



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV NESTACIONÁRNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE NA CHOVÁNÍ IONTOVÝCH KAPALIN

INFLUENCE OF NON-STATIONARY ELECTRIC FIELD ON BEHAVIOR OF IONIC LIQUIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Schneider

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. David Schneider
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.
Akademický rok:	2024/25

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

Vliv nestacionárního elektrického pole na chování iontových kapalin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace ložisek dnes pokrývají široké pole oblastí od malých mechanismů až po větrné elektrárny. Mazání zde zajišťuje nízkou hlučnost, tření a vysokou životnost. Požadavky na autonomní provoz v koncepci Průmyslu 4.0 formují další výzvy jak pro vývoj ložisek, tak i mazacích systémů. Jednou z výzev v oblasti chytrých ložisek je schopnost plynule měnit reologické vlastnosti maziv působením aktivního elektrického pole. Nové poznatky, technologie a diagnostické metody umožní zavést do průmyslu novou generaci chytrých zařízení.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je popsat mechanismus řízení mazacího filmu ve vysoce zatížených kontaktech mazaných iontovými kapalinami za působení nestacionárního elektrického pole. Jedná se o experimentální práci založenou na využití kolorimetrické interferometrie a univerzálního tribometru.

Díličí cíle diplomové práce:

- analyzovat problém a provést bibliografickou rešerši iontových kapalin pro tribologii,
- navrhnout vhodnou iontovou kapalinu, experimentální přístup a parametry měření,
- experimentálně popsat mechanismus řízení mazacího filmu v nestacionárním elektrickém poli.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

Walther, H. C.; Holub, R. A. Lubrication of electric motors as defined by IEEE standard 841-2009, shortcomings and potential improvement opportunities. 2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 91-98. <https://doi.org/10.1109/PCICon.2014.6961872>

Chen, Y.; Jha S.; Raut, A.; Zhang, W.; Liang, H. Performance Characteristics of Lubricants in Electric and Hybrid Vehicles: A Review of Current and Future Needs. *Frontiers in Mechanical Engineering* 2020, 6. <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.571464>

Gunderson, S.; Fultz, G.; Snyder, C.; Wright, J.; Gschwender, L.; Heidger, S. The effect of water content on the dielectric strength of polyalphaolefin (PAO) coolants. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2011, 18(1), 295-302. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5704521>

Michalec, M.; Svoboda, P.; Krupka, I.; Hartl, M. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry* 2018, 40 (4), 515-528. <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.01>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na studium vlivu nestacionárního elektrického pole na chování mazacího filmu v elastohydrodynamickém (EHD) kontaktu mazaném iontovou kapalinou (IL). Cílem je ověřit, zda a jak aplikace elektrického napětí ovlivňuje tloušťku mazacího filmu v reálném čase. Pro dosažení tohoto cíle byla navržena experimentální metoda založená na kolorimetrické interferometrii, která umožňuje sledování tloušťky filmu v reálném čase. Součástí práce je také konstrukční řešení elektrod, které zajišťují cílené přivádění napětí do oblasti kontaktu bez narušení optické cesty. Naměřené výsledky prokazují, že aplikace elektrického napětí vede k výrazným změnám tloušťky mazacího filmu. Tento efekt je závislý na polaritě i velikosti napětí. Zatímco při použití běžného oleje nejsou pozorovány žádné změny, IL vykazuje znatelnou odezvu, přičemž nejvýraznější nárůst tloušťky filmu je zaznamenán při anodické polarizaci. Získaná data potvrzují potenciál IL pro aktivní řízení tribologických vlastností, konkrétně tloušťky mazacího filmu, prostřednictvím elektrického buzení. Tato schopnost je zvláště přínosná pro vývoj inteligentních mazacích systémů určených pro aplikace vystavené elektrickému a mechanickému zatížení.

KLÍČOVÁ SLOVA

iontová kapalina (IL), elektrické napětí, tloušťka mazacího filmu, EHD kontakt, kolorimetrická interferometrie

ABSTRACT

This thesis focuses on the experimental investigation of the influence of a non-stationary electric field on the lubricating film behavior in elastohydrodynamic (EHD) contact lubricated with ionic liquid (IL). The aim is to verify how electric voltage affects the lubricating film thickness in real time. To achieve this, an experimental method based on colorimetric interferometry was developed for real-time monitoring of the film thickness, with a design solution for the electrodes ensuring targeted voltage application without disturbing the optical path. The measured results demonstrated that applying electric voltage leads to significant changes in the lubricating film thickness, depending on the polarity and magnitude of the voltage. While no changes were observed using conventional oil, IL showed a noticeable response, with the most significant increase in film thickness during anodic polarization. The obtained data confirm the potential of IL for active control of tribological properties, particularly lubricating film thickness, through electric stimulation, which is beneficial for the development of intelligent lubrication systems for applications exposed to both electrical and mechanical loading.

KEYWORDS

ionic liquid (IL), electric voltage, lubricating film thickness, EHD contact, colorimetric interferometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHNEIDER, David. *Vliv nestacionárního elektrického pole na chování iontových kapalin*. Online, diplomová práce. Petr SVOBODA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165190>. [cit. 2025-05-12].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. a také Ing. Michalu Michalcovi, Ph.D. za mnoho připomínek a cenných rad při konzultacích i v celém průběhu řešení této práce. Také bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu při studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Rešeršní metody	16
2.2	Kritická rešerše	17
2.2.1	Iontové kapaliny	17
2.2.2	Regulace tloušťky mazacího filmu	23
2.2.3	Experimentální přístup	25
2.2.4	Elektromobilita	28
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	30
2.4	Mezera v poznání	31
3	CÍLE PRÁCE	33
3.1	Výzkumné otázky	33
3.2	Cíle výzkumu	33
3.3	Hypotézy	33
4	MATERIÁL A METODY	35
4.1	Metodika	35
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	36
4.2.1	Optický tribometr	36
4.2.2	Úpravy experimentálního zařízení	37
4.3	Materiál a testovací podmínky	41
4.3.1	Základový olej	42
4.3.2	Iontová kapalina	42
4.3.3	Vstupní parametry	42
4.4	Metody	43
4.4.1	Přípravná měření	44
4.4.2	Optická interferometrie	45
4.5	Testované predikce	47
5	VÝSLEDKY	49
5.1	Přípravná měření	49
5.1.1	Optické a reologické vlastnosti maziv	49
5.1.2	Predikce mazacího filmu	51

5.2	Optická interferometrie	52
5.2.1	Měření bez elektrického napětí	52
5.2.2	Měření s elektrickým napětím	54
6	DISKUSE	61
6.1	Interpretace výsledků	62
6.1.1	Polarizace a konfigurace elektrod	62
6.1.2	Nárůst tloušťky filmu IL bez působícího napětí	63
6.1.3	Vliv velikosti napětí na nárůst tloušťky mazacího filmu	65
6.1.4	Změna polarizace v čase	67
6.2	Verifikace hypotéz	68
6.2.1	Omezení výsledků a další využití	70
7	ZÁVĚR	72
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	74
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	80
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	81
12	SEZNAM TABULEK	83
13	SEZNAM PŘÍLOH	84

1 ÚVOD

V současnosti připadá přibližně 20 % světové spotřeby energie na překonávání třecích sil v tribologických kontaktech [1]. Tření a opotřebení zásadně ovlivňují účinnost, spolehlivost a životnost strojních zařízení. S rostoucími nároky na energetickou efektivitu a udržitelnost technických systémů nabývá na významu řízení tribologických parametrů, jako je součinitel tření či tloušťka mazacího filmu. Zvláště náročné jsou aplikace s elektrickým buzením, typicky v elektromobilitě, kde může nízká tloušťka filmu v ložiscích vést k elektrickým výbojům a následnému selhání komponent.

Jedním z perspektivních přístupů ke zlepšení tribologického chování je použití tzv. smart maziv, konkrétně iontových kapalin (IL). Tyto kapaliny umožňují měnit své reologické a tribologické vlastnosti vlivem aplikace vnějšího elektrického pole. Studie ukazují, že elektrické napětí může vyvolat reorganizaci iontových struktur, což ovlivňuje součinitel tření, režim mazání nebo dokonce vede k superlubricitě. IL jsou navíc schopny tvořit stabilní adsorpční vrstvy na površích a tím efektivně ovlivňovat strukturu mazacího filmu i za náročných provozních podmínek.

Zatímco vliv elektrického napětí na součinitel tření IL je v literatuře poměrně dobře popsán, otázka jeho působení na tloušťku mazacího filmu zůstává dosud nedostatečně prozkoumaná. Existující studie sice naznačují možnost aktivní regulace tloušťky filmu pomocí elektrického napětí, avšak většina z nich je zaměřena výhradně na změnu reologických vlastností, přičemž přímé sledování změn tloušťky filmu v reálném čase zcela chybí. Není jednoznačně objasněno, jak se film mění v závislosti na velikosti a polaritě napětí, jak rychlá a stabilní je odezva systému, do jaké míry jsou tyto změny reverzibilní, jaký je podíl elektrostatických a fyzikálně-chemických mechanismů na pozorovaných efektech.

V současnosti neexistuje dostatek experimentálních dat, která by kvantifikovala tyto změny v závislosti na typu IL nebo geometrii a typu elektrod. Základní výzkumnou otázkou proto zůstává, zda a jak lze tloušťku filmu IL aktivně řídit pomocí nestacionárního elektrického pole v EHD kontaktu a jaké charakteristiky má dynamická odezva systému. Klíčová je především rychlost, stabilita a případná reverzibilita těchto změn, jejichž pochopení je zásadní pro návrh inteligentních tribologických systémů.

Tato diplomová práce se proto zaměřuje na experimentální studium vlivu elektrického pole na tloušťku mazacího filmu IL v EHD kontaktu a sledování změny filmu po přivedení elektrického napětí, vlivu polarity, délky expozice i chování filmu po vypnutí napětí. Výzkum vychází ze dvou výzkumných otázek a dvou hypotéz.

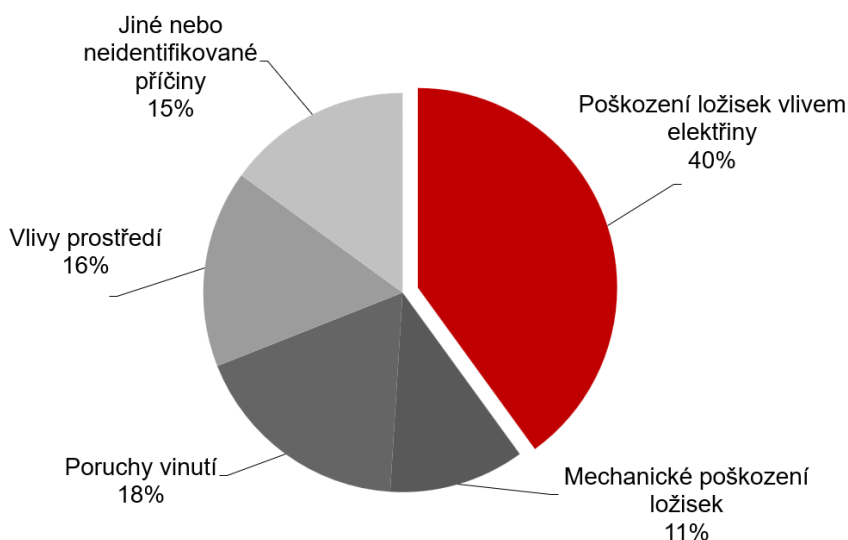
Pro ověření stanovených hypotéz je využita metoda kolorimetrické interferometrie na upraveném optickém tribometru, který umožňuje přímé sledování tloušťky mazací vrstvy s nanometrovou přesností. Experimentální aparatura byla modifikována tak, aby umožňovala aplikaci elektrického napětí v různých konfiguracích a v blízkosti kontaktní oblasti. Práce zahrnuje srovnání chování IL a oleje a testuje odezvu systému na různé velikosti a polarity napětí.

Struktura práce odpovídá standardnímu vědeckému postupu. Po úvodu do problematiky následuje rešerše současné literatury, formulace výzkumných otázek a hypotéz, popis metodiky a experimentálního zařízení, vyhodnocení výsledků, diskuze v kontextu současného stavu poznání a závěr shrnující klíčová zjištění a návrhy na další výzkum. Práce přináší poznatky z oblasti základního výzkumu chování IL v tribologických systémech ovlivňovaných elektrickým napětím.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V současnosti pochází celkem 20 % celkové světové spotřeby energie na překonání tření v tribologických kontaktech [1]. Možnost ovlivňovat součinitel tření nebo tloušťku mazacího filmu by tedy mohla výrazně snížit spotřebu energie. V současnosti existuje jen malé množství studií zabývajících se problematikou kontroly tloušťky mazacího filmu. Ta by se mohla regulovat díky využití smart kapalin, mezi které se řadí i iontové kapaliny (IL). Díky IL a aplikovanému elektrickému napětí je možné měnit reologické vlastnosti maziva podle potřeb uživatele. Tím je možné regulovat tloušťku mazacího filmu, a to i za chodu stroje. Díky tomu dochází k prodloužení životnosti strojních součástí.

Dalším odvětvím, které by mohlo využívat mazání pomocí IL, je automobilový průmysl a elektromobilita. Ta je v dnešní době jedním z nejvíce se rozvíjejících odvětví dopravy. Selhávání ložisek vlivem elektrického výboje v mazivu je jednou z nejčastějších příčin poruch u elektromotorů, viz Obr 2-1. Nové technologie mazání ve vozidlech by mohly celosvětové ztráty způsobené třením snížit v dlouhodobém horizontu 15 let až o 40 %, krátkodobě (8 let) o 18 % [1]. Celosvětově by využití moderních tribologických technologií vedlo ke snížení emisí až o 3 140 MtCO₂ a k ekonomickým úsporám ve výši 970 miliard € ročně [1]. Celkově by tak světové úspory činily 1,4 % HDP [1].



Obr 2-1 Příčiny poruch elektromotorů u elektromobilů [2]

2.1 Rešeršní metody

Snahou systematické rešerše bylo zjistit, jakým způsobem je možné regulovat, popřípadě programovat tloušťku mazacího filmu při mazání IL. Dále zjistit, jakým způsobem je nejvhodnější přivádět elektrické napětí co nejbližší bodovému kontaktu v oblasti experimentu. A do jaké míry jsou IL vhodné pro mazání ložisek u elektromobilů. Pro zmapování oblasti zájmu bylo nezbytné sestavit vhodné otázky:

1) *Jak lze regulovat (programovat) tloušťku mazacího filmu pomocí IL?*

V dnešní době můžeme tloušťku mazacího filmu měnit přizpůsobením kontaktních materiálů nebo maziva danému tribologickému systému. Tyto změny ale není možné provádět za chodu stroje. Právě mazání pomocí IL umožňuje nárůst nebo pokles tloušťky filmu. Je tedy možné tloušťku přizpůsobit dané technické aplikaci a dosáhnout tím nejlepších provozních podmínek.

2) *Jak přivádět elektrické napětí do kontaktu během laboratorního experimentu?*

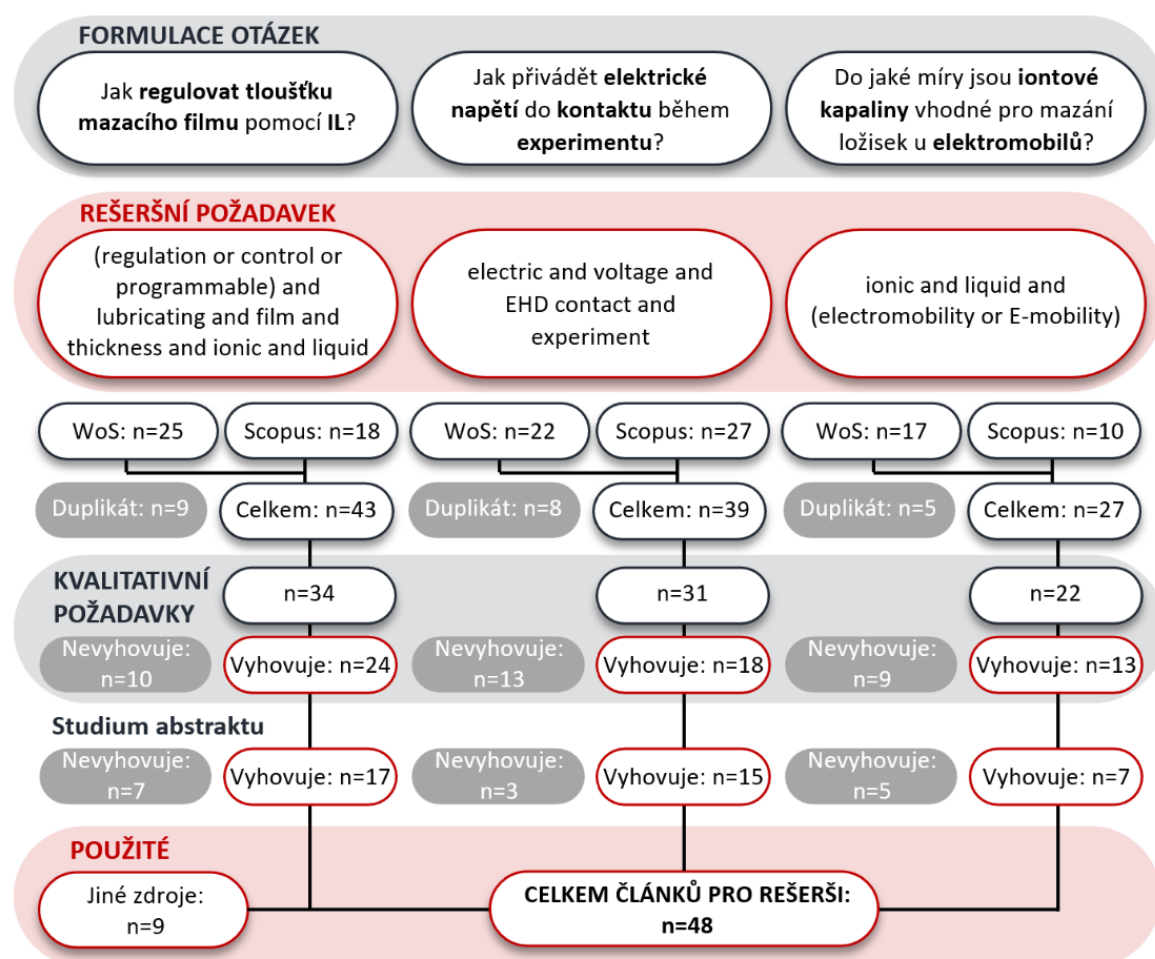
Změna tloušťky mazacího filmu bývá sledována pomocí metody kolorimetrické interferometrie. Během experimentu je nutné zajistit, aby bylo možné napětí přivádět do maziva v co nejbližší oblasti bodového kontaktu, případně na velké ploše maziva, aby bylo možné dosáhnout ovlivnění maziva vlivem elektrického napětí.

3) *Do jaké míry jsou iontové kapaliny vhodné pro mazání ložisek u elektromobilů?*

Až 40 % poruch motorů v elektromobilech je způsobeno předčasným selháním ložisek z důvodu elektrického výboje (Electric discharge) působícího v ložisku [3]. Při běžném způsobu mazání dochází k oddělení kovových částí ložiska nevodivým mazacím filmem. Tím může docházet k elektrickým výbojům. IL v mazivu by měla zabránit vzniku elektrického výboje.

Na základě vytvořených otázek byla vybrána klíčová slova, ke kterým se přiřadila příslušná synonyma. Následně byly sestaveny rešeršní dotazy (RD), pomocí kterých byly na stránkách *Web of Science* a *Scopus* vyhledány články pojednávající o daném problému.

Obdržené publikace byly následně porovnávány na základě kvalitativních požadavků jako kvartil (Q) a impakt faktor (IF) časopisu, názvu článku, počtu citací vzhledem k roku vydání a h-indexu prvního a posledního autora. Takto získané články byly následně podle jejich abstraktů dále protříděny až na finální počet článků k prostudování. K nim se ještě přidaly články z jiných zdrojů (od vedoucího práce nebo z předchozí rešerše). Tento postup je schematicky znázorněn v prizma diagramu Obr 2-2.



Obr 2-2 Prizma diagram

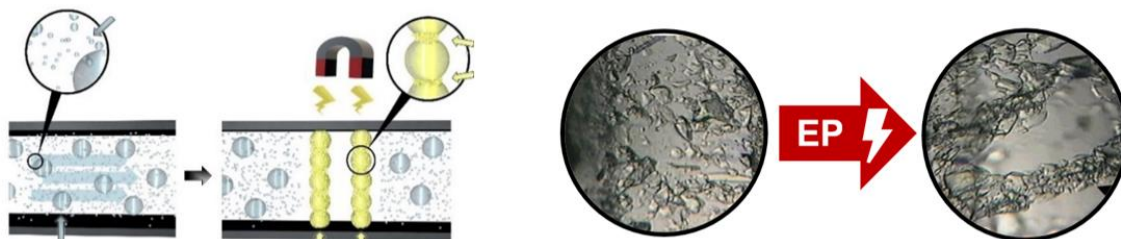
2.2 Kritická rešerše

Problematika regulace součinitele tření a tloušťky mazacího filmu je poměrně nové téma. V současnosti jsou již ale prováděny výzkumy, které se zabývají přidáváním IL do maziv. Tím vzniká mazivo, které umožňuje měnit své reologické vlastnosti pomocí vnějších vlivů, jako třeba aplikací elektrického napětí. Díky tomu je tedy možné nejen programovat tření, ale také zvýšit tloušťku mazacího filmu, kontrolovat hladovění nebo snížit opotřebení. IL také nachází uplatnění v nastupující elektromobilitě.

2.2.1 Iontové kapaliny

IL představují perspektivní alternativu k tradičním syntetickým olejům využívaným v tribologii. Jejich charakteristickou vlastností je jejich kapalný stav při teplotách pod 100 °C, což ve spojení s unikátními chemickými a fyzikálními vlastnostmi činí z IL takzvané smart kapaliny, které jsou vhodné pro široké spektrum aplikací [4].

Smart kapaliny umožňují dynamickou změnu zdánlivé viskozity a tím i přizpůsobení tribologických vlastností aktuálním požadavkům systému. Tyto kapaliny lze rozdělit na magnetoreologické (MR), viz Obr 2-3 (vlevo), a elektoreologické (ER), viz Obr 2-3 (vpravo). MR kapaliny obsahují feromagnetické částice, zatímco ER kapaliny jsou tvořeny polarizovatelnými částicemi rozptýlenými v nosné kapalině.



Obr 2-3 Působení a) magnetoreologického buzení [4]; b) elektrického pole [5]

Mezi ER patří také IL, jejichž významnou předností je jejich schopnost dynamicky reagovat na vnější podněty, jako jsou světlo, teplo nebo elektrické pole [5]. Právě elektrický impulz umožňuje cílenou modifikaci jejich tribologických a reologických vlastností v reálném čase v závislosti na provozních podmínkách. Strukturní složení IL, tvořené organickými či anorganickými kationty a anionty s nízkou teplotou tání [5], zajišťuje nejen nízký tlak par, ale i vysokou chemickou a tepelnou stabilitu [6]. V důsledku jejich minimální těkavosti jsou IL schopny bezpečného provozu i v extrémních teplotních a tlakových podmínkách, aniž by docházelo k jejich odpařování nebo vznícení [7]. Díky těmto vlastnostem se IL jeví jako optimální médium pro řízené mazání ložisek, což potvrzují i další experimentální studie [8].

Fyzikálně-chemické vlastnosti IL, jako jsou viskozita, teplotní stabilita, teplota tání a polarita, vykazují přímou závislost na molekulární struktuře jejich kationtů a aniontů. Prodloužením alkylových řetězců na imidazoliových kationtech dochází ke zvýšení viskozity, avšak současně ke snížení teplotní stability kapaliny [9]. Významný vliv na tepelnou stabilitu má rovněž typ aniontu – například anionty NTf_2^- vykazují výrazně vyšší termální stabilitu ve srovnání s halidovými anionty [9].

Z tribologického hlediska přispívá vysoká polarita IL k tvorbě stabilních adsorpčních vrstev na povrchu, což umožňuje efektivní mazání i za podmínek vysokého zatížení a nízkých relativních rychlostí. Dále mohou ionty obsahující tribologicky aktivní prvky, jako jsou dusík, fosfor, síra, bór nebo fluor, vstupovat během smykového kontaktu do tribochemických reakcí vedoucích k tvorbě ochranných povrchových vrstev [9].

IL rovněž vykazují výborné mazací vlastnosti v elasto-hydrodynamickém (EHD) i smíšeném režimu mazání. Například IL [C₆C₂im][BF₄] dosáhla vyšší tloušťky mazacího filmu než srovnatelně viskózní silikonový olej, přičemž prodlužování alkylového řetězce dále zvyšovalo tloušťku filmu [9]. Hodnoty tlakově-viskozitního součinitele IL se typicky pohybují v rozmezí 5–20 GPa, což odpovídá úrovni běžně používaných minerálních a syntetických maziv [9]. V režimu přechodného mazání pak vysoká polarita IL umožňuje tvorbu silně adsorbovaných vrstev i za extrémního zatížení, a to bez nutnosti přidavku běžných aditiv.

