



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

PARAMETRY MAZACÍ VRSTVY A TŘECÍCH POVRCHŮ V KONTAKTU PRACUJÍCÍM V REŽIMU SUPERLUBRICITY

PARAMETERS OF LUBRICATING FILMS AND RUBBING SURFACES IN
CONTACTS OPERATED IN SUPERLUBRICITY REGIME

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. et Bc. Tomáš Poláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Poláček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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

Parametry mazací vrstvy a třecích povrchů v kontaktu pracujícím v režimu superlubricity

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Oddělení třecích povrchů souvislou vrstvou maziva je hlavní způsob, jak zajistit nízké tření a dlouhou životnost kontaktů. Při provozu strojů bez oddělení povrchů dochází k přímé interakci povrchů doprovázené opotřebením. V poslední době byly nalezeny kombinace materiálů a maziva, které vedou na speciální režim fungování se součinitelem tření nižším než 0,01 označovaný jako superlubricita. Existují kombinace materiálů, kdy i kapalinový mazací film poskytuje výrazně nižší tření než konvenční řešení. Tyto kombinace však nejsou doposud plně otestovány.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit parametry utvářené mazací vrstvy a změn topografie povrchů, ke kterým dochází v mazaných kontaktech vykazující součinitel tření nižší než 0,01. Práce má přispět k posunu provozních podmínek blíže podmínkám běžných v technické praxi. Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled kombinací materiálů a maziv vykazující superlubricitu,
- navrhnout experimenty a vzorky pro testování,
- realizovat měření tření, topografie povrchu a parametrů mazací vrstvy,
- zjistit vliv rychlosti a relativního skluzu v kontaktu.

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:

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

Seznam doporučené literatury:

ZHAI, W. a K. ZHOU. Nanomaterials in Superlubricity. *Advanced Functional Materials*. 2019, 29(28).

GE, X., J. LI a J. LUO. Macroscale Superlubricity Achieved With Various Liquid Molecules: A Review. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019, 5, 1-15.

BAYKARA, M. Z., M.R. VAZIRISERESHK a A. MARTINI. Emerging superlubricity: A review of the state of the art and perspectives on future research. *Applied Physics Reviews*. 2018, 5(4), 041102.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá snižováním tření mezi nekonformními makrokontakty s částečným skluzem. Měření součinitele tření, o velikosti superlubricity, navyšuje o vliv relativního skluzu, přímé pozorování kontaktní oblasti a o měření tloušťky mazacího filmu. Zahrnuto je také zkoumání změn topografie při tření. Experimenty byly provedeny převážně na tribometru ball-on-disk doplněném o možnost měření tloušťky mazacího filmu kolorimetrickou interferometrií. Změny drsnosti povrchů byly zkoumány na optickém profilometru. Vliv střední rychlosti, relativního skluzu a topografie byly pozorovány u vybraných kombinací, z nichž jedna neumožňovala měření tloušťky maziva a jedna nedosáhla očekávaného snížení tření. U zbylých systémů bylo možné pozorovat snížení součinitele tření na 0,003 a méně. Vlivy působící na tření mezi tělesy z vybraných materiálů byly prozkoumány do značné míry. Je tak položen základ pro výzkum superlubricity mezi kontakty s částečným valením. Práce může přispět ke snížení ztrát třením, k dřívějšímu a běžnějšímu používání některých maziv a materiálů ve strojírenství.

KLÍČOVÁ SLOVA

superlubricita mazaných kontaktů, superlubricita v makrokontaktech, velmi tenké filmy, elektrická dvojrstva

ABSTRACT

The work investigates the reduction of friction between non-conformal macro contacts with partial slip. The measurement of the coefficient of friction, with the magnitude of the superlubricity, is extended by the influence of relative slip, direct observation of the contact area and the measurement of the thickness of the lubricating film. It also includes a comparison of changes in topography by friction. The experiments were mainly performed on a ball-on-disk tribometer with measuring the film thickness by colorimetric interferometry. The surface roughness changes were investigated using an optical profilometer. The effect of mean velocity, slide-to-roll ratio and topography were observed for selected combinations, one of which did not allow the measurement of film thickness and one did not achieve the expected reduction in friction. For the other combinations, it was possible to observe a reduction of the coefficient of friction to 0,003 or less. The influences affecting the friction between selected materials have been investigated considerably. Thus, a foundation is laid for the research of superlubricity between contacts with partial rolling. The thesis could contribute to the reduction of friction losses, earlier(quicker/faster?) and more common use of some lubricants and materials in mechanical engineering.

KEYWORDS

liquid superlubricity, macroscale superlubricity, thin film lubrication, electric double layer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁČEK, Tomáš. Parametry mazací vrstvy a třecích povrchů v kontaktu pracujícím v režimu superlubricity. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.

PODĚKOVÁNÍ

Svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., děkuji za odborné připomínky a cenné rady při tvorbě této práce. Dále děkuji za podporu a inspiraci v průběhu vypracovávání přátelům a rodině.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Podpis autora

OBSAH

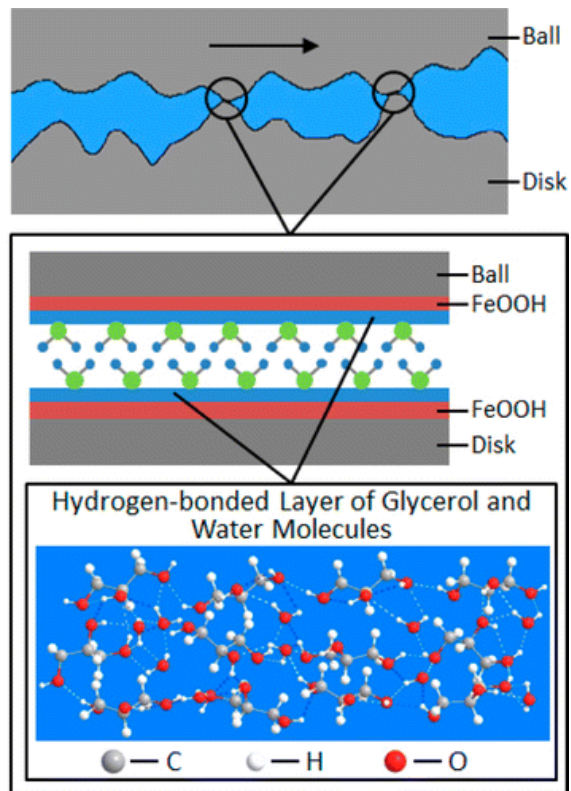
1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Superlubricita suchých kontaktů	15
2.1.1	Uhlíkové povlaky podobné diamantu (DLC)	15
2.1.2	Disulfid molybdeničitý (MoS ₂)	17
2.1.3	Grafit, grafen	Chyba! Záložka není definována.
2.1.4	Nitrid uhlíku (CN _x)	17
2.2	Superlubricita mazaných kontaktů	18
2.2.1	Voda	19
2.2.2	Polymery	22
2.2.3	Kyselé roztoky	23
2.2.4	Iontové kapaliny (RTIL)	Chyba! Záložka není definována.
2.2.5	Oleje	24
2.2.6	Nanomateriály	Chyba! Záložka není definována.
2.2.7	Shrnutí	Chyba! Záložka není definována.
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	28
3.1	Analýza problému	28
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	29
3.3	Cíl práce	30
4	ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY	32
4.1	Postup řešení	32
4.2	Měření	32
4.2.1	Základní typy testů	32
4.2.2	Analýza testů	33
4.3	Použitá zařízení	33
4.3.1	Optický tribometr (EHD5)	33
4.3.2	Mini Traction Machine (MTM)	35
4.4	Materiály	35
4.5	Metody měření	36
4.5.1	Kolorimetrická interferometrie	36
5	VÝSLEDKY	38
5.1	Ocel/sklo mazané roztokem glycerolu	Chyba! Záložka není definována.

6	GANTTŮV DIAGRAM	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
7	ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ	CHYBA!	
	ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.		
8	CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU ŘEŠENÍ	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.	
	DIPLOMOVÉ PRÁCE		
9	BIBLIOGRAFIE		81
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN		86
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ		89
12	SEZNAM TABULEK		92

1 ÚVOD

Snížení tření, a s tím související opotřebení, je jednou z možností snížení nákladů na provoz strojů. Pro režim extrémně nízkého tření se používá termín superlubricita. Ta je charakterizována součinitelem tření menším než 0,01 [1]. Jedná se o hodnotu tření, které lze běžně dosáhnout pouze u čistého valení, ale zkoumané kombinace materiálů jí dosahují i za plného skluzu. Značná část strojních aplikací, která užívá valení stále obsahuje i část skluzu. V praxi je možné se s kombinací valení a skluzu potkat u většiny valivých ložisek, u ozubených kol a dalších aplikací. V případě superlubricity mazaných kontaktů jsou povrchy dvou těles odděleny kapalinovým filmem, přičemž mazivo může snižovat tření oddělením vrstev, či může docházet ke specifické reakci vůči povrchům kontaktních těles. Dosažení superlubricity zpravidla není okamžitý proces, ale je k tomu potřeba určitý záběhový čas. Během tohoto období se může vyhladit povrch, snížit kontaktní tlak vlivem opotřebení, případně mohou proběhnout tribochemické reakce mezi mazivem a kontaktními tělesy. Příklad takto vniklých vrstev je na obr. 1, kde se směsí vody a glycerolu reagují ocelové povrchy. Tloušťka mazací vrstvy mezi povrchy je v případě superlubricity často velmi nízká, a to v řádu jednotek až desítek nanometrů. Takovéto mazací vrstvy společně s tribochemickými reakcemi mohou vést nejen ke snížení tření, ale i k režimu velmi tenkých filmů, který je obtížně předpověditelný. Hodnota tloušťky takového filmu se přitom obvykle zakládá jen na výpočtové velikosti dané predikčními vztahy. Velikost tření ve zmíněném režimu je vzhledem k častým chemickým reakcím třeba zjistit spíše pomocí experimentu nežli pomocí výpočtu.

Většina doposud provedených experimentů souvisejících s takto sníženým třením probíhala na nano-, popř. mikroúrovni. Současným trendem je proto vyvíjení snahy o přenos poznatků na makroúroveň. Pro tento fenomén – superlubricitu – nejsou zcela popsány všechny měřitelné parametry mazací vrstvy či tření. Jedná se zejména o tloušťku mazací vrstvy, závislost tření na rychlosti či skluzu, kdy vzhledem k většině výzkumů prováděných s čistým skluzem není vždy jasné, jak se budou kontakty při příspěvku valení chovat. Taková měření je tedy pro posunutí poznatků v této oblasti třeba provést a vyhodnotit. Pro plné pochopení dějů vedoucích k redukci tření je pak vhodné pozorovat kontakt *in situ*.



obr. 1-1 Vrstvy oxyhydroxidu železa vzniklé během záběhu v kontaktu ocel/ocel [2]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Na počátku 20. století byly poprvé provedeny pokusy, které vedly k velmi nízkému tření, které je dnes označováno jako superlubricita [1]. V 80. letech 20. století pak vznikly první studie zabývající se tímto chováním, jejichž cílem bylo pokles tření pochopit.

Daný fenomén lze obecně rozdělit na superlubricitu vznikající za suchých podmínek a superlubricitu s kapalným mazivem [3]. Také je možné provést dělení podle režimů mazání, ve kterých je sníženo tření mezi kontaktními dvojicemi na ty v režimu mezního mazání, velmi tenkých filmů (TFL), smíšeného mazání nebo elasto-hydrodynamického mazání (EHD). Tření mezi kontakty je obecně dle Stribeckovy křivky nejmenší u EHD mazání. Vzhledem k tenké hranici s režimem velmi tenkých filmů může být při takto nízkém tření EHD a TFL mazání zaměňováno, a to především tehdy, když není provedeno měření tloušťky kapalinového filmu, která je pouze vypočtena na základě predikčních vztahů. Vzhledem ke skluzu ve většině kontaktů, ať už konformních nebo nekonformních, je vhodné zabývat se převážně takovými, které při zachování superlubricity pracují v jednom z těchto dvou zmíněných režimů. Dochází při něm nejen k redukci tření, ale i opotřebení, protože kontakty zůstávají plně odděleny mazivem.

2.1 Superlubricita suchých kontaktů

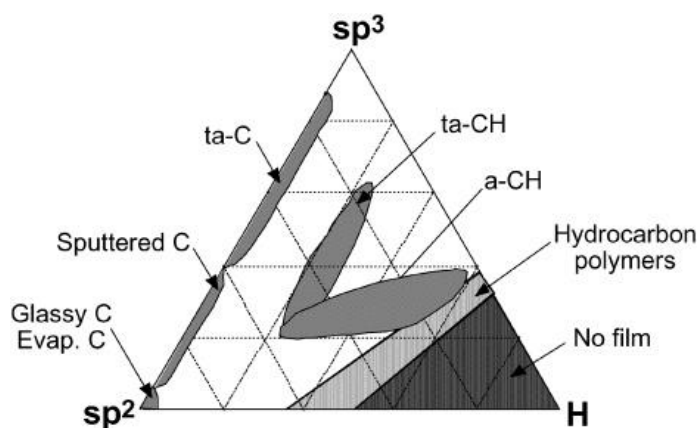
Tento typ zkoumaného jevu lze z hlediska režimů mazání označit jako mezní mazání. K tomu může docházet při nízkých rychlostech nebo vysokých zatíženích i u mazaných kontaktů. Je proto vhodné se mechanismům, kterými je v takových případech docilováno superlubricity, věnovat alespoň okrajově.

Protože kontaktní tělesa v tomto případě neodděluje kapalinový film, musí vykazovat velmi nízkou drsnost povrchu [1]. U některých materiálů zase může docházet ke skluzu po vlastních vrstvách nebo k chemické či fyzikální interakci s okolním prostředím.

Velmi nízké tření mezi pevnými látkami je možné dosáhnout například mezi materiály s povlaky DLC (uhlík podobný diamantu), disulfidu molybdeničitého MoS_2 , grafitu, nitridu uhlíku CN_x [4].

2.1.1 Uhlíkové povlaky podobné diamantu (DLC)

Jedná se o kompozitní materiály složené z částic diamantu, grafitu a z uhlovodíků. Jejich kombinací, dle ternárního fázového diagramu na obr. 2, vznikají povlaky o různých mechanických a chemických vlastnostech, přičemž pro tuto práci jsou podstatné nízké tření, vysoká tvrdost a v jejím důsledku nízké opotřebení [5].



obr. 2-1 Ternární fázový diagram uhlíku podobnému diamantu [5]

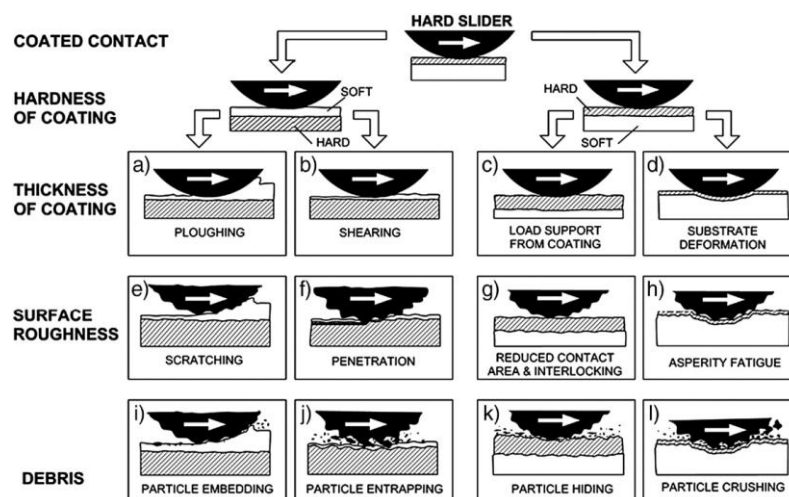
Pro pochopení diagramu je třeba říci, že:

- sp^3 je druh hybridizace (spojení) orbitalů uspořádaných do tetraedru [6]. Mezi sebou jsou orbitály hybridizace sp^3 vázány kovalentními σ vazbami, které jsou značně pevné. Tvar a druh vazby jsou shodné u diamantu a zajišťují vysokou tvrdost, a tedy nízké opotřebení povlaků s vysokým zastoupením sp^3 .
- sp^2 je hybridizace orbitalů uspořádaných do trojúhelníku [6]. Ve vrstvách jsou orbitály hybridizace sp^2 také propojeny σ vazbami, které jsou doplněny rozprostřenými vazbami π . Spojení vrstev je realizováno slabými van der Waalsovými silami. Díky tomu má grafit disponující tímto uspořádáním menší tvrdost a při stejném zatížení je náchylnější k většímu opotřebení.
- vodíkové sloučeniny zhoršují mechanické vlastnosti, jako je tvrdost [5], ale díky nim získává povrch povlaku vyšší polaritu a umožňuje tak snazší interakci s okolním prostředím.

Dle struktury a chemického složení lze pak podle diagramu dělit DLC povlaky na ta-C (tetraedrické amorfni bezvodíkové), ta-C:H (tetraedrické amorfni uhlovodíkové), a-C (amorfni bezvodíkové), a-C:H (amorfni uhlovodíkové).

Vzhledem k tomu, že je pro nízký součinitel tření lepší vysoká tvrdost a nízký modul pružnosti materiálů [7], je vhodné povlakovat spíše takové materiály, které mají oproti DLC menší Youngův modul. Tím může být například ocel. Větší vrstva takového povlaku je pak z hlediska tření i opotřebení lepší (viz obr. 2-2) [8].

Ke stavu superlubricity mohou dopomoci odpudivé van der Waalsovy síly, které vzniknou mezi hydrogenovanými DLC povrchy ve vodíkové nebo dusíkové atmosféře [4, 9, 10]. Součinitel tření, mezi dvěma kontakty s hydrogenovanými DLC povlaky při zatížení kuličky o průměru 10 mm silou 10 N (odpovídá Hertzovu tlaku 1 GPa) a rychlosti 0,5 m/s, může klesnout na 0,003 [9]. Jiná studie uvádí při stejných zatěžovacích podmínkách a průměru kuličky 9,5 mm snížení součinitele tření na 0,001 [10]. Oba experimenty byly přitom prováděny v dusíkové atmosféře.



obr. 2-2 Vliv materiálu a tloušťky povrchu na tření a opotřebení [8]

2.1.2 Disulfid molybdeničitý (MoS₂)

Mechanismus superlubricity disulfidu molybdeničitého je anizotropní, tedy spočívá v natočení vrstev složených ze šestiúhelníků proti sobě. Nejlépe pak o 30°, protože atomy molybdenu a síry se v rozích šestiúhelníku střídají [11, 12]. Vodní pára a kyslík mohou způsobit zvýšení tření, a proto musí být kontakt umístěn ve velmi vysokém vakuu ($5 \cdot 10^{-8}$ Pa) nebo v dusíkové atmosféře. Součinitel tření pak v závislosti na prostředí může být při zatížení 1-2 N i menší než 0,003 [13, 14].

2.1.3 Nitrid uhlíku (CN_x)

Mechanismus, jakým dochází k tomuto typu superlubricity nebyl doposud uspokojivě objasněn. Opět ale platí, že tření je závislé na typu prostředí a stavu superlubricity je dosahováno hlavně v dusíkové atmosféře. Přičemž při zatížení 2 N je dosaženo koeficientu tření 0,008 [17].

Jak lze vyvodit z výše uvedeného a z tab. 2-1, je bez přítomnosti maziva dosažení superlubricity v praxi obtížnější především z důvodu potřeby speciální atmosféry.

tab. 2-1 Přehled dosažitelného součinitele tření pro materiály suché lubricity [10, 13, 17]

Suchá superlubricita	Zatížení	Prostředí	Součinitel tření
DLC	10 N	Dusík	0,003
MoS ₂	2 N	Vakuum	0,003
Grafit	100 nN	Vlhký vzduch	0,005
CN _x	2 N	Vakuum	0,008

2.2 Superlubricita mazaných kontaktů

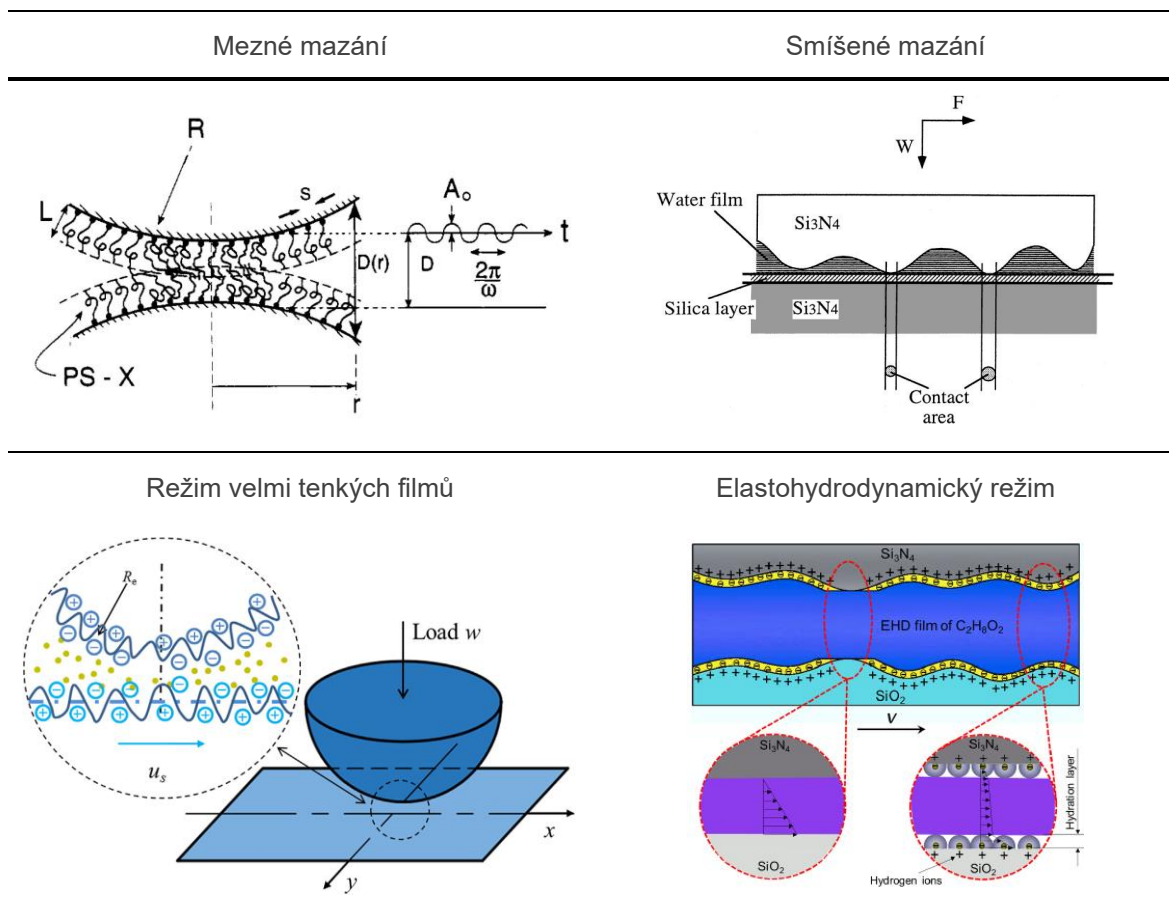
Mazané kontakty mají z hlediska superlubricity větší potenciál pro vyšší zatížení při zachování extrémně nízkého tření. Díky tomu lze v budoucnu předpokládat využití kapalinové superlubricity v běžné strojírenské praxi. Téměř nulového tření je možné dosáhnout ve všech režimech mazání. Ne všechny mechanismy, kterými je možné požadovaného chování dosáhnout, se ale vyskytují u více typů mazání zároveň. Jednotlivé režimy, ve kterých lze tření o velikosti čistého valení dosáhnout, jsou zobrazeny na následujícím obrázku (obr. 2-3). Jediný režim, při kterém doposud superlubricita pozorována nebyla, je tak hydrodynamický režim.

Tření mezi kontakty s kapalným mazivem ovlivňuje kromě drsnosti povrchu, skluzová rychlost, velikost zatížení (kontaktní tlak), doba záběhu, vlastnosti maziva, teplota a další faktory. Tyto parametry je třeba brát v potaz při studiu a analýze literatury a následném návrhu podmínek plánovaných testů.

Kapalinovou superlubricitu lze rozdělit podle podstaty a fungování mazaného systému, skládajícího se z kontaktních materiálů a maziva [3]. Mezi ty patří voda, polymery, roztoky kyselin, iontové kapaliny, oleje a nanomateriály. Tohoto dělení bude v této práci dále použito. V literatuře je ale možné setkat se i s dalším rozdělením kapalin poskytujících superlubricitu. Často je pak především při experimentech s olejovými mazivy používáno termínů ‚water-based‘ a ‚oil-based‘ [18], tedy kapaliny s vodou mísitelné a nemísitelné.

Pomocí látek mísitelných s vodou lze obvykle dosahovat tření menšího než 0,01 i za použití vyšších tlaků, takže jsou vhodnější pro nekonformní kontakty. Poněvadž má voda velmi nízkou viskozitu i tlakově-viskózní součinitel [19], je její mísení s těmito mazivy důvodem pro pokles jejich běžné viskozity i za vysokých kontaktních tlaků.

Do maziv mísitelných s vodou lze řadit téměř všechny dále popisovaná maziva až na oleje, kde je výjimkou glycerol (glycerinový olej). Proto bude rozdělení týkající se mísitelnosti s vodou znovu zmíněno jen ve vhodných případech.



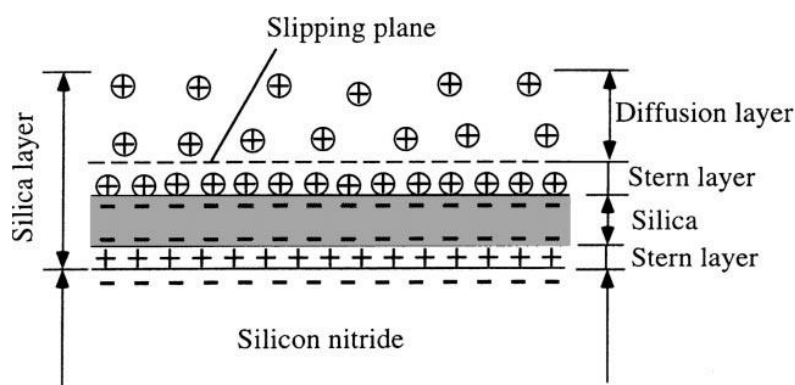
obr. 2-3 Režimy mazání způsobující superlubricitu [20–23]

2.2.1 Voda

Jako mazivo mezi kontaktními dvojicemi (tribopáry) může sloužit i samotná voda. Ta nejčastěji tribochemicky reaguje s keramikou obsahující křemík. Na povrchu této keramiky se pak vytváří ochranná vrstva oxidu křemičitého SiO_2 , která částečně sníží drsnost povrchu [22]. Zároveň může díky polaritě vody a částečné polaritě SiO_2 docházet k vzájemným interakcím, především pomocí van der Waalsových sil, které se uplatňují v režimu velmi tenkých filmů. Pakliže dojde k abrazi křemíkové částice, je hydratována ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a dochází tak k menšímu opotřebení [22].

Režim velmi tenkých filmů není klasickým režimem mazání jako ostatní. Jedné se o jeden z mechanismů, které snižují tření na úroveň superlubricity. Je úzce spjat s elektrickou dvouvrstvou zobrazenou na obrázku 2-4 [21, 22]. Negativně nabitý povrch nitridu křemíku zde přitahuje hydratované částice oxidu křemičitého, na nichž je vytvořena vlastní kladně nabitá elektrická dvouvrstva. Tyto částice se shlukují v souvislou vrstvu SiO_2 . Sternovu vrstvu tvoří kladně nabité ionty, které jsou u povrchu drženy adsorpčními silami na rozdíl od difuzní vrstvy, kde působí síly elektrostatické [24]. Díky tomu dochází ke tvorbě odpuzivých sil mezi kontakty, čímž je umožněno nižší tření a vyšší únosnost filmu než za

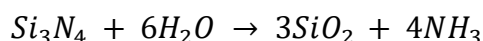
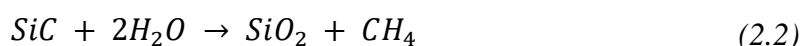
normálních podmínkách. Dosažení tohoto režimu je možné například u keramik obsahujících křemík, jako jsou nitrid křemičitý Si_3N_4 a karbid křemičitý SiC [22, 25].



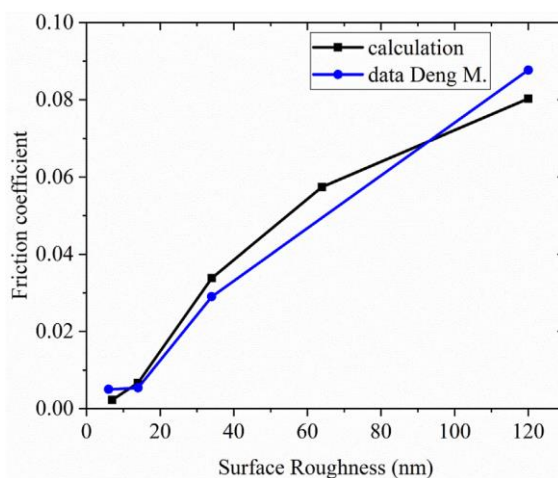
obr. 2-4 Elektrická dvojvrstva s utvořenou hydratovanou koloidální křemíkovou vrstvou [22]

Zmíněné reakce potřebné k vytvoření vrstev dle obr. 2-4 u dvou nejčastěji používaných keramik jsou níže. U SiC se kromě vrstvy oxidu křemičitého vytváří i metan a u nitridu křemičitého zase amoniak.

(2.1)



Pro tento typ superlubricity, kdy dochází k tvorbě velmi tenkých filmů, lze součinitele tření předpovídat pomocí upravených forem Reynoldsovy rovnice [21, 22]. Pro porovnání výpočtu s experimentem přitom bylo v jednom případě [21] použito hodnot získaných měření závislosti součinitele tření na drsnosti povrchu [26], kdy byly jako kontaktní materiály použity nitrid křemíku a safír a mazivem byl roztok glycerolu (v kapitole Oleje). Dané závislosti jsou na obr. 2-5. A lze dle nich vyvodit značné ovlivnění tření drsností, přičemž v tomto případě je hraniční drsností přibližně 20 nm. Vliv drsnosti na součinitel tření byl zkoumán i v dalších pracích [27].



obr. 2-5 Porovnání závislosti součinitele tření na drsnosti mezi výpočtem a experimentem [21]

Kombinace kontaktních těles z Si_3N_4 a vody je schopna přenášet vysoká zatížení. Při 49 N a skluzové rychlosti 1,18 m/s byl zjištěn průměrný součinitel tření 0,009. Při stejných podmínkách dále zkoumané tribopáry SiC/SiC a $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (oxid hlinitý, safír či rubín) nedosáhly stavu superlubricity [28]. Obecně lze říci, že i když dosáhne karbid křemičitý koeficientu tření pod 0,01 (za odlišných podmínek), snižuje oproti nitridu křemičitému tření méně a má delší čas záběhu [29].

Obvykle je pro zkoumání tohoto fenoménu používána deionizovaná voda. V případě použití roztoku o kyselém pH dochází k vyššímu opotřebení, než když je použit zásaditý roztok (vysoké pH) [30]. Lze říct, že mírně snížené pH zlepšuje třecí vlastnosti, protože vyšší opotřebení vede k snazšímu vzniku ochranné vrstvy SiO_2 . Při kombinaci Al_2O_3 disku a Si_3N_4 kuličky a zatížení 54,25 N bylo při skluzové rychlosti 1 m/s nejnižší tření pozorováno s vodou o pH 4, což odpovídá slabé kyselině [6, 30]. Hodnota součinitele tření činila 0,0054.

tab. 2-2 Kombinace materiálů a podstatné parametry pro dosažení superlubricity při mazání vodou

Kulička	Disk	Mazivo	Hertzův kontaktní tlak (MPa)	Skluzová rychlost (mm/s)	Součinitel tření	Zdroj
Si_3N_4	Si_3N_4	voda	1775	120	0,0035	[31]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda	2518	120	<0,01	[32]
SiC	SiC	čištěná voda ¹	3063	120	<0,01	[32]
Si_3N_4	Si_3N_4	voda	2240*	1180	0,009	[28]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda	1775	120	$\leq 0,0035$	[33]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda	2440	60	0,0035	[29]
Si_3N_4	Al_2O_3	voda + HCl ²	2267	1000	0,0054	[30]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda ³	1808*	500	<0,01	[34]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda	1535	262,5	0,003	[35]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda ⁴	1951	500	0,007	[36]
Si_3N_4	Si_3N_4	čištěná voda ⁵	1200	500	0,0089	[37]
Al_2O_3	Al_2O_3	voda + H_3PO_4	1200	57	0,004	[18]

¹ Jako aditivum použito diamantové submikronové abrazivo.

