



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TŘENÍ MEZI DLC POVLAKY V MEZNÉM REŽIMU MAZÁNÍ

FRICTION BETWEEN DLC COATINGS IN BOUNDARY LUBRICATION REGIME

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michael Koutný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Michael Koutný**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

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:

Tření mezi DLC povlaky v mezném režimu mazání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

DLC povlaky (diamond like carbon) vynikají svými mechanickými vlastnostmi a umožňují snížit tření a opotřebení. Existuje více druhů dle struktury a příměsí dalších prvků. Díky časově a cenově efektivní výrobě mají již dnes praktickou použitelnost v konstrukci mnoha strojů a zařízení. Zároveň mají potenciál se stát novým řešením s nižším třením i v situaci nízkých rychlostí pohybu součástí, kdy jsou formovány tenké mazací filmy.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: MŠMT

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně popsat vliv modifikátorů tření a provozních podmínek na tření v kontaktech DLC povlaků pracujících v mezném a smíšeném režimu mazání. Práce přispívá k poznání funkce směsí aditiv s mazivy dovolující dosažení superlubricity.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled tribologie DLC povlaků a modifikátorů tření,
- navrhnout experimenty a vzorky pro testování,
- realizovat měření tření, topografie povrchu a učinit závěry.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

YIN, X. et al. Nanostructure of Superlubricating Tribofilm Based on Friction-Induced a-C: H Films under Various Working Conditions: A Review of Solid Lubrication. Online. Lubricants. 2024, roč. 12, č. 2. ISSN 2075-4442.

YU, Q., CHEN, X., ZHANG, Ch. a LUO, J. Influence Factors on Mechanisms of Superlubricity in DLC Films: A Review. Online. Frontiers in Mechanical Engineering. 2020, roč. 6. ISSN 2297-3079.

LIN, Y., LIU, X., YANG, J. a ZHANG, X. Solid/liquid hybrid lubrication behaviors of amorphous carbon film coupling with nonpolar and polar base oils. Online. Diamond and Related Materials. 2024, roč. 149. ISSN 09259635.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá experimentálním studiem tribologického chování DLC povlaků v podmínkách mezného až smíšeného režimu mazání se zaměřením na vliv mastných kyselin jako aditiv do základového maziva PEG400. Cílem práce bylo objasnit vliv typu DLC povlaku, složení maziva, provozní teploty a povrchové topografie na součinitel tření, opotřebení, změnu topografie povrchu a formování mazacího filmu. Experimentální část byla realizována na tribologických zařízeních RTEC SMT-5000, PCS MTM a UMT Bruker v konfiguracích čistého posuvně-vratného skluzu a valení se skluzem. Součástí práce bylo měření součinitele tření, hodnocení změny topografie povrchu a opotřebení pomocí optické profilometrie a optické sledování mazacího filmu během tribologického testu.

Výsledky ukázaly, že tribologické chování DLC povlaků není určeno pouze typem povlaku nebo maziva, ale především jejich kombinací s kontaktní kinematikou a provozními podmínkami. Přídavek mastných kyselin do PEG400 nevedl k univerzálnímu zlepšení tribologického chování, výraznější účinek byl však pozorován ve valivě-skluzovém kontaktu. U kombinace 100Cr6/a-C:H snížily směsi s mastnými kyselinami součinitel tření až o 60 % oproti čistému PEG400. Zvýšení teploty na 60 °C se neprokázalo jako primární faktor vedoucí k dalšímu výraznému snížení tření. Z hlediska typu povlaku se jako stabilnější systém projevil vodíkový a-C:H, přičemž kombinace a-C:H/a-C:H dosahovala v čistém skluzu oproti ta-C/ta-C přibližně o dva řády nižšího opotřebení, až na úroveň 10^{-9} mm³/N·m. Optické pozorování kontaktu potvrdilo rozdíly ve schopnosti jednotlivých maziv formovat mazací film a doplnilo tribologická data o přímou informaci z kontaktní oblasti. Přínos práce spočívá v komplexním porovnání stejných materiálových a mazacích systémů v odlišných kinematických režimech a v propojení tření, opotřebení, změny topografie povrchu a optického sledování mazacího filmu.