Dalším významným aspektem IL je jejich ekologický přínos. Absence těkavých organických sloučenin minimalizuje negativní dopady na životní prostředí, což IL činí atraktivní alternativou ke konvenčním mazivům obsahujícím potenciálně škodlivé látky. IL také vykazují vynikající schopnost snižovat součinitel tření a opotřebení, čímž přispívají k prodloužení životnosti strojních součástí a ke snížení nákladů na údržbu [8]. Variabilita chemického složení IL navíc umožňuje jejich přizpůsobení konkrétním aplikacím, včetně optimalizace kompatibility s různými materiály a provozními podmínkami. Z hlediska životního prostředí je klíčové, že použítá IL neobsahuje halogeny, čímž eliminuje ekologická rizika spojená s běžnými aditivami, jako jsou ZDDP nebo TCP [10]. Tyto tradiční přísady mohou při rozkladu tvořit toxické látky a škodlivé popelovité usazeniny. Naproti tomu například IL P-BMB vytváří ochranné vrstvy bohaté na bor a fosfor, přičemž nebyla zaznamenána korozivní aktivita [10]. Studie [10] dále potvrzuje, že vývoj „green“ maziv na bázi biologicky odbouratelných olejů a nehalogenovaných IL představuje slibný směr pro ekologicky udržitelnou tribologii, zejména v aplikacích, kde hrozí únik maziva do životního prostředí.

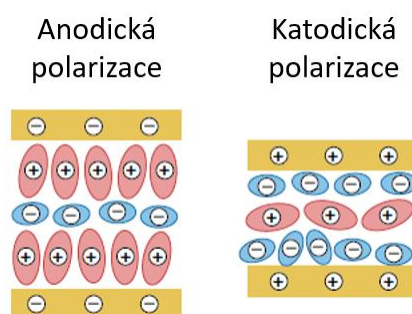
Strukturální změny

Aplikace elektrického pole vyvolává v mazacím filmu IL výrazné strukturální změny, které vedou k zásadním změnám třecích vlastností [11]. V běžně zatížených tribologických systémech dosahuje tloušťka aktivní mazací vrstvy pouze několika molekulárních vrstev. To vyžaduje detailní molekulární analýzu pro pochopení její struktury a odezvy na zatížení, smyk, teplotu a elektrické pole [11].

Experimentální studie [12] prokázaly kvantifikované tření IL, přičemž součinitel tření závisí na diskretním počtu uzavřených iontových vrstev. Povrchový náboj výrazně ovlivňuje interakce mezi mazacími vrstvami a tribologickým povrchem – při nízkých hodnotách náboje se první vrstva silně váže k povrchu, zatímco se zvyšováním náboje interakce s následujícími vrstvami slábne [11]. Třecí síla dosahuje svého maxima při středních hodnotách povrchového náboje, při dalším zvyšování náboje ale tření klesá [11]. Tato silná interakce první vrstvy s povrchem zároveň přispívá ke snížení opotřebení [11].

Viskozita IL je rovněž ovlivněna molekulární strukturou iontů – delší a symetričtější alkylové řetězce na kationtech zvyšují viskozitu kapaliny [11], přičemž rozvětvené struktury vedou k vyšší viskozitě než jejich lineární protějšky [11].

Z hlediska elektro-tribologických jevů hraje klíčovou roli molekulární uspořádání iontů. Elektrostrikce a elektroswellling jsou dva protichůdné jevy, které způsobují změny tloušťky mazacího filmu vlivem aplikovaného elektrického pole [13; 14]. Elektroswellling vzniká v důsledku odpuzování iontů a reorganizace iontových vrstev, zejména při anodické polarizaci, viz Obr 2-4 (vlevo), kdy anionty migrují k povrchu, což vede k expanzi filmu a případnému nárůstu tření v důsledku snížení mechanické stability mazací vrstvy [13; 14]. Naproti tomu elektrostrikce spočívá v katodické polarizaci, přitažení iontů a kompresi filmu, která může snížit součinitel tření až na úroveň superlubricity [13; 14], viz Obr 2-4 (vpravo).



Obr 2-4 Anodická a katodická polarizace [15]

Tyto změny tloušťky mazacího filmu, související s přeskoky mezi konfiguracemi s různým počtem iontových vrstev (např. ze 7 na 5 vrstev), mohou dosahovat řádově jednotek nanometrů [13]. Experimentální výsledky rovněž ukazují, že složení IL, konkrétně typ kationtu a aniontu, zásadně ovlivňuje elektroregulaci třecích vlastností. Například IL obsahující BF_4^- a NTf_2^- vykazují nižší tření než kapaliny s C_2SO_4^- aniontem, zatímco IL s kratšími alkylovými řetězci lépe odolávají fenoménu „squeeze-out“ než ty s řetězci delšími [13; 14].

Je možné konstatovat, že elektrické pole je účinným nástrojem pro aktivní řízení tribologických vlastností IL, a to zejména tření a tloušťky mazacího filmu. To je mimořádně významné pro aplikace vyžadující dynamickou adaptaci provozních parametrů [11]. Bylo rovněž zjištěno, že ionty s asymetrickým rozložením náboje a vysokou polarizovatelností reagují na elektrické pole výraznější reorganizací, což vede k větším změnám v tribologické odezvě [13]. Naopak ionty s rovnoměrně rozloženým nábojem vykazují vůči změnám napětí nižší citlivost [13].

Srovnání použitých iontových kapalin

Tabulka 1 porovnává vybrané IL, které byly testovány v uvedených studiích. Všechny IL kapaliny byly testovány na zařízení ball-on-disk při teplotě okolí 25 °C. Tabulka uvádí viskozitu a index lomu kapaliny, dále jsou uvedeny zatěžující podmínky experimentu, působící napětí a výsledky, kterých se během experimentu dosáhlo.

Tabulka 1 Porovnání vybraných IL

IL	Autor a publikace	Dynamická viskozita [mPa·s]	Index lomu [-]	Napětí [V]	Zatěžující podmínky	Dosažené výsledky
[BMIm]PF ₆		210				
[HMIm]PF ₆	Xie a kol. 2010 [15]	410	1,471	0-20	530 Mpa	Při napětí 10 V nárůst tloušťky mazacího filmu o 16 nm.
[OMIm]PF ₆		690				
[C ₂ MIM][BF ₄]		41				
[C ₄ MIM][BF ₄]	Kong a kol. 2016 [16]	98	-	0-10	0,1-1 N 210-454 MPa	Téměř dvojnásobný nárůst součinitele tření.
[C ₆ MIM][BF ₄]		300				
Tekutý parafín + 5 hm.% ZDDP	Xie a kol. 2010 [17]	30,12	1,471	0-90	27 N 191 MPa	Při 90 V mírný nárůst tloušťky filmu.
Roztok 1/4 n-dekanol/n-heptan	Xie a kol. 2011 [18]	1,85	1,43	0-30	28 N	Při napětí 30 V nárůst tloušťky mazacího filmu o 10 nm.
[HMIm][FAP]	Li a kol. 2014 [14]	20,72	-	0-1,5	20 N	Při napětí 1,5 V klesá tření na neměřitelné hodnoty.
[P ₆₆₆₁₄][DEHP]	GATTI a kol. 2020 [7]	1120	-	0-4	50 N 200-400 MPa	Při anodickém potenciálu se součinitel tření zvýší o 45 %.

Ředění iontových kapalin

IL mohou být testovány buď jako čisté látky, nebo ve formě zředěných roztoků. Z ekonomických důvodů se často využívá jejich ředění vodou či základovými oleji, mezi něž patří například polyalfaolefiny (PAO) [15]. Vhodnými kandidáty pro ředění jsou IL na bázi fosforu a boru [15], stejně jako ty s fosfátovými či fosfinátovými anionty, které vykazují dobrou mísitelnost s nosnou kapalinou [15]. Doporučený obsah IL ve směsi činí alespoň 5 % hmotn. [15], protože při nižších koncentracích není zajištěn spolehlivý průběh tribologických experimentů [15].

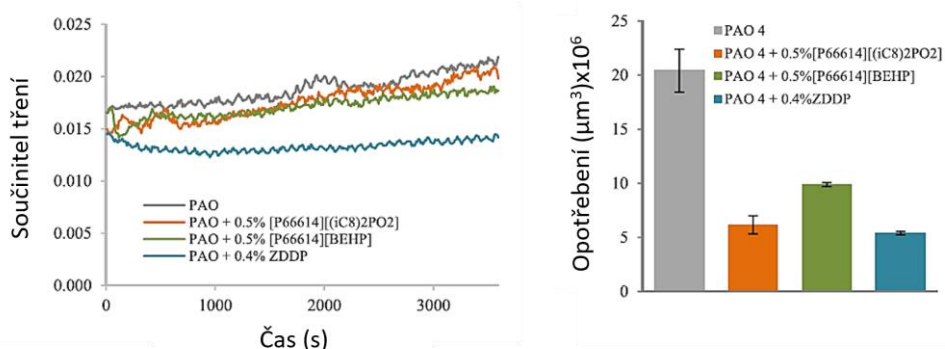
Alternativně lze IL míchat s biologickými oleji, čímž vznikají tzv. zelená nebo BIO maziva. Tato možnost je podstatná v souvislosti s rostoucími požadavky na ekologickou šetrnost průmyslových procesů [10]. Studie [10] ukazuje, že směsi IL mohou být díky synergickým účinkům mezi různými anionty účinnější než jednotlivé IL. Tento efekt podporuje využití IL jako funkčních aditiv pro vývoj autonomních mazacích systémů, které jsou schopny přizpůsobovat své vlastnosti v reálném čase v závislosti na provozních podmínkách.

Příměsi v mazivu však mohou ovlivnit elektrochemicky řízené reologické chování. Například přidavek 10 % vody zvýšil součinitel tření a destabilizoval mazací vrstvu, pravděpodobně v důsledku adsorpce polárních molekul vody, která narušila strukturu iontové dvojvrstvy [14]. Naopak ethanol měl na součinitel tření menší vliv, avšak způsobil zvýšené opotřebení. Tento jev souvisí se změnou vodíkových vazeb mezi ionty [14].

Samotné základové oleje, například 2EHL, nevykazují žádnou elektroresponzivitou. Pro dosažení tribotrického efektu je nezbytná přítomnost IL alespoň v koncentraci 5 hmotn. % [14]. Při nižších koncentracích nebyla pozorována výrazná změna v tloušťce mezivrstvy [14].

Obecně mají IL nízkou rozpustnost v nepolárních uhlovodíkových olejích. To vede ke vzniku nestabilních emulzí nebo roztoků s velmi omezeným obsahem iontové složky v konečné směsi [15]. Přesto některé IL dosahují velmi dobré kompatibility s PAO. Například maximální dosažená koncentrace rozpustné fáze IL v PAO dosáhla přibližně 22 hmotn. % pro [P66614][$(iC_8)_2PO_2$] a pro [P66614][BEHP] dosáhla 16 hmotn. % [15].

Přidavek IL významně neovlivňuje hustotu ani viskozitu oleje, což naznačuje, že změny v tribologickém chování jsou způsobeny převážně adsorpčními interakcemi iontů s povrchem [15]. I při nízké koncentraci 0,5 % hmotn. dochází k výraznému snížení součinitele tření a opotřebení ve srovnání s čistým PAO 4 [15]. Zvýšení koncentrace na 1 % hmotn. tento efekt dále zesílí. IL [P66614][$(iC_8)_2PO_2$] dosáhla srovnatelných výsledků jako ZDDP, zatímco účinek [P66614][BEHP] byl mírnější, což může souviset s nižší afinitou této látky k povrchu, viz Obr 2-5 [15].

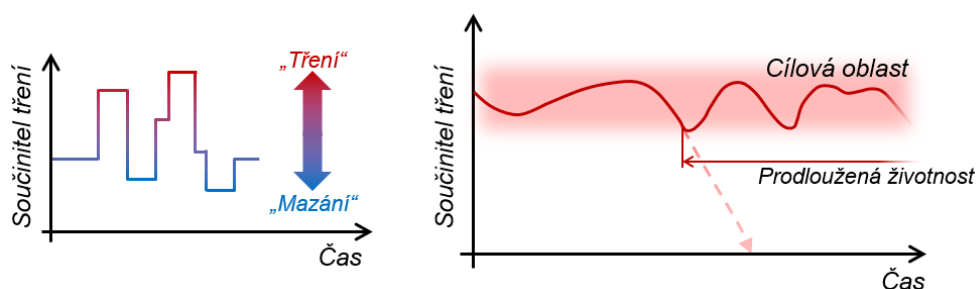


Obr 2-5 Porovnání součinitele tření a opotřebení pro IL a olej [16]

Další studie testovala směsi obsahující 1, 2 a 3 % hmotn. IL [Cho][Pro] v 30% vodném roztoku glycerolu. IL přispěla k udržení vyššího obsahu vody ve filmu, čímž se snížila jeho viskozita a omezilo se odpařování. Výpočty minimální tloušťky mazacího filmu pomocí Hamrock-Dowsonovy rovnice ukázaly hodnoty pod 10 nm. Nejnižší hodnota 4,1 nm byla zaznamenána u směsi s 3 % [Cho][Pro], což odpovídá režimu tenkého mazacího filmu [16].

2.2.2 Regulace tloušťky mazacího filmu

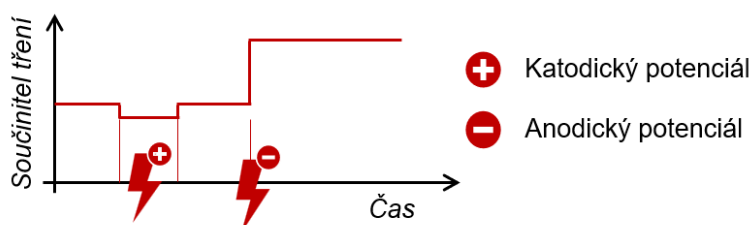
V současnosti se k optimalizaci tření a opotřebení přistupuje přizpůsobením kontaktních materiálů nebo maziva danému tribologickému systému. Součinitel tření je v tomto okamžiku konstantní, a proto nelze systém optimalizovat pro všechny provozní podmínky. Zejména při změnách zatížení, rychlosti, teploty nebo při mazání více kontaktů jedním mazivem [13]. Právě mazání pomocí IL umožňuje změnu tloušťky mazacího filmu. Graf na Obr 2-6 (vlevo) popisuje možnost změnit třecí podmínky maziva a zvýšit v daný moment tření nebo mazání podle aktuální potřeby pro tribologickou soustavu. Graf na Obr 2-6 (vpravo) zobrazuje změnu součinitele tření v závislosti na čase. Růžová zóna popisuje cílovou oblast, která zaručuje správnou funkčnost systému. Vychýlení mimo cílovou oblast znamená poruchu systému. Čárkovaná šipka naznačuje selhání běžně mazané strojní součásti. Díky aplikaci programovatelného tření pomocí eklektického pole je možné déle setrvávat v cílové oblasti a prodloužit tím životnost.



Obr 2-6 Regulace součinitele tření

Elektrochemicky řízené směsi IL umožňují nejen aktivní ovlivnění součinitele tření, ale i cílenou regulaci tloušťky mazacího filmu [14]. Experimentální výsledky prokázaly, že aplikace elektrického napětí způsobuje změny v adsorpci iontů na povrch třecích těles, což se odráží ve změně geometrie mazací vrstvy. Ve stavu bez elektrického obvodu byla změřena centrální tloušťka filmu 33 nm. Při katodické polarizaci s velikostí -4 V došlo k snížení tloušťky na 31 nm, což bylo způsobeno zvýšenou adsorpcí objemných kationtů a tím i změnou lokální viskozity [14]. Anodická polarizace s velikostí $+4$ V vedla k menší redukci na 32 nm [14]. Je potvrzeno, že účinnost elektrochemické regulace závisí jak na tloušťce mazací vrstvy, tak na chemickém složení kapaliny a také na typu polarizace [14]. Tato metoda umožňuje flexibilní přizpůsobení třecích vlastností aktuálním provozním podmínkám a zároveň optimalizaci stability filmu.

Elektrické buzení povrchu v tribologickém kontaktu má zásadní vliv na reologické vlastnosti maziva, zejména při použití IL. Experimentální studie [13] ukazuje, že aplikace anodického potenciálu způsobuje výrazné zvýšení součinitele tření až o 45 %, zatímco katodická polarizace jej snižuje přibližně o 4 %, viz Obr 2-7. Tento efekt je spojen s elektrochemicky indukovanou reorganizací mazací vrstvy, která mění charakter interakcí mezi ionty kapaliny a povrchem třecích těles.



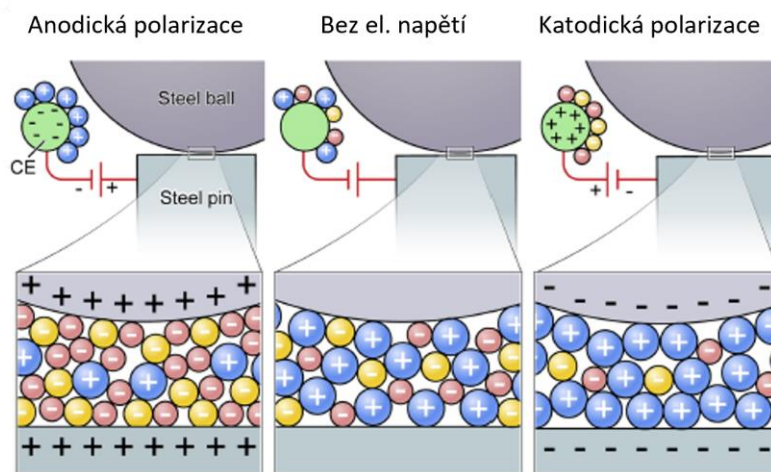
Obr 2-7 Působení elektrického pole

V případě anodické polarizace dochází k adsorpci malých aniontů na povrchu třecích těles, což vytěsňuje kationty s dlouhými řetězci do objemu kapaliny. Tento proces vede ke snížení přítomnosti olejovitých postranních řetězců v kontaktní oblasti, což zvyšuje mezimolekulové interakce a odpor proti smykovému pohybu [13]. Tím dochází ke zhoršení mazacích vlastností a ke zvýšení součinitele tření. Anodická změna je přitom stabilní, protože anionty po adsorpci na povrch setrvávají v této konfiguraci i po vypnutí vnějšího elektrického pole. Nejvýraznější nárůst součinitele tření byl pozorován při smíšeném složení 75 % aniontu [BTA] v IL [P66614][DEHP] [13].

Naopak katodická polarizace podporuje adsorpci velkých kationtů na povrch, čímž dochází k vytvoření mechanicky stabilní lubrikační vrstvy s nízkým smykovým odporem. Přítomnost kationtů s dlouhými alkylovými řetězci na povrchu snižuje tření a umožňuje efektivnější mazání. Na rozdíl od anodické polarizace však katodická změna vyžaduje trvalý přísun elektrického proudu, protože kationty nejsou schopny samovolně udržet stabilní adsorpční konfiguraci po vypnutí napětí [13]. Největšího snížení součinitele tření bylo dosaženo při složení obsahujícím 50 % aniontu [BTA] v [P66614][DEHP] [13].

Ukazuje se, že při aplikaci anodického potenciálu se maximální hodnota tření dosahuje s jistým časovým zpožděním, což naznačuje, že proces přeuspořádání iontů ve vrstvě maziva není okamžitý. Podobně i při katodické polarizaci existuje prodleva, během níž kationty postupně migrují k povrchu a vytvářejí stabilní vrstvy. Tento efekt je zvláště patrný při změnách polarity, kdy dochází k reverznímu procesu reorganizace adsorbovaných iontů [13].

Výsledky studie [13] potvrzují, že elektrická polarizace tribologického kontaktu umožňuje aktivní řízení součinitele tření (Obr 2-8). Zatímco anodická polarizace poskytuje stabilní zvýšení tření s minimální energetickou náročností, katodická polarizace vyžaduje trvalé napájení, ale umožňuje snížení tření. Tyto poznatky otevírají cestu k programovatelným tribologickým systémům, které mohou autonomně přizpůsobovat tření aktuálním provozním podmínkám, což má potenciální využití v aplikacích, jako jsou spojky, ložiska či přesné polohovací systémy [13].



Obr 2-8 Migrace iontů po polarizaci [14]

2.2.3 Experimentální přístup

Metody pro výzkum

Ke studiu tloušťky mazacího filmu se nejčastěji využívá optický tribometr nebo další zařízení umožňující měření pomocí optické interferometrie [8]. Typická experimentální konfigurace je typu „ball-on-disk“ [3; 14; 3; 8], případně „ball on plate“ [13]. Využívá se skleněného disku s polopropustnou chromovou vrstvou, který umožňuje sledování interferenčních pruhů v kontaktní oblasti mezi ocelovou kuličkou a diskem [17]. Měření jsou obvykle prováděna za konstantních zatěžovacích a teplotních podmínek, což zajišťuje reprodukovatelnost výsledků [17].

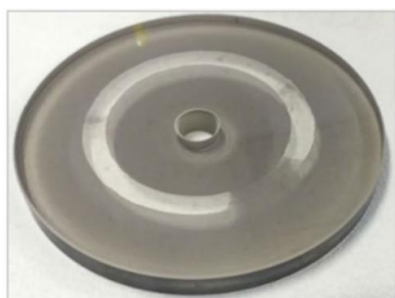
Alternativou je možnost doplnění optických a spektrálních metod pro sledování dějů v kontaktu [18]. Vhodnou metodou se jeví například metoda fluorescence. Protože je většina IL průhledná, je u nich nutné zajistit fluorescenční chování. Toho se dosáhne přidáním tzv. luminiscenčních nebo fluorescenčních sond, jako jsou například atomy lanthanoidů pro svou dobrou luminiscenci. Lanthanoidy disponují několika podstatnými vlastnostmi, které mají vliv na výslednou kvalitu fluorescence IL. Kombinací různých IL a různých lanthanoidů se mění vlnová délka absorbovaného a emitovaného záření, intenzita a doba života luminiscenčního záření. Existují dva hlavní přístupy k syntéze fluorescenčně aktivovaných IL. První způsob spočívá v prostém rozpuštění soli s lanthanoidem (kationtem

Ln 3+) ve vhodné IL [19]. Touto metodou však lze dosáhnout pouze velmi nízkých koncentrací rozpuštěných sond v IL. Pokud však má aniont IL koordinační vlastnosti, lze použít druhou metodu inkorporace, která využívá tvorby komplexů (Ln-ILs), kde lanthanoidový kationt vystupuje jako centrální atom a molekuly IL pak působí jako ligandy [19]. To jsou atomy, ionty nebo molekuly, které poskytují jeden nebo více elektronových párů centrálnímu atomu.

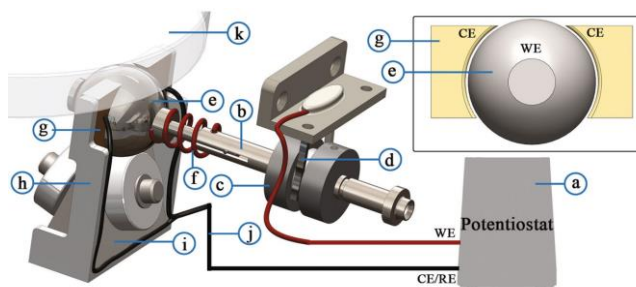
Zařízení

Nejčastěji bylo experimentální zařízení provedeno v konfiguraci ball on disk, přičemž kulička byla vyrobena z oceli AISI 52100 [16]. Kulička slouží jako pracovní elektroda [3], jako druhá elektroda je v případě práce Michalce [8] využita samotná chromová vrstva s tloušťkou 10 nm. Jak ukázal výzkum [8], některé IL reagují s chromovou vrstvou disku, kterou odleptají (Obr 2-9). Po několika vteřinách došlo k přerušení elektrického obvodu a experiment byl znehodnocený.

Ve studii provedené Reddym [3] je možné celé zapojení provést s diskem bez chromové vrstvy (Obr 2-10), kde je opět pracovní elektroda vedena na kuličku, ale referenční elektroda je vedena přes speciální obložení kuličky (Obr 2-10 g). To je umístěno symetricky na obou stranách kuličky. Vzniklé elektrické pole tak interaguje přímo s třecím kontaktem, přičemž vzdálenost mezi elektrodami činí přibližně 0,5 mm [3].



Obr 2-9 Poškození chromové vrstvy [9]



Obr 2-10 Zařízení s diskem bez chromové vrstvy [2]

V některých experimentech, které provedl Yu Zhang [18], bylo elektrické pole indukováno dvojicí kovových elektrod připravených technikou template stripping, která zajišťuje extrémně hladké povrchy vhodné pro přesné tribologické měření. V makroměřítku se často aplikuje elektrické napětí ve dvouelektrodovém nebo třielektrodovém uspořádání [18]. Výzkum [18] ukazuje, že elektrická regulace třecích vlastností je možná napříč všemi měřítky, od nanoúrovně až po makroskopické měřítko (tribometr), přičemž různé typy maziv (IL, oleje) vykazují rozdílnou odezvu na elektrické pole v závislosti na své struktuře, polaritě a hydratačních vlastnostech.

Použitá napětí

Výzkumy potvrzují, že IL dobře reagují na aplikované elektrické pole, a to i při nízkých hodnotách napětí. Na makroskopické úrovni byla zaznamenána změna součinitele tření až o 125 % při aplikaci napětí 3 V, což podtrhuje jejich potenciál pro využití v inteligentních tribologických systémech [14]. Například při aplikaci +1,5 V v systému s IL[HMIm] došlo ke snížení součinitele tření v důsledku zvýšené koncentrace aniontů v adsorpční vrstvě na velmi malé hodnoty [20]. Řada dalších studií potvrzuje významné změny tribologických vlastností již při napětích v rozsahu ± 2 V [3; 8; 21; 14; 22; 16].

Významná změna tloušťky mazacího filmu byla pozorována již při +1,5 V, kdy došlo k nárůstu tloušťky filmu o 14 nm. Po delší aplikaci napětí se hodnota stabilizovala na 30 nm. Tento jev je připisován tvorbě vícevrstvé aniontové struktury [3].