² Roztok o pH 4

³ Jako aditivum použity amino-modifikované nanočástice SiO_2 o velikosti 100 nm

⁴ Jako aditivum použity amino-modifikované nanočástice SiO_2 o velikosti 100 nm o koncentraci 3 hm. %

⁵ Jako aditivum použity amino-modifikované nanočástice SiO_2 o velikosti 100 nm o koncentraci 5 hm. %

*v práci chybí důležitý údaj pro výpočet maximálního kontaktního tlaku, proto údaj orientační

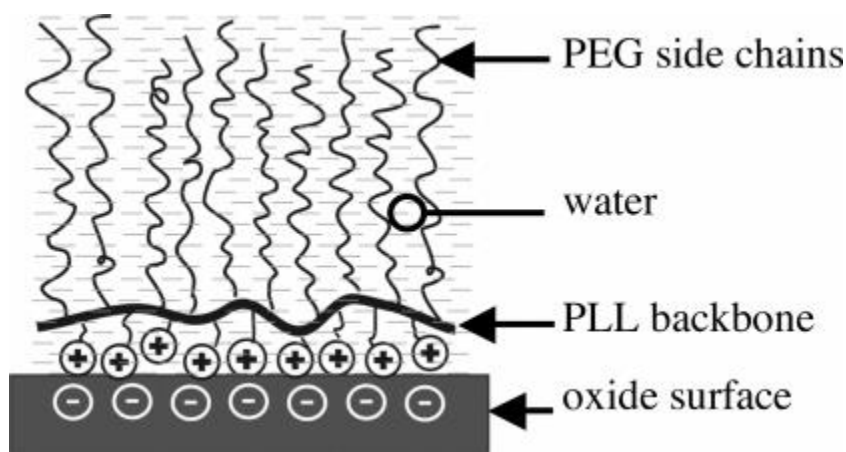
2.2.2 Polymery

Mechanismus ultra-nízkého tření u polymerů je způsoben vytvořením kartáčů připojených k povrchům. Ty jsou nabitý stejným nábojem, a proto se odpuzují. Podobně jako u vody s keramikou zde tedy vzniká kontakt s odpudivými silami. Pokud dojde ke kontaktu těchto kartáčů, nemusí nutně dojít k velkému navýšení smykového napětí, neboť odpuzující se kartáče po sobě budou klouzat [3, 4].

Polymery se nejprve musejí nanést na (negativně) nabitý povrch. Poté je na takto povlakované těleso aplikované polární rozpouštědlo, ve kterém se (kladně) nabitě řetězce narovnají. Vzhledem k jejich shodnému náboji mají snahu o co nejrovnoměrnější rozmístění po povrchu [38].

Množství jednotlivých složek a vazby mezi nimi hrají u kopolymerů vzhledem ke tření důležitou roli [39, 40]. Například asi nejprozkoumanější kopolymer z hlediska superlubricity (PLL-g-PEG) při zatížení 10 N a skluzové rychlosti 2,5 m/s dosahuje součinitele tření v rozmezí 0,0001 – 0,001 [39]. Jeho struktura je zobrazena na obr. 2-6.

Polymery lze použít i společně s jinými kapalnými mazivy a pouze na jednom povrchu. Například polymer na disku z titanové oceli proti teflonové (PTFE) kuličce mazané fosfátem pufrovaným roztokem NaCl. Tato kombinace při skluzové rychlosti 12 mm/s a zatížení 40 N vykazuje součinitel tření přibližně 0,005 [41].



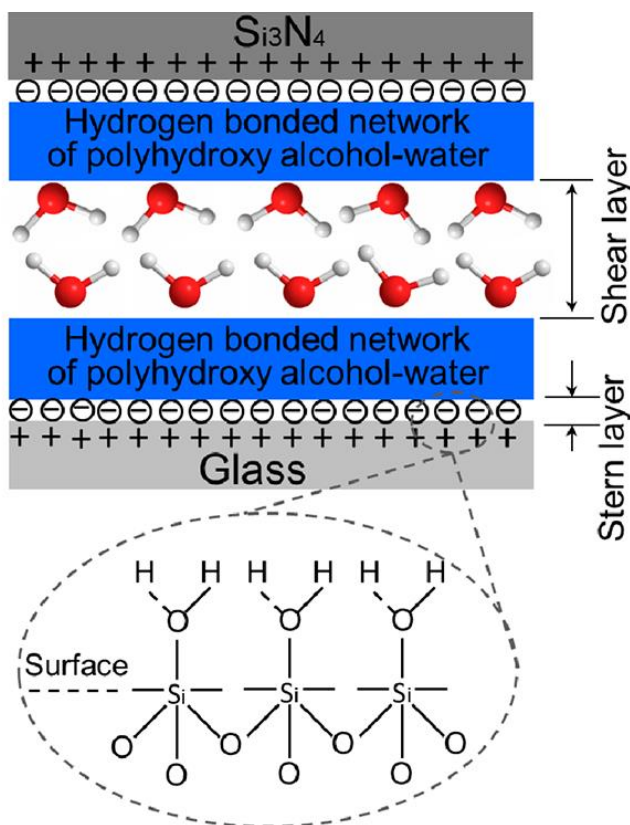
obr. 2-6 Mechanismus navázání polymerů na kontaktní těleso [42]

Ge a kol. [43] zkoumali směs deionizované vody, polyethylenglykolu (PEG) a kyseliny borité. Zjistili, že po záběhu trvajícím asi 600 s došlo ke snížení součinitele tření na 0,004 a poté k mírnému zvýšení na 0,006. Pro porovnání byly použity další organické kyseliny, a to octová, mléčná, citronová a vinná. Nejlepších výsledků bylo přitom dosaženo právě s kyselinou boritou. Obdobně byl použit PEG o různých molekulárních hmotnostech (200, 400, 600, 1000 g/mol). Nejnižšího součinitele bylo pak dosaženo pro směs kyseliny borité

s PEG200. Vzhledem k pH 6 této směsi byl proveden test, kdy do ní byla na 3 dny namočená ocelová kulička. Její povrch zůstal bez projevů koroze. Byl proto proveden časový test, kdy po záběhu sice bylo dosaženo součinitele tření o hodnotě 0,005, ale po čase došlo k opětovnému navýšení na 0,011.

2.2.3 Kyselé roztoky

Vlastnosti extrémně nízkého tření spadající do této kategorie byly poprvé objeveny u kyseliny trihydrogenfosforečné [44]. Odštěpený vodík z této kyseliny je schopný se navázat protonací na křemík obsažený v keramice (i sklu) a aniont kyseliny fosforečné na sebe následně váže vodíkovou vazbou molekuly vody [45, 46]. Vzniká tak Sternova vrstva a odpudivé síly, díky nimž může docházet ke tření v režimu velmi tenkých vrstev [46]. Superlubricity je dosahováno rovněž mezi safírovými povrchy a touto kyselinou [44].



obr. 2-7 Mechanismus vzniku superlubricity [46]

Stejný mechanismus je uplatněn i při tření mezi keramickými povrchy s křemíkem s mazivem ze směsi polyhydroxy alkoholů a dalších kyselin. Vodík odštěpený z kyseliny se opět naváže na povrch a polyhydroxy alkoholy plní funkci vazače vody [46]. Toto je zobrazeno na obr. 2-7.

Maximální únosnost kontaktu mazaného kyselinou fosforečnou je 5 N, přičemž roztok je zředěn na pH = 1,5, skluzová rychlost je 0,15 m/s a koeficient tření je 0,004 [47]. Ze

zmíněných směsí nejnižší hodnotu tření vykazuje směs 1,3-propandiolu a kyseliny chlorovodíkové (HCl) při zatížení 3 N a skluzové rychlosti 0,075 m/s [46].

2.2.4 Oleje

Glycerol

Jak již bylo dříve zmíněno, je glycerol jediným mazivem, který lze v této kategorii řadit mezi mísitelné s vodou. Zároveň je nejvíce prozkoumaným mazivem, s nímž lze dosáhnout superlubricity za účasti viskózního, a tedy značně oddělujícího, mazacího filmu. Podmínku snížení třecího součinitele pod 0,01 může glycerol nebo jeho vodný roztok za určitých podmínek splňovat jako mazivo kontaktů z oceli, ta-C povlaku, nitridické keramiky Si_3N_4 či skla SiO_2 .

[48] **BOUCHET, I., et al.** Superlubricity mechanism of diamond-like carbon with glycerol. Coupling of experimental and simulation studies. 2007.

Bouchet a kol. [48] studovali vliv DLC povlaku na tření při použití čistého glycerolu a směsi polyalfaolefinu s glycerol monooleátem (PAO+GMO) při teplotě 80 °C. Pro pin-on-disk test bylo zatížení rovno Hertzovu kontaktnímu tlaku 0,7 GPa a skluzové rychlosti od 0 do 1000 mm/s. Porovnávány byly mezi sebou ocelová kontaktní tělesa nepovlakovaná a s naneseným ta-C nebo a-C:H povlakem. Bylo zjištěno, že ke snížení součinitele tření na hodnotu 0,006 dojde při použití PAO+GMO od skluzové rychlosti 100 mm/s pouze u ta-C povlaku, kdežto u a-C:H povlaku ke snížení pod 0,01 nedojde.

Při SRV testu prováděném recipročně v konfiguraci needle-pin-on-flat-disc [48] bylo zatížení rovno pouze 270 MPa a ke snížení tření na hodnotu superlubricity došlo pouze pro ta-C/ta-C kontakt mazaný glycerolem. Přesto bylo tření tohoto kontaktu dosti nízké i při mazání PAO+GMO. Byl zjišťován důvod snížení tření u takto povlakovaných kontaktů, a proto bylo kontaktní těleso zkoumáno EFTEM mikroskopem, kdy byla na uhlíkové sp^3 vrstvě s vysokou mikrotvrdostí (65 GPa) a Youngovým modulem pružnosti (650 GPa) pozorována 3 nm silná vrstva s vyšším zastoupením hybridizace sp^2 . Ta zajišťuje vyšší reaktivnost povrchu, kdy se na ni může navázat hydroxylová (-OH) skupina, která se odštěpí při tribochemické reakci glycerolu, případně GMO. Na ta-C povlaku tak při hydroxylaci vznikne monovrstva, která má spolu s glycerolem či GMO za následek snížení tření v mezním mazacím režimu.

Závěry

Při teplotě 80 °C je možné dosáhnout mezi kontakty s ta-C povlaky superlubricity. Povlaky jsou na sebe schopny vázat -OH skupiny z maziv, a proto je možný vznik nabitých monovrstev na kontaktních tělesech. Pro snížení součinitele tření za přítomnosti PAO+GMO je při Hertzově kontaktním tlaku 0,7 GPa potřeba dosáhnout skluzové rychlosti aspoň 100 mm/s. Redukce tření mezi těmito povrchy lze dosáhnout i při mazání glycerolem.

[49] **MATTA, C., et al.** Superlubricity and tribochemistry of polyhydric alcohols. 2008.

Na předchozí práci navázali Matta a kol. [49], kteří ji rozšířili o experimenty ve velmi vysokém vakuu (UHV), ve kterém jako jediný tribopár vykazuje režim superlubricity kontakt a-C:H/a-C:H. Také popsali možné organické kyseliny, které pravděpodobně rozkladem glycerolu v kontaktu vznikají.

Nejvíce se ovšem práce [49] zabývala přidáním myo-inositolu (1 hm. %) do čistého glycerolu. Při shodném SRV testu jako v předchozí publikaci bylo zjištěno, že superlubricity je možné dosáhnout pouze aplikací čistého glycerolu mezi ta-C/ta-C kontakty. Použitím pin-on-disc testu byl pro kontaktní dvojici ocel/ocel při 25 °C zjištěn kladný vliv vysokého kontaktního tlaku na součinitel tření, který pak v závislosti na počtu cyklů roste pozvolněji. Pakliže je při nejvyšším zkoumaném zatížení (800 MPa) použita zmíněná směs s myo-inositolem, je možné prodloužit dobu, po kterou je třecí kontakt v režimu superlubricity. Po jistě době se nicméně tření opět zvyšuje. Lze jej ale snížit opětovným přidáním myo-inositolu, což ukazuje na jeho spotřebovávání v tribochemické reakci mezi kontakty.

Závěry

Použití čistého glycerolu jako maziva snižujícího součinitel tření mezi ocelovými kontakty a za pokojové teploty je z dlouhodobého časového hlediska možné pouze pokud bude přidán myo-inositol. Zároveň je třeba v takovém kontaktu vyvinout vysoký kontaktní tlak. Jeho působením pravděpodobně dochází k tribochemické reakci mezi ocelí a glycerolem, kdy přidáním myo-inositolu dochází k menšímu účinku korozivních kyselin.

[50] **ZHANG, Chen-Hui, et al.** Superlubricity of a Mixed Aqueous Solution. 2011.

Tato studie se věnovala kontaktu mezi Si₃N₄ (Ra 2 nm) kuličkou a skleněným diskem (Ra 0,5 nm). Jako mazivo posloužila směs glycerolu deionizované vody a kyseliny borité. Součinitel tření klesl při použití tribometru v konfiguraci ball-on-disk s rotujícím diskem (300 MPa, 12,56 mm/s) pod 0,01 po asi 200 s a poté klesl až na 0,0028. Teplota během testu byla 26 °C a relativní vlhkost byla 20 %. Kontaktní povrchy byly před testem hydroxylovány pro snazší dosažení reakce mezi nimi a mazivem.

Tření bylo testováno i při použití samotné vody, směsi glycerolu s vodou (1:1) a 5% vodného roztoku kyseliny borité. Tření ale nedosahovalo požadovaných hodnot. Pro zjištění mechanismu tření byl skleněný povrch všech měřených kombinací otestován AFM mikroskopem. Při mazání vodou nebyla zjištěna žádná změna v drsnosti povrchu. Povrch mazaný glycerolem nebylo možné pro velkou viskozitu maziva naměřit. Použití vodného roztoku kyseliny borité znamenalo vytvoření nanovýstupků, které jsou nejspíše důsledkem adsorpce a nahromadění kyseliny na povrchu kontaktu. Protáhlé výstupky pak byly vytvořeny i na skleněném povrchu mazaném výslednou směsí. Má se za to, že se jedná o adsorbovanou uniformní vrstvu, která je odolná vysokému tlaku a je důvodem pro nízký smykový odpor kapaliny v kontaktu. Molekuly maziva jsou na hydroxylovaném skleněném povrchu navázány pravděpodobně van der Waalsovými silami, přičemž se nejspíše jedná

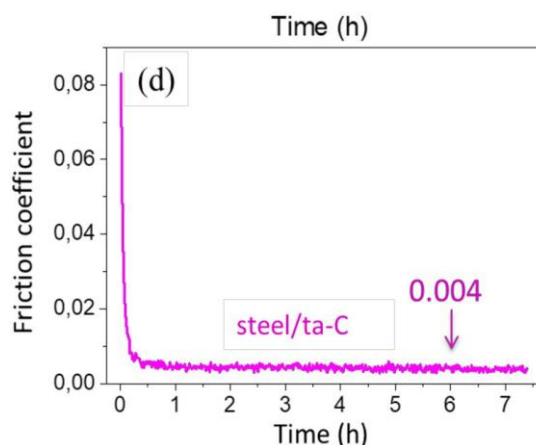
o molekuly diglycerolborátu vzniklé tribochemicky. Přítomnost těchto molekul byla dokázána Ramanovou a infračervenou spektroskopií. Záběh je tak nejspíše dobou, za kterou zreaguje dostatečné množství molekul a následně se vytvoří povrchová vrstva.

Závěry

Superlubricity je možné za pokojové teploty dosáhnout i mezi nitridickou keramikou a sklem při poměrně malé skluzové rychlosti i kontaktním tlaku, pokud je jako mazivo použita směs kyseliny borité, glycerolu a vody. Na kontaktních materiálech se vytváří vrstva van der Waalsovými silami vázaných molekul diglycerolborátu. Tento tribochemicky vzniklý povlak je odolný vůči tlakovému namáhání a po záběhu způsobuje snížení tření i při relativně nízké skluzové rychlosti a kontaktním tlaku.

[51] **LI, Jinjin, et al.** Superlubricity Achieved with Mixtures of Acids and Glycerol. 2013.

Avšak pro poslední zmiňovaný to platí jen při teplotě 80 °C [3, 52]. Poněkud specifický je pak povrch ocelových kontaktů, na němž se tvoří při zatížení povlak oxyhydroxy železa FeOOH (platí také pro ta-C při jeho kombinaci s ocelí). Tribopár ocel/ta-C znázorněný na obr. 2-8 dosahuje součinitele tření 0,004 při zatížení 3 N, rychlosti 3 mm/s a teplotě 50 °C [52].



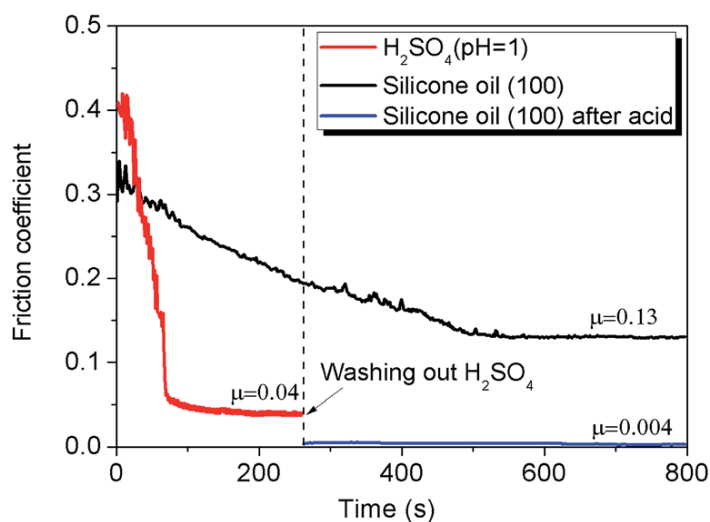
obr. 2-8 Závislost součinitele tření na čase [52]

Zajímavé je, že ačkoliv většinou pro kapalná maziva platí, že se zvyšující se teplotou součinitel tření klesá (klesá viskozita), pro tření s glycerolem a ocelovými povrchy to neplatí [53].

Silikonový olej

Li a kolektiv [54] uvádí, že snížení tření v kontaktu skleněného disku (Ra 5 nm) a kuličky z nitridu křemíku (Ra 10 nm) je možné při mazání silikonovým olejem dosáhnout po záběhu v roztoku kyseliny sírové o pH 1. Následně je možné do kontaktu aplikovat silikonový olej

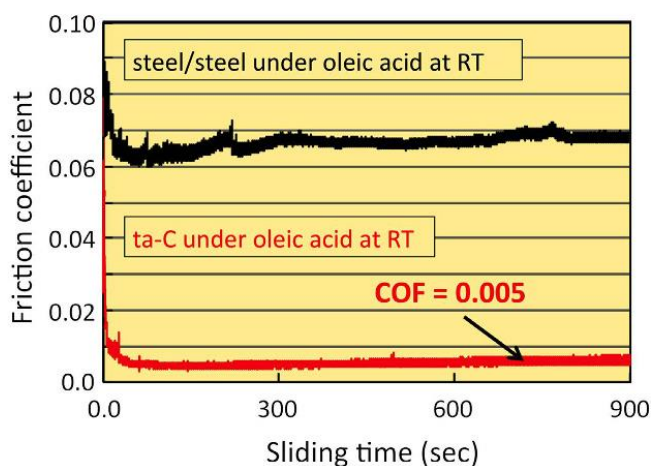
o různých viskozitách a dosáhnout tření i o velikosti 0,004. Tento záběh je zobrazen níže na obr. 2-9.



obr. 2-9 Záběh v kyselém prostředí pro silikonový olej o viskozitě 100 mPa [54]

Kyselina olejová

Bouchet a kol. [55] uvádí, že při použití ta-C povlaků je možné snáze dosáhnout snížení tření díky reakci povlaku s mazivem podobně jako již bylo zmíněno u glycerolu (stejní autoři). Přičemž ke snížení tření na hodnotu 0,005 dochází už při 50 mm/s (viz obr. 2-10), což odpovídá dle parametru mazání o velikosti 2 smíšenému mazacímu režimu. Dále pak od 100 mm/s (již EHL režim) dochází k dalšímu snížení tření.



obr. 2-10 Záběh kontaktu mazaného kyselinou olejovou při 50 mm/s [55]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

V dnešní době je snaha o snižování nákladů na provoz strojů. Proto je věnována větší pozornost jevům, jakým je superlubricita. Jedná se o děj, při kterém klesne hodnota součinitele tření pod 0,01. Může tak dojít k lepšímu využití energie, a tudíž ke zvýšení účinnosti strojů.

V současnosti se materiály a maziva, vykazující superlubricitu, testují převážně na nanoúrovni, případně na mikroúrovni. Pro lepší poznání jejich chování v podmínkách, ve kterých pracují běžné stroje, je třeba provést detailnější výzkum na makroúrovni. Především často chybí měření tření v závislosti na rychlosti, případně na parametru mazání. Jehož teoretické výpočty vycházejí z předpokladu, že dojde k EHD mazání a neberou v potaz tribochemické reakce a režim velmi tenkých filmů.

Lze předpokládat, že na makroúrovni se bude na výsledném tření více podílet drsnost povrchů, a proto bude dosaženo potřebné velikosti tření později nebo, při drsnosti uvedené v předchozích článcích, vůbec. Vzhledem k tomu, že materiály kontaktů, negativní vliv drsnosti povrchů a některé další faktory působící na výsledné tření již byly zkoumány, je vhodné se více zaměřit na samotné kontakty při pohybu. Optický vzhled, velikost tření či jiné hodnoty zjištěné *in situ*, mohou poskytnout informaci o fungování superlubricity v makrokontakttech a také o jejím uplatnění při daných rychlostech. Podrobnější zkoumání mazací vrstvy může rovněž přinést nové poznatky v oblasti superlubricity.

Ve strojírenství jsou častá vysoká zatížení na úrovni makrokontaktů, která vyžadují výběr vhodných kontaktních materiálů a maziv. Tyto kombinace musí dosahovat potřebných parametrů pro zajištění superlubricity, jako je drsnost, pH a další, a zároveň musí splňovat určité provozní parametry, při nichž je možné požadovaného snížení tření dosáhnout. Pozornost by měla být věnována zejména kontaktnímu tlaku, skluzové rychlosti a samotné hodnotě součinitele tření. Zároveň musí být kladen důraz na dobrou únosnost mazacího filmu, čímž bude zajištěna možná použitelnost v budoucí strojírenské praxi. Je tedy třeba zajistit vhodnou kombinaci materiálů a vlastností měřicího systému pro dosažení superlubricity a měření tření a tloušťky mazacího filmu.

3.2 Analýza a zhodnocení řešerše

Superlubricita suchých kontaktů není především z hlediska speciální atmosféry vhodná pro aplikaci v klasických součástech běžného strojírenství, ačkoliv se zajisté objevují případy, kdy je naopak nevhodné použití kapalinového maziva. Je ale užitečné se s touto problematikou seznámit, neboť materiály, které se v ní používají, se vyskytují i v superlubricitě kontaktů mazaných [4]. Z tohoto hlediska jsou pak zajímavé především DLC povlaky a výskyt odpudivých sil mezi takto upravenými kontaktními povrchy.

Co se týče kapalinové superlubricity, všechna uvedená maziva nějakým způsobem fyzikálně, či chemicky reagují s kontaktními tělesy a zajišťují mezi nimi odpudivé síly [21, 39, 46]. Může se jednat například o van der Waalovy síly. Takové kombinace materiálů, maziv a interakcí mezi nimi často vedou na zvláštní typ mazání, který se vyznačuje velmi tenkými mazacími filmy. Ty jsou poměrně novým objevem a nejsou proto dobře prozkoumány. Je ale známo, že souvisejí s tvorbou elektrické dvojvrstvy, která vzniká polarizací tribopárů i maziv [57]. Tato dvojvrstva způsobuje odpudivé síly mezi kontakty a může být narušena při zvýšeném zatížení.

Například při kontaktech mazaných vodou, lze na základě prostudovaných prací říci, že aspoň jedním z materiálů musí být křemičitá keramika, kdy se elektrická dvojvrstva tvoří na základě tribochemické reakce [28, 32, 33]. Tyto kontakty jsou zároveň schopny snést poměrně značné zatížení. Přestože se obvykle používá deionizovaná voda, jejíž pH je přibližně neutrální, může vést mírné snížení pH ke snížení tření [30]. Tento poznatek pak podporuje i fakt, že jedna z kategorií maziv jsou roztoky kyselin. Voda samotná a kyselé roztoky obzvláště, jsou korozivním prostředím především pro oceli [43], které jsou v současnosti hlavním konstrukčním materiálem. Je tak třeba přemýšlet o povrchové úpravě ocelí, případně o utěsnění kontaktů mazaných vodou nebo kyselými roztoky.

U maziv na bázi vody, kyselin, olejů, polymerů a iontových kapalin, jmenovaných již v kapitole 2.1, chybí pro plné poznání mechanismu některé z měřitelných charakteristik. Kupříkladu se jedná o závislost tření na rychlosti, či skluzu. To jsou pro některé části strojů důležité parametry, podle kterých lze vyhodnotit následnou použitelnost výše popisovaných způsobů snižování tření pro tato zařízení.

V důsledku zjištěných informací lze říci, že každý z popsaných typů superlubricity, je z hlediska únosnosti v nějaké své formě použitelný v budoucí praxi. Ne všechny ale mohou být nasazeny na strojírenské prvky, jako jsou ložiska, ozubená kola, ... Ať již z hlediska zatížení nebo z důvodu speciálního prostředí, jakým je u pevných maziv vakuum nebo dusíková atmosféra [1].

Mnoho materiálů se objevuje ve více druzích superlubricity, v důsledku čehož je možné se na takové materiály zaměřit přednostně. Jedná se především o keramiku a povlaky. Pro všechny kontaktní materiály dále platí potřeba značně malé drsnosti povrchů [47], která však

může být v praxi při dlouhodobějším používání problém. Bylo by proto vhodné se během měření věnovat i kontaktům, jejichž plochy vykazují nebo aspoň napodobují drsnost a případné vady částečně opotřebovaných povrchů.

3.3 Cíl práce

Hlavním cílem práce je objasnění parametrů mazacího filmu a pozorování změn topografie kontaktních povrchů u vybraných kombinací materiálů a maziv, které vykazují součinitel tření nižší než 0,01. Bude zkoumána velikost tření mezi kontakty za různých provozních podmínek, především za rozdílné rychlosti a relativního skluzu. Okolní prostředí bude mít během všech experimentů přibližně stejnou teplotu i relativní vlhkost, aby byla měření srovnatelná a opakovatelná. Práce přispěje k posunutí poznatků o dané problematice blíže technické praxi, ve které se kontakty s vysokými kontaktními tlaky vyskytují za variabilních rychlostí a skluzových poměrů.

Dílčí cíle jsou

- Zpracovat přehled kombinací materiálů a maziv vykazující superlubricitu
- Navrhnout experimenty a vzorky pro testování
- Realizovat měření tření, topografie povrchu a parametrů mazací vrstvy
- Zjistit vliv rychlosti a relativního skluzu v kontaktu

Vědecká otázka 1

Jaký vliv na tření a tloušťku mazacího filmu má unášivá rychlost a Hertzův kontaktní tlak v mazaných kontaktech vykazujících superlubricitu?

Pracovní hypotéza 1

K superlubricitě nedojde, pakliže není překročena určitá rychlost mezi kontakty [48]. Při vyšších rychlostech nebudou změny ve tření a tloušťce mazací vrstvy příliš patrné, ale může se zkrátit doba záběhu.

Vysoký kontaktní tlak znemožní oddělení povrchů mazací vrstvou [18], naopak nízký kontaktní tlak může zapříčinit pozdější vznik tribochemické vrstvy, a proto i delší záběhový čas. V případě velmi nízkého tlaku pak k vytvoření tribochemické vrstvy vůbec nedojde.

Vědecká otázka 2

Jaký vliv na superlubricitu a stabilitu chování systému má opotřebení a s ním spojený nárůst drsnosti povrchu v makrokontaktech?

Pracovní hypotéza 2

Zvýšení drsnosti povrchu, které může být způsobené i snížením unášivé rychlosti, povede k nárůstu tření (řešili např. Fang a kol. [21] nebo Wong a kol. [27]). Následné zvýšení unášivé rychlosti nemusí vést k jeho opětovnému snížení. Tím se chování systému z pohledu tření stává nestabilním.

Výstup práce

Předpokládaným výsledkem práce je článek publikovaný v některém z časopisů zařazených do databáze Web of Science. Dle Metodiky hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů [58] se jedná o článek v odborném periodiku s označením

Jimp – článek v časopise evidovaném ve Web of Science

4 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY

4.1 Postup řešení

První částí, kterou je třeba pro provedení experimentů provést, je získání vzorků kontaktních těles a maziv. Tyto materiály budou podrobněji popsány v kapitole 4.4. V druhé části je třeba navrhnout experimenty (viz kap. 4.2). Následně je nutné navržené testy realizovat. Tato měření lze provádět na tribometrech popsaných v kapitole 4.3.

V další části je třeba změřená data analyzovat, což může být v některých případech provedeno pomocí vyhodnocovacího softwaru používaného pro daný typ tribometru. Další vyhodnocování lze provést pomocí programů MS Excel či MATLAB. Analýza pak zahrnuje i statistické zpracování dat, pokud jsou měření z důvodu zajištění opakovatelnosti prováděna vícekrát.

4.2 Měření

Kromě úvodních testů se budou podmínky měření iteračně měnit v závislosti na výsledcích dosažených v předchozích experimentech. Změna by měla probíhat postupně směrem k parametrům, kterých je běžně dosahováno v makrokontaktech strojírenských součástí. Z tohoto hlediska lze měnit především kontaktní tlak nebo unášivou rychlost a případně také drsnost povrchu.

Jestliže kontaktní materiály umožňují optický vhled do kontaktu, je vhodné v průběhu testování tření měřit pomocí kolorimetrické interferometrie i tloušťku mazací vrstvy. Paralelně s měřením tření je možné pozorovat i změny ve stavu povrchů kontaktních těles. Změnu drsnosti je ale možné měřit až po ukončení experimentu, například na optickém profilometru.

4.2.1 Základní typy testů

Úvodní test

Jedná se o test reprodukcující publikované výsledky na dostupných zařízeních. Tento test sleduje vývin tření v čase, jedná se tak o časový test. Vzhledem k parametrům tribometrů a k rozdílnosti publikovaných průměrů kuliček a zatěžovacích sil, je nutné upravit měření tak, aby se s publikacemi shodovaly alespoň Hertzovy kontaktní tlaky, unášivé rychlosti

a pokud možno i drsnosti povrchů kontaktních těles. Pak lze provést měření tření, kdy bude pozorována změna součinitele tření v čase.

Časový test

Tento druh experimentu sleduje časový průběh velikosti součinitele tření, včetně záběhu kontaktů. Veškeré podmínky měření by měly být konstantní, přičemž porovnání výsledků úvodního testu s publikovanými výsledky by mělo poskytnout informace vedoucí k iteračním změnám v měřicích podmínkách.

Stribeckův test

Na počátku experimentu je třeba, aby došlo k záběhu kontaktů. Teprve poté je možné nastavit měření na Stribeckův test. Jedná se o test měřící tření, při kterém se mění unášivá rychlost v čase. Vzhledem k předpokladu změny tření při změně této rychlosti, a také změně drsnosti, je vhodné provést měření v obou směrech. A to jak při vzrůstající rychlosti, tak při klesající.

4.2.2 Analýza testů

Hodnocení časového testu by mělo obsahovat dobu trvání záběhu a výslednou velikost součinitele tření. Z měření lze vyčíst i stabilitu součinitele tření, ve smyslu jeho rozkmitu, která může být hodnocena pomocí směrodatných odchylek z naměřených dat po ustálení tření (po záběhu).

Průměrná centrální tloušťka mazací vrstvy by měla být hodnocena v závislosti na Hertzově kontaktním tlaku a na rychlosti. Pakliže bude zjištěno složitější rozložení tloušťky mazacího filmu, například nějaké abnormality oproti dosud poznanému, bude tloušťka vrstvy v kontaktu popsána podrobněji.

