

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

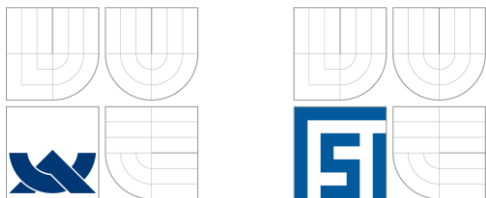
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. David Nečas**
Author

Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: Ing. David Nečas
Author

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Supervisor

Brno 2014



OBSAH

1 Úvod	6
2 Vymezení řešené problematiky a předběžného cíle disertační práce	7
3 Shrnutí současného stavu poznání	10
3.1 Fluorescenční mikroskopie v tribologii	10
3.2 Analýza tloušťky mazací vrstvy v náhradách kyčelního kloubu	25
3.3 Analýza mazání kloubních náhrad z hlediska modelové kapaliny	44
4 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše ..	50
5 Vymezení cíle disertační práce a návrh způsobu jejího řešení	52
5.1 Cíl disertační práce	52
5.2 Vědecká otázka	52
5.3 Pracovní hypotéza	52
5.4 Návrh způsobu řešení	53
6 Současný stav řešení disertační práce	56
6.1 Modifikace experimentální aparatury	56
6.2 Odladění měřicí metody pro stanovení tloušťky filmu	57
6.3 Předběžné výsledky pozorování adsorpce proteinů	60
6.4 Studijní stáž	61
7 Závěr	64
8 Literatura	65
Seznam obrázků	69
Seznam tabulek	71
Seznam použitých zkratk	72
Seznam použitých symbolů	73

1 ÚVOD

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá studiem formování mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu. Motivace je v tomto případě zřejmá. Vzhledem k neustále se zrychlujícímu tempu života, nárůstu počtu úrazů a v neposlední řadě prodlužování průměrné délky života a tedy i jeho aktivní části, je náhrada kyčelního kloubu jednou z nejčastěji prováděných operací. Na základě statistik potom patří zavedení totální endoprotézy mezi nejúspěšnější ortopedické zákroky moderní medicíny. S tímto zákrokem je však spojen i jeden poměrně zásadní problém a to je omezená životnost kloubních náhrad. Z toho důvodu nastává po určitém čase nutnost provádět takzvané revizní operace, což výrazně snižuje životní komfort, zejména pak u mladých pacientů.

Z hlediska ztráty funkce náhrady hrají velmi podstatnou roli tribologické procesy. V přirozeném lidském kloubu se nachází kloubní chrupavka, která odděluje povrchy kostí a díky své poddajnosti a neustálé hydrataci vytváří téměř ideální mazací podmínky. U umělých kloubů je však situace zcela odlišná. Vzhledem k absenci chrupavky dochází ke kontaktu tvrdých povrchů náhrady, což vede ke značnému zhoršení mazání a tedy zvýšení opotřebení. Přitom se doposud nepodařilo plně objasnit proces formování mazacího filmu mezi komponentami náhrady.

Pokud by taková studie byla úspěšná, mohla by vést k určitým změnám v oblasti vývoje kloubních náhrad z hlediska jejich konstrukce či geometrie a mohla by tak být prodloužena jejich životnost, což by v důsledku vedlo k výrazné redukci potřeby reoperací a tím k úspoře finančních nákladů i zpříjemnění života pacientů.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z historického hlediska došlo k nejvýraznějšímu pokroku v oblasti totální náhrady kyčelního kloubu v posledních 50 letech. Vůbec první pokusy pak proběhly již v polovině 19. století, přičemž však použité materiály a postupy byly na nesrovnatelně nižší úrovni než dnes. První umělé klouby byly vyrobeny ze dřeva, přibližně o 50 let později byla pak pro jejich výrobu použita slonovina. Za přelomový se považuje rok 1962, kdy britský ortoped John Charnley poprvé využil polyetylen s mimořádně vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE) jako materiál kloubní jamky. Jednalo se o zásadní pokrok, který předurčil směr, kterým se bude vývoj dále ubírat. Mezi další významné objevy pak patří zejména zavedení slitiny CoCrMo a vývoj různých keramických materiálů, které při vzájemné interakci vykazují nejnižší míru opotřebení [1].

Jak již bylo zmíněno v úvodu tohoto pojednání, počet operací náhrady kyčelního kloubu neustále narůstá. Dle údajů Švédského artroplastického registru, který je považován za jednu z nejkomplexnějších databází z hlediska relevance dat, došlo ve Švédsku mezi lety 1967 a 2010 k nárůstu počtu operací z 6 na 15 935 ročně. Dalším závažným údajem je nárůst počtu operací u mladých pacientů do 50 let věku. Zde se počet operací zvýšil z 501 v roce 2000 na 863 v roce 2010 [2].

Důležitým pozorovaným faktorem je životnost náhrad. Více než deset procent všech provedených zákroků totiž představují jejich re-operace. Životnost náhrady je v průměru odhadována na 15 – 20 let, u mladších pacientů se však tato hodnota razantně snižuje, konkrétně ve 28 % případů dochází k revizní operaci do deseti let od zavedení implantátu [3]. Jedním z parametrů, který značně ovlivňuje životnost náhrady je míra opotřebení. Uvolněné částice se dostávají do kontaktu s okolní tkání, mohou vést k zánětům a úbytku kostní tkáně, přičemž konečným důsledkem je uvolnění náhrady a ztráta její funkce (tento degradační proces se nazývá osteolýza a je příčinou více než 50 % revizních operací) [2]. Počet uvolněných opotřebovaných částic je dán především zvolenou materiálovou kombinací implantovaných komponent. Přibližné hodnoty objemového opotřebení různých materiálů za 1 rok jsou shrnuty v tab. 1.

Materiál jamky-hlavice	Objemové opotřebení [mm ³ /rok]
UHMWPE-kov	55,7
Keramika-kov	17,1
Kov-kov	0,9
Keramika-keramika	0,004

Tab. 1: Opotřebení komponent kloubní náhrady z hlediska použitých materiálů [4].

Vzhledem k uvedeným informacím se poměrně dlouhou dobu většina publikací v oblasti biotribologie kyčelního kloubu zabývala právě kvantifikací míry opotřebení [5] - [11]. V souvislosti s prakticky nerealizovatelným měřením in vivo (v těle pacienta) tak byly autory publikací navrženy různé simulátory, metodiky vyhodnocení dat a podobně. Aplikovat poznatky dané kvantifikací opotřebení při snaze zlepšit

charakteristiky náhrad je však mimořádně komplikovaná záležitost. Snížení opotřebení je do značné míry podmíněno vývojem nových materiálů, a proto tato problematika spadá spíše do oblasti materiálového inženýrství než do základního tribologického výzkumu.

V posledních přibližně 10 letech se proto studie stále častěji zabývají samotným procesem mazání, respektive formováním mazacího filmu mezi komponentami náhrady, přičemž objasnění fundamentálních jevů může výrazně přispět k dalšímu vývoji v oblasti totálních endoprotéz.

Důležitým aspektem při snaze analyzovat utvářený mazací film, je zvolená experimentální metoda. Jak bude podrobně komentováno v další části pojednání, teoretické predikce prakticky postrádají význam, jelikož biologická maziva, jako je synoviální kapalina či hovězí sérum jsou newtonské kapaliny, přičemž postihnout proměnnou viskozitu není triviální, přesto však, tento problém je řešitelný. Zásadní komplikace však spočívá ve výrazném ovlivnění tloušťky mazacího filmu v důsledku adsorpce proteinů – tento jev je numericky prakticky neřešitelný.

Při volbě metody je třeba nejprve definovat předpokládané pozorované a měřené proměnné. Při snaze postihnout reálnou situaci se předpokládá studium kontaktu in situ. S ohledem na téma disertační práce bude třeba zejména:

- Kvantifikovat tloušťku vrstvy maziva v řádu desítek nanometrů až jednotek mikrometrů.
- Pozorovat adsorpci jednotlivých komponent modelové kapaliny.

Publikace se pak stále častěji zabývají i reálnou možností náhrady kloubní chrupavky, která v přirozeném kloubu pomáhá dosáhnout optimálních mazacích podmínek. Z hlediska potenciálu dalšího výzkumu je pak tedy žádoucí, aby zvolená měřicí metoda dokázala analyzovat i materiály podobné kloubní chrupavce, které se vyznačují zejména:

- Nízkým modulem pružnosti.
- Velmi nízkou odrazivostí.
- Nízkou elektrickou vodivostí.

Rozsáhlý přehled experimentálních metod pro analýzu elastohydrodynamického (EHD) kontaktu přinesl Spikes v publikaci [12], který tak výrazně rozšířil stručnější přehled publikovaný dříve [13]. Z uvedených informací plyne, že nejpoužívanější metody se dělí do dvou kategorií. Jsou to metody optické (optická interferometrie, fluorescenční mikroskopie) a dále metody elektrické (založené na změně elektrické kapacity a elektrického odporu).

Jedním z aspektů využitelnosti dané metody je typ analyzovaného kontaktu (tuhý, poddajný). Problematické je pak zejména studium kontaktů poddajných [14], [15]. Samotná podstata poddajného kontaktu totiž prakticky vylučuje, případně velmi výrazně limituje užití většiny výše uvedených konvenčně využívaných metod. Nejvýznamnější omezující faktory jsou pak důsledkem následujících skutečností [13], [16]:

- Tloušťka filmu v poddajném kontaktu se pohybuje v řádu od jednotek nanometrů do desítek mikrometrů.
- Poddajné kontakty jsou často tvořeny polymery a tkáňovými materiály, které se vyznačují špatnou odrazivostí a nízkou elektrickou vodivostí.
- Nanášení povlaků (za účelem zvýšení odrazivosti) je obtížné - tenké vrstvy povlaků bývají náchylné k opotřebení (nanesená vrstva navíc ovlivňuje tuhost základního materiálu).

- Poddajné materiály se také často vyznačují vysokou drsností povrchů a jejich obtížnou leštitelností.

Na základě zvážení všech aspektů měření tak bylo rozhodnuto o využití metody založené na principu fluorescenční mikroskopie, která je „imunní“ vůči všem uvedeným limitacím. Tato metoda totiž na rozdíl od optické interferometrie, která definuje tloušťku vrstvy mezi povrchy na základě interferogramů (je tedy silně závislá na odrazivosti), určuje množství maziva v kontaktu na základě intenzity emitovaného záření a není proto nikterak omezena měřicím rozsahem, odrazivostí, vodivostí, ani drsností povrchů [12], [17].

Tato metoda doposud nebyla na pracovišti řešitele využívána, přitom její implementace je z hlediska tvorby disertační práce zásadní a předpokládá se, že její zavedení bude i z časového hlediska velice náročné. Proto je jejímu využití v oblasti tribologických analýz věnována první část současného stavu poznání a její odladění je jedním z podstatných cílů disertační práce.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Fluorescenční mikroskopie v tribologii

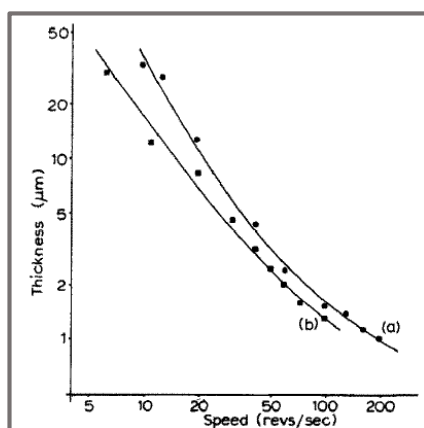
[18] SMART, A. E. a R. A. J. FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*. 1974, vol. 29, issue 1, s. 41-47. DOI: 10.1016/0043-1648(74)90132-x.

Tato práce jako první využívá pro analýzu tloušťky vrstvy maziva optickou metodu založenou na principu fluorescenční mikroskopie indukované rtuťovou lampou. Autoři měřili tenké mazací filmy látek, které emitovaly záření buď přirozeně, případně do nich bylo přimícháno fluorescenční barvivo. Tloušťka filmu byla měřena na povrchu rotujícího válce, přičemž poznatky získané z experimentů lze přenést na problematiku hladování valivých ložisek. Rozsah měřené tloušťky závisí do značné míry jednak na použitém optickém vybavení a dále na intenzitě fluorescence.

Výsledky

Výsledky předběžných testů jsou znázorněny na obr. 1. Při vysokých rychlostech je tloušťka povrchového filmu na rotujícím válci nedostatečná na to, aby mohlo být mazivo vneseno do kontaktu. Citlivost metody umožňuje dle autorů měření tloušťky v rozsahu 0,1 μm až 1 mm, v závislosti na přesnosti kalibrace. V této práci byly pak konkrétně měřeny hodnoty v rozsahu přibližně 0,8 – 35 μm při otáčkách rotujícího válce 7 – 200 s^{-1} .

Pro běžný olej využívaný v plynových turbínách (Castrol 3C), byla při teplotě 20 $^{\circ}\text{C}$ na válcové ploše o průměru 73,5 mm při otáčkách 10 000 min^{-1} naměřena tloušťka filmu 1 μm . Film vnesený do kontaktu je však při těchto hodnotách příliš tenký a není tak možné zajistit dostatečné oddělení povrchů mazací vrstvou, přičemž dochází k hladování kontaktu. Autoři dále využili fotonásobič, s jehož pomocí byly detekovány určité fluktuace filmu spojené s rychlostí válce. Vyšetření pomocí stroboskopie ukázalo, že tyto fluktuace jsou spojeny se vznikem kapek maziva v důsledku působení odstředivé síly.



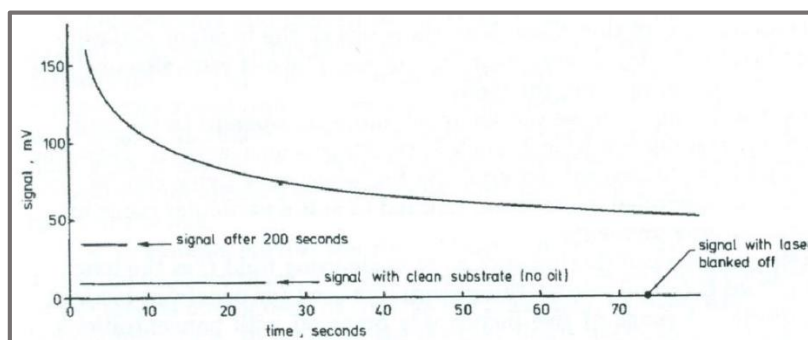
Obr. 1: Průběh tloušťky filmu na povrchu válce v závislosti na otáčkách (s^{-1}) pro olej Castrol 3C. a) Ocelový povrch, b) pochromovaný povrch válcové plochy [18].

Závěr

Tato práce jako vůbec první využívá jevu fluorescence v oblasti tribologického výzkumu a její přínos je tak zcela neoddiskutovatelný zejména pak s ohledem na datování vzniku článku, kdy vybavení dostupné pro měření bylo do značné míry omezené. Z toho plynou určité limity studie, například již uvedený rozsah měřených hodnot. Autoři se zabývali měřením tloušťky maziva, které ulpívá na povrchu rotujícího válce. Tloušťka vrstvy přímo v kontaktu dvou povrchů v tomto případě analyzována nebyla.

[19] **FORD, R. A. J. a C. A. FOORD.** Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films. *Wear.* 1978, vol. 51, issue 2, s. 289-297. DOI: 10.1016/0043-1648(78)90267-3.

Práce navazuje na předchozí publikaci, přičemž autoři využili pro excitaci místo rtuťové lampy laser o vlnové délce $\lambda = 441,6$ nm. Důsledkem využití laseru je zejména jednodušší návrh měřicí aparatury. Při použití rtuťové výbojky bylo nutné používat Cassegrainova zrcadla, která značně limitovala modifikaci zařízení. Laser dále umožňuje provádět měření při větších pracovních vzdálenostech, což vede k rozšíření aplikačních možností. Publikace se do značné míry zabývá rozdíly při excitaci modrým laserem a UV lampou. Autoři také, mimo jiné, jako první diskutují problém vysvěcování barviva (obr. 2), ke kterému docházelo po určitém čase i u těch nejstabilnějších substancí. Tento problém byl částečně vyřešen například pulzním spouštěním laseru, či zeslabením jeho výkonu, kdy však logicky docházelo k poklesu intenzity emitované fluorescence.



Obr. 2: Pokles intenzity fluorescence oleje pro plynové turbíny s narůstajícím časem [19].

Výsledky

Publikace se zaměřuje na metodu jako takovou, přičemž neobsahuje mnoho kvantitativních výsledků. Poznatky jsou shrnuty do několika následujících bodů:

- Podmínkou možnosti excitace pomocí UV lampy je využití optických prvků vyrobených z křemíkového skla, oproti tomu, v případě laseru je možné použít sklo standardní.
- Laser je při dané vlnové délce stabilnější a jeho výkon je mnohem vyšší, proto vede k výraznější emisi záření. Z toho důvodu postačí při excitaci laserem menší množství fluorescenčního barviva, jehož cena je v některých případech velmi vysoká.

- Některé oleje fluoreskují přirozeně, tj. není třeba do nich přidávat fluorescenční barvivo. V takovém případě je pozorována hloubka, do jaké je osvětlení dané vnějším světelným zdrojem schopné prostoupit. Takzvaná penetrace excitace je opět znatelně lepší, pokud je olej excitován laserem.
- Další výhodou laseru je jeho viditelnost (oproti UV lampě), což zjednodušuje konfiguraci optické sestavy a využití ochranných pomůcek.

Závěr

Publikace je s ohledem na dobu svého vzniku velice kvalitní a poskytuje velmi dobrý teoretický základ, pokud jde o využití laserem indukované fluorescence. Mnoho autorů později uvedených článků uvažuje tuto práci jako pilotní, pokud jde o využití uvedené metody v oblasti tribologického výzkumu. Mírné negativum lze shledat právě v absenci většího množství kvantitativních výsledků. S ohledem na to, že hlavní autor se podílel i na předchozí studii, by bylo velice přínosné například srovnání hodnot s výsledky uvedenými v práci [1].

[20] **GABELLI, A. a G. POLL.** Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part I: Lubricant Film Modeling. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 280-. DOI: 10.1115/1.2920885.

[13] **POLL, G. a A. GABELLI.** Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II: A new measuring principle for lubricant film thickness. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 290.

[21] **POLL, G., A. GABELLI, P. G. BINNINGTON a J. QU.** Dynamic Mapping of Rotary Lip Seal Lubricant Films by Fluorescent Image Processing. In: NAU, B. *Fluid sealing*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c1992. ISBN 079231669x.

V následujících letech byla fluorescenční metoda využita při studiu reálných aplikací. Autoři Gabelli a Poll se v pracích [20], [13] zabývají analýzou mazacího filmu v kontaktu hřídele a rotačních břitových těsnění. Základním úkolem tohoto elastomerového elementu je zajistit spolehlivost systému, konkrétně pak oddělit některé prostory a zabránit tak jejich kontaminaci mazivem, dále zabránit úniku maziva a také předcházet jeho samotnému znečištění. V první části práce [20] se autoři zabývají tvorbou numerického modelu predikce tloušťky filmu v závislosti na unášivé rychlosti, přičemž berou v úvahu viskoelastický charakter chování elastomeru. Při tvorbě predikcí byly využity snímky získané pomocí fluorescence indukované halogenovou lampou.

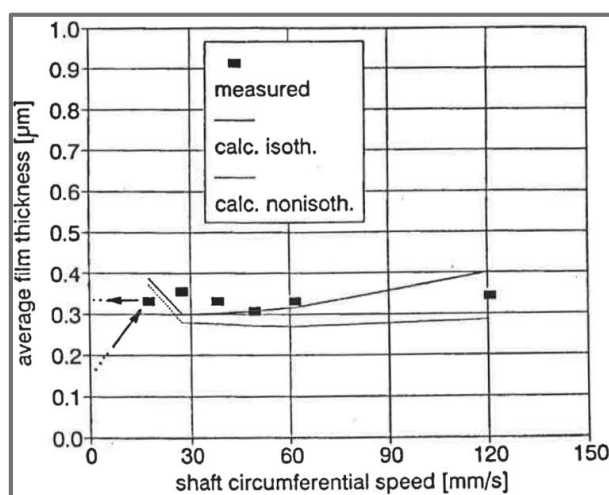
Druhá část práce [13] obecně pojednává o experimentálních metodách, jejich principech a možnostech, kdy detailně rozebírá metodu založenou na změně elektrického odporu, pomocí které verifikuje numerický model. Autorům se podařilo dosáhnout velmi dobré shody v celém rozsahu uvažovaných rychlostí (do 250 otáček za minutu).

Na tuto dvoudílnou studii navazuje skupina autorů Poll a kol. v práci [21]. Autoři se tentokrát zabývají využitím fluorescenční metody přímo pro kvantifikaci tloušťky filmu, jelikož elektrická metoda využitá v předchozí studii má jistá omezení, pokud jde o minimální otáčky hřídele, respektive rozlišitelnost.

V první fázi této studie bylo sestrojeno kalibrační zařízení, které bylo využito pro optimalizaci optického systému a stanovení ideální koncentrace fluorescenčního barviva. Následně byla studována korelace tloušťky filmu a třecího momentu v radiálním břitovém těsnění.

Výsledky

S ohledem na téma disertační práce, ke které se vztahuje toto pojednání, není třeba detailně rozebírat výsledky uvedené dvoudílné studie [20], [13]. Zajímavá je však z tohoto pohledu publikace [21]. V této práci se s využitím fluorescenční metody podařilo dosáhnout celkového měřicího rozsahu 0 - 10 μm s rozlišením 0,02 μm . Výsledky naměřené v kontaktu dvou těles jsou znázorněny na obr. 3. Autoři konstatují, že metoda se jeví jako ideální pro studium podobných typů kontaktů (myšleny poddajné kontakty), přičemž pro další výzkum doporučují zaměřit se na vyšší rychlosti pro možnost simulace reálných provozních podmínek.

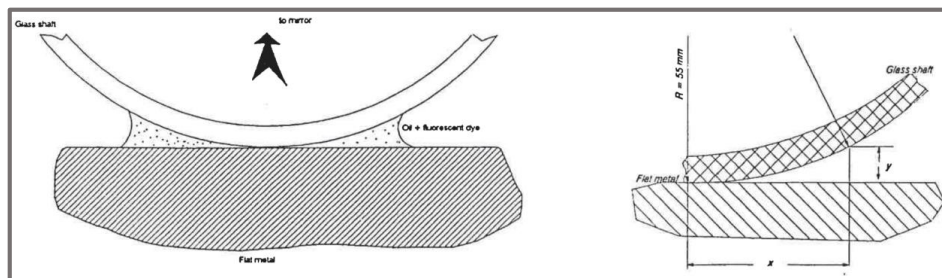


Obr. 3: Závislost tloušťky filmu na otáčkách hřídele [21].

Diskutován je také způsob kalibrace. V této studii byla pro kalibraci využita konfigurace ocelová deska/skleněná hřídel, obr. 4, přičemž tloušťka filmu odpovídající dané intenzitě je dána vztahem (1). Následně přitom byla kvantifikována tloušťka maziva mezi skleněnou hřídelí a břitovým těsněním. Dle konstatování autorů by bylo do budoucna vhodnější v podobných případech skleněnou hřídel nahradit hřídelí ocelovou s optickým průzorem, jelikož tribologické charakteristiky skla a oceli jsou odlišné.

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (1)$$

- ... y ... Tloušťka filmu v dané vzdálenosti od středu kontaktu
- ... x ... Daná vzdálenost od středu kontaktu
- ... R ... Poloměr hřídele



Obr. 4: Kalibrační konfigurace využitá pro stanovení tloušťky filmu [21].

Závěr:

Autorům se pomocí fluorescenční metody podařilo dosáhnout velice dobré rozlišitelnosti při relativně velkém měřicím rozsahu. Nevyřešenou otázkou však zůstává již diskutovaný problém kalibrace, kdy autoři sice doporučují nahrazení skleněné hřídele, nicméně samotné provedení jimi navrhovaného řešení (ocelová hřídel s optickým průzorem) je velmi obtížně realizovatelné. Naměřené hodnoty však i přes tento nedostatek dobře korelují s predikovanými daty a výsledky tak lze považovat za relevantní.

[22] SUGIMURA, J., M. HASHIMOTO, Y. YAMAMOTO. Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope. *Tribology Series*, 2000, 38: 609-617.

Sugimura a kol. [22] jako první využili fluorescenční metodu při analýze kontaktu v experimentální konfiguraci ball-on-disc (ocelová kulička-skleněný disk). Barvivo přidané do maziva bylo excitováno pomocí rtuťové lampy a záznam kontaktní oblasti byl snímán pomocí CCD kamery. Autorům se podařilo detekovat mazací film tenčí než 30 nm.

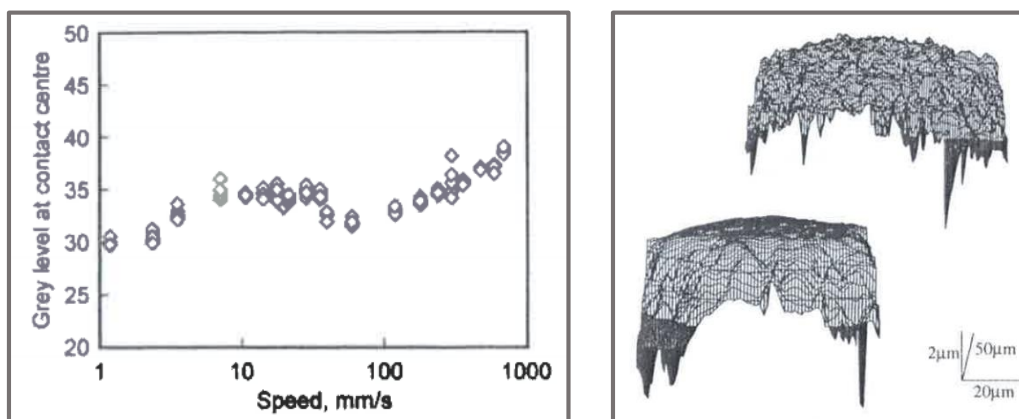
V práci jsou diskutovány zejména dva problémy, které limitují využití fluorescenční metody při měření. Jedním z těchto problémů je vznikající interference, která naprosto zásadně ovlivňuje přesnost kalibrace. Další komplikací byl potom výrazný zkreslující efekt pozadí, který se nakonec nepodařilo plně eliminovat, nicméně ovlivnění výsledků se ukázalo být zanedbatelné.