Jak ukázal výzkum [22], při aplikaci napětí již kolem 1 V dochází k významné reorganizaci elektrické dvojvrstvy, zejména v nejbližších vrstvách u povrchu elektrod. Tato reorganizace způsobuje změny v počtu a rozložení kationtů a aniontů ve filmu, čímž ovlivňuje lokální elektrostatické pole, orientaci iontů a skluzovou rovinu. Při určitém povrchovém náboji se skluzová rovina posouvá z rozhraní pevná látka-kapalina do vnitřní části filmu [22].

V rozmezí mezi -1 V a $+0,5$ V bylo pozorováno systematické chování tloušťky mazacího filmu v závislosti na polaritě aplikovaného pole. Při negativním napětí dochází k postupnému poklesu tloušťky filmu v důsledku nárůstu koncentrace kationtů v adsorpční vrstvě, které vykazují nízkou stabilitu a slabou přilnavost k povrchu. Naopak aplikace pozitivního napětí způsobuje nárůst tloušťky filmu díky přítomnosti aniontů s karbonylovými skupinami, které se silně adsorbují a vytvářejí stabilní mezivrstvu s vysokou únosností [3].

Byly také provedeny testy změny polarity během testu. U IL [BMIM]PF₆ se po změně polarity elektrického pole projevila reverzibilní změna součinitele tření, která potvrdila přítomnost elektroindukované orientace a vrstvení iontů [3]. I po odpojení napájení zůstal součinitel tření zvýšený, což bylo přičítáno setrvávajícímu uspořádání alkylových řetězců na povrchu. Teplotní změny během testů nepřesáhly 1,5 °C a byly vyloučeny jako hlavní faktor ovlivňující mazací chování [3]. V Tabulka 2 je porovnáván vliv elektrického napětí na změnu součinitele tření.

Tabulka 2 Vliv elektrického pole na změnu součinitele tření [14]

Reference	Geometry	Material	Lubricant	el. Potential	Change in COF *	
				V	-	%
Gat 2019	ball-on-3-pins	100Cr6	[P66614][DEHP]; [P66614][BTA] 1:3	3.0 -3.0	0.028 -0.005	26.7 -4.8
Gat 2020	ball-on-3-pins	100Cr6	[P66614][Doc]; [P66614][BTA] 1:4	3.0 -3.0	0.045 -0.004	45.0 -4.3
Kaw 2019	disk-on-disk	AISI 52100 + ta-C	[BMIM][FAB] [BMIM][PF6]	4.0 -2.0	0.027 -0.004	40.9 -6.3
Guo 2019	ball-on-disk	GCr15	C10 NFs	4.5	-0.017	-13.5
Mic 2020	ball-on-disk	C45/C10	[BMIM]PF6	1.0	0.023	69.2
Li 2014	AFM cantilever tip on plate	Si/HOPG	[HMIm]FAP	-1.0 1.5	0.001 -0.018	5.3 -94.7
Yang 2014	ball-on-disk	ZrO ₂ /steel 4340	PC oil [DMIm]PF6/PC (0.5 mM)	0.6 -0.6	0.020 -0.120	8.0 -46.2
Zhang 2022	ball-on-disk	GCr15	1 wt.% [OMIm]PF6 + PAO50	3.0	0.100	125.0
Liu 2021	ball-on-disk	ZrO ₂ /Al ₂ O ₃	1 mM SDS and 10 mM NaCl	-2.0	0.220	169.2

* The stated change in COF could deviate slightly from the measured values since most of the values were read from diagrams.

2.2.4 Elektromobilita

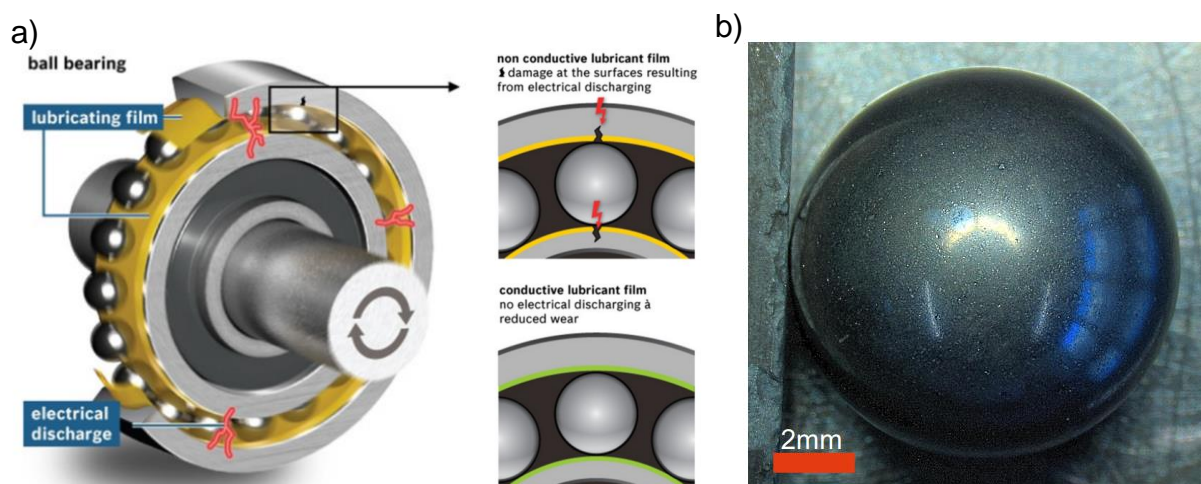
IL v mazivu by mohla také představovat významnou výhodu v mazání ložisek elektromobilů. Elektromobilita je v dnešní době jedním z nejvíce se rozvíjejících odvětví dopravy. Jak uvádí například výzkum [2] až 40 % poruch motorů elektromobilů je důsledkem selhání valivých ložisek. Tedy přesněji elektrickým výbojem (Electric discharge), který vznikne v nevodivém mazivu mezi dvěma třecími povrchy ložiska (Obr 2-11 a)) [3].

Elektrický výboj

V elektromobilech dochází k elektrickému poškození ložisek v důsledku složitého elektrického prostředí, které je výsledkem konstrukce napájecí soustavy elektromotoru. Baterie elektromobilů, typicky pracující s napětím v rozsahu 300 až 800 V DC, napájí výkonovou elektroniku [23]. Toto napětí je nejprve upraveno pomocí DC/DC měniče a následně převedeno na střídavé napětí pomocí invertoru. Nejčastěji se používá PWM (Pulse Width Modulation) invertor, který generuje střídavé napětí ze série rychlých spínacích pulzů. Rychlé spínání pólů v PWM invertoru vytváří tzv. common mode voltage (CMV), což je vysokofrekvenční nesymetrické napětí, které se může indukovat na hřídeli motoru [24]. Dále se na hřídeli může objevit napětí způsobené asymetriemi magnetického toku, které vznikají např. z důvodu nerovnoměrného vinutí statoru, geometrických nepřesností nebo excentricity rotoru [24]. Vlivem těchto jevů se v ložiscích mohou akumulovat elektrické náboje. Pokud je mezi třecími povrchy přítomen mazací film s nízkou vodivostí, dochází k vytvoření izolační vrstvy, která odděluje vodivé části ložiska. Jakmile se napětí na této dielektrické vrstvě zvýší nad mezní hodnotu její dielektrické pevnosti, dojde k průrazu mazacího filmu a k elektrickému výboji [23; 25].

Výsledný výboj způsobuje lokální tavení nebo dokonce odpaření maziva i materiálu povrchu, čímž dochází ke vzniku charakteristických poškození povrchů, jako je frosting nebo fluting [26]. Při opakovaných výbojích dochází ke strukturálním změnám nejen na povrchu, ale také v mazivu samotném. Mazací film je degradován jak fyzikálně, tak chemicky, což vede ke zhoršení jeho izolačních vlastností [26]. V konečném důsledku to znamená ztenčení filmu, snížení dielektrické pevnosti a zvýšení pravděpodobnosti dalších výbojů. Ztráta mazacího filmu pak vede ke smíšenému nebo suchému tření, které urychluje opotřebení ložiska.

Výzkumy [3; 27] prokázaly, že díky IL je mazací film vodivý a nedojde tak k elektrickému výboji, který výrazně ničí povrch ložiska, jak je vidět na Obr 2-11 b). Nové technologie mazání ve vozidlech by mohly celosvětové ztráty způsobené třením snížit v dlouhodobém horizontu 15 let až o 40 %, krátkodobě (8 let) o 18 %, celkově by tak světové úspory činily 1,4 % HDP [28].



Obr 2-11 a) Elektrický výboj [25]; b) poškození povrchu kuličky [25]

Výsledky výzkumu [29] ukázaly, že díky vyššímu tlakově-viskozitnímu součiniteli dochází ke zvýšení centrální i minimální tloušťky EHD filmu a díky tomu zároveň roste izolační schopnost mazací vrstvy, čímž se snižuje pravděpodobnost vzniku elektrického výboje. Kromě toho byla určena limitní hodnota tloušťky filmu (~100 nm), pod kterou výrazně roste výskyt průrazů. Průraz (dielectric breakdown) je fyzikální jev, který předchází elektrickému výboji [29]. Izolační materiál (například mazací film) ztrácí své izolační schopnosti a začne vodit elektrický proud. Dochází k němu tehdy, když je na izolační vrstvu aplikováno tak vysoké elektrické napětí, že v ní vznikne lokální ionizace. Molekuly nebo atomy izolantu se rozpadnou na ionty a elektrony, čímž vznikne vodivá cesta [29].

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Na základě kritické rešerše dostupné odborné literatury bylo identifikováno několik klíčových faktorů, které umožňují řídit tloušťku mazacího filmu pomocí IL a působícího elektrického pole. Jedním z hlavních mechanismů je elektrostatická reorganizace iontové dvojvrstvy v reakci na polarizaci třecích povrchů [11]. Katodické buzení způsobuje adsorpci kationtů s dlouhými alkylovými řetězci na povrch, čímž dochází ke vzniku stabilní lubrikační vrstvy a ke snížení součinitele tření [14]. Naproti tomu anodické buzení indukuje přítomnost aniontů v adsorpční zóně, což vede k vytěsnění kationtů z povrchu a následnému zvýšení tření [14]. Tento jev byl popsán například ve studii Gatti a kol. (2023) [14], kde bylo také pozorováno, při použití směsi IL [P66614][DEHP] a aniontu [BTA], zvýšení tloušťky mazacího filmu z 33 nm na 45 nm při aplikaci kladného napětí +3 V a snížení na 31 nm při -3 V, přičemž změny souvisely se směrem migrace iontů v elektrickém poli.

Z hlediska experimentální realizace byly identifikovány dva hlavní přístupy k přivedení napětí do kontaktu. Prvním je použití chromové vodivé vrstvy na skleněném disku, jak bylo provedeno například v experimentech Michalce (2020) [8]. Druhým způsobem je přivedení napětí přes elektrody okolo kuličky, jak bylo realizováno například u zařízení popsaného Reddym (2022) [3]. Ve všech případech bylo napětí udržováno v nízkých hodnotách, typicky do ± 2 V, aby se předešlo Faradayovým reakcím [3; 8; 13; 14; 30]. Významným diagnostickým nástrojem byla kolorimetrická interferometrie, která umožňuje sledovat dynamické změny v tloušťce filmu v reálném čase s rozlišením do 1 nm [8].

Při hodnocení vhodnosti IL pro mazání ložisek v elektromobilech se ukazuje, že jejich unikátní elektrické vlastnosti představují zásadní výhodu oproti běžným nevodivým mazivům. Průraz mazacího filmu v EHD kontaktu, způsobený vysokou intenzitou elektrického pole, může vést k opakovaným elektrickým výbojům, lokálnímu přehřátí a poškození povrchu (tzv. frosting, fluting). Tyto jevy byly detailně popsány například ve studii [30], která ukázala, že četnost výbojů prudce roste při poklesu tloušťky filmu pod 100 nm a že oleje s vyšším tlakově-viskozitním součinitelem vykazují lepší schopnost odolat průrazu díky větší tloušťce vytvořeného filmu.

Použitím IL jakožto vodivých a elektrostaticky stabilních maziv lze těmto jevům efektivně předejít. Díky své elektrické vodivosti a schopnosti rovnoměrného rozložení náboje zabraňují hromadění potenciálových rozdílů mezi kovovými částmi, čímž eliminují podmínky pro vznik průrazu. Studie Reddyho (2022) [3] navíc prokázala, že i při extrémně nízké koncentraci IL v biooleji (5 % P-BOB v 2EHL) dochází při aplikaci elektrického napětí k nárůstu tloušťky filmu až na 30 nm, což je spojeno s tvorbou vícevrstvé aniontové struktury.

Přestože většina studií potvrzuje vysoký potenciál IL pro tyto aplikace, existují i omezení. Některé IL mohou být chemicky reaktivní vůči elektrodám. Například IL s imidazoliovým kationtem mohou interagovat s kovovými oxidy nebo chromem, jak upozorňuje i Gatti a kol. (2023) [14]. Dále byly identifikovány rozdíly v efektivitě regulace tření mezi anodickou a katodickou polarizací. Zatímco změny dosažené anodickým buzením často přetrvávají i po odpojení napětí, katodická polarizace vyžaduje trvalé elektrické napětí, což je z hlediska energetické efektivity nevýhodné.

Rešerše tedy potvrzuje, že kombinace vhodné IL, řízené elektrické polarizace a pokročilé diagnostiky umožňuje cílené programování tření a tloušťky mazacího filmu. Tyto poznatky jsou vysoce relevantní pro vývoj moderních tribologických systémů včetně ložisek elektromobilů, kde elektrická pole a dielektrické vlastnosti maziva hrají klíčovou roli.

2.4 Mezera v poznání

Současný výzkum v oblasti elektroregulace tribologických vlastností IL se zaměřuje především na řízení součinitele tření. Tloušťka mazacího filmu, přestože má zásadní význam pro oddělení třecích povrchů a výsledné opotřebení součástí, bývá často sledována pouze okrajově. Přitom právě možnost aktivně ovlivnit tloušťku mazací vrstvy elektrickým napětím otevírá cestu k vývoji spolehlivých a adaptivních mazacích systémů.

V laboratorních experimentech bylo prokázáno, že aplikace napětí může měnit uspořádání iontů v kontaktu a tím přímo ovlivňovat tloušťku filmu. Kompresi či expanze mazací vrstvy je výsledkem elektrostatické reorganizace kationtů a aniontů, přičemž rozhodující je volba iontového páru (kationt a aniont). Tvorba vícevrstevných adsorpčních struktur umožňuje cílené řízení separace povrchů, což klasická maziva neumožňují.

Tato schopnost je obzvlášť významná v technických aplikacích, kde dochází k současnému působení mechanického a elektrického zatížení. Typickým příkladem jsou valivá ložiska v elektromobilech, kde vysokofrekvenční napěťové špičky mohou vést k průrazu tenkého mazacího filmu a vzniku výbojů. Tradiční nevodivá maziva nejsou schopna takovým jevům zabránit, zatímco IL díky své vodivosti umožňují rozptýlení náboje a současně reagují vytvořením silnější ochranné vrstvy.

Dosud neprozkoumanou otázkou zůstává, zda by samotný výboj mohl sloužit jako spouštěč pro změnu struktury mazací vrstvy. Hypotéza, že by výboje mohly přechodně zvýšit tloušťku filmu, nebyla dosud experimentálně potvrzena. Naopak opakované výboje často vedou k degradaci maziva nebo poškození povrchu.

Tato diplomová práce se proto zaměřuje na dosud opomíjený aspekt – přímé sledování a kvantifikaci změn tloušťky mazacího filmu IL pod vlivem elektrického napětí. K tomuto účelu je využita kolorimetrická interferometrie, která umožňuje měřit tloušťku filmu v reálném čase. Předmětem zkoumání je iontová kapalina [HMIM][Cl] s chloridovým aniontem, pro kterou dosud nebyla publikována žádná studie zaměřená na elektroregulaci tloušťky mazací vrstvy.

Shrnutím lze konstatovat, že řízení tloušťky mazacího filmu IL prostřednictvím elektrického pole představuje slibný směr výzkumu s vysokým aplikačním potenciálem. Získané poznatky mohou přispět k vývoji inteligentních tribologických systémů schopných adaptace na měnící se provozní podmínky.

3 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je popsat chování mazacího filmu v EHD kontaktu mazaném iontovou kapalinou za působení nestacionárního elektrického pole. Jedná se o experimentální práci založenou na využití kolorimetrické interferometrie a univerzálního tribometru.

3.1 Výzkumné otázky

O1: Jak se změní tloušťka mazacího filmu po aktivaci elektrického napětí oproti stavu při nulovém napětí?

O2: Jaký vliv má polarita napětí, doba buzení elektrického napětí nebo uzemnění na změnu tloušťky mazacího filmu?

3.2 Cíle výzkumu

Hlavním cílem je provést základní orientovaný výzkum, který popíše mechanismus tvorby mazacího filmu v EHD bodovém kontaktu. K této tvorbě dochází díky změně reologických vlastností smart maziva, tj. maziva s IL, která nastává vlivem působení nestacionárního elektrického pole. K pozorování chování maziva bude využit univerzální tribometr, který je nutné upravit tak, aby bylo možné ke kontaktu přivádět elektrický proud. Pro měření bude využito metody kolorimetrické interferometrie.

Dílní cíle:

- navrhnout vhodnou IL,
- modifikovat stávající experimentální zařízení a navrhnout parametry měření,
- experimentálně popsat mechanismus utváření mazacího filmu za působení elektrického napětí.

3.3 Hypotézy

H1: Aplikace vnějšího elektrického napětí v oblasti EHD kontaktu způsobí elektrostatickou migraci iontů, která povede ke **kumulaci iontů** v blízkosti třecích povrchů. **Se zvyšujícím se napětím** poroste **rychlost nárůstu tloušťky** mazacího filmu a bude možné dosáhnout **vyšších hodnot** jeho stabilní **tloušťky**.

Tato hypotéza vychází z principu elektrostatické reorganizace iontové dvojvrstvy v přítomnosti elektrického pole [13]. Podobně Reddy a kol. (2022) pozorovali výrazné zahuštění mazacího filmu při překročení napětí +1,5 V u směsi biooleje a P-BOB, přičemž film dosáhl více než dvojnásobné tloušťky ve srovnání s nulovým napětím [3]. Tyto výsledky naznačují, že s rostoucím napětím se zvyšuje nejen intenzita elektroindukované adsorpce iontů, ale i rychlost změny struktury filmu. Mechanismem tohoto jevu je elektroswelling, při kterém elektrostatické přitažení iontů vytváří vícenásobné vrstvy u povrchu, což vede k mechanickému oddálení protilehlých třecích ploch [14].

H2: Změna polarity aplikovaného elektrického napětí **zajistí nárůst nebo pokles tloušťky mazacího filmu**. Anodická polarizace povede k jeho růstu, katodická k poklesu. **Po odpojení elektrického napětí (uzemnění) dojde k postupnému poklesu tloušťky filmu** v důsledku ztráty elektrostatické organizace iontů.

Hypotéza reflektuje rozdílnou odezvu mazacího filmu na anodickou a katodickou polarizaci, která byla potvrzena například ve studii Gatti a kol. (2023). Zde bylo pozorováno, že při kladné polarizaci dochází k nárůstu filmu vlivem akumulace aniontů, zatímco při záporné polarizaci se film stlačuje v důsledku přítomnosti méně stabilních kationtů u povrchu [14]. Bylo rovněž prokázáno, že po změně polarit y napětí dochází k reverzibilnímu nárůstu nebo poklesu tloušťky a že po odpojení napětí tloušťka filmu klesá, což bylo přičteno zpětné difuzi iontů a uvolnění elektrostatické organizace ve vrstvě. Tyto výsledky podporují předpoklad, že polarita napětí je rozhodujícím parametrem pro směr změny tloušťky a že dosažený efekt není trvalý. Po uzemnění elektrody mizí nábojová nerovnováha a systém se postupně vrací do neutrálního stavu s nižší tloušťkou mazací vrstvy [14].

4 MATERIÁL A METODY

V této kapitole jsou popsány analyzované materiály a jejich parametry, dále měřicí a vyhodnocovací metody a postupy.

4.1 Metodika

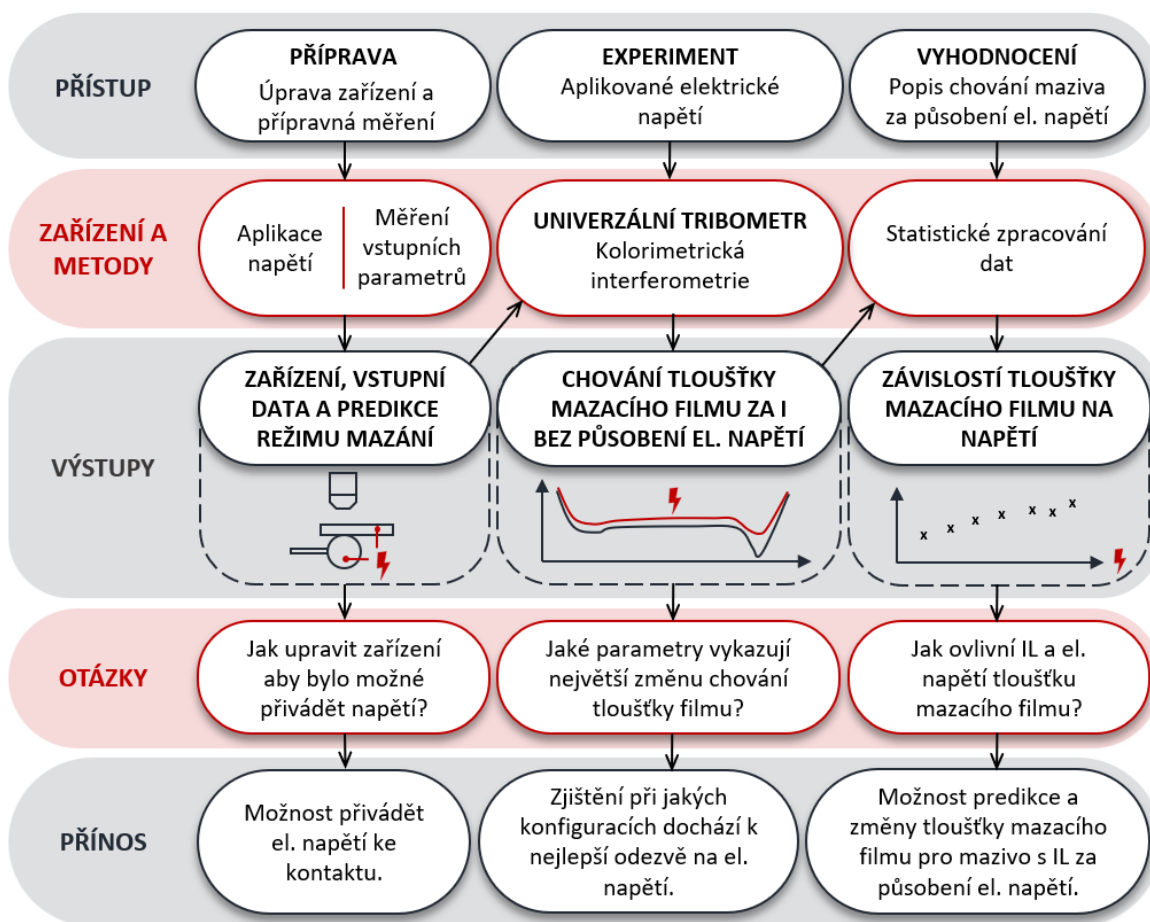
Výzkumné otázky uvedené v předchozí kapitole se zaměřují na vztah mezi vstupními vlastnostmi a jejich důsledky v kontextu použití IL a vlivu na tloušťku mazacího filmu. Z toho vyplývá, že se tato diplomová práce zabývá relačním výzkumným problémem. K jeho řešení byla aplikována empirická vědecká metoda se zaměřením na kvantitativní výzkum s využitím deduktivního postupu.

Ze stanovených cílů byly vytvořeny konkrétní výzkumné otázky, které sloužily jako vstupy pro systematickou rešerši. Rešeršní část práce se věnovala identifikaci vlivu IL na změnu tloušťky mazacího filmu a současně analyzovala dostupné experimentální přístupy pro sledování tohoto jevu.

Na základě poznatků z rešerše byla zvolena vhodná IL s prokázanou odezvou na elektrické pole. Dále byl zvolen experimentální přístup pro měření tloušťky mazacího filmu za působení elektrického napětí. Vzhledem k požadavku na zavedení elektrického proudu do oblasti kontaktu během měření bylo nutné navrhnout a realizovat úpravy stávajícího experimentálního zařízení.

Na modifikovaném zařízení byla provedena série experimentů s různými mazivy (např. olej R825/95 a IL) a v odlišných konfiguracích elektrického zapojení. Měřena byla tloušťka mazacího filmu a současně docházelo k ověřování stanovených hypotéz.

Naměřená data byla zpracována pomocí statistických metod, na jejichž základě byla provedena diskuze výsledků a formulovány závěry. Postup řešení je graficky znázorněn na schématu na Obr 4-1.