Pro měření tření při konstantním zatížení a rychlosti je v případě dosažení superlubricity vhodné zhodnotit opakovatelnost měření. Při všech typech testů je vhodné hodnotit i drsnost povrchu kontaktů na počátku a na konci měření

4.3 Použitá zařízení

4.3.1 Optický tribometr (EHD5)

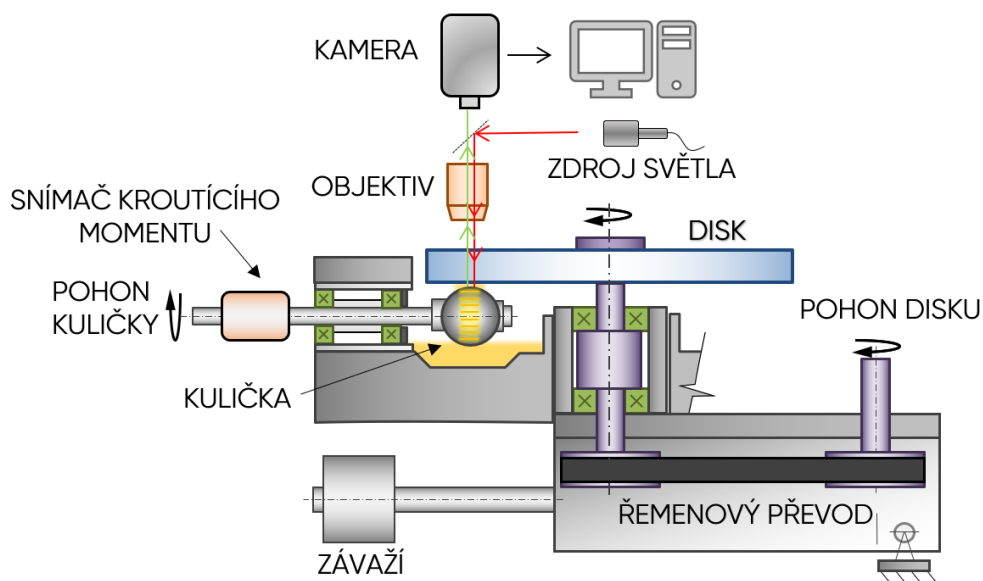
Experimentální měření budou převážně realizována na optickém tribometru typu ball-on-disk (obr. 4-1). V něm je kontakt zatěžován posunem závaží, pomocí něhož lze vyvodit zatěžovací sílu o velikosti od 5 N do 150 N [59]. Mezi disk a kuličku je rotací kuličky přiváděno mazivo, díky čemuž vzniká tenký mazací film oddělující povrchy. Pro pozorování

kontaktnímu je nutný průhledný disk, obvykle skleněný či safírový. Pomocí kolorimetrické interferometrie lze pak tloušťku mazacího filmu měřit. Materiálem pro kuličku o průměru 25,4 mm je nejčastěji ocel. Maximální dosažitelný Hertzův kontaktní tlak při této konfiguraci je 1,64 GPa.

Rotace kontaktních těles je zajišťována stejnosměrnými servomotory, díky kterým je umožněna rychlost třecích povrchů až $4000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž za snadněji realizovatelné se považují experimenty při rychlostech v rozmezí $0,1 - 1500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Pomocí těchto nezávislých pohonů lze měnit poměr skluzové a valivé rychlosti neboli SRR (viz vztah níže), téměř libovolně, až do dosažení maximální rychlosti. Součinitel tření se přepočte z hodnot naměřených snímačem krouticího momentu. V kontaktu je možné měřit také rozložení teploty v kontaktu pomocí infračervené termovize. Do jisté míry lze měnit i okolní podmínky přístroje, kdy teplota výhřevu okolí může dosahovat až $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$SRR = \frac{2(v_d - v_k)}{(v_d + v_k)} \quad (4.1)$$

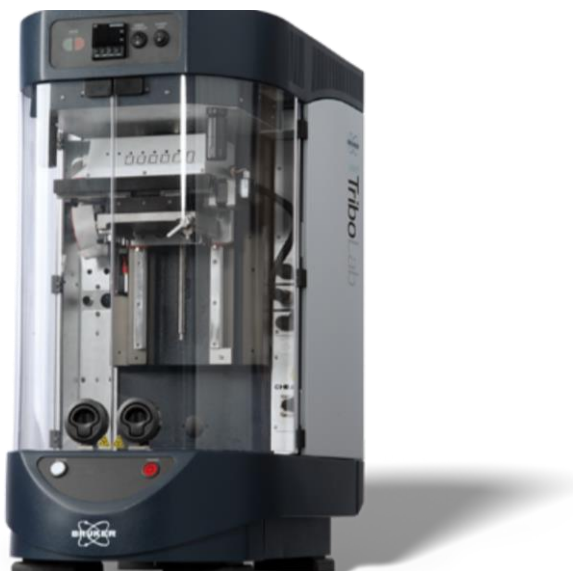
Mazivo je do kontaktu přiváděno broděním kuličky v zásobníku maziva, které má objem přibližně 60 ml. Při tomto zaplnění je kulička ponořena v mazivu asi z poloviny. Málo viskózní kapaliny lze aplikovat přímo do kontaktu injekčně otvorem pro teplotní snímač, aby nedocházelo ke hladovění kontaktu a následnému opotřebení polopropustné vrstvy.



obr. 4-1 Schéma tribometru EHD5 [59]

4.3.2 Universal Mechanical Tester (UMT)

Testování za čistého skluzu bez nutnosti optického pozorování lze realizovat na univerzálním tribometru v konfiguraci ball-on-disk. Průměr nehybné kuličky pro tento typ experimentů je 9,525 mm (3/8"). Kulička je zatěžována normálovou silou oproti disku (\varnothing 25,4 mm) uchycenému v rotujícím zásobníku maziva.



obr. 4-2 Zařízení UMT [60]

4.3.3 Rotační viskozimetr

4.3.4 Tlakový viskozimetr

4.4 Materiály

Pro experimentální měření byly vybrány kombinace materiálů a maziv zobrazených v tabulce 4-1 níže. Lze předpokládat, že některá kontaktní tělesa nebudou dosahovat po dodání potřebné drsnosti povrchu. Její snížení může být dosaženo například leštěním pomocí diamantové brusné pasty. Drsnost (S_a) kuliček pro měření na optickém tribometru s označením EHD5 bude rovna přibližně 5 nm a drsnost disku pak menší než 2 nm. Kontaktní materiály, především keramiky, se mohou odlišovat od publikací mechanickými vlastnostmi, které jsou podstatné pro výpočet kontaktního tlaku. Z toho důvodu budou všechny kombinace pro jednoduchost zatěžovány přibližně stejnou silou, a to 70 N a následně bude při analýze toto zatížení na kontaktní tlak přepočteno. V následující tabulce jsou pak uvedeny provozní podmínky, včetně Hertzova kontaktního tlaku, dle již dříve

publikovaných výzkumů. Výjimku tvoří první kombinace, kdy pro roztok glycerolu nebyla tato kombinace (ocel/sklo) mezi dřívějšími pracemi nalezena. Roztok glycerolu je ale, jako asi nejprozkoumanější mazivo vykazující superlubricitu, vhodné do testování zařadit. Zvláště, když mechanismy redukce tření byly objasněny jak pro ocelové materiály, tak pro materiály obsahující křemík.

tab. 4-1 Vybrané kontaktní kombinace a některé provozní parametry časových testů [18, 28, 43, 48]

Kulička	Disk	Mazivo	Unášivá rychlost (mm/s)	Hertzův kontaktní tlak (GPa)
Ocel	Sklo	glycerol + voda	100	0,7
Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	deionizovaná voda	1180	2,24
Ocel + ta-C	Ocel + ta-C	kyselina olejová	100	0,07
Si ₃ N ₄	SiO ₂	voda + kys. boritá + PEG 200	75	0,75
Si ₃ N ₄	Sklo	Silikonový olej (záběh H ₂ SO ₄ +voda)	12	0,7

4.5 Metody měření

4.5.1 Kolorimetrická interferometrie

Pomocí této metody lze měřit tloušťku mazací vrstvy v kontaktu. Jedná se o metodu využívající interferenci světelných paprsků odražených od obou kontaktních materiálů. V případě disku se jedná o průhledný disk s napařenou polopropustnou vrstvou chromu na straně kontaktu. Druhé kontaktní těleso (kulička) musí být samo dostatečně odrazivé.

Interferenci těchto odražených paprsků vzniká barevný interferogram. Barvy interferogramu v sobě nesou informaci o tloušťce vrstvy. Pro vyhodnocení je možné použít například program Achilles a kalibraci založenou na porovnání tloušťky maziva s interferenční barvou. Pro měření mazivových filmů o centrální tloušťce maziva menší než 100 nm je vhodné nepoužívat pouze průhledný disk s poloodrazivou vrstvou chromu, protože pod hodnotou 50 nm, která se pak může objevovat jako minimální tloušťka maziva, je měření tloušťky již poměrně nepřesné z důvodu rozlišitelnosti barev v barevném spektru. Lze pak využít buď zvýšené bytové hloubky kamery nebo dalšího povlaku SiO₂ na stávajícím povlaku chromu.

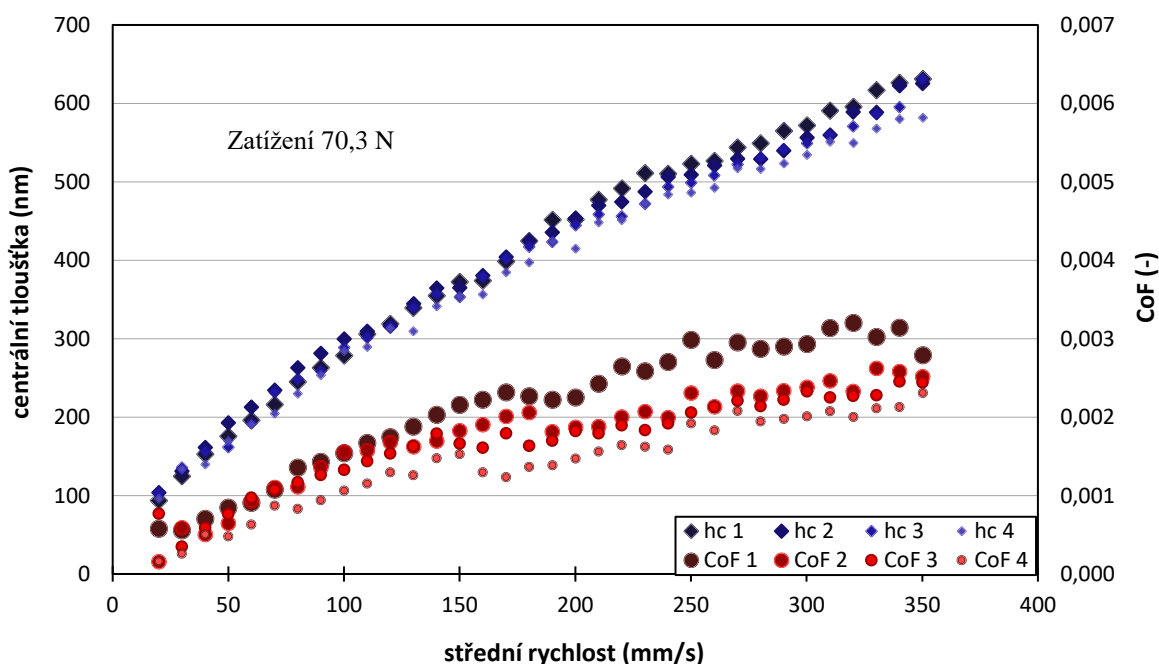
5 VÝSLEDKY

Během experimentů na zařízení na optickém tribometru s označením EHD5 byla měřena teplota v místnosti a relativní vlhkost vzduchu. Průměrná teplota v místnosti odpovídá $24,7 \pm 0,8$ °C při relativní vlhkosti $28,5 \pm 2,4$ % RH. Vzhledem k velikosti statistického souboru (22 hodnot pro teplotu i pro vlhkost v několika dnech) jsou data považována za dostatečně vypovídající a teplota i vlhkost proto nebudou v dalších výsledcích pro jednotlivá měření uváděny.

5.1 Vodný roztok glycerolu, ocel/sklo

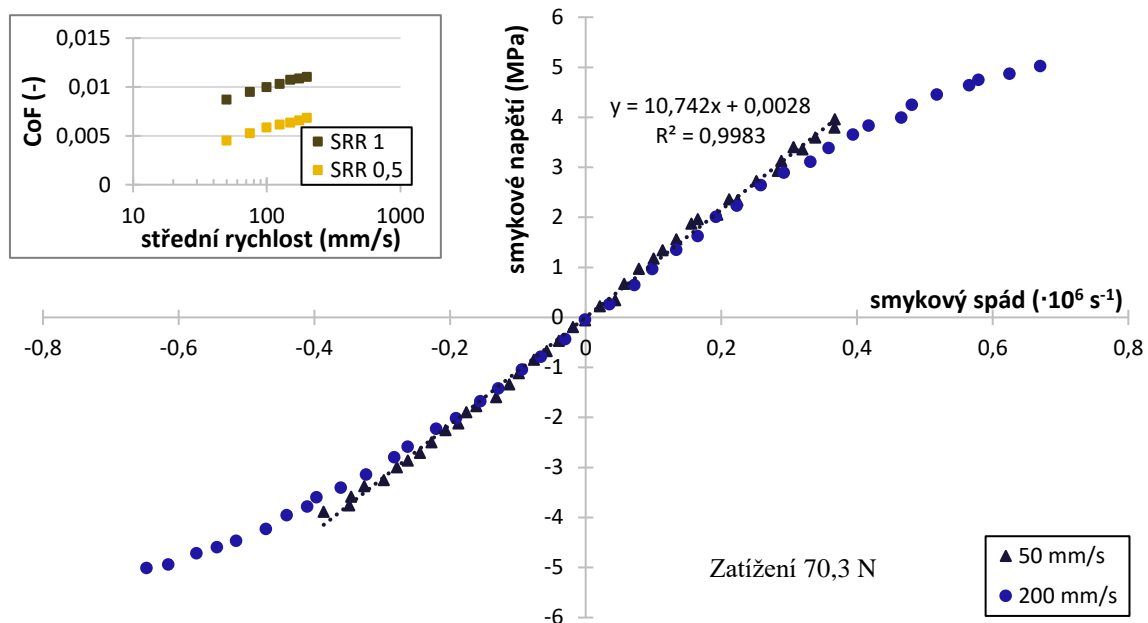
5.1.1 Čistý glycerol

Jako čistý byl považován glycerol s indexem lomu 1,471 (tabulkově odpovídá 98 hm. % glycerolu [62]). Pro zjištění vlivu hygroskopicity glycerolu na tření a tloušťku maziva byl proveden Stribeckův test čistého glycerolu při SRR 0 se 4 opakováními (viz obr. 5-1).



obr. 5-1 Stribeckův test pro čistý glycerol za SRR 0.

Následně byla z důvodu lepší představy o chování glycerolu jako kapaliny v kontaktu převedena naměřená data trakčních křivek pro různé rychlosti na tokovou křivku. Představu o vlivu skluzu na tření pak dokreslují žlutě znázorněná data ze Stribeckových testů (viz obr. 5-2). Zatížení bylo zachováno s předešlým testem.



obr. 5-2 Toková křivka pro čistý glycerol a Stribeckova data pro různá SRR.

5.1.2 Roztok glycerolu s vodou

Pro následující experimenty byl použit roztok složený z 80 obj. % glycerolu a vody. Přičemž bylo uvažováno, že glycerol již absorboval určité množství vody. Je známo, že množství vody ve směsi ovlivňuje řadu veličin, jako je například viskozita, index lomu nebo hustota [62]. Proto byl naměřen index lomu směsi ($n=1,449$), který odpovídá 84 hm. %.

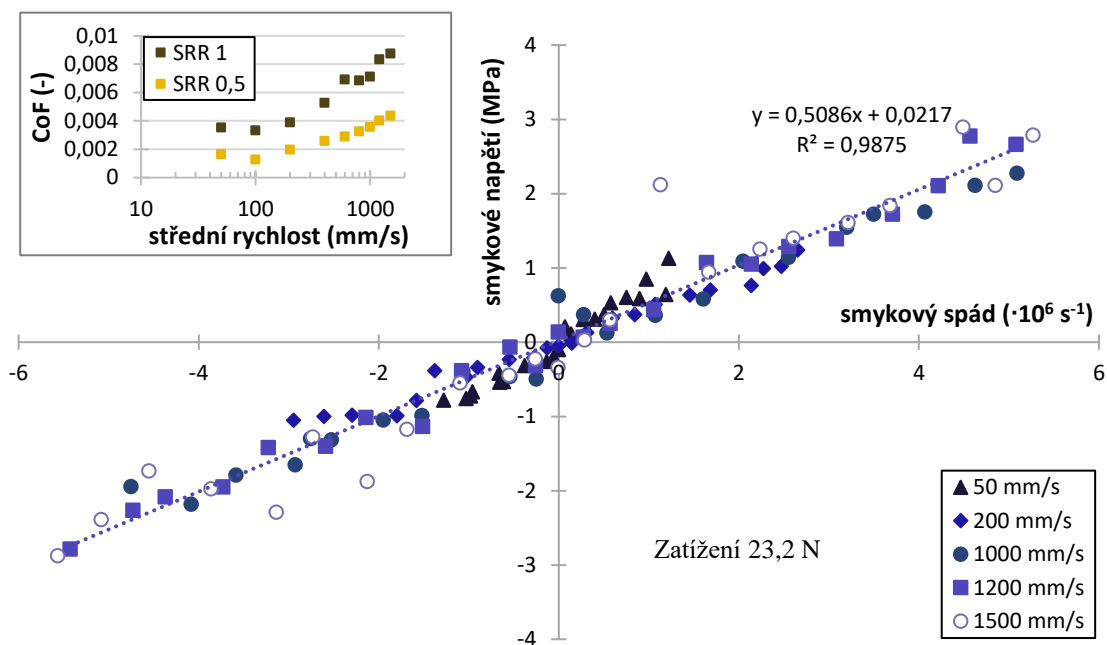
Vliv viskozity maziva na tření je ovlivňován také zatížením, a proto bylo provedeno měření na vysokotlakém viskozimetru. Z naměřených hodnot viskozity byl pomocí McEwenova a Roelandsova modelu [63] a nástroje citlivostní analýzy „Řešitel“ v programu MS Excel určen tlakově-viskózní součinitel α^* pro teploty od 30 °C do 70 °C (podrobně v příloze). Protože lepší spolehlivosti výsledků bylo dosaženo proložením pomocí McEwenova modelu, jsou dále uvažovány hodnoty dle tab. 5-1.

tab. 5-1 Tlakově viskózní součinitel pro směs glycerolu za různých teplot.

	30 °C	50 °C	70 °C
α_M^* (GPa ⁻¹)	3,545	2,903	2,576

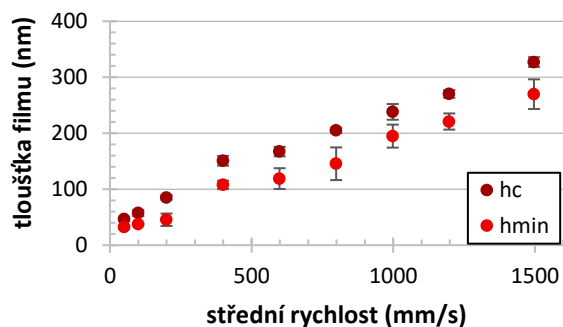
Provedené testy vykazovaly značně lineární podmíněnost tření na SRR. Ta se přenesla i do závislosti smykového napětí na smykovém spádu (obr. 5-3). Zatížení kuličky při testu dosahovalo 23,2 N. Data byla pro porovnání opět převedena do tokové křivky, kde lze při

nízké rychlosti pozorovat odklon od obvyklého chování maziva. Při nízkých rychlostech lze pak pozorovat i změny v trendu tření při měnění se střední rychlosti.



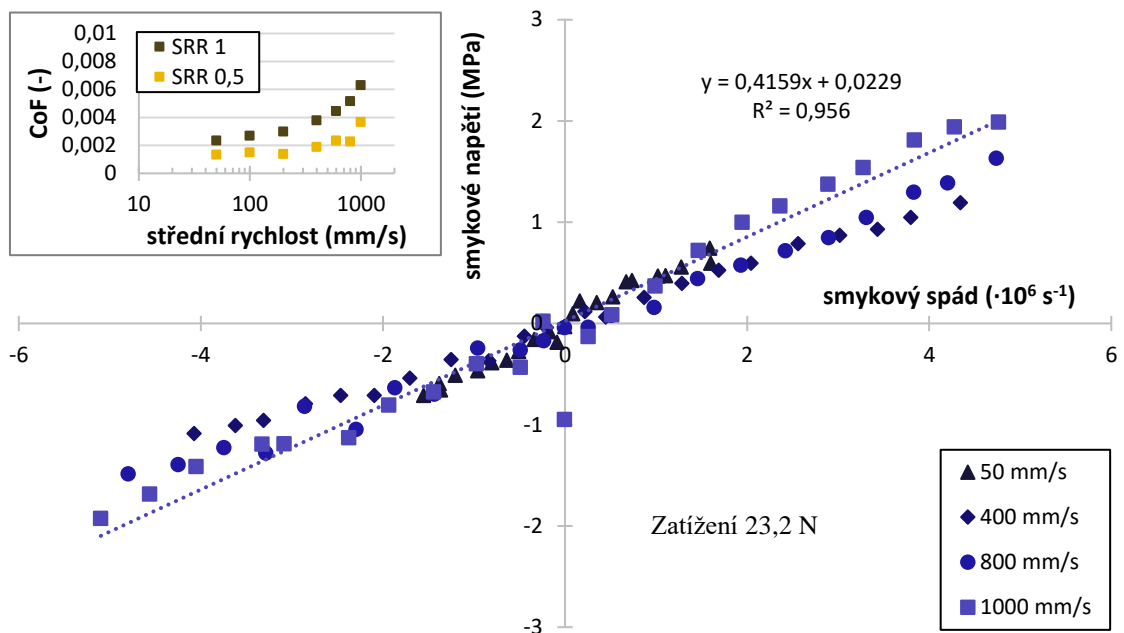
obr. 5-3 Toková křivka roztoku glycerolu a Stribeckova křivka pro různá SRR.

Pomocí optické interferometrie zkoumaná tloušťka mazacího filmu, která sloužila pro přepočítání SRR na smykový spád. (obr. 5-4)

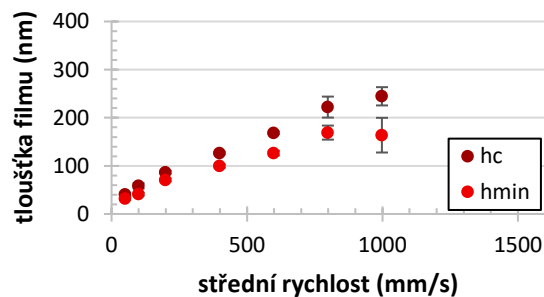


obr. 5-4 Tloušťka roztoku glycerolu v závislosti na střední rychlosti

Drsnost povrchů (S_a) před testem byla 5,8 nm. Při měření po testu pak hodnota dosahovala 4,7 nm. Vliv drsnosti a opakovatelnost měření byly následně ověřovány při dalším měření (obr. 5-5), kdy došlo ke změně tvaru Stribeckovy křivky, ale také ke změně strmosti tokové křivky, která indikuje změnu viskozity maziva. Zároveň byla zkoumána i velikost EHD filmu (obr. 5-6).

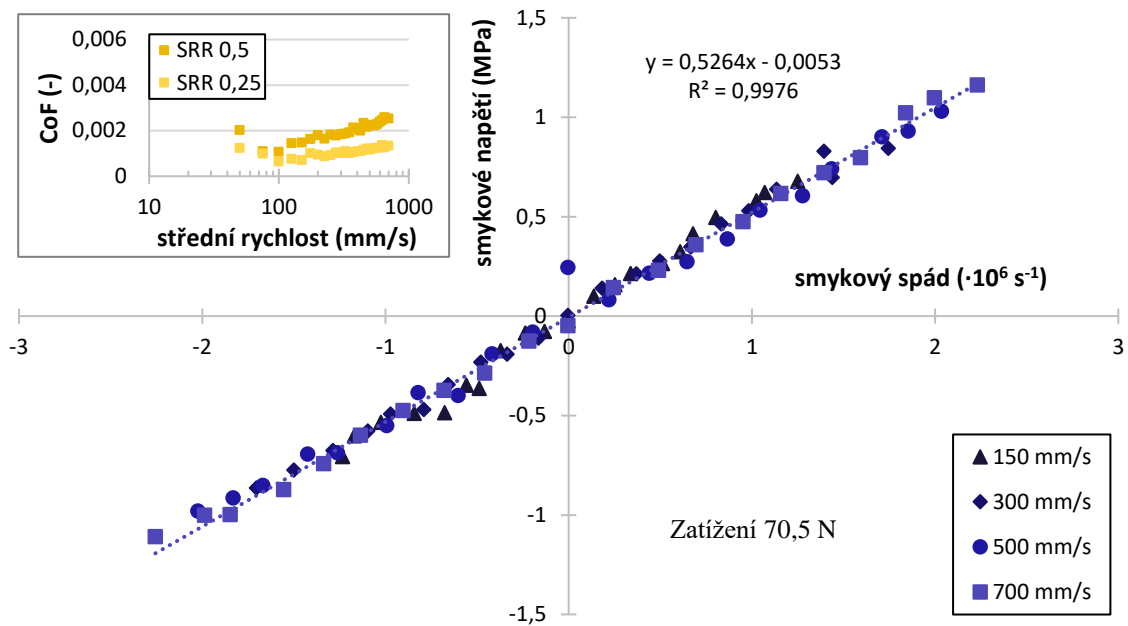


obr. 5-5 Toková křivka roztoku glycerolu a Stribeckova křivka při nižší drsnosti.

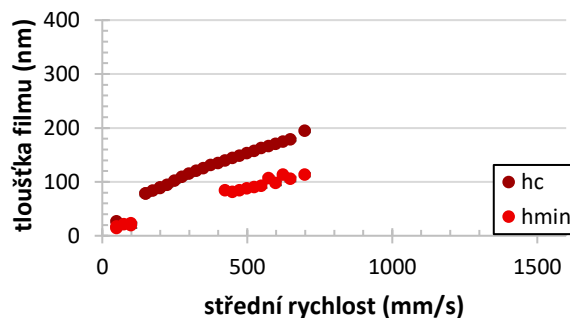


obr. 5-6 Tloušťka roztoku glycerolu v závislosti na střední rychlosti (opakované měření).

S ohledem na udržitelnost chromové vrstvy na disku byly předchozí testy provedeny při působení nízké hodnoty normálové síly. Nicméně z důvodu určení vlivu zatížení byla provedena i měření o vyšším zatížení (70,5 N). Zjištěné výsledky tření a odpovídající toková křivka jsou zobrazeny na obr. 5-7. Co se týče tloušťky mazacího filmu, tak bylo obtížné provést vyhodnocení kolem hodnoty 70 nm. Kvůli nízké důvěryhodnosti byly tyto tloušťky z grafu (viz obr. 5-8) odstraněny



obr. 5-7 Toková a Stribeckova křivka roztoku glycerolu při vyšším zatížení.

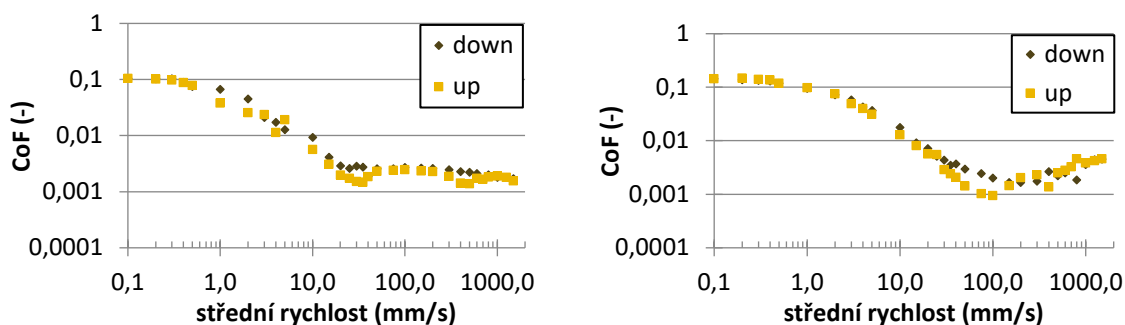


obr. 5-8 Tloušťka kontaktu mazaného roztokem glycerolu při vyšším zatížení.

Pro měření plných Stribeckových křivek (viz obr. 5-9) jdoucích až do oblasti mezného mazání bylo použito skleněného disku bez chromové vrstvy, aby tato nebyla během mezného a smíšeného mazání zbytečně znehodnocena. Zároveň byl tímto ověřen i vliv čistého skla na tření.

Měření byla provedena při zatížení 74,05 N tak, že bylo z rychlosti 1500 mm/s postupně zpomalováno až na 0,1 mm/s a poté bylo opět zrychlováno zpět na počáteční hodnotu (v grafech značeno jako „up“ a „down“). V prvním grafu (SRR 0,5) nelze vidět zřetelnou přechodovou oblast mezi smíšeným a EHD mazáním. Podobných výsledků bylo dosaženo i u nižších kladných skluzových poměrů. Naopak později provedená měření pro záporné skluzu (graf vlevo SRR -0,5) obsahovali již zřetelný přechod mezi režimy ML a EHL.

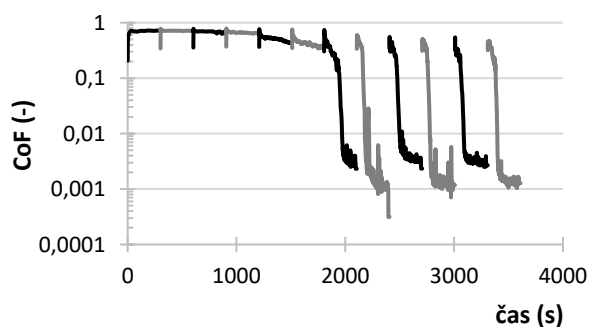
Z pravého grafu pro záporný skluz (SRR -0,5) lze vidět, že přechod mezi EHL a ML režimem se pohybuje kolem 100 mm/s, což platilo i pro kladný skluz. Lze si povšimnout, že minimální tření (tedy i hranice mezi ML a EHL) se při zpomalujícím chodu nacházelo spíše ve stovkách mm/s, kdežto při zrychlujícím chodu se více blížilo desítkám mm/s.



obr. 5-9 Stribeckovy křivky pro SRR 0,5 (vlevo) a pro SRR -0,5 (vpravo).

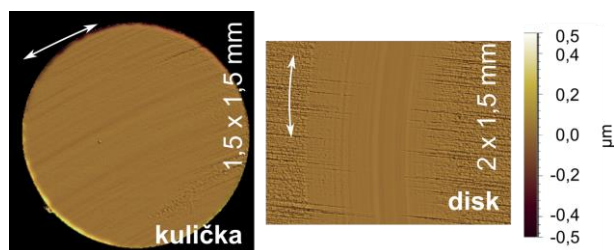
5.2 Voda, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$

Pro lepší představě o formování záběhu a o snižování tření byly nejprve testy provedeny na zařízení UMT Bruker, který má kuličku pevně uchycenou, díky čemuž dochází k čistému skluzu (SRR 2). V grafu (obr. 5-10) jsou měření barevně rozdělena podle smyslu rotace, který byl vždy po 5 minutách změněn. Pro rychlé zformování záběhu bylo použito postupného zvyšování rychlostí z 30 mm/s (prvních 10 minut) na 60 mm/s (dalších 10 minut) a poté na konečných 120 mm/s. Tato rychlost byla s výjimkou zrychlení a zpomalení na začátku a na konci cyklu dodržena po zbytek testu. Daný víceetapový záběh přibližně odpovídá literatuře [35]. Zatížení 10,6 N odpovídalo výsledným maximálním kontaktním tlakem (1329,7 MPa) podmínkám objevujícím se v literatuře spíše ojediněle, kdy obvyklé zatížení dává kontaktní tlak i přes 2 GPa. Naproti tomu se jedná o kompromis mezi těmito hodnotami a možnostmi optického tribometru s označením EHD5, který byl zvolen z důvodu alespoň částečné porovnatelnosti.



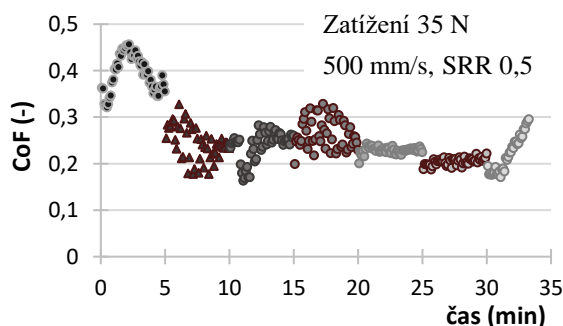
obr. 5-10 Časový test (UMT Bruker).