Jako maziva byly využity minerální oleje H60 a P500. Přestože je známo, že minerální oleje při excitaci v UV oblasti sami o sobě emitují záření ve viditelném spektru, je obvykle tato emise velmi slabá. Proto byl do olejů přidán pyren, konkrétně pak v relativně vysoké koncentraci 2 hm%. Experimenty byly provedeny za podmínky čistého prokluzu, kdy kulička představovala stacionární komponentu, a skleněný disk rotoval.

Výsledky

V publikaci jsou analyzovány dva typy kontaktů s ohledem na drsnost povrchu kuličky (konfigurace ball-on-disc zůstává stejná). V prvním analyzovaném případě je maximální drsnost povrchu kuličky $R_{\max} = 80$ nm, povrch je tedy velmi hladký. Kontakt byl zatížen radiální silou o velikosti $F_1 = 2,5$ N, experiment probíhal za teploty $T_1 = 28$ °C při rozsahu skluzových rychlostí $v_{t1} = 2,4 - 350$ mm/s. Mazivem je olej P500. Naměřené hodnoty jsou znázorněny na obr. 5 vlevo.

Ve druhém případě je střední kvadratická odchylka drsnosti kuličky v důsledku otryskání povrchu $R_{\text{rms}} = 1 \mu\text{m}$, povrch je tedy výrazně drsnější. Kontakt byl mazán olejem H60 a experimenty byly provedeny pro dvě různá zatížení $F_2 = 0,9$, respektive $3,6 \text{ N}$ při rychlosti $v_{t2} = 53 \text{ mm/s}$. Měření probíhalo při okolní teplotě $T_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Publikované výsledky jsou v tomto případě pouze kvalitativní, viz obr. 5 vpravo.



Obr. 5: Vlevo: Naměřené hodnoty stupňů šedi v závislosti na skluzové rychlosti. Vpravo: Profil mazacího filmu, vlevo dole – před experimentem, vpravo nahoře – po 30 s experimentu (čistý prokluz, 53 mm/s , $3,6 \text{ N}$) [22].

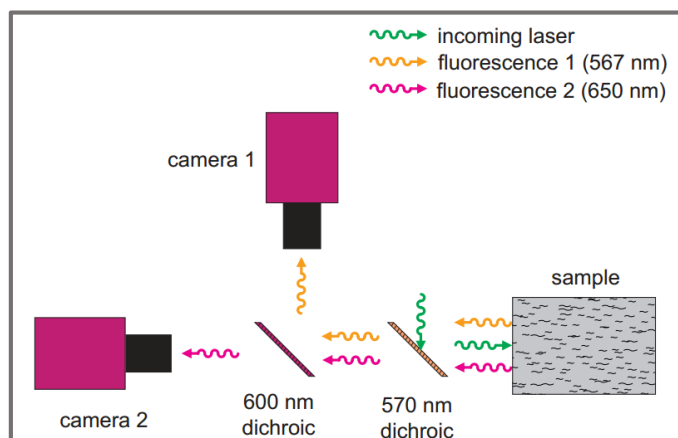
Závěr

Článek se podrobně zabývá nejen samotným principem měření, ale také problémy, které jsou s fluorescenční metodou spojeny, což dosud ostatní autoři do značné míry opomíjeli. Výrazným problémem je zejména již zmíněná interference, která je v tomto případě silně nežádoucí, jelikož znemožňuje provést přesnou kalibraci. Autoři tento problém vyřešili tím, že při pořízení kalibračního snímku nahradili ocelovou kuličku skleněnou čočkou. Tento přístup se jeví jako jednoduchý a velmi efektivní, nicméně, jak je poukázováno v pozdějších publikacích, rozdílné optické vlastnosti prvků využitých při kalibraci a při samotném měření mohou vést k nepřesnostem v naměřených datech, je proto třeba v tomto případě postupovat obezřetně.

[23] **HIDROVO, C. H. a D. P. HART.** Dual Emission Laser Induced Fluorescence technique (DELIF) for oil film thickness and temperature measurement. In: *FED*. 2000, s. 175-182. ISSN 0888-8116.

[24] **HIDROVO, C. H. a D. P. HART.** Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2001-04-01, vol. 12, issue 4, s. 467-477. DOI: 10.1088/0957-0233/12/4/310.

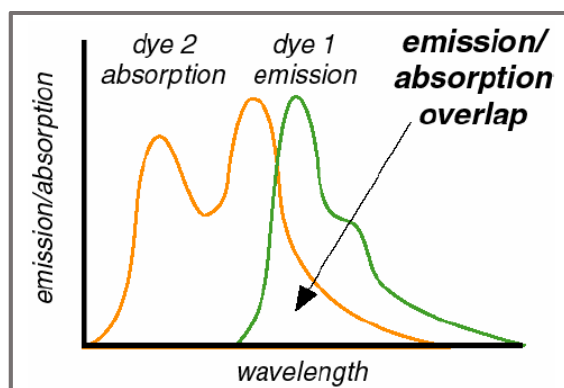
Významný posun při aplikaci fluorescenční metody přinesli ve svých pracích Hidrovo a Hart [23], [24]. První z uvedených publikací zavádí pojem laserem indukované fluorescence s duální emisí (DELIF), obr. 6. V tomto případě jsou do maziva přidána dvě různá fluorescenční barviva, která mají podobnou vlnovou délku excitace, ale rozdílnou vlnovou emise. Metoda tak využívá poměrného principu, který umožňuje provést normalizaci emise jednoho barviva oproti emisi druhého barviva a dochází tak k eliminaci nežádoucích jevů jako je například fluktuace intenzity osvětlení, či zkreslení pozadí zmiňované v práci [23].



Obr. 6: Schéma laserem indukované fluorescence s duální emisí [23].

V práci [23] je také diskutován přístup reabsorpce emise laserem indukované fluorescence (ERLIF), viz obr. 7. Tento jev nastává v případě, kdy vlnová délka emise barviva 2 je blízká vlnové délce excitace barviva 1, či naopak. V tom případě nastávají dva jevy. Barvivo 1 je oproti excitaci vnějším zdrojem navíc excitováno emitovaným zářením barviva 2. Tento jev je možné zanedbat, jelikož emise barviva 2 je ve srovnání s vnějším zdrojem nepodstatná. Výraznější problém je ten, že intenzita emise barviva 2 je ponížena o hodnotu, která se dále podílí na excitaci barviva 1. Tento efekt je třeba brát v úvahu při vyhodnocení.

Druhá z uvedených publikací [24] dokládá, že využití tohoto poměrného principu přináší velmi přesné měření tloušťky filmu, jelikož jsou minimalizovány chyby způsobené změnami v intenzitě osvětlení a odrazivosti povrchů.

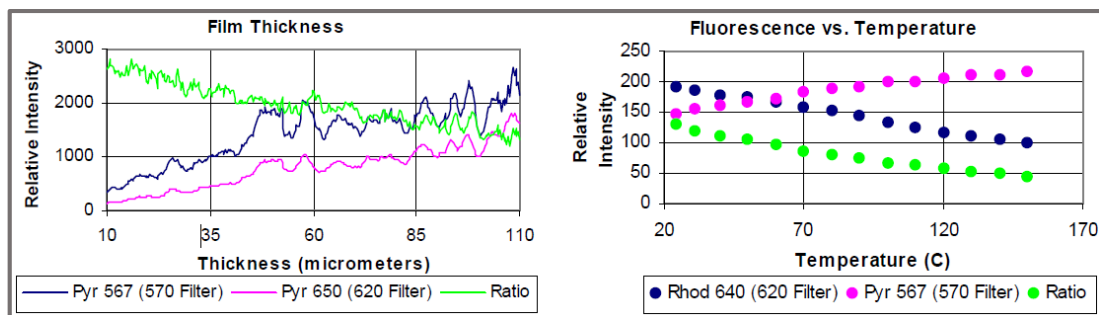


Obr. 7: Reabsorpce emise [24].

Výsledky

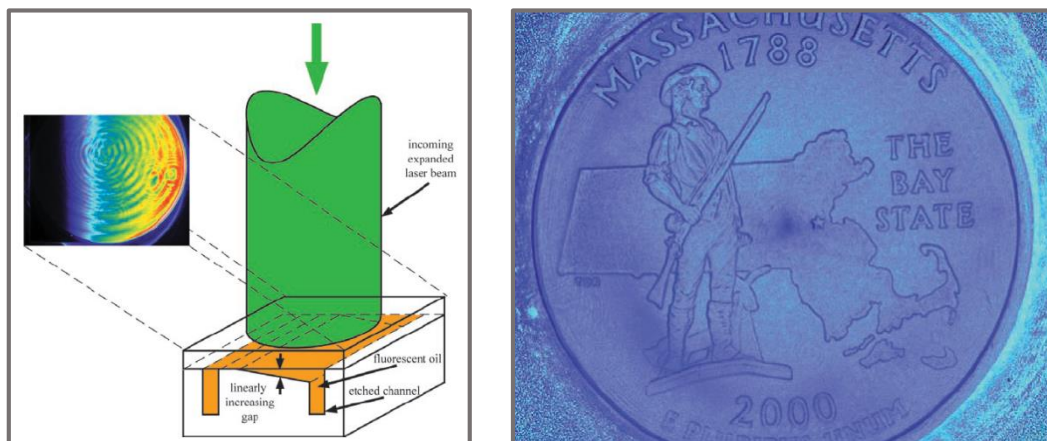
V první z výše uvedených prací [23] je pro stanovení tloušťky filmu využito optického systému tvořeného dvěma deskami, přičemž na jednom konci je mezi desky vložena podložka o tloušťce 110 μm , čímž vznikne klínovitá mezera o známé geometrii. Při tomto experimentu jsou do oleje přidána dvě fluorescenční barviva, Pyrromethene 567 a Pyrromethene 650, s cílem nalézt závislost intenzity fluorescence pro dané mazivo na tloušťce. Dále je také stanovena závislost intenzity na teplotě maziva, kdy je Pyrromethene 650 nahrazen barvivem Rhodamine 640. Výsledky obou

experimentů jsou znázorněny na obr. 8, přičemž samotné vyhodnocení není zcela triviální a pro plné pochopení významu výsledků je třeba nastudovat matematickou interpretaci jevu reabsorpce, která je v publikaci detailně popsána.

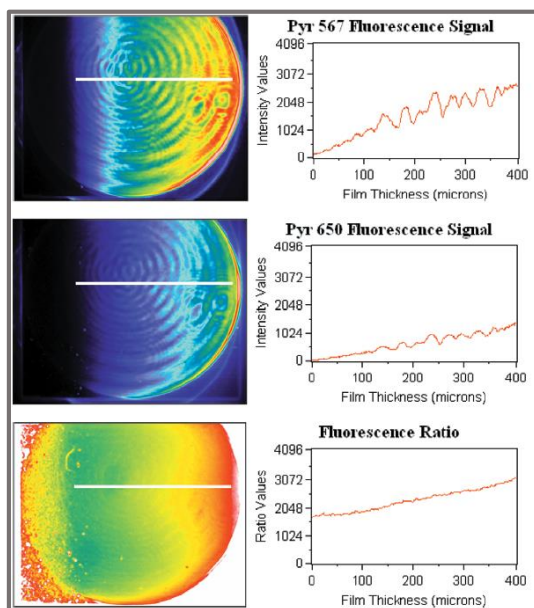


Obr. 8: Výsledná závislost relativní intenzity fluorescence na tloušťce filmu a teplotě [23].

V druhé publikaci [24] autoři opět využívají klínovité mezery o známé geometrii, kdy jsou navíc na jejich okrajích zhotoveny dva kanály, obr. 9 vlevo. Tato konfigurace slouží pro vytvoření kalibračního snímku. Do oleje jsou opět přidána barviva Pyromethene 567 a Pyromethene 650. Aplikací metody se autorům podařilo měřit tloušťku filmu v rozsahu 5 – 400 μm s chybou do 1 %. Tento rozsah tlouštěk filmu je označen jako optický tlustý systém, kdy má využití reabsorpce svoje opodstatnění, obr. 10. U opticky tenkých systémů, 0 – 5 μm , je poměr intenzit konstantní a reabsorpce je naprosto zanedbatelná. Práce dále obsahuje část zaměřenou na pozorování topografie povrchu s využitím duální emise, kdy je pomocí přístupu ERLIF zmapována topografie mince, obr. 9 vpravo.



Obr. 9: Vlevo: Kalibrační konfigurace pro měření s využitím ERLIF. Vpravo: Topografie mince získaná pomocí aplikace ERLIF [24].



Obr. 10: Vytvoření kalibračního snímku s využitím přístupu ERLIF [24].

Závěr

Tyto dvě práce přispěly k výraznému pokroku, pokud jde o využití metody fluorescenční mikroskopie v oblasti tribologie. Oba přístupy (DELIF, ERLIF) významně zpřesňují dosažené výsledky. Možnost využití metody při analýze topografie povrchů se rovněž jeví jako poměrně zajímavá.

Přesto by zejména proces vyhodnocení poměrného přístupu ve vztahu k tloušťce filmu mohl být popsán lépe. Je proto velmi důležité, že autoři doplnili teoretické poznatky i matematickým aparátem popisujícím jednotlivé nastalé jevy, jelikož interpretace výsledků získaných pomocí těchto přístupů není triviální.

[25] **AUSHIMA, A.** In lubro 3D measurement of oil film thickness at the interface between tool and workpiece in sheet drawing using a fluorescence microscope. *Tribology International*. 2005, vol. 38, issue 2, s. 105-112. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.04.006.

[26] **AZUSHIMA, A.** In situ 3D measurement of lubrication behavior at interface between tool and workpiece by direct fluorescence observation technique. *Wear*. 2006, vol. 260, issue 3, s. 243-248. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.053.

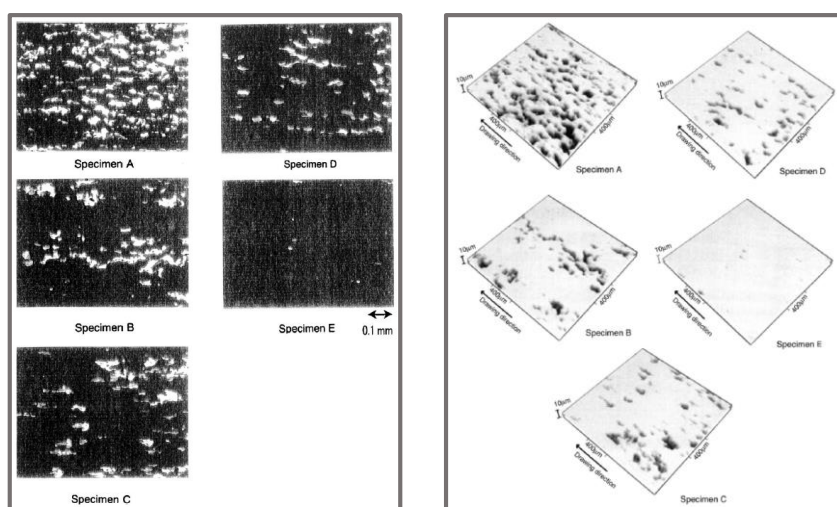
Azushima se ve svých pracích [25], [26] zaměřil na pozorování tloušťky filmu na rozhraní nástroj/obrobek při procesu tažení plechů. Dále se také zabýval topografií tažených profilů. K excitaci barviva byla jako již v některých předešlých pracích využita UV lampa. Díky posunu ve vlnových délkách excitace a emise se emitované záření stane viditelným, přičemž děj byl zaznamenáván pomocí CCD kamery.

Výsledky

První z uvedených článků [25] analyzuje 5 vzorků (A, B, C, D, E) vyrobených ze stejného materiálu. Jedná se žíhaný hliníkový plech s označením A1100, tloušťky 1 mm, šířky 10 mm a délky 500 mm. Všechny vzorky byly následně válcováním

ztenčeny o 1% – 5%. Jelikož bylo při válcování využito oleje s abrazivními částicemi, došlo ke snížení hodnoty drsnosti povrchu z 3,5 μm až na 0,2 μm . Vzorky byly poté taženy rychlostí 0,14 mm/s při okolní teplotě 20 °C. Velikost působícího tlaku nástroje na stěnu byla 50 MPa.

Pro možnost pozorování tloušťky filmu byl do použitého parafinového oleje přidán thiofen (1 hm%) a kyselina olejová (5 hm%). Snížením drsnosti došlo k nárůstu poměru reálné plochy kontaktu mezi vzorkem a nástrojem. Tento jev je jasně patrný na obr. 11 vlevo, kde světlá místa představují přítomnost maziva, tmavá místa jsou ta, kde je tloušťka nulová, tedy kde dochází ke kontaktu mezi povrchy nástroje a obrobku. Tyto snímky byly pořízeny pro všechny vzorky v průběhu procesu tažení. Následně byly z intenzitních snímků vyhodnoceny negativní profily povrchů (obr. 11 vpravo) a byla stanovena průměrná tloušťka mazacího filmu v průběhu operace. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

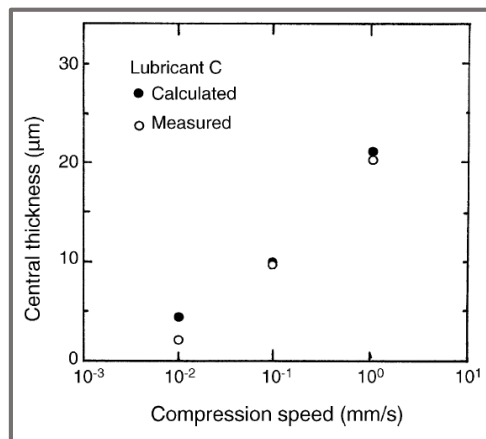


Obr. 11: Studované vzorky. Vlevo: snímky získané při procesu tažení. Vpravo: vyhodnocené negativní profily povrchů [25].

Vzorek	Průměrná tloušťka filmu [μm]
A	2,8
B	1,1
C	1,0
D	0,7
E	0,2

Tab. 2: Průměrné hodnoty tloušťky filmu pro studované vzorky [25].

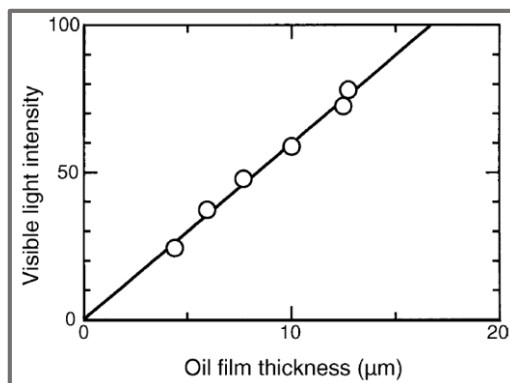
Navazující publikace [26] se opět zabývá analýzou tloušťky filmu na rozhraní nástroje a obrobku a porovnává naměřené hodnoty s teoretickými predikcemi. V této práci jsou využita tři různá maziva, označená jako A, B, C o viskozitách 1 Pa·s, 5 Pa·s, 20 Pa·s. Jak ukazuje obr. 12, bylo dosaženo velmi dobré shody naměřených hodnot s predikovanými.



Obr. 12: Porovnání naměřené a predikované tloušťky maziva v závislosti na rychlosti tažení [26].

Závěr

Obě uvedené publikace jsou si do značné míry velice podobné, liší se prakticky pouze v realizovaných experimentech. Práce jsou inovativní zejména uvedeným způsobem kalibrace, která probíhá následujícím způsobem: nejprve jsou zváženy dvě skleněné tabule. Následně je mezi tabule, které jsou pozorovány pomocí fluorescenčního mikroskopu a snímány pomocí kamery, postupně přidáváno obarvené mazivo, přičemž se provede opětovné vážení, kdy je na základě nárůstu hmotnosti a znalosti rozměru tabulí a hustoty maziva stanovena tloušťka vrstvy maziva mezi deskami. Proces se několikrát opakuje pro stanovení závislosti intenzity záření na tloušťce filmu, obr. 13. Tento způsob je velice průkazný a nemalé množství autorů se na uvedené publikace odkazuje při demonstraci lineární závislosti intenzity záření na tloušťce vrstvy maziva.



Obr. 13: Výsledky provedené kalibrace [25], [26].

- [17] REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. *Tribology Letters*. 2010, vol. 38, issue 3, s. 207-215. DOI: 10.1007/s11249-010-9592-6.

V posledních letech se aplikací fluorescenční metody v tribologii zabývá zejména tribologická výzkumná skupina na Imperial College v Londýně. V této práci se

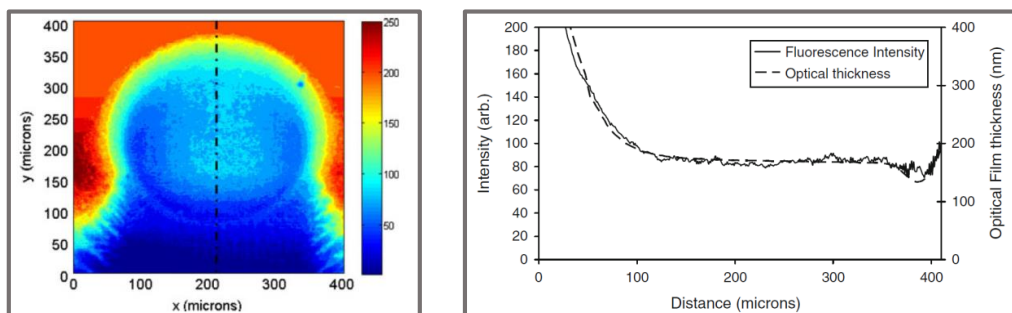
Reddyhoff a kol. zaměřili na oblast pozorování formování maziva v kontaktu. Znalost charakteru formování maziva může výrazně pomoci při predikci součinitele tření mezi povrchy, kdy je obecně známo, že právě tření určuje ztrátu výkonu v kontaktu a v konečném důsledku tedy účinnost kontaktní dvojice.

Kontakt byl v tomto případě tvořen ocelovou kuličkou a skleněným diskem, přičemž pozorování formování maziva probíhalo za podmínek plného zaplavení. Excitačním zdrojem byl laser o vlnové délce $\lambda = 532$ nm. Nejprve byla provedena verifikace samotné měřicí metody, kdy byla analyzována tloušťka mazacího filmu. Získané výsledky byly porovnány s těmi získanými pomocí optické interferometrie při stejných podmínkách experimentů.

Samotné pozorování toku maziva probíhalo za postupného přidávání maziva dopovaného fluorescenčním barvivem do dráhy kontaktu, přičemž byla pomocí fluorescenčního mikroskopu pozorována hranice mezi obarveným a neobarveným mazivem.

Výsledky

Na obr. 14 vlevo je znázorněna mapa intenzity fluorescenčního záření v kontaktu za podmínek čistého valení při rychlosti 75 mm/s. Jako mazivo byl použit glycerol obarvený eosinem o hmotnostní koncentraci 0,04 hm%. Experiment probíhal při okolní teplotě 23 °C a bylo aplikováno zatížení o velikosti 20 N. Obr. 14 vpravo představuje korespondující rozložení tloušťky filmu v kontaktu, kdy profil odpovídá čerchované čáře, přičemž platí, že vstupní oblast se nachází nahoře, respektive vlevo. Na obr. 14 vpravo je také znatelná velmi dobrá korelace výsledků tloušťky filmu vyhodnocená pomocí fluorescenční metody a metody optické interferometrie. Na základě této shody lze konstatovat, že metoda poskytuje relevantní výsledky a je jí tedy možné využít pro další analýzy.



Obr. 14: Vlevo: mapa intenzity fluorescenčního záření v kontaktu. Vpravo: profil tloušťky filmu v kontaktu ve směru osy y [17].

Závěr

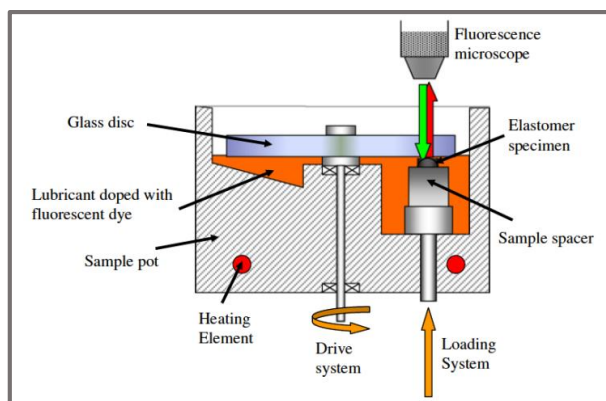
Tuto publikaci lze považovat za pilotní, pokud jde o využití fluorescenční mikroskopie při snaze mapovat formování maziva v kontaktu. Tvůrci práce dále velmi detailně popisují jak metodu samotnou, tak provedené experimenty, což může výrazně pomoci při snaze některá tato měření reprodukovat. V závěrečné diskusi se autoři zabývají otázkou dosud neúplného využití fluorescence v oblasti tribologie, přestože princip metody umožňuje její aplikaci ve velmi širokém rozsahu: od měření tloušťky filmu, přes stanovení kompozice maziva, po právě zmíněné pozorování toku maziva.

To vše přitom u různých typů kontaktních dvojic bez ohledu na jejich tuhost či odrazivost.

[14] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H. A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 11, s. 1960-1969. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013.

Rovněž tato publikace vznikla na Imperial college. Myant a kol. využili laserem ($\lambda = 532$ nm) indukovanou fluorescenci pro mapování tloušťky filmu v poddajném kontaktu tvořeném elastomerovým (PDMS) pinem o poloměru zakřivení 12,7 mm a skleněným diskem, viz obr. 15, za podmínek čistého prokluzu při malém zatížení, respektive malém kontaktním tlaku. Experimenty byly provedeny při plném zaplavení a také při hladovění kontaktu.

Při experimentech byly použity tři druhy maziva; jednak čistý glycerol (GLY), následně destilovaná voda s glycerolem v poměru 1:1 (GLY50) a konečně čistá destilovaná voda, přičemž dynamické viskozity jednotlivých maziv byly: $\eta_1 = 1,16$ Pa·s, $\eta_2 = 0,055$ Pa·s, $\eta_3 = 0,00089$ Pa·s. Do maziva je vždy přidáno fluorescenční barvivo eosin v koncentraci 0,4 hm%. Experimenty probíhaly při teplotě okolí $T = 22 \pm 2$ °C.



Obr. 15: Schematické zobrazení simulátoru kontaktu [14].