Obr 4-1 Schéma metodiky práce

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

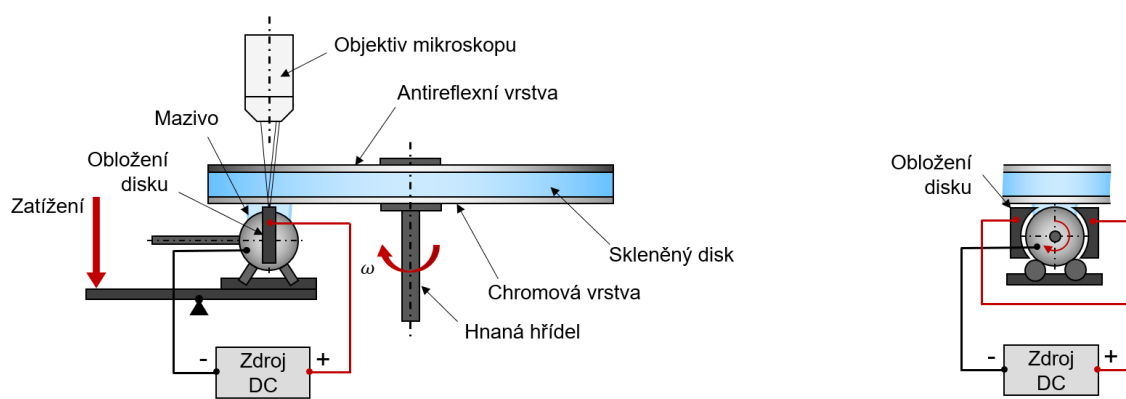
Kapitola popisuje hlavní použité experimentální zařízení, kterým je optický tribometr. Dále jsou zde zmíněny úpravy dílčího zařízení.

4.2.1 Optický tribometr

Na základě provedené literární rešerše byla jako nejvhodnější experimentální metoda pro sledování tloušťky mazacího filmu zvolena optická interferometrie. Pro její realizaci byl použit optický tribometr v konfiguraci „ball-on-disk“, který umožňuje přesné sledování kontaktní oblasti mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem. Zařízení je vybaveno pákovým mechanismem, který zajišťuje konstantní přítlak kuličky na disk, jehož povrch je opatřen polopropustnou chromovou vrstvou.

Původní sestava tribometru však neumožňuje aplikaci elektrického napětí bez rizika degradace chromové vrstvy. V dřívějších experimentech [8] bylo napětí přiváděno přímo přes chromovou vrstvu disku a kuličku, což vedlo k chemické reakci mezi IL a chromem. Důsledkem této interakce bylo postupné odleptávání chromové vrstvy, které ohrožovalo jak funkčnost zařízení, tak přesnost měření. Z tohoto důvodu byly navrženy a vyrobeny nové konstrukční prvky umožňující bezpečné zavedení elektrického napětí do maziva bez přímého kontaktu s chromovou vrstvou. Upravené schéma zařízení včetně elektrického zapojení je znázorněno na Obr 4-2.

Sledování interferenčního obrazu bylo realizováno pomocí objektivu s dvacetinásobným zvětšením. Snímaná data byla zaznamenávána digitální CCD kamerou typu FLIR BFLY-3-3S6C-C a následně zpracována v softwaru Achilles. Podrobný popis použité metody optické interferometrie je uveden v kapitole 4.4.2.



Obr 4-2 Schéma optického tribometru s elektrickým obvodem

4.2.2 Úpravy experimentálního zařízení

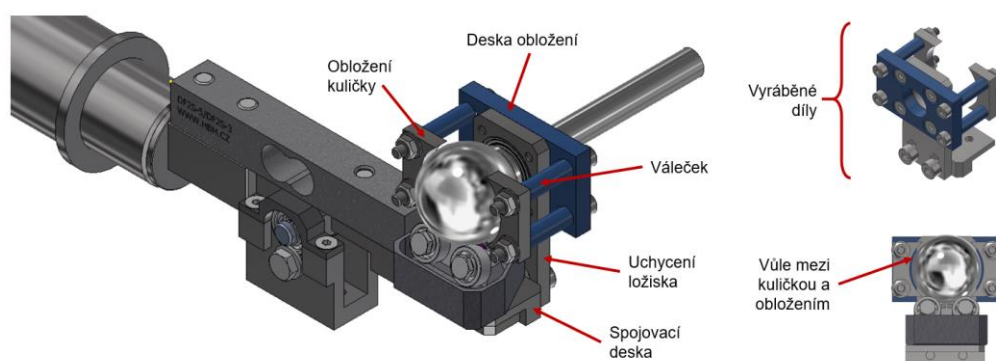
Pro zajištění přívodu elektrického napětí do kontaktní oblasti mezi kuličkou a diskem bylo nutné provést konstrukční úpravy stávajícího experimentálního zařízení. Byly navrženy dvě varianty řešení, které umožňují aplikaci elektrického napětí v těsné blízkosti tribologického kontaktu.

První varianta (A) využívá dvojici elektrod integrovaných do obložení kuličky. Tímto způsobem je napětí přiváděno do maziva přímo prostřednictvím obložení. Druhá varianta (B) spočívá v použití vodivého hrotu, jehož výstupní část je umístěna v těsné blízkosti kontaktní oblasti mezi kuličkou a diskem, čímž umožňuje cílenou aplikaci elektrického pole přímo do mazací vrstvy. Součástí konstrukčních úprav byla rovněž modifikace pohonu kuličky.

Varianta A

U konstrukční varianty A je možné využít buď samotnou ocelovou kuličku, nebo sestavu tvořenou kuličkou uchycenou na ose. Nově navržené a vyrobené díly jsou znázorněny na Obr 4-3. Konstrukce vyžadovala kombinaci vodivých kovových a elektricky nevodivých plastových součástí s cílem zajistit bezpečné a cílené přivedení napětí výhradně do kontaktní oblasti mezi kuličkou a diskem.

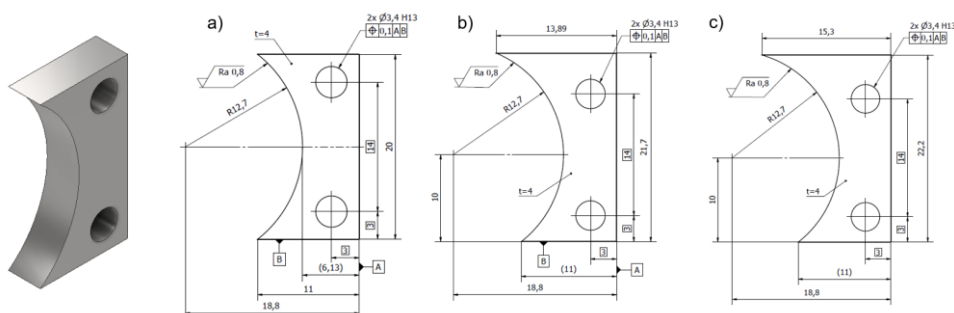
Plastové komponenty, konkrétně válečky a deska obložení, byly vyrobeny pomocí 3D tisku a plní funkci elektrického izolantu. Jejich úkolem je zamezit úniku elektrického proudu mimo oblast tribologického kontaktu. Kovové části byly zhotoveny z nerezové oceli 1.4301 a zahrnovaly tři sady obložení kuličky, spojovací desku a desku pro uchycení ložiska. Toto uspořádání umožnilo stabilní mechanické uchycení, možnost regulace polohy a současně spolehlivý přenos elektrického signálu.



Obr 4-3 Model vyráběných dílů – varianta A

Nově navržené komponenty byly k původnímu experimentálnímu zařízení připevněny pomocí spojovací desky, viz Obr 4-4 (vlevo), a standardizovaných spojovacích prvků. K uchycení spojovací desky byly použity zápusťné šrouby DIN 7991 M3×12. Na spojovací desku byla následně připevněna deska uchycení ložiska, viz Obr 4-4 (vpravo), pomocí šroubů DIN 912 M4×12. Tato deska je opatřena otvorem pro přesné osazení ložiska typu W 61701-2RS1, které slouží k vedení hřídele nesoucí kuličku. Pro snadné ustavení a přesnou polohovou regulaci v rámci experimentální sestavy jsou ve spodní části této desky vyfrézovány dvě vodící drážky. Kromě toho obsahuje deska k uchycení ložiska čtyři závitové otvory M3 umístěné v blízkosti ložiskového uložení. Do těchto otvorů je pomocí šroubů typu DIN 912 připevněna plastová deska obložení, která slouží k elektrickému izolování jednotlivých částí a současně fixuje obložení kolem kuličky.

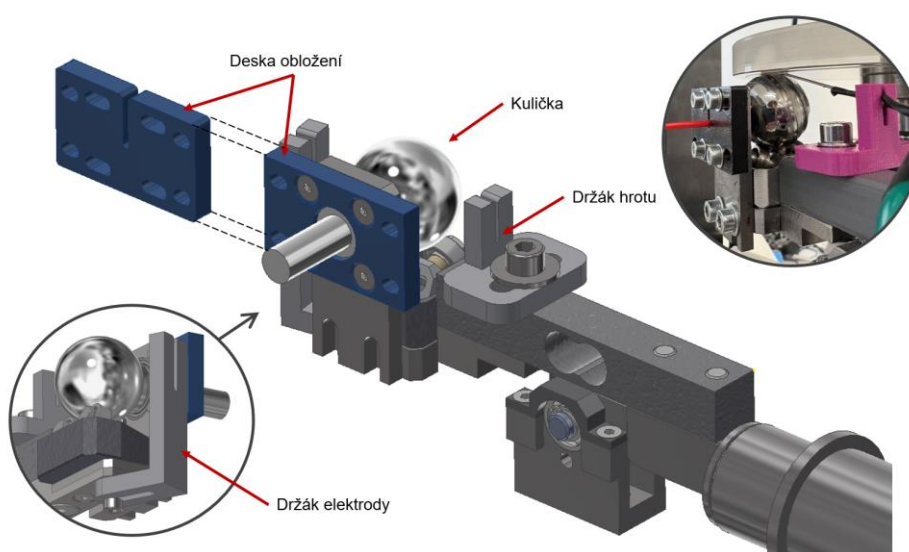
Klíčovou součástí celého systému bylo obložení kuličky (Obr 4-6), které zajišťovalo přívod elektrického napětí do maziva. Byly vyrobeny celkem tři sady obložení, přičemž každá sada obsahovala dva kusy obložení. Jednotlivé varianty, označené jako a až c, se liší konstrukčním řešením horní části. Ve všech variantách je horní polovina obložení záměrně navržena větší. Díky tomu je možné dostat obložení po výměně blíže ke kontaktní oblasti mezi kuličkou a diskem. Tím se minimalizuje vzdálenost mezi elektrodou a tribologickým kontaktem, což umožňuje účinnější aplikaci elektrického napětí.



Obr 4-6 Obložení kuličky

Varianta B

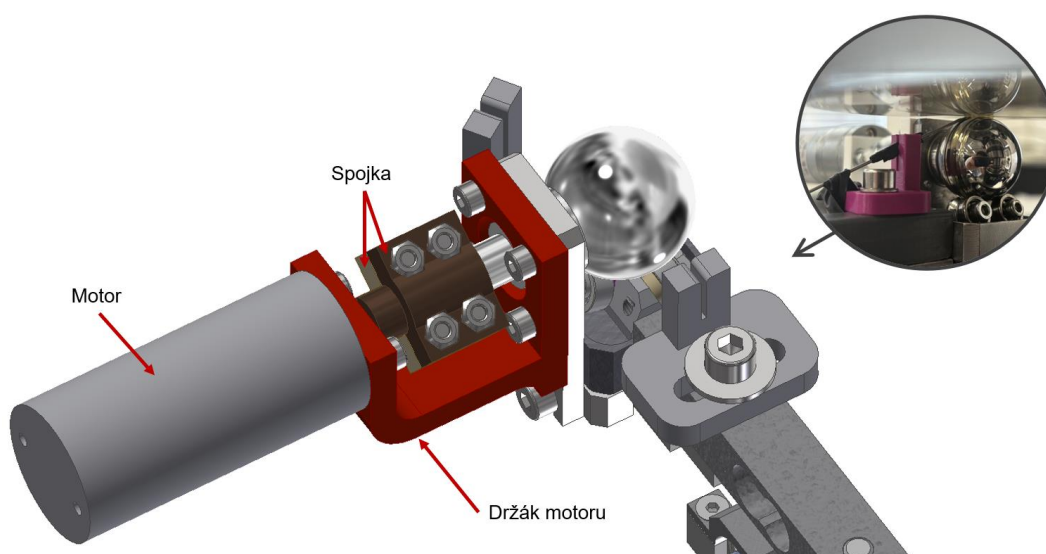
Varianta B (Obr 4-7) konstrukčně vychází ze stejného základu jako varianta A, tedy ze spojovací desky a desky pro uchycení ložiska. I v tomto uspořádání je možné provádět experimenty jak se samotnou kuličkou, tak s kuličkou uchycenou na ose. Pro umístění vodivého hrotu v blízkosti kontaktní oblasti byl navržen a pomocí 3D tisku vyroben speciální držák. Tento držák umožňuje přesné polohování hrotu tak, aby se co nejvíce přiblížil ke kontaktní oblasti a zajistil lokalizovaný přívod elektrického napětí. V případě použití varianty kuličky s osou byl navíc vyroben přídatný držák elektrody, který umožňuje fixaci vodiče vedoucího přímo ke kuličce.



Obr 4-7 Schéma varianty B

Pohon kuličky

Pro zvýšení přesnosti a opakovatelnosti experimentálních měření byl k systému integrován motor k pohonu kuličky (Obr 4-8). Na základě požadavků na nízké a stabilní otáčky byl zvolen stejnosměrný motor typu 25GA-370 12V 200 RPM (model JGA25-370). Tento motor umožnil sladění obvodové rychlosti kuličky s rotujícím diskem, čímž bylo dosaženo podmínek čistého nebo řízeného valení. Díky tomu bylo možné eliminovat nežádoucí skluz mezi kontaktními tělesy, který by mohl negativně ovlivnit opakovatelnost výsledků měření. K integraci motoru bylo nutné navrhnout a vyrobit držák motoru zajišťující jeho stabilní uchycení, a dále spojku pro mechanické propojení motoru s osou kuličky. Tímto způsobem byl zajištěn plynulý a řízený přenos rotačního pohybu do experimentálního kontaktu.



Obr 4-8 Schéma dílů pohonu kuličky

4.3 Materiál a testovací podmínky

Tato kapitola popisuje vlastnosti použitých maziv a důvody jejich výběru s ohledem na požadavky experimentu. Výběr základového oleje a IL byl proveden tak, aby jejich dynamické viskozity byly co nejvíce srovnatelné, čímž se minimalizoval vliv tohoto parametru na výsledky měření.

4.3.1 Základový olej

Na základě rešerše byl jako referenční olej zvolen R 825/95. Kromě dostupnosti a nízké ceny sehrála při výběru zásadní roli hodnota dynamické viskozity, která činí 0,064 Pa·s při 25 °C. Olej byl vybrán tak, aby měl viskozitu co nejbližší vhodné IL, což umožnilo objektivní porovnání jejich mazacích schopností v identických podmínkách. Hlavním důvodem pro využití oleje v experimentu bylo ověření funkčnosti experimentální aparatury.

4.3.2 Iontová kapalina

Jako testovaná IL byla zvolena 1-hexyl-3-methylimidazolium chlorid ($C_{10}H_{19}ClN_2$, HMIMCl) s $[HMIM]^+$ kationtem a aniontem chloridu $[Cl]^-$. Tato IL vykazuje ve vodném roztoku při různých teplotách chování typické pro kationtové povrchově aktivní látky s krátkým řetězcem, včetně agregačního chování [31]. Stejně jako většina IL je průhledná, což ji činí vhodnou pro metodu kolorimetrické interferometrie. Výběr byl dále ovlivněn její dobrou dostupností, příznivou cenou a citlivou odezvou na elektrické buzení. Za účelem sladění viskozity s referenčním olejem byla IL mírně ředěna destilovanou vodou, přičemž její koncentrace zůstala nad 98 % hmotn. Označení IL v experimentech odpovídá HMIMCl.

4.3.3 Vstupní parametry

Experiment byl navržen tak, aby většina parametrů ovlivňujících tloušťku mazacího filmu zůstala konstantní. Mezi tyto parametry patří mechanické zatížení realizované závažím na konci páky, které odpovídá přítláčné síle 8,5 N v kontaktní oblasti. Všechny testy probíhaly při teplotě 25 °C ± 0,5 °C. Důležitým faktorem byla rovněž topografie povrchu těles v kontaktu. Skleněný disk vyrobený z borosilikátového skla BK7 byl opatřen chromovou vrstvou na spodní straně a vykazoval opticky čistý povrch. Ocelová kulička z materiálu AISI 52100 (100Cr6) s tvrdostí 60–66 HRC byla před každým experimentem přešetřena a kontrolována, aby bylo zaručeno, že se kvadratická drsnost S_q jejího naleštěného povrchu pohybuje mezi 8–9 nm. Průměr kuličky činil 25,4 mm, disk měl průměr 150 mm. Klíčovým parametrem však byl průměr dráhy vzhledem k ose otáčení disku, po níž se kulička pohybovala. Tento rozměr se měnil mezi 100 a 140 mm v závislosti na rozsahu neporušené chromové vrstvy. Přesná geometrie kontaktu byla důležitá pro vyhodnocení mazacího režimu a porovnání jednotlivých experimentálních konfigurací. Další vstupní parametry disku a kuličky jsou uvedené v Tabulka 3.

Tabulka 3 Vstupní parametry

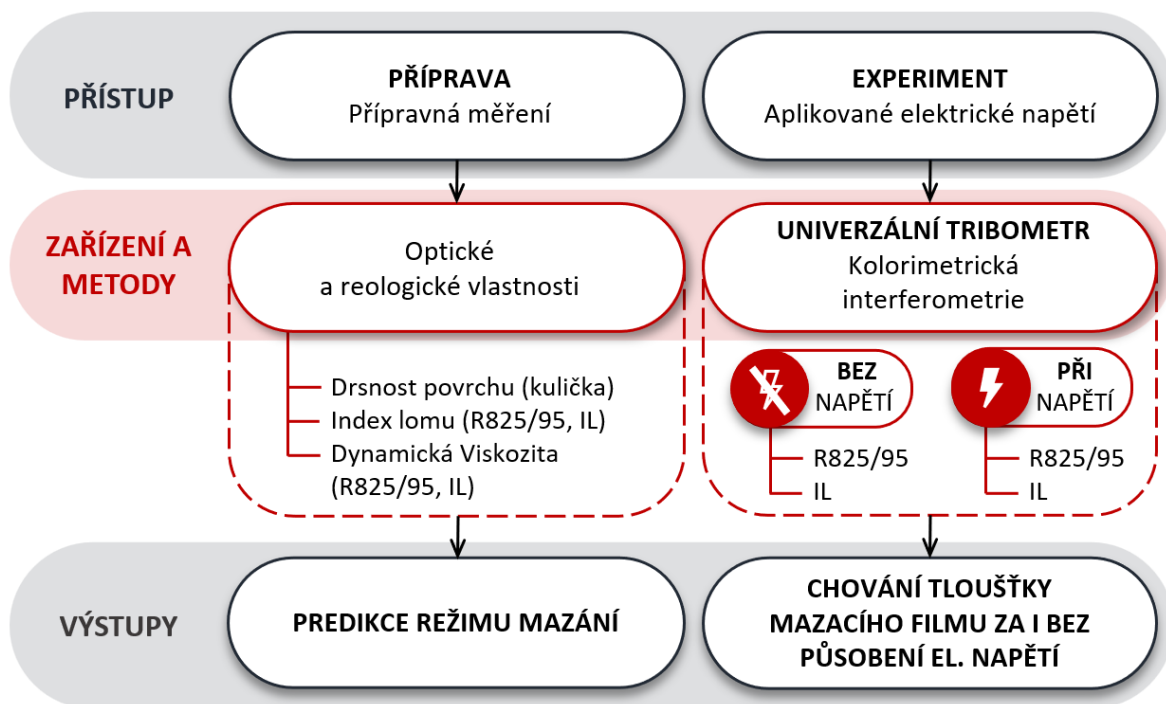
Parametr	Kulička	Disk
Materiál	AISI 52100	BK7
Youngův modul E [GPa]	206	82
Poissonova konstanta ν [-]	0,3	0,208
Drsnost povrchu Sq (Rq) [nm]	8-9	14,1
Průměr D [mm]	25,4	150

Mezi proměnné parametry, které byly v rámci experimentu systematicky měněny, patřily z důvodu opotřebení chromové vrstvy poloměr dráhy kuličky a rychlost kontaktu. Tyto veličiny ovlivňují výslednou tloušťku mazacího filmu a mazací režim. Rychlost byla měněna v průběhu experimentu s cílem dosáhnout elasto-hydrodynamického (EHD) bodového kontaktu. A zároveň co nejmenších tlouštěk mazacího filmu z důvodu snadného ovlivnění elektrickým napětím. Rozmezí testovaných rychlostí bylo stanoveno na základě predikce mazacího režimu. Klíčovým ukazatelem byl parametr mazání Λ , který se v experimentech pohyboval v rozsahu 4 až 6. Hodnota $\Lambda = 5$ je považována za orientační mezní hodnotu pro přechod do EHD režimu. Otáčky byly upravovány v závislosti na aktuálním poloměru dráhy kuličky, aby výsledná obvodová rychlost odpovídala požadovaným podmínkám pro vznik EHD filmu.

Dalším důležitým proměnným parametrem bylo elektrické napětí. To bylo v průběhu experimentů měněno v rozmezí ± 2 V, přičemž v některých specifických případech bylo zvýšeno až na 5 V. Změna elektrického napětí umožnila sledovat vliv elektrochemické aktivace na tloušťku mazacího filmu.

4.4 Metody

Tato kapitola podrobně popisuje použité metody a postupy využité během experimentů. Schéma prováděných měření pro stanovení tloušťky mazacího filmu je znázorněno na Obr 4-9.



Obr 4-9 Schéma provedených měření

4.4.1 Přípravná měření

První fáze experimentální části byla zaměřena na přípravná měření, jejichž cílem bylo stanovit predikci režimu mazání. Tato predikce je nezbytná pro správné nastavení experimentu a následnou interpretaci výsledků a závisí na celé řadě parametrů. Mezi klíčové vstupní parametry patří materiálové charakteristiky, geometrie kontaktu, mazací vlastnosti použitých kapalin, aplikované zatížení a relativní rychlost.

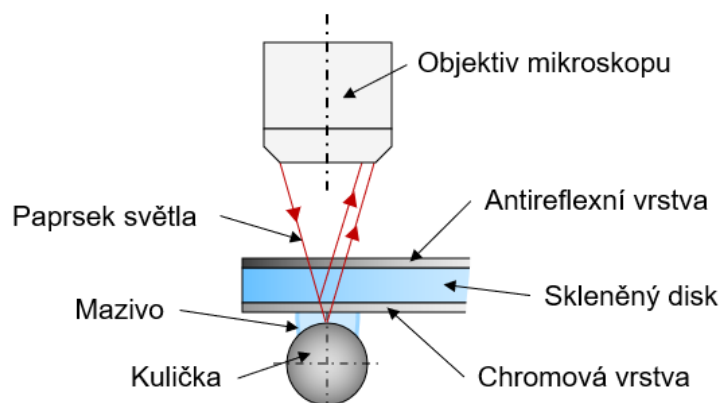
Pro stanovení režimu mazání byla využita prediktivní rovnice dle Hamrocka a Dowsona (viz rovnice 1), která umožňuje predikovat tloušťku mazacího filmu v EHD kontaktech. K aplikaci této rovnice bylo nezbytné experimentálně určit všechny potřebné vstupní parametry. Mezi ně patřily zejména index lomu, drsnost povrchů a dynamická viskozita maziv. Výsledné hodnoty byly následně využity při výpočtech predikovaných hodnot tloušťky filmu a při klasifikaci výsledných mazacích režimů v jednotlivých konfiguracích. V rovnici představuje H_C predikovanou hodnotu centrální tloušťky, G (-) parametr materiálu, U (-) parametr rychlosti, W (-) parametr zatížení, k (-) parametr elipticity.

$$H_C = 2,69 \cdot G^{0,53} \cdot U^{0,67} \cdot W^{-0,067} \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}) \quad (1)$$

4.4.2 Optická interferometrie

Metoda optické interferometrie (Obr 4-10) byla použita pro měření tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu mezi skleněným diskem a ocelovou kuličkou. Do této kontaktní oblasti je soustředěn paprsek bílého světla, jehož široké spektrální složení vede k interferenci s nízkou koherencí. Paprsek prochází skleněným diskem a naráží na jeho polopropustnou chromovou vrstvu, kde dochází k jeho rozdělení. Jedna část světla se ihned odrazí zpět směrem k objektivu, druhá část pokračuje k povrchu kuličky, odkud se po odrazu také vrací. Vzniklá diference mezi oběma paprsky způsobí posun jejich fází, což se ve výsledném obraze projeví interferencí ve formě rozdílné intenzity a barev.

Pro kvantitativní vyhodnocení tloušťky filmu je nezbytná kalibrace, při níž je každé barevné složce přiřazena odpovídající tloušťka mazacího filmu. Kalibrace probíhá za podmínek statického, zaplaveného kontaktu. Nejprve se pořídí monochromatický interferogram sloužící k určení geometrie kontaktní oblasti, na něž navazuje statistické zpracování chromatického interferogramu a přiřazení barevné škály. Vyhodnocení probíhá pomocí diferenční formule, která porovnává barevnou informaci z aktuálního interferogramu s referenčními daty z kalibračního etalonu. Tato kolorimetrická interferometrie dosahuje rozlišitelnosti až 1 nm, což z ní činí metodu vhodnou pro sledování i velmi tenkých mazacích vrstev.



Obr 4-10 Schéma metody optické interferometrie

V rámci experimentu byla metoda aplikována na měření tloušťky mazacího filmu u základového oleje i IL. Měření probíhala nejprve bez působení elektrického napětí a následně s jeho aplikací.