KLÍČOVÁ SLOVA

DLC povlaky, mezné mazání, mastné kyseliny, součinitel tření, mazací film

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the experimental study of the tribological behaviour of DLC coatings under boundary-to-mixed lubrication conditions, with a focus on the effect of fatty acids used as additives in the PEG400 base lubricant. The aim of the thesis was to clarify the influence of the DLC coating type, lubricant composition, operating temperature and surface topography on the coefficient of friction, wear, changes in surface topography and lubricant film formation. The experimental part was carried out using RTEC SMT-5000, PCS MTM and Bruker UMT tribological devices in pure reciprocating sliding and rolling-sliding contact configurations. The work included measurement of the coefficient of friction, evaluation of surface topography changes and wear using optical profilometry, and optical observation of lubricant film formation during tribological testing.

The results showed that the tribological behaviour of DLC coatings is not determined only by the coating type or lubricant, but mainly by their combination with contact kinematics and operating conditions. The addition of fatty acids to PEG400 did not result in a universal improvement of tribological behaviour; however, a more pronounced effect was observed in rolling-sliding contact. For the 100Cr6/a-C:H combination, mixtures containing fatty acids reduced the coefficient of friction by up to 60% compared with pure PEG400. Increasing the temperature to 60 °C was not shown to be the primary factor leading to a further significant reduction in friction. In terms of coating type, hydrogenated a-C:H proved to be the more stable system. In pure sliding, the a-C:H/a-C:H combination achieved approximately two orders of magnitude lower wear than ta-C/ta-C, reaching the level of $10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Optical observation of the contact confirmed differences in the ability of individual lubricants to form a lubricant film and supplemented the tribological data with direct information from the contact area. The main contribution of the thesis lies in the comprehensive comparison of identical material and lubricant systems under different kinematic regimes and in linking friction, wear, changes in surface topography and optical observation of lubricant film formation.

KEYWORDS

DLC coatings, boundary lubrication, fatty acids, coefficient of friction, lubricant film

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUTNÝ, Michael. *Tření mezi DLC povlaky v mezném režimu mazání*. Online, diplomová práce. Ing. Petr ŠPERKA Ph.D. (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/174055>. [cit. 2026-05-22].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu, Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné rady a neocenitelnou podporu při zpracování této práce. Velmi si vážím jeho trpělivosti, vstřícnosti a podnětných připomínek, které významně přispěly ke kvalitě předložené práce. Bez jeho vedení by tato práce nemohla dosáhnout současné úrovně. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich dlouhodobou podporu, pochopení a motivaci v průběhu celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že 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.

Při zpracování práce byly v omezené míře využity nástroje umělé inteligence (konkrétně ChatGPT), a to v souladu s platnými směrnici Vysoké učení technické v Brně týkajícími se využívání generativní umělé inteligence při tvorbě závěrečných prací. Tyto nástroje nebyly použity pro generování odborného nebo vědeckého obsahu práce ani tvorbu závěrů. Sloužily pouze jako podpůrný prostředek při jazykové a formální úpravě textu, zejména ke kontrole gramatiky, stylistiky, slovosledu a srozumitelnosti formulací. Veškerý odborný obsah, interpretace výsledků a závěry jsou původní prací autora.

.....