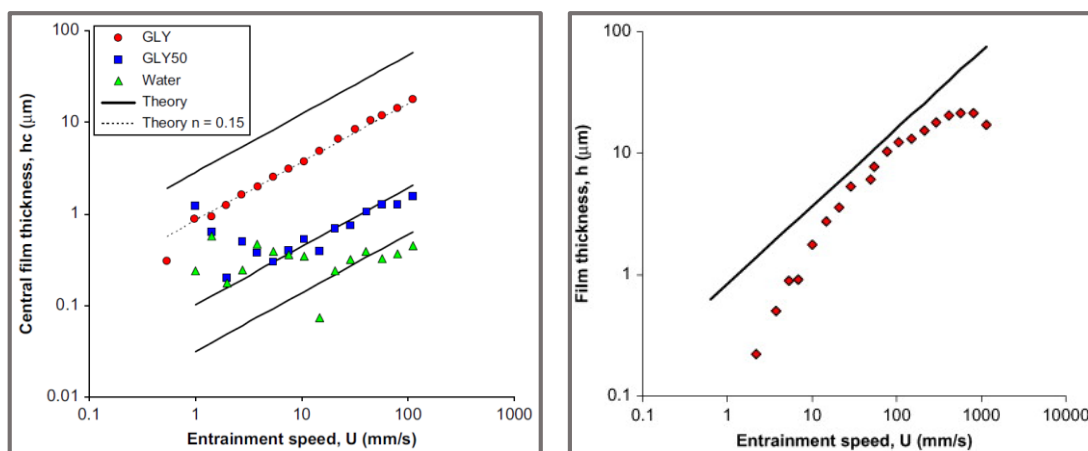
Výsledky

Celkový rozsah měřených tloušťek v této publikaci se pohybuje od 200 nm do 25 μ m. Výsledné závislosti tloušťky filmu na unášivé rychlosti při zatížení $W = 40$ mN za podmínek plného zaplavení jsou znázorněny na obr. 16 vlevo. V případě GLY je závislost v rozsahu 1 – 100 mm/s prakticky lineární. U dalších dvou maziv je tloušťka při nižších rychlostech poměrně nestabilní, křivka se stává lineární až při dosažení rychlosti 8 mm/s pro GLY50, respektive 25 mm/s pro destilovanou vodu. Tento jev je spojen s viskozitou maziva, kdy s klesající viskozitou je mazivo méně stabilní a dochází tak ke fluktuacím. Zajímavé je porovnání s predikovanou hodnotou (plná čára), dle vztahu (2). V případě GLY50 a destilované vody naměřené hodnoty v lineární části křivky velmi dobře odpovídají predikci. U čistého glycerolu jsou však hodnoty nižší, než predikované, přičemž kopírují přerušovanou čáru, která představuje predikci tloušťky filmu při dynamické viskozitě maziva $\eta = 0,15$ Pa·s.

$$h_c = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R' \quad (2)$$

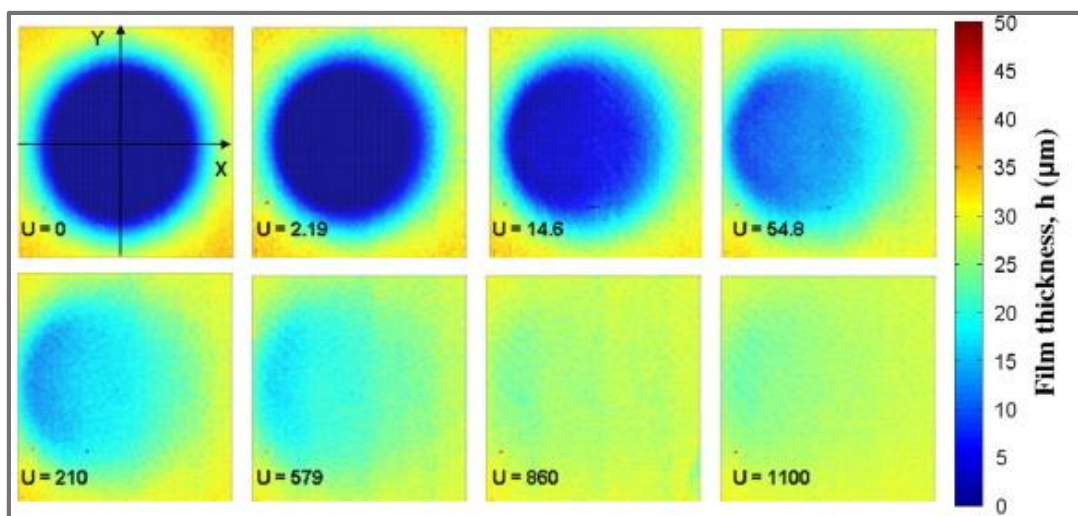
- ... h_c ... Centrální tloušťka filmu
- ... \bar{U} ... Bezrozměrný parametr rychlosti
- ... \bar{W} ... Bezrozměrný parametr zatížení
- ... R' ... Redukovaný poloměr křivosti

Výsledky za podmínek hladovění kontaktu v případě použití čistého glycerolu jsou znázorněny na obr. 16 vpravo. V tomto případě bylo aplikováno zatížení 25 mN. Přímka představující teoretickou predikci tloušťky je stanovena na základě výše uvedené rovnice (2), do vztahu je však dosazena snížená hodnoty dynamické viskozity $\eta = 0,15$ Pa·s, získaná z předchozího experimentu.

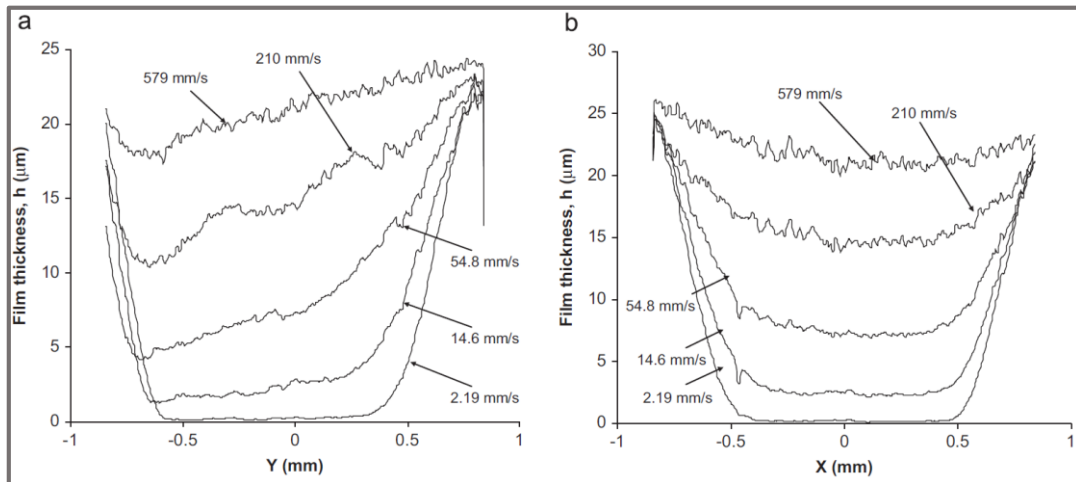


Obr. 16: Vlevo: Závislost centrální tloušťky filmu na unášivé rychlosti za podmínek plného zaplavení. Vpravo: Závislost centrální tloušťky filmu na unášivé rychlosti za podmínek hladovění kontaktu [14].

Na obr. 17 a obr. 18 je vyobrazeny snímky kontaktní oblasti při zvyšující se unášivé rychlosti, respektive profily tloušťky v osách x , y , (osy jsou znázorněny na levém horním snímku obr. 17). Vstupní oblast je na pravé straně kontaktu.



Obr. 17: Snímky kontaktní oblasti za podmínek hladovění při zvyšující se unášivé rychlosti [14].



Obr. 18: Profil tloušťky mazacího filmu v osách x, y [14].

Závěr

Tento článek je bezpochyby jednou z nejpřínosnějších prací demonstrujících využitelnost fluorescenční metody při analýze tloušťky filmu, kdy nezáleží na poddajnosti materiálu testovaných vzorků. Autorům se podařilo získat velice kvalitní výsledky za odlišných kinematických a silových podmínek.

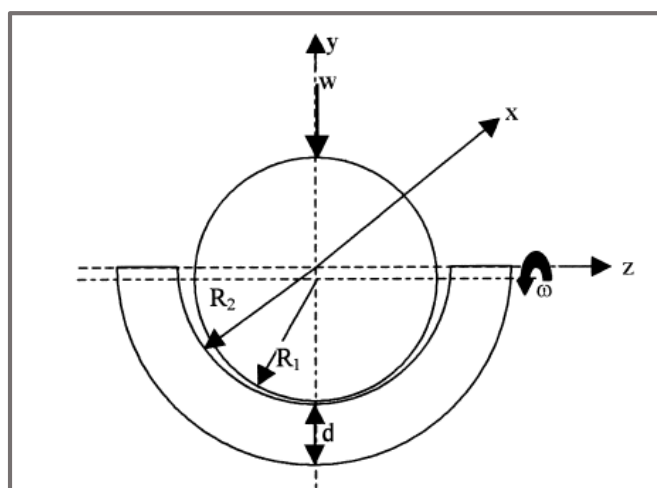
Předmětem diskuse se znovu stává způsob provedené kalibrace, přičemž je uvedeno, že autoři předchozích publikací často získávali kalibrační snímek v konfiguraci, která se liší od vlastní analyzované kontaktní dvojice [21] - [26], kdy rozdílná odrazivost etalonu a zkušební vzorku může do měření vnášet nepřesnosti. V této práci je kalibrace provedena přímo na skutečném měřeném kontaktu a jsou tak minimalizovány případné chyby.

Konečně odchylka naměřených hodnot od teoretických predikcí je připisována zejména kombinaci termálních efektů a hygroskopických vlastností kapaliny, což je schopnost látky pohlcovat vzdušnou vlhkost.

3.2 Analýza tloušťky mazací vrstvy v náhradách kyčelního kloubu

- [27] JALALI-VAHID, D., M. JAGATIA, Z. M. JIN a D. DOWSON. Prediction of lubricating film thickness in UHMWPE hip joint replacements. *Journal of Biomechanics*. 2001, vol. 34, issue 2, s. 261-266. DOI: 10.1016/S0021-9290(00)00181-0.
- [28] JALALI-VAHID, D, M JAGATIA, Z M JIN a D DOWSON. Prediction of lubricating film thickness in a ball-in-socket model with a soft lining representing human natural and artificial hip joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001-1-1, vol. 215, issue 4, s. 363-372.

Práce [27] využívá EHD modelu mazání již dříve vyvinutého stejným kolektivem autorů pro konfiguraci ball-on-socket (kulička-jamka), (obr. 19) pro predikci minimální tloušťky mazacího filmu v závislosti na parametrech jako je: průměr hlavice, radiální vůle, tloušťka jamky, či modul pružnosti jamky. Ve studii je acetabulární jamka z UHMWPE uvažována jako stacionární, v ní potom rotuje kulička (kov, keramika) při stálé úhlové rychlosti a při stálém zatížení. V navazující publikaci [28] autoři uvažovali v jamce také výstelku v podobě poddajné vrstvy, která reprezentuje lidskou kloubní chrupavku s cílem demonstrovat možnost využití definovaných vztahů jak pro kloubní náhrady, tak pro klouby přirozené.



Obr. 19: Konfigurace pro stanovení predikce minimální tloušťky filmu [27].

Výsledky

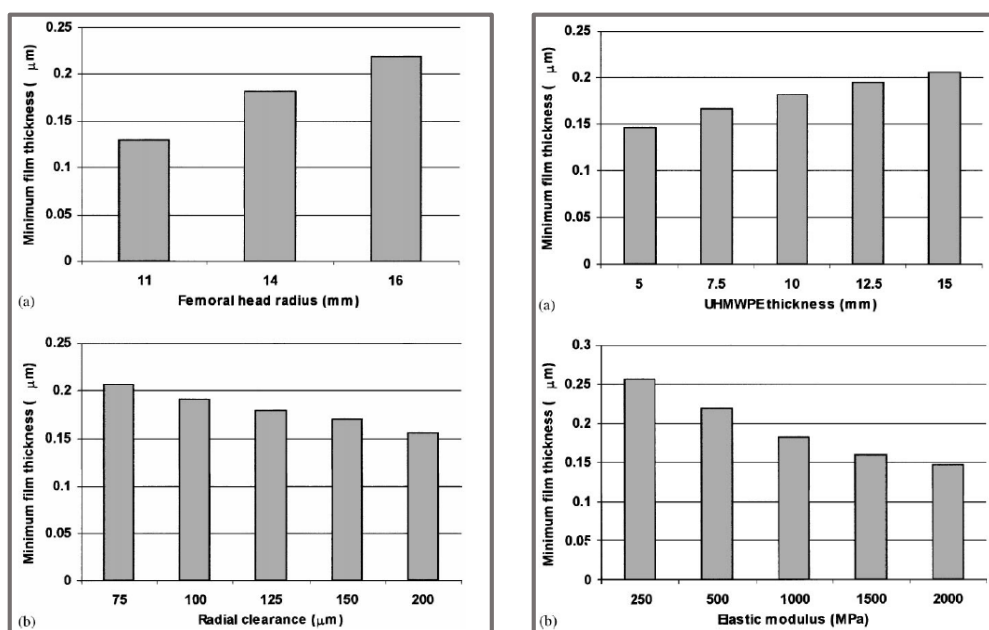
Na základě využití výše uvedeného modelu bylo zjištěno, že predikovaná tloušťka mazacího filmu v této konfiguraci narůstá s:

- Narůstajícím průměrem hlavice (obr. 20 vlevo - a)
- Klesající radiální vůlí (obr. 20 vlevo - b)
- Narůstající tloušťkou jamky (obr. 20 vpravo - a)
- Klesajícím modulem pružnosti materiálu jamky (obr. 20 vpravo - b)

Je zdůrazněno, že predikovaná tloušťka filmu je nedostatečná ve vztahu k uvažovaným drsnostem povrchů obou komponent, tudíž nelze zajistit jejich dostatečnou separaci a tedy není možné zajistit kapalinový režim mazání, který nastává

v kloubu přirozeném, ve kterém je však oproti tomuto modelu navíc přítomna chrupavka, která výrazně zlepšuje podmínky mazání.

Proto je vhodné se zamyslet se nad volbou komponent, kdy primárním cílem by mělo být co nejnižší opotřebení namísto co největší tloušťky filmu. Například, v případě narůstajícího průměru hlavice sice dojde ke zvýšení tloušťky maziva, ale také k nárůstu skluzové dráhy a tedy i k nárůstu opotřebení za podmínek smíšeného nebo mezného režimu mazání, které nastávají v důsledku nedostatečné separace kontaktních povrchů. Dále je poukázáno na fakt, že nárůst tloušťky filmu je obvykle spojen se zvětšující se kontaktní oblastí, což může vést k nedostatečnému zásobování kontaktu mazivem (hladovění) a koncentracím napětí na hraně jamky.



Obr. 20: Vlevo: Závislost tloušťky filmu na: a) poloměru hlavice, b) radiální vůli. Vpravo: Závislost tloušťky filmu na: a) tloušťce UHMWPE jamky, b) modulu pružnosti UHMWPE jamky [27].

Práce [28] obsahuje kromě již výše uvedených vztahů pro výpočet minimální tloušťky filmu i vztah pro stanovení tloušťky centrální. Dále je kromě závislosti tloušťky filmu na kontaktním úhlu také simulována závislost tlaku na tomto úhlu.

Závěr

Matematický model vytvořený pro predikci minimální a centrální tloušťky filmu je v pracích velmi přehledně a jasně popsán. Autoři zdůrazňují, že provedené analýzy zahrnovaly široký rozsah vstupních hodnot s ohledem na praktické zkušenosti s mazáním těchto kontaktních dvojic (UHMWPE/kov, UHMWPE/keramika). Práce [28] navíc dokládá, že uvedené závislosti lze využít i v případě kloubů přirozených, nicméně publikace je do značné míry inspirována prací předchozí a nepřináší příliš mnoho nových podstatných informací.

Jedním z nedostatků těchto dvou publikací je absence experimentální verifikace získaných výsledků. Dále, matematický model sice pracuje s dynamickou viskozitou uvažované synoviální kapaliny, nicméně není uvažován vliv adsorpce proteinů na jednotlivé povrchy. Přitom pozdější studie prokazují, že adsorpce proteinů na

artikulující povrchy má na výslednou tloušťku filmu velmi výrazný vliv. Přesto však nelze pochybovat o kvalitě obou publikací, což dokazuje jejich vysoká citovanost ostatními autory.

[29] MAVRAKI, A. a P. M. CANN. Friction and lubricant film thickness measurements on simulated synovial fluids. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2009-5-1, vol. 223, issue 3, s. 325-335.

Práce je zaměřena na studium fundamentálních aspektů mazání umělých kloubních náhrad synoviální kapalinou a zabývá se vlivem proteinů na průběh tloušťky mazacího filmu. Byly využity odlišné roztoky proteinů (albumin, γ -globulin), přičemž pro porovnání bylo jako mazivo využito hovězí sérum. Důvodem použití rozdílných roztoků byla snaha modelovat jak zdravou, tak periprotetickou synoviální kapalinu. Zdravá synoviální kapalina byla simulována roztokem phosphate-buffered saline (PBS) s přidanými proteiny (albumin, γ -globulin) v poměru A:G = 2:1. V případě periprotetické kapaliny byl potom stejný poměr proteinů přidán do pufru značeného jako 2-amino-2-(hydroxymethyl)-1,3-propanediol (Tris). Pro možnost stanovení vlivu obsahu proteinů byla využita i koncentrace opačná, teda A:G = 1:2. Hovězí sérum bylo využito ve třech různých koncentracích, 100 %, 50 %, 25%, přičemž k ředění byla využita deionizovaná voda. Dále bylo provedeno kombinované měření, kdy výsledná mazací kapalina obsahovala 50 % roztok hovězího séra společně s PBS, respektive s Tris.

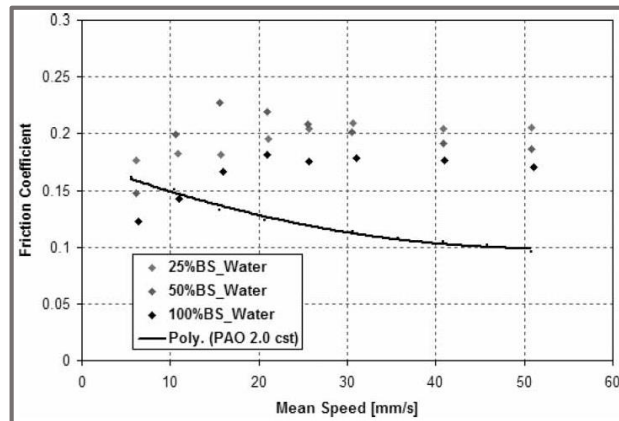
Pro simulaci kontaktu povrchů bylo využito často využívané konfigurace ball-on-disk. Všechna měření byla provedena za podmínek ustáleného zatížení o velikosti 5 N při proměnné rychlosti. Dále byl analyzován i součinitel tření, pro jehož měření bylo využito zařízení Mini Traction Machine (MTM), kde měření probíhalo za částečného prokluzu. Tloušťka filmu byla analyzována na optickém tribometru za čistého valení a pro její vyhodnocení byla využita optická interferometrie. Podmínky experimentů jsou uvedeny v tab. 3.

Parametr	MTM	Optický tribometr
Střední Hertzův tlak [GPa]	0,34	0,25
Rychlost [mm/s]	5 – 50	5 – 20
Zatížení [N]	5	5
Skluzový poměr [%]	180	0
Teplota [°C]	37	25

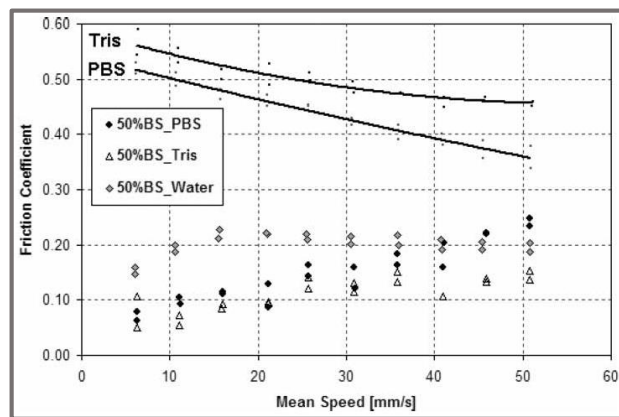
Tab. 3: Podmínky aplikované při experimentech [29].

Výsledky

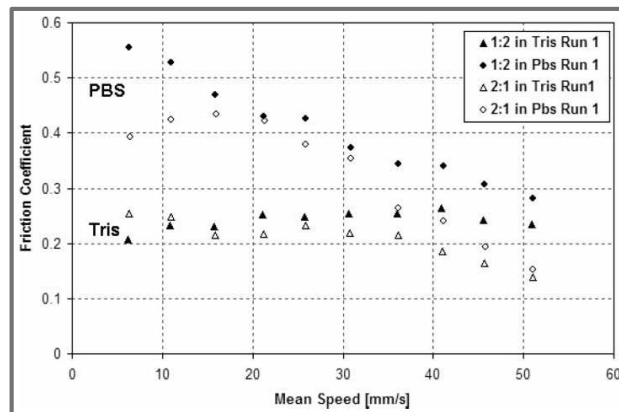
Výsledky ze zařízení MTM ukázaly, že v případě mazání hovězím sérem společně s roztoky PBS, respektive Tris docházelo k nízkému tření zejména při nižších rychlostech. Detailní výsledky pro jednotlivá maziva jsou znázorněny na obr. 21 - obr. 23, přičemž na obr. 21 jsou naměřená data navíc porovnána s výsledky pro nízko viskózní syntetický olej PAO.



Obr. 21: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro různé koncentrace hovězího séra [29].



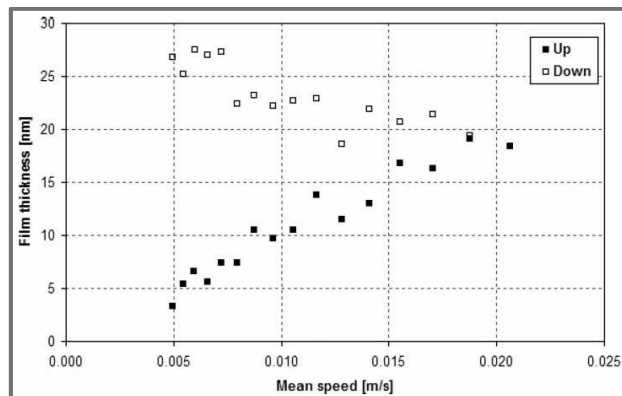
Obr. 22: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro 50 % hovězí sérum s roztoky proteinů [29].



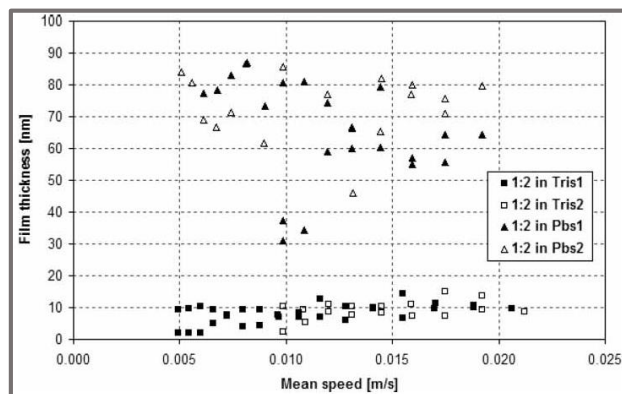
Obr. 23: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro rozdílné koncentrace proteinů [29].

Při analýze tloušťky filmu byl pozorován efekt formování vrstvy adsorbovaných proteinů tenké méně než 20 nm, přičemž celková tloušťka filmu dále naroste v důsledku hydrodynamického efektu. Zajímavý jev je možné pozorovat na obr. 24, který představuje závislost tloušťky na unášivé rychlosti při mazání 50 % roztokem hovězího séra. V první části experimentu dochází se zvyšující se rychlostí k nárůstu tloušťky, v druhé části pak sice rychlost klesá zpět na počáteční hodnotu, přičemž ale tloušťka filmu dále narůstá.

Konečně obr. 25 ukazuje, že v případě PBS byla tloušťka výrazně vyšší než v případě Tris, kdy však byly hodnoty pro změnu mnohem stabilnější. V grafu jsou také znázorněny hodnoty pro případ, kdy bylo mazivo použito ve dvou po sobě jdoucích experimentech. Je zřejmé, že tento jev nemá na tloušťku filmu zásadní vliv.



Obr. 24: Závislost tloušťky filmu pro vzrůstající a následně klesající unášivou rychlost [29].



Obr. 25: Závislost tloušťky filmu na opakovatelnosti měření pro různá maziva [29].

Závěr

Publikace jako taková je velice komplexní a lze ji v určitém ohledu považovat za průkopnickou studii, pokud jde o analýzu utváření mazacího filmu v náhradě kyčelního kloubu. Velmi podrobně je zpracován mimo jiné i přehled současného stavu poznání, který často podává informace mimo jiné i o člancích, které jsou ostatními autory přehlíženy. V praktické části se autoři zabývají vlivem kinematických podmínek a složení maziva na tření v kontaktu a tloušťku mazacího filmu. Publikované výsledky jsou z výzkumného hlediska velice přínosné a poskytují solidní základ pro další výzkum v této oblasti.

[30] MAVRAKI, A. a P. M. CANN. Lubricating film thickness measurements with bovine serum. *Tribology International*. 2011, vol. 44, issue 5, s. 550-556. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.07.008.

Publikace se zabývá analýzou tloušťky filmu v kontaktu mazaném hovězím sérem. K měření byla opět využita metoda optické interferometrie, přičemž byl mimo

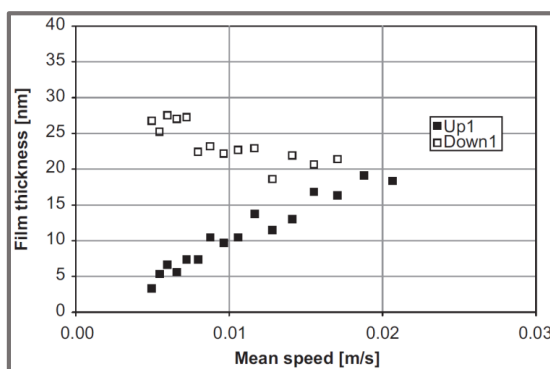
jiné studován efekt vysokého (200 MPa) a nízkého (30 MPa) kontaktního tlaku. Tohoto rozdílu bylo dosaženo využitím dvou různých experimentálních konfigurací, kdy se lišil poloměr zakřivení jednoho z elementů v kontaktu.