Měření bez elektrického napětí

Na odlehčeném experimentálním zařízení byl pomocí objektivu lokalizován přesný kontaktní bod a následně provedena kalibrace interferenčního zobrazení (s malým množstvím maziva). Po dokončené kalibraci bylo do kontaktní oblasti aplikováno dostatečné množství testovaného maziva (základový olej nebo IL). To odpovídá objemu přibližně 1 ml, který byl určen na základě parametru mazání $\Lambda = 5$. Na konec pákového mechanismu bylo umístěno závaží, které vytvořilo konstantní zatěžovací sílu v kontaktu. Po spuštění motoru rotujícího diskem, případně motoru s kuličkou bylo možné zahájit experiment a začít pořizovat snímky. V každý okamžik, kdy bylo požadováno zaznamenat hodnoty, se pořídily tři snímky, které se následně vyhodnotily a jejich hodnoty tloušťky se zprůměrovaly. Pro každý typ experimentu byla vždy provedena minimálně tři měření.

Měření za působení elektrického napětí

Měření s aplikovaným elektrickým polem probíhala ve stejném experimentálním uspořádání jako v předchozí fázi, přičemž došlo pouze k výměně dílů umožňujících připojení elektrod dle konkrétní měřicí konfigurace. Systém byl přizpůsoben tak, aby umožňoval realizaci experimentu jak se samotnou kuličkou, tak s kuličkou upevněnou na ose. V obou případech byla kulička využita jako jedna z elektrod v rámci elektrického obvodu. Druhá elektroda byla tvořena buď obložením kuličky (varianta A), nebo vodivým hrotem umístěným v blízkosti kontaktní oblasti (varianta B). Dále proběhl experiment, kde byl zaručen stejný pól na kuličce a chromové vrstvě a zároveň byl do kontaktu přiveden opačný pól pomocí hrotu. Zmíněné konfigurace jsou uvedeny v Tabulka 4.

Tabulka 4 Konfigurace zapojení

Konfigurace zapojení	Kladný pól	Záporný pól
Obložení / kulička	Obložení	Kulička
Kulička / obložení	Kulička	Obložení
Hrot / kulička	Hrot	Kulička
Kulička / hrot	Kulička	Hrot
Hrot / kulička / chromová vrstva	Hrot	Kulička + ch. vrstva

Elektrický obvod sestával ze zdroje stejnosměrného napětí, pomocí kterého bylo nastavováno požadované napětí na elektrody. Pro kontrolu elektrického proudu v obvodu byl zařazen digitální multimetr. Zařízení tak umožňovalo sledovat průběh elektrické odezvy v reálném čase během experimentu. Kompletní zapojení obvodu zahrnovalo zdroj, multimetr a dvojici elektrod aplikujících elektrické napětí přímo do mazací vrstvy.

V rámci základního testování byla ověřena funkčnost několika variant zapojení s cílem identifikovat konfiguraci s nejvýraznější a nejstabilnější odezvou mazacího filmu na elektrické buzení. V navazující fázi experimentů byl systém doplněn o motor pohánějící kuličku. Ten umožnil přesné nastavení obvodové rychlosti kuličky a disku, čímž bylo dosaženo řízeného valení. Tím se vyloučil nežádoucí skluz, který by mohl ovlivnit opakovatelnost měření a interpretaci výsledků.

4.5 Testované predikce

Pro hypotézy zmíněné v kapitole 3.3 byly vytvořeny testovací predikce. V Tabulka 5 jsou pro jednotlivé predikce vypsány kontrolované, závislé a nezávislé proměnné.

Testovaná predikce pro H1:

Na základě dostupné literatury lze predikovat, že při aplikaci vnějšího elektrického pole do EHL kontaktu mazaného IL skutečně dochází ke směrové migraci iontů v rámci elektrické dvojvrstvy [14]. Výsledkem této reorganizace je kumulace iontů s opačným nábojem u polarizovaných elektrod, což podporuje tvorbu vícenásobných adsorpčních vrstev a zvětšení celkové tloušťky mazacího filmu [3]. Tento jev byl experimentálně potvrzen například ve studii Reddy a kol. (2022), kde při anodické polarizaci biooleje došlo ke skokovému nárůstu tloušťky filmu, přičemž se film dále zahušťoval s délkou a velikostí aplikovaného napětí. Podobně Gatti a kol. (2023) popsali systematické zvyšování tloušťky mazacího filmu se zvyšujícím se kladným napětím v prostředí IL, a to až do bodu, kdy se vytvořila vícestupňová aniontová struktura v blízkosti povrchu [14]. Simulační studie provedená Bresme a kol. (2022) dále potvrzuje, že při vyšších povrchových nábojích dochází ke strukturálnímu přeskoku v uspořádání iontových vrstev, což se projeví jako náhlé zvýšení vzdálenosti mezi povrchy [22].

Vědecká predikce proto potvrzuje, že **vyšší aplikované napětí** nejen **urychlí reorganizaci** iontů, ale také **umožní dosažení větších** výsledných hodnot **tloušťky mazacího filmu** díky stabilnější adsorpci iontových struktur.

Testovaná predikce pro H2:

Změna polaritý elektrického pole má přímý vliv na směr elektrostatické migrace iontů a tím i na dynamiku růstu nebo poklesu tloušťky mazací vrstvy. Při anodické polarizaci se k povrchu hromadí anionty, které bývají obecně větší a mají vyšší tendenci tvořit multilamelární struktury, což vede ke zvětšení tloušťky mazacího filmu. Naopak při katodickém buzení jsou k povrchu přitahovány menší kationty s nižší adsorpční energií, což způsobuje snížení tloušťky mazacího filmu. Tento vratný jev byl detailně popsán ve studii Gatti a kol. (2023), kde opakovaná změna polaritý vedla k pravidelným změnám v tloušťce filmu, přičemž efekt byl silnější v anodickém směru [14]. Po vypnutí napětí nebo uzemnění elektrody dochází ke ztrátě elektrostatické interakce a ionty se postupně redistribuují do rovnovážného stavu, což vede k poklesu tloušťky mazacího filmu. Tento pokles byl pozorován i v tribologické studii Reddy (2022), kde po ukončení napěťového pulzu nastal postupný návrat filmu do výchozí tloušťky v rámci několika desítek sekund [3]. Podobně i simulace, které uvádí v práci Bresme a kol. (2015), ukazují, že po odstranění elektrického pole dochází k rozrušení uspořádané vrstvy iontů a kolapsu systému na nižší energetickou hladinu, spojenou s tenčí adsorpční vrstvou [22].

Predikce tedy uvádí, že **změna polaritý slouží jako efektivní nástroj pro řízení nárůstu, nebo poklesu vývoje tloušťky mazacího filmu** a že v případě **odpojení či uzemnění napětí dojde k dalšímu snížení této mazací vrstvy**.

Tabulka 5 Testované predikce

Hypotéza	H1	H2
Kontrolovaná proměnná	<ul style="list-style-type: none">– Tloušťka mazacího filmu v čase– Rychlost změny tloušťky	<ul style="list-style-type: none">– Tloušťka mazacího filmu– Směr změny (nárůst/pokles)– Rychlost změny po přepnutí polaritý– Doba poklesu tloušťky po uzemnění kontaktu
Závislá proměnná	<ul style="list-style-type: none">– Velikost přivedeného napětí (± 5 V)	<ul style="list-style-type: none">– Polarita přivedeného napětí– Časový průběh aplikace napětí (zapnuto/vypnuto)
Nezávislá proměnná	<ul style="list-style-type: none">– Materiál a drsnost kontaktních těles– Teplota maziva a okolí– Doba expozice napětí– Smyková rychlost a zatížení (Hertzův tlak)– Atmosférická vlhkost (hygroskopie IL)	<ul style="list-style-type: none">– Konfigurace a materiály elektrod– Zatížení a rychlost– Počáteční tloušťka filmu před aplikací napětí– Okolní teplota a vlhkost– Viskozita a vodivost použitého maziva

5 VÝSLEDKY

5.1 Přípravná měření

Pro základový olej R 825/95 i IL (označení IL dále odpovídá HMIMCl) byla provedena přípravná měření, jejichž cílem bylo získat vstupní data pro predikci režimu mazání. Tato měření zahrnovala stanovení klíčových tribologických parametrů, jako jsou dynamická viskozita, index lomu, viskózně-tlakový součinitel a drsnost povrchu kontaktních těles. Získané hodnoty byly následně využity v Hamrock-Dowsonově výpočtovém modelu, který umožňuje predikovat tloušťku mazacího filmu a klasifikovat vzniklý režim mazání. Na základě této predikce byly poté definovány specifické parametry pro hlavní experimentální měření, jako je rozsah rychlostí nebo velikost zatěžování. Přípravná fáze tak tvořila zásadní základ pro validní návrh a provedení vlastního experimentu.

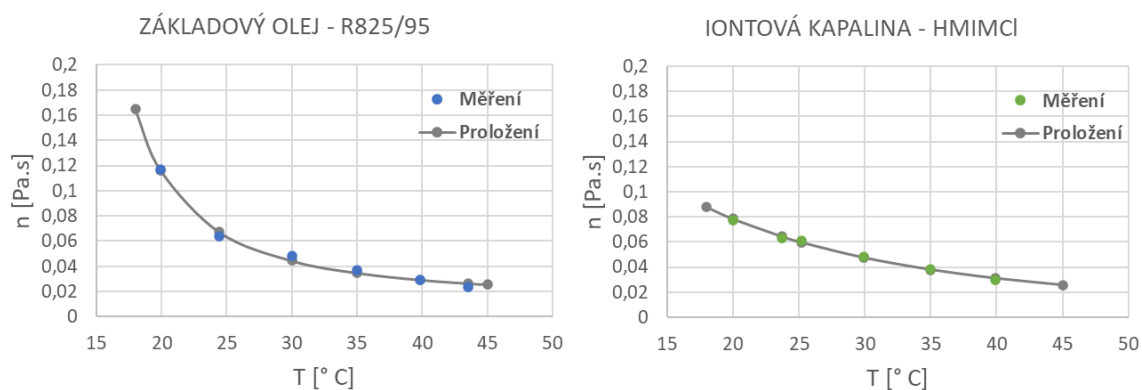
5.1.1 Optické a reologické vlastnosti maziv

Index lomu

Pro správné provedení kalibrace a následného vyhodnocení měření pomocí optické interferometrie bylo nezbytné určit index lomu testovaných kapalin. Tato hodnota vstupuje přímo do výpočtu tloušťky mazacího filmu z interferenčních obrazů a ovlivňuje přesnost celé metody. Index lomu byl stanoven experimentálně pro referenční olej i pro IL. Měření byla provedena pomocí Abbeho refraktometru při laboratorní teplotě 25 °C. Zjištěné hodnoty byly dále použity jako vstupní parametry pro kalibraci barevné škály a interpretaci interferenčních pruhů v softwaru Achilles. Měření indexu lomu bylo dále zopakováno před a po testu, aby se prokázala změna koncentrace vody v ředěné IL.

Dynamická viskozita

Teplotní závislost dynamické viskozity byla stanovena na základě Vogelova vztahu, který umožňuje popsat nelineární charakter poklesu viskozity s rostoucí teplotou. Tento přístup byl uplatněn pro základový olej R 825/95 i pro IL. Výsledky jsou graficky znázorněny na připojeném Obr 5-1.



Obr 5-1 Dynamická viskozita oleje a IL

Pro základový olej byla využita data z dřívějších měření, která pokrývala teplotní rozsah 18–5 °C. V identickém rozsahu byla následně experimentálně určena viskozita IL. U obou kapalin byly hodnoty dynamické viskozity změřeny při několika definovaných teplotách, které umožnily vytvořit dostatečně reprezentativní oblast dat. Naměřené hodnoty byly následně proloženy Vogelovou křivkou, což umožnilo vytvořit matematický model závislosti viskozity na teplotě. Tento model sloužil nejen k interpolaci hodnot v rámci měřeného intervalu, ale i k případné extrapolaci pro jiné teplotní podmínky. Takto získané hodnoty byly následně využity jako vstupní parametr pro predikci tloušťky mazacího filmu.

Viskózně-tlakový součinitel

Pro predikci režimu mazání v EHD kontaktu bylo nezbytné stanovit viskózně-tlakový součinitel α , který vyjadřuje míru, s jakou dynamická viskozita maziva narůstá s tlakem. Tento parametr je zásadní pro přesné určení tloušťky mazacího filmu při výpočtech dle Hamrock-Dowsonova modelu, jelikož významně ovlivňuje vývoj mazacího režimu ve vysoce zatížených kontaktech.

K jeho určení byla provedena série experimentálních měření na optickém tribometru využívajícím metodu kolorimetrické interferometrie. Měření probíhala za konstantního zatížení 8,5 N a teploty 25 °C, přičemž otáčky disku byly postupně nastavovány v rozsahu 200 až 800 RPM. Pro každou testovanou kapalinu (referenční olej i IL) byly zaznamenány tři sady interferenčních dat, které byly vyhodnoceny pomocí softwaru Achilles. Na základě interferenčních snímků byla stanovena centrální i minimální tloušťka mazacího filmu pro každou konfiguraci. Získané hodnoty byly zprůměrovány, aby se minimalizoval vliv experimentálních odchylek. Následně byl proveden inverzní výpočet viskózně-tlakového součinitele α . Tedy hledání hodnoty, při níž vypočtená tloušťka filmu dle modelu odpovídala experimentálně získaným hodnotám.

Výsledné hodnoty viskózně-tlakového součinitele α , dynamické viskozity a indexu lomu při 25 °C pro základový olej i IL jsou přehledně uvedeny v Tabulka 6.

Tabulka 6 Hodnoty vstupních měření pro olej a IL při teplotě 25 °C

Mazivo	Dynamická viskozita (pro 25 °C) (Pa·s)	Index lomu (-)	Viskózně- tlakový součinitel (1/Gpa)
Základový olej (R 825/95)	0,064	1,483	19,3
Iontová kapalina (IL)	0,062	1,482	27,6

Drsnost povrchu kuličky

Pro predikci režimu mazání byla také nezbytná znalost povrchové drsnosti kontaktních těles, konkrétně ocelové kuličky. V experimentu byla použita kulička s leštěným povrchem, u které bylo provedeno kontrolní měření drsnosti, aby se potvrdilo, jaké drsnosti je možné leštěním dosáhnout.

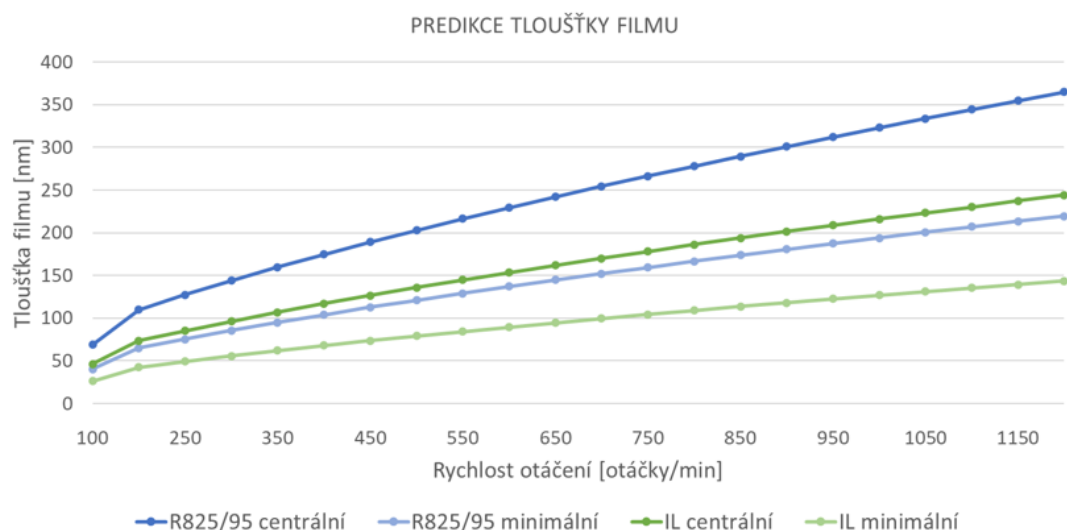
Výsledky měření ukázaly, že aritmetická střední hodnota drsnosti povrchu S_a se u použitých leštěných kuliček pohybovala v rozmezí 6,5 až 7,5 nm. Tyto hodnoty byly dostatečně nízké, aby umožňovaly stabilní interferometrická měření a zároveň odpovídaly podmínkám pro vznik EHD mazání.

5.1.2 Predikce mazacího filmu

Na základě experimentálně stanovených hodnot dynamické viskozity a indexu lomu byla provedena predikce tloušťky mazacího filmu pomocí výpočtového modelu dle Hamrocka a Dowsona. Do tohoto výpočtu dále vstupoval viskózně-tlakový součinitel α , mechanické a elastické vlastnosti disku a kuličky, hodnota zatížení v kontaktní oblasti, průměr kuličky a poloměr dráhy kuličky vzhledem ke středu skleněného disku.

Predikce byla provedena v rozsahu rychlostí 100 až 1200 otáček za minutu. Pro každou rychlost byla vypočtena jak centrální, tak minimální tloušťka mazacího filmu. Výpočty byly provedeny zvlášť pro základový olej a IL, aby bylo možné srovnat jejich chování v identických provozních podmínkách.

Výsledné hodnoty centrální a minimální tloušťky filmu jsou graficky znázorněny v Obr 5-2. Tento graf poskytuje přehled o vývoji tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti a typu použitého maziva a slouží jako referenční základ pro porovnání s experimentálně naměřenými daty.



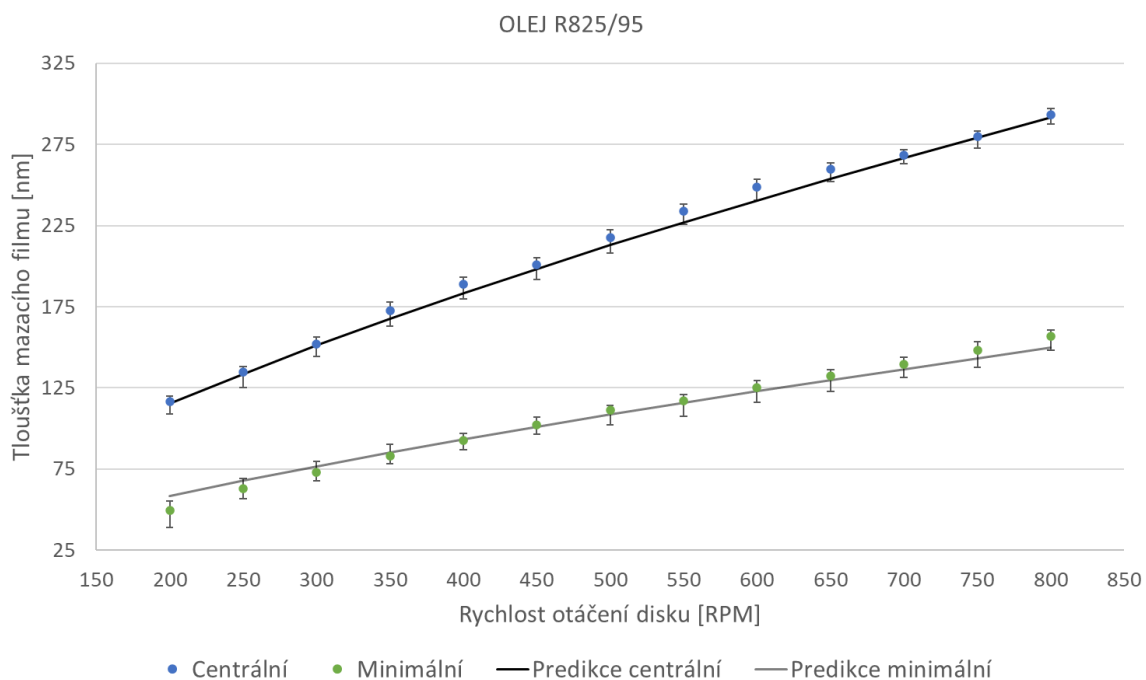
Obr 5-2 Predikce mazacího filmu

5.2 Optická interferometrie

5.2.1 Měření bez elektrického napětí

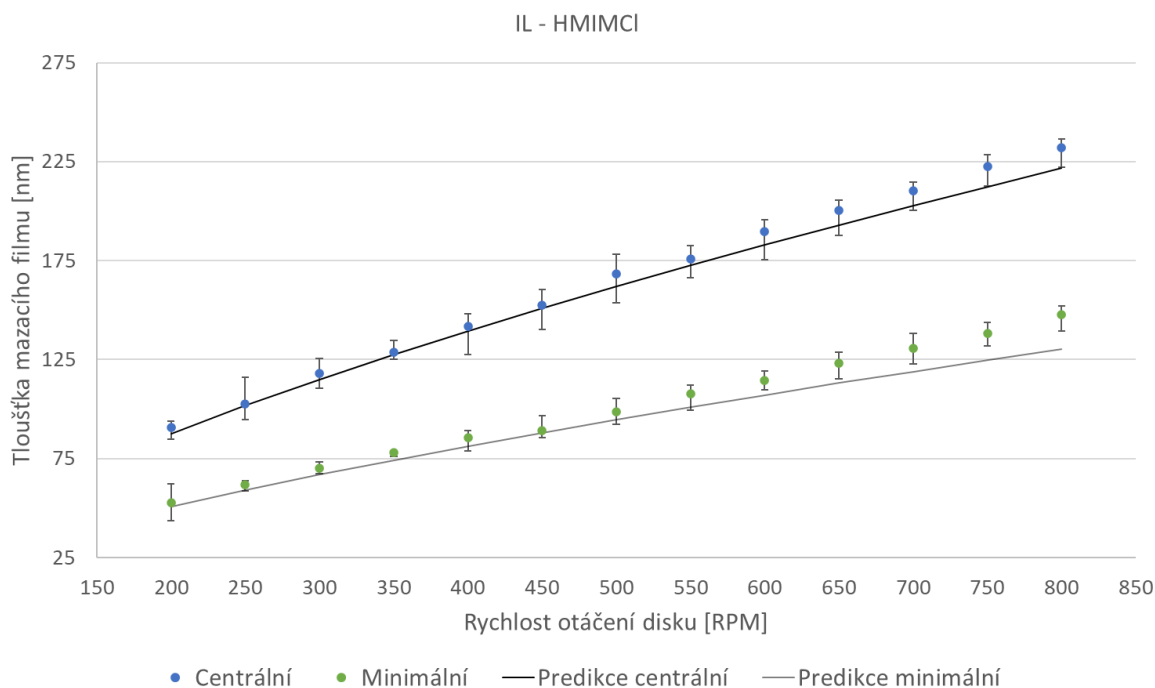
V první fázi experimentální části bylo provedeno úvodní měření na upraveném experimentálním zařízení s cílem ověřit funkčnost aparatury, validitu měřicí metody a přesnost predikce režimu mazání. Testování probíhalo pro obě zvolená maziva (olej a IL). Pro každé mazivo bylo provedeno pět sad měření. V rámci každé sady byly zaznamenány tři snímky pro každou testovanou rychlost, ze kterých byla následně vypočtena průměrná hodnota tloušťky mazacího filmu. Z těchto pěti opakovaných měření byl poté stanoven celkový průměr a směrodatná odchylka.

Výsledky pro olej byly porovnány s výpočty získanými predikcí dle Hamrock-Dowsonova modelu, a to jak pro centrální, tak pro minimální tloušťku mazacího filmu. Průběh experimentálních dat a predikce je zobrazen v příslušném grafu (Obr 5-3), kde je patrná velmi dobrá shoda v celém rozsahu rychlostí.



Obr 5-3 Porovnání experimentu s predikcí pro olej

Stejný postup byl aplikován i pro IL. Experimentální data ukázala podobný trend jako u oleje, avšak s výraznější odchylkou od predikované křivky při vyšších rychlostech. V grafu (Obr 5-4) je vidět, že od hodnoty 500 RPM začíná být pozorován nárůst reálně naměřené tloušťky filmu oproti teoretické predikci.



Obr 5-4 Porovnání experimentu s predikcí pro IL

5.2.2 Měření s elektrickým napětím

Po úvodním ověření bylo možné přistoupit k měřením s aplikovaným elektrickým napětím na IL. Cílem těchto experimentů bylo nastavit takovou obvodovou rychlost disku a kuličky, která zajistí minimální tloušťku mazacího filmu. Tenký film zvyšuje citlivost na vliv elektrického napětí, zejména z hlediska možnosti reorganizace iontů. Zároveň však bylo nezbytné zajistit, aby v kontaktu nedocházelo k hladovění maziva.

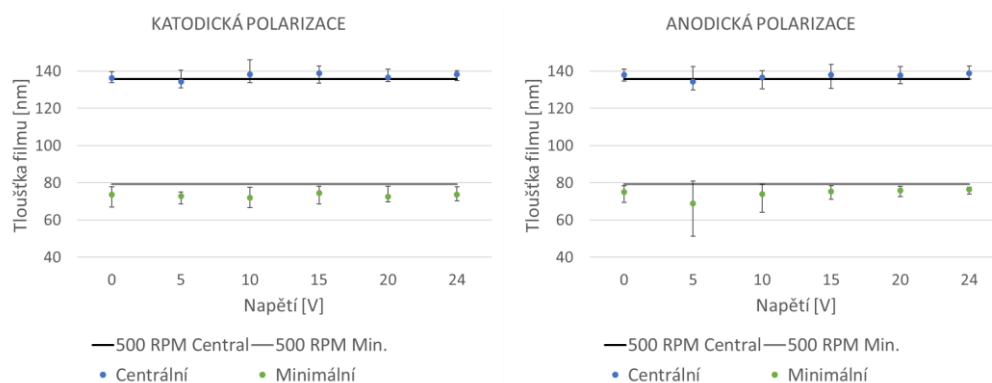
K určení vhodné rychlosti otáčení byla využita predikce tloušťky filmu. Na základě výpočtu parametru Λ v rozsahu 3–5, odpovídajícímu EHD režimu, byla jako cílová hodnota zvolena tloušťka filmu přibližně 100 nm. V průběhu měření docházelo k postupnému opotřebení chromové vrstvy disku, což si vyžádalo změnu poloměru kontaktu od osy rotace disku. Z tohoto důvodu bylo nutné zároveň upravovat otáčky disku i kuličky tak, aby se v místě kontaktu zachovala konstantní obvodová rychlost.