Podpis autora

OBSAH

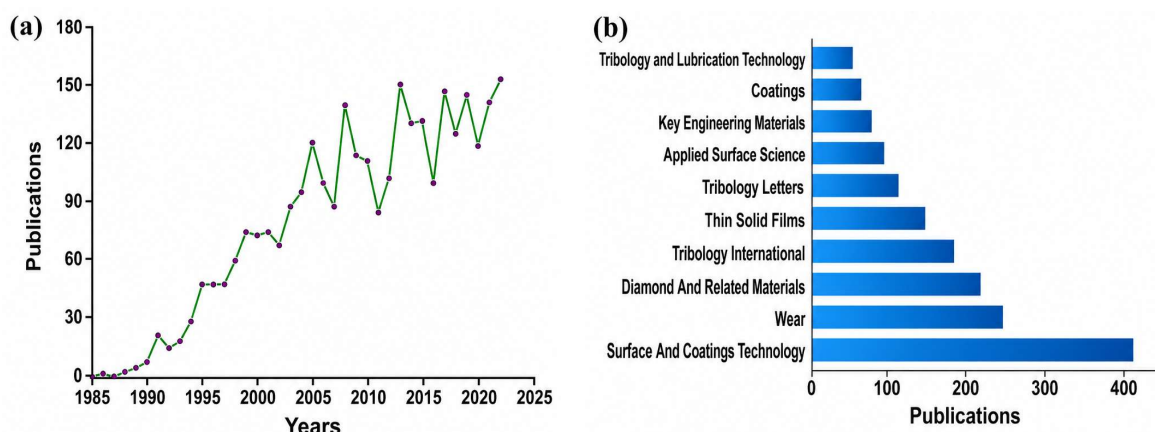
1	ÚVOD	11
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1	Rešeršní metody	13
2.2	Kritická rešerše	14
2.2.1	DLC povlaky	14
2.2.2	Mezné a smíšené mazání u DLC povlaků	16
2.2.3	Dosažení snížení součinitele tření	17
2.2.4	Opotřebení	19
2.2.5	Superlubricita jako teoretické východisko	22
2.2.6	Maziva a aditiva vykazující superlubricitu	24
2.2.7	Vliv provozních podmínek a topografie povrchu	27
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	28
2.4	Mezera v poznání	32
3	CÍLE PRÁCE	34
3.1	Výzkumné otázky	34
3.2	Cíle výzkumu	34
3.3	Hypotézy	35
4	MATERIÁL A METODY	37
4.1	Metodika	37
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	38
4.3	Materiál a testovací podmínky	41
4.3.1	Materiál a maziva	41
4.3.2	Stanovení provozních podmínek	43
4.3.3	Koncepce experimentálního plánu	46
4.4	Metody	47
4.4.1	Příprava vzorů	47
4.4.2	Příprava maziv	48
4.4.3	Topografie povrchu	49
4.4.4	Součinitel tření	50
4.4.5	Opotřebení povrchu	51
4.4.6	Měření tloušťky mazacího filmu	52
4.5	Testované predikce	53
5	VÝSLEDKY	54

5.1	Vývoj a ladění měřicích metod	54
5.2	SMT-5000 - Čistý skluz (první fáze)	55
5.2.1	Součinitel tření	56
5.2.2	Změna topografie povrchu	58
5.2.3	Opotřebení	60
5.3	MTM – Valení se skluzem (druhá fáze)	63
5.3.1	Součinitel tření	63
5.3.2	Změna topografie povrchu	64
5.3.3	Stribeckovy křivky	66
5.4	UMT Bruker – Čistý skluz s optikou (třetí fáze)	68
5.4.1	Součinitel tření	68
5.4.2	Změna topografie povrchu	71
5.4.3	Opotřebení	72
5.4.4	Optické pozorování mazacího filmu	74
6	DISKUZE	79
6.1	Interpretace výsledků	79
6.1.1	Vymezení stavu před a po záběhu	79
6.1.2	Porovnání systémů čistého skluzu a valení se skluzem	80
6.1.3	Porovnání metod a přenositelnost výsledků mezi zařízeními	81
6.1.4	Vliv maziva a mastných kyselin	82
6.1.5	Vliv teploty a mazacího režimu	83
6.1.6	Vliv typu DLC povlaku na třecí chování	85
6.1.7	Vztah mezi třením, opotřebením a změnou kontaktního tlaku	86
6.1.8	Optické pozorování mazacího filmu	87
6.2	Omezení práce	88
6.3	Směry budoucího výzkumu	92
6.4	Verifikace hypotéz	93
7	ZÁVĚR	96
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	98
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	99
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	103
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	107
12	SEZNAM TABULEK	110
13	SEZNAM PŘÍLOH	111

1 ÚVOD

Snížování tření a opotřebení patří mezi dlouhodobě významná témata tribologie, protože přímo ovlivňují energetickou účinnost, životnost součástí a spolehlivost technických systémů. Třecí ztráty představují významnou část energetických ztrát mechanických zařízení a současně urychlují degradaci povrchů v kontaktních uzlech. Z tohoto důvodu je značná pozornost věnována vývoji povrchových úprav a mazacích systémů, které umožňují omezit tření i opotřebení v náročných provozních podmínkách.