První konfigurace byla reprezentována konvenčním uspořádáním ball-on-disc, kdy byl poloměr ocelové kuličky 9,5 mm. Ve druhém případě se jednalo o modifikovanou konfiguraci lens-on-disc (čočka-disk) s poloměrem čočky 50 mm. Experimenty probíhaly za čistého valení (ball-on-disc), případně za čistého prokluzu (ball-on-disc, lens-on-disc), kdy kulička, respektive čočka byly stacionární, a disk rotoval. S ohledem na podmínky v kyčelním kloubu probíhaly experimenty při rozsahu rychlostí 2 – 30 mm/s za teploty 25, respektive 37 °C.

Obecně byl pozorován trend vyšších tloušťek filmu při nižších rychlostech. Dále s ohledem na významný rozptyl naměřených hodnot práce pojednává o vlastnostech maziva, které zcela jednoznačně nelze považovat za newtonské, což komplikuje případnou tvorbu modelů pro predikci tloušťky filmu.

Výsledky

V případě vyššího kontaktního tlaku byla tloušťka na počátku měření při nízkých rychlostech velice malá, přibližně 2 nm. Při zvýšení rychlosti však došlo k téměř okamžitému nárůstu na hodnotu 10 – 20 nm. Tloušťka dále narůstala až do maximální hodnoty, které dosáhla při rychlosti mezi 15 a 20 mm/s. Následně docházelo k postupnému snižování rychlosti, přičemž však nedocházelo k redukci filmu, který zůstával konstantní, případně jeho tloušťka dále narůstala, viz obr. 26.



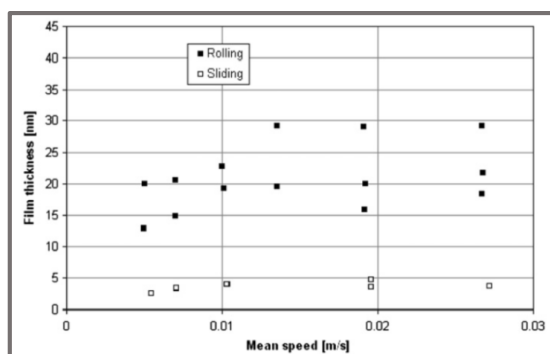
Obr. 26: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti, čisté valení, 25 °C, 200 MPa [30].

Vzhledem k tomu, že výsledky se v rámci jednotlivých měření velice lišily (pravděpodobně z důvodu chování maziva, viz výše), bylo třeba experimenty mnohokrát opakovat, aby bylo možné vyvodit jasné závěry. Občas přitom nastaly určité extrémy, kdy zejména při velmi nízkých rychlostech, menších než 5 mm/s, byla tloušťka filmu výrazně vyšší oproti průměrným hodnotám, někdy dosahovala hodnoty až 100 nm. Na konci každého měření byla také stanovena tloušťka při ustálených podmínkách, tj. při nulové rychlosti a statickém zatížení (5 N), přičemž hodnota tloušťky se pohybovala v rozsahu 9 – 19 nm, kdy se však očekává tloušťka nulová. Tento jev je připisován adsorpci proteinů na artikulující povrchy.

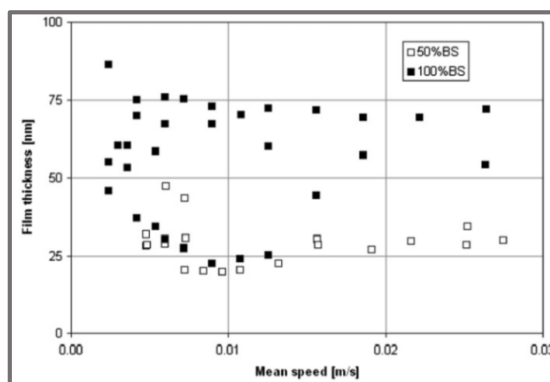
Výsledky měření při zvýšené teplotě 37 °C byly velice podobné těm při teplotě 25 °C, pouze hodnota tloušťky adsorbované vrstvy byla v řádu 11 – 13 nm. Zajímavé jsou výsledky, pokud se jedná o vliv skluzového poměru. Oba experimenty, jak čisté

valení, tak čistý prokluz byly provedeny při stejné konfiguraci ball-on-disc, přičemž je zřejmý efekt výrazného poklesu tloušťky filmu při čistém prokluzu. Hodnota byla přibližně o 70 – 80 % nižší než ta naměřená při čistém valení. Konkrétní získané hodnoty jsou znázorněny na obr. 27.

Výsledky získané při nižším kontaktním tlaku, kdy mohly být experimenty prováděny pouze za čistého prokluzu (lens-on-disc) jsou znázorněny na obr. 28. Je zde vynesena závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti pro různé roztoky hovězího séra, 50 %, respektive 100 %.



Obr. 27: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti při čistém valení a čistém prokluzu, 37 °C, 200 MPa [30].



Obr. 28: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti při odlišné koncentraci roztoku hovězího séra [30].

Poměrně výrazný rozdíl naměřených tlouštěk je zajímavý zejména z toho pohledu, že v případě vysokého kontaktního tlaku nebyl tento efekt (tedy závislost tloušťky na koncentraci séra) nijak výrazný. Konečně tloušťka adsorbované vrstvy je i za nízkého tlaku podobná předchozím výsledkům, konkrétně je to přibližně 15 nm.

Závěr

Práce je zaměřena zejména na analýzu tloušťky filmu za různých kinematických a teplotních podmínek. Je také vyšetřován vliv koncentrace hovězího séra. Současně, díky dvěma rozdílným experimentálními konfiguracím je vyšetřen i efekt vlivu velikosti zatížení. Zajímavé jsou především následující skutečnosti:

- Při zvyšování unášivé rychlosti dochází k nárůstu tloušťky, při poklesu rychlosti se však tloušťka nesnižuje, naopak dále mírně narůstá.

- Při vysokém kontaktním tlaku se nikterak neprojevuje vliv koncentrace roztoku hovězího séra na tloušťku filmu, při nízkém kontaktním tlaku je tento efekt velmi významný.
- Tloušťka adsorbované vrstvy je v obou případech podobná a pohybuje se mezi 10 a 20 nm.
- Naměřené hodnoty vykazují značný rozptyl, což lze připsat zejména chování maziva, které se rozhodně nechová jako mazivo newtonské.

[31] FAN, J., C. W. MYANT, R. UNDERWOOD, P. M. CANN a A. HART. Inlet protein aggregation: a new mechanism for lubricating film formation with model synovial fluids. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2011-06-22, vol. 225, issue 7, s. 696-709. DOI: 10.1177/0954411911401306.

Práce se opět zabývá základním popisem průběhu tloušťky mazacího filmu při mazání hovězím sérem, případně modelovou synoviální kapalinou. Cílem studie bylo objasnit roli proteinů v procesu mazání. Maziva využitá při experimentech jsou shrnuta v tab. 4. Experimenty probíhaly za čistého prokluzu na optickém tribometru v konfiguraci ball-on-disc. Autoři poprvé analyzují tloušťku filmu na reálné komponentě kloubní náhrady, konkrétně používají CoCrMo kuličku o průměru 38 mm (stacionární komponenta), a rotující skleněný disk. K vyhodnocení tloušťky maziva byla využita metoda optické interferometrie. Rozsah uvažovaných rychlostí byl 2 – 60 mm/s, kontaktní tlak 100 MPa, teplota při měření 37 °C. Naměřené hodnoty byly dále porovnány s teoretickou predikcí tloušťky, kterou definoval Hooke [32].

Složení maziva	Dynamická viskozita η [Pa·s]	Celková koncentrace proteinů (g/dl)
25 % hovězí sérum	0,021	1,62
50 % hovězí sérum	0,022	3,23
100 % hovězí sérum	0,026	6,45
Roztok albuminu	-	1
Roztok γ-globulinu	-	0,18
Roztok albuminu + γ-globulinu (A:G = 2:1)	-	1,18

Tab. 4: Maziva použitá při měření tloušťky mazacího filmu [31].

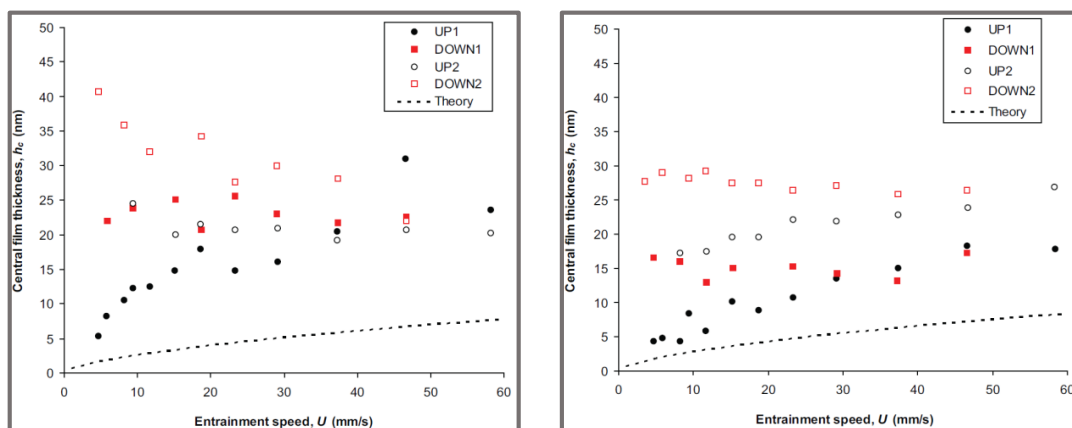
Výsledky:

Výsledky prokázaly, že v případě, kdy mazivo obsahuje přidané proteiny, je závislost tloušťky filmu silně závislá na čase, což neodpovídá chování jednoduché (newtonské kapaliny). V průběhu experimentu došlo k vytvoření ustálené adsorbované vrstvy proteinů o tloušťce přibližně 10 – 20 nm. Tloušťka filmu dále narůstala v důsledku hydrodynamického efektu, přičemž nárůst byl patrný zejména za nižších uvažovaných rychlostí. Na konci měření byla naměřena tloušťka mazací vrstvy v rozsahu 20 – 50 nm s ohledem na použité mazivo, hodnoty jsou sumarizovány v tab.

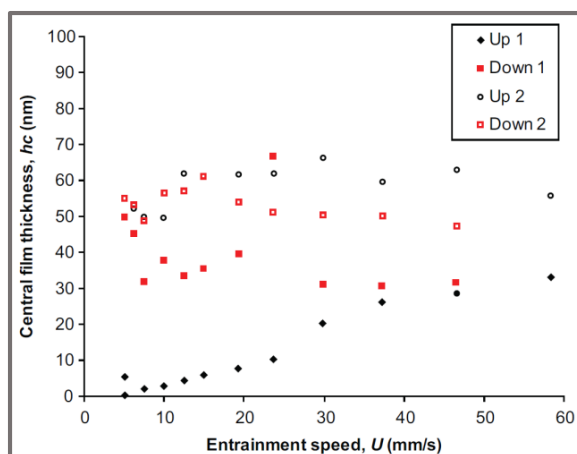
5. Průběh tloušťky filmu v závislosti na skluzové rychlosti je znázorněn na obr. 29 (různé koncentrace hovězího séra) a obr. 30 (roztok proteinů).

Mazivo	Tloušťka filmu na konci měření
25 % hovězí sérum	$35,75 \pm 2,4$
50 % hovězí sérum	$19,4 \pm 3,5$
100 % hovězí sérum	$34 \pm 0,00$
Roztok albuminu	$52,95 \pm 24,05$
Roztok γ-globulinu	$29,55 \pm 14,00$
Roztok albuminu + γ-globulinu (A:G = 2:1)	$60,00 \pm 20,00$

Tab. 5: Tloušťka reziduální vrstvy pro jednotlivá maziva [31].



Obr. 29: Porovnání teoretické a experimentální tloušťky filmu v závislosti na skluzové rychlosti pro dva navazující experimenty. Vlevo: 50 % hovězí sérum, vpravo: 100 % hovězí sérum [31].



Obr. 30: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti pro dva navazující experimenty pro roztok obsahující albumin i γ -globulin [31].

Závěr:

Publikace navazuje na předchozí práce výzkumného pracoviště. Výsledky naměřené adsorbované vrstvy při daných kinematických podmínkách jsou velice podobné výsledkům uvedeným v přecházejících dvou publikacích.

Zajímavé je srovnání výsledků u hovězího séra jakožto náhrady biologické kapaliny a uměle vytvořených proteinových roztoků s obsahem proteinů odpovídajícím parametrům synoviální kapaliny, kdy v tomto případě je tloušťka vrstvy maziva prakticky dvojnásobná.

Dalším zajímavým bodem je porovnání výsledků s teoretickou predikcí, kdy rozdíl oproti předpokládaným hodnotám dosahuje řádu stovek procent. Tento fakt lze zcela opět přisoudit chování použitých kapalin, které, jak už bylo zmíněno, vykazují newtonské chování, zatímco teoretické predikce jsou odvozovány pro kapaliny newtonské.

[33] MYANT, C., R. UNDERWOOD, J. FAN a P. M. CANN. Lubrication of metal-on-metal hip joints: The effect of protein content and load on film formation and wear. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012, vol. 6, s. 30-40. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2011.09.008.

[34] MYANT, C. a P. CANN. In contact observation of model synovial fluid lubricating mechanisms. *Tribology International*. 2013, vol. 63, s. 97-104. DOI: /10.1016/j.triboint.2012.04.029.

Myant a kol. v uvedených publikacích dále rozvíjí biotribologický výzkum univerzity Imperial College. V první uvedené studii [33] se autoři kromě vlivu složení maziva zabývají také vlivem zatížení a času na tloušťku mazacího filmu. Dále je předmětem pozorování i proces formování mazacího filmu a opotřebení povrchů. Experimentální přístupy se nikterak neliší od předchozích prací. Měření probíhá v konfiguraci ball-on-disc za čistého prokluzu, přičemž stacionární komponentu představuje CoCrMo hlavice o průměru 38 mm, oproti které rotuje skleněný disk. Byly provedeny následující typy experimentů:

- Měření při konstantní rychlosti:
 - Uvažované rychlosti: 0; 10 mm/s
 - Při nulové rychlosti bylo aplikováno cyklické zatěžování statického kontaktu o velikosti 5 N. Kontakt byl nejprve na 15 s zatížen, byla změřena tloušťka filmu, následovalo odlehčení kontaktu na 45 s. Cyklus se opakoval po dobu 12 minut. Po stejnou dobu probíhal i experiment při rychlosti 10 mm/s, čemuž odpovídá skluzová vzdálenost 14,4 m. Aplikované zatížení rezultuje v maximální počáteční kontaktní tlak o velikosti 113 MPa.
 - Po předchozím iniciačním testu byla provedena analýza vlivu zatížení v rozsahu 5 – 20 N.
- Měření při proměnné rychlosti:
 - Dochází k plynulému nárůstu a opětovnému poklesu skluzové rychlosti v rozsahu 0 – 55 mm/s, při zatížení 5 N.

Všechna měření probíhala za zvýšené teploty 37 °C. Maziva použitá v této studii jsou uvedena v tab. 6.

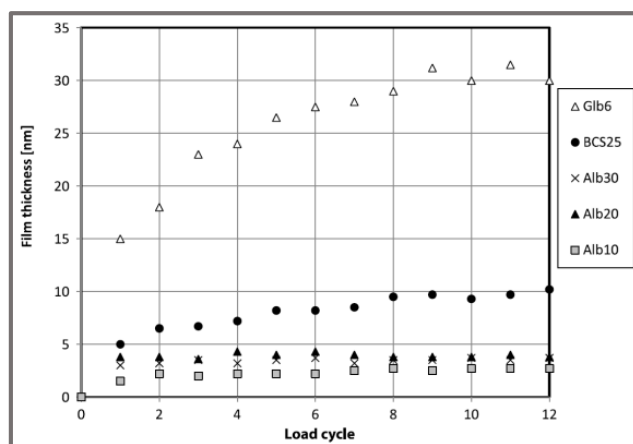
Označení maziva	Složení maziva
BCS25	Hovězí sérum ředěné na koncentraci 25 %, celkový obsah proteinů 13 mg/ml
Alb10	Roztok PBS obsahující albumin v koncentraci 10 mg/ml
Alb20	Roztok PBS obsahující albumin v koncentraci 20 mg/ml
Alb30	Roztok PBS obsahující albumin v koncentraci 30 mg/ml
Glb6	Roztok PBS obsahující γ -globulin v koncentraci 30 mg/ml

Tab. 6: Maziva použitá při měření tloušťky mazacího filmu [33].

Druhá publikace [34] se blíže zabývá pozorováním kontaktní oblasti, přičemž se snaží najít souvislosti mezi měřenou tloušťkou maziva a vizuální podobou kontaktu. Experimenty jsou provedeny za stejných podmínek jako ty v předchozí studii, jediným rozdílem je použité mazivo, kterým je tentokrát pouze 25 % hovězí sérum.

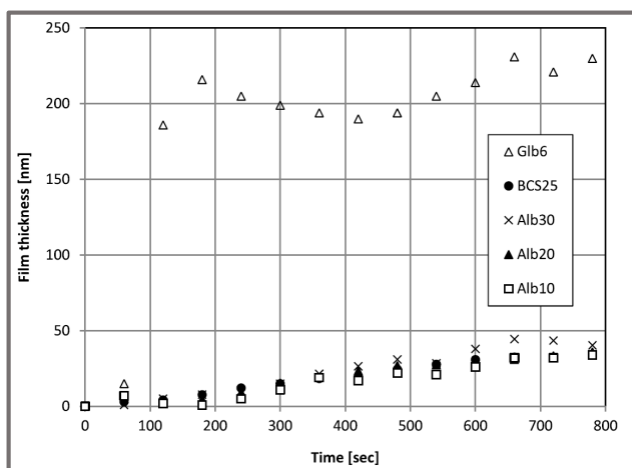
Výsledky:

Na obr. 31 jsou vykresleny výsledky testu při cyklickém zatěžování kontaktu silou 5 N. Je zřejmé, že v případě, kdy mazivo obsahuje γ -globulin, je tloušťka filmu několikanásobně větší než v případě, kdy je do maziva přidán pouze albumin. Hovězí sérum obsahuje oba uvedené proteiny, proto je tloušťka vrstvy větší než v případě maziv Alb10, Alb20, Alb30, ale menší než je tomu u Glb6. Dalším poznatkem je prakticky zanedbatelná závislost koncentrace albuminu na naměřené hodnoty, kdy i při trojnásobné koncentraci dojde k nárůstu filmu pouze o 1 – 3 nm.



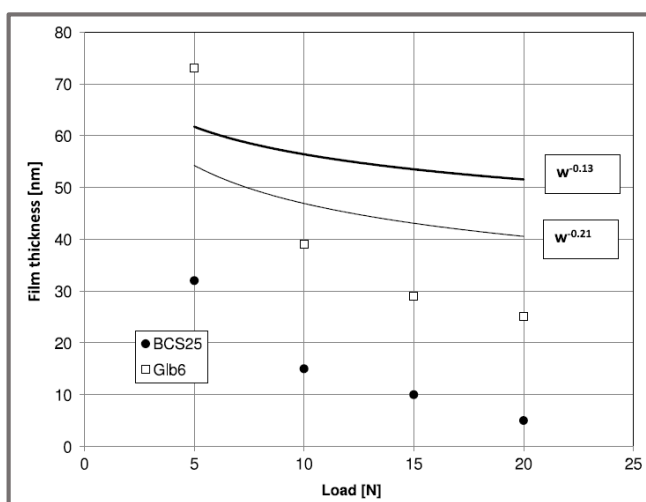
Obr. 31: Závislost tloušťky filmu na počtu zátěžných cyklů pro odlišná maziva [33].

V případě experimentu při rychlosti 10 mm/s, viz obr. 32, je opět výrazně vyšší tloušťka maziva u Glb6. Dochází zde k prudkému nárůstu tloušťky během prvních přibližně 120 s testu, dále se už tloušťka s narůstajícím časem mění jen minimálně. V kontextu předchozího grafu a uvedených informací je zářezující zejména výsledek pro hovězí sérum, kdy se hodnoty tloušťky nijak neliší od roztoků albuminu.



Obr. 32: Závislost tloušťky filmu na čase pro odlišná maziva při skluzové rychlosti 10 mm/s [33].

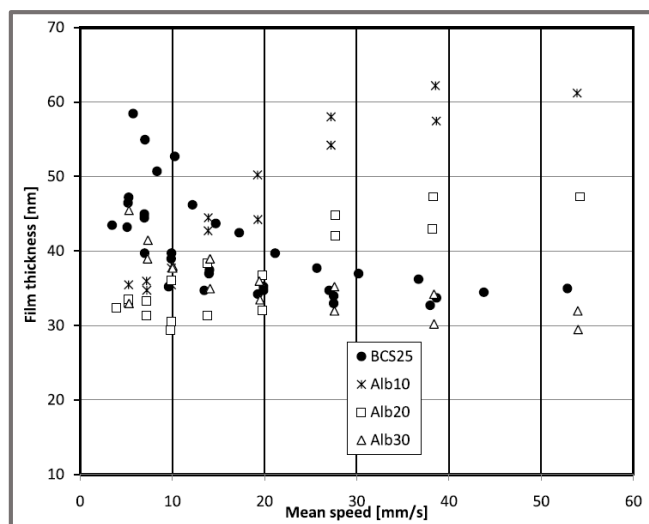
Závislost tloušťky na velikosti zatížení je znázorněna na obr. 33. V grafu jsou zároveň zaneseny křivky reprezentující teoretickou predikci, přičemž u obou použitých maziv (BCS25, Glb6) jsou až na jednu výjimku naměřené hodnoty o 40 až 80 % nižší než predikované.



Obr. 33: Závislost tloušťky filmu na zatížení pro maziva BCS25 a Glb6 [33].

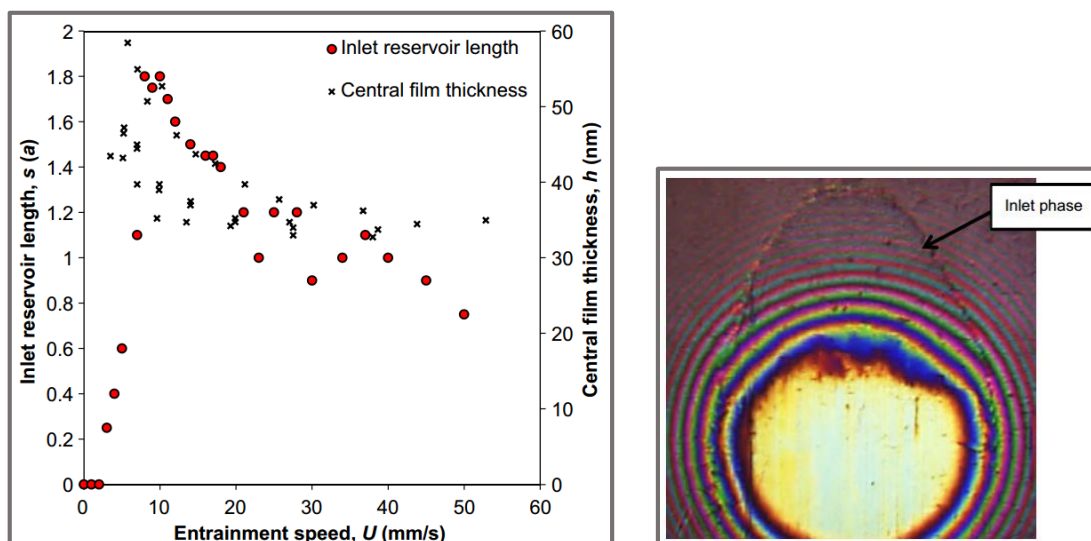
Konečně na obr. 34 je znázorněna závislost tloušťky na skluzové rychlosti. Jak je vidět, výsledky vykazují značný rozptyl a proto není snadné vyvodit jasné závěry. Přesto lze konstatovat, že koncentrace proteinů má na výsledky významný vliv, konkrétně pak v případě roztoků albuminu dochází s klesající koncentrací a vzrůstající rychlostí k nárůstu tloušťky a naopak. U hovězího séra pak dochází při nárůstu rychlosti k poklesu tloušťky, který je však od určité hodnoty (30 mm/s) jen velmi

mírný. Největší rozptyl naměřených hodnot je možné pozorovat v oblasti nízkých rychlostí, kdy lze považovat mazací film za poněkud nestabilní.

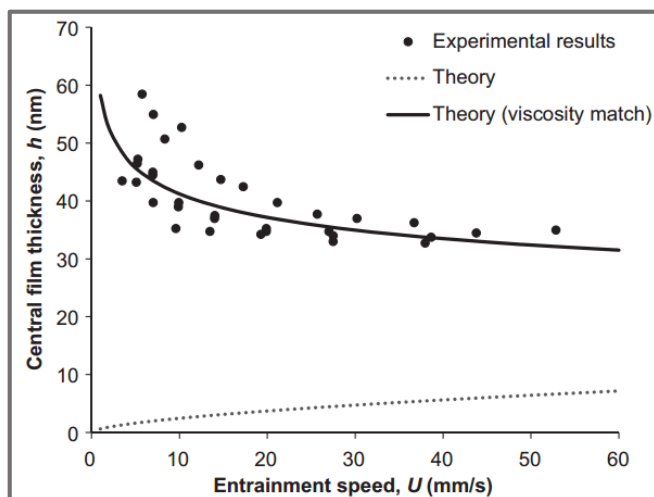


Obr. 34: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti pro maziva BCS25, Alb10, Alb20 a Alb30 [33].

Z výsledků publikovaných v práci [34] je asi nejzajímavější graf znázorňující komplexní závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti a zároveň na délce vstupní oblasti kontaktu, obr. 35. Z tohoto grafu je zřejmé, že tloušťka filmu je silně závislá právě na této vstupní oblasti. S ohledem na pokles tloušťky při vzrůstající skluzové rychlosti dochází dále autoři k závěru, že chování hovězího séra ve vstupní oblasti respektuje model smykového řidnutí kapaliny. Z tohoto důvodu je následně rovnice predikce tloušťky filmu upravena zavedením proměnné viskozity. Výsledky se v tomto případě velmi dobře shodují s naměřenými hodnotami, jak je znázorněno na obr. 36.



Obr. 35: Vlevo: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti a délce vstupní oblasti. Vpravo: Kontakt včetně vstupní oblasti [34].