Na konci testu bylo provedeno hodnocení změny povrchu, kdy počáteční drsnost (S_a) disku 30,8 nm byla snížena na 5,9 nm a v případě kuličky, kde došlo k vyrovnání zakřivení byla drsnost z původních 3,0 nm navýšena na 5,8 nm. Vzhled kontaktních povrchů po testu je znázorněn na obr. 5-11.



obr. 5-11 Topografie povrchů po záběhu ve vodě.

První test provedený za částečného skluzu, kdy výsledky za těchto podmínek nejsou v literatuře dostupné (obr. 5-12), byl proveden při zatížení 35 N, střední rychlosti 500 mm/s a SRR 0,5. Test byl prováděn přerušovaně vždy po dobu 5 minut, tak, aby byla zaručena dodávka vody. Voda zde byla aplikována injekčně přímo do kontaktu mezi rotující kuličkou a disk, jak bude dále podrobněji popsáno. Nicméně bylo dávkování během posledního 5minutového úseku sníženo, což se projevilo na průběhu tření.



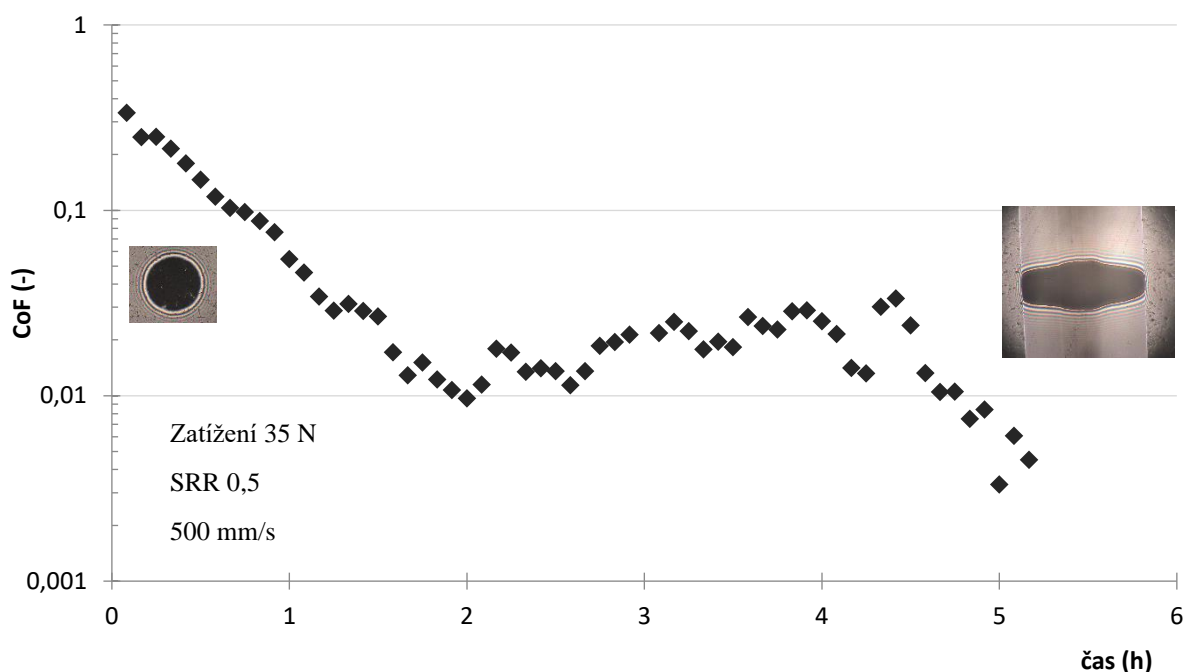
obr. 5-12 Krátkodobý časový test (EHD5).

Následný experiment byl pro dosažení nízkého tření delší. Na počátku tohoto testu byl použit pro pozorování kontaktu skleněný disk, který byl poté vyměněn za keramický. Při jeho chodu (i chodu předchozím) bylo přímo do kontaktu během 5 minut aplikováno 20 ml destilované vody pomocí injekční stříkačky, aplikátoru NE-1000 od New Era Pump Systems, Inc., hadičky a jehly. Po každých 5 minutách bylo navíc provedeno ještě kalibrační měření trvající celkem 50 s v zatíženém stavu, které umožňovalo správné odečtení hodnoty součinitele tření. Po tomto testu byla voda ze zásobníku odsáta, kdy bylo vypořádáno, že 20 ml vody v zásobníku je množství, které tření nijak neovlivňuje a není tak třeba vodu odsávat v průběhu 5minutového testování. Při testování s částečně zaplavenou kuličkou by mohlo docházet ke kontaminaci vody, což by měla pravděpodobně vliv na tření.

V obou testech (obr. 5-12 i obr. 5-13) byla naměřena hodnota vždy po 6 s, což během 5 minut dělá 50 hodnot. V druhém případě byla tato 5minutová měření pro zanesení do grafu zprůměrována.

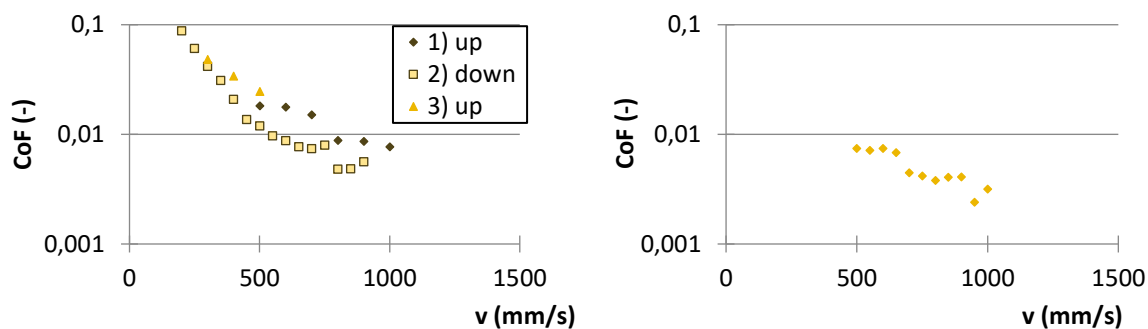
Po 2 hodinách a 40 minutách bylo, rozhodnuto, že již by měl být zásobník maziva dostatečně pročištěn a mohlo by se dále používat vody odsáté ze zásobníku v předchozích 2 měřeních. Po 210 minutách (3,5 hod.) záběhu bylo provedeno měření závislosti tření na rychlosti při SRR 0,5. Nejprve bylo zrychlováno na střední rychlost 1000 mm/s, poté bylo zpomalováno až na 200 mm/s a nakonec bylo opět zrychleno na původní hodnotu.

Následně bylo v časovém testu pokračováno stejným způsobem až do 4. hodiny záběhu, od které byla opět znovu používána čistá destilovaná voda. Po 15 minutách ale nedopatřením zůstala voda v zásobníku neodsátá, což mělo vliv na prudké navýšení tření (z asi 0,011 na asi 0,031). Dále provedená měření nicméně zopakovaly přerušené snižování tření.



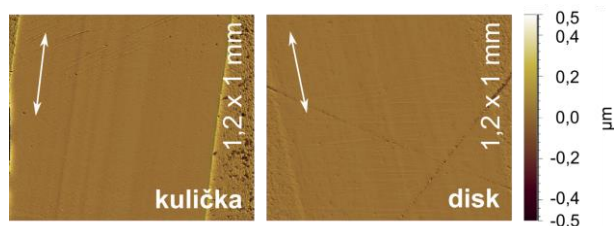
obr. 5-13 Dlouhodobý časový test (EHD5).

Na konci měřeného časového testu (v posledních měřeních 5 minutách) mělo tření stále snižující se tendenci a jeho průměrná hodnota činila $0,0045 \pm 0,0012$. Po ukončení tohoto experimentu byl opět proveden test Stribeckův. Tentokrát byl ale zkrácený pouze na vyšší rychlosti, aby nebyl poškozen povrch kontaktních těles a mohl být použit při následném hodnocení topografie.



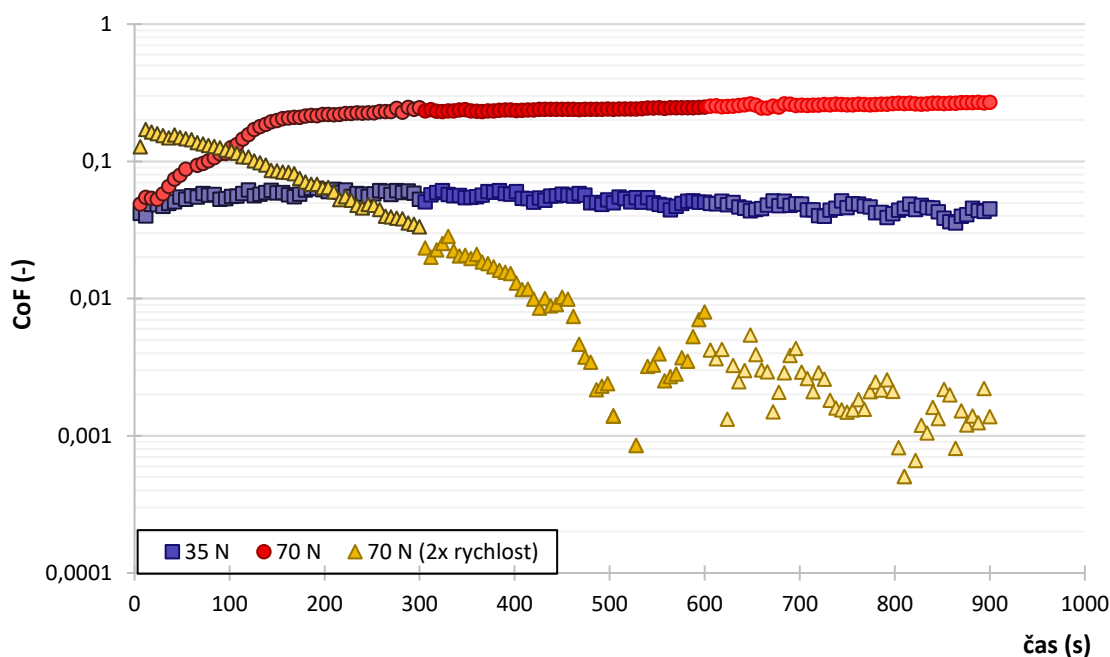
obr. 5-14 Stribeckův test po 3,5 hod. (vlevo) a na konci časového testu (vpravo).

Po testu byl keramický disk vyměněn za skleněný a byl pořízen snímek statického kontaktu, který znázorňuje změnu tvaru a plochy kontaktní oblasti a změnu jejího tvaru a vyhlazení kontaktní plochy. Velikost snímku kontaktu po záběhu (obr. 5-13 vlevo) má 2krát menší zvětšení než primární snímek (obr. 5-13 vpravo), proto je jeho velikost dvojnásobná. Záběh ovlivnil nejen tvar kontaktní oblasti, ale i jeho drsnost (S_a), která se v případě kuličky na počátku testu pohybovala kolem 10 nm a po provedeném záběhu došlo ke snížení na hodnotu $4,8 \pm 1,6$ nm. Redukce drsnosti v případě disku byla o něco vyšší, kdy původní povrch (13,1 nm) byl vyleštěn až na $3,7 \pm 0,2$ nm. Topografie povrchů po záběhu je na obr. 5-15.



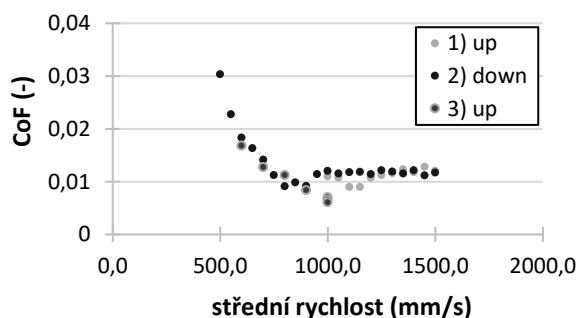
obr. 5-15 Kontaktní povrchy po 5hodinovém testu.

Pro představu o vlivu zatížení a velikosti střední rychlosti na záběh byl proveden následující test, kdy byla použita již zaběhlá kulička a nezaběhlý disk. Testy byly provedeny po dobu 15 minut, kdy dodávka vody probíhala stejným způsobem po 5minutových intervalech jako při minulém experimentu. Tyto intervaly jsou na obr. 5-16 graficky odlišeny. Nejprve byl kontakt zatížen normálovou silou o velikosti 35 N, následně bylo zatížení zvýšeno na dvojnásobek. Oba testy byly přitom provedeny za SRR 0,5 a při střední rychlosti 500 mm/s. Poslední test byl proveden za dvojnásobně zvýšené rychlosti (1000 mm/s) při zatížení 70 N.



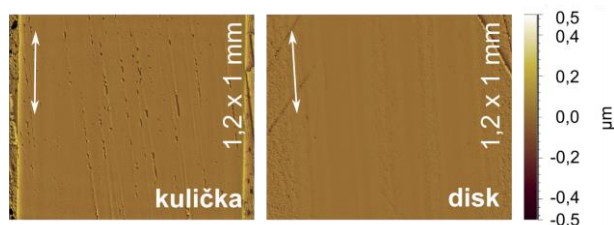
obr. 5-16 Časový test vodou mazaného kontaktu za různých zatěžovacích podmínek.

Snížení tření při posledním kroku tohoto experimentu bylo dosti podstatné, a proto byl proveden ještě Stribeckův test (obr. 5-17). Zatížení 70 N a počáteční střední rychlost 1000 mm/s odpovídala poslednímu kroku předcházejícího experimentu, kdy nejprve bylo zrychlováno na 1500 mm/s a poté zpomalováno na 500 mm/s, kdy přibližně od 750 mm/s bylo možná pozorovat navyšování tření se snižující rychlostí. Nakonec bylo opět zrychleno na počáteční hodnotu 1000 mm/s, při které bylo provedeno měření 3krát. Lze vidět, že při zrychlování došlo ke snižování tření, které bylo možné pozorovat i v rámci opakovaného měření poslední hodnoty.



obr. 5-17 Stribeckův test při zatížení 70 N.

Po ukončení předchozího experimentu byly na optickém profilometru vyhodnoceny změny v průběhu experimentu, kdy kulička (po minulém experimentu $S_a = 4,8$ nm) zvýšila svoji drsnost na 5,4 nm a u disku došlo k jejímu snížení na $4,1 \pm 0,7$ nm. Změny oproti minulému experimentu lze hodnotit pomocí obr. 5-18.



obr. 5-18 Kontaktní povrchy po 2. časovém záběhu.

5.3 Vodný roztok PEG200, Si₃N₄/sklo

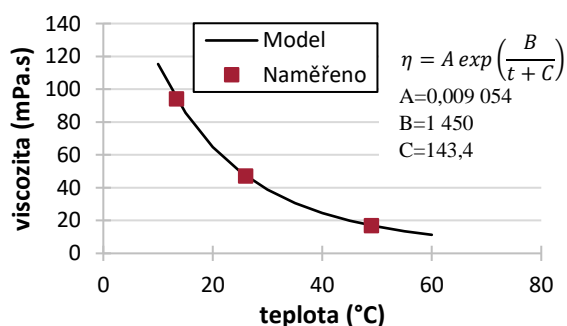
5.3.1 PEG200 (100 %)

Pro zjištění vlivu tlaku na viskozitu maziva v kontaktu bylo provedeno měření na vysokotlakém viskozimetru a z hodnot byl zjištěn tlakově-viskózní součinitel dle McEwenova vztahu, který je pro jednotlivé teploty uveden v tab. 5-2.

tab. 5-2 Tlakově viskózní součinitel pro PEG200.

	30 °C	50 °C	70 °C
α_M^* (GPa ⁻¹)	7,843	6,520	5,759

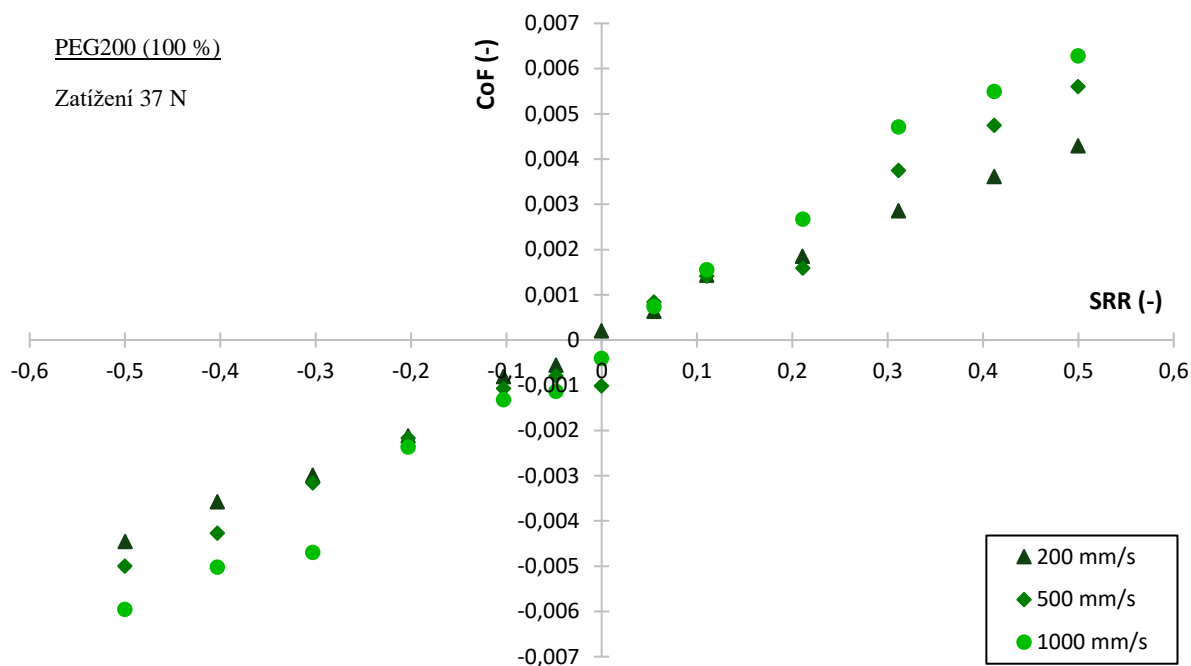
Vzhledem ke značné teplotní závislosti byla viskozita maziva proměřena také na rotačním viskozimetru, kdy byly naměřené hodnoty proloženy křivkou dle Vogelova vztahu [64]. Výsledná závislost je zobrazena obr. 5-19.



obr. 5-19 Závislost viskozity na teplotě pro PEG200.

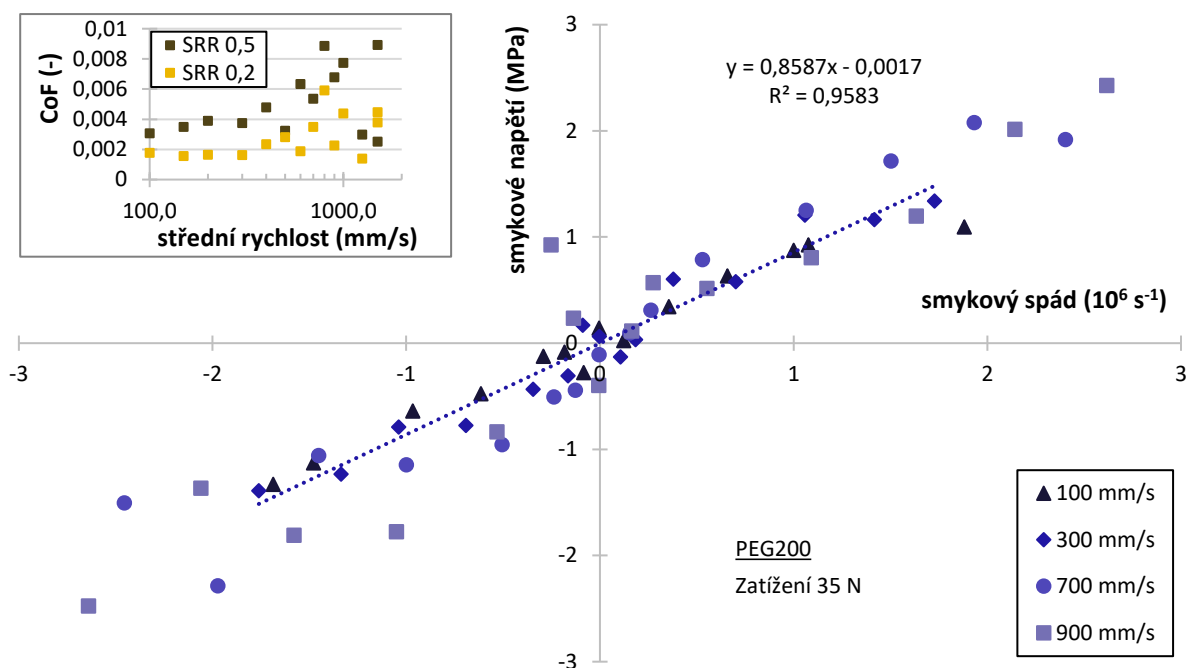
Trakční křivka byla naměřena při různých rychlostech při zatížení 37 N. Aby byla dobře vidět změna ve stoupání směrnic pro různé rychlosti, byly vybrány 3 rychlosti, pro které jsou naměřené hodnoty zobrazeny na obr. 5-20. Toto měření bylo provedeno v kontaktu

keramické kuličky přímo se skleněným diskem bez povlaku chromu. Nebylo tak zamezeno případné tribochemické interakci mezi sklem a mazivem.



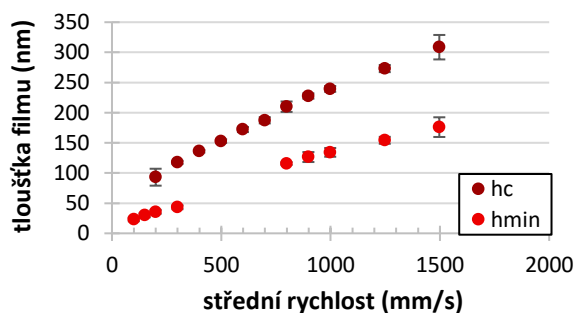
obr. 5-20 Trakční křivka čistého PEG200 pro různé rychlosti.

Následně provedené měření s diskem s chromovou vrstvou a přibližně stejným zatížením (35 N) bylo přepočteno na tokovou křivku (obr. 5-21), kdy hodnota viskozity v kontaktu určená ze směrnice hodnot (858,7 mPas) relativně dobře odpovídá viskozitě, kterou je možné získat ze zjištěných hodnot závislosti viskozity na tlaku (viz tab. 5-2). Teplota, která v modelu závislosti viskozity na tlaku/teplotě odpovídá danému zatížení je 26 °C, což odpovídá teplotě v laboratoři.



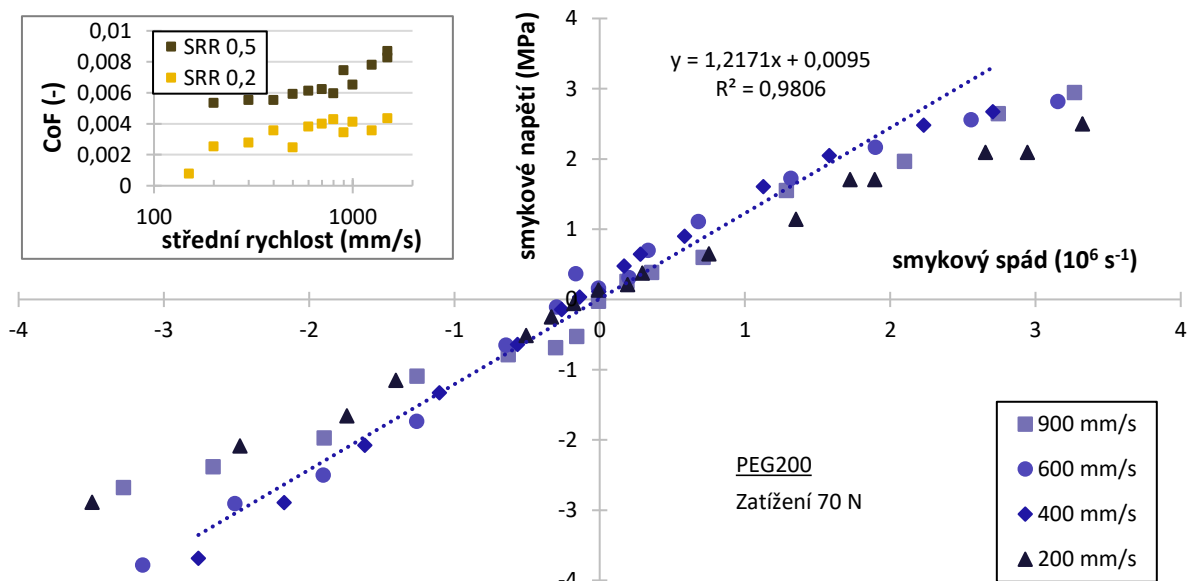
obr. 5-21 Toková a Stribeckova křivka pro PEG200.

Hodnoty tloušťky maziva byly při tloušťkách mezi 50 a 100 nm obtížně vyhodnotitelné. Zjištěné průměrné hodnoty neodpovídaly trendu a jejich směrodatná odchylka se značně navýšila oproti zbylým hodnotám. Lze to přikládat měřicí metodě, kalibraci nebo použitým materiálům. Proto byly v grafu (obr. 5-22) použity pouze data spadající mimo uvedené hodnoty.



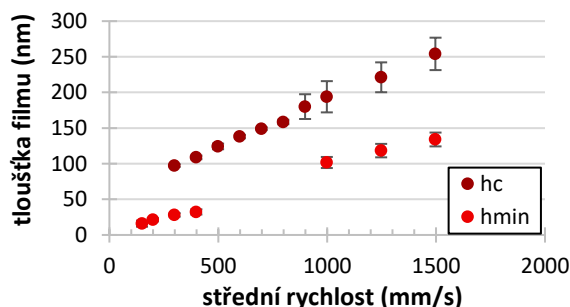
obr. 5-22 Centrální a minimální tloušťka filmu.

Vliv vyššího zatížení na tření, a viskozitu pomocí Stribeckovy a tokové křivky lze pozorovat z naměřených hodnot na obr. 5-23. Hodnota viskozity dané modelem plynoucím z naměřených hodnot a viskozity, kterou je možné odečíst z tokové křivky se v tomto případě mírně liší. Shoda nastává až v případě, kdy je v modelu počítáno s teplotou $28,2 \text{ }^\circ\text{C}$, což je mírně vyšší teplota, než která byla v laboratoři běžně měřena.



obr. 5-23 Toková a Stribeckova křivka pro vyšší zatížení kontaktu mazaného PEG200.

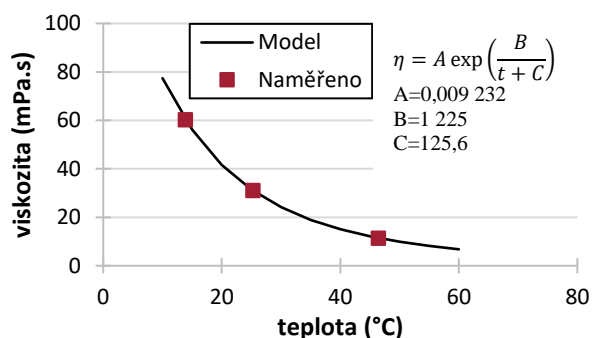
Velikost tloušťky mazacího filmu mezi kontaktními tělesy při vyšším zatížení je mírně nižší než v případě obr. 5-24. Oblast obtížně vyhodnotitelné tloušťky maziva zůstala nicméně stejná, čemuž odpovídají i hodnoty použité v grafu níže.



obr. 5-24 Centrální a minimální tloušťka filmu pro dvojnásobné zatížení.

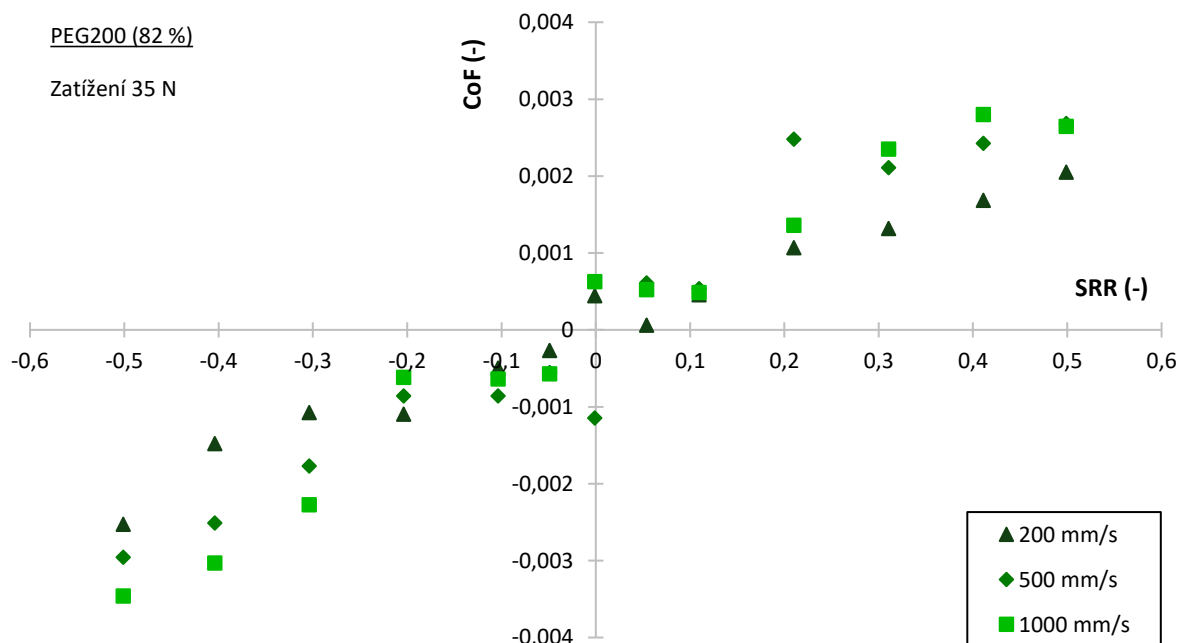
5.3.2 PEG200 (82 %)

Stejně jako u čistého PEG200 i u jeho roztoku s 18 obj. % vody je závislost viskozity na teplotě výrazná. Celkově je ale viskozita významně menší. Data naměřená na rotačním viskozimetru (obr. 5-25) byla opět proložena modelem dle Vogelova vzorce [64].



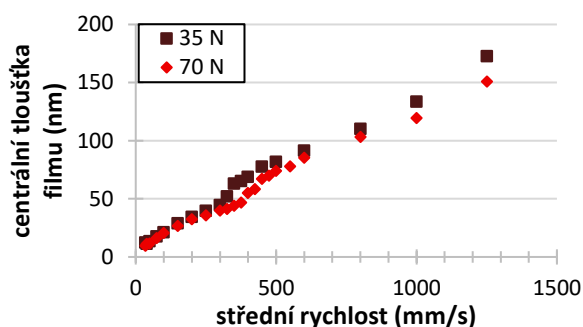
obr. 5-25 Závislost viskozity na teplotě pro PEG200 (82 %).

S přidáním množstvím vody lze pozorovat snížení směrnice dat v trakční přímce (viz obr. 5-26). Pro zobrazené rychlosti, kdy jsou kontakty plně odděleny mazivem platí také lineární závislost tření (smykového napětí) na smykové rychlosti (spádu).



obr. 5-26 Trakční křivka vodného roztoku PEG200 (82 %) pro různé rychlosti.