Jednou z perspektivních skupin povrchových úprav jsou DLC (Diamond-Like Carbon) povlaky. Tyto povlaky se vyznačují vysokou tvrdostí, nízkým součinitelem tření, chemickou stabilitou a dobrou odolností proti opotřebení. Díky těmto vlastnostem nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu, strojírenství, energetice i biomedicínských aplikacích. Rostoucí význam DLC povlaků dokládá také vývoj počtu publikací (Obr. 1-1), přičemž bylo v databázi Scopus v období 1985–2022 evidováno téměř 3000 článků zaměřených na DLC povlaky ve vztahu k opotřebení [1].



Obr. 1-1 Vývoj ročního počtu publikací zaměřených na DLC povlaky a jejich celkové rozdělení podle vědeckých časopisů, upraveno dle [1]

Tribologické chování DLC povlaků však nelze hodnotit pouze na základě samotných vlastností povlaku. Významně jej ovlivňuje typ protikusu, topografie povrchu, kontaktní kinematika, teplota a především složení použitého maziva. Zvláště důležité jsou podmínky mezného a smíšeného režimu mazání, kde již nedochází k úplnému oddělení povrchů mazacím filmem. V těchto režimech se proto výrazně uplatňují interakce mezi povrchovými nerovnostmi (asperitami), adsorpce polárních látek, tvorba tenkých mazacích vrstev a tribochemické procesy probíhající přímo v kontaktním rozhraní.

Právě oblast tenkých mazacích filmů představuje z hlediska DLC povlaků stále poměrně složitou, a ne zcela objasněnou problematiku. Vhodná kombinace DLC povlaku, polárního maziva a modifikátorů tření může vést k výraznému snížení součinitele tření, v některých případech až k hodnotám spojovaným se superlubricitou. Zároveň však výsledné chování závisí na konkrétní konfiguraci kontaktu, typu DLC vrstvy, provozních podmínkách a průběhu záběhu. Dosud tak není zcela objasněno, jak spolu souvisí tření, opotřebení, změna topografie povrchu a formování mazacího filmu v těchto podmínkách.

Tato diplomová práce se proto zaměřuje na experimentální hodnocení tribologického chování DLC povlaků v podmínkách mezného a smíšeného režimu mazání. Pozornost je věnována vlivu polárních maziv a mastných kyselin jako aditiv na součinitel tření, opotřebení, změnu topografie povrchu a formování mazacího filmu. Práce propojuje výsledky získané v různých experimentálních konfiguracích s cílem lépe popsat mechanismy probíhající v kontaktním rozhraní DLC povlaků a posoudit vliv provozní teploty, rychlosti a typu povlaku na výsledné tribologické chování systému.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