Obr. 36: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti. Porovnání s predikovanými hodnotami. Tečkovaná čára – Newtonský model, plná čára – model smykového řidnutí [34].

Závěr:

Zejména první uvedená studie [33] přináší rozsáhlé množství výsledků, přičemž například závislost tloušťky filmu na velikosti a charakteru zatížení doposud nebyla dostatečně objasněna. Závislost tloušťky na cyklickém zatížení při nulové skluzové rychlosti pak byla zkoumána vůbec poprvé. Výsledky studie jasně naznačují, že γ -globulin vede k formování tlustšího filmu, oproti tomu albumin vede k jeho redukci. Důležité výsledky by tedy mohla přinést studie analyzující vliv uvedených maziv na součinitel tření. Za mírný nedostatek lze považovat absenci výsledků pro mazivo Glb6 v grafu na obr. 34.

Druhá publikace [34] se blíže zabývá studiem kontaktu z vizuálního hlediska, přičemž mezi nejvýznamnější závěry patří průkazný vliv délky vstupní oblasti kontaktu na hodnotu tloušťky filmu. Ačkoliv již předchozí práce diskutovali newtonské chování hovězího séra, případně proteinových roztoků, až Myant a kol. provedli korekci vztahu pro predikci tloušťky zavedením proměnné dynamické viskozity, přičemž výsledky velmi dobře korelují s naměřenými hodnotami.

[35] VRBKA, M., T. NÁVRAT, I. KŘUPKA, M. HARTL, P. ŠPERKA a J. GALLO. Study of film formation in bovine serum lubricated contacts under rolling/sliding conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2013-04-18, vol. 227, issue 5, s. 459-475. DOI: 10.1177/1350650112471000.

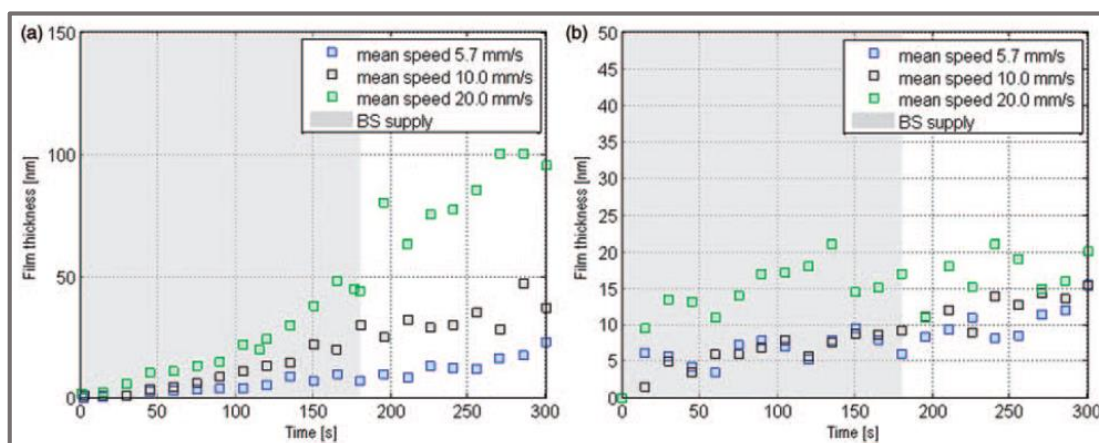
Autoři se zabývali studiem tloušťky mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu. Stejně jako v předcházejících případech je při studiu využita konfigurace ball-on-disc. V předchozích publikacích byly předmětem studia pouze hlavice ze slitiny CoCrMo. Tento článek analyzuje tloušťku filmu i pro hlavice keramické. Použití skutečných kloubních komponent lépe modeluje reálnou situaci v náhradách, jednak z hlediska materiálových vlastností, dále potom s ohledem na reálné drsnosti povrchů a jejich hydrofilicitu, respektive hydrofobicitu.

Experimenty byly prováděny za různých kinematických podmínek a skluzových poměrů, přičemž byla pozorována závislost tloušťky filmu na čase, respektive valivé

vzdálenosti. Při měření bylo aplikováno zatížení o velikosti 5 N, přičemž výsledná hodnota kontaktního tlaku byla v případě kovové hlavice 180 MPa a v případě hlavice keramické potom 190 MPa. Jako mazivo byl využit 25% roztok hovězího séra o celkovém objemu 10,5 ml, které bylo kontinuálně dávkováno do kontaktu po dobu 180 s, kdy celková doba měření dosahovala 300 s. Měření probíhalo za teploty 24 °C.

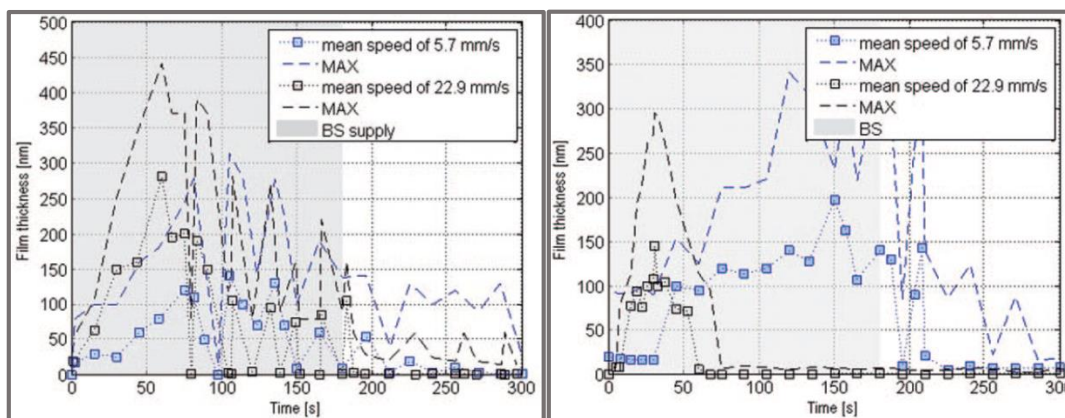
Výsledky

V případě čistého valení byla pozorována tendence nárůstu tloušťky filmu s časem při všech uvažovaných rychlostech jak u kovové, tak keramické hlavice, přičemž u hlavice kovové docházelo obecně k formování tlustšího filmu, viz obr. 37.



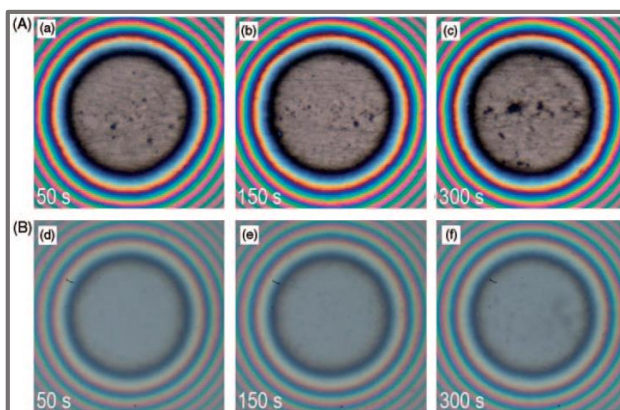
Obr. 37: Závislost tloušťky filmu na čase pro různé unášivé rychlosti za podmínek čistého valení; a) kovová hlavice, b) keramická hlavice [35].

Odlíšný charakter formování mazacího filmu byl pozorován za podmínek částečného prokluzu, přičemž důležitá nebyla jen samotná hodnota prokluzu, ale také skutečnost, který ze dvou elementů byl rychlejší (rychlejší disk => pozitivní prokluz; rychlejší kulička => negativní prokluz). V případě, kdy je rychlejší disk, dochází nejprve k velmi rychlému významnému nárůstu tloušťky bez ohledu na unášivou rychlost. Následně po dosažení maximální hodnoty začne tloušťka filmu klesat, přičemž na konci měření dosahuje hodnot v řádu jednotek nanometrů. Hodnota maximální tloušťky je u kovové hlavice závislá na unášivé rychlosti. U hlavice keramické se za těchto podmínek významný vliv rychlosti na tloušťku, která se pohybovala mezi 150 a 200 nm, neprokázal. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na obr. 38.



Obr. 38: Závislost tloušťky filmu na čase pro různé unášivé rychlosti za podmínek částečného pozitivního prokluzu (150 %). Vlevo: kovová hlavice, vpravo: keramická hlavice [35].

Velice odlišné chování bylo dále pozorováno v případě, kdy byla kulička rychlejší než disk. Tehdy byla vrstva maziva v případě obou materiálů velmi tenká v řádu několika nanometrů. Dále docházelo k formování shluků proteinů o tloušťce přibližně 20 až 25 nm u hlavice kovové a 5 nm u hlavice keramické. Chromatické interferogramy pořízené vysokorychlostní kamerou pořízené za těchto podmínek jsou znázorněny na obr. 39.



Obr. 39: Interferogramy získané při měření za podmínek negativního prokluzu; A) kovová hlavice, B) keramická hlavice [35].

Závěr

Publikace je zaměřená na analýzu tloušťky filmu v náhradách kyčelního kloubu, přičemž jako první využívá při těchto měřeních také keramické kloubní hlavice. Případné nepřesnosti, které mohou být vneseny do měření v případě jiných materiálů (odlišná drsnost, smáčivost) jsou tak tímto přístupem eliminovány. Zajímavý je především velmi podstatný vliv pozitivního, respektive negativního prokluzu na charakter formování mazacího filmu. Autoři dále zmiňují, že získané výsledky nemusí zcela přesně odpovídat reálné situaci v kloubní náhradě, přičemž jedním z omezení aplikovaného přístupu je studium kontaktu nekonformních těles, zatímco reálné komponenty spoluvytvářejí kontakt konformní. Dalšími faktory, které je však velmi obtížné přesně postihnout, je konkrétní složení synoviální kapaliny, oxidace a teplota použitého hovězího séra, přechodové kinematické a silové podmínky.

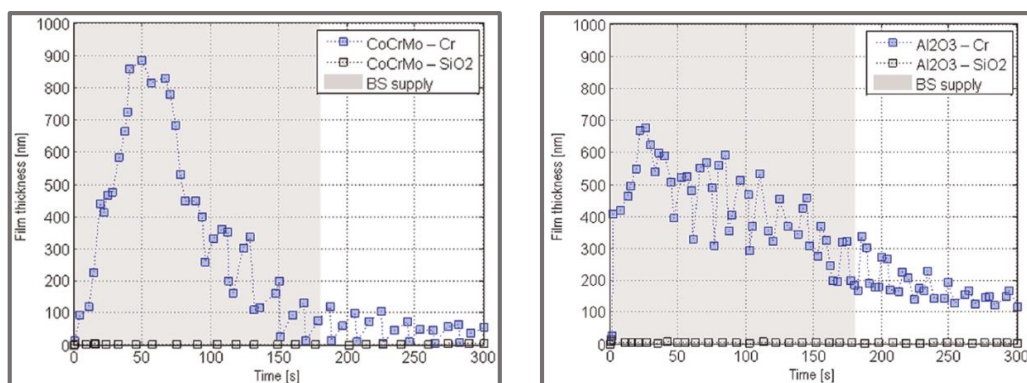
- [36] VRBKA, M., I. KŘUPKA, M. HARTL, T. NÁVRAT, J. GALLO a A. GALANDÁKOVÁ. In situ measurements of thin films in bovine serum lubricated contacts using optical interferometry. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2014-02-17, vol. 228, issue 2, s. 149-158. DOI: 10.1177/0954411913517498.

Navazující práce stejného kolektivu autorů rozšiřuje dosud získané poznatky z oblasti formování proteinového filmu. Pro analýzu tloušťky filmu je opět využita kolorimetrická interferometrie. Tato metoda, stejně jako další optické metody vyžaduje, aby byl alespoň jeden z povrchů transparentní. Skleněné disky dále bývají na své spodní stranou potaženy tenkou vrstvou chromu, případně vrstvou chromu a vrstvou křemíku pro zvýraznění interference a tedy zpřesnění měření. Práce se zabývá vlivem hydrofobicity a hydrofilicity těchto povlaků na formování filmu.

S ohledem na závěry vyvozené v předchozí studii využili autoři nové experimentální konfigurace, konkrétně ball-on-lens (kulička-čočka). Nahrazením skleněného disku skleněnou čočkou (rovněž potaženou chromovou vrstvou) se tak kontakt stává více konformním, což mimo jiné vede k výraznému snížení kontaktního tlaku, konkrétně ze 177 MPa na 37 MPa při radiálním zatížení o velikosti 5 N. Omezením této konfigurace je možnost měření pouze při čistém negativním prokluzu, kdy je čočka stacionární a hlavice rotuje, přitom předešlá studie naznačila, že v takovém případě je tloušťka formovaného proteinového filmu velmi malá. Jako mazivo byl u všech měření opět využit 25% roztok hovězího séra.

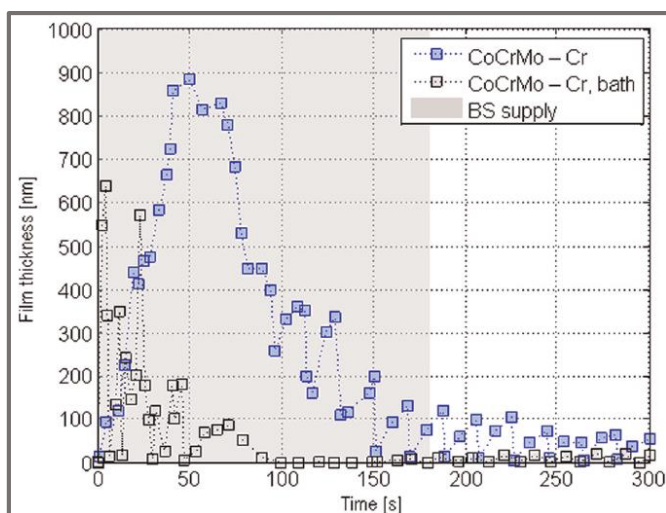
Výsledky

Vlastnosti povlakových vrstev nanášených na spodních stranách disků ovlivňují formování proteinového filmu následujícím způsobem. Chromová vrstva, která vykazuje hydrofobní chování, podporuje adsorpci proteinů, v důsledku čehož dochází k formování tlustšího mazacího filmu. Oproti tomu, k formování proteinového filmu prakticky nedocházelo v případě vrstvy křemíku, která vykazuje hydrofilní chování. Tehdy vznikl velmi tenký mazací film, pouze v důsledku hydrodynamického efektu. Uvedené informace jsou ilustrovány na obr. 40. Dále bylo zjištěno, že materiál hlavice (kov, keramika) nemá na formování filmu výrazný vliv, přestože smáčivost obou povrchů je velmi odlišná.



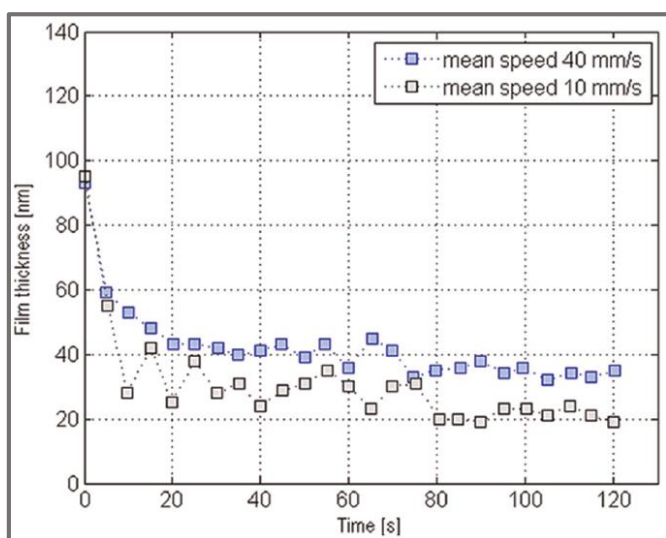
Obr. 40: Závislost tloušťky filmu na čase pro rozdílné povlakové vrstvy za čistého pozitivního prokluzu při rychlosti 10 mm/s. Vlevo: kovová hlavice, vpravo: keramická hlavice [36].

Následně byla potvrzena domněnka, že konformita kontaktní dvojice zásadním způsobem ovlivňuje formování mazacího filmu. V konfiguraci ball-on-disc se mazací film formuje zejména v důsledku agregací proteinů, které prochází kontaktní oblastí a vzniká tak relativně tlustý film v řádu stovek nanometrů, jak je znázorněno na obr. 41. Na témže obrázku jsou dále uvedeny hodnoty tloušťky filmu při plném zaplavení kontaktu, přičemž nižší hodnoty jsou pravděpodobně způsobeny „omýváním“ adsorbovaných proteinů všudypřítomným mazivem.



Obr. 41: Závislost tloušťky filmu na čase pro průběžné dávkování a plné zaplavení mazivem za čistého pozitivního prokluzu při rychlosti 10 mm/s v konfiguraci ball-on-disc [36].

V případě více konformní konfigurace ball-on-lens v kontaktu nedochází k výrazným agregacím proteinů a film tak primárně narůstá v důsledku hydrodynamického efektu. Proto je naměřená tloušťka celkově menší, a navíc, díky absenci agregovaných proteinů vykazují hodnoty menší rozptyl, než je tomu v předcházejícím případě, viz obr. 42.



Obr. 42: Závislost tloušťky filmu na čase za čistého negativního prokluzu při rychlosti 10 a 40 mm/s v konfiguraci ball-on-lens (hovězí sérum dávkováno kontinuálně) [36].

Závěr

Tato práce svým výzkumným zaměřením přímo navazuje na předcházející publikaci a zabývá se vlivy, které byly v práci [35] diskutovány jako podstatné z hlediska ovlivňování formování mazacího filmu. Bylo jasně prokázáno, že vrstva povlaku, která se nachází na disku z důvodu zvýraznění interference, velmi výrazně ovlivňuje adsorpci proteinů na tento povrch a tedy i výslednou tloušťku filmu. Dále jsou zajímavá data znázorňující vliv způsobu mazání kontaktu, kdy v případě plného zaplavení dochází k výrazné redukci tloušťky. Konečně byl analyzován vliv konformity povrchů na tloušťku filmu. Práce jako taková je velmi komplexní a získané informace jsou z hlediska tohoto pojednání, potažmo tvorby vlastní disertační práce velice podstatné.

3.3 Analýza mazání kloubních náhrad z hlediska modelové kapaliny

[37] **SCHOLES, S. C. a A. UNSWORTH.** The Effects of Proteins on the Friction and Lubrication of Artificial Joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2006-8-1, vol. 220, issue 6, s. 687-693. DOI: 10.1243/09544119JEIM21.

Práce je zaměřena na studium tření a mazání kyčelních a kolenních kloubních náhrad, přičemž se snaží podmínky experimentů přiblížit reálnému stavu, tj. respektuje silové zatížení a vzájemný charakter pohybu artikulujících povrchů.

Konkrétní silové zatížení se pohybovalo v rozsahu od 100 do 2 000 N u náhrady kyčelního kloubu a od 100 do 1 000 N u náhrady kloubu kolenního. Vzájemná artikulace povrchů probíhala za zjednodušeného harmonického cyklu v rozsahu $\pm 24^\circ$ u kyčelního a $\pm 32,5^\circ$ u kolenního kloubu.

Autoři využili různá maziva s cílem stanovit jejich vliv na tření a mazání a poskytnout tak určité predikce pro případný další výzkum v této oblasti. Konkrétně byla použita jednak karboxymethyl celulóza (CMC) a dále hovězí sérum (s příměsí CMC), přičemž účelem bylo vytvořit Stribeckovu křivku.

Dále byla provedena některá měření s lidskou synoviální kapalinou pro možnost porovnání výsledků s fyziologickým mazivem. Byly testovány náhrady kyčelního a kolenního kloubu při odlišných materiálových kombinacích, jak je uvedeno v tab. 7. Experimenty probíhaly na Dunhamově simulátoru tření.

Náhrada	Femorální komponenta	Acetabulární/tibiální komponenta	Poloměr kloubu [mm]
Kyčelní	CoCrMo	UHMWPE	28
Kyčelní	CoCrMo	CoCrMo	28
Kyčelní	Oxid hlinitý	Oxid hlinitý	28
Kolenní	CoCrMo	Polyuretan	33,5

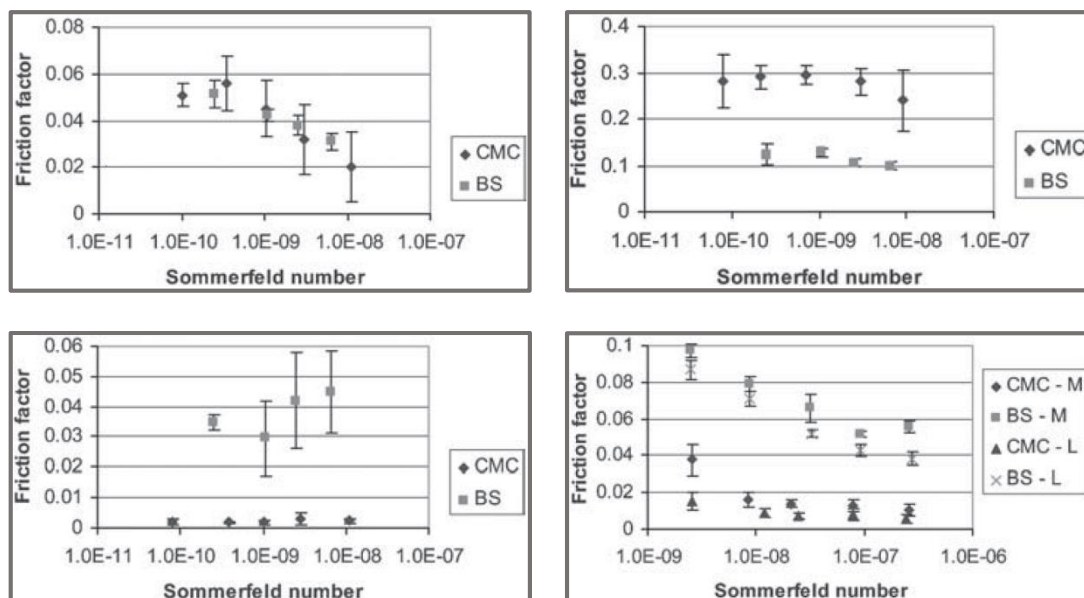
Tab. 7: Testované materiálové kombinace [37].

Výsledky

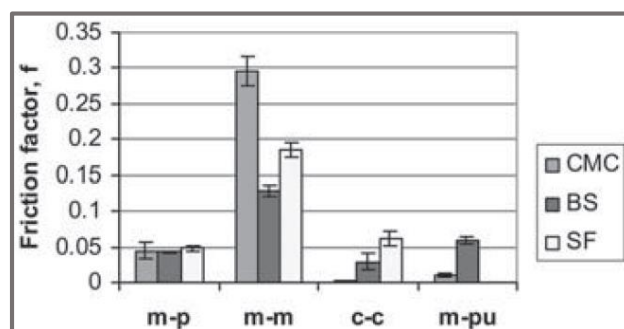
Naměřené hodnoty potvrdily elementární předpoklad, že použité mazivo má na naměřené hodnoty velice podstatný vliv. Tento jev je spojený především s adsorpcí proteinů, které jsou obsaženy v hovězím séru i synoviální kapalině. Proteiny přilnou na povrch náhrady a vytvoří tak určitou ochrannou vrstvu, která zabraňuje vzájemnému kontaktu povrchů. Jedná se tedy o pozitivní efekt, zejména pokud jde o snížení opotřebení.

Situace však není tak jednoznačná s ohledem na velikost součinitele tření, kdy může s ohledem na dosažené výsledky dojít jak k jeho snížení obr. 43 (vpravo nahoře), tak ke zvýšení, jak je vidět na obr. 43 (dole). Na 4 snímcích obr. 43 jsou vyneseny závislosti součinitele tření na Sommerfeldově čísle s ohledem na použité mazivo pro všechny materiálové kombinace uvedené v tab. 7. Zajímavý je také obr. 44, který rovněž srovnává součinitel tření pro různé materiálové kombinace při využití všech tří zmíněných maziv, která byla připravena v takové koncentraci, aby dynamická

viskozita odpovídala dynamické viskozitě fyziologické synoviální kapaliny a tedy, aby hodnoty byly mezi sebou porovnatelné.



Obr. 43: Závislost součinitele tření na Sommerfeldově čísle pro maziva CMC a hovězí sérum (BS) pro různé materiálové kombinace. Vlevo nahoře: CoCrMo-UHMWPE, vpravo nahoře: CoCrMo-CoCrMo, vlevo dole: oxid hlinitý-oxid hlinitý, vpravo dole: CoCrMo-Polyuretan (značka L – laterální komponenta, M – mediální komponenta) [37].



Obr. 44: Porovnání hodnot součinitele tření pro různé materiálové kombinace a různá maziva (SF – synoviální kapalina) [37].

Závěr

Problematika adsorpce proteinů je velice komplikovaná. Tato publikace se snaží přiblížit některé základní aspekty spojené s volbou modelové kapaliny na procesy tření a mazání. Z hlediska přístupu je třeba vyzdvihnout zejména snahu o dodržení kinematických a silových podmínek, které skutečně nastávají mezi povrchy kloubních náhrad během chůze člověka. Autoři dále diskutují skutečnost, že hovězí sérum je v současné době pravděpodobně nejpoužívanějším mazivem při snaze simulovat synoviální kapalinu, přesto by však bylo vhodné pracovat na modelové kapalině, která by kapalině synoviální odpovídala lépe. Kvalitu práce snižuje její zaměření pouze na hodnocení součinitele tření. Autoři sice zmiňují pozitivní vliv adsorpce proteinů z hlediska opotřebení, nicméně kvantifikace míry opotřebení není k dispozici.

- [38] YANG, C.-B., H.-W. FANG, H.-L. LIU, C.-H. CHANG, M.-C. HSIEH, W.-M. LEE a H.-T. HUANG. Frictional characteristics of the tribological unfolding albumin for polyethylene and cartilage. *Chemical Physics Letters*. 2006, vol. 431, 4-6, s. 380-384. DOI: 10.1016/j.cplett.2006.10.003.

Tento článek se zabývá vlivem konformačních změn albuminu na charakteristiky tření. Autoři se zaměřili na studium dvou materiálů. Nejprve na UHMWPE běžně používaný u kloubních náhrad a dále na umělou chrupavku, která byla vypěstována z biologických kultur kolenního kloubu čerstvě poraženého prasete (12 hodin po porážce). Tření bylo testováno v konfiguraci pin-on-plate (kolík-deska) při vzájemném recipročním pohybu.