Konfigurace s obložením

První sada experimentů testovala konfiguraci, ve které byly elektrody tvořeny obložením kuličky. Na základě predikovaných podmínek byla pro IL zvolena konstantní rychlost otáčení 500 RPM. Aplikované napětí se pohybovalo v rozmezí 0–24 V. Během experimentu se měnila polarita mezi kuličkou a oběma částmi obložení. Každý test byl opakován třikrát pro zajištění opakovatelnosti měření.

Na Obr 5-5 jsou zobrazeny výsledky dvou sad měření, přičemž grafy zachycují jak centrální, tak minimální tloušťku mazacího filmu. Pro ilustraci je v grafech doplněna i predikovaná hodnota tloušťky filmu bez aplikovaného napětí.

První sada odpovídá katodické polarizaci, tedy kladnému pólu na kuličce a zápornému na obložení. Druhá sada představuje anodickou polaritu, kde jsou póly obráceně. V obou případech je patrné, že ani při napětí až 24 V nedošlo k významné změně tloušťky filmu. Výsledky tak naznačují, že použitá konfigurace s obložením jako elektrodou nevytváří dostatečné elektrické pole v místě kontaktu, které by při daných podmínkách ovlivnilo tloušťku filmu.



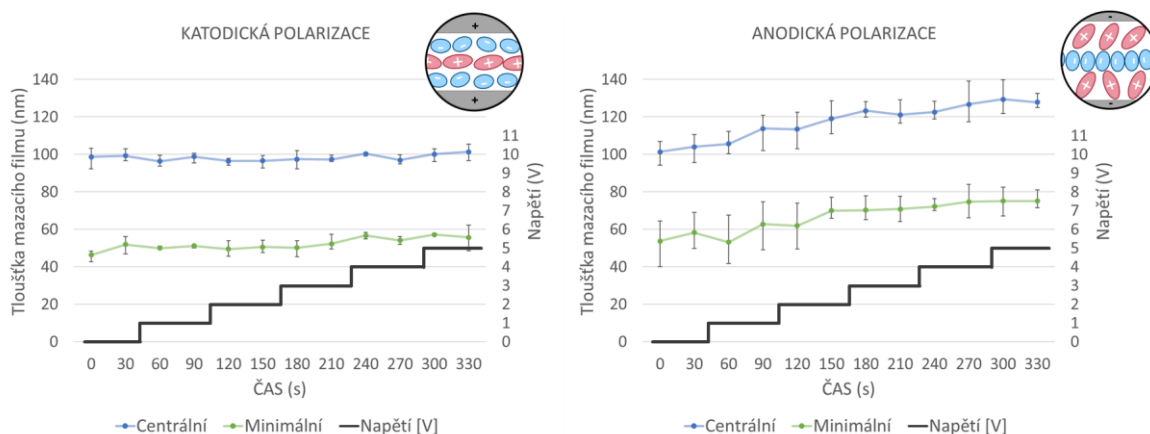
Obr 5-5 Katodická a anodická polarizace pro konfiguraci elektrod – obložení

Konfigurace s hrotem

Na základě předchozích výsledků, které neprokázaly vliv elektrického pole při použití obložení jako elektrody, byla konfigurace upravena. Obložení bylo nahrazeno hrotem, jehož konstrukce umožňuje přivádět elektrické napětí výrazně blíže ke kontaktní oblasti mezi kuličkou a diskem. Cílem této úpravy bylo zvýšit intenzitu elektrického pole v mazací vrstvě a ovlivnit strukturu IL prostřednictvím reorganizace iontů.

Pro zvýšení citlivosti systému na elektrické buzení byla obvodová rychlost snížena na 350 RPM, což při daném poloměru odpovídá rychlosti 0,13 m/s. Nižší rychlost vede ke snížení tloušťky mazacího filmu a tím i ke zvýšení účinnosti elektroindukovaných strukturálních změn v IL. Aplikované napětí se pohybovalo v rozsahu 0–5 V. Po každé změně napětí byla zařazena prodleva 60 s, která poskytla dostatečný čas pro ustálení a případnou tvorbu struktur v mazivu. Každý test se třikrát opakoval a mezi testy byla aparatura důkladně vyčištěna acetonem, aby se zamezilo ovlivnění následných měření zbytkovým mazivem. Zároveň byla všechna měření provedena vždy s novou IL. Testy proběhly jak pro katodickou, tak pro anodickou polarizaci. Zároveň byla měřena teplota maziva před a po každém testu, maximální rozdíl teplot v průběhu experimentu nepřesáhl 0,5 °C.

Na Obr 5-6 jsou zobrazeny výsledky dvou sad měření. Opět pro centrální a minimální tloušťku filmu. V první sadě, při katodické polarizaci (kulička kladná, hrot záporná elektroda), se neprojevila žádná změna tloušťky v závislosti na rostoucím napětí. Naproti tomu při anodické polarizaci (hrot kladná, kulička záporná elektroda) byl pozorován zřetelný nárůst tloušťky mazacího filmu s rostoucím napětím.

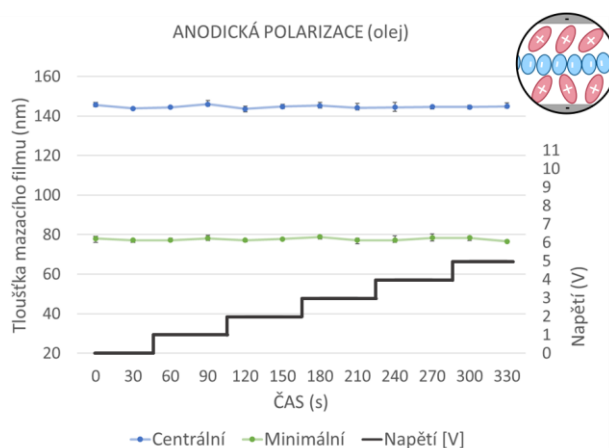


Obr 5-6 Katodická a anodická polarizace pro konfiguraci elektrod – hrot

Aby byla potvrzena hypotéza, že sledovaný jev je specifický pouze pro IL a samotný olej není elektrickým polem ovlivnitelný, byl následně proveden identický experiment i pro olej R 825/95. Měření probíhalo za stejných podmínek – při rychlosti 350 RPM, aplikovaném napětí do 5 V. Z důvodu, že se tloušťka filmu IL měnila pouze při anodické polarizaci, byl olej testován při stejné polaritě.

Výsledky, zobrazené na Obr 5-7 ukazují, že v případě oleje zůstává tloušťka mazacího filmu konstantní bez ohledu na velikost aplikovaného napětí. Tato skutečnost potvrzuje, že olej na elektrické buzení nereaguje a změny tloušťky pozorované u IL jsou důsledkem specifických elektrochemických vlastností IL.

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto, že ve všech dalších experimentech bude použita výhradně konfigurace s kladnou elektrodou na hrotu a zápornou na kuličce, tj. režim anodické polarizace.



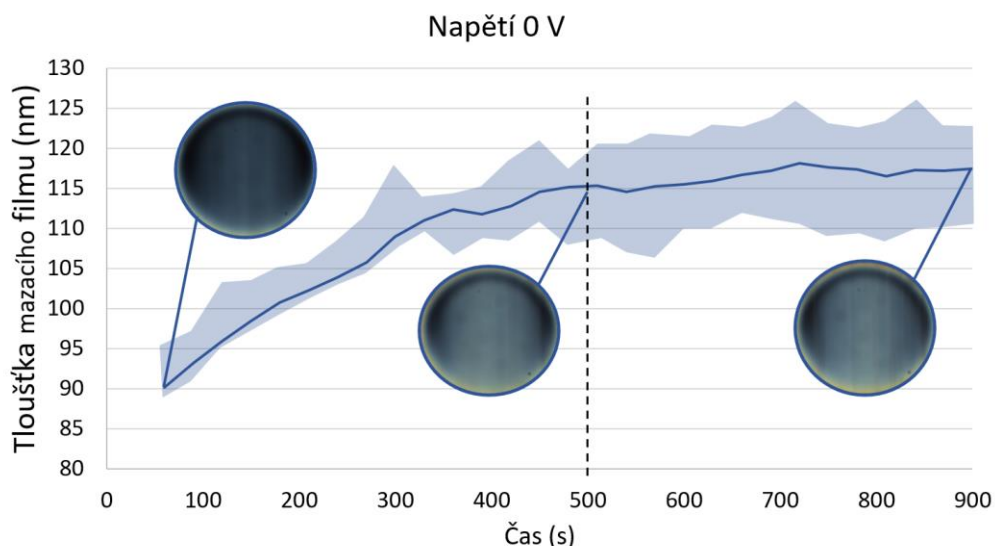
Obr 5-7 Anodická polarizace pro olej konfigurace elektrod – hrot

Experimenty s hnanou kuličkou

Pro zamezení skluzu v kontaktu byla v navazujících experimentech kulička mechanicky poháněna. Tím byla zajištěna rovnoměrná obvodová rychlost v místě kontaktu a reprodukovatelné podmínky měření. Ve všech následujících experimentech byla rychlost nastavena tak, aby odpovídala hodnotě přibližně 0,13 m/s. Podle dříve vytvořené predikce tato rychlost odpovídá tloušťce mazacího filmu přibližně 90 nm. Všechny testy probíhaly za konstantních experimentálních podmínek. Teplota během měření byla stabilní a udržována na hodnotě $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k tomu, že průběh minimální tloušťky se v předchozích měřeních výrazně nelišil od tloušťky centrální, jsou v této části práce dále uváděny pouze výsledky centrální tloušťky filmu.

První série měření byla provedena bez přivedeného elektrického napětí, v tzv. uzemněném stavu. Cílem bylo sledovat přirozený vývoj tloušťky mazacího filmu v čase, bez vlivu elektrického napětí. Interferenční snímky byly pořizovány v pravidelných intervalech po 30 s po dobu celkem 15 minut. Tento časový rámeček umožnil zachytit dynamiku stabilizace mazací vrstvy.

Výsledky měření jsou zobrazeny v grafu na Obr 5-8. Z průběhu je patrný výrazný nárůst tloušťky mazacího filmu v prvních 500 s od začátku testu. Po uplynutí této doby se průběh stabilizuje a tloušťka filmu zůstává téměř konstantní. Výsledky tak potvrdily důležitost časové prodlevy při zahájení experimentu a vytvořily výchozí referenci pro následná měření s elektrickým napětím.

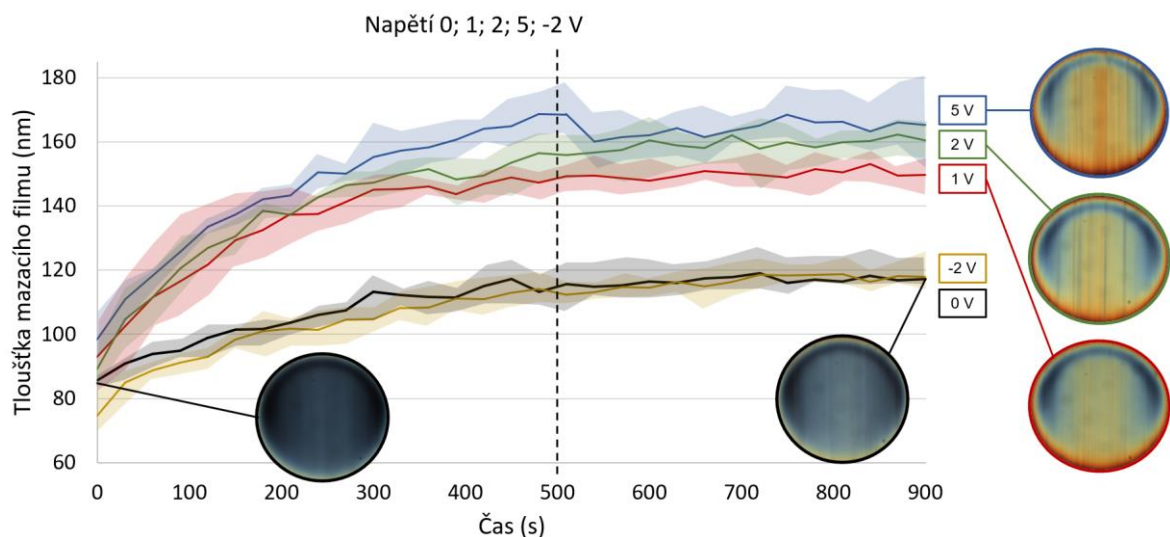


Obr 5-8 Měření IL bez působícího napětí

Navazující experimenty probíhaly za stejných podmínek jako předchozí test bez napětí. Byla tedy zachována řízená obvodová rychlost 0,13 m/s, poháněná kulička, teplota $24\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ a interval snímání 30 s po dobu 15 minut. Cílem bylo vyhodnotit vliv velikosti aplikovaného elektrického napětí na tloušťku mazacího filmu IL.

Postupně byla realizována měření s napětím 1 V, 2 V a 5 V (anodická polarizace). Pro napětí 2 V byla navíc provedena i katodická polarizace, tedy konfigurace s kladnou elektrodou na kuličce a zápornou na hrotu, aby se potvrdily výsledky z předchozích měření. Elektrické napětí bylo přivedeno do kontaktu okamžitě po spuštění měření. Pro každé napětí byla provedena tři měření, přičemž z naměřených hodnot byla následně vypočtena průměrná tloušťka centrálního filmu a směrodatná odchylka.

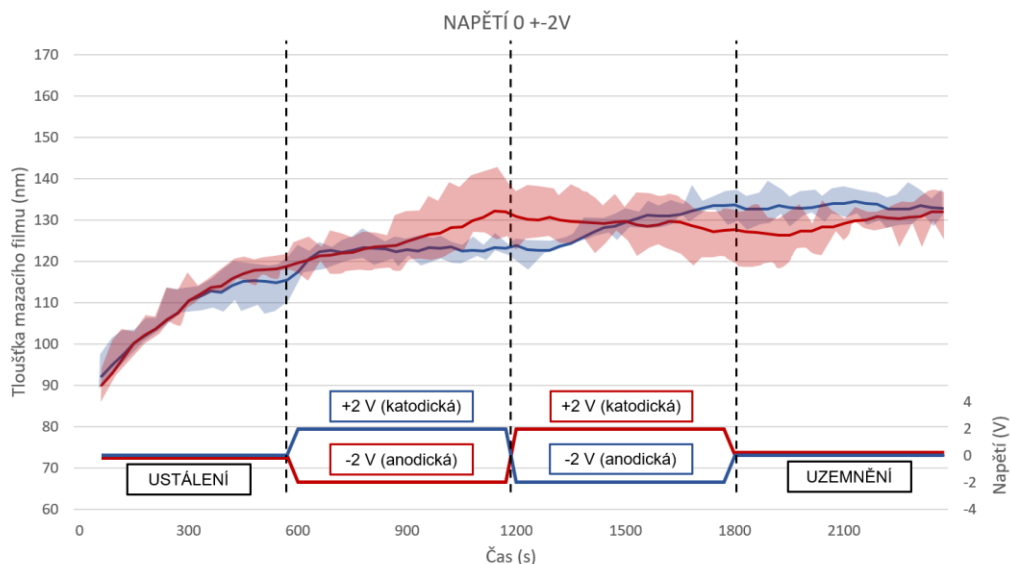
Průběhy všech variant jsou zobrazeny v grafu na Obr 5-9. Jsou zde uvedeny výsledky pro testy s napětím 0 V (referenční), 1 V, 2 V, 5 V a -2 V (představující katodickou polarizaci). Výsledky ukazují, že při katodické polarizaci (-2 V) nedochází k žádné změně tloušťky mazacího filmu ve srovnání s testem bez napětí. Oproti tomu při opačné polaritě, tedy při anodické polarizaci, byl pozorován výrazný nárůst centrální tloušťky již při napětí 1 V. Z grafu je dále patrné, že s rostoucím napětím dochází ke kontinuálnímu nárůstu tloušťky mazací vrstvy. Ve všech variantách se průběh tloušťky filmu ustálil přibližně po 500 s od začátku testu, podobně jako v referenčním měření bez napětí. Tato skutečnost potvrzuje, že efekt elektrického pole se projeví relativně rychle po jeho aplikaci a následně dochází k ustavení stabilního mazacího stavu.



Obr 5-9 Měření IL pro napětí 0, 1, 2, 5, -2 V (anodická polarizace) + interferogramy

Na základě předchozích výsledků bylo navrženo navazující měření, jehož cílem bylo detailně sledovat časovou odezvu IL na změnu elektrického pole, včetně přepólování a následného odpojení a uzemnění napětí. IL byla nejprve ponechána bez elektrického napětí, aby se přirozeně ustálila její tloušťka filmu. Doba ustálení byla stanovena na 10 minut (600 s), a to na základě předchozích experimentálních pozorování. Po této úvodní fázi bylo aktivováno elektrické napětí 2 V. Ve variantě A byla zvolena katodická polarizace (kladná elektroda na kuličce, záporná na hrotu), ve variantě B anodická polarizace (kladná elektroda na hrotu, záporná na kuličce). Obě měření probíhala po dobu dalších 10 minut. Následně došlo ke změně polarity mezi elektrodami. Obvod zůstal pod napětím dalších 10 minut, tentokrát s opačnou polaritou než v předchozí fázi. Ve čtvrté a závěrečné části testu bylo napětí odpojeno a celý systém byl uzemněn. Měření pokračovalo dalších 10 minut, aby bylo možné sledovat chování mazacího filmu. Každé měření bylo opakováno třikrát a výsledky byly zprůměrovány, současně byla vypočtena směrodatná odchylka.

Výsledky jsou zobrazeny v grafu na Obr 5-10. První časový úsek (0–600 s) probíhal bez aplikace napětí – průběh tloušťky mazacího filmu byl u obou variant prakticky totožný a odpovídal přirozenému ustálení tloušťky mazacího filmu IL. Ve druhé fázi (600–1200 s), kdy bylo aktivováno elektrické napětí, se projevil rozdíl mezi oběma polaritami. U anodické polarizace byl pozorován další růst tloušťky mazacího filmu, zatímco u katodické polarizace se růst zastavil a hodnota zůstala konstantní. Po výměně polarity (1200–1800 s) bylo možné pozorovat opačný efekt. Konfigurace s anodickou polarizací opět vedla k nárůstu tloušťky, zatímco opačné zapojení vyvolalo mírný pokles. V závěrečné části (1800–2400 s), kdy bylo napětí odpojeno a systém uzemněn, se hodnoty tloušťky obou variant postupně ustálily a konvergovaly ke stejné tloušťce.

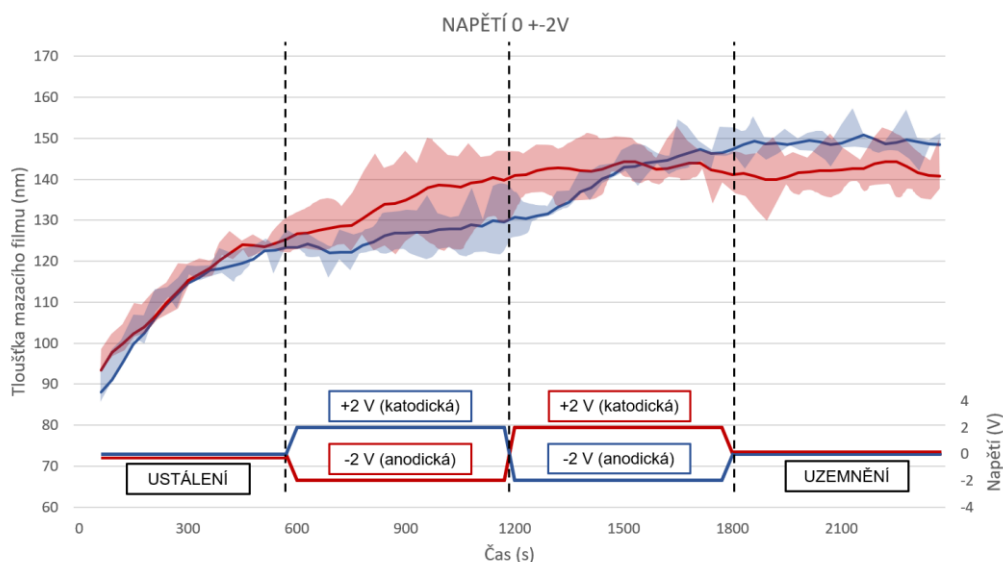


Obr 5-10 Změna anodické/katodické polarizace v čase

Na předchozí měření navazoval experiment, ve kterém byla upravena konfigurace elektrického zapojení. Cílem bylo ověřit, zda připojení elektrody přímo na chromovou vrstvu skleněného disku ovlivní účinnost elektrochemické excitace a výslednou tloušťku mazacího filmu IL. V této variantě byly kulička a chromová vrstva disku elektricky propojeny a zapojeny ke stejné polaritě napětí. Hrot, který sloužil jako druhá elektroda, byl připojen k opačné polaritě. Konfigurace tedy vytvořila silnější elektrické pole přímo v oblasti kontaktu mezi kuličkou a diskem, kde dochází k interferometrickému měření tloušťky.

Měření probíhalo dle stejného časového scénáře jako v předchozím testu – 10 minut bez napětí, 10 minut s anodickou polarizací (případně katodickou polarizací), 10 minut s přepólovaným napětím a 10 minut po odpojení a uzemnění systému. Každá konfigurace byla testována třikrát, výsledky byly zprůměrovány a doplněny o směrodatnou odchylku.

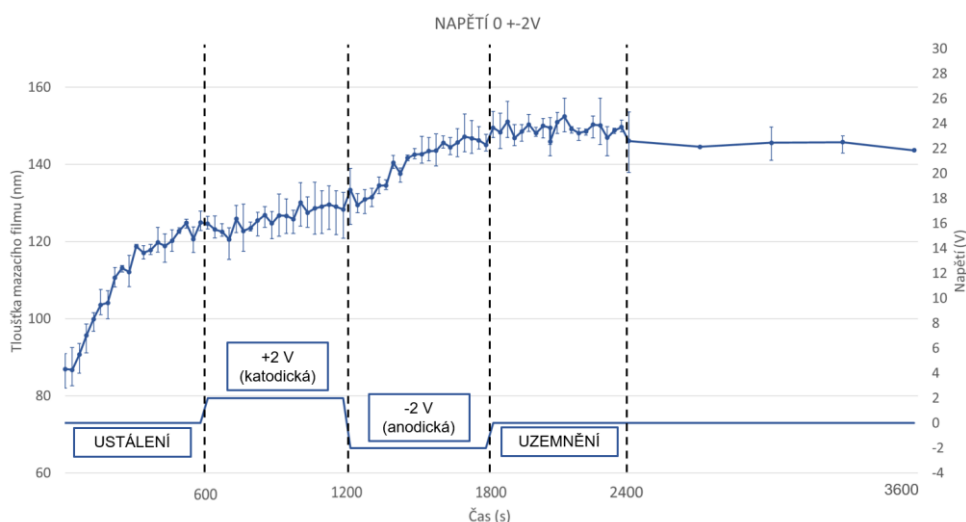
Výsledky zobrazené v grafu na Obr 5-11 ukazují obdobný trend jako v předchozím experimentu. Při anodické polarizaci dochází k výraznému nárůstu tloušťky mazacího filmu. Při změně polarity je tento efekt výrazně menší, případně dochází k mírnému poklesu. Celkově však dosažené hodnoty tloušťky filmu v této konfiguraci přesahují hodnoty zjištěné v předchozím měření, kde byla elektroda připojena pouze na kuličku.



Obr 5-11 Změna anodické/katodické polarizace v čase – zapojení s chromovou vrstvou

Na základě předchozích měření, ve kterých během závěrečné fáze uzemnění nedocházelo k poklesu tloušťky mazacího filmu, byl navržen prodloužený experiment s cílem ověřit, zda delší doba bez působení elektrického napětí povede k poklesu mazacího filmu na výchozí hodnoty. Celková délka testu byla prodloužena na 60 minut. Průběh experimentu zahrnoval čtyři fáze. První fáze ustálení bez napětí (0–10 min), dále katodická polarizace (10–20 min), anodická polarizace (20–30 min). V poslední fázi došlo k uzemnění (30–60 min), přičemž prvních 10 minut byly snímky pořizovány každých 30 sekund jako v předchozích případech. Po 10 minutách se snížil interval pořizování snímků na 5 minut.

Výsledky zobrazené na Obr 5-12 ukazují, že ani prodloužená doba uzemnění (30 minut) nezpůsobila téměř žádný pokles tloušťky mazacího filmu. Po skončení anodické polarizace a odpojení napětí zůstala tloušťka filmu prakticky konstantní po celou dobu uzemnění. Nedochází tedy k pozorovatelnému návratu na výchozí hodnoty z úvodní fáze experimentu.



Obr 5-12 Dlouhodobé uzemnění

6 DISKUSE

Tato kapitola je věnována interpretaci zásadních výsledků získaných během experimentální části, jejich porovnání s relevantní odbornou literaturou a zhodnocení jejich přínosu k řešení stanovených výzkumných otázek. Diskuse se zaměřuje na čtyři hlavní oblasti, které se ukázaly jako klíčové pro pochopení chování IL v EHD kontaktu za působení elektrického napětí.