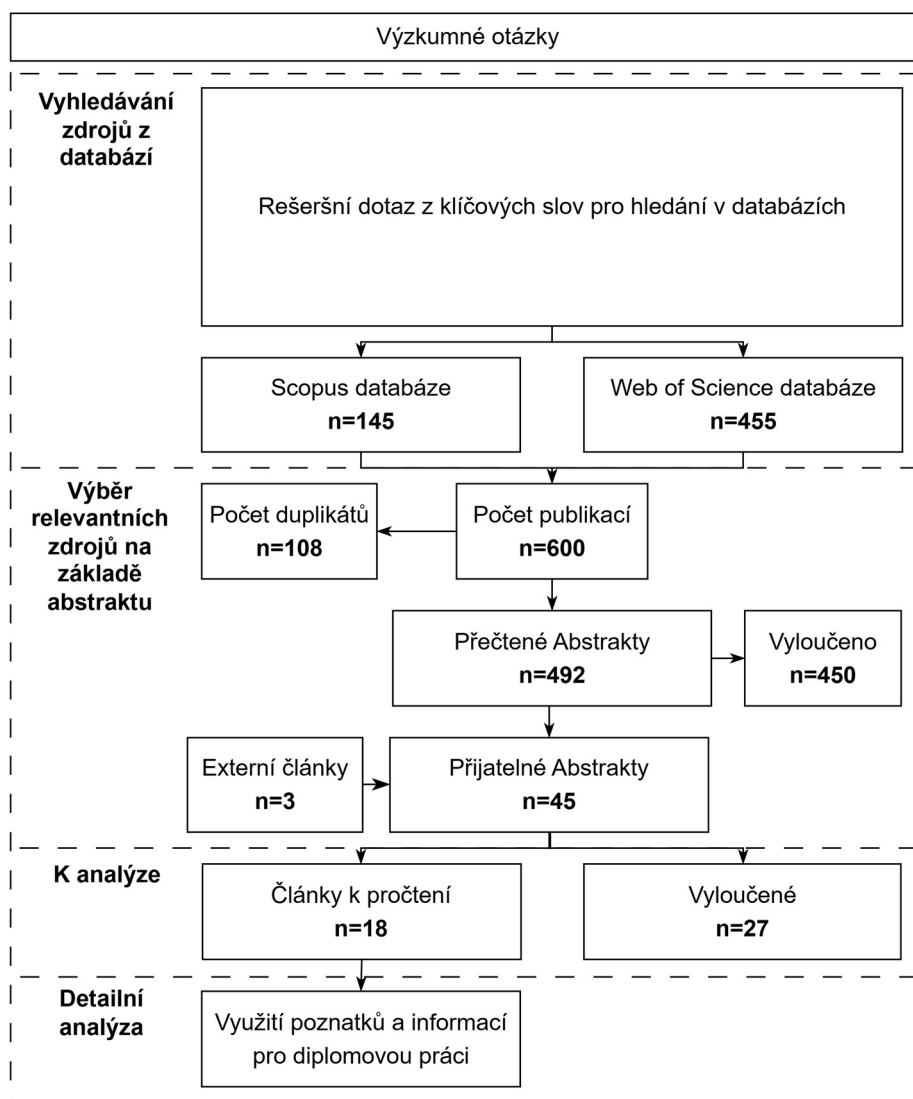
2.1 Rešeršní metody

Pro orientaci v dané problematice byly formulovány rešeršní otázky zaměřené na současné poznatky o tribologickém chování DLC povlaků v kombinaci s kapalnými mazivy. Hlavní pozornost byla věnována zejména podmínkám, které mohou v mezném až smíšeném režimu mazání vést ke snížení tření a opotřebení. Tento režim je pro řešenou diplomovou práci zásadní, protože při nízkých rychlostech dochází pouze k omezené tvorbě souvislého mazacího filmu a třecí chování je výrazně ovlivněno interakcí mezi povrchem DLC povlaku, mazivem a vznikající meznou vrstvou. Rešerše proto nesměřovala k přímému návrhu systému pro dosažení superlubricity tedy součinitele tření pod $< 0,01$, ale využívala poznatky o dosaženém velmi nízkém tření a jevu superlubricity, jež se jeví jako teoretické východisko pro pochopení mechanismů, které mohou pozitivně ovlivnit tribologické chování DLC povlaků v podmínkách tenkého mazacího filmu.

Na začátku práce byly s ohledem na naplnění cíle diplomové práce formulovány rešeršní otázky. Na jejich základě byly následně vytvořeny konkrétní vyhledávací dotazy, které sloužily k vyhledávání relevantních vědeckých článků v databázích Web of Science a Scopus. Rešeršní otázky byly formulovány následovně:

- a) Jak lze dosažením superlubricity snížit tření a opotřebení u DLC povlaků?
- b) Jaká kapalná maziva lze využít k dosažení superlubricity?
- c) Jaké provozní podmínky dosáhnou superlubricity pro mezný režim mazání?
- d) Jaké nedopované DLC povlaky a maziva dosahují superlubricity?