Aby bylo možné porovnat vliv konformačních změn na součinitel tření, byl nejprve realizován experiment v konfiguraci UHMWPE pin vs. deska z nerezavějící oceli. Experiment probíhal za následujících podmínek: kontaktní tlak o velikosti $p = 3$ MPa, délka dráhy $x_{t1} = 19$ mm, průměrná skluzová rychlost $v_{t1} = 57,2$ mm/s, doba trvání experimentu $t = 24$ hodin. Mazivem byl roztok PBS s obsahem albuminu 12,6 mg/ml. Po ukončení testu byl roztok podroben biochemickým analýzám a extrahovaný albumin byl dále využit jako „použitý“ při dalších experimentech.

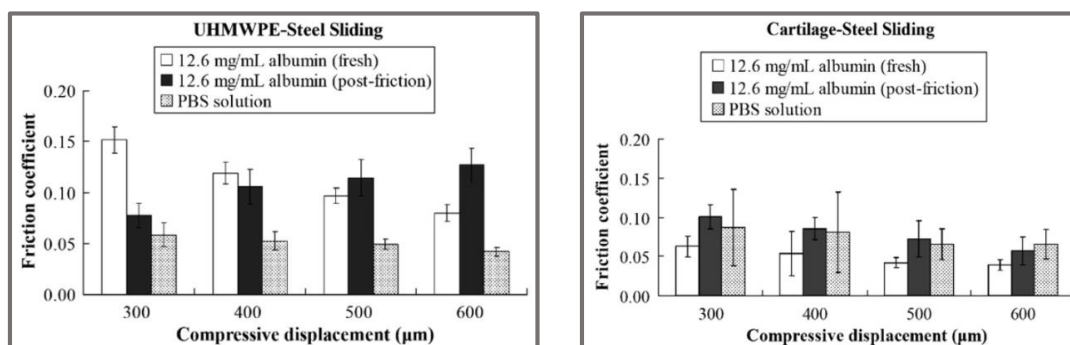
V případě druhé testované konfigurace byla na třecí plochu pinu navíc přilepena vrstva vypěstované chrupavky. Podmínky experimentů pro vlastní vyhodnocení vlivu konformačních změn byly následující: délka dráhy $x_{t2} = 5$ mm, počet cyklů $n = 50$, skluzová rychlost $v_{t2} = 20$ mm/s. Byla aplikována čtyři různá zatížení, rezultující v důsledku přitlačení pinu k desce o 300, 400, 500 a 600 μm . Odpovídající silové zatížení pro obě materiálové kombinace je uvedeno v tab. 8. Jako mazivo byly využity tři kapaliny: čistý roztok PBS, dále PBS + čerstvý albumin, konečně pak PBS + použitý albumin.

Přitlačení pinu	UHMWPE/nerez ocel			Chrupavka/nerez ocel		
	PBS +	PBS +	PBS +	PBS +	PBS +	PBS +
	Čerstvý Albumin	Použitý Albumin	-	Čerstvý Albumin	Použitý Albumin	-
300 [μm]	28,2 N	29,7 N	24,6 N	9,5 N	10,9 N	7,2 N
400 [μm]	53,3 N	52,8 N	45,3 N	13,3 N	14,6 N	8,0 N
500 [μm]	85,5 N	86,8 N	76,9 N	17,8 N	20,7 N	10,1 N
600 [μm]	124,3 N	119,4 N	113 N	24,7 N	29,4 N	13,5 N

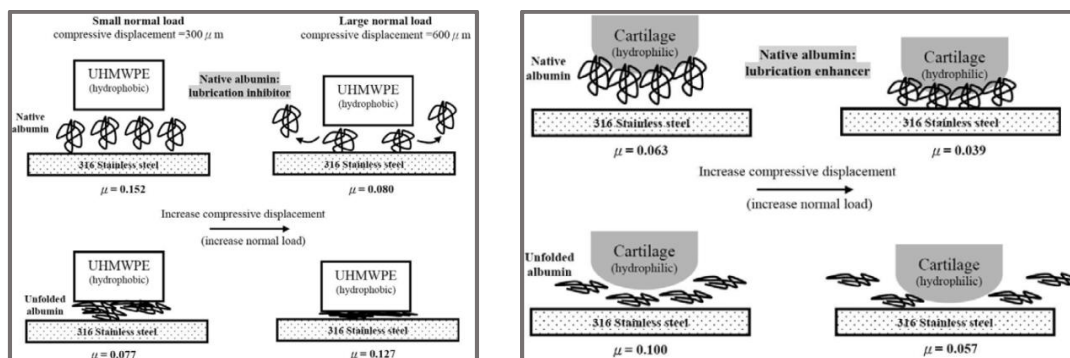
Tab. 8: Výsledné silové zatížení kontaktní dvojice s ohledem na stlačení kontaktu a použité mazivo [38].

Výsledky

Naměřené hodnoty součinitele tření ukázaly, že v případě kontaktní dvojice tvořené UHMWPE a ocelí je tření nejnižší při mazání kontaktu čistým roztokem PBS. Zajímavý je potom fakt, kdy v případě nižšího zatížení nastává nižší tření při použití již použitého albuminu, naopak při nárůstu zatížení nad určitou hodnotu se tření snižuje při aplikaci čerstvého albuminu. V případě chrupavky pak nejnižší tření nastává při použití roztoku PBS a čerstvého albuminu, bez ohledu na aplikované zatížení. Celkově nejsou rozdíly v součiniteli tření u chrupavky tak výrazné, jako u UHMWPE. Všechny výsledky jsou shrnuty na obr. 45. Autoři se dále pokusili ilustrovat vliv konformačních změn proteinu na tření na obr. 46.



Obr. 45: Závislost součinitele tření na velikosti přitlačení vzorků pro různá použitá maziva. Vlevo: UHMWPE-ocel, vpravo: chrupavka-ocel [38].



Obr. 46: Ilustrace vlivu konformačních změn albuminu na součinitel tření. Vlevo: UHMWPE-ocel, vpravo: chrupavka-ocel [38].

Závěr

Autoři provedli velice zajímavou studii s cílem stanovit vliv změny konformity proteinů obsažených v biologickém mazivu na součinitel tření. Z obr. 46 přitom plyne následující: na snímku vlevo je deklarováno, že v kontaktu UHMWPE/nerez ocel dochází se vzrůstajícím stlačením (zatížením) k poklesu tření, pokud je do maziva přidán čistý albumin a k nárůstu tření v případě, kdy je do PBS přidán albumin použitý. Z druhého snímku plyne, že v kontaktu chrupavky/nerez oceli se tření snižuje bez ohledu na použité mazivo. Zcela bezpochyby by bylo vhodné uvedenou studii dále rozšířit. Například objasnit podobný jev s ohledem na změny konformity γ -globulinu, který se rovněž nachází v synoviální kapalině, stejně jako v hovězím séru, které se

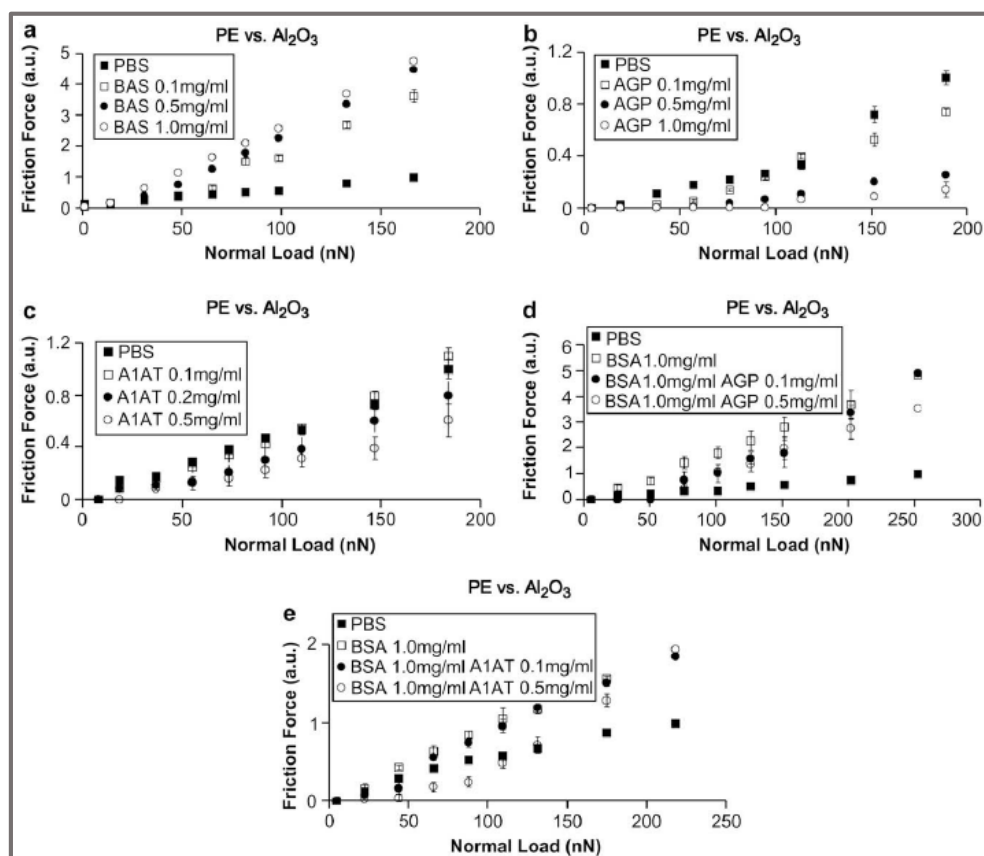
často používá jako její model. Stejně komplexní studie zaměřená na kombinaci obou proteinů s ohledem na různé koncentrace by mohla přinést velice důležité informace z hlediska formování proteinového filmu mezi komponentami umělých kloubních náhrad.

[39] **ROBA, M., M. NAKA, E. GAUTIER, N. D. SPENCER a R. CROCKETT.** The adsorption and lubrication behavior of synovial fluid proteins and glycoproteins on the bearing-surface materials of hip replacements. *Biomaterials*. 2009, vol. 30, issue 11, s. 2072-2078. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2008.12.062.

Práce je zaměřena na studium adsorpce proteinů obsažených v synoviální kapalině na povrchy umělých kloubních náhrad, konkrétně na UHMWPE a keramiku (Al_2O_3). K tomuto účelu byla využita metoda fluorescenční mikroskopie a gelová elektroforéza (SDS-PAGE). Dále byly provedeny testy tření na mikroúrovni na zařízení AFM a to mezi UHMWPE sondou a keramickým diskem za podmínek čistého prokluzu při teplotě 24 °C. Aplikované zatížení se pohybovalo od 0 do 250 nN. Byla využita různá maziva, jejichž základem byl opět roztok PBS, do něhož byly přidávány následující látky: albumin z hovězího séra (BSA), alfa-1-kyselý glykoprotein (AGP) a alfa-1-antitrypsin (A1AT), referenčním mazivem byl čistý roztok PBS.

Výsledky:

Ukázalo se, že v případě přidání albuminu do PBS došlo ke zvýšení tření mezi povrchy, podobný jev pozorovali i Yang a kol. v práci [38]. Autoři Roba a kol. připisují tento fakt denaturaci proteinů v důsledku vysokých hodnot smykového napětí. Naopak oba použité glykoproteiny (AGP, A1AT) překvapivě vedou ke zlepšení mazacích podmínek a tedy ke snížení tření, navzdory jejich nízké koncentraci (hodnoty koncentrací včetně kompletních výsledků z testu tření na zařízení AFM jsou uvedeny na obr. 47). Dobré mazací vlastnosti těchto glykoproteinů byly připsány adsorpci jejich hydrofobních řetězců na třecí povrchy, zatímco jsou hydrofilní uhlohydrátové zbytky vystaveny okolnímu vodnému roztoku a vytváří tak kapalinový film o nízké smykové pevnosti, který zlepšuje mazání kontaktu.



Obr. 47: Výsledky z testu tření na mikroúrovni na zařízení AFM [39].

Závěr

Autoři provedli studium adsorpce proteinů na površích, které se běžně využívají u umělých kloubních náhrad (UHMWPE, Al_2O_3). Zajímavá je souvislost s testy tření na mikroúrovni, kdy se potvrdil již dříve publikovaný fakt, že albumin přidáný do PBS vede ke zvýšení tření. Na druhé straně bylo tření pozitivně ovlivněno v případě přidání i malého množství glykoproteinů. Vlivem glykoproteinů se přitom ostatní autoři většinou nezabývají, a soustředí se na vliv albuminu a γ -globulinu. Pokud jde o publikované výsledky z oblasti adsorpce proteinů, nejsou uvedené informace a snímky jednoduše pochopitelné, případně interpretovatelné a jejich plné porozumění vyžaduje hlubší znalosti z oblasti biochemie a dále také znalost metody SDS-PAGE.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Problematika mazání kloubních náhrad je velice komplexní, přičemž z hlediska výzkumu je fundamentálním aspektem volba vhodného experimentálního přístupu. Na základě publikovaných informací [12], [13] se jako nejvhodnější jeví metoda založená na principu fluorescenční mikroskopie. Tato metoda totiž kromě stanovení tloušťky mazacího filmu (v řádu jednotek nanometrů až desítek mikrometrů) umožňuje:

- Analyzovat poddajné a neodrazivé materiály.
- Analyzovat povrchy bez zásadního ovlivnění měření jejich drsnostmi.
- Pozorovat charakter formování maziva v kontaktu.
- Pozorovat dílčí složky maziva a stanovit tak jejich vliv na procesy mazání.

Fluorescenční metoda byla v rámci tribologického výzkumu poprvé využita v 70. letech 20. století [18], [19]. Počáteční studie se soustředily na samotný princip metody; zabývaly se vlivem zdroje osvětlení, analyzovaly měřicí rozsah, přičemž v souvislosti s přesností a rozlišitelností metody byl velmi často zmiňován proces kalibrace. Na základě provedené kalibrace jsou totiž následně vyhodnocena naměřená data, proto je tato fáze naprosto zásadní. V průběhu let došli autoři prací k jasnému závěru, že kalibrace provedená na odlišné materiálové konfiguraci, než je samotný analyzovaný kontakt, může vzhledem k rozdílným optickým vlastnostem povrchů přinést výrazné zkreslení výsledků. Tento fakt částečně zpochybňuje data publikovaná dříve, než byla tato skutečnost prokázána. Z hlediska kalibrace je také velmi důležitá lineární závislost tloušťky maziva na intenzitě emitovaného záření [25], [26], přičemž bez této znalosti by bylo velice obtížné jakékoliv kvantitativní posouzení výsledků.

Významné zdokonalení z hlediska přesnosti, respektive rozlišitelnosti metody přinesli ve svých pracích Hidrovo a Hart [23], [24], kteří zavedli princip laserem indukované fluorescence s duální emisí (dual emission laser induced fluorescence - DELIF) a také aplikovali poměrný přístup založený na reabsorpci emise laserem indukované fluorescence (emission reabsorption laser induced fluorescence - ERLIF). Oba tyto přístupy činí z uvedené metody velmi robustní a přesný nástroj z hlediska experimentální validace, nicméně, zejména z důvodu komplikovanosti optické soustavy jiní autoři na tyto publikace v oblasti tribologie doposud nenašli návaznost.

V posledních letech se aplikací fluorescenční metody zabývají především výzkumní pracovníci univerzity Imperial College. Zde se autoři studií zabývají mimo jiné pozorováním charakteru formování maziva [17], případně in-situ studiem mazání poddajných kontaktů [14]. Je přitom jasně uvedeno, že fluorescenční metoda poskytuje velmi široké možnosti využití a může tak výrazným způsobem přispět k objasnění tribologických jevů jak v oblasti technické, tak biologické.

Oblast analýzy mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu je jednou z relativně nových oblastí tribologického, respektive biotribologického výzkumu. Na přelomu tisíciletí Jalali-Vahid a kol. publikovali práce zabývající se teoretickou predikcí tloušťky filmu mezi komponentami kloubních náhrad [27], [28]. Přestože autoři ve svých modelech zohledňují mimo jiné reálnou konformitu komponent (model ball-on-socket), je prakticky vyloučené do těchto modelů zahrnout skutečné vlastnosti biologických maziv. Sice jsou známa data týkající se viskozity těchto kapalin, nicméně pozdější práce dokazují, že z hlediska tloušťky mazacího filmu je velmi důležitá adsorpce proteinů na třecí povrchy. Biologická maziva navíc svým chováním odpovídají modelu smykového řídnutí (shear thinning). Z uvedených

důvodů jsou případné numerické studie velice komplikované a je tak třeba se orientovat spíše experimentálně.

Kvantifikaci tloušťky mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu s ohledem na různé kinematické, silové, teplotní podmínky a různé modelové kapaliny se zabývají práce [29] - [36]. Ve všech těchto studiích je mazací film analyzován pomocí optické interferometrie. Tato metoda je schopná velice přesně stanovit tloušťku mazacího filmu. Nicméně v případě mazání biologickými kapalinami je mazací film silně nehomogenní, což činí proces vyhodnocení obtížnějším, než je tomu při mazání oleji. Dále, tento přístup poskytuje jen omezené možnosti, pokud jde o pozorování formování proteinového filmu. Je sice možné pozorovat určité shluky proteinů procházející kontaktem, avšak nelze rozlišit jednotlivé složky maziva, stejně jako pozorovat jejich adsorpci na třecí povrchy v reálném čase.

Poslední část současného stavu poznání se snaží alespoň stručně přiblížit problematiku chování modelové kapaliny v kontaktu. Z tohoto pohledu je naprosto zásadní adsorpce proteinů na třecí povrchy. Problematikou adsorpce, jakožto chemickým procesem, se zabývá velké množství autorů. Nicméně ve vztahu k tribologickým aspektům kloubních náhrad prozatím informace nejsou úplné a počet publikací není vysoký. Proto byly vybrány tři práce, které jsou z pohledu autora pojednání důležité a mohou přispět k úspěšnému splnění cílů disertační práce. Práce [36] deklaruje, že na adsorpci má významný vliv už pouze použitý materiál náhrady (keramika/kov). Scholes a Unsworth ve své práci [37] přitom dále prokázali, že adsorpce může tření mezi povrchy ovlivnit jak pozitivním, tak negativním způsobem.

Z hlediska adsorpce jsou podstatné i konformační změny proteinů, které nastávají v důsledku zatížení, případně termálních efektů. Výzkum v této oblasti však dosud nepřinesl dostatečné množství informací, které by bylo možné zobecnit například z hlediska používaných materiálových kombinací náhrad. Pilotní studii provedl Yang [38], přičemž je třeba tuto práci brát jako určitou inspiraci pro další výzkum.

Dalším bodem, který je třeba zmínit, je samotný model kontaktní dvojice využívaný v laboratorních podmínkách. Autoři často využívají konfiguraci ball-on-disc, kde dochází ke kontaktu nekonformních povrchů a nastávají tak podmínky elastohydrodynamického mazání. Kloubní náhrady však vykazují vysoký stupeň konformity, což vede mimo jiné k podstatnému snížení kontaktního tlaku. Důležitá je také reálná radiální vůle mezi komponentami, která může výrazně ovlivnit tloušťku mazací vrstvy. Tento fakt je autory zmiňován jako určitý limit při snaze přenést experimentální výsledky na reálnou situaci [35], [36], nicméně z hlediska předběžných výsledků je i výše uvedená experimentální konfigurace velmi přínosná a může přispět k získání nových poznatků.

Na základě provedené kritické rešerše lze konstatovat, že doposud nebyla provedena studie, která by se zabývala charakterem formování mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu z hlediska vlivu jednotlivých složek modelové kapaliny. Využití fluorescenční metody přitom v případě volby vhodných barviv umožňuje separovat jednotlivé komponenty maziva a může tak v této oblasti přinést nové informace a přispět k dalšímu vývoji kloubních náhrad.

Toto pojednání se nezabývá podrobnou analýzou problematiky opotřebení komponent kloubních náhrad. Kvantifikace míry opotřebení je sice zcela jistě podstatná z hlediska životnosti náhrady, nicméně disertační práce je primárně zaměřena na analýzu utváření mazacího filmu, proto nejsou publikace zabývající se opotřebením detailně popsány.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

5.1 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je provést experimentální analýzu in situ utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu mazaném modelovou synoviální kapalinou s využitím optické měřicí metody založené na principu fluorescenční mikroskopie. Důraz přitom bude kladen na objasnění role jednotlivých složek maziva na utvářený film.

Úspěšné splnění cíle disertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- Odladit experimentální metodu na principu fluorescenční mikroskopie pro stanovení rozložení tloušťky maziva v kontaktu.
 - Modifikovat experimentální aparaturu.
 - Replikovat experimenty realizované v pracích [35], [36] pro prokázání validity výsledků získaných pomocí nové metody.
- Navrhnout metodiku vyhodnocení procesu formování mazacího proteinového filmu v náhradách kyčelního kloubu.
 - Provést sérii měření za proměnných experimentálních podmínek při využití různých modelových kapalin.
 - Navrhnout způsob experimentálního pozorování adsorpce proteinů na třecí povrchy.
 - Provést pozorování proteinových agregací s cílem objasnit proces adsorpce jednotlivých proteinů na rozdílné typy povrchů.
 - Provést pozorování utváření proteinového filmu a objasnit vliv jednotlivých složek modelové kapaliny na charakter formování maziva, tloušťku filmu a součinitel tření mezi povrchy.
- Vyhodnotit experimenty, porovnat výsledky s dosud publikovanými daty a zobecnit získané poznatky na reálnou situaci.

5.2 Vědecká otázka

Jakým způsobem ovlivňují dílčí složky modelové kapaliny utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu za různých kinematických, silových a teplotních podmínek?

5.3 Pracovní hypotéza

Tloušťka mazacího filmu bude narůstat se zvyšující se koncentrací γ -globulinu při současně snižující se koncentraci albuminu v modelové kapalině, přičemž bude docházet ke zlepšení mazacích podmínek. V případě, kdy bude mazivo obsahovat pouze γ -globulin, bude tloušťka adsorbované vrstvy narůstat se vzrůstající unášivou

rychlostí, respektive valivou či skluzovou vzdáleností. Oproti tomu, mazivo obsahující samotný albumin bude formovat tenký mazací film a bude docházet ke zhoršení mazacích podmínek mezi povrchy.

Na základě již provedených experimentů lze dále predikovat, že v případě maziva obsahujícího kombinaci obou proteinů ve fyziologické koncentraci bude tloušťka adsorbované vrstvy podobná, jako v případě samotného γ -globulinu, tření mezi povrchy však bude vyšší v důsledku zvýšené smykové pevnosti vrstvy maziva dané přítomností albuminu.

Dále lze předpokládat, že zvyšující se zatížení povede k redukci tloušťky maziva. Změna teploty z 22 na 37 °C by neměla mít na výsledky výrazný vliv. Pokud však k určité změně dojde, dají se větší rozdíly očekávat u modelových kapalin s vyšším obsahem proteinů, kdy může dojít k jejich denaturaci.

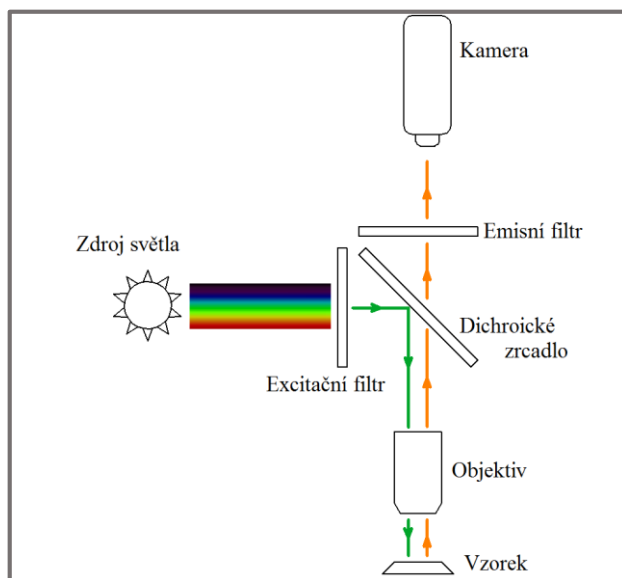
5.4 Návrh způsobu řešení

Na základě vyslovené pracovní hypotézy budou navrženy série měření při konkrétních experimentálních podmínkách. Princip získání dat je tak založen na procesu empirické evidence. Data budou následně podrobena statistickému zpracování, přičemž na jejich základě bude možné přinést odpověď na položenou vědeckou otázku. Jelikož jedním z cílů je přenést informace získané z modelové situace na situaci reálnou, bude dále třeba aplikovat proces indukce.

Měřicí metoda

Pro možnost provedení experimentů je třeba implementovat experimentální metodu na principu fluorescenční mikroskopie, schematicky znázorněné na obr. 48. Fluorescenční jev definoval mimo jiné Haugland a kol. [40] jako jev, který nastává ve třech fázích:

- *Excitace* – foton, který je excitován žhavicí lampou nebo laserem, je absorbovaný fluorescenčním barvivem, nastává fáze rozrušeného pohybu molekuly.
- *Fáze rozrušeného pohybu* – molekula setrvává v tomto stavu přibližně 1 až 10 ns, během této doby podstupuje excitované barvivo určitou formu relaxace (dochází k disipaci energie), následně může fluorescenční barvivo emitovat záření.
- *Emise* – vzhledem k disipaci energie během *fáze rozrušeného pohybu* má foton vyzařovaný barvivem nižší energii, tedy větší vlnovou délku. Tento rozdíl v hodnotách vlnových délek je známý jako Stokesův posun, který je z hlediska možné separace excitace a emise naprosto zásadní (umožňuje definovat výtěžek fluorescence).



Obr. 48: Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie.

Experimentální aparatura

Experimenty nutné pro splnění cílů disertační práce jsou realizovány na tribometru, který simuluje kontakt nekonformních povrchů mezi kuličkou (kov, keramika) a skleněným diskem, obr. 49. Při kontaktu nekonformních povrchů nastávají obvykle podmínky EHD mazání, kdy v důsledku působícího zatížení dochází k nezanedbatelným elastickým deformacím povrchů a dále dochází ke změně viskozity maziva v kontaktu [41].

Zatížení je realizováno pákovým mechanismem, který přitlačuje disk na kuličku. První regulovatelnou veličinou je tak zatěžující síla. Oba elementy (kulička, disk) jsou samostatně řízeny pomocí servomotorů a je tedy možné aplikovat různé kinematické podmínky (rozdílné rychlosti, rozdílné stupně prokluzu). Celou komoru, v níž dochází ke kontaktu těles je dále možné temperovat a dosáhnout tak požadované teploty měření.