Prvním výsledkem je prokazatelný rozdíl v odezvě IL na anodickou a katodickou polarizaci při využití hrotu jako elektrody. Při anodické polarizaci (kladný potenciál na hrotu) byl pozorován výrazný nárůst tloušťky mazacího filmu, zatímco katodická polarizace vyvolala pouze mírné nebo žádné změny. Tento rozdíl lze vysvětlit odlišnou adsorpcí aniontů a kationtů v blízkosti třecích povrchů.

Jedním z nejvýraznějších výsledků je nárůst tloušťky mazacího filmu i bez aplikace elektrického napětí. Tento jev byl konzistentně pozorován během úvodních fází všech měření a pravděpodobně souvisí s dynamickým ustalováním IL v kontaktu, včetně časově závislé reorganizace iontů a interakce s povrchem. Přestože některé studie [22; 14] tento efekt zmiňují jen okrajově, v rámci této práce se ukázal jako reprodukovatelný a významný, zejména z hlediska časování měření a vyhodnocování vlivu elektrického napětí.

Třetím poznatkem je kvantifikovaný nárůst tloušťky mazacího filmu v závislosti na velikosti přiváděného napětí. Bylo prokázáno, že již při hodnotách kolem 1 V dochází ke změně struktury mazací vrstvy, doprovázené nárůstem tloušťky filmu. Tento nárůst se stabilizuje po několika minutách, přičemž rozsah změn závisí na použité polaritě a velikosti napětí. Pozorované výsledky odpovídají principu elektroindukované reorganizace iontových struktur, jak ji popisuje např. Gatti [14] nebo další výzkumy [13; 8; 22].

Čtvrtým klíčovým výstupem je zjištění, že změna polarity napětí v čase způsobuje odlišnou odezvu IL. Při změně anodické na katodickou dochází k poklesu nebo stabilizaci filmu, zatímco při opačné změně k jeho opětovnému nárůstu. Experimenty zároveň prokázaly, že ani dlouhodobé uzemnění nevede k návratu tloušťky filmu na výchozí hodnoty, což naznačuje setrvačnost reorganizovaných iontových struktur. Tento jev podporuje předpoklad vzniku stabilních struktur v IL po aplikaci elektrického pole, které mohou přetrvávat i po jeho odpojení [14].

Získané výsledky jednoznačně potvrzují, že IL v EHD kontaktu vykazují elektroaktivní chování, jehož charakter je podmíněn nejen velikostí a polaritou přiváděného napětí, ale i elektrodou, přes kterou se napětí dodává. Tato zjištění přinášejí nové poznatky k pochopení řízeného chování mazacích systémů s IL a poskytují dílčí odpovědi na výzkumné otázky formulované v úvodu práce. Potvrzují také výchozí hypotézu o možnosti aktivního ovlivnění tloušťky mazacího filmu prostřednictvím nestacionárního elektrického pole.

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Polarizace a konfigurace elektrod

Experimentální zjištění

V úvodní sadě experimentů byl analyzován vliv konfigurace elektrod na elektrochemickou odezvu IL. Byly testovány dvě hlavní varianty přivedení elektrického napětí do oblasti kontaktu, a to pomocí obložení a pomocí hrotu.

První variantou byla konfigurace s obložением, kde bylo napětí přiváděno prostřednictvím dvojice elektrod symetricky obepínajících kuličku. Tento přístup navazoval na postupy použité například ve studii Reddyho a kol. [3], kde bylo dosaženo zvýšení tloušťky mazacího filmu v důsledku elektrického buzení. Tento způsob se však ukázal jako nevhodný. Hlavními omezeními byla obtížně nastavitelná vzdálenost elektrod vůči kuličce, nerovnoměrné doléhání způsobené výrobními tolerancemi a chybějící pohon kuličky. Nebylo tedy zaručeno plynulé otáčení kuličky. Výsledkem byl nežádoucí skluz, který ovlivňoval smykové podmínky a tím i opakovatelnost výsledků. Měření v této konfiguraci neprokázala žádnou výraznou změnu tloušťky mazacího filmu IL, ani při napětí až do 24 V při žádné polaritě.

Tyto výsledky odpovídají závěrům několika studií, které zdůrazňují význam geometrie elektrod při elektrochemickém ovlivnění IL. Závěry Gattiho a kol. [14; 13] zdůrazňují nutnost přímého a stabilního kontaktu elektrody s IL a dostatečné intenzity elektrického pole v oblasti kontaktu. V případě, kdy nebyly elektrody dostatečně v kontaktu s IL, může být napětí příliš slabé na to, aby indukovalo viditelnou změnu tloušťky filmu.

Oproti tomu konfigurace s hrotem se ukázala jako výrazně účinnější. Tato varianta umožňovala přesné přivedení napětí ke kontaktu mezi kuličkou a diskem. Možnost jemného polohování hrotu a přímé umístění elektrody do blízkosti kontaktu bez narušení optické cesty vedly ke stabilnímu kontaktu s IL. To je v souladu s poznatky uvedenými ve studiích Bresme a kol. [11; 22] i Gatti a kol. [14].

Výsledky ukázaly, že při anodické polarizaci (kladný potenciál na hrotu) došlo k systematickému nárůstu tloušťky mazacího filmu s rostoucím napětím (1–5 V), zatímco při katodické polarizaci se žádná změna neprojevila. Tento jev je plně v souladu s pozorováním Gattiho a kol. [13], kde byla stabilní a trvalá změna tloušťky filmu pozorována také pouze při anodické polarizaci, pravděpodobně v důsledku přítomnosti silně adsorbujících aniontů. Díky hrotu je tedy potvrzeno, že je možné dosáhnout změny tloušťky filmu i za mnohem snazší konstrukce experimentálního zařízení, než jak tomu bylo například v případě Reddy a kol. [3].

Srovnání s olejem R 825/95 provedené za identických podmínek, prokázalo, že v případě klasického maziva nedochází k žádné změně tloušťky filmu vlivem napětí. Tento výsledek je v souladu s výsledky González a kol. [15], kteří prokázali, že běžné nepolární syntetické oleje nevykazují žádnou elektroresponzivitu vzhledem k absenci polárních částic a schopnosti adsorpce. Test s olejem zároveň sloužil jako důležitá kontrola, která potvrdila, že pozorované změny u IL jsou výsledkem jejich specifických elektrochemických vlastností, nikoliv nahodilým měřicím zařízením.

Vyhodnocení vůči hypotéze

V úvodu práce byla formulována hypotéza (H1), že *aplikace vnějšího elektrického pole vede ke zvýšení tloušťky mazacího filmu IL v důsledku elektrostatické migrace iontů*. Výsledky jednoznačně **potvrdily** platnost této hypotézy, ovšem pouze za podmínek správně navržené konfigurace elektrod.

Při použití kovového hrotu a jeho přiblížení do blízkosti kontaktní oblasti došlo ke spolehlivému a reprodukovatelnému nárůstu tloušťky filmu IL, který navíc koreloval s velikostí aplikovaného napětí. Tento výsledek potvrzuje tvrzení Gattiho a kol. [14] i Reddyho a kol. [3], kteří nezávisle popsali, že při dostatečně silném elektrickém poli dochází k reorganizaci iontové vrstvy a tím i ke změně fyzikální struktury maziva v místě kontaktu.

Lze tedy konstatovat, že experimentální část potvrdila nejen samotný vliv elektrického pole na reologii IL, ale i klíčovou roli konstrukce měřicí aparatury, konkrétně elektrod. Lokalizovaná aplikace napětí prostřednictvím dobře navržené elektrody je podmínkou pro dosažení měřitelných změn tloušťky mazacího filmu a efektivního řízení tribologických vlastností IL.

6.1.2 Nárůst tloušťky filmu IL bez působícího napětí

Experimentální zjištění

Ve všech úvodních experimentech s IL, které probíhaly v uzemněném stavu bez přivedeného elektrického napětí, byl pozorován samovolný nárůst tloušťky mazacího filmu IL během prvních několika minut měření. Tento nárůst probíhal typicky do prvních 500–600 s, po kterých se hodnoty tloušťky stabilizovaly. Růst byl patrný jak u centrální, tak i u minimální tloušťky filmu a konzistentně se opakoval ve všech měřeních.

Přestože v těchto experimentech nebylo aplikováno vnější elektrické napětí, bylo nutné identifikovat možné fyzikální nebo chemické mechanismy, které by mohly popisovaný nárůst způsobit. Uvažováno je několik relevantních faktorů.

Dynamické ustalování vrstvy IL: Po nanesení IL do kontaktní oblasti může docházet k reorganizaci iontů a tvorbě vícevrstevných struktur. Tento jev je závislý na čase i na působícím smykovém zatížení. Fajardo a kol. [11] popisují obdobný průběh v AFM měřeních, kde IL reorganizují své vrstvy během několika set sekund.

Zbytkové elektrické náboje a elektrostatické pole: I přesto, že byla IL vyměněna a systém byl uzemněn, nelze zcela vyloučit přítomnost zbytkového náboje v součástech zařízení nebo strukturách IL. Tyto náboje mohou být důsledkem předchozích měření nebo se v systému akumulovat během manipulace. Gatti a kol. [14] upozorňují, že orientované iontové vrstvy IL mohou přetrvávat i po odpojení napětí a mohou tak ovlivnit počáteční vývoj tloušťky filmu.

Adsorpce iontů na povrchy: IL vykazují přirozenou tendenci vytvářet adsorpční vrstvy na kovových nebo oxidových površích. Tento proces je časově závislý a může probíhat i bez působení elektrického napětí. Jak uvádí Gatti et al. [13], při prvním kontaktu IL s povrchem dochází k postupné akumulaci iontů v blízkosti rozhraní, což ovlivňuje formování mazací vrstvy. Vzhledem k tomu, že v rámci experimentů byla vždy použita čerstvá IL, tento efekt nastával při každém měření.

Změna viskozity IL vlivem odpařování vody: Testovaná IL (HMIMCl) byla před experimentem ředěna destilovanou vodou, aby bylo dosaženo podobné viskozity s olejem. Při dlouhodobém experimentu dochází k mírnému nárůstu teploty a může docházet i k částečnému odpařování vody, což vede k vyšší koncentraci IL a tím i k nárůstu viskozity. Zvýšená viskozita vede dle Hamrock-Dowsonova modelu k růstu tloušťky filmu. Přímé měření viskozity během experimentu nebylo možné z důvodu malého objemu maziva využívaného pro jednotlivá měření. Nicméně byl sledován index lomu, který se v průběhu experimentu zvyšoval v řádu setin, což může odpovídat drobnému zvýšení koncentrace IL v mazivu, a tedy i změně viskozity.

Změna teploty: Měření teploty před a po testech ukázala maximální rozdíl do 1 °C, což odpovídá nepatrnému snížení viskozity. Tento jev by tedy měl vést spíše ke snížení tloušťky filmu a nelze jej považovat za příčinu pozorovaného nárůstu.

Vyhodnocení vůči hypotéze

Tato část výsledků se částečně vztahuje k hypotéze (H1), že *kumulace iontů a změna tloušťky mazacího filmu je výhradně důsledkem působení elektrického napětí*. Na základě provedených experimentů a dostupné literatury je třeba tuto hypotézu **částečně vyvrátit**. Bylo totiž prokázáno, že i v uzemněném stavu dochází u IL ke spontánnímu nárůstu tloušťky mazacího filmu.

Tento jev pravděpodobně souvisí s kombinací více faktorů, především dynamické reorganizace IL v kontaktu, časově závislé adsorpce iontů na površích a mírného zvýšení viskozity způsobeného odpařováním vody. Zatímco v dalších měřeních bylo jednoznačně prokázáno, že elektrické napětí tloušťku filmu dále zvyšuje, výše uvedené výsledky ukazují, že i bez jeho působení je nutné počítat s významnými časově závislými procesy v IL. Ty je třeba při interpretaci dat a návrhu experimentů zohlednit.

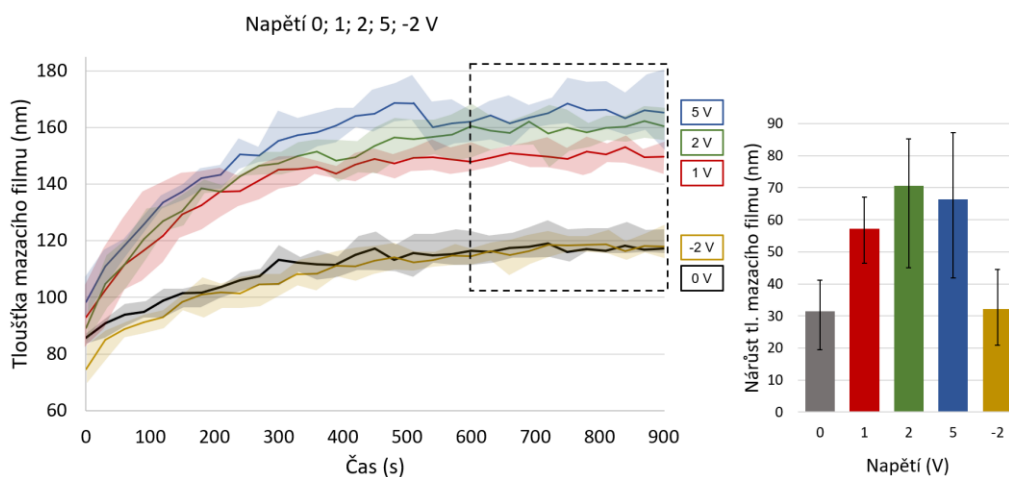
6.1.3 Vliv velikosti napětí na nárůst tloušťky mazacího filmu

Experimentální zjištění

Třetí sledovanou oblastí byl vliv velikosti aplikovaného elektrického napětí na změnu tloušťky mazacího filmu IL v EHD kontaktu. Napětí bylo aplikováno v rozsahu 1–5 V s anodickou polarizací, kdy byl tedy hrot zapojen jako kladná elektroda. Pro srovnání bylo provedeno i kontrolní měření s katodickou polarizací (-2 V). Ve všech případech byla sledována centrální tloušťka filmu v čase.

Výsledky ukázaly, že již při aplikaci 1 V dochází k měřitelnému nárůstu tloušťky mazacího filmu IL. S rostoucím napětím dále narůstá i výsledná tloušťka, přičemž nejvyšší hodnoty byly dosaženy při napětí 5 V. Ve všech případech byl nárůst nejvýraznější v časovém intervalu 0–600 s po aplikaci napětí, po kterém se film ustálil. Katodická polarizace nevedla oproti stavu bez napětí k žádné změně tloušťky, což potvrzuje dřívější zjištění o dominantním vlivu anodického buzení.

Pro názorné srovnání byl vytvořen graf na Obr 6-1 (vpravo), který zachycuje relativní nárůst tloušťky mazacího filmu z ustálené oblasti (vyznačená oblast na Obr 6-1 (vlevo)) vzhledem k počáteční hodnotě pro jednotlivá napětí. Výsledky ukázaly, že nejvýraznějšího relativního nárůstu bylo dosaženo při napětí 2 V. Při aplikaci 5 V sice byly naměřeny vyšší absolutní hodnoty, nicméně došlo také k poškození chromové vrstvy a známkám degradace IL, což omezuje praktickou využitelnost vyšších napětí.



Obr 6-1 Nárůst tloušťky mazacího filmu

Pozorovaný zvýšený nárůst tloušťky filmu IL lze vysvětlit jako důsledek elektroindukované reorganizace iontů v IL. Pod vlivem elektrického pole dochází k migraci iontů, přičemž při anodické polarizaci se anionty adsorbují na kladně nabitě elektrody, čímž vytvářejí stabilní a objemnější mezivrstvu, což vede k expanzi filmu (tzv. electroswelling). Tento jev je dobře popsán Gatti a kol. [14], kteří pozorovali obdobné chování u IL [P₆₆₆₁₄][DEHP] při napětích 1–3 V. Autoři uvádějí, že při anodické polarizaci dochází k trvalé změně struktury filmu, která přetrvává i po odpojení napájení, což bylo rovněž potvrzeno v provedených experimentech.

Podobně jako v předchozím případě je nárůst tloušťky spojený s vodou přítomnou v IL. Studie O'Mahony a kol. [32] přináší další důležité poznatky týkající se vlivu vody na elektrochemické chování IL, mimo jiné i [HMIM][Cl]. Pomocí cyklické voltametrie bylo prokázáno, že přítomnost vody výrazně ovlivňuje fyzikálně-chemické vlastnosti IL, zejména šířku elektrochemického okna. Anion [Cl]⁻ vykazuje silně hygroskopické chování, což zvyšuje jeho schopnost absorbovat vodu z okolního prostředí. Tento jev může zásadně ovlivnit elektrochemické charakteristiky systému. Autoři studie ukazují, že voda přítomná v IL vede ke zúžení elektrochemického okna a zvyšuje pravděpodobnost výskytu elektrolytických dějů. Konkrétně pro [HMIM][Cl] bylo určeno elektrochemické okno v rozmezí -2,6 V (katodická polarizace) až +0,4 V (anodická polarizace). Výsledky této studie potvrzují, že znalost a kontrola obsahu vody v IL jsou nezbytné pro správnou interpretaci jak elektrochemických, tak tribologických měření.

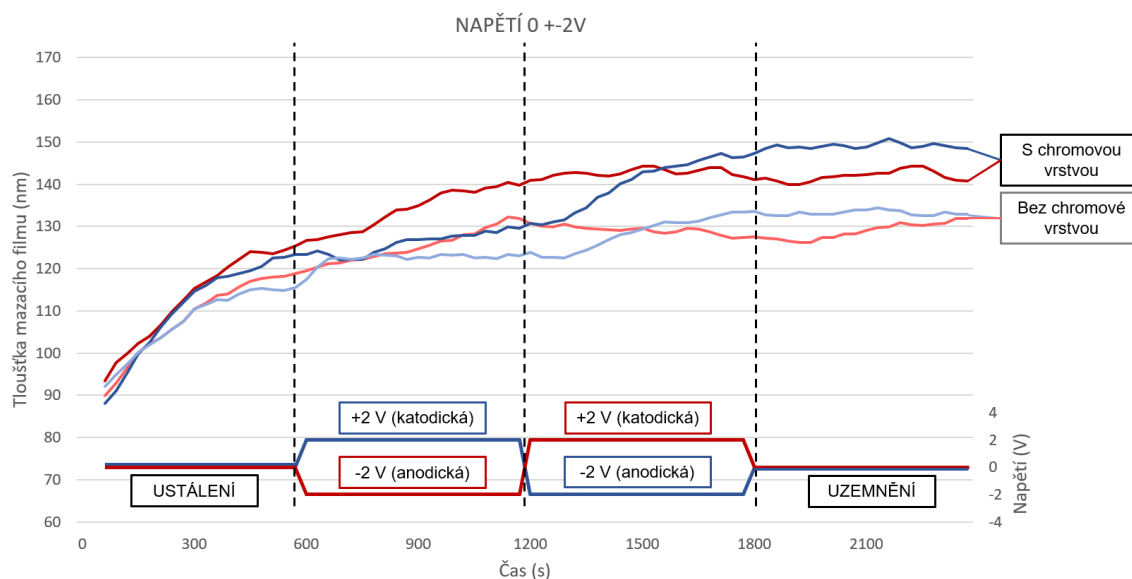
Vyhodnocení vůči hypotéze

Zjištění této části přímo navazuje na druhou část hypotézy (H1), že *se zvyšujícím se napětím poroste rychlost nárůstu tloušťky mazacího filmu a bude možné dosáhnout vyšších hodnot jeho stabilní tloušťky*. Na základě experimentálních dat lze tuto hypotézu **potvrdit**, přičemž výsledky ukazují, že velikost napětí je klíčovým parametrem, který umožňuje efektivně ovlivnit reologické vlastnosti IL a řídit tloušťku mazacího filmu. Zároveň však experimenty prokázaly, že tento efekt má své limity. Při překročení určité hranice (v případě IL [HMIM][Cl] 2 V) dochází k nelineárnímu chování, případně až k degradaci maziva. Proto je pro praktické využití elektrochemické regulace tloušťky filmu nutné pečlivě optimalizovat rozsah napětí s ohledem na stabilitu systému.

6.1.4 Změna polarizace v čase

Experimentální zjištění

V závěrečné sadě experimentů byl sledován vliv časové změny polarizace napětí na chování mazacího filmu IL v EHD kontaktu. Měření probíhalo ve čtyřech po sobě následujících fázích: ustalování bez napětí, aplikace napětí (anodická nebo katodická polarizace), změna polarity, uzemnění systému. Experiment byl dále zopakován v konfiguraci s připojením elektrody i na chromovou vrstvu, přičemž tato elektroda sdílela stejnou polaritu s kuličkou. Pro přehlednost byly výsledky všech čtyř měření zobrazeny v jednom grafu na Obr 6-2.



Obr 6-2 Porovnání experimentu bez/s chromovou vrstvou

V první fázi měření byl během prvních 10 minut zaznamenán očekávaný samovolný nárůst tloušťky mazacího filmu konzistentně u všech konfigurací. Po aplikaci anodického napětí došlo k výraznému zvýšení centrální tloušťky filmu, zatímco při katodické polarizaci byl pozorován pouze nepatrný, případně žádný nárůst. Změna polarity z anodické na katodickou vedla ke zpomalení růstu, případně k mírnému poklesu tloušťky, zatímco přechod na anodickou polarizaci opět vyvolal zřetelný nárůst filmu. Nejvyšších hodnot tloušťky bylo dosaženo v konfiguraci, kdy bylo napětí přivedeno jak na kuličku, tak na chromovou vrstvu disku. Tento výsledek lze vysvětlit kombinovaným účinkem, jednak dochází ke kumulaci iontů na obou elektrodách a zároveň chromová vrstva pokrývá celý disk, čímž výrazně rozšiřuje aktivní oblast elektrody. Výsledkem je intenzivnější a rovnoměrněji rozprostřené elektrické napětí, které účinněji ovlivňuje strukturu mazací vrstvy.

Tento výsledek potvrzuje, že konfigurace zapojení elektrod má zásadní vliv na intenzitu odezvy systému. Současně však tato konfigurace způsobila výrazné poškození chromové vrstvy, což nasvědčuje přímému průchodu elektrického napětí kontaktní oblastí a možnému výskytu elektrochemických reakcí mezi IL a kovovým povrchem. Tento výsledek odpovídá dřívějším pozorováním [8], která upozorňují na degradační účinky některých IL na chromové vrstvy při působení napětí.

Skutečnost, že po uzemnění, v poslední fázi experimentu, nedochází ke zpětnému poklesu tloušťky mazacího filmu, lze vysvětlit především vlivem přetrvávajícího uspořádání iontů. Struktura vytvořená během anodické polarizace zůstává stabilní i po vypnutí napětí. Dlouhodobý test, ve kterém systém setrval v uzemněném stavu po dobu 30 minut, potvrdil, že ani delší časový interval nevede ke snížení tloušťky. Tento jev je v souladu se závěry Gattiho a kol. [14], kde po vypnutí napětí při anodické polarizaci zůstává změněný stav tloušťky IL zachován v důsledku setrvačnosti molekulárního uspořádání.

Vyhodnocení vůči hypotéze

Výsledky této části se přímo vztahují k hypotéze (H2), že *změna polarity napětí zajistí nárůst nebo pokles tloušťky mazacího filmu. Anodická polarizace povede k jeho růstu, katodická k poklesu. Po odpojení elektrického napětí (uzemnění) dojde k postupnému poklesu tloušťky filmu.* Původní hypotéza byla **částečně potvrzena**. Potvrdilo se, že anodická polarizace vyvolává výrazný nárůst tloušťky filmu, zatímco katodická polarizace změnu nevyvolává, případně tloušťku mírně snižuje. Neprokázalo se však, že by uzemnění vedlo k poklesu nebo návratu k původní tloušťce. Stabilita zesíleného filmu po odpojení napětí naznačuje, že elektroindukované změny mohou mít stabilní charakter a nezmizí bez dalšího zásahu.

6.2 Verifikace hypotéz

O1: *Jak se změní tloušťka mazacího filmu po aktivaci elektrického napětí oproti stavu při nulovém napětí?*

H1: *Aplikace vnějšího elektrického napětí v oblasti EHD kontaktu způsobí elektrostatickou migraci iontů, která povede ke kumulaci iontů v blízkosti třecích povrchů. Se zvyšujícím se napětím poroste rychlost nárůstu tloušťky mazacího filmu a bude možné dosáhnout vyšších hodnot jeho stabilní tloušťky.*

Výsledky experimentu tuto hypotézu **potvrzují**. Bylo jednoznačně prokázáno, že při anodické polarizaci dochází k systematickému nárůstu tloušťky mazacího filmu IL ve srovnání se stavem bez aplikovaného napětí. Naopak při katodické polarizaci se tloušťka filmu od stavu bez napětí téměř neliší. Neočekávaným výsledkem je samovolný nárůst tloušťky mazacího filmu při nulovém napětí. Tento jev byl zaznamenán opakovaně v počátečních fázích experimentů s IL, kdy po započetí měření docházelo k samovolnému nárůstu tloušťky filmu i v uzemněném stavu. Možnou příčinou může být postupné uspořádání iontů nebo zvýšení koncentrace IL v důsledku odpařování vody, která byla použita pro ředění, což může vést k nárůstu viskozity maziva. Přímé měření viskozity během experimentu nebylo možné z důvodu minimálního množství použitého maziva.