Na základě těchto otázek bylo vyhledáno celkem 600 vědeckých publikací. Z nalezených zdrojů byly následně po kontrole relevance a obsahového zaměření vybrány články, které nejlépe odpovídaly tématu diplomové práce. Do finální analýzy bylo zahrnuto 18 publikací, přičemž v průběhu zpracování práce byly doplněny také další odborné články, které byly identifikovány při práci s literaturou a tematicky rozšiřovaly řešenou problematiku. Následující část uvádí finální znění rešeršních dotazů pro jednotlivé rešeršní otázky a PRISMA diagram na Obr. 2-1, který znázorňuje postup validace a výběru použitých zdrojů.



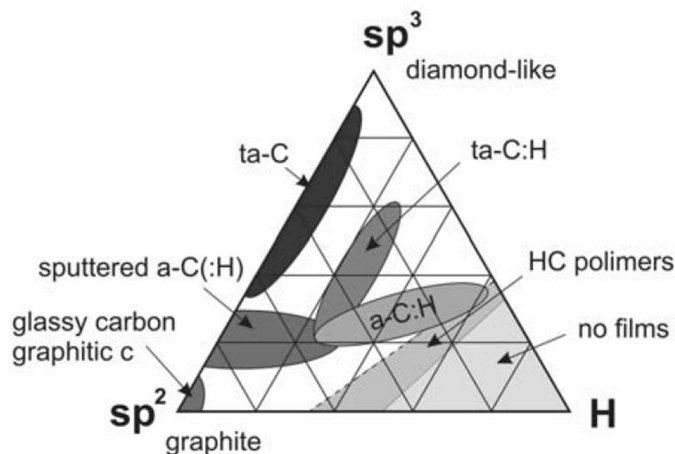
Obr. 2-1 PRISMA diagram výběru a validace literárních zdrojů

2.2 Kritická rešerše

2.2.1 DLC povlaky

DLC povlaky představují skupinu amorfních uhlíkových vrstev, které jsou v tribologii využívány zejména díky nízkému součiniteli tření, vysoké tvrdosti, dobré odolnosti proti opotřebení a chemické stabilitě vůči okolnímu prostředí. Výhodou těchto povlaků je také možnost jejich nanášení na širokou škálu různorodých materiálů, včetně kovů, nekovů i keramických substrátů. Vlastnosti DLC povlaků jsou však výrazně závislé na jejich vnitřní struktuře, zejména na poměru vazeb sp^2/sp^3 , obsahu vodíku a případné přítomnosti dalších prvků.

DLC povlaky lze klasifikovat několika způsoby. Pro účely této práce je nejvhodnější dělení podle přítomnosti cizích prvků ve struktuře povlaku. Povlaky obsahující kromě uhlíku a vodíku také další kovové nebo nekovové prvky se označují jako dopované DLC povlaky. Naproti tomu nedopované DLC povlaky jsou tvořeny pouze uhlíkem, případně uhlíkem a vodíkem, a jejich rozdělení v ternárním diagramu je znázorněno na Obr. 2-2. Do této skupiny patří amorfní uhlík a-C, tetraedrální amorfní uhlík ta-C a jejich hydrogenované varianty a-C:H a ta-C:H.



Obr. 2-2 Ternární diagram DLC povlaků [2]

Z hlediska nízkého tření a možnosti dosažení velmi nízkých hodnot součinitele tření jsou v literatuře často uváděny právě nedopované DLC povlaky. Erdemir et al. (2004) a později Yin et al. (2024) ukázali, že tyto povlaky mají vyšší potenciál pro dosažení velmi nízkého tření než některé dopované varianty [2; 3]. Významnou roli zde sehrává zejména přítomnost vodíku u hydrogenovaných povlaků a-C:H a ta-C:H, která podporuje pasivaci povrchu a omezuje vznik silných chemických vazeb mezi kontaktními povrchy. Tím může docházet ke snížení adheze a smykového odporu v kontaktu. Naproti tomu dopované DLC povlaky, například Si-DLC nebo W-DLC, mohou v některých podmínkách vykazovat vyšší reaktivitu povrchu a náchylnost k tvorbě tribochemických vrstev s vyšším smykovým odporem. To může vést ke zvýšení tření a v některých případech i k rychlejšímu opotřebení v laboratorně řízeném atmosférickém prostředí [4]. Tento rozdíl je důležitý zejména v běžné atmosféře, kde je povrch vystaven okolnímu prostředí včetně vlhkosti.