Jelikož tloušťka mazacího filmu zcela prokazatelně souvisí i se součinitelem tření, budou provedena doplňková měření na komerčním zařízení Mini Traction Machine (MTM) pro verifikaci či falzifikaci faktů vyslovených v rámci pracovní hypotézy. MTM zařízení využívá taktéž konfigurace ball-on-disc a bude tedy možné aplikovat stejné experimentální podmínky jako na optickém tribometru.

Vyhodnocení výsledků měření

Vzhledem k principu metody je evaluace výsledků spojena s problematikou zpracování obrazu. Zjednodušeně bude vyhodnocení provedeno ve dvou krocích:

- 1) Pořízení kalibračního snímku, ze kterého je na základě znalosti povrchu kalibračního vzorku získána kalibrační křivka, která různým intenzitám pixelů přiřadí odpovídající tloušťku vrstvy maziva.
- 2) Aplikace získané kalibrační křivky na zvolenou oblast pro libovolné množství snímků.

Spolupráce s jinými institucemi

Z důvodu lepší orientace v problematice adsorpce proteinů byla navázána spolupráce s Kyushu University, kde je tomuto tématu věnována značná pozornost v rámci biotribologického výzkumu.

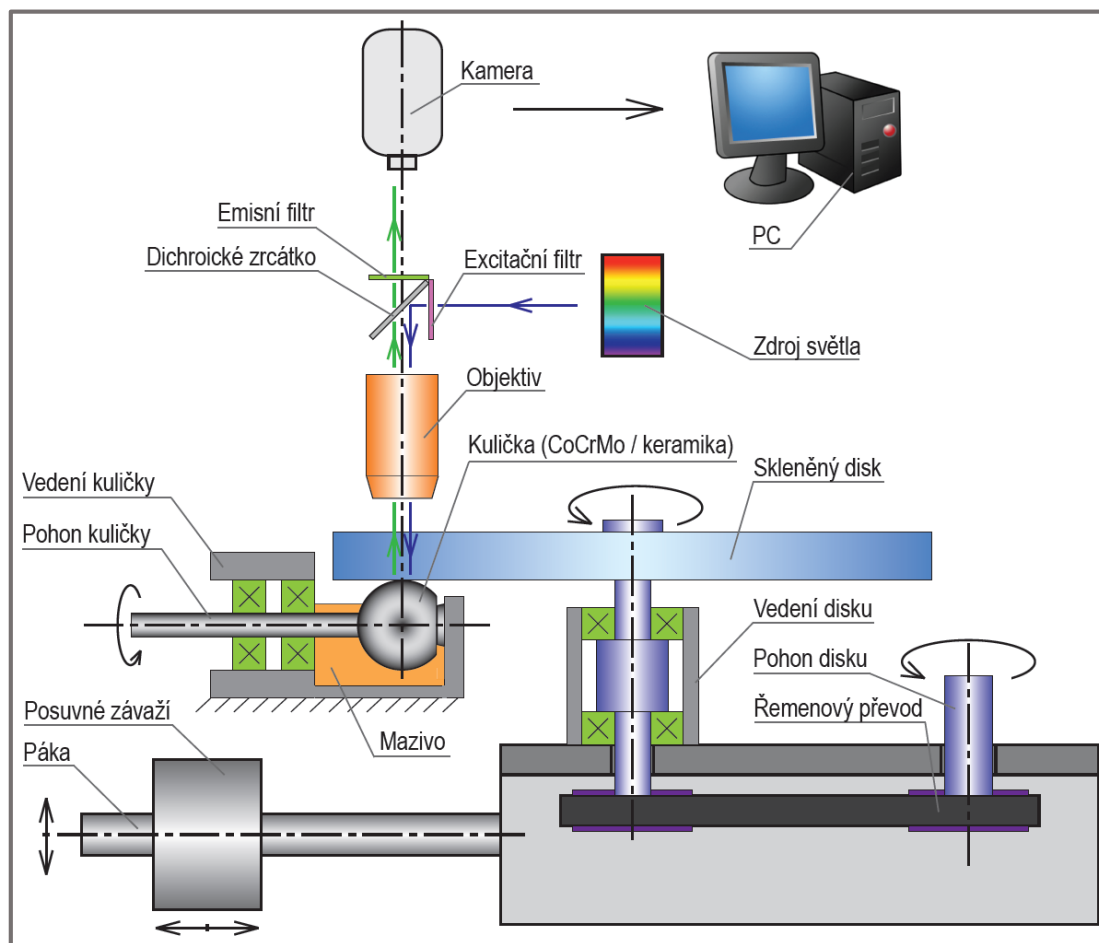
S ohledem na podstatu vyhodnocení měřených dat byla dále navázána spolupráce s Ústavem matematiky, FSI VUT v Brně.

Otázka přípravy modelových maziv, konzultace nastalých jevů z hlediska biologie a medicíny je předmětem spolupráce s pracovníky Fakultní nemocnice Olomouc.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

6.1 Modifikace experimentální aparatury

Jelikož uvedená měřicí metoda doposud nebyla na pracovišti řešitele disertační práce využívána, bylo nutné nejprve zvolit vhodné prvky celého měřicího řetězce. Měřicí řetězec se skládá ze simulátoru kontaktu, fluorescenčního mikroskopu, zdroje osvětlení, záznamového a vyhodnocovacího zařízení, viz obr. 49.



Obr. 49: Schéma měřicí aparatury.

Dostupné experimentální zařízení vyžadovalo z hlediska konstrukce provedení jen drobných úprav s ohledem na možnost dávkování maziva přímo do dráhy kontaktu a také pro možnost pohodlnější manipulace se skleněným diskem.

Důležitou součástí fluorescenčního mikroskopu jsou optické bločky, které se skládají ze tří částí: excitační filtr, dichroické zrcadlo a emisní filtr. Po dohodě s dodavatelem byl mikroskop vybaven 4 optickými filtry pro pokrytí celého viditelného spektra. Zároveň byl také pořízen trojnásobný optický filtr, který umožňuje pozorovat až tři rozdílná fluorescenční barviva najednou a může tak výrazně přispět při studiu role jednotlivých komponent modelové biologické kapaliny. Osvětlení kontaktu může být realizováno buď rtuťovou lampou, nebo laserem o vlnové délce $\lambda = 532$ nm, který může pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. Jako

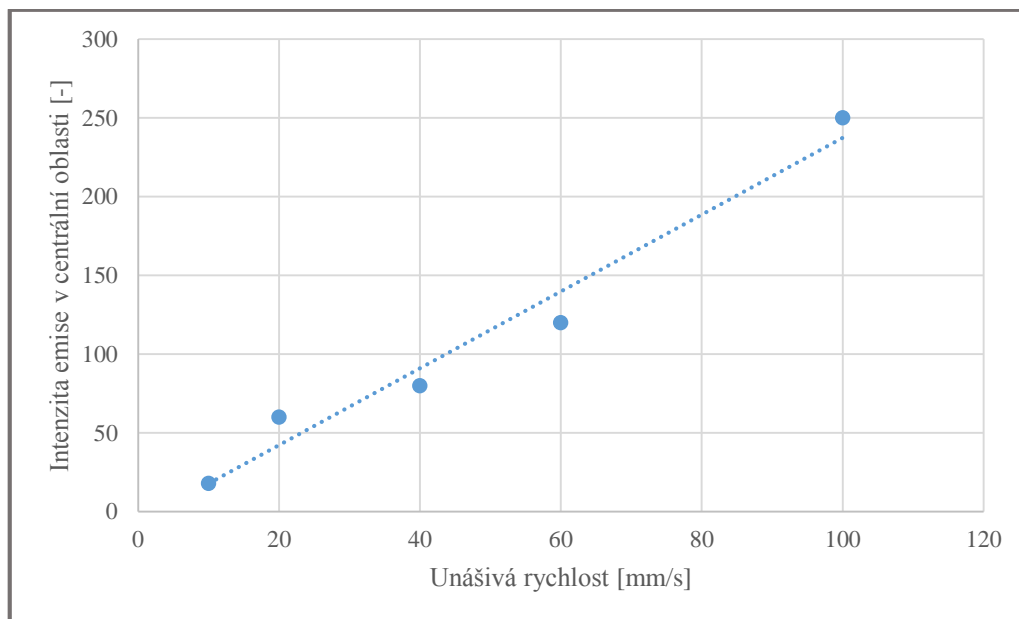
záznamové zařízení slouží vysokorychlostní monochromatická sCMOS kamera, která by měla poskytnout optimální obraz pozorované oblasti. Vyhodnocovacím zařízením je běžný osobní počítač. Jelikož bylo v průběhu provedených testovacích experimentů zjištěno, že na měření má významný vliv mimo jiné i okolní světlo, byla celá měřicí stanice (kromě počítače) dovybavena jednoduchou konstrukcí umožňující její plné zakrytí.

6.2 Odladění měřicí metody pro stanovení tloušťky filmu

Konečná sestava popsaná v přecházející podkapitole je důsledkem dlouhodobého procesu a vznikala iterativně na základě průběžně prováděných měření. Snahou prvních provedených experimentů bylo prokázat lineární závislost centrální tloušťky filmu na unášivé rychlosti [42]. Za tímto účelem byl navržen následující experiment.

Cíl experimentu:	Kvalitativní posouzení centrální tloušťky filmu v kontaktu s cílem prokázat lineární závislost tloušťky maziva na unášivé rychlosti.
Konfigurace:	CoCrMo kulička o průměru $d = 28$ mm, skleněný disk.
Mazivo:	PAO 6, dynamická viskozita $\eta = 0,054$ Pa·s, celkový objem $V = 10$ ml.
Fluorescenční barvivo:	Eosin Y.
Zatížení:	$F = 5$ N.
Kontaktní tlak:	$p = 281,3$ MPa.
Teplota:	$T = 22$ °C.
Poměr prokluz/valení:	SRR = 0 % (čisté valení).
Čas trvání experimentu:	$t = 300$ s.
Unášivá rychlost:	$u_1 = 10, u_2 = 20, u_3 = 40, u_4 = 60, u_5 = 100$ mm/s.
Pozorovaná proměnná:	Intenzita emise centrální oblasti kontaktu v čase $t = 250$ s.

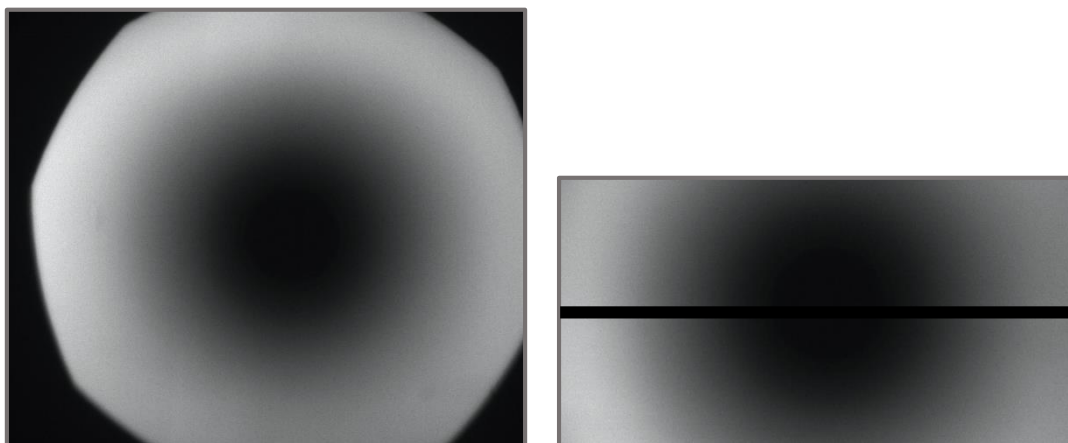
Měření bylo v tomto případě pouze kvalitativní. Na základě předpokladu lineární závislosti mezi tloušťkou filmu a intenzitou emise [25], [26] tak byla intenzita uvažována jako bezrozměrný parametr definující tloušťku filmu. Nejprve byl realizován experiment při nejvyšší uvažované rychlosti 100 mm/s s cílem nastavit parametry snímání pro největší předpokládanou tloušťku filmu. Z hlediska porovnatelnosti kvalitativního posouzení je totiž nutné dodržet stejné nastavení optické soustavy pro všechna měření. Na základě provedených experimentů byla získána následující závislost, obr. 50. Výsledky první fáze ladění, stejně jako detailní popis principu metody byl prezentován na mezinárodní konferenci 54th International Conference of Machine Design Departments, konané v 10. – 12. září 2013 v Hejnicích, v České republice.



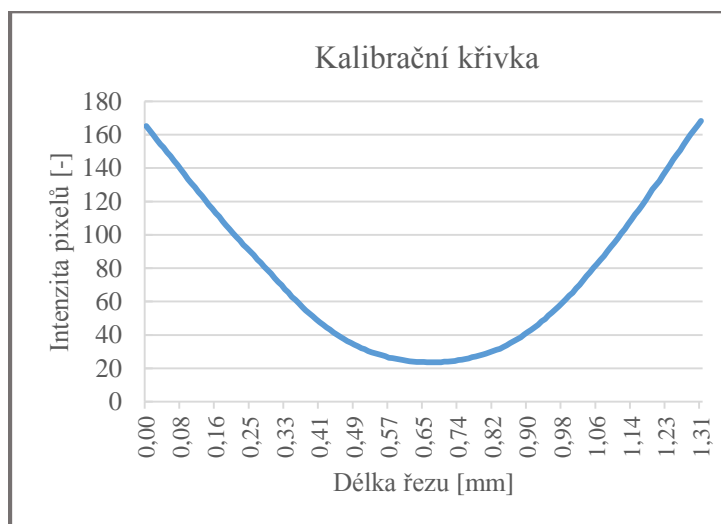
Obr. 50: Výsledná závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti

Závislost sice není perfektně lineární, jednalo se však o předběžná měření, proto lze na základě získaných dat předpokládat, že měřicí řetězec je správně sestavený a metoda tak může přinést relevantní výsledky. Jelikož parametry kamery nebyly s ohledem na další plánované experimenty dostačující (nízká snímkovací frekvence, nepřilíš kvalitní obraz), bylo následně rozhodnuto o dovybavení aparatury o výše zmíněnou sCMOS kameru. Společně s kamerou byl také pořízen laser pro možnost volby typu osvětlení. Aparatura je tak v současné době kompletně sestavena, a přestože prozatím nebyly provedeny žádné kvantitativní experimenty, s ohledem na kalibrační snímky, které se podařilo opakovaně získat, levá část obr. 51, lze konstatovat, že je metoda odladěna z hlediska možnosti stanovení tloušťky maziva v kontaktu. Jak již bylo zmíněno, kalibrace jako taková je totiž fundamentálním aspektem korektnosti provedeného měření. Dosažená kalibrační křivka na základě řezu kalibračním snímkem (obr. 51 vpravo), je zobrazena na obr. 52.

V té souvislosti byla za pomoci prof. RNDr. Miloslava Druckmüllera, CSc. vytvořena první verze software pro vyhodnocení dat s pracovním názvem Film1. Software nejprve analyzuje vybranou oblast z hlediska intenzity pixelů. Následně je automaticky exportována tabulka, kterou uživatel doplní na základě parametrů kontaktní oblasti a přiřadí tak jednotlivým hodnotám intenzit danou tloušťku vrstvy maziva (ze znalosti tvaru plochy kalibračního vzorku). Modifikovaná tabulka je následně opětovně načtena do pracovního prostředí a software provede analýzu zvolené kontaktní oblasti libovolného počtu snímků, přičemž výsledkem je jedna hodnota centrální tloušťky filmu pro každý snímek. V budoucnu bude software dále upraven, aby nebyl nutný zásah uživatele (přiřazení tloušťky intenzitě). Jeho jediným úkolem tak bude definovat oblast na kalibračním snímku a oblast kontaktu na snímcích, které mají být vyhodnoceny.



Obr. 51: Vlevo: Kalibrační snímek. Vpravo: Detail kontaktní oblasti včetně zobrazení řezu pro kalibraci.



Obr. 52: Kalibrační křivka odpovídající řezu na detailu předchozího snímku.

Limitace metody

V průběhu prováděných měření dochází k postupnému objevování určitých limitací, respektive problémů, které však nepochybně nastávají vždy při zavádění nové měřicí metody. Největší komplikací je vysoká citlivost optické soustavy na jakýkoliv vnější světelný zdroj (umělé osvětlení v laboratoři, přirozené ve formě slunečních paprsků). Dochází tak k výrazným fluktuacím v měřeném signálu. Bylo proto rozhodnuto o kompletním zakrytí celé aparatury, aby byl tento efekt eliminován.

Dalším problémem je vznikající interference, na kterou upozornili už Sugimura a kol. [22]. Tento jev má také souvislost s okolním světlem. Bylo zjištěno, že interferenci lze částečně snížit (nikoliv však plně odstranit) při využití laseru jako zdroje osvětlení. Významně je také interference ovlivněna koncentrací barviva přidaného do základního maziva. Předmětem dalšího studia proto bude stanovení optimální hmotnostní koncentrace, aby interference byla potlačena na nejnižší možnou úroveň a neznemožňovala tak provedení kalibrace.

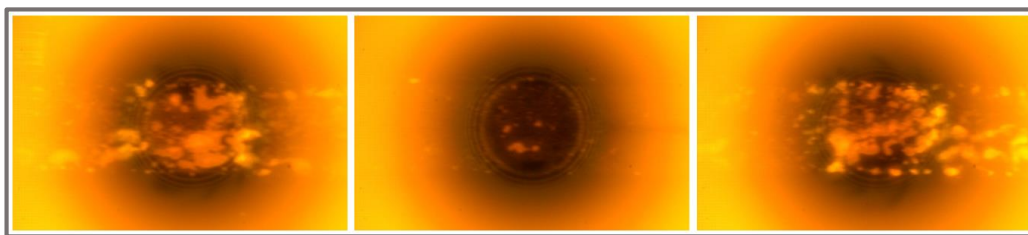
Problematické je také vysvěcování barviva s časem při kontinuálním osvětlení. Tento fakt zmínili již Ford a Foord v práci [19]. Řešením je volba barviv s velmi

dobrou trvanlivostí, přičemž nezbytná je v tomto případě další diskuse s výzkumníky z oblasti chemie a biochemie. Pomoci také může využití laseru v pulzním režimu jako zdroje osvětlení.

6.3 Předběžné výsledky pozorování adsorpce proteinů

V druhé fázi bylo třeba ověřit využitelnost metody z hlediska pozorování vybraných komponent modelového maziva. Vzhledem k nedostatečné snímkovací frekvenci použité kamery nebylo možné pozorovat adsorpci v reálném čase. Nicméně bylo možné pozorovat vrstvu adsorbovanou na skleněném disku na konci proběhnutého experimentu. Podmínky experimentu, na jehož konci byla snímána dráha adsorbovaného filmu, byly následující.

Cíl experimentu:	Pozorování adsorpce albuminu značeného fluorescenčním barvivem. Adsorpce byla pozorována na dráze disku.
Konfigurace:	CoCrMo kulička o průměru $d = 28$ mm, skleněný disk.
Mazivo:	Hovězí sérum 25 % (9 ml) + označený albumin z hovězího séra (koncentrace proteinu 5,7 mg/ml), (1 ml), celkový objem $V = 10$ ml.
Fluorescenční barvivo:	Tetramethylrhodamin-B-isothiocyanate
Zatížení:	$F = 5$ N.
Kontaktní tlak:	$p = 281,3$ MPa.
Teplota:	$T = 22$ °C.
Poměr prokluz/valení:	SRR = 0 % (čistě valení).
Čas trvání experimentu:	$t = 300$ s (pozorování proběhlo po skončení experimentu).
Unášivá rychlost:	$u = 20$ mm/s.
Pozorovaná proměnná:	Adsorpce albuminu na skleněném disku v čase 350 – 500 s (jedna otáčka disku o 360 °).



Obr. 53: Pozorovaná adsorpce albuminu na skleněném disku v čase; zleva: 350 s, 425 s, 500 s.

Díky tomuto relativně jednoduchému experimentu byla ověřena možnost využití metody při pozorování fluorescenčně označených komponent modelového maziva. V centrální části snímků na obr. 53 je zřejmá kontaktní oblast. Adsorpce byla snímána v průběhu jedné otáčky disku, časy 350 a 500 s tak odpovídají téměř totožnému místu. Právě v tomto místě započalo dávkování maziva při předchozím experimentu, proto je adsorpce v této oblasti výraznější, než ta v čase 425 s, což odpovídá místu na protilehlé straně dráhy maziva.

Zajímavé bylo zjištění při snaze pozorovat adsorpci po odstranění disku také na CoCrMo kuličce. V tom případě nevykazovala pozorovaná oblast žádné stopy adsorpce. Na základě literatury bylo zjištěno, že chróm se chová jako takzvaný zhášec

fluorescence (angl. quenching), proto bude velmi složité na tomto povrchu adsorpci pozorovat [43]. S tímto faktem souvisí jeden z dílčích cílů práce a to je navržení způsobu vyhodnocení adsorpce na třecích površích. Zároveň by efekt zhášení měl být znatelný jen do vzdálenosti jednotek až několika málo desítek nanometrů od povrchu, proto by neměla být výrazně ovlivněna měřená tloušťka mazacího filmu v kontaktu.

6.4 Studijní stáž

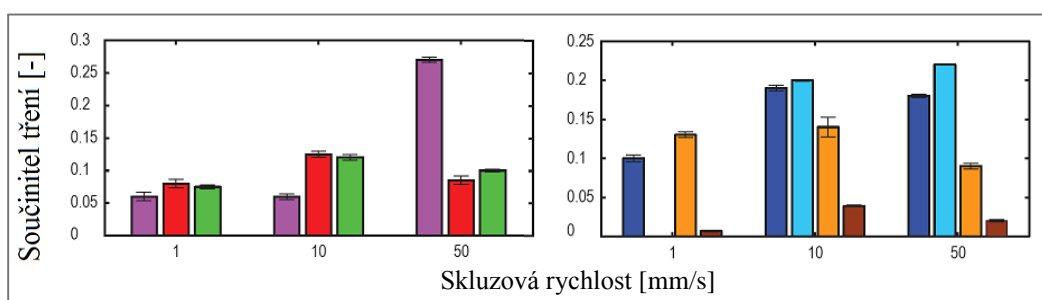
Na konci prvního ročníku studia řešitel absolvoval studijní stáž na Kyushu University v Japonsku v délce trvání 10 týdnů. Cílem této stáže bylo blíže se seznámit s problematikou adsorpce proteinů na třecí povrchy, získat znalosti v oblasti fluorescenčního značení proteinů, míchání modelových maziv a v neposlední řadě pracovat na společném výzkumném programu.

V průběhu této stáže byla provedena série experimentů v konfiguraci pin-on-plate. Předmětem studia bylo *ex situ* kvalitativní a kvantitativní posouzení proteinového mazacího filmu v kontaktu dvou těles z materiálů běžně využívaných u náhrad kyčelního kloubu (CoCrMo, UHMWPE). Kvantitativní posouzení spočívalo v determinaci tloušťky adsorbované vrstvy pomocí optické metody zvané elipsometrie, kvalitativní potom v pozorování této vrstvy na fluorescenčním mikroskopu. Současně byl analyzován součinitel tření v kontaktu uvedených těles. Podmínky experimentu jsou shrnuty v následujícím přehledu.

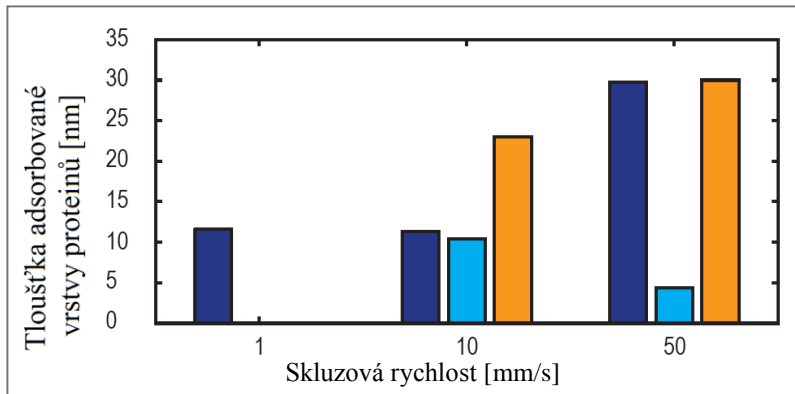
<i>Cíl experimentu:</i>	Kvalitativní a kvantitativní posouzení proteinového mazacího filmu v kontaktu dvou těles při využití různých modelových kapalin. Stanovení součinitele tření v kontaktu v závislosti na skluzové rychlosti.
<i>Konfigurace:</i>	CoCrMo pin o poloměru křivosti $r = 200$ mm, UHMWPE destička.
<i>Mazivo:</i>	Všechna použitá maziva jsou shrnuta v tab. 9.
<i>Fluorescenční barvivo:</i>	RBITC – albumin FITC – γ -globulin
<i>Zatížení:</i>	$F = 9,8$ N.
<i>Kontaktní tlak:</i>	$p = 3,7$ MPa.
<i>Teplota:</i>	$T = 22$ °C.
<i>Poměr prokluz/valení:</i>	SRR = 200 % (čistý prokluz – reciproční pohyb).
<i>Čas trvání experimentu:</i>	$t = 3\ 600$ s.
<i>Skluzová rychlost:</i>	$v_{t1} = 1$, $v_{t2} = 10$, $v_{t3} = 50$ mm/s.
<i>Pozorovaná proměnná:</i>	Tření v kontaktu pin-on-plate, tloušťka adsorbované vrstvy, kvalitativní posouzení proteinového filmu po provedeném experimentu.

Složka							
PBS	+	+	+	+	+	+	+
Albumin	+	-	-	+	+	-	-
γ -globulin	+	-	+	-	-	+	-
Fluorescenčně značený albumin	-	+	+	-	-	-	-
Fluorescenčně značený γ -globulin	-	+	-	+	-	-	-
Barva reprezentující mazivo v grafu	■	■	■	■	■	■	■

Tab. 9: Modelové kapaliny použité při měřeních.