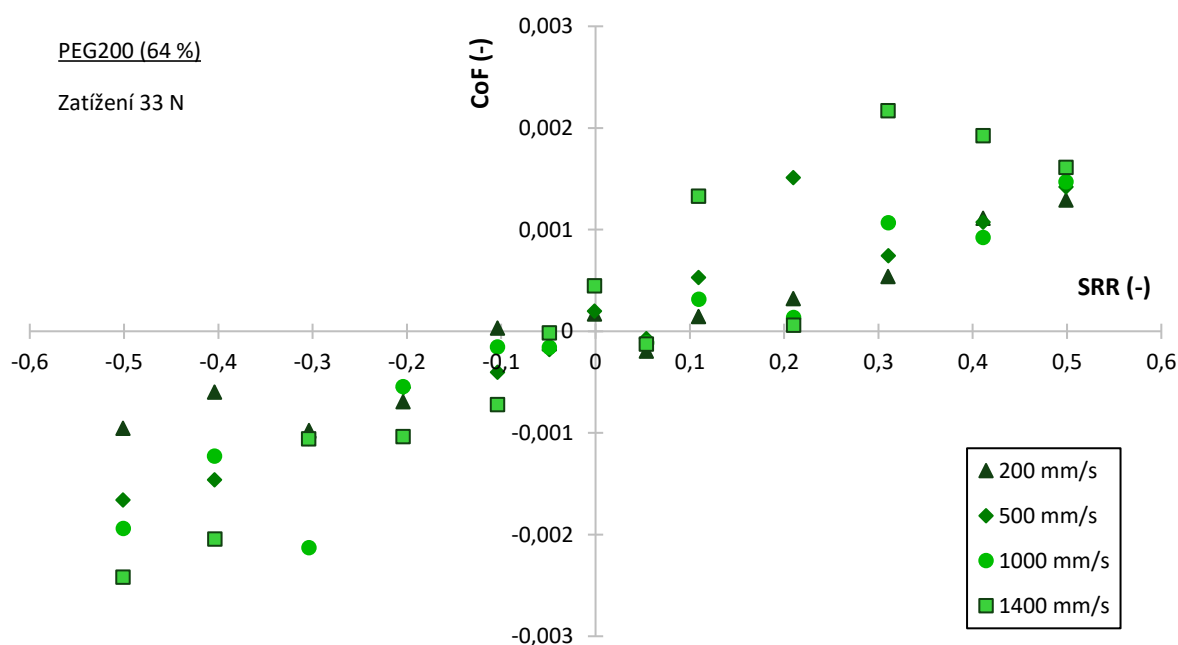
Při použití skleněného disku s vrstvou chromu s nižší odrazivostí bylo možné lépe vyhodnotit tloušťku mazacího filmu, kdy na obr. 5-27 je zobrazeno porovnání pro 2 různá zatížení, kdy lze vidět snížení centrální tloušťky maziva. Mezi 45 a 70 nm tloušťky však data nadále neodpovídají teoreticky očekávanému mocinnému trendu s konstantními parametry.



obr. 5-27 Vliv zatížení a rychlosti na centrální tloušťku mazacího filmu.

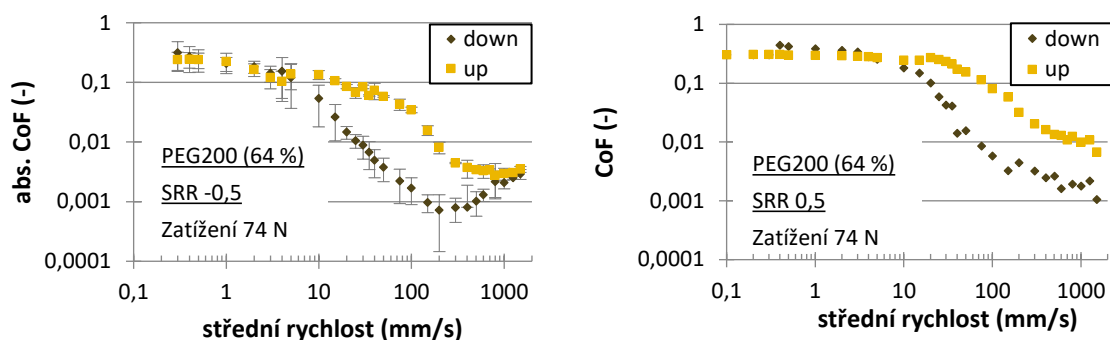
5.3.3 PEG200 (64 %)

Se zvýšeným množstvím vody lze pozorovat další snížení směrnice závislosti tření na skluzu. Pro rozdílné střední rychlosti lze ale z důvodu vysokého rozptylu dat celkem obtížně pozorovat snižování tření se snižující rychlostí. Při velkém rozdílu rychlostí, například při 200 mm/s a při 1400 mm/s, jak je uvedeno níže (obr. 5-28) lze nicméně stále snižující trend tření pozorovat.



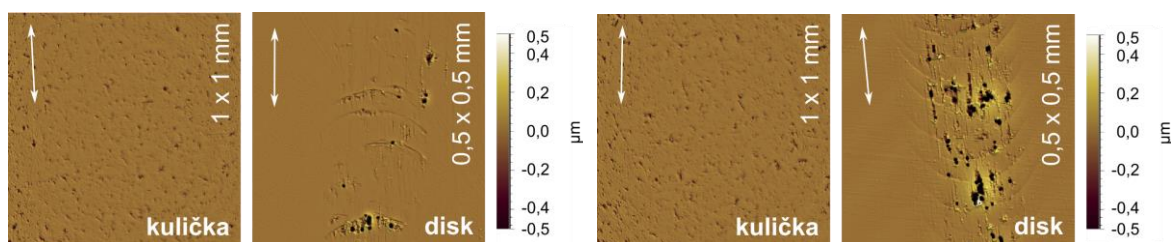
obr. 5-28 Trakční křivka vodného roztoku PEG200 (64 %) pro různé rychlosti.

Pro záporné SRR (kulička je rychlejší než disk) platí, že při měření plné Stribeckovy křivky (obr. 5-29) docházelo snižováním střední rychlosti („down“) k pozvolnějšimu nárůstu tření, než to je možné pozorovat při jejím opětovném navyšování, kdy při 2 opakováních bylo konečné tření vždy přibližně rovné tomu na počátku experimentu. Kladné SRR vykazuje podobné chování, ale tření na konci experimentu nedosáhne hodnoty na jejím počátku.



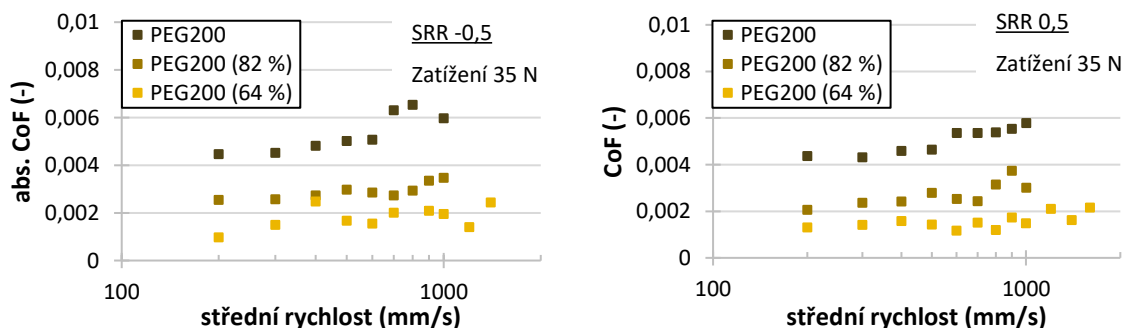
obr. 5-29 Plná Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) za záporného (vlevo) a kladného (vpravo) SRR.

K pochopení rozdílného chování za opačného SRR bylo provedeno hodnocení topografie povrchu (obr. 5-30), kdy mezi povrchem kuličky u obou testů nebyly zjištěny žádné podstatné rozdíly. Povrchy byly v obou případech prakticky shodné se stavem na počátku experimentu a jejich drsnost (S_a) měla hodnotu kolem 10 nm. U skleněného disku již ale rozdíly pozorovat lze (viz obr. 5-28). V případě SRR 0,5 došlo na povrchu k velmi výrazným změnám, kdy oproti drsnosti 0,7 nm na počátku byl zjištěn nárůst na průměrných 115, 6 nm. Během měření za SRR -0,5 pak došlo k nárůstu na průměrných 12,9 nm.



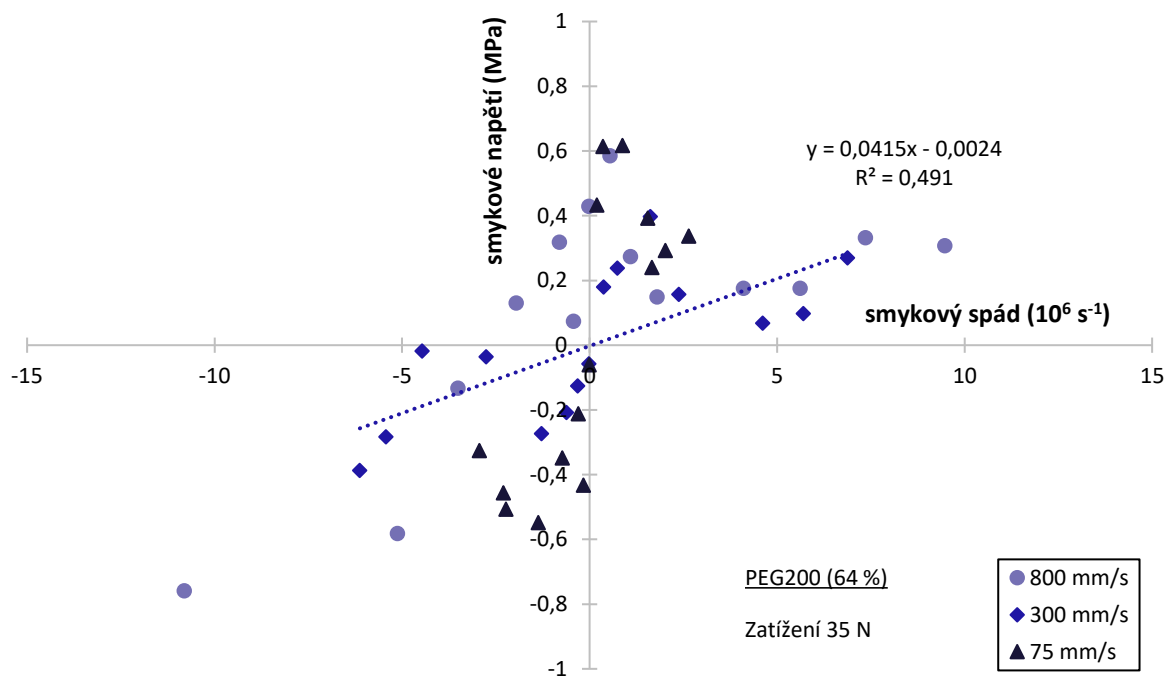
obr. 5-30 Povrchy kontaktních těles po měření Stribeckovy křivky za SRR -0,5 (vlevo) a SRR 0,5 (vpravo).

Vliv přidané vody na tření lze hodnotit z následujících neúplných Stribeckových křivek, kdy se zvýšeným množstvím vody klesá součinitel tření a také nárůst tření s rychlostí. Pro kladné i záporné SRR lze přitom za daných rychlostních podmínek pozorovat přibližně stejné hodnoty tření (obr. 5-31).



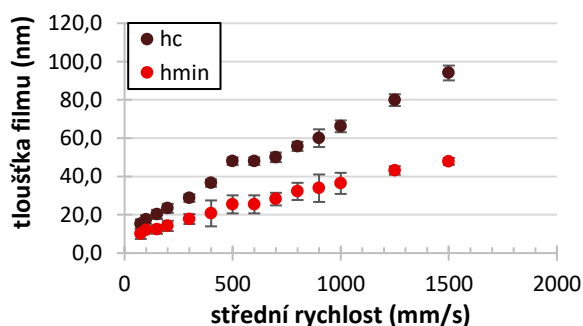
obr. 5-31 Stribeckovy křivky porovnávající vliv přidané vody na tření.

Přidání většího množství vody (v tomto případě 36 obj. %) výrazně snižuje viskozitu maziva v kontaktu. Kdy z následující tokové křivky lze odečíst viskozitu o velikosti 41,5 mPas. Při nízkých rychlostech (na obr. 5-32 se jedná o hodnotu 75 mm/s) lze pak pozorovat odlišné chování, které lze přičíst nízké tloušťce maziva, a tudíž přechodu do smíšeného mazání.



obr. 5-32 Toková křivka pro vodný roztok PEG200 (64 %).

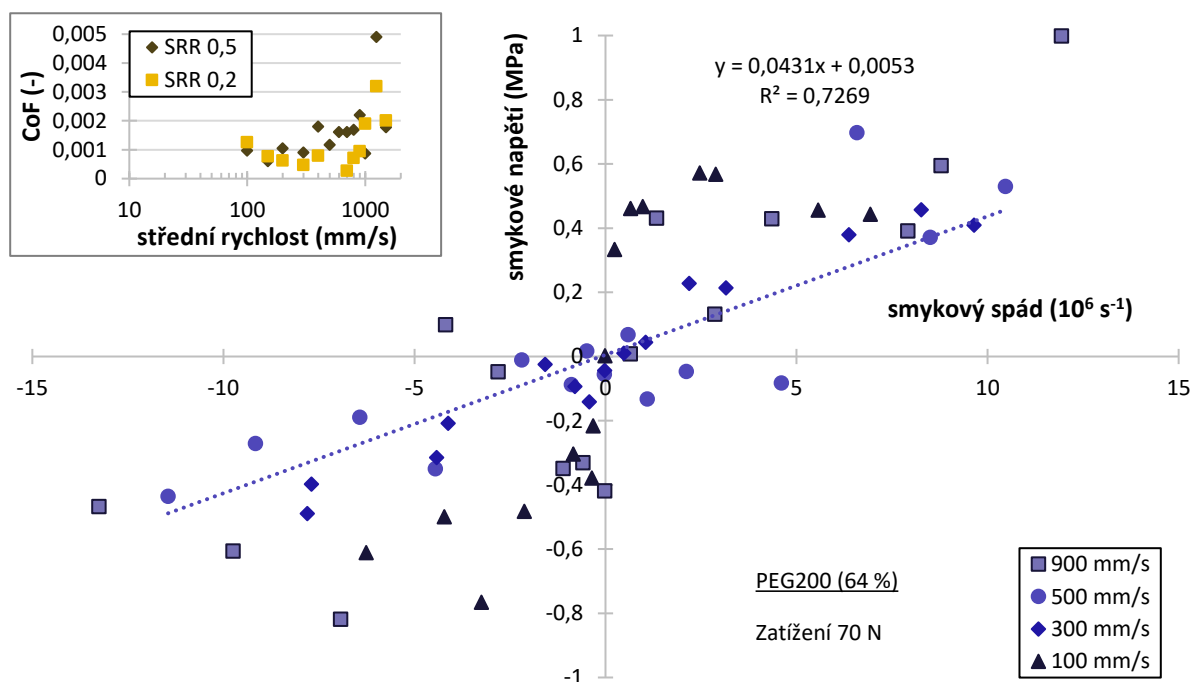
Pomocí naměřené tloušťky maziva mezi kontakty (obr. 5-33) lze v naměřených datech vidět vliv změny režimu mazání. Minimální tloušťka mazacího filmu při 75 mm/s je například rovna asi 10 nm. V oblasti centrálních tlouštěk kolem 50 nm lze opět vidět mírný odklon hodnot oproti celkovému trendu, nicméně obdobné chování lze vidět i u hodnot minimální tloušťky maziva.



obr. 5-33 Vliv střední rychlosti na tloušťku filmu pro PEG200 (64 %).

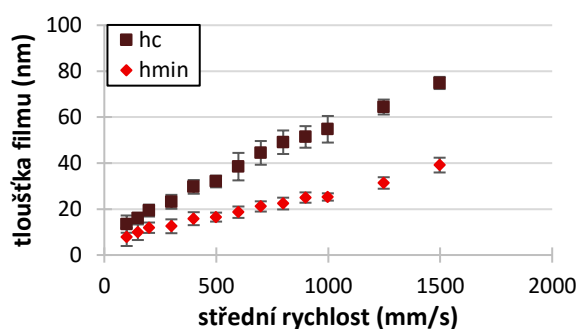
Při vyšším zatížení lze v tokové křivce pozorovat menší rozptýlení hodnot. Pro 100 mm/s lze pozorovat výrazně odlišné uspořádání dat (viz obr. 5-34), které lze spolu s hodnotami ze

Stribeckovy křivky přisuzovat počátku smíšeného mazání. Je poměrně dobře patrné, že rozptyl hodnot třecího součinitele v závislosti na střední rychlosti je značný. Přesto je ale stále patrný i vliv SRR, kdy jeho snížení znamená i snížení tření v kontaktu.



obr. 5-34 Toková a Stribeckova křivka pro dvojnásobně zatížený kontakt mazaný roztokem PEG200 (64 %).

Navýšení normálové síly má značný vliv na tloušťku mazacího filmu (obr. 5-35), kdy jeho velikost poklesla. V grafu je vidět výrazný rozdíl centrální a minimální tloušťky filmu.

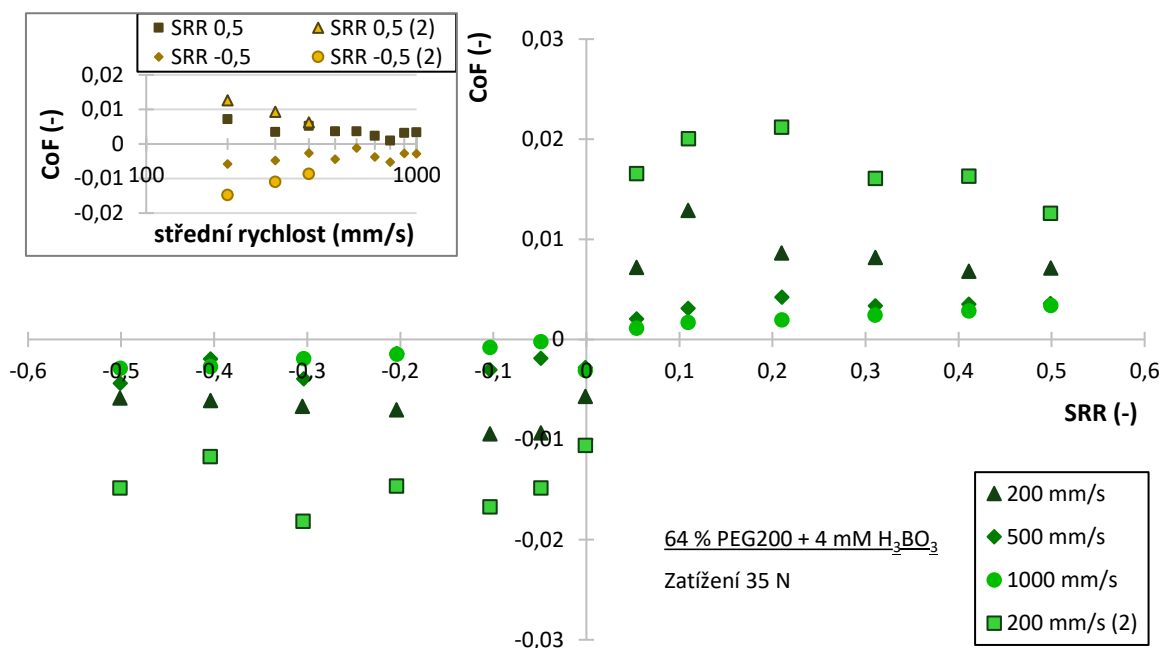


obr. 5-35 Vliv rychlosti na tloušťku filmu pro PEG200 (64 %) při vyšším zatížení.

5.3.4 PEG200 (64 %) + H₃BO₃ (4 mM)

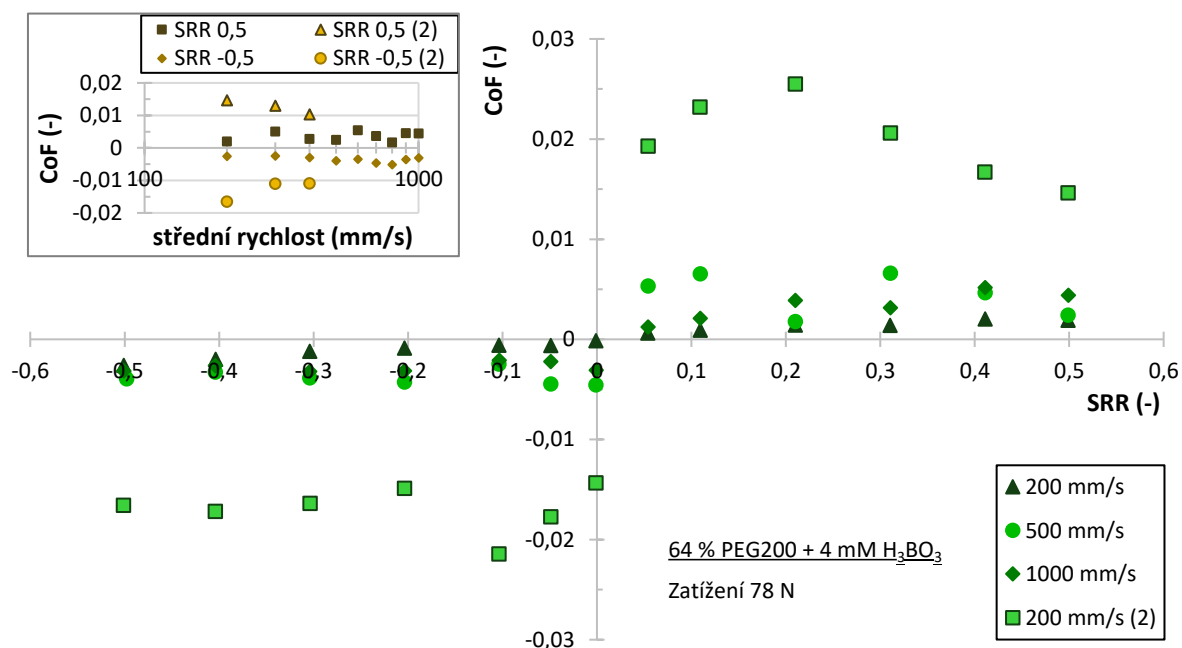
Vliv kyseliny borité o molární koncentraci 4 mM na tření byl ověřen následujícími experimenty. Při měření byly postupně navyšovány střední rychlosti od 200 do 1000 mm/s. a poté byla ještě provedena měření pro 400, 300 a 200 mm/s. Hodnoty druhých měření jsou na obr. 5-36 označeny odpovídajícím způsobem. Lze přitom pozorovat nárůst tření

u podruhé naměřených hodnot, což odpovídá zvýšenému vlivu přímého styku kontaktů a mezného tření.



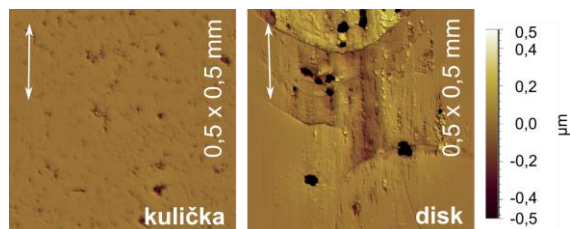
obr. 5-36 Trakční a Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) s přidavkem kyseliny borité (4mM).

Při vyšším zatížení lze pozorovat výraznější změnu ve tření mezi prvním a druhým měřením. Naměřené hodnoty v grafech (obr. 5-36 a obr. 5-37) zobrazujících trakční křivky není možné s dostatečnou přesností korelace proložit přímkou, protože již neobsahují pouze vliv viskozity, ale také vliv vzájemného působení kontaktů.



obr. 5-37 Trakční a Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) s přidavkem kyseliny borité (4mM) za zvýšeného zatížení.

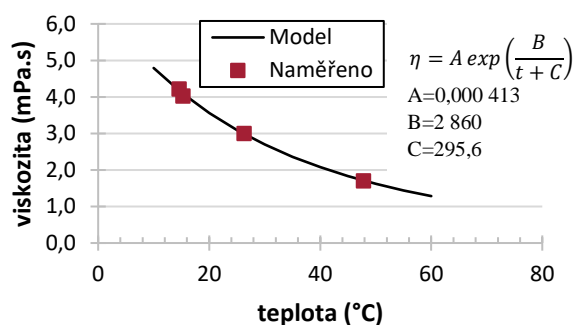
Navýšení tření při opakování podmínek na počátku experimentu lze dávat do souvislosti se změnou drsnosti (S_a) skleněného disku (viz obr. 5-38), která se z běžných 0,7 nm změnila na konci experimentu na 35,7 nm. Změny na povrchu kuličky nebyly pozorovány (9,1 nm).



obr. 5-38 Povrchy kontaktních těles po experimentech při 78 N.

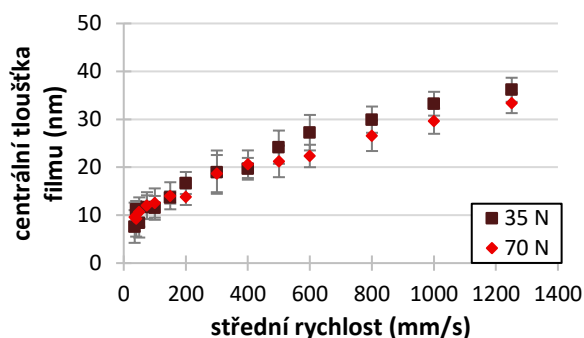
5.3.5 B-PEG200 (aq)

Měření viskozity (obr. 5-39) na rotačním viskozimetru byly zjištěny hodnoty, nežší než u PEG200 (100 %) a PEG200 (82 %). Mazivo bylo měřeno také na vysokotlakém pádovém viskozimetru, nicméně velice nízká viskozita zapříčinila velmi rychlou změnu polohy pádového tělíska, v důsledku čehož bylo obtížné výsledky vyhodnotit. Lze však říci, že oproti čistému PEG200 je hodnota tlakově viskózního součinitele o řád nižší. Výsledná hodnota pH směsi je $5,22 \pm 0,17$.



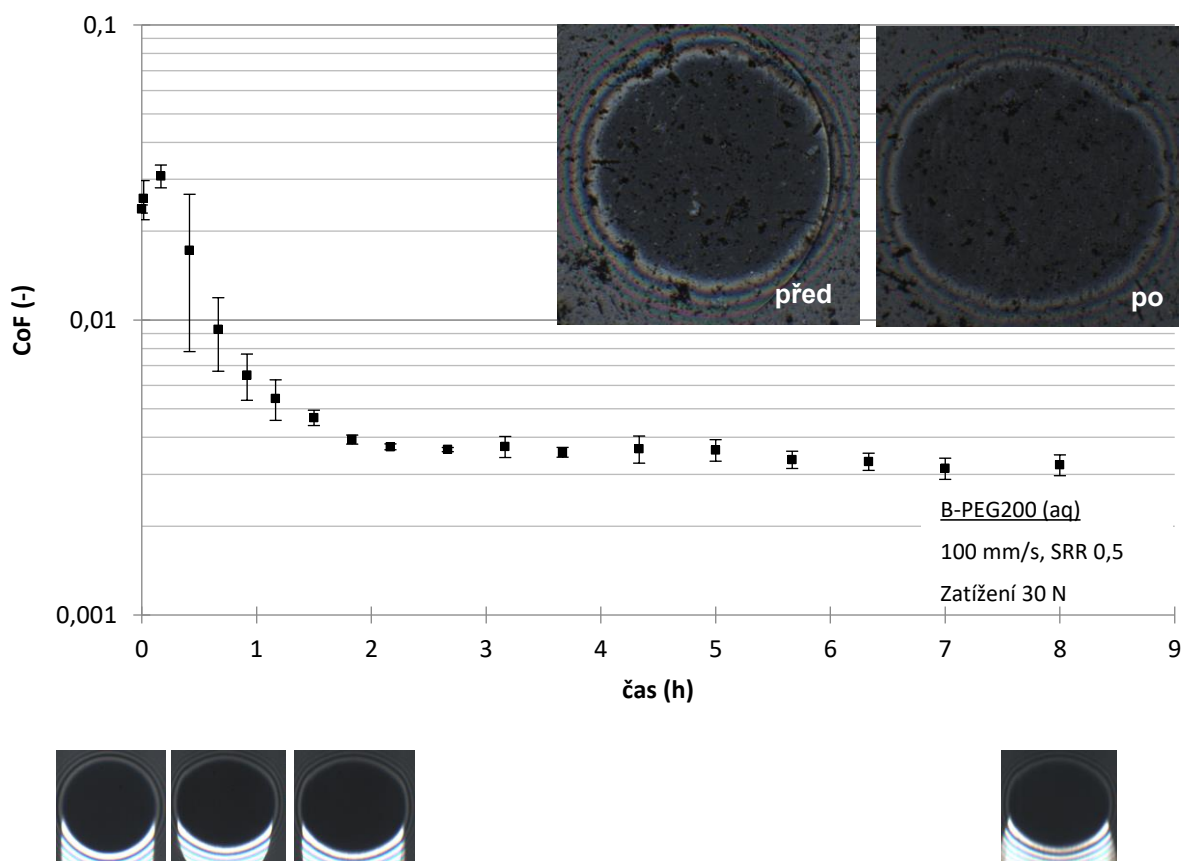
obr. 5-39 Závislost viskozity na teplotě pro B-PEG200 (aq).

Velikost tloušťky maziva před záběhem je znázorněna na obr. 5-40. Patrný je tu především mírný vliv zatížení a odlišná směrnice hodnot při nižších rychlostech. Zobrazené hodnoty jsou klíčové pro představu o útváření tření a oddělení povrchů kontaktních těles. Měření bylo kvůli nízkým hodnotám provedeno za čistého valení a mazivo bylo do kontaktu vpravováno injekčně s ručním dávkováním.



obr. 5-40 Závislost centrální tloušťky maziva na rychlosti s vlivem zatížení.

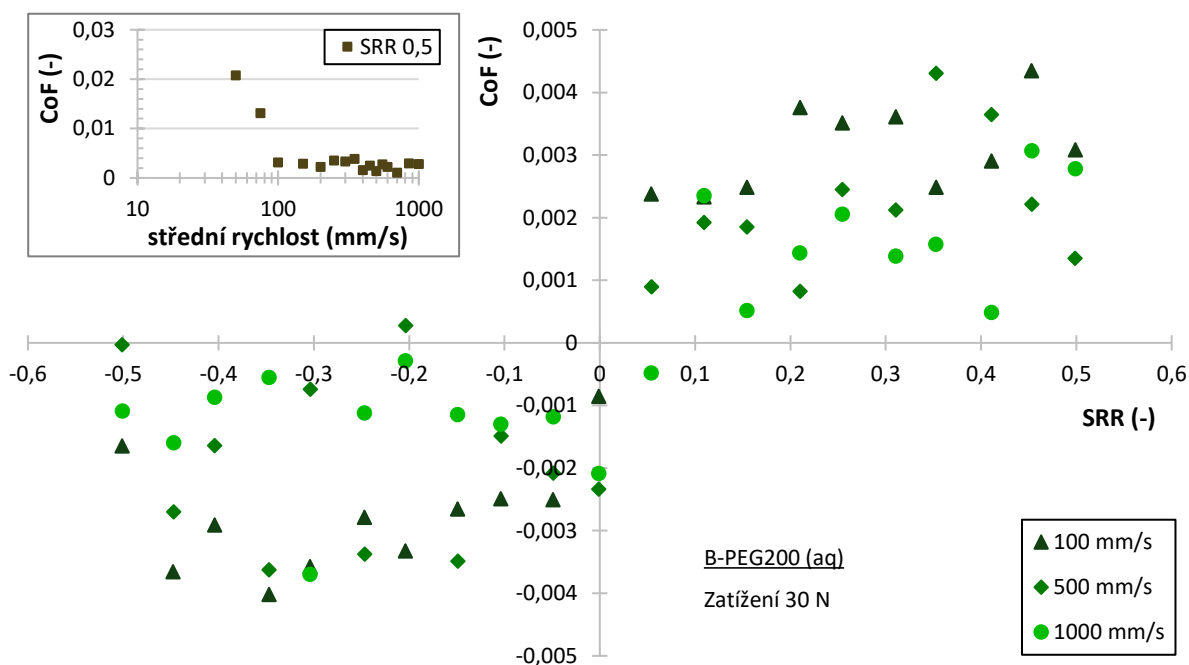
Pro zjištění vlivu časového záběhu na velikost tření byl proveden test dlouhý 8 hodin, kdy každá z hodnot byla zprůměrována ze 3 hodnot naměřených s časovým odstupem 1 sekundy. Střední rychlost byla zvolena o velikosti 100 mm/s dle literatury [43]. V grafu (obr. 5-41) lze vidět počáteční mírný nárůst tření a poté jeho relativně prudké snížení, jehož hodnota se ustálila přibližně po 2 hodinách, přičemž následný pokles je už relativně zanedbatelný.



obr. 5-41 Časový test kontaktu mazaného pomocí B-PEG200 (aq) včetně snímků kontaktní oblasti.