Na základě těchto pozorování je formulována nová hypotéza: *Samovolný nárůst tloušťky mazacího filmu i bez působícího elektrického napětí je způsoben zvýšením viskozity IL v důsledku odpaření vody, kterou byla IL ředěna.* Pro ověření této hypotézy je navržen další test s použitím čisté IL bez příměsi vody. Experiment bude proveden bez aplikace elektrického napětí, v uzemněném stavu, za stejných podmínek jako měření s ředěnou IL. Srovnání průběhů tloušťky mazacího filmu v čase umožní potvrdit nebo vyvrátit vliv odpaření vody jako hlavního mechanismu nárůstu viskozity a tím i tloušťky filmu.

O2: *Jaký vliv má polarita napětí, doba buzení elektrického napětí nebo uzemnění na změnu tloušťky mazacího filmu?*

H2: *Změna polaritě aplikovaného elektrického napětí zajistí nárůst nebo pokles tloušťky mazacího filmu. Anodická polarizace povede k jeho růstu, katodická k poklesu. Po odpojení elektrického napětí (uzemnění) dojde k postupnému poklesu tloušťky filmu v důsledku ztráty elektrostatické organizace iontů.*

Tato hypotéza je **potvrzena** pouze **částečně**. Změna polaritě napětí skutečně ovlivňuje tloušťku mazacího filmu IL. Při přepnutí z anodické na katodickou polarizaci dochází ke zpomalení růstu, případně k mírnému poklesu tloušťky filmu. Naopak při změně z katodické na anodickou polarizaci byl zaznamenán výrazný nárůst tloušťky filmu. Tím je potvrzena odezva systému na polaritu elektrického buzení. Druhá část hypotézy, která předpokládala, že po odpojení napětí nebo při uzemnění dojde k poklesu tloušťky filmu, se však nepotvrdila. Experimenty ukázaly, že i po dlouhodobém uzemnění (až 30 minut) zůstává tloušťka mazacího filmu stabilní. Tento výsledek naznačuje, že elektroindukované změny mají dlouhodobý charakter.

Na základě těchto výsledků se nabízí doplnění nové hypotézy: *Reorganizované iontové struktury, vytvořené v mazací vrstvě během elektrického buzení, setrvávají i po odpojení elektrického napětí. K jejich rozrušení a následnému návratu tloušťky filmu do původního stavu je zapotřebí aktivní zásah, například dlouhodobá katodická polarizace nebo dlouhodobé uzemnění.* Pro hlubší porozumění těmto procesům by bylo vhodné využít fluorescenční mikroskopii, která umožňuje vizualizaci a kvantifikaci distribuce iontů v mazací vrstvě. Využitím fluorescenčních sond navázaných na anionty IL by bylo možné sledovat změny v orientaci a kumulaci iontových složek v blízkosti povrchu v reálném čase. Tato metoda by mohla poskytnout přímý experimentální důkaz o reorganizaci iontů v důsledku působení elektrického pole a zároveň umožnit sledování dynamiky návratu systému do původního stavu po vypnutí elektrického napětí. Získané údaje by přispěly k lepšímu pochopení stability elektroindukovaných struktur a umožnily by experimentálně ověřit, zda prodloužená katodická polarizace nebo dlouhodobé uzemnění skutečně podporují zpětnou reorganizaci iontů a tím i pokles tloušťky mazacího filmu. Fluorescenční mikroskopie by se tak mohla stát klíčovým nástrojem pro další studium řízených mazacích systémů s IL.

6.2.1 Omezení výsledků a další využití

Získané výsledky je nutné interpretovat s ohledem na několik zásadních omezení, která mohla ovlivnit jejich přesnost a obecnou platnost. Prvním z těchto omezení je nestabilita chemického složení IL během delších měření, způsobená především ředěním IL vodou za účelem sjednocení viskozity s olejem. V průběhu experimentu mohlo docházet k odpařování vody, což vedlo ke změně koncentrace IL a tím i k nárůstu viskozity, která přímo ovlivňuje tloušťku mazacího filmu. Druhým omezením je možná interakce IL s kovovými prvky experimentální aparatury, zejména s chromovou vrstvou disku. Při přímém zapojení vrstvy do elektrického obvodu vykazovala IL chemické degradace. Tyto reakce mohly modifikovat lokální elektrostatické podmínky v kontaktu a tím zkreslit výsledky měření. Třetím významným faktorem je absence přímé detekce reorganizace iontových struktur. Všechny závěry o elektroindukovaných změnách byly odvozeny nepřímě na základě změn tloušťky filmu. Tento přístup sice poskytuje důležité informace, ale neumožňuje vizualizaci a přesné sledování prostorového rozložení iontů. Uvedený nedostatek by bylo možné odstranit využitím fluorescenční mikroskopie, která by umožnila přímé sledování distribuce a reorganizace iontů v reálném čase.

Zůstává nejasné, zda jsou pozorované elektroindukované změny v IL trvalého charakteru či zda a jakým způsobem dochází k jejich postupnému rozpadu. Klíčovou otázkou je také časový průběh těchto změn, zejména po odpojení elektrického pole. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na charakterizaci návratu systému do původního stavu, a to jak při opakované změně polarity, tak při dlouhodobém uzemnění. Zjištění těchto vztahů je nezbytné pro vývoj programovatelných mazacích systémů, které by mohly adaptivně reagovat na změny provozních podmínek.

Z pohledu aplikací mají výsledky přímý význam pro vývoj inteligentních mazacích systémů, které budou schopny dynamicky měnit své vlastnosti v závislosti na provozních požadavcích. Kvazistabilita elektroindukovaných struktur by mohla být využita k vytvoření trvalého mazacího stavu bez potřeby kontinuálního elektrického buzení, což je výhodné například pro ložiska v elektromotorech. Tento jev lze chápat jako určitý „paměťový efekt“ mazací vrstvy. Z teoretického hlediska přináší práce podporu konceptu elektrostriktce a elektroindukované adsorpce jako klíčových mechanismů řízení tribologického chování IL. Změny tloušťky mazacího filmu lze vnímat jako makroskopický důsledek reorganizace molekulární struktury iontových vrstev v IL.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřuje na experimentální studium chování tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu mazaném iontovou kapalinou (IL) při působení nestacionárního elektrického pole. Cílem bylo objasnit, zda lze aktivní aplikací elektrického napětí ovlivnit tloušťku mazacího filmu, jakou roli hraje polarita pole a jak se systém chová po odpojení elektrického napětí. Byly formulovány dvě hlavní výzkumné otázky, na které bylo odpovězeno prostřednictvím kolorimetrické interferometrie a systematického srovnání různých konfigurací elektrického buzení. Dále jsou shrnuta hlavní zjištění, jejich srovnání s dostupnou literaturou a naznačeny směry budoucího výzkumu v této oblasti.

Výsledky experimentů jednoznačně odpovídají na položené výzkumné otázky. V případě otázky **O1**: *Jak se změní tloušťka mazacího filmu po aktivaci elektrického napětí oproti stavu při nulovém napětí?* bylo zjištěno, že po aktivaci elektrického napětí dochází u IL k významnému nárůstu tloušťky mazacího filmu oproti stavu při nulovém napětí. Tento efekt je pozorován již při nízkém napětí (1 V) a s jeho dalším zvyšováním tloušťka filmu dále roste. Bylo však také potvrzeno, že při vyšších napětích (nad 5 V) dochází ke stagnaci nárůstu, případně k degradaci IL. Práce zároveň přináší nové zjištění o samovolném nárůstu tloušťky filmu i při nulovém napětí, což nebylo dosud v literatuře detailně popisováno.

U otázky **O2**: *Jaký vliv má polarita napětí, doba buzení elektrického napětí a uzemnění na změnu tloušťky mazacího filmu?* bylo prokázáno, že polarita napětí má zásadní vliv na chování mazacího filmu. Anodická polarizace vedla k systematickému nárůstu tloušťky filmu, zatímco katodická polarizace způsobovala zanedbatelné změny nebo mírné snížení tloušťky. Tento výsledek odpovídá očekáváním založeným na teorii elektrostrikce a elektroadsorpce v IL. Na rozdíl od některých předchozích studií však bylo zjištěno, že po odpojení napětí a uzemnění nedochází k poklesu tloušťky na původní hodnotu. Elektroindukované změny zůstávaly stabilní i po dlouhých časových intervalech (až 30 minut), což rozšiřuje dosavadní poznatky a naznačuje možnost trvalé stabilizace reorganizovaných iontových struktur.

Z porovnání výsledků této práce s dostupnou literaturou vyplývá, že chování IL v elektrickém poli je komplexnější, než předpokládají jednoduché modely elektrostrikce. Zatímco dřívější studie popisovaly rychlé reverzibilní změny při zapnutí a vypnutí napětí, provedený výzkum ukazuje, že některé strukturální změny mohou přetrvávat i po ukončení buzení. To otevírá nové možnosti využití IL nejen pro programovatelné řízení tření, ale i pro dlouhodobou stabilizaci mazacího filmu například v podmínkách s proměnným elektrickým zatížením, typickým například pro elektromobily.

Na základě získaných výsledků je naznačen i směr dalšího výzkumu. V první řadě je nutné detailně analyzovat molekulární reorganizaci IL během aplikace a odpojení elektrického napětí. Vhodnou metodou by mohlo být využití fluorescenční spektroskopie, kdy by IL byla modifikována fluorescenčními sondami, například lanthanoidy. Tím by bylo možné přímo sledovat změny v uspořádání iontových vrstev v reálném čase a ověřit tak nové hypotézy o stabilitě elektroindukovaných struktur. Dále se nabízí testování reverzibility těchto struktur například pomocí opakované změny polaritity či aplikací dlouhodobého uzemnění. Takové experimenty by mohly objasnit, zda existují podmínky, za kterých se reorganizované vrstvy rozpadnou, a tím přispět k návrhu aktivně řízených mazacích systémů s možností navyšovat a snižovat tloušťku mazacího filmu.

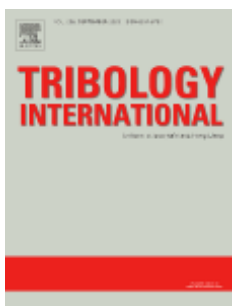
Hlavní přínosy této práce jsou:

- Experimentální prokázání vlivu elektrického pole na nárůst tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu mazaném IL (konkrétně [HMIM][Cl]).
- Dokumentace odezvy mazacího filmu na polaritu napětí – anodická polarizace způsobuje nárůst tloušťky, katodická má zanedbatelný nebo opačný efekt.
- Poukázání na samovolný nárůst tloušťky mazacího filmu v uzemněném stavu bez aplikace napětí, což rozšiřuje dosavadní poznání o chování IL.
- Zjištění stability elektroindukovaných struktur i po odpojení napětí, čímž práce naznačuje možnost dlouhodobého udržení změněných reologických vlastností bez trvalého elektrického napětí.
- Návrh nových hypotéz popisujících kombinovaný vliv elektrostatických a fyzikálně-chemických procesů na chování tloušťky mazacího filmu IL.
- Návrh využití metody fluorescence pro přímé sledování reorganizace iontových struktur v reálném čase.

Výsledky této práce tedy významně rozšiřují současné poznání o chování IL v elektricky aktivních mazacích systémech a otevírají nové perspektivy pro jejich praktické nasazení v inteligentních tribologických aplikacích.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Na základě práce vznikl ve spolupráci s FCH článek, který je již publikovaný ve sborníku konference. Zároveň je připravený text druhého článku, který je snahou publikovat v časopise *Tribology International* s kvartilem Q1.



PO2: Organic Electrochemical Transistor as a Device for Studying Electrical Properties of Smart Ionic Liquids

Blahut Jan¹, Svoboda Petr², Michalec Michal², Foltýn Jan², Schneider David², Menčík Přemysl¹, Zmeškal Oldřich¹

¹ Faculty of Chemistry, Institute of Physical and Applied Chemistry, Purkyňova 464/118, Brno, Czech Republic, Email: Jan.Blahut@vutbr.cz

² Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design, Technická 2896/2, Brno, Czech Republic

VLIV NESTACIONÁRNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE NA CHOVÁNÍ IONTOVÝCH KAPALIN

Influence of non-stationary electric field on behavior of ionic liquids

David SCHNEIDER ¹, Petr SVOBODA ¹, Michal MICHALEC ¹, Vít ŠIMARA ¹

¹ Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, Brno 616 69, Česko

*Korespondenční autor: davschneider@seznam.cz; 229142@vutbr.cz

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOLMBERG, Kenneth a ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Online. *Friction*. 2017, roč. 5, č. 3, s. 263-284. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>. [cit. 2024-04-12].
- [2] HE, Feng; XIE, Guoxin a LUO, Jianbin. Electrical bearing failures in electric vehicles. Online. *Friction*. 2020, roč. 8, č. 1, s. 4-28. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0356-5>. [cit. 2024-04-15].
- [3] REDDY, Akepati Bhaskar; PILKINGTON, Georgia A.; RUTLAND, Mark W. a GLAVATSKIH, Sergei. Tribotronic control of an ionic boundary layer in operando extends the limits of lubrication. Online. *Scientific Reports*. 2022, roč. 12, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22504-6>. [cit. 2024-04-12].
- [4] CAI, Meirong; YU, Qiangliang; LIU, Weimin a ZHOU, Feng. Ionic liquid lubricants: when chemistry meets tribology. Online. *Chemical Society Reviews*. 2020, roč. 49, č. 21, s. 7753-7818. ISSN 0306-0012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D0CS00126K>.
- [5] SOMERS, Anthony; HOWLETT, Patrick; MACFARLANE, Douglas a FORSYTH, Maria. A Review of Ionic Liquid Lubricants. Online. *Lubricants*. 2013, roč. 1, č. 1, s. 3-21. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants1010003>. [cit. 2024-04-12].
- [6] TOTOLIN, Vladimir; PISAROVA, Lucia; DÖRR, Nicole a MINAMI, Ichiro. Tribochemistry and thermo-oxidative stability of halogen-free ionic liquids. Online. *RSC Adv*. 2017, roč. 7, č. 77, s. 48766-48776. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C7RA09163J>. [cit. 2024-04-12].
- [7] MINAMI, Ichiro. Ionic Liquids in Tribology. Online. *Molecules*. 2009, roč. 14, č. 6, s. 2286-2305. ISSN 1420-3049. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules14062286>.

- [8] MICHALEC, Michal; SVOBODA, Petr; KRUPKA, Ivan; HARTL, Martin a VENCL, Aleksandar. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. Online. *Friction*. 2020, roč. 8, č. 5, s. 982-994. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0342-y>. [cit. 2024-04-12].
- [9] CAI, Meirong; YU, Qiangliang; LIU, Weimin a ZHOU, Feng. Ionic liquid lubricants: when chemistry meets tribology. Online. *Chemical Society Reviews*. 2020, roč. 49, č. 21, s. 7753-7818. ISSN 0306-0012. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D0CS00126K>.
- [10] ROHLMANN, Patrick; MUNAVIROV, Bulat; FURÓ, István; ANTZUTKIN, Oleg; RUTLAND, Mark William et al. Non-halogenated Ionic Liquid Dramatically Enhances Tribological Performance of Biodegradable Oils. Online. *Frontiers in Chemistry*. 2019, roč. 7. ISSN 2296-2646. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00098>. [cit. 2024-04-12].
- [11] FAJARDO, O. Y.; BRESME, Fernando; KORNYSHEV, Alexei A. a URBAKH, Michael. Electrotunable Friction with Ionic Liquid Lubricants: How Important Is the Molecular Structure of the Ions? Online. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2015, roč. 6, č. 20, s. 3998-4004. ISSN 1948-7185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.5b01802>. [cit. 2024-04-12].
- [12] SMITH, Alexander M.; LOVELOCK, Kevin R. J.; GOSVAMI, Nitya Nand; WELTON, Tom a PERKIN, Susan. Quantized friction across ionic liquid thin films. Online. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2013, roč. 15, č. 37. ISSN 1463-9076. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c3cp52779d>. [cit. 2024-04-15].
- [13] GATTI, Felix; AMANN, Tobias; KAILER, Andreas; BALTES, Norman; RÜHE, Jürgen et al. Towards programmable friction: control of lubrication with ionic liquid mixtures by automated electrical regulation. Online. *Scientific Reports*. 2020, roč. 10, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74709-2>. [cit. 2024-04-12].
- [14] GATTI, Felix Joachim; CAI, Wanhao; HERZOG, Richard; GHARAVIAN, Amirmasoud; KAILER, Andreas et al. Investigation of Programmable Friction with Ionic Liquid Mixtures at the Nano- and Macroscales. Online. *Lubricants*. 2023, roč. 11, č. 9. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants11090376>. [cit. 2024-04-12].

- [15] GONZÁLEZ, R.; VIESCA, J.L.; BATTEZ, A. Hernández; HADFIELD, M.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, A. et al. Two phosphonium cation-based ionic liquids as lubricant additive to a polyalphaolefin base oil. Online. *Journal of Molecular Liquids*. 2019, roč. 293. ISSN 01677322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111536>. [cit. 2024-04-12].
- [16] HUA, Jing; BJÖRLING, Marcus; LARSSON, Roland a SHI, Yijun. Controllable superlubricity achieved with mixtures of green ionic liquid and glycerol aqueous solution via humidity. Online. *Journal of Molecular Liquids*. 2022, roč. 345. ISSN 01677322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117860>. [cit. 2024-04-12].
- [17] BJÖRLING, Marcus; BAIR, Scott; MU, Liwen; ZHU, Jiahua a SHI, Yijun. Elastohydrodynamic Performance of a Bio-Based, Non-Corrosive Ionic Liquid. Online. *Applied Sciences*. 2017, roč. 7, č. 10. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app7100996>.
- [18] ZHANG, Yu a LIN, Weifeng. Electrotunable interfacial friction: A brief review. Online. *Chinese Chemical Letters*. 2025, roč. 36, č. 4. ISSN 10018417. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2024.110566>. [cit. 2025-03-25].
- [19] PEREIRA, Cláudia C. L.; CARRETAS, José M.; MONTEIRO, Bernardo a LEAL, João P. Luminescent Ln-Ionic Liquids beyond Europium. Online. *Molecules*. 2021, roč. 26, č. 16. ISSN 1420-3049. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules26164834>. [cit. 2024-04-15].
- [20] LI, Hua; WOOD, Ross J.; RUTLAND, Mark W. a ATKIN, Rob. An ionic liquid lubricant enables superlubricity to be “switched on” in situ using an electrical potential. Online. *Chemical Communications*. 2014, roč. 50, č. 33. ISSN 1359-7345. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c4cc00979g>. [cit. 2024-04-12].
- [21] PILKINGTON, Georgia A.; HARRIS, Kathryn; BERGENDAL, Erik; REDDY, Akepati Bhaskar; PALSSON, Gunnar K. et al. Electro-responsivity of ionic liquid boundary layers in a polar solvent revealed by neutron reflectance. Online. *The Journal of Chemical Physics*. 2018, roč. 148, č. 19. ISSN 0021-9606. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5001551>. [cit. 2024-04-12].

- [22] BRESME, Fernando; KORNYSHEV, Alexei A.; PERKIN, Susan a URBACH, Michael. Electrotunable friction with ionic liquid lubricants. Online. *Nature Materials*. 2022, roč. 21, č. 8, s. 848-858. ISSN 1476-1122. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01273-7>. [cit. 2024-04-12].
- [23] JANIK, Jack R.; SAHA, Sudip; JACKSON, Robert L. a MILLS, German. Exploring the Boundaries of Electrically Induced Bearing Damage in Grease-Lubricated Rolling Contacts. Online. *Lubricants*. 2024, roč. 12, č. 8. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants12080268>.
- [24] LIU, Jinjie; BAI, Qinghua; LI, Xinming; ZHANG, Li; PAPE, Florian et al. Evolution processes of electrical discharge in EHD contact lubricated with conductive grease. Online. *Tribology International*. 2025, roč. 209. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110725>.
- [25] HE, Feng; XIE, Guoxin a LUO, Jianbin. Electrical bearing failures in electric vehicles. Online. *Friction*. 2020, roč. 8, č. 1, s. 4-28. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0356-5>.
- [26] SCHNEIDER, Volker; BEHRENDT, Cara; HÖLTJE, Pauline; CORNEL, Daniel; BECKER-DOMBROWSKY, Florian Michael et al. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range. Online. *Lubricants*. 2022, roč. 10, č. 8. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants10080194>. [cit. 2024-04-12].
- [27] TISCHMACHER, H.; GATTERMANN, S.; KRIESE, M. a WITTEK, E. Bearing wear caused by converter-induced bearing currents. Online. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2010, s. 784-791. ISBN 978-1-4244-5225-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675212>. [cit. 2024-04-15].
- [28] HOLMBERG, Kenneth a ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Online. *Friction*. 2017, roč. 5, č. 3, s. 263-284. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>. [cit. 2024-04-15].
- [29] TOKIAI, Takeo; KIMURA, Takuma; NAGASE, Naoki a DESHIMARU, Junichi. Relation between Corrosion Energy and Rolling Fatigue Life with a Four Ball Test. Online. *Tribology Online*. 2011, roč. 6, č. 6, s. 273-276. ISSN 1881-2198. Dostupné z: <https://doi.org/10.2474/trol.6.273>. [cit. 2025-03-25].

- [30] PILKINGTON, Georgia A.; OLESHKEVYCH, Anna; PEDRAZ, Patricia; WATANABE, Seiya; RADIOM, Milad et al. Electroresponsive structuring and friction of a non-halogenated ionic liquid in a polar solvent: effect of concentration. Online. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020, roč. 22, č. 34, s. 19162-19171. ISSN 1463-9076. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D0CP02736G>. [cit. 2024-04-12].
- [31] GHASEMIAN, Ensieh; NAJAFI, Mojgan; RAFATI, Amir Abbas a FELEGARI, Zahra. Effect of electrolytes on surface tension and surface adsorption of 1-hexyl-3-methylimidazolium chloride ionic liquid in aqueous solution. Online. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2010, roč. 42, č. 8, s. 962-966. ISSN 00219614. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2010.03.007>. [cit. 2024-10-29].
- [32] O'MAHONY, Aoife M.; SILVESTER, Debbie S.; ALDOUS, Leigh; HARDACRE, Christopher a COMPTON, Richard G. Effect of Water on the Electrochemical Window and Potential Limits of Room-Temperature Ionic Liquids. Online. 2008, roč. 53, č. 12, s. 2884-2891. ISSN 0021-9568. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/je800678e>.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

ZKRATKY

IL	Iontová kapalina
EHD	Elastohydrodynamický kontakt
HDP	Hrubý domácí produkt
IF	Impakt faktor
MR	Magnetoreologické
ER	Elektroreologické
PAO	Polyalfaolefiny

SYMBOLY A VELIČINY

Λ	Parametr mazání
H_c	Centrální tloušťka
G	Parametr materiálu
U	Parametr rychlosti
W	Parametr zatížení
k	Parametr elipticity

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr 2-1 Příčiny poruch elektromotorů u elektromobilů [2]	15
Obr 2-2 Prizma diagram	17
Obr 2-3 Působení a) magnetoreologického buzení [4]; b) elektrického pole [5].....	18
Obr 2-4 Anodická a katodická polarizace [15].....	20
Obr 2-5 Porovnání součinitele tření a opotřebení pro IL a olej [16]	22
Obr 2-6 Regulace součinitele tření	23
Obr 2-7 Působení elektrického pole	24
Obr 2-8 Migrace iontů po polarizaci [14].....	25
Obr 2-9 Poškození chromové vrstvy [9]	26
Obr 2-10 Zařízení s diskem bez chromové vrstvy [2]	26
Obr 2-11 a) Elektrický výboj [25]; b) poškození povrchu kuličky [25].....	29
Obr 4-1 Schéma metodiky práce	36
Obr 4-2 Schéma optického tribometru s elektrickým obvodem	37
Obr 4-3 Model vyráběných dílů – varianta A	38
Obr 4-4 Spojovací deska a deska uchycení ložiska	39
Obr 4-5 Deska obložení	39
Obr 4-6 Obložení kuličky	40
Obr 4-7 Schéma varianty B	40
Obr 4-8 Schéma dílů pohonu kuličky	41
Obr 4-9 Schéma provedených měření.....	44
Obr 4-10 Schéma metody optické interferometrie.....	45
Obr 5-1 Dynamická viskozita oleje a IL	50
Obr 5-2 Predikce mazacího filmu	52
Obr 5-3 Porovnání experimentu s predikcí pro olej.....	53
Obr 5-4 Porovnání experimentu s predikcí pro IL.....	53
Obr 5-5 Katodická a anodická polarizace pro konfiguraci elektrod – obložení	54
Obr 5-6 Katodická a anodická polarizace pro konfiguraci elektrod – hrot.....	55
Obr 5-7 Anodická polarizace pro olej konfigurace elektrod – hrot.....	56

Obr 5-8 Měření IL bez působícího napětí.....	57
Obr 5-9 Měření IL pro napětí 0, 1, 2, 5, -2 V (anodická polarizace) + interferogramy	58
Obr 5-10 Změna anodické/katodické polarizace v čase.....	59
Obr 5-11 Změna anodické/katodické polarizace v čase – zapojení s chromovou vrstvou .	60
Obr 5-12 Dlouhodobé uzemnění	60
Obr 6-1 Nárůst tloušťky mazacího filmu.....	65
Obr 6-2 Porovnání experimentu bez/s chromovou vrstvou	67

12 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Porovnání vybraných IL	21
Tabulka 2	Vliv elektrického pole na změnu součinitele tření [15]	28
Tabulka 3	Vstupní parametry.....	43
Tabulka 4	Konfigurace zapojení	46
Tabulka 5	Testované predikce	48
Tabulka 6	Hodnoty vstupních měření pro olej a IL při teplotě 25 °C	51

13 SEZNAM PŘÍLOH