Významnou vlastností DLC povlaků je také schopnost vytvářet během tření tribologicky ovlivněné vrstvy. Makowski et al. (2017) a Chen et al. (2020) uvádějí, že u nedopovaných DLC povlaků může během tření vznikat tenká tribochemicky stabilní vrstva s vyšším podílem sp² hybridizovaného uhlíku, která snižuje smykové napětí v kontaktu [5; 6]. Stabilita a charakter této vrstvy však závisí nejen na typu povlaku, ale také na mazivu, provozních podmínkách a okolním prostředí.

Z uvedených poznatků vyplývá, že nedopované DLC povlaky typu a-C:H a ta-C představují vhodný materiálový systém pro studium nízkého tření a opotřebení v tribologických kontaktech. Jejich chování však nelze posuzovat pouze podle samotné struktury povlaku, protože výsledná tribologická odezva závisí také na režimu mazání, vlastnostech maziva a podmínkách v kontaktu. Proto je dále nutné zaměřit se na mezné a smíšené mazání, ve kterém se při nízkých rychlostech nejvýrazněji projevuje interakce mezi povrchem DLC, mazivem a vznikající meznou vrstvou.

2.2.2 Mezné a smíšené mazání u DLC povlaků

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, samotná struktura DLC povlaku je pouze jedním z faktorů ovlivňujících výsledné tribologické chování. V podmínkách nízkých rychlostí je rozhodující také mazací režim, protože nedochází k úplnému oddělení kontaktních povrchů souvislým mazacím filmem. Právě proto je pro tuto práci klíčové mezné až smíšené mazání.

V mezném režimu mazání je zatížení přenášeno převážně přímým kontaktem nerovností povrchů. Mazivo je v kontaktu přítomno pouze ve formě velmi tenké vrstvy, která nemusí být schopna oddělit oba povrchy po celé kontaktní ploše. Výsledné tření je proto ovlivněno nejen viskozitou maziva, ale především schopností molekul adsorbovat se na povrchu, vytvářet mezní vrstvy a omezovat přímý kontakt asperit. Tento princip je významný zejména u DLC povlaků, kde může interakce mezi mazivem a uhlíkovým povrchem vést k tvorbě tribochemicky ovlivněných vrstev s nízkým smykovým odporem [7; 3; 5].

Smíšený režim mazání představuje přechodovou oblast mezi mezním a hydrodynamickým, případně elastohydrodynamickým mazáním. V tomto režimu se již částečně uplatňuje mazací film, ale stále dochází ke kontaktu nerovností povrchů. Ve studii Lin et al. (2024) byl například popsán přechod z mezního režimu do smíšeného režimu při zvyšování skluzové rychlosti, přičemž u PEG oleje bylo velmi nízkého tření dosaženo právě ve smíšeném režimu mazání [7]. To ukazuje, že pro dosažení nízkého tření nemusí být nutné úplné oddělení povrchů, ale rozhodující může být stabilní tenký film v kombinaci s příznivou tribochemickou interakcí na povrchu DLC.

Pro DLC povlaky je mezné a smíšené mazání zvláště významné. Nízké tření zde nemusí být dáno pouze mechanickým oddělením povrchů, ale také chemickou stabilitou povlaku a interakcí maziva s uhlíkovým povrchem. V těchto podmínkách se může uplatnit tvorba tribofilmu, změna hybridizace uhlíku v povrchové vrstvě, adsorpce polárních molekul nebo tribochemická pasivace aktivních míst v kontaktu [2; 3; 6]. Právě tyto mechanismy jsou v literatuře často spojovány s velmi nízkým třením DLC povlaků.