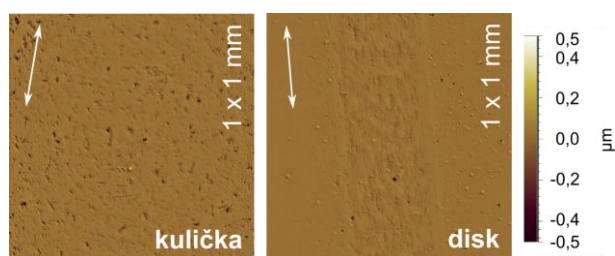
Výsledná hodnota tření po celém záběhu odpovídá $0,0032 \pm 0,0003$. Na obr. 5-39 je možné vidět rovněž 2 statické snímky na kterých lze pozorovat rozdíl ve tvaru kontaktní oblasti před a po záběhu. Snímky pod grafem pořízené na počátku, ve 25. minutě, ve 40. minutě a na konci pak ilustrují změnu tvaru kontaktní oblasti v průběhu záběhu.

Po ukončení záběhu byly naměřeny trakční a Stribeckova křivka (viz obr. 5-42) (utvořená z hodnot trakčních testů). Z té lze pozorovat, že vybraná střední rychlost je nejnižší z měřených rychlostí, pro niž platí, že součinitel tření při ní naměřený je menší než 0,01. Na trakční křivce lze pozorovat, že i přes značný rozptyl hodnot vyšší rychlosti stále vedou na nižší tření.



obr. 5-42 Trakční a Stribeckova křivka pro kontakt mazaný B-PEG200 (aq) po 8hodinovém záběhu.

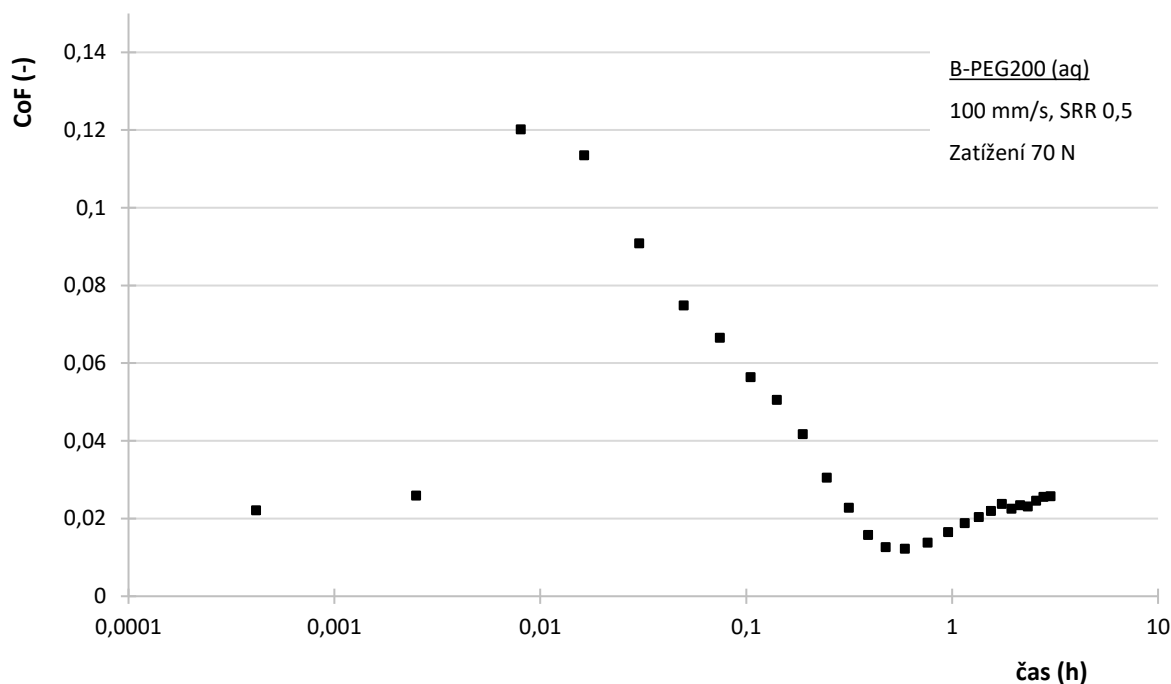
Hodnocení změn na površích provedené po zmíněných experimentech (časovém, trakčních) vedlo ke zjištění, že drsnost kuličky se oproti stavu před testy ($S_a = 8,3 \pm 0,6$ nm) zvýšila, a to na hodnotu $10,8 \pm 0,1$ nm. Přesto však nebyla pozorována výrazná změna ve tvaru kuličky. Ta je naopak patrná u disku nejen ze snímků na obr. 5-41, ale také z obr. 5-43, kdy oproti okolnímu povrchu ($0,7 \pm 0,1$ nm) má vytvořená drážka drsnost $9,3 \pm 0,2$ nm.



obr. 5-43 Povrch kontaktních těles po dlouhodobém záběhu v B-PEG200 (aq).

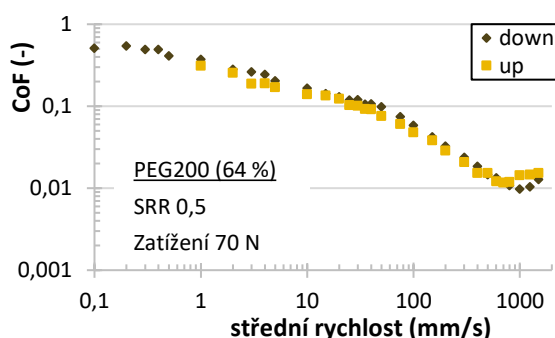
Následný záběhový test probíhal při vyšším zatížení, jež přibližně odpovídá Hertzově kontaktnímu tlaku při němž bylo v původním výzkumu dosaženo nejnižších hodnot tření [43]. Z grafu na obr. 5-44 plyne, že po velmi rychlém počátečním navýšení tření začalo

docházet k jeho opětovnému snížení, kdy se nakonec hodnota součinitele tření ustálila přibližně na hodnotě výchozí.



obr. 5-44 Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 1.

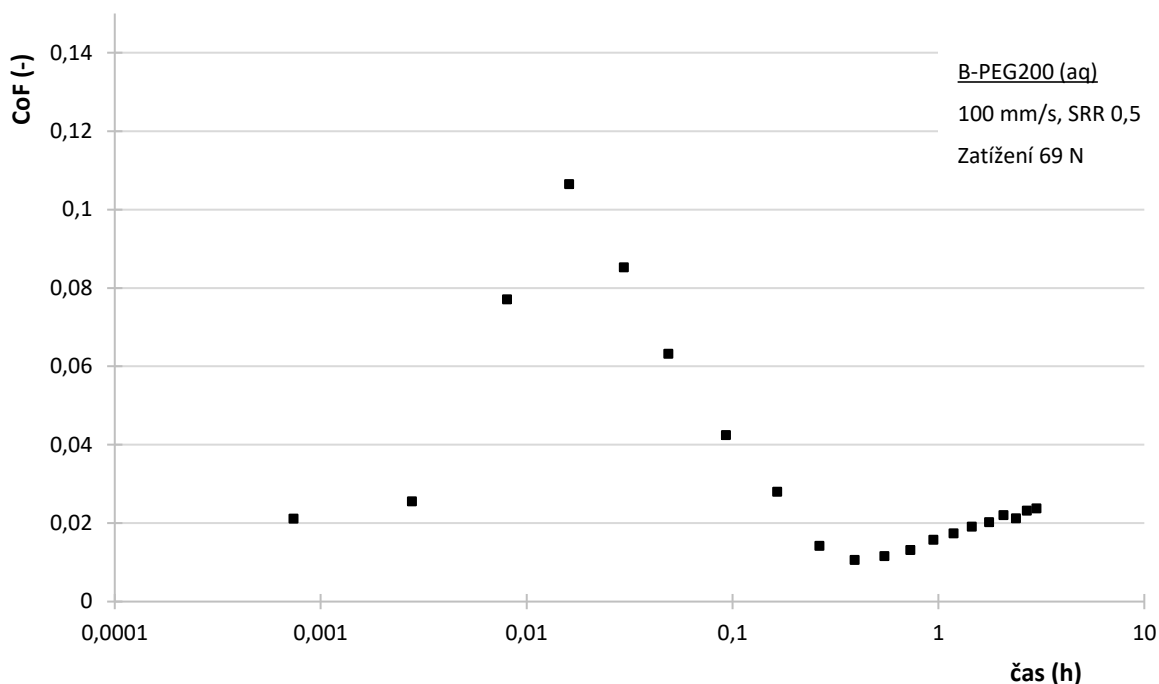
Po tomto časovém testu byl proveden Stribeckův test s PEG200 (64 %), který byl injekčně aplikován do kontaktu (obr. 5-45). Kontakt před touto aplikací nebyl očištěn a na disku a kuličce zůstalo malé množství původního maziva. Hodnoty tření vybrané směsi bez kyseliny borité přitom řádově odpovídají výsledkům dosaženým během záběhu. Rozdíly mezi hodnotami naměřenými při zpomalování („down“) a při následném zrychlování („up“) se příliš neodlišují.



obr. 5-45 Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 1.

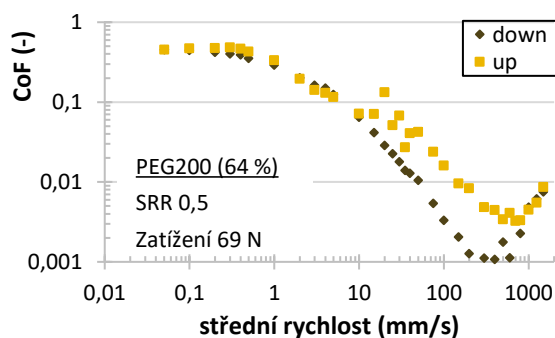
Záběh byl z důvodu zjištění opakovatelnosti výsledků proveden znovu při téměř stejném zatížení a hodnoty včetně průběhu záběhu jsou velmi podobné (viz obr. 5-46). Po tomto testu byl proveden ještě 3hodinový časový test (při 100 mm/s, SRR 0,5) samotné směsi PEG200

(64 %). Její hodnota na počátku téměř o řád klesla, ale během několika málo minut se ustálila na $0,0033 \pm 0,0002$.



obr. 5-46 Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 2.

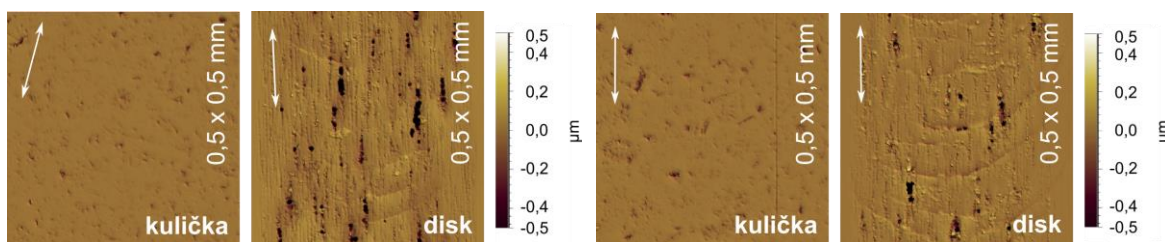
Po záběhu a zmíněném časovém testu byla naměřena Stribeckova křivka (obr. 5-47) rovněž s PEG200 (64 %). Tato křivka má již podobný tvar jako data z předchozích měření roztoku PEG200 (64 %), kdy obsahuje rozdílné hodnoty součinitele tření při zpomalování i při zrychlování. Zároveň je možné vidět, že hodnota na počátku experimentu je přibližně rovna tomu na konci.



obr. 5-47 Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 2.

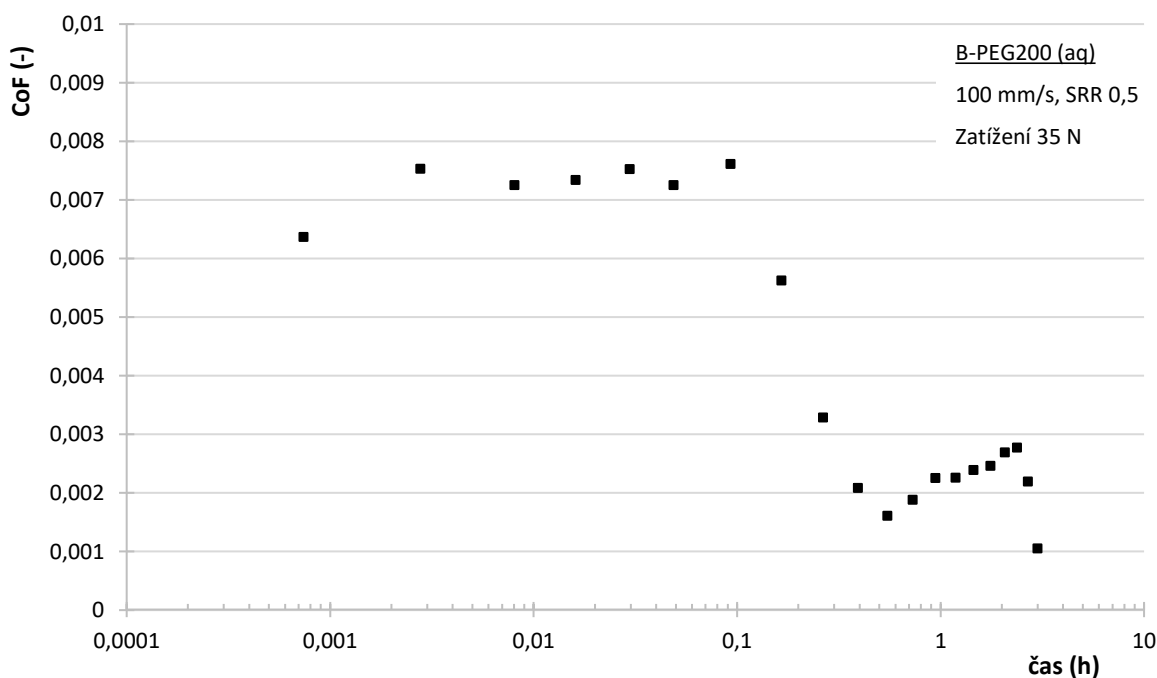
Mezi povrchy kuliček na koncích obou experimentů (Stribeckovy testy pro záběhy č. 1 a č. 2) nebyl pozorován statistický rozdíl. Drsnost (S_a) se v obou případech pohybovala kolem 9 nm. Nicméně skleněný disk po prvním experimentu vykazoval drsnost

41,9 ± 12,9 nm a po druhém experimentu pouze 18,7 ± 0,1 nm, kdy viditelné změny jsou zobrazeny na obr. 5-48.



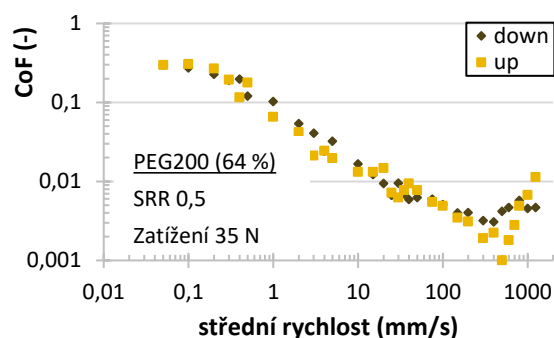
obr. 5-48 Rozdíl mezi měřením provedeným po záběhu č. 1 (vlevo) a po záběhu č. 2 (vpravo).

Protože pozitivní změny tření bylo dosaženo pouze za působení nižšího zatížení při 8hodinovém časovém testu (obr. 5-41), byl z důvodu opakovatelnosti proveden ještě jeden 3hodinový test s nižším zatížením (obr. 5-49). Hodnota součinitele tření byla už na počátku testu pod 0,01. Tato velikost zůstala přibližně konstantní po dobu asi 5 minut, poté během 25 minut klesla na méně než 0,002. Následoval pozvolný nárůst téměř na 0,003 a během poslední půlhodiny došlo opět k poklesu tření na hodnotu přibližně 0,001.



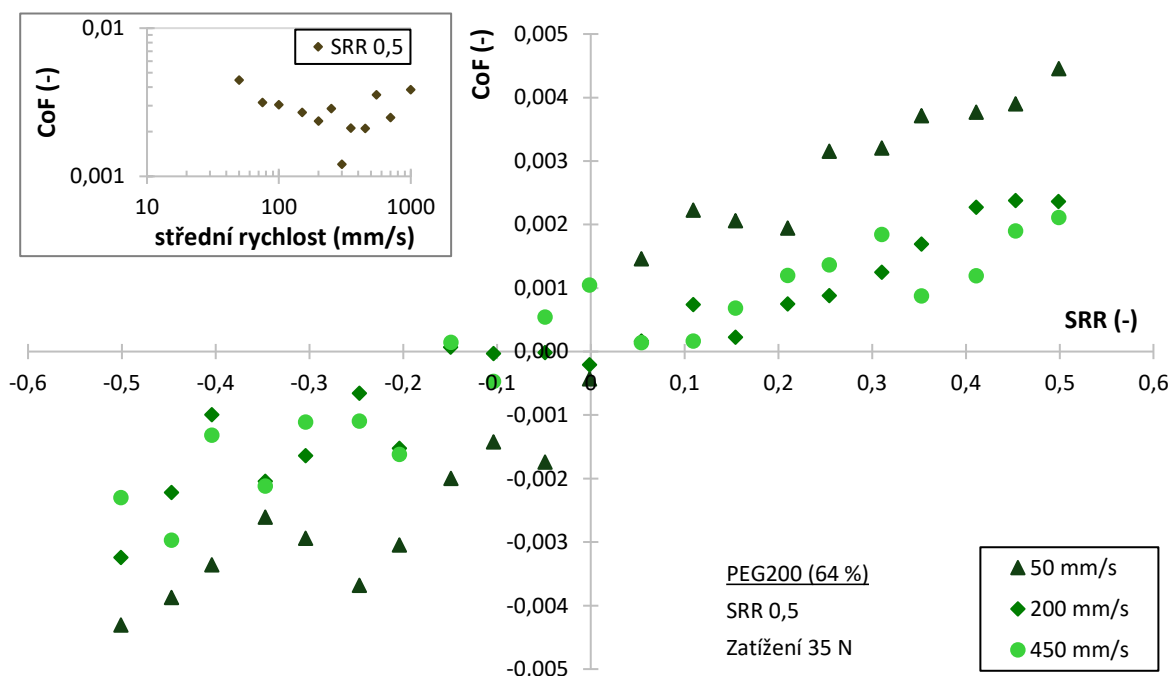
obr. 5-49 Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 3.

Po tomto časovém testu opět následoval Stribeckův test (obr. 5-50), který se vyznačuje velmi podobnými hodnotami při snižování i opětovném navyšování střední rychlosti. Minimální tření nastává při rychlosti 400 nebo 500 mm/s („down“ či „up“) a poté se zvyšující se střední rychlostí dochází ke zvýšení tření až na dvojnásobek.



obr. 5-50 Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 3.

Vliv skluzu na tření se zvyšuje s klesající rychlostí, což je zobrazeno na obr. 5-51 společně s daty menší části Stribeckovy křivky. Lze vidět, že i pro 50 mm/s je závislost tření na SRR stále lineární. Oproti součinitelům tření změřeným při dalších rychlostech je ale hodnota pro 50 mm/s téměř o tisícinu větší.



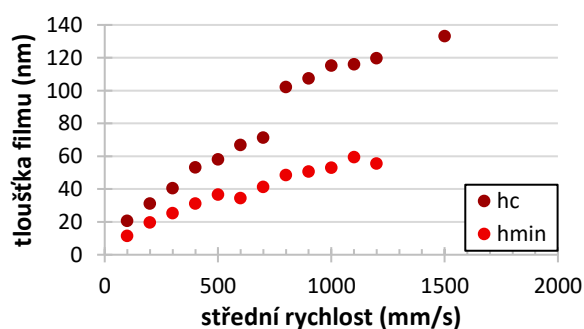
obr. 5-51 Trakční a Stribeckova křivka naměřené po 3hodinovém záběhu.

Před časovým testem na obr. 5-49 byl pomocí laboratorního optického refraktometru naměřen index lomu směsi B-PEG200 (aq). Jeho hodnota byla rovna 1,374. Po provedení záběhu a naměření dat pro Stribeckovu a trakční křivku byla na povrchu disku a kuličky pozorována viskózní vrstva maziva v místě dráhy. Aby byl alespoň orientačně zjištěn vliv pravděpodobného navýšení viskozity, bylo mazivo z disku odebráno a zjištěno, že se index lomu navýšil na 1,454. Naměřené indexy lomu odpovídající směsím polyethylenglykolu na počátku testů jsou přehledně uvedeny v tab. 5-3. Pro lepší představu o vlivu vody na tuto veličinu lze dodat, že množství PEG200 ve směsi B-PEG200 (aq) je asi 34,1 obj. %.

tab. 5-3 Index lomu použitých maziv se složkou PEG200.

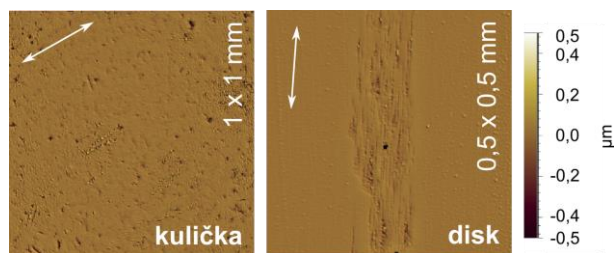
mazivo	index lomu
PEG200 (100 %)	1,4585
PEG200 (82 %)	1,441
PEG200 (64 %)	1,421
PEG200 (64 %) + H ₃ BO ₃ (4 mM)	1,422
B-PEG200 (aq)	1,374

Protože doposud nebyla pozorována takováto významná změna v indexu lomu žádné ze směsí s PEG200, bylo vhodné podrobněji prozkoumat vzniklé mazivo. Vzhledem k množství utvořené směsi byl použit skleněný disk s chromovou poloodrazivou vrstvou pro další test, kdy byla vyhodnocována tloušťka maziva. Část odebrané kapaliny použité pro měření indexu lomu byla vrácena do kontaktu. A protože bylo kapaliny pro potřeby experimentálního měření tloušťky stále málo, byla do kontaktu injekčně přidáno několik kapek PEG200 (64 %). Vzhledem k velikosti indexu lomu se jedná o směs, která by viskozitu, a tedy i tloušťku maziva neměla navýšit. Je tak eliminován vliv opticky aktivních sloučenin, které by mohly v případě jejich vytvoření ovlivnit index lomu maziva. Výsledná tloušťka maziva je zobrazena na obr. 5-52. Kolem tloušťky 70 nm se vyskytuje skok, kdy není jasné, zda je to způsobeno vlivem měřicí metody nebo dochází k takovému jevu.



obr. 5-52 Závislost tloušťky maziva na rychlosti po 3hodinovém záběhu č. 3.

Pro úplnost lze ještě říci, že se povrchy kontaktních těles mezi stavem před záběhem a po souboru všech provedených testů (viz obr. 5-50, 5-51, 5-52) zdrsnilo. Drsnost (Sa) kuličky na počátku byla asi 10 nm a na poté přibližně 13 nm. Drsnost skla (běžně 0,7 nm) se v místě drážky zvýšila na asi 13,5 nm. Představu o velikosti a tvaru drážky lze získat z obr. 5-53.



obr. 5-53 Kontaktní povrchy po záběhu č. 3 a následných testech.

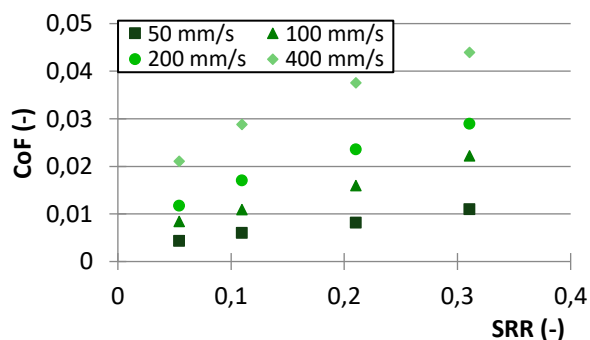
5.4 Vodný roztok PEG-ran-PG, ocel/sklo

Pro lepší představu o chování maziva ve směsi s vodou bylo provedeno měření na tlakovém viskozimetru a následně byly data proloženy pomocí McEwenova vztahu a byl získán tlakově viskózní součinitel uvedený v tab. 5-4.

tab. 5-4 Tlakově viskózní součinitel pro PEG-ran-PG (50 %).

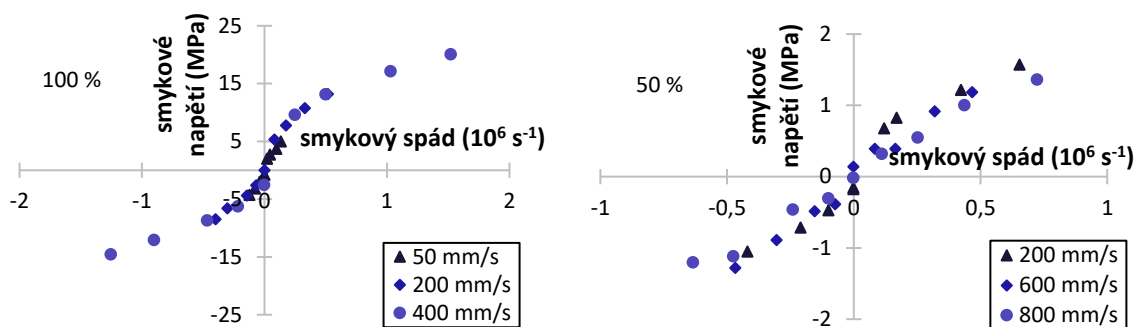
30 °C	
α_M^* (GPa ⁻¹)	4,125

Pro nezředěné mazivo (100 %) byla naměřena následující trakční křivka (obr. 5-54), ze které je patrné, že při nižších rychlostech se mazivo chová poměrně newtonsky, ale vyšší rychlosti už naznačují značně nenewtonské chování. V grafu lze také vidět, že redukcí tření pod hranici superlubricity je možné docílit při nízkých rychlostech a také nízkém SRR.



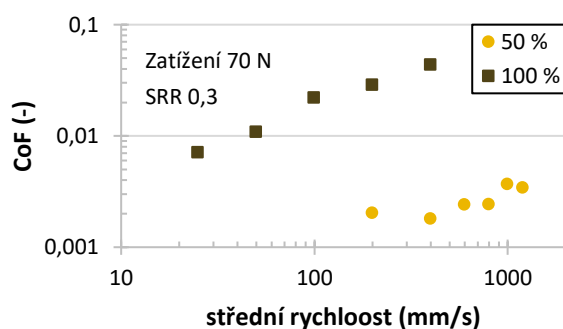
obr. 5-54 Trakční křivka pro čistý PEG-ran-PG.

Reologické chování lépe popisuje toková křivka, kdy na obr. 5-55 lze pozorovat vliv přídavku 50 obj. % vody na viskozitu a také na reologické vlastnosti maziva. Viskozita maziva s přídavkem vody několikanásobně klesá.



obr. 5-55 Toková křivka pro čistý PEG-ran-PG (vlevo) a jeho směs s vodou (vpravo).

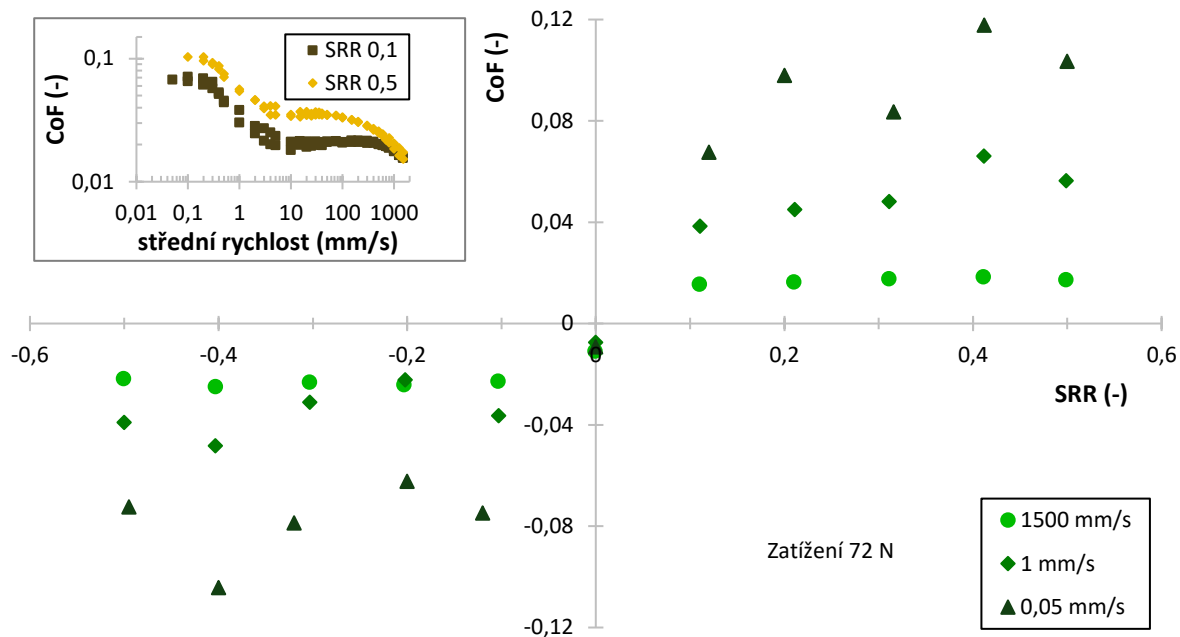
Jak velký vliv na redukcí tření má voda, jako aditivum k tomuto mazivu, si lze představit z následující Stribeckovy křivky (obr. 5-56) provedené za SRR 0,3. Po uvedených testech byla provedena další měření, kdy po určitém čase došlo ke tvorbě oxidů železa na kuličce, zabarvení mazivové směsi do oranžova a k navýšení tření.



obr. 5-56 Stribeckova křivka pro různé koncentrace PEG-ran-PG.

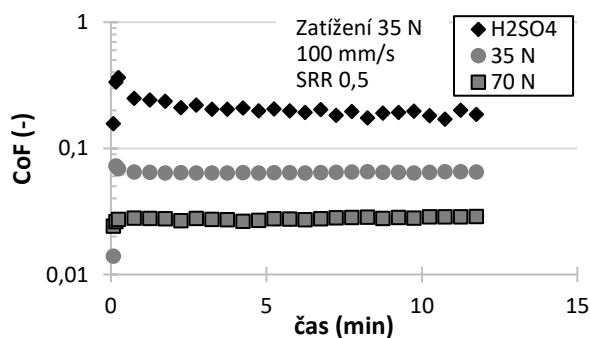
5.5 Silikonový olej, Si₃N₄/sklo

Aby bylo možné porovnávat velikost tření po záběhu v kyselém prostředí a bez něj, byla naměřena data pro trakční a Stribeckovu křivku daného maziva (obr. 5-57). Graf trakčních křivek zobrazuje vybraná data ze všech myšlených režimů tření. Pro EHL režim je to 1500 mm/s, pro ML režim 1 mm/s a pro BL pak 0,05 mm/s. Hodnoty lze odečíst dle tvaru Stribeckovy křivky.



obr. 5-57 Trakční a Stribeckova křivka pro silikonový olej bez záběhu v kyselém prostředí.

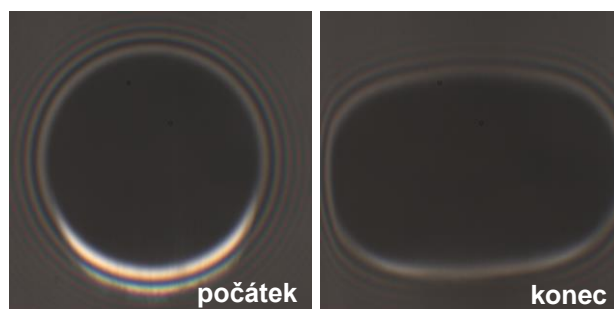
Pro záběh byl připraven vodný roztok kyseliny sírové o $\text{pH}=1,61$. Bylo zjištěno, že při příliš dlouhém záběhu dochází ke zdrsnění skleněného disku do takové míry, že součinitel vzroste z původně ustálené hodnoty asi o desetinu. Proto by záběh v roztoku o daném pH měl probíhat méně než 14 minut. Po záběhu byl ze zásobníku odstraněn přebytečný roztok a následně byl kontakt zaplaven vybraným silikonovým olejem a poté zatížen. Nejprve silou 35 N a poté 70 N. Výsledné tření včetně samotného záběhu je zobrazeno v následujícím grafu (obr. 5-58). Během záběhu došlo v počátku k nárůstu tření a poté k jeho velmi pozvolnému klesání. Lze vidět, že s vyšším zatížením došlo k poklesu tření, přičemž hodnota součinitele tření je v daném časovém úseku stabilní.



obr. 5-58 Záběhový test a pozáběhové testy.