Obr. 54: Závislost součinitele tření na skluzové rychlosti; vlevo: značené proteiny, vpravo: neznačené proteiny



Obr. 55: Závislost tloušťky adsorbované vrstvy na skluzové rychlosti

Na základě experimentů provedených v rámci studijní stáže bylo zjištěno (obr. 54, obr. 55), že mazivo obsahující pouze γ -globulin vytváří při vyšších rychlostech relativně tlustou vrstvu, která dostatečně oddělí artikulující plochy a vede tak ke snížení tření. Oproti tomu, albumin formuje při stejné rychlosti vrstvu tenkou v řádu jednotek nanometrů a součinitel tření narůstá. Zajímavý je také případ, kdy jsou použity oba zmíněné proteiny dohromady. Tehdy je sice díky přítomnosti γ -globulinu adsorbovaná vrstva relativně tlustá, nicméně v důsledku současné přítomnosti albuminu se zvýší její smyková pevnost a nedochází tak k výraznému snížení tření. Dále bylo prokázáno, že v případě fluorescenčně značených proteinů součinitel tření při vyšších rychlostech výrazně narůstá, což je pravděpodobně spojeno s určitými

konformačními změnami proteinů v průběhu jejich značení. Tento jev je předmětem dalšího výzkumu.

Studijní stáž výrazně rozšířila znalosti řešitele z hlediska složení modelových kapalin a vlivu proteinů na mazací film. Hodnoty tloušťky adsorbované vrstvy jsou však stanoveny až po dokončení měření, tedy ex-situ, a nelze tak tuto hodnotu zaměřit s tloušťkou maziva v kontaktu, která může být řádově jiná. Konfigurace CoCrMo-UHMWPE však neumožňuje pozorování in situ, jelikož ani jeden z materiálů není transparentní. Přesto získané znalosti výrazně pomohly při tvorbě dílčích pracovních hypotéz.

Druhým významným přínosem stáže byl návrh formy pro vytvoření polyvinyl alkohol (PVA) hydrogelu ve tvaru acetabulární jamky. Tento materiál je v současné době předmětem diskusí výzkumníků při snaze vyvinout umělou kloubní chrupavku. Vytvořené vzorky byly následně odeslány na pracoviště řešitele, kde byl analyzován součinitel tření mezi keramickou kloubní hlavicí a hydrogelovou jamkou na simulátoru na principu kyvadla při respektování reálné konformity obou kontaktních povrchů.

Výsledkem této stáže a následných měření na FSI VUT v Brně jsou tak dva společné příspěvky na mezinárodní biotribologické konferenci International Conference on BioTribology 2014 konané 11. – 14. května 2014 v Torontu, v Kanadě.

V rámci samotné stáže byla pak problematika disertační práce navíc představena v rámci příspěvku na konferenci Joint Forum of 2nd Japan-Singapore Exchange Seminar & ICT Farm Project, konané 16. – 17. srpna 2014 v oblasti Kuju v Japonsku.

7 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současné poznatky v oblasti mazání náhrad kyčelního kloubu. Práce se v přehledu současného stavu poznání do značné míry zabývá optickou metodou založenou na principu fluorescenční mikroskopie, která doposud není implementována na pracovišti řešitele a musí tak být kompletně odladěna v rámci tvorby disertační práce. Detailně jsou proto analyzovány publikace, které mohou přispět k úspěšnému zavedení této měřicí metody. Pojednání se dále zabývá vysoce aktuálními tématy: analýzou tloušťky filmu v kyčelních náhradách a adsorpcí proteinů na jejich površích. Na základě zhodnocení současného stavu poznání jsou definovány cíle disertační práce, je položena vědecká otázka a navržena pracovní hypotéza, stejně jako metodický postup řešení. V poslední části pojednání je shrnut současný stav řešení disertační práce, přičemž se již podařilo částečně splnit dílčí stanovené cíle a byl tak položen základ pro úspěšné splnění disertační práce.

8 LITERATURA

- [1] PRAMANIK, S., A. K. AGARWAL a K. N. RAI. Chronology of total hip joint replacement and materials development. *Trends in Biomaterials & Artificial Organs*, 2005, 19.1: 15-26. <http://www.angelfire.com/space2/trends/pdf/19-1-15-26.pdf>
- [2] GARELLICK, G., J. KÄRRHOLM, C. ROGMARK a P. HERBERTS. Swedish Hip Arthroplasty Register: Annual Report 2010. 2011. ISBN 978-91-977112-9-6. Dostupné z: <http://www.shpr.se/Libraries/Documents/AnnualReport-2010-2-eng.sflb.ashx>
- [3] CORBETT, K. L., E. LOSINA, A. A. NTI, J. J. Z. PROKOPETZ, J. N. KATZ a F. P. RANNOU. Population-Based Rates of Revision of Primary Total Hip Arthroplasty: A Systematic Review. *PLoS ONE*. 2010-10-20, vol. 5, issue 10, e13520-. DOI: 10.1371/journal.pone.0013520. Dostupné z: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0013520>
- [4] HEISEL, C., M. SILVA a T. P. SCHMALZRIED. Bearing surface options for total hip replacement in young patients. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2003, 85.7: 1366-1379. Dostupné z: <http://www.orthochirurg.com/resources/journals/Instructional%20Course%20Lectures/Bearing%20Surface%20options%20for%20THR%20in%20young%20patients.pdf>
- [5] LANCASTER, J. G., D. DOWSON, G. H. ISAAC a J. FISHER. The wear of ultra-high molecular weight polyethylene sliding on metallic and ceramic counterfaces representative of current femoral surfaces in joint replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 1997-1-1, vol. 211, issue 1, s. 17-24. DOI: 10.1243/0954411971534647. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/0954411971534647>
- [6] GOLDSMITH, A. A. J., D. DOWSON, G. H. ISAAC a J. G. LANCASTER. A comparative joint simulator study of the wear of metal-on-metal and alternative material combinations in hip replacements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2000-1-1, vol. 214, issue 1, s. 39-47. DOI: 10.1243/0954411001535228. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/0954411001535228>
- [7] DOWSON, D. New joints for the Millennium: Wear control in total replacement hip joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2001-04-01, vol. 215, issue 4, s. 335-358. DOI: 10.1243/0954411011535939. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/0954411011535939>
- [8] WANG, A., A. ESSNER a G. SCHMIDIG. The effects of lubricant composition on in vitro wear testing of polymeric acetabular components. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2004-01-15, 68B, issue 1, s. 45-52. DOI: 10.1002/jbm.b.10077. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.b.10077>
- [9] DOWSON, D., F. C. WANG, W. Z. WANG a Z. M. JIN. A predictive analysis of long-term friction and wear characteristics of metal-on-metal total hip replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2007-1-1, vol. 221, issue 3, s. 367-378. DOI: 10.1243/13506501JET255. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/13506501JET255>
- [10] SAWAE, Y., A. YAMAMOTO a T. MURAKAMI. Influence of protein and lipid concentration of the test lubricant on the wear of ultra high molecular weight polyethylene. *Tribology International*. 2008, vol. 41, issue 7, s. 648-656. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X07001971>
- [11] MATTEI, L., F. DI PUCCIO, B. PICCIGALLO a E. CIULLI. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: A review. *Tribology International*. 2011, vol. 44, issue 5, s. 532-549. DOI:

- 10.1016/j.triboint.2010.06.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001647>
- [12] SPIKES, H. A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 335-352. DOI: 10.1243/1350650991542712. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/1350650991542712>
- [13] POLL, G. a A. GABELLI. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II: A new measuring principle for lubricant film thickness. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 290. Dostupné z: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=5249709>
- [14] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 11, s. 1960-1969. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10000770>
- [15] BONGAERTS, J. H. H., J. P. R. DAY, C. MARRIOTT, P. D. A. PUDNEY a A.-M. WILLIAMSON. In situ confocal Raman spectroscopy of lubricants in a soft elastohydrodynamic tribological contact. *Journal of Applied Physics*. 2008, vol. 104, issue 1, s. 014913-. DOI: 10.1063/1.2952054. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/104/1/10.1063/1.2952054>
- [16] MYANT, C., M. FOWELL, H. A. SPIKES a J. R. STOKES. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions*. 2010-08-20, vol. 53, issue 5, s. 684-694. DOI: 10.1080/10402001003693109. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402001003693109>
- [17] REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. *Tribology Letters*. 2010, vol. 38, issue 3, s. 207-215. DOI: 10.1007/s11249-010-9592-6. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-010-9592-6>
- [18] SMART, A. E. a R. A. J. FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*. 1974, vol. 29, issue 1, s. 41-47. DOI: 10.1016/0043-1648(74)90132-x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004316487490132X>
- [19] FORD, R. A. J. a C. A. FOORD. Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films. *Wear*. 1978, vol. 51, issue 2, s. 289-297. DOI: 10.1016/0043-1648(78)90267-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164878902673>
- [20] GABELLI, A. a G. POLL. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part I: Lubricant Film Modeling. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 2, s. 280-. DOI: 10.1115/1.2920885. Dostupné z: <http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460086>
- [21] POLL, G., A. GABELLI, P. G. BINNINGTON a J. QU. Dynamic Mapping of Rotary Lip Seal Lubricant Films by Fluorescent Image Processing. In: NAU, B. *Fluid sealing*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c1992. ISBN 079231669x. Dostupné z: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-011-2412-6_5
- [22] SUGIMURA, J., M. HASHIMOTO, Y. YAMAMOTO. Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope. *Tribology Series*, 2000, 38: 609-617.
- [23] HIDROVO, C. H. a D. P. HART. Dual Emission Laser Induced Fluorescence technique (DELIF) for oil film thickness and temperature measurement. In: *FED*. 2000, s. 175-182. ISSN 0888-

8116. Dostupné z: <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-33745238978&origin=inward&txGid=FA009F56A5B515187586434BE91C934B.f594dyPDCy4K3aQHRor6A%3a3>
- [24] HIDROVO, C. H. a D. P. HART. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2001-04-01, vol. 12, issue 4, s. 467-477. DOI: 10.1088/0957-0233/12/4/310. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/12/i=4/a=310?key=crossref.d3b5ca9c9a2db2a6fcfde0a313d8705a>
- [25] AZUSHIMA, A. In lubro 3D measurement of oil film thickness at the interface between tool and workpiece in sheet drawing using a fluorescence microscope. *Tribology International*. 2005, vol. 38, issue 2, s. 105-112. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.04.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X04000854>
- [26] AZUSHIMA, A. In situ 3D measurement of lubrication behavior at interface between tool and workpiece by direct fluorescence observation technique. *Wear*. 2006, vol. 260, issue 3, s. 243-248. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.053. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164805003686>
- [27] JALALI-VAHID, D., M. JAGATIA, Z.M. JIN a D. DOWSON. Prediction of lubricating film thickness in UHMWPE hip joint replacements. *Journal of Biomechanics*. 2001, vol. 34, issue 2, s. 261-266. DOI: 10.1016/S0021-9290(00)00181-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021929000001810>
- [28] JALALI-VAHID, D, M JAGATIA, Z M JIN a D DOWSON. Prediction of lubricating film thickness in a ball-in-socket model with a soft lining representing human natural and artificial hip joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001-1-1, vol. 215, issue 4, s. 363-372. DOI: 10.1243/1350650011543600. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/1350650011543600>
- [29] MAVRAKI, A. a P. M. CANN. Friction and lubricant film thickness measurements on simulated synovial fluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2009-5-1, vol. 223, issue 3, s. 325-335. DOI: 10.1243/13506501JET580. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/13506501JET580>
- [30] MAVRAKI, A. a P. M. CANN. Lubricating film thickness measurements with bovine serum. *Tribology International*. 2011, vol. 44, issue 5, s. 550-556. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.07.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10001775>
- [31] FAN, J., C. W. MYANT, R. UNDERWOOD, P. M. CANN a A. HART. Inlet protein aggregation: a new mechanism for lubricating film formation with model synovial fluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2011-06-22, vol. 225, issue 7, s. 696-709. DOI: 10.1177/0954411911401306. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954411911401306>
- [32] HOOKE, C. J. The elastohydrodynamic lubrication of heavily loaded point contacts. *ARCHIVE: Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982 (vols 1-23)*. 1980-8-1, vol. 22, issue 4, s. 183-187. DOI: 10.1243/JMES_JOUR_1980_022_036_02. Dostupné z: http://jms.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/JMES_JOUR_1980_022_036_02
- [33] MYANT, C., R. UNDERWOOD, J. FAN a P.M. CANN. Lubrication of metal-on-metal hip joints: The effect of protein content and load on film formation and wear. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012, vol. 6, s. 30-40. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2011.09.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616111002426>

- [34] MYANT, C. a P. CANN. In contact observation of model synovial fluid lubricating mechanisms. *Tribology International*. 2013, vol. 63, s. 97-104. DOI: /10.1016/j.triboint.2012.04.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X12001533>
- [35] VRBKA, M., T. NÁVRAT, I. KŘUPKA, M. HARTL, P. ŠPERKA a J. GALLO. Study of film formation in bovine serum lubricated contacts under rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2013-04-18, vol. 227, issue 5, s. 459-475. DOI: 10.1177/1350650112471000. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/1350650112471000>
- [36] VRBKA, M., I. KŘUPKA, M. HARTL, T. NÁVRAT, J. GALLO a A. GALANDÁKOVÁ. In situ measurements of thin films in bovine serum lubricated contacts using optical interferometry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2014-02-17, vol. 228, issue 2, s. 149-158. DOI: 10.1177/0954411913517498. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954411913517498>
- [37] SCHOLE, S. C. a A. UNSWORTH. The Effects of Proteins on the Friction and Lubrication of Artificial Joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2006-8-1, vol. 220, issue 6, s. 687-693. DOI: 10.1243/09544119JEIM21. Dostupné z: <http://pih.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/09544119JEIM21>
- [38] YANG, C.-B., H.-W. FANG, H.-L. LIU, C.-H. CHANG, M.-C. HSIEH, W.-M. LEE a H.-T. HUANG. Frictional characteristics of the tribological unfolding albumin for polyethylene and cartilage. *Chemical Physics Letters*. 2006, vol. 431, 4-6, s. 380-384. DOI: 10.1016/j.cplett.2006.10.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009261406014801>
- [39] ROBA, M., M. NAKA, E. GAUTIER, N. D. SPENCER a R. CROCKETT. The adsorption and lubrication behavior of synovial fluid proteins and glycoproteins on the bearing-surface materials of hip replacements. *Biomaterials*. 2009, vol. 30, issue 11, s. 2072-2078. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2008.12.062. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014296120801065X>
- [40] HAUGLAND, R. P., M. T. SPENCE a I. D. JOHNSON. *Handbook of fluorescent probes and research chemicals*. 6th ed. Eugene, OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402): Molecular Probes, c1996, xii, 680 p. ISBN 09-652-2400-7.
- [41] ESFAHANIAN, M. a B. J. HAMROCK. Fluid-Film Lubrication Regimes Revisited. *Tribology Transactions*. 1991, vol. 34, issue 4, s. 628-632. DOI: 10.1080/10402009108982081. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402009108982081>
- [42] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts for Materials of Low Elastic Modulus I-Fully Flooded Conjunction. *Journal of Lubrication Technology*. 1978, vol. 100, issue 2, s. 236-. DOI: 10.1115/1.3453152. Dostupné z: <http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1463922>
- [43] CROCKETT, R., M. ROBA, M. NAKA, B. GASSER, D. DELFOSSE, V. FRAUCHIGER a N. D. SPENCER. Friction, lubrication, and polymer transfer between UHMWPE and CoCrMo hip-implant materials: A fluorescence microscopy study. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2009-06-15, 89A, issue 4, s. 1011-1018. DOI: 10.1002/jbm.a.32036. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jbm.a.32036>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Průběh tloušťky filmu na povrchu válce v závislosti na otáčkách (s^{-1}) pro olej Castrol 3C. a) Ocelový povrch, b) pochromovaný povrch válcové plochy [18].	10
Obr. 2: Pokles intenzity fluorescence oleje pro plynové turbíny s narůstajícím časem [19].	11
Obr. 3: Závislost tloušťky filmu na otáčkách hřídele [21].	13
Obr. 4: Kalibrační konfigurace využitá pro stanovení tloušťky filmu [21].	14
Obr. 5: Vlevo: Naměřené hodnoty stupňů šedi v závislosti na skluzové rychlosti. Vpravo: Profil mazacího filmu, vlevo dole – před experimentem, vpravo nahoře – po 30 s experimentu (čistý prokluz, 53 mm/s, 3,6 N) [22].	15
Obr. 6: Schéma laserem indukované fluorescence s duální emisí [23].	16
Obr. 7: Reabsorpce emise [24].	16
Obr. 8: Výsledná závislost relativní intenzity fluorescence na tloušťce filmu a teplotě [23].	17
Obr. 9: Vlevo: Kalibrační konfigurace pro měření s využitím ERLIF. Vpravo: Topografie mince získaná pomocí aplikace ERLIF [24].	17
Obr. 10: Vytvoření kalibračního snímku s využitím přístupu ERLIF [24].	18
Obr. 11: Studované vzorky. Vlevo: snímky získané při procesu tažení. Vpravo: vyhodnocené negativní profily povrchů [25].	19
Obr. 12: Porovnání naměřené a predikované tloušťky maziva v závislosti na rychlosti tažení [26].	20
Obr. 13: Výsledky provedené kalibrace [25], [26].	20
Obr. 14: Vlevo: mapa intenzity fluorescenčního záření v kontaktu. Vpravo: profil tloušťky filmu v kontaktu ve směru osy y [17].	21
Obr. 15: Schematické zobrazení simulátoru kontaktu [14].	22
Obr. 16: Vlevo: Závislost centrální tloušťky filmu na unášivé rychlosti za podmínek plného zaplavení. Vpravo: Závislost centrální tloušťky filmu na unášivé rychlosti za podmínek hladovění kontaktu [14].	23
Obr. 17: Snímky kontaktní oblasti za podmínek hladovění při zvyšující se unášivé rychlosti [14].	23
Obr. 18: Profil tloušťky mazacího filmu v osách x, y [14].	24
Obr. 19: Konfigurace pro stanovení predikce minimální tloušťky filmu [27].	25
Obr. 20: Vlevo: Závislost tloušťky filmu na: a) poloměru hlavice, b) radiální vůli. Vpravo: Závislost tloušťky filmu na: a) tloušťce UHMWPE jamky, b) modulu pružnosti UHMWPE jamky [27].	26
Obr. 21: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro různé koncentrace hovězího séra [29].	28
Obr. 22: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro 50 % hovězí sérum s roztoky proteinů [29].	28
Obr. 23: Závislost součinitele tření na unášivé rychlosti pro rozdílné koncentrace proteinů [29].	28
Obr. 24: Závislost tloušťky filmu pro vzrůstající a následně klesající unášivou rychlost [29].	29
Obr. 25: Závislost tloušťky filmu na opakovatelnosti měření pro různá maziva [29].	29
Obr. 26: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti, čisté valení, 25 °C, 200 MPa [30].	30
Obr. 27: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti při čistém valení a čistém prokluzu, 37 °C, 200 MPa [30].	31
Obr. 28: Závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti při odlišné koncentraci roztoku hovězího séra [30].	31
Obr. 29: Porovnání teoretické a experimentální tloušťky filmu v závislosti na skluzové rychlosti pro dva navazující experimenty. Vlevo: 50 % hovězí sérum, vpravo: 100 % hovězí sérum [31].	33
Obr. 30: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti pro dva navazující experimenty pro roztok obsahující albumin i γ -globulin [31].	33
Obr. 31: Závislost tloušťky filmu na počtu zátěžných cyklů pro odlišná maziva [33].	35
Obr. 32: Závislost tloušťky filmu na čase pro odlišná maziva při skluzové rychlosti 10 mm/s [33].	36

Obr. 33: Závislost tloušťky filmu na zatížení pro maziva BCS25 a Glb6 [33].	36
Obr. 34: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti pro maziva BCS25, Alb10, Alb20 a Alb30 [33].	37
Obr. 35: Vlevo: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti a délce vstupní oblasti. Vpravo: Kontakt včetně vstupní oblasti [34].	37
Obr. 36: Závislost tloušťky filmu na skluzové rychlosti. Porovnání s predikovanými hodnotami. Tečkovaná čára – Newtonský model, plná čára – model smykového řídnutí [34].	38
Obr. 37: Závislost tloušťky filmu na čase pro různé unášivé rychlosti za podmínek čistého valení; a) kovová hlavice, b) keramická hlavice [35].	39
Obr. 38: Závislost tloušťky filmu na čase pro různé unášivé rychlosti za podmínek částečného pozitivního prokluzu (150 %). Vlevo: kovová hlavice, vpravo: keramická hlavice [35].	40
Obr. 39: Interferogramy získané při měření za podmínek negativního prokluzu; A) kovová hlavice, B) keramická hlavice [35].	40
Obr. 40: Závislost tloušťky filmu na čase pro rozdílné povlakové vrstvy za čistého pozitivního prokluzu při rychlosti 10 mm/s. Vlevo: kovová hlavice, vpravo: keramická hlavice [36].	41
Obr. 41: Závislost tloušťky filmu na čase pro průběžné dávkování a plné zaplavení mazivem za čistého pozitivního prokluzu při rychlosti 10 mm/s v konfiguraci ball-on-disc [36].	42
Obr. 42: Závislost tloušťky filmu na čase za čistého negativního prokluzu při rychlosti 10 a 40 mm/s v konfiguraci ball-on-lens (hovězí sérum dávkováno kontinuálně) [36].	42
Obr. 43: Závislost součinitele tření na Sommerfeldově čísle pro maziva CMC a hovězí sérum (BS) pro různé materiálové kombinace. Vlevo nahoře: CoCrMo-UHMWPE, vpravo nahoře: CoCrMo-CoCrMo, vlevo dole: oxid hlinitý-oxid hlinitý, vpravo dole: CoCrMo-Polyuretan (značka L – laterální komponenta, M – mediální komponenta) [37].	45
Obr. 44: Porovnání hodnot součinitele tření pro různé materiálové kombinace a různá maziva (SF – synoviální kapalina) [37].	45
Obr. 45: Závislost součinitele tření na velikosti přitlačení vzorků pro různá použitá maziva. Vlevo: UHMWPE-ocel, vpravo: chrupavka-ocel [38].	47
Obr. 46: Ilustrace vlivu konformačních změn albuminu na součinitel tření. Vlevo: UHMWPE-ocel, vpravo: chrupavka-ocel [38].	47
Obr. 47: Výsledky z testu tření na mikroúrovni na zařízení AFM [39].	49
Obr. 48: Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie.	54
Obr. 49: Schéma měřicí aparatury.	56
Obr. 50: Výsledná závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti	58
Obr. 51: Vlevo: Kalibrační snímek. Vpravo: Detail kontaktní oblasti včetně zobrazení řezu pro kalibraci.	59
Obr. 52: Kalibrační křivka odpovídající řezu na detailu předchozího snímku.	59
Obr. 53: Pozorovaná adsorpce albuminu na skleněném disku v čase; zleva: 350 s, 425 s, 500 s.	60
Obr. 54: Závislost součinitele tření na skluzové rychlosti; vlevo: značené proteiny, vpravo: neznačené proteiny	62
Obr. 55: Závislost tloušťky adsorbované vrstvy na skluzové rychlosti	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Opotřebení komponent kloubní náhrady z hlediska použitých materiálů [4].....	7
Tab. 2: Průměrné hodnoty tloušťky filmu pro studované vzorky [25].	19
Tab. 3: Podmínky aplikované při experimentech [29].	27
Tab. 4: Maziva použita při měření tloušťky mazacího filmu [31].	32
Tab. 5: Tloušťka reziduální vrstvy pro jednotlivá maziva [31].	33
Tab. 6: Maziva použita při měření tloušťky mazacího filmu [33].	35
Tab. 7: Testované materiálové kombinace [37].	44
Tab. 8: Výsledné silové zatížení kontaktní dvojice s ohledem na stlačení kontaktu a použité mazivo [38].	46
Tab. 9: Modelové kapaliny použité při měřeních.	62

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Originální význam	Český význam
AFM	Atomic Force Microscopy	Mikroskopie atomárních sil
CCD	Charge Coupled Device	Zařízení s vázanými náboji
CMC	Carboxymethyl Cellulose	Karboxymetyl celulóza
CoCrMo	Cobalt-Chromium-Molybdenum	Kobalt-chróm-molybden
DELIF	Dual Emission Laser Induced Fluorescence	Laserem indukované fluorescence s duální emisí
EHD	Elastohydrodynamics	Elastohydrodynamika
ERLIF	Emission Reabsorption Laser Induced Fluorescence	Reabsorpce emise laserem indukované fluorescence
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství	Fakulta Strojního Inženýrství
FITC	Fluorescein Isothiocyanate	Fluorescein isothiokyanát
MTM	Mini Traction Machine	Mini trakční zařízení
PBS	Phosphate Buffered Saline	Fosfátem pufrovaný fyziologický roztok
PDMS	Polydimethylsiloxane	Polydimethylsiloxan
PVA	Polyvinyl Alcohol	Polyvinyl alkohol
RBITC	Rhodamine B Isothiocyanate	Rhodamin-B-isothiokyanát
sCMOS	Scientific Complementary Metal–Oxide–Semiconductor	Vědecký komplementární kov–oxid–polovodič
SDS-PAGE	Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis	Elektroforéza v polyakrylamidovém gelu v přítomnosti dodecylsíranu sodného
SRR	Slide to Roll Ratio	Skluzevalivý poměr
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene	Polyetylen s mimořádně vysokou molekulovou váhou
UV	Ultraviolet	Ultrafialový
VUT	Vysoké Učení Technické	Vysoké Učení Technické

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
η	[Pa·s, mPa·s]	Dynamická viskozita
λ	[nm]	Vlnová délka
d	[mm]	Průměr disku
F	[N]	Zatěžující síla
h_c	[nm, μm]	Centrální tloušťka filmu
n	[-]	Počet cyklů
p	[Pa, MPa]	Kontaktní tlak
r	[mm]	Poloměr kuličky
R	[mm]	Poloměr hřídele
R'	[mm]	Redukovaný poloměr křivosti
R_{max}	[nm]	Maximální drsnost povrchu
R_{rms}	[μm]	Střední kvadratická odchylka drsnosti povrchu
t	[s]	Doba trvání experimentu
T	[°C]	Teplota
u	[m·s ⁻¹ , mm·s ⁻¹]	Unášivá rychlost
Ū	[-]	Bezrozměrný parametr rychlosti
v_t	[m·s ⁻¹ , mm·s ⁻¹]	Skluzová rychlost
V	[ml]	Objem
W	[N, mN]	Zatěžující síla
W̄	[-]	Bezrozměrný parametr zatížení
x	[mm]	Daná vzdálenost od středu kontaktu
x_t	[m, mm]	Délka dráhy
y	[μm]	Tloušťka filmu v dané vzdálenosti od středu kontaktu