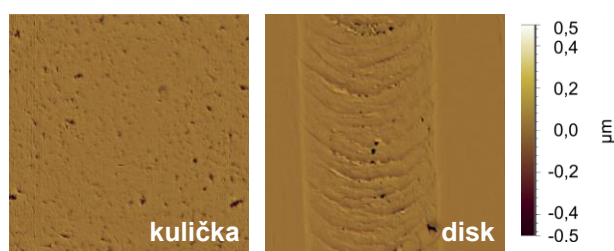
Protože byl během experimentu umožněn přímý vhled do kontaktu, šlo pozorovat, jak se s časem záběhu mění tvar kontaktní oblasti. Zpočátku bylo možné pozorovat mírné opotřebení a v průběhu záběhu pak postupnou změnu kruhového kontaktu na eliptický tak,

jak je znázorněno níže (obr. 5-59) na snímcích pořízených na počátku a na konci časového testu.



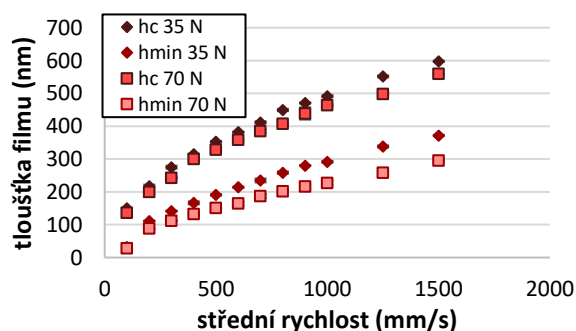
obr. 5-59 Vliv záběhu v kyselém prostředí na kontaktní oblast.

Disk měl před testem drsnost (S_a) $0,7 \pm 0,1$ nm a kulička $9,6 \pm 0,3$ nm. V průběhu záběhu se drsnost měnila a na jejím konci tak bylo možné změřit pro drážku disku $21,6 \pm 5,6$ nm a pro kuličku $9,3 \pm 0,4$ nm. Topografii povrchů z koncového měření (obr. 5-60) lze vidět níže.



obr. 5-60 Optické snímky drsnosti povrchů po záběhu v roztoku H_2SO_4 .

Po záběhu byl použitý skleněný disk vyměněn za disk s vrstvou chromu. Bylo provedeno měření pomocí kolorimetrické interferometrie, kdy je na následujícím grafu (obr. 5-61) zobrazen vliv rychlosti a zatížení pro centrální i minimální tloušťku maziva v kontaktu.



obr. 5-61 Tloušťka filmu silikonového oleje s vlivem zatížení

6 DISKUZE

6.1 Glycerol

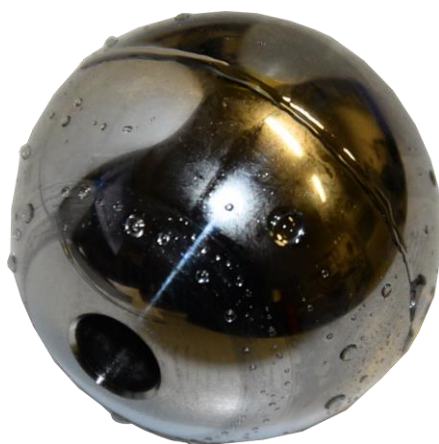
Jak již dříve ukázal Vergne [1], kontakty mazané čistým glycerolem se v trakčních křivkách chovají ve velké míře jako newtonské kapaliny a závislost součinitele tření na SRR je téměř lineární, jak ukazuje i graf na obr. 5-2. Ve vyšších rychlostech lze ale zaznamenat prvky pseudoplastického chování, kdy s vyšším smykovým spádem mírně klesá směrnice závislosti smykového napětí. Odklon od lineární závislosti autor ve své práci vzhledem k chování jiných olejů a k nízkému příspěvku změny viskozity na tření spíše zanedbává. Čistý glycerol je možné použít jako mazivo zajišťující EHL režim i při značně nízkých rychlostech, k čemuž přispívá jeho relativně vysoká viskozita za laboratorní teploty [62]. Je tak umožněna tvorba EHD mazacího filmu i za poměrně nízkého tlakově viskózního součinitele, který při 40 °C odpovídá 5,4 GPa⁻¹. Lze předpokládat, že právě tato hodnota je jedním z klíčových parametrů nízkého tření v kontaktech pohybujících se za příspěvku valení. Má totiž vliv jak na smykovou složku tření, kterou zajišťuje viskozita (Couettův tok), tak na valivou složku, jejíž součástí je Poiseuillův tok. Ten je ovlivňován výškou maziva, jež dle Hamrock-Dowsonovy teorie na hodnotě tlakově viskózního součinitele do značné míry závisí.

Vliv relativní vlhkosti vzduchu a hygroskopicity glycerolu na tření [2] byl ověřen při zjišťování opakovatelnosti měření (viz obr. 5-1). Na jímání vody ze vzduchu pak zjevně reagoval i výše popsany experiment, kdy později provedené měření za vyšší rychlosti má o něco nižší směrnici, a tedy i viskozitu. Vliv této vlastnosti na tření lze lépe pochopit při porovnání obr. 5-2 s grafy na obr. 5-3 a 5-5. Lze jasně vidět, že se kapalina chová více newtonsky i při vyšších smykových spádech. Při tomto porovnání je navíc dobře vidět pozitivní efekt přepočtu trakčních křivek na tokové, kdy lze srovnávat různě zatížené kontakty.

Pokud s mazivem kontaktní tělesa interagovaly za vzniku elektrické dvojvrstvy a docházelo k vytvoření skluzové roviny mezi kontaktním tělesem (ocelovou kuličkou nebo skleněným diskem), nebyl vliv takového chování na tření podstatný. Kromě výsledků zobrazených v předchozí kapitole byly provedeny i časové testy, které v průběhu času neukazovaly žádné další snížení tření. Pakliže by na povrchu ocelové kuličky byl vytvořen hydroxyoxid železa (FeOOH) [2] nebo na povrchu skleněného disku křemičitý gel, jako je popisováno u keramických kontaktů mazaných vodou [3, 32], bylo by možné v případě jejich vlivu na tření toto pozorovat ve změně viskozity tokové křivky. Smykové napětí je v tomto případě vypočteno z hodnot středního tlaku a součinitele tření. Snížení tření v důsledku tribochemického působení adsorbovaných vrstev by tak znamenalo snížení viskozity, kterou je možné z tokové křivky odečíst.

Pakliže se pro přibližný výpočet viskozity v kontaktu použije McEwenova vztahu [63], odpovídajícího středního kontaktního tlaku a hodnot zjištěných při měření a výpočtu tlakově viskózního součinitele proložených mocninou regresní funkcí, lze při znalosti přesné teploty porovnat hodnotu viskozity vypočtenou se zjištěnou pomocí tokové křivky. Přesná teplota v kontaktu ale nebyla měřena, a proto byl využit iterační postup při jejím dosazování. Viskozitě 508,6 mPa·s (viz obr. 5-3), pak odpovídá teplota přibližně 24,6 °C, což odpovídá běžné teplotě v laboratoři. Viskozitě z tokové křivky na obr. 5-5 pak odpovídá teplota 21,6 °C. Mohlo by to být připisováno vlivu nějaké tribochemické reakce, ale spíše se bude jednat o navýšení množství vody v roztoku. Jeho koncentrace by totiž měla odpovídat prostředí o 40 % RH a při vlhkosti v laboratoři docházelo po čase k odpařování vody. Ta byla následně doplňována tak, aby byl zachován index lomu, který je na množství vody v roztoku závislý. Také mohlo dojít k termálním účinkům v kontaktu v důsledku vysokého skluzu, a tedy ke snížení viskozity.

Snížení hodnoty součinitele tření by mohlo být způsobeno rovněž nevhodnou kalibrací. Její provedení bylo ale shodné s předchozím testem, a proto by nemělo být důvodem ke zdánlivé změně viskozity. Tribochemickou podstatu ve výsledku lze podpořit pouze pozorováním změny úhlu smáčení v místě kontaktu (viz obr. 6-1), k čemuž docházelo po déle trvajících experimentech. Souvislost reakce se změnou úhlu smáčení byla již pozorována [2]. Nicméně vrstva maziva se zdála být viskóznější, a tak lze předpokládat odlišný důvod vzniku tohoto jevu.



obr. 6-1 Vrstva maziva na ocelové kuličce.

Popisované snížení viskozity mělo příznivý vliv na tření především při SRR 1 a za vyšších rychlostí i při SRR 0,5, jak je patrné při porovnání Stribeckových křivek na obr. 5-3 a 5-5. Výrazný účinek na tloušťku filmu pozorován nebyl.

Test při vyšším zatížení (obr. 5-7) opět potvrdil možnost využití predikce viskozity, kdy viskozitě o velikosti 526,4 -mPa·s odpovídá teplota 23,9 °C, což je teplota, během níž se v laboratoři pracovalo. Ze zobrazené Stribeckovy křivky je dále možné usuzovat, že za střední rychlosti 50 mm/s se už kontakt nachází ve smíšeném mazacím režimu. Tomu pak

odpovídá i tloušťka mazacího filmu (obr. 5-8). Přibližně stejná hodnota přechodu do smíšeného režimu je pozorována i v případě plné Stribeckovy křivky na obr. 5-9, v níž ale není možné pozorovat navyšování tření se vzrůstající střední rychlostí, jako je tomu v případě záporného skluzu. Podobné chování bylo zjištěno i v případě nižších kladných skluzů. Posun přechodu mezi EHL a ML při použití záporných skluzů si lze vysvětlovat vyšší rychlostí drsnější kuličky, což se projeví především při nízkých rychlostech (ML a BL). Odpovídá to i postupnému navyšování drsnosti kuličky. Při experimentu o velikosti SSR - 0,5 lze naopak pozorovat snížení místa přechodu, což odpovídá vyleštění kontaktní oblasti po použití dosud nepoškozené dráhy na disku.

Jak plyne z textu, nebyl prokázán žádný pozitivní vliv záběhu na tření, přičemž zvyšující se kontaktní tlak mírně snižoval tření pouze za vysokých rychlostí. Při nízkých pak přecházel do smíšeného režimu, což tření navyšovalo. Tímto zjištěním je vyvrácena první hypotéza.

Dle druhé hypotézy skutečně dochází při nízkých rychlostech k opotřebení a pokud se drsnost kontaktů příliš zvýší, tak dojde k posunu přechodu mezi mazacími režimy, čímž se tření stává do značné míry nestabilním, ale stále je dosahováno díky plnému oddělení kontaktů a nízké viskozitě tření pod hranicí superlubricity ve velkém rozsahu rychlostí.

6.2 Voda

Na obr. 5-10 je znázorněn test, který se podmínkami blíží experimentu, ve kterém byl zkoumán právě vícestupňový záběh [35]. Rozdílné vlastnosti v této práci jsou mírně nižší kontaktní tlak, větší kulička a změna směru rotace disku, kdy při každé rychlosti byl záběh proveden po dvojnásobnou dobu oproti zmíněné studii. Při dosažení 120 mm/s, což je hodnota, za které by mělo být tření sníženo téměř okamžitě pod 0,01 se dle obr. 5-10 tření snižovalo v prvním cyklu (rotace v obou směrech, celkem 10 minut záběhu) jen pozvolně a k výraznému poklesu došlo až v následujícím cyklu. S vysokou pravděpodobností to lze přisuzovat větší kuličce, kdy při nižším kontaktním tlaku dochází k pozvolnějšímu opotřebování. Průměr kuličky po opotřebení autoři uvádí přibližně 1,8 mm, což je při porovnání s obr. 5-11, kde je průměr kontaktní oblasti menší než 1,5 mm, více. Lze tedy uvažovat, že pro zajištění vhodných podmínek, za kterých dochází k plnému oddělení a mazání kontaktu vodou je potřebný určitý kontaktní tlak, který může souviset s viskozitou vody a její schopností oddělit kontaktní povrchy.

Pakliže je možné vyhladit oba kontaktní povrchy za čistého skluzu za pomoci vody na téměř shodnou hodnotu, kdy běžně je pro leštění dané křemičité keramiky využíváno mechanicko-chemického působení [65], pak je pravděpodobné, že k určitému tribochemickému působení mezi kontakty dochází a i když tato reakce nemusí být podstatná z hlediska výsledného tření, může hrát roli v průběhu záběhu. Vliv tribochemické reakce mezi danými kontakty mazanými vodou byl někdy zamítán i v minulosti [35], kdy však nebyla brána v potaz

tloušťka mazací vrstvy a byla snaha poukázat pouze na nemožnost reakce samotné, neboť bylo pozorováno chování běžné pro kontakty plně oddělené mazacím filmem. Naproti tomu jiná studie [22] vznik a funkci adsorbované tribochemické vrstvy na tření podporuje a vysvětluje.

Při změně směru rotace lze na obr. 5-10 pozorovat rozdílné hodnoty tření, kdy to může být dáno tuhostí uchycení pinu v přístroji. Lze uvažovat, že při náhlém snížení třecí síly došlo k uvolnění snímače a k natočení, které při změně rotace funguje jako klínová mezera. Tento vliv by mohl být v budoucnu zkoumán jemným natáčením pinu. A to nejlépe v takové konfiguraci, která by umožňovala výměnu za skleněný či safírový disk a následné optické pozorování kontaktu, čímž by mohlo dojít i k lepšímu pochopení vývoje tření tohoto systému. A k potvrzení či vyvrácení možných hypotéz uvedených v minulém odstavci.

Přídavek valení v této konfiguraci znamená spolu s větší kontaktní oblastí a dráhou pravděpodobně delší čas záběhu (obr. 5-13), během kterého rovněž dochází ke snižování kontaktního tlaku a vyhlazování povrchů. Z měření dále vyplynula důležitost čistoty vody na záběh a výsledné tření. Pakliže se ve vodě neobjevily kontaminanty, které navyšovaly drsnost, ale působily chemicky, lze předpokládat, že byl v kontaktu tvořen tribochemický film [22]. Možnými látkami, které mohly nepříznivě na vývoj tření působit a které lze uvažovat, jsou keramické částice uvolněné během počátečního opotřebení, s vodou mísitelný PEG200 z dříve provedeného měření nebo oleje, které zůstaly v ne zcela vyčistitelném zásobníku maziva, a které s vodou vytvořily emulzi.

Jako pozitivní vlastnost makrokontaktu s přídavkem valení lze uvést snížení drsnosti kontaktních ploch. Avšak oproti běžným mazivům lze zároveň říci negativum. A to, že přídavek valení ovlivňuje zvyšuje tření, což může být způsobeno nemožností utvoření klínové mezery a hydrodynamického režimu v kontaktu. Negativní působení však může být dáno i velikostí kontaktní plochy a tím, že je při zatížení většinová část vody, coby mazacího filmu, z kontaktu vytlačena. Za stejných středních rychlostí bylo přitom v případě experimentů s menší staticky umístěnou kuličkou dosaženo mnohem nižšího tření.

Při porovnání dat ze Stribeckovy křivky (obr. 5-14) naměřené v průběhu záběhu, lze říct, že vyšší rychlost působí na tření pozitivně [29, 35], jako v případech čistého skluzu. Vzhledem k průběhu uvedeného záběhového a Stribeckova testu, lze předpokládat, že v případě navýšení drsnosti, je opětovné zvýšení střední rychlosti takřka zárukou snížení tření. což potvrzuje i graf na obr. 5-16, kdy po zvýšení zatížení došlo k rychlému nárůstu tření, ale při zvýšení rychlosti na dvojnásobnou pak bylo dosaženo snížení součinitele tření z desetin na tisícinu během pouhých 15 minut.

Následný Stribeckův test (obr. 5-17) lze porovnat se Stribeckovým testem (obr. 5-14) vytvořeným v průběhu časového testu, kdy i přes odlišné zatížení jsou obě křivky prakticky totožné, a to jak ve tvaru, tak v hodnotách a chování. Při zrychlování lze v obou případech pozorovat zlepšování tření. Experiment na obr. 5-17 mohl být ale zatížen příliš rychle

a mohlo dojít k navýšení drsnosti nebo porušení tribochemické vrstvy, což by vysvětlovalo, že tření na počátku testu nebylo nízké jako po záběhu.

Při porovnání topografie na obr. 5-15 a 5-18 lze vidět v druhém případě na kuličce liniové výstupky, jejichž části jsou místy z povrchu strženy. Podobné výstupky byly popisovány při mazání směsí vody, glycerolu a kyseliny borité [50], kdy bylo předpokládáno že byly vytvořeny jako součást adsorbované vrstvy snižující tření. Lze předpokládat, že pakliže by liniové výstupky zůstali neporušené, byla by hodnota tření nižší. Zároveň byly pozorovány pouze po testech za vysokého zatížení, a proto je možné, že byly spíše vytvořeny jako reakce na podpovrchové napětí v kontaktu, které je u ocelových kuliček důvodem k pittingu.

Uvedeným hodnotám drsnosti Sa po záběhu za nižšího zatížení (topografie bez výstupků viz obr. 5-15) odpovídá $Sq_1 = 8,3$ nm (kulička) a $Sq_2 = 5,6$ nm (disk). Pro přibližné určení režimu mazání kontaktu mazaného vodou lze použít práci Kvardy [66], který naměřil tloušťku filmu v kontaktu mazaném vodou za kontaktního tlaku 0,75 GPa a při drsnosti (Sq) ocelové kuličky 8,3 nm a skleněném disku o drsnosti menší než 1 nm, jehož hodnota redukovanou drsnost příliš neovlivní. Zároveň je voda brána jako izoviskózní kapalina, takže by vliv vyššího kontaktního tlaku neměl být pro tloušťku mazání podstatný. Pro střední rychlost lze z grafu v práci vyčíst hodnotu tloušťky 5–6 nm. Pak je možné vypočíst parametr mazání dle rovnice 6.1 [64].

$$\Lambda = \frac{h}{\sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2}} \quad (6.1)$$

Kdy jeho výsledná hodnota činí přibližně 0,5. To dle teorie odpovídá stavu deformací povrchu, kontaktu výstupků jednotlivých atp. Dle hodnoty a charakteristiky uvedené v literatuře lze říci, že se jedná o mezní mazání (BL). Konvenčně pak není možné uvažovat, že je kontakt mazán plným EHD filmem. Nicméně TFL režim jako přechod mezi BL a EHD, který v sobě nese prvky obou těchto režimů lze uvažovat. Vliv případné interakce povrchů je nicméně stále poněkud nejasný. V budoucnu by proto bylo vhodné provést experimenty v takovém sledu, aby na jejich konci bylo možné v režimu superlubricity kontakt opticky pozorovat a nejlépe i provést měření tloušťky filmu například pomocí kolorimetrické interferometrie.

Z výše řečeného plyne, že první hypotézu lze považovat za potvrzenou, kdy vzhledem k tvaru Stribeckových křivek se velikost tření s rychlostí sice mění, ale ne významně. Střední rychlost je nicméně podstatná ve vztahu k rychlosti záběhu. A to především pro vysoké kontaktní tlaky, kdy nízká rychlost plus vysoký kontaktní tlak se rovnají vysokému součiniteli tření. Druhá hypotéza platí s tím rozdílem, že lze předpokládat snížení tření při navýšení rychlosti téměř vždy.

6.3 Polyglykoly

Polyglykoly jsou látky s dlouhými řetězci, jejichž délka se zpravidla vyjadřuje molekulovou hmotností. Čím je vyšší, tím je vyšší i viskozita takového maziva [43, 67]. Protože jejich základní složkou jsou glykoly, tedy dvojsytné alkoholy (obsahující dvě hydroxylové skupiny), jedná se o látky polární [68] a rozpustné ve vodě. Sklo a křemičitou keramiku pak lze brát jako látky, o vysoké povrchové energii, které se snižuje adsorpcí kapalin [24]. Tyto látky spolu mohou díky tomu teoreticky interagovat.

Jak lze vidět z obr. 5-20, čistý polyethylenglykol o molekulové hmotnosti 200 g/mol (PEG200) se stejně jako čistý glycerol chová do velké míry newtonsky. Jeho viskozita v závislosti na teplotě za atmosférického tlaku byla naměřena na rotačním viskozimetru (obr. 5-19) a vliv kontaktního tlaku na zvyšování viskozity byl zjišťován měřením na vysokotlakém viskozimetru (tab. 5-2). Pokud dojde k porovnání viskozity čistého glycerolu [62] s viskozitou naměřenou pro čistý PEG200 za atmosférického tlaku a teploty 30 °C, pak lze říci, že viskozita PEG200 je přibližně 15krát menší. Naproti tomu tlakově viskózní součinitel je při 40 °C asi 1,3krát větší. A protože dle Hamrock-Dowsonovy teorie má na tloušťku filmu větší vliv viskozita za atmosférického tlaku než tlakově viskózní součinitel, lze předpokládat, že čistý PEG200 bude výrazně méně únosný než čistý glycerol. Na druhou stranu nižší viskozita maziva znamená snížení kapalinového tření, vyjádřeného v tokové křivce smykovým napětím. Jinými slovy lze říci, že použití čistého glycerolu je vhodnější pro nižší rychlosti a méně zatížené kontakty než čistý PEG200. A díky vlastnosti supernízké trakce, jak nízkou závislost tření na skluzu Vergne nazývá [1], lze tvrdit, že bude maziva s podobnými vlastnostmi v budoucnu možné použít u valivých ložisek nebo převodovek s ozubenými koly.

Při proložení dat naměřených na vysokotlakém viskozimetru lze zhodnotit tokovou křivku na obr. 5-21, kdy jí model odpovídá při teplotě 26,0 °C a v případě více zatíženého kontaktu (obr. 5-23) pak model odpovídá teplotě 28,2 °C. To už je hodnota, která je vzhledem k běžnému laboratornímu prostředí poměrně vysoká. Protože i polyglykoly jsou do jisté míry hygroskopické, lze uvažovat, že došlo k mírnému snížení viskozity maziva právě vlivem relativní vlhkosti okolí. Při porovnání tloušťky maziva na obr. 5-22 a 5-24 lze tvrdit, že předpokládaný vliv nízké viskozity a vysokého zatížení, který byl představen je správný. Vliv rychlosti patrný ze Stribeckových křivek (obr. 5-21 a 5-23) pak ukazuje na vhodnost mazání pomocí PEG200 za vysokých rychlostí.

Jak je možné usoudit z obr. 5-19 a obr. 5-25, dochází při přidání i nízkého množství vody (18 obj. %) k poměrně razantnímu poklesu již tak nízké viskozity. To se následně projevuje na snížení tření za shodného zatížení přibližně na polovinu, jak ukazuje obr. 5-20 a 5-26. Při takto nízké viskozitě se snižuje i vliv zatížení na kontakt, což je možné pozorovat z obr. 5-27. Bylo přitom pozorováno poměrně razantní změny v tloušťce maziva kolem 50 nm. Je možné, že je to způsobeno změnou v uspořádání řetězců makromolekul maziva

tak, jak to popisuje Liu [67], kdy je uvažováno, že jsou řetězce adsorbovány na kontaktní povrchy. Při velkém snížení rychlosti pak může dojít k částečnému propojení jednotlivých řetězců, čímž dojde ke skokovému snížení tloušťky maziva.

Dalším přidáním vody tření a také viskozita dále poklesnou, jak lze uvažovat z výsledků trakčního testu na obr. 5-28. Při nízkých hodnotách skluzu už může přitom na přesnost měřených hodnot mít vliv i linearita snímače, kdy lze jako hodnotu problémového součinitele tření při daném zatížení uvažovat přibližně 0,0005. Z tohoto důvodu lze tvrdit, že zatěžovací podmínky Stribeckových testů (obr. 5-29) jsou vhodnější než podmínky uvedené trakční křivky. Tvar Stribeckovy křivky provedený za záporného skluzu (obr. 5-29 vlevo) se od tvar křivky provedené za kladného skluzu (obr. 5-29 vpravo) značně liší. Bylo proto provedeno měření topografie (obr. 5-30), že kterého plyne, že při kladném SRR došlo k výraznějšímu opotřebení na disku. To si lze vysvětlit tím, že při velmi nízkých rychlostech odpovídajících smíšenému, a především meznému mazání, dochází ke styku rychleji se točícího disku s tvrdší a drsnější kuličkou, což zajistí opotřebení disku na větší ploše, a proto nedojde při opětovném zrychlování k odpovídajícímu snížení tření.

Výrazný vliv přidané vody na viskozitu, a tedy i kapalinové tření lze pozorovat na obr. 5-31, kdy pro vybrané spektrum rychlostí je tření přibližně shodné pro kladný i záporný skluz. Velikost viskozity při přidaných 36 obj. % vody lze vyčíst z tokových křivek na obr. 5-32 i 5-34. Lze si povšimnout nejen vlivu kontaktů mezi tělesy za nižších rychlostí, ale také velmi nízkého vlivu zatížení na viskozitu. Lze tedy předpokládat, že je v mazivu tolik vody, že se vliv kontaktního tlaku na viskozitu silně zmenšil. Vzhledem k velikosti tření a zmíněné linearitě snímače, ale také kvůli tloušťce maziva na obr. 5-33 a 5-35, lze říci, že byly hodnoty spíše jen špatně proloženy a vliv zatížení je pořád značný.

Jak bylo uvedeno v dříve publikovaných článcích [43, 50], mělo by mít přidání kyseliny borité do maziva pozitivní vlastnosti, kdy je předpokládán vznik komplexu chelátu boru, vyloučení oxidu křemičitého z keramického povrchu a další reakce vedoucí k tribochemicky indukovaným adsorbovaným vrstvám a snížení tření za pomoci elektrické dvojvrstvy. Vytvořením vodného roztoku PEG200 (64 %) za přítomnosti 4 mM roztoku dle [43] došlo při testech k velmi rychlé tribochemické reakci, která vedla k narušení povrchů a navýšení tření (viz obr. 5-36 a 5-37) oproti hodnotám bez kyseliny. V trakčních křivkách lze pozorovat, že v průběhu testů došlo ke změně povrchů, které měly za následek přechod do smíšeného mazacího režimu v důsledku čehož došlo k nárůstu tření. Ačkoliv je smíšený režim mazání uvažovaný jako podmínka snížení tření, nebylo při mazání tímto roztokem takového efektu docíleno. Vždy docházelo ke zdrsnění kontaktní oblasti na disku, které nebylo sníženo ani při dlouhodobých časových testech.

Proto bylo použito k vytvoření vzorku hmotnostní koncentrace udané v článku, kdy bylo zjištěno, že neodpovídá 4 mM množství kyseliny. Množství vody v roztoku je navíc vzhledem k dosud proběhlým testům ještě vyšší, a tudíž je viskozita ještě nižší. Byla naměřena její závislost na teplotě (viz obr. 5-39) a také bylo zjištěno, že hodnota tlakové

viskózního součinitele je přibližně o řád nižší než u čistého PEG200, čímž je dáno i snížení tloušťky mazání dle měření na obr. 5-40.

Pozitivní vliv záběhu na tření tohoto roztoku (B-PEG200 (aq)) byl pozorován v průběhu 8hodinového časového testu (obr. 5-41), kdy hodnota součinitele klesla z počátečních přibližně 0,02 na asi 0,003. Tato hodnota byla již v čase relativně stálá a byla pravděpodobně způsobena vlivem snížení kontaktního tlaku. Toho bylo docíleno tribochemicky indukovanou tvorbou drážky (obr. 5-41 a 5-43) o výsledné drsnosti (S_a) asi 9,3 nm. Byla pozorována i změna v drsnosti kuličky, kdy došlo k jejímu navýšení na 10,8 nm. Vliv rychlosti a skluzu na tření po záběhu je možné pozorovat na obr. 5-42, kdy je vidět velmi výrazná hranice mezi režimy mazání, která přibližně odpovídá záběhové rychlosti.

Z hodnoty tloušťky mazacího filmu při nižším zatížení z obr. 5-40 (tj 12,54 nm) a uvedených drsností je patrné, že po záběhu nebyly kontakty plně odděleny vlastní směsí maziva. Lze však uvažovat, že byly pokryty vrstvou křemičitého filmu a docházelo tak k působení elektrické dvojvrstvy, která snižovala množství styku kontaktů. Případně docházelo k vyhlazení povrchů adsorbovanou vrstvou křemičitého filmu. Při porovnání s hodnotami, které byly naměřeny při použití PEG200 (64 %) lze však považovat záběh ve směsi s kyselinou boritou v makrokontaktu za částečného skluzu za zbytečný, protože odpovídajícího tření, či dokonce ještě nižšího, je možné dosáhnout i bez záběhu.

Z důvodu zjištění vlivu zatížení na záběh byly provedeny dva 3hodinové testy (obr. 5-44 a 5-46), kdy v obou případech ke snížení tření nedošlo. Rozdílné chování pak bylo možné pozorovat po naměřených Stribeckových křivkách mazaných pomocí PEG200 (64 %) viz obr. 5-45 a 5-47, kdy tyto změny lze připsat rozdílné topografii drážky na disku (obr. 5-48).

Pro zopakování úspěšného záběhu za nižšího zatížení byl použit rovněž čas 3 hodin (obr. 5-49), kdy snížení tření po záběhu je možné pozorovat také po přerušení způsobeném měřením Stribeckova testu s mazivem o vyšší viskozitě (PEG200 (64 %)) viz obr. 5-50. Během něj nebylo pozorováno změn zrychlovací fáze oproti zpomalovací, což je pravděpodobně způsobeno dobrým stavem povrchu (obr. 5-53). Při pozorování vlivu skluzu a střední rychlosti na tření provedené po záběhu v kyselém prostředí ($pH=5,2$) směsi B-PEG200 (aq) nebyl pozorován výrazně záporný efekt zvýšené drsnosti (obr. 5-53) na tření i za nízkých rychlostí odpovídajících smíšenému mazání (obr. 5-51).

Pozorovaná změna indexu lomu po testech může být způsobena křemičitou vrstvou vytvořenou na povrchu kontaktů po záběhu. Takto vysoký nárůst indexu lomu totiž neodpovídá hygroskopicitě polyglykolů ani ničemu jinému, co bylo možné během záběhu pozorovat.



obr. 6-2 Vrstva viskózního maziva na keramickém disku.

Vliv molekulové hmotnosti byl pozorován při mazání pomocí PEG-ran-PG (12 000 g/mol). Oproti mazání kontaktů pomocí čistého PEG200 (aq) bylo tření s tímto nezředěným polyglykolem mnohem vyšší (obr. 5-54). Látka byla proto zředěna objemově 50/50. Měřením této směsi na vysokotlakém viskozimetru bylo zjištěno, že dochází k výraznému snížení závislosti na tlaku., což je vidět při porovnání s hodnotou čistého polyglykolu z literatury v tab. 6-1.

tab. 6-1 Tlakově viskózní součinitel pro PEG-ran-PG

	α_M^* (GPa ⁻¹)		
	25 °C	30 °C	40 °C
50 %		4,125	
100 % [69]	12,436[69]		11,569[69]

Přídavkem vody bylo tak jako v minulých případech docíleno více newtonského chování (viz obr. 5-55) a také značného snížení tření v závislosti na střední rychlosti (obr. 5-56), kdy lze říci že vysoká koncentrace polyglykolu umožňuje dosáhnout nižšího tření za velmi nízkých rychlostí.

První hypotézu lze potvrdit pouze pro směs maziva B-PEG200 (aq). Kdy v ostatních případech nedochází ke změně tření v čase a je možné uvažovat, že vysoká zatížení budou představovat problém za nízkých rychlostí tak, jak je to běžně dáno Stribeckovou křivkou.

Druhou hypotézu lze potvrdit, kdy především za vyšších zatížení a skluzů mohlo dojít ke změně v topografii povrchů, která se stala nezvratnou pro celý systém.

6.4 Silikonový olej

Závislost tření čistého silikonového oleje na rychlosti a skluzu je zobrazena na obr. 5-57 a je možné ji porovnat s měřením tření provedeném po záběhu v roztoku kyseliny sírové (obr. 5-58), kdy žádných výrazných rozdílů nebylo, kromě změny v tvaru a drsnosti kontaktní oblasti (obr. 5-59), možné pozorovat. Nejspíše to bylo způsobeno chybným předpokladem, že je možné použít téměř libovolný silikonový olej, tak jako tomu bylo v literatuře [54].

7 ZÁVĚR

Práce se zabývá problematikou mazaných makrokontaktů poskytujících velmi nízké tření (menší než 0,01) za podmínek částečného skluzu. Byly zhodnoceny dosud prozkoumané kombinace kontaktních materiálů a maziv, mezi které patří voda, kyselé roztoky, polymery a oleje, kdy bylo zjištěno, že nejčastěji lze nízkého tření dosáhnout při použití vody a jejích směsí.

Pro lepší pochopení dějů v kontaktech bylo zapotřebí navrhnout experimenty tak, aby bylo ideálně možné kontakt přímo pozorovat a měřit tloušťku mazacího filmu. To je možné při použití skleněných disků, díky nimž je umožněn přímý vhled do kontaktu a také je možné měřit tloušťku maziva v kontaktu pomocí optické interferometrie.

V práci je zkoumáno mazání glycerolem a jeho směsí s vodou, aplikovaný do kontaktu skleněného disku a ocelové kuličky. Byl zjištěn vliv přidané vody do kontaktu a reologické chování této směsi na formování tloušťky mazací vrstvy, ovlivnění viskozity, a tím také tření kapalinového filmu. Bylo zjištěno, že nedochází k tribochemickým reakcím tohoto maziva s kontaktními povrchy. Použitím směsi glycerolu s vodou dochází ke snížení tření, jako i viskozity takové směsi a také závislosti viskozity na tlaku. Díky tomu je umožněno výrazné snížení tření a tloušťky maziva při zachování oddělení povrchů.

Podobného chování bylo dosaženo i u další kombinace, kdy byla použita směs polyglykolu s vodou jako maziva mezi skleněným diskem a keramickou kuličkou. Polyglykol funguje obdobně, neboť má nízkou počáteční viskozitu, díky níž nedochází v kontaktu k velkému tření. Bylo zjištěno, že přidáním i relativně malého množství vody dochází k výraznému snížení tření. Přidání kyseliny borité ovlivňuje rychlost záběhu, avšak se nepotvrdila nutnost jeho přidání na dosažení velmi nízkého tření.

Keramické kontakty mazané vodou vyžadují výrazný záběh pro dosažení velmi nízkého tření. Tento režim může fungovat i v kontaktech s částečným skluzem.

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] ERDEMIR, Ali a Jean Michel MARTIN. *Superlubricity*. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 9780444527721.
- [2] CHEN, Zhe, Yuhong LIU, Shaohua ZHANG a Jianbin LUO. Controllable Superlubricity of Glycerol Solution via Environment Humidity. *Langmuir*. 2013, roč. 29, č. 38, s. 11924–11930. ISSN 0743-7463.
- [3] GE, Xiangyu, Jinjin LI a Jianbin LUO. Macroscale Superlubricity Achieved With Various Liquid Molecules: A Review. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019, roč. 5, č. February. ISSN 2297-3079.
- [4] LI, Jinjin a Jianbin LUO. Advancements in superlubricity. *Science China Technological Sciences*. 2013, roč. 56, č. 12, s. 2877–2887. ISSN 1674-7321.
- [5] ERDEMIR, Ali a Christophe DONNET. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006, roč. 39, č. 18, s. R311–R327. ISSN 0022-3727.
- [6] SEDMIDUBSKÝ, David, Vratislav FLEMR, Jiří SVOBODA a Radek CIBULKA. *Základy chemie pro bakaláře*. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2011. ISBN 978-80-7080-790-3.
- [7] ŠPERKA, Petr. *Prezentace z předmětu ZTR*. 2019
- [8] HOLMBERG, Kenneth, Helena RONKAINEN, Anssi LAUKKANEN a Kim WALLIN. Friction and wear of coated surfaces — scales, modelling and simulation of tribomechanisms. *Surface and Coatings Technology*. 2007, roč. 202, č. 4–7, s. 1034–1049. ISSN 02578972.
- [9] ERDEMIR, A. The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*. 2001, roč. 146–147, s. 292–297. ISSN 02578972.
- [10] ERDEMIR, Ali. Genesis of superlow friction and wear in diamondlike carbon films. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 11–12, s. 1005–1012. ISSN 0301679X.
- [11] CLAERBOUT, Victor E.P., Tomas POLCAR a Paolo NICOLINI. Superlubricity achieved for commensurate sliding: MoS₂ frictional anisotropy in silico. *Computational Materials Science*. 2019, roč. 163, č. December 2018, s. 17–23. ISSN 09270256.
- [12] MARTIN, J. M., C. DONNET, Th LE MOGNE a Th EPICIER. Superlubricity of molybdenum disulphide. *Physical Review B*. 1993, roč. 48, č. 14, s. 10583–10586. ISSN 0163-1829.
- [13] DONNET, C., J.M. MARTIN, Th LE MOGNE a M. BELIN. The origin of super-low friction coefficient of MoS₂ coatings in various environments. In: *Tribology Series*. 1994, s. 277–284. ISSN 01678922. Dostupné z: doi:
- [14] MARTIN, J.M., H. PASCAL, C. DONNET, Th LE MOGNE, J.L. LOUBET a Th EPICIER. Superlubricity of MoS₂: crystal orientation mechanisms. *Surface and Coatings Technology*. 1994, roč. 68–69, č. C, s. 427–432. ISSN 02578972.
- [15] LIU, Yanfei, Xinchun CHEN, Jinjin LI a Jianbin LUO. Enhancement of friction performance enabled by a synergetic effect between graphene oxide and molybdenum disulfide. *Carbon*. 2019, roč. 154, s. 266–276. ISSN 00086223.
- [16] MUTYALA, Kalyan C., Yimin A. WU, Ali ERDEMIR a Anirudha V. SUMANT. Graphene - MoS₂ ensembles to reduce friction and wear in DLC-Steel contacts. *Carbon*. 2019, roč. 146, s. 524–527. ISSN 00086223.
- [17] SÁNCHEZ-LÓPEZ, J.C, M. BELIN, C. DONNET, C. QUIRÓS a E. ELIZALDE. Friction mechanisms of amorphous carbon nitride films under variable environments:

- a triboscopic study. *Surface and Coatings Technology*. 2002, roč. 160, č. 2–3, s. 138–144. ISSN 02578972.
- [18] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG, Mingming DENG a Jianbin LUO. Investigation of the difference in liquid superlubricity between water- and oil-based lubricants. *RSC Advances*. 2015, roč. 5, č. November, s. 63827–63833.
- [19] FÖRST, Petra, Franz WERNER a Antonio DELGADO. The viscosity of water at high pressures - especially at subzero degrees centigrade. *Rheologica Acta*. 2000, roč. 39, č. 6, s. 566–573. ISSN 0035-4511.
- [20] KLEIN, Jacob, Yoichiro KAMIYAMA, Hisae YOSHIZAWA, Jacob N. ISRAELACHVILI, Glenn H. FREDRICKSON, Philip PINCUS a Lewis J. FETTERS. Lubrication forces between surfaces bearing polymer brushes. *Macromolecules*. 1993, roč. 26, č. 21, s. 5552–5560. ISSN 0024-9297.
- [21] FANG, Yanfei, Liran MA a Jianbin LUO. Modelling for water-based liquid lubrication with ultra-low friction coefficient in rough surface point contact. *Tribology International*. 2020, roč. 141, č. August 2019, s. 105901. ISSN 0301679X.
- [22] XU, Junguo a Koji KATO. Formation of tribochemical layer of ceramics sliding in water and its role for low friction. *Wear*. 2000, roč. 245, č. 1–2, s. 61–75. ISSN 00431648.
- [23] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG, Mingming DENG a Jianbin LUO. Reduction of friction stress of ethylene glycol by attached hydrogen ions. *Scientific Reports*. 2014, roč. 4, s. 1–6. ISSN 20452322.
- [24] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠIŠKOVÁ. *Co je co v povrchové a koloidní chemii*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, nedatováno.
- [25] BROWN, Matthew A., Zareen ABBAS, Armin KLEIBERT, Richard G. GREEN, Alok GOEL, Sylvio MAY a Todd M. SQUIRES. Determination of Surface Potential and Electrical Double-Layer Structure at the Aqueous Electrolyte-Nanoparticle Interface. *Physical Review X*. 2016, roč. 6, č. 1, s. 011007. ISSN 2160-3308.
- [26] DENG, Mingming, Jinjin LI, Chenhui ZHANG, Jing REN, Ningning ZHOU a Jianbin LUO. Investigation of running-in process in water-based lubrication aimed at achieving super-low friction. *Tribology International*. 2016, roč. 102, s. 257–264. ISSN 0301679X.
- [27] HO-CHIEH WONG, Noritsugu UMEHARA a Koji KATO. The effect of surface roughness on friction of ceramics sliding in water. *Wear*. 1998, roč. 218, č. 2, s. 237–243. ISSN 00431648.
- [28] AMUTHA RANI, D., Y. YOSHIZAWA, H. HYUGA, K. HIRAO a Y. YAMAUCHI. Tribological behavior of ceramic materials (Si₃N₄, SiC and Al₂O₃) in aqueous medium. *Journal of the European Ceramic Society*. 2004, roč. 24, č. 10–11, s. 3279–3284. ISSN 09552219.
- [29] CHEN, Ming, Koji KATO a Koshi ADACHI. The comparisons of sliding speed and normal load effect on friction coefficients of self-mated Si₃N₄ and SiC under water lubrication. *Tribology International*. 2002, roč. 35, č. 3, s. 129–135. ISSN 0301679X.
- [30] OLIVEIRA, Roberto Pereira De, Eliel Dos SANTOS, Tiago COUSSEAU a Amilton SINATORA. Effect of pH on wear and friction of silicon nitride sliding against alumina in water. *Tribology International*. 2015, roč. 90, s. 356–361. ISSN 0301679X.
- [31] CHEN, Ming, Koji KATO a Koshi ADACHI. Friction and wear of self-mated SiC and Si₃N₄ sliding in water. *Wear*. 2001, roč. 250, č. 1–12, s. 246–255. ISSN 00431648.
- [32] GATES, Richard S. a Stephen M. HSU. Tribochemistry Between Water and Si₃N₄ and SiC: Induction Time Analysis. *Tribology Letters*. 2004, roč. 17, č. 3, s. 399–407.

- ISSN 1023-8883.
- [33] CHEN, Ming, Koji KATO a Koshi ADACHI. The difference in running-in period and friction coefficient between self-mated Si₃N₄ and SiC under water lubrication. *Tribology Letters*. 2001, roč. 11, č. 1, s. 23–28. ISSN 10238883.
 - [34] LIN, Bin, Mei DING, Tianyi SUI, Yuxiao CUI, Shuai YAN a Xibei LIU. Excellent Water Lubrication Additives for Silicon Nitride To Achieve Superlubricity under Extreme Conditions. *Langmuir*. 2019, roč. 35, č. 46, s. 14861–14869. ISSN 0743-7463.
 - [35] GUO, Fei, Zixi WANG, Ying LIU, Yuming WANG a Yu TIAN. Investigation of ultra-low friction between self-mated Si₃N₄ in water after running-in. *Tribology International*. 2017, roč. 115, č. June, s. 365–369. ISSN 0301679X.
 - [36] CUI, Yuxiao, Mei DING, Tianyi SUI, Wei ZHENG, Guochao QIAO, Shuai YAN a Xibei LIU. Role of nanoparticle materials as water-based lubricant additives for ceramics. *Tribology International*. 2020, roč. 142, č. July 2019, s. 105978. ISSN 0301679X.
 - [37] DING, Mei, Bin LIN, Tianyi SUI, Anying WANG, Shuai YAN a Qiang YANG. The excellent anti-wear and friction reduction properties of silica nanoparticles as ceramic water lubrication additives. *Ceramics International*. 2018, roč. 44, č. 12, s. 14901–14906. ISSN 02728842.
 - [38] MÜLLER, Markus T., Xiaoping YAN, Seunghwan LEE, Scott S. PERRY a Nicholas D. SPENCER. Lubrication properties of a brushlike copolymer as a function of the amount of solvent absorbed within the brush. *Macromolecules*. 2005, roč. 38, č. 13, s. 5706–5713. ISSN 00249297.
 - [39] MÜLLER, Markus, Seunghwan LEE, Hugh A. SPIKES a Nicholas D. SPENCER. The Influence of Molecular Architecture on the Macroscopic Lubrication Properties of the Brush-Like Co-polyelectrolyte Poly(L-lysine)-g-poly(ethylene glycol) (PLL-g-PEG) Adsorbed on Oxide Surfaces. *Tribology Letters*. 2003, roč. 15, č. 4, s. 395–405. ISSN 1023-8883.
 - [40] HARTUNG, Whitney. *Aqueous Lubrication of Ceramics by means of presented by*. B.m., 2009. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich. Dostupné z: doi:
 - [41] ZHANG, Caixia, Zhifeng LIU, Yuhong LIU, Jing REN, Qiang CHENG, Congbin YANG a Ligang CAI. Novel tribological stability of the superlubricity poly(vinylphosphonic acid) (PVPA) coatings on Ti₆Al₄V: Velocity and load independence. *Applied Surface Science*. 2017, roč. 392, s. 19–26. ISSN 01694332.
 - [42] MÜLLER, Markus T., Xiaoping YAN, Seunghwan LEE, Scott S. PERRY a Nicholas D. SPENCER. Preferential Solvation and Its Effect on the Lubrication Properties of a Surface-Bound, Brushlike Copolymer. *Macromolecules*. 2005, roč. 38, č. 9, s. 3861–3866. ISSN 0024-9297.
 - [43] GE, Xiangyu, Jinjin LI, Chenhui ZHANG a Jianbin LUO. Liquid Superlubricity of Polyethylene Glycol Aqueous Solution Achieved with Boric Acid Additive. *Langmuir*. 2018, roč. 34, č. 12, s. 3578–3587. ISSN 0743-7463.
 - [44] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG a Jianbin LUO. Superlubricity Behavior with Phosphoric Acid–Water Network Induced by Rubbing. *Langmuir*. 2011, roč. 27, č. 15, s. 9413–9417. ISSN 0743-7463.
 - [45] SJÖBERG, Staffan. Silica in aqueous environments. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1996, roč. 196, s. 51–57. ISSN 00223093.
 - [46] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG a Jianbin LUO. Superlubricity Achieved with Mixtures of Polyhydroxy Alcohols and Acids. *Langmuir*. 2013, roč. 29, č. 17, s. 5239–5245. ISSN 0743-7463.
 - [47] XIAO, Chen, Jinjin LI, Jian GONG, Lei CHEN, Jiyang ZHANG, Linmao QIAN a

- Jianbin LUO. Gradual degeneration of liquid superlubricity: Transition from superlubricity to ordinary lubrication, and lubrication failure. *Tribology International*. 2019, roč. 130, č. September 2018, s. 352–358. ISSN 0301679X.
- [48] BOUCHET, I. De Barros, C. MATTA, Th LE-MOGNE, J. Michel MARTIN, Q. ZHANG, W. GODDARD, M. KANO, Y. MABUCHI a J. YE. Superlubricity mechanism of diamond-like carbon with glycerol. Coupling of experimental and simulation studies. *Journal of Physics: Conference Series*. 2007, roč. 89, č. 1. ISSN 17426596.
- [49] MATTA, C., L. JOLY-POTTUZ, M. I. DE BARROS BOUCHET, J. M. MARTIN, M. KANO, Qing ZHANG a W. A. GODDARD. Superlubricity and tribochemistry of polyhydric alcohols. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 2008, roč. 78, č. 8. ISSN 10980121.
- [50] ZHANG, Chen-Hui, Zhi-Zuo MA, Jian-Bin LUO, Xin-Chun LU a Shi-Zhu WEN. Superlubricity of a Mixed Aqueous Solution. *Chinese Physics Letters*. 2011, roč. 28, č. 5, s. 056201. ISSN 0256-307X.
- [51] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG, Liran MA, Yuhong LIU a Jianbin LUO. Superlubricity Achieved with Mixtures of Acids and Glycerol. *Langmuir*. 2013, roč. 29, č. 1, s. 271–275. ISSN 0743-7463.
- [52] LONG, Yun, Maria Isabel De Barros BOUCHET, Ton LUBRECHT, Tasuku ONODERA a Jean Michel MARTIN. Superlubricity of glycerol by self-sustained chemical polishing. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9, č. 1, s. 1–13. ISSN 20452322.
- [53] ZHOU, Xiaoxue, Bin LIN, Shuai YAN, Anying WANG, Xiaofeng ZHANG a Shidong GE. Influence of temperature and concentration on tribological properties of silicon nitride in glycerol aqueous solution. *Ceramics International*. 2016, roč. 42, č. 3, s. 3786–3796. ISSN 02728842.
- [54] LI, Jinjin, Chenhui ZHANG, Mingming DENG a Jianbin LUO. Superlubricity of silicone oil achieved between two surfaces by running-in with acid solution. *RSC Advances*. 2015, roč. 5, č. 39, s. 30861–30868. ISSN 2046-2069.
- [55] DE BARROS BOUCHET, Maria Isabel, Jean Michel MARTIN, José AVILA, Makoto KANO, Kentaro YOSHIDA, Takeshi TSURUDA, Shandan BAI, Yuji HIGUCHI, Nobuki OZAWA, Momoji KUBO a Maria C. ASENSIO. Diamond-like carbon coating under oleic acid lubrication: Evidence for graphene oxide formation in superlow friction. *Scientific Reports*. 2017, roč. 7, č. 1, s. 46394. ISSN 2045-2322.
- [56] GE, Xiangyu, Jinjin LI, Hongdong WANG, Chenhui ZHANG, Yuhong LIU a Jianbin LUO. Macroscale superlubricity under extreme pressure enabled by the combination of graphene-oxide nanosheets with ionic liquid. *Carbon*. 2019, roč. 151, s. 76–83. ISSN 00086223.
- [57] BO, ZHANG a Noritsugu UMEHARA. Hydrodynamic Lubrication Theory Considering Electric Double Layer for Very Thin Water Film Lubrication of Ceramics. *JSME International Journal Series C*. 1998, roč. 41, č. 2, s. 285–290. ISSN 1347-538X.
- [58] *Metodika hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů (platná pro léta 2013 až 2016)*. 2015. Dostupné z: <https://www.vyzkum.cz/FrontClanek.aspx?idsekce=685899>
- [59] ŠNEVAJS, Matěj. *Snižování tření mazaných kontaktů změnou tepelné vodivosti materiálů*. B.m., 2019. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/%0Adetail/117548>
- [60] Mini-Traction Machine. *PCS Instruments*. 2017 [vid. 6. duben 2020]. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2017/01/MTM2-brochure-2017-Publisher-version-1.pdf>

- [61] MA, Liran a Jianbin LUO. Thin film lubrication in the past 20 years. *Friction*. 2016, roč. 4, č. 4, s. 280–302. ISSN 2223-7690.
- [62] ASSOCIATION, Glycerine Producers. *Physical properties of glycerine and its solutions*. New York: Glycerine Producers Association, 1963. ISBN 0803114281.
- [63] BAIR, Scott. *High Pressure Rheology for Quantitative Elastohydrodynamics*. Second Edi. Atlanta: Matthew Deans, 2019. ISBN 978-0-444-64156-4.
- [64] STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. Fourth Edi. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [65] ZHU, Cong Rong, Bing Hai LV a Ju Long YUAN. Research on Mechanism of Chemical Mechanical Polishing Process for Silicon Nitride Balls with CeO₂ Abrasive. *Advanced Materials Research*. 2008, roč. 53–54, s. 131–136. ISSN 1662-8985.
- [66] KVARDA, Daniel, Radovan GALAS, Milan OMASTA, Lu bing SHI, Haohao DING, Wen jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Asperity-based model for prediction of traction in water-contaminated wheel-rail contact. *Tribology International*. 2021, roč. 157, č. November 2020, s. 106900. ISSN 0301679X.
- [67] LIU, Wenrui, Hongdong WANG, Yuhong LIU, Jinjin LI, Ali ERDEMIR a Jianbin LUO. Mechanism of Superlubricity Conversion with Polyalkylene Glycol Aqueous Solutions. *Langmuir*. 2019, roč. 35, č. 36, s. 11784–11790. ISSN 0743-7463.
- [68] GE, Xiangyu, Tobias HALMANS, Jinjin LI a Jianbin LUO. Molecular behaviors in thin film lubrication—Part three: Superlubricity attained by polar and nonpolar molecules. *Friction*. 2019, roč. 7, č. 6, s. 625–636. ISSN 2223-7690.
- [69] BAIR, Scott. Reference liquids for quantitative elastohydrodynamics: selection and rheological characterization. *Tribology Letters*. 2006, roč. 22, č. 2, s. 197–206. ISSN 1023-8883.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

(-OH)	hydroxylová skupina
A	parametr A Vogelovy rovnice
a-C	amorfní bezvodíkové DLC
a-C:H	amorfní uhlovodíkové DLC
AFM	mikroskopo atomárních sil
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý, safír či rubín
B	parametr B Vogelovy rovnice
BL	mezný režim mazání (boundary lubrication)
B-PEG200 (aq)	vodný roztok kyseliny borité a PEG200
C	parametr C Vogelovy rovnice
C:H	
CN _x	uhlíkatodusíkatá sloučenina
CoF	součinitel tření
DLC	diamantový povlak (diamond like carbon)
EFTEM	elektronový mikroskop (Energy-filtered transmission electron microscopy)
EHD	elastohydrodynamický
EHD	elastohydrodynamický
EHD5	optický tribometr s označením EHD5
EHL	elastohydrodynamický režim
FeOOH	hydroxyoxid železitý (oxyhydroxid železitý)
GMO	glycerol mono oleát
GMO	glycerol-monooleát
h	tloušťka mazacího filmu
H ₂ SO ₄	kyselina sírová
H ₃ PO ₄	kyselina trihydrogenfosforečná
HCl	kyselina chlorovodíková

hm. %	hmotnostní procento
in situ	vyjadřuje zkoumání „na místě“
ML	smíšený režim mazání
MoS ₂	disulfid molybdeničitý (molyka)
MTM	mini traction machine
obj.	objemové procento
obr.	obrázek
PAO+GMO	směs polyalfaolefinu s glycerol mono oleátem
PEG	polyetylglykol
PEG200	polyetylglykol s molekulovou hmotností 200 g/mol
PEG-ran-PG	polyetylen – ran – polypropylen
pin-on-disc	konfigurace tribometru s kontaktem kulička/disk
PLL-g-PEG	Poly(L-Lysine) – gran – Polyethyleneglycol
PTFE	polytetrafluorethylen (teflon)
Ra	střední aritmetická úchylka drsnosti profilu
RH (%)	relativní vzdušná vlhkost
Rq ₁	průměrná kvadratická úchylka drsnosti kuličky
Rq ₂	průměrná kvadratická úchylka drsnosti disku
RTIL	iontové kapaliny (Room Temperature Ion
Sa	střední aritmetická úchylka drsnosti povrchu (plošná)
Si ₃ N ₄	nitrid křemičitý
SiC	karbid křemičitý
SiO ₂	oxid křemičitý
sp ²	hybridizace orbitalu typu sp ² (tvar – rovnostranný trojúhelník)
sp ³	hybridizace orbitalu typu sp ³ (tvar – tetraedr)
SRR	poměr skluzu ku valení (slide-to-roll ratio)
SRV	multifunkční tribometr pro dynamické testy
tab.	tabulka
ta-C	tetraedrické amorfni bezvodíkové DLC
ta-C:H	tetraedrické amorfni uhlovodíkové DLC

TFL	režim velmi tenkých filmů (Thin Film Lubrication)
tj.	to jest
UHV	velmi vysoké vacuum
UMT	univerzální mikrotribometr
v_d	obvodová rychlost disku v místě kontaktu
v_k	obvodová rychlost kuličky v místě kontaktu
α_M^*	tlakově-viskózní součinitel dle McEwenovy regresní rovnice
α_R^*	tlakově-viskózní součinitel dle Roelandsovy regresní rovnice
Δ_M	tlakově-viskózní součinitel dle McEwenovy regresní rovnice
Δ_R	tlakově-viskózní součinitel dle Roelandsovy regresní rovnice
η	viskozita
Λ	parametr mazání

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1	Vrstvy oxyhydroxidu železa vzniklé během záběhu v kontaktu ocel/ocel [2]	14
obr. 2-1	Ternární fázový diagram uhlíku podobnému diamantu [5]	16
obr. 2-2	Vliv materiálu a tloušťky povrchu na tření a opotřebení [8]	17
obr. 2-3	Režimy mazání způsobující superlubricitu [20–23]	19
obr. 2-4	Elektrická dvojvrstva s vytvořenou hydratovanou koloidální křemíkovou vrstvou [22]	20
obr. 2-5	Porovnání závislosti součinitele tření na drsnosti mezi výpočtem a experimentem [21]	20
obr. 2-6	Mechanismus navázání polymerů na kontaktní těleso [42]	22
obr. 2-7	Mechanismus vzniku superlubricity [46]	23
obr. 2-8	Závislost součinitele tření na čase [52]	26
obr. 2-9	Záběh v kyselém prostředí pro silikonový olej o viskozitě 100 mPa [54]	27
obr. 2-10	Záběh kontaktu mazaného kyselinou olejovou při 50 mm/s [55]	27
obr. 4-1	Schéma tribometru EHD5 [59]	34
obr. 4-2	Zařízení UMT [60]	35
obr. 5-1	Stribeckův test pro čistý glycerol za SRR 0.	38
obr. 5-2	Toková křivka pro čistý glycerol a Stribeckova data pro různá SRR.	39
obr. 5-3	Toková křivka roztoku glycerolu a Stribeckova křivka pro různá SRR.	40
obr. 5-4	Tloušťka roztoku glycerolu v závislosti na střední rychlosti	40
obr. 5-5	Toková křivka roztoku glycerolu a Stribeckova křivka při nižší drsnosti.	41
obr. 5-6	Tloušťka roztoku glycerolu v závislosti na střední rychlosti (opakované měření).	41
obr. 5-7	Toková a Stribeckova křivka roztoku glycerolu při vyšším zatížení.	42
obr. 5-8	Tloušťka kontaktu mazaného roztokem glycerolu při vyšším zatížení.	42
obr. 5-9	Stribeckovy křivky pro SRR 0,5 (vlevo) a pro SRR -0,5 (vpravo).	43
obr. 5-10	Časový test (UMT Bruker).	43
obr. 5-11	Topografie povrchů po záběhu ve vodě.	44
obr. 5-12	Krátkodobý časový test (EHD5).	44
obr. 5-13	Dlouhodobý časový test (EHD5).	45

obr. 5-14	Stribeckův test po 3,5 hod. (vlevo) a na konci časového testu (vpravo).	46
obr. 5-15	Kontaktní povrchy po 5hodinovém testu.	46
obr. 5-16	Časový test vodou mazaného kontaktu za různých zatěžovacích podmínek.	47
obr. 5-17	Stribeckův test při zatížení 70 N.	47
obr. 5-18	Kontaktní povrchy po 2. časovém záběhu.	48
obr. 5-19	Závislost viskozity na teplotě pro PEG200.	48
obr. 5-20	Trakční křivka čistého PEG200 pro různé rychlosti.	49
obr. 5-21	Toková a Stribeckova křivka pro PEG200.	50
obr. 5-22	Centrální a minimální tloušťka filmu.	50
obr. 5-23	Toková a Stribeckova křivka pro vyšší zatížení kontaktu mazaného PEG200.	51
obr. 5-24	Centrální a minimální tloušťka filmu pro dvojnásobné zatížení.	51
obr. 5-25	Závislost viskozity na teplotě pro PEG200 (82 %).	52
obr. 5-26	Trakční křivka vodného roztoku PEG200 (82 %) pro různé rychlosti.	52
obr. 5-27	Vliv zatížení a rychlosti na centrální tloušťku mazacího filmu.	53
obr. 5-28	Trakční křivka vodného roztoku PEG200 (64 %) pro různé rychlosti.	53
obr. 5-29	Plná Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) za záporného (vlevo) a kladného (vpravo) SRR.	54
obr. 5-30	Povrchy kontaktních těles po měření Stribeckovy křivky za SRR -0,5 (vlevo) a SRR 0,5 (vpravo).	54
obr. 5-31	Stribeckovy křivky porovnávající vliv přidané vody na tření.	54
obr. 5-32	Toková křivka pro vodný roztok PEG200 (64 %).	55
obr. 5-33	Vliv střední rychlosti na tloušťku filmu pro PEG200 (64 %).	55
obr. 5-34	Toková a Stribeckova křivka pro dvojnásobně zatížený kontakt mazaný roztokem PEG200 (64 %).	56
obr. 5-35	Vliv rychlosti na tloušťku filmu pro PEG200 (64 %) při vyšším zatížení.	56
obr. 5-36	Trakční a Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) s přidavkem kyseliny borité (4mM).	57
obr. 5-37	Trakční a Stribeckova křivka pro roztok PEG200 (64 %) s přidavkem kyseliny borité (4mM) za zvýšeného zatížení.	58
obr. 5-38	Povrchy kontaktních těles po experimentech při 78 N.	58

obr. 5-39	Závislost viskozity na teplotě pro B-PEG200 (aq).	58
obr. 5-40	Závislost centrální tloušťky maziva na rychlosti s vlivem zatížení.	59
obr. 5-41	Časový test kontaktu mazaného pomocí B-PEG200 (aq) včetně snímků kontaktní oblasti.	59
obr. 5-42	Trakční a Stribeckova křivka pro kontakt mazaný B-PEG200 (aq) po 8hodinovém záběhu.	60
obr. 5-43	Povrch kontaktních těles po dlouhodobém záběhu v B-PEG200 (aq).	60
obr. 5-44	Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 1.	61
obr. 5-45	Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 1.	61
obr. 5-46	Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 2.	62
obr. 5-47	Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 2.	62
obr. 5-48	Rozdíl mezi měřeními provedeným po záběhu č. 1 (vlevo) a po záběhu č. 2 (vpravo).	63
obr. 5-49	Časový test B-PEG (aq) 3hodinový č. 3.	63
obr. 5-50	Stribeckův test po 3hodinovém záběhu č. 3.	64
obr. 5-51	Trakční a Stribeckova křivka naměřené po 3hodinovém záběhu.	64
obr. 5-52	Závislost tloušťky maziva na rychlosti po 3hodinovém záběhu č. 3.	65
obr. 5-53	Kontaktní povrchy po záběhu č. 3 a následných testech.	66
obr. 5-54	Trakční křivka pro čistý PEG-ran-PG.	66
obr. 5-55	Toková křivka pro čistý PEG-ran-PG (vlevo) a jeho směs s vodou (vpravo).	67
obr. 5-56	Stribeckova křivka pro různé koncentrace PEG-ran-PG.	67
obr. 5-57	Trakční a Stribeckova křivka pro silikonový olej bez záběhu v kyselém prostředí.	68
obr. 5-58	Záběhový test a pozáběhové testy.	68
obr. 5-59	Vliv záběhu v kyselém prostředí na kontaktní oblast.	69
obr. 5-60	Optické snímky drsnosti povrchů po záběhu v roztoku H ₂ SO ₄ .	69
obr. 5-61	Tloušťka filmu silikonového oleje s vlivem zatížení	69
obr. 6-1	Vrstva maziva na ocelové kuličce.	71
obr. 6-2	Vrstva viskózního maziva na keramickém disku.	78

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1	Přehled dosažitelného součinitele tření pro materiály suché lubricity [10, 13, 17]	18
tab. 2-2	Kombinace materiálů a podstatné parametry pro dosažení superlubricity při mazání vodou	21
tab. 4-1	Vybrané kontaktní kombinace a některé provozní parametry časových testů [18, 28, 43, 48]	36
tab. 5-1	Tlakově viskózní součinitel pro směs glycerolu za různých teplot.	39
tab. 5-2	Tlakově viskózní součinitel pro PEG200.	48
tab. 5-3	Index lomu použitých maziv se složkou PEG200.	65
tab. 5-4	Tlakově viskózní součinitel pro PEG-ran-PG (50 %).	66
tab. 6-1	Tlakově viskózní součinitel pro PEG-ran-PG	78

PŘÍLOHY

Tabulka tlakově viskózních součinitelů některých použitých maziv.

	B-PEG200 (aq)	PEG200	Glycerol 80 obj. %	PEG-ran- PG 50 obj. %
30 °C	α_M^* (GPa ⁻¹)	0,904	7,843	3,545
	Δ_M (%)	1,64	0,09	1,17
	α_R^* (GPa ⁻¹)	4,089	9,606	5,837
	Δ_R (%)	2,11	2,22	3,46
	α_M^* (GPa ⁻¹)	0,774	6,520	2,903
50 °C	Δ_M (%)	2,80	0,28	0,50
	α_R^* (GPa ⁻¹)	3,904	8,345	5,441
	Δ_R (%)	3,74	2,11	2,45
	α_M^* (GPa ⁻¹)		5,759	2,576
70 °C	Δ_M (%)		0,45	0,90
	α_R^* (GPa ⁻¹)		7,821	5,103
	Δ_R (%)		1,93	1,29