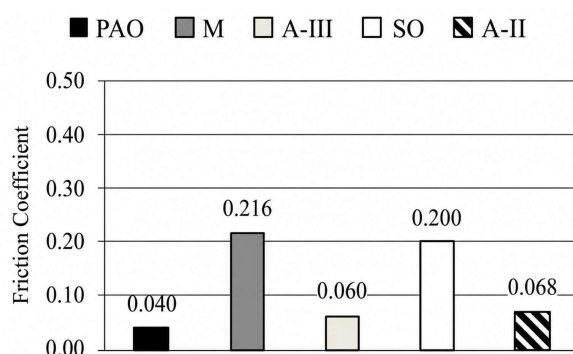
V mezném režimu se výrazně projevuje také počáteční topografie povrchu. Vyšší drsnost vede k vyšším lokálním kontaktním tlakům a častějšímu narušování mazací vrstvy. Naopak hladší povrch může podporovat rovnoměrnější rozložení zatížení a stabilnější tvorbu mezní vrstvy. Tento vztah je důležitý zejména u tvrdých DLC povlaků, kde i malé změny topografie mohou výrazně ovlivnit skutečnou kontaktní plochu, průběh záběhu a výsledné opotřebení [5; 7].

V mezném a smíšeném režimu tedy není výsledné tření určeno pouze viskozitou maziva nebo tvrdostí povlaku, ale především schopností systému vytvořit stabilní meznou vrstvu a omezit přímý kontakt asperit. Z tohoto důvodu je vhodné dále popsat mechanismy, které mohou u DLC povlaků vést ke snížení součinitele tření.

2.2.3 Dosažení snížení součinitele tření

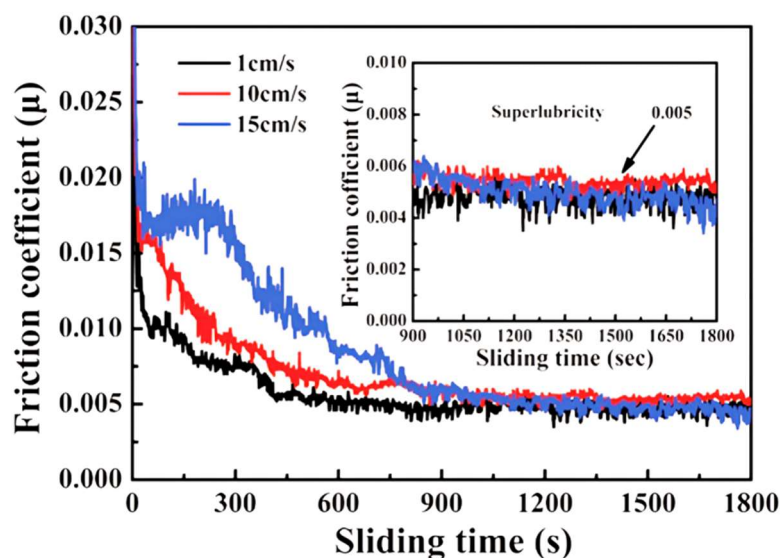
V návaznosti na charakter mezního a smíšeného mazání je snížení tření u DLC povlaků spojeno především s procesy probíhajícími přímo na rozhraní kontaktu. V těchto podmínkách nelze nízké tření vysvětlit pouze vytvořením silného mazacího filmu, ale je nutné uvažovat také adsorpci molekul maziva, tvorbu tribofilmu, chemickou pasivaci povrchu a průběh záběhu.

Minimalizace tření je v tribologii důležitá nejen z hlediska snížení energetických ztrát, ale také z hlediska omezení degradace povrchů a zvýšení životnosti mechanických systémů. U DLC povlaků je snížení tření ovlivněno kombinací několika faktorů, mezi které patří struktura povlaku, chemické složení maziva, přítomnost funkčních skupin, provozní podmínky a vývoj kontaktu během zatěžování. Ve smíšeném a mezném režimu mazání je dosažení nízkého tření náročné, protože se zde kombinuje přímý kontakt asperit s působením velmi tenké mazací vrstvy. Výzkumy ukazují (Obr. 2-3), že vhodnou kombinací DLC povlaku, maziva a provozních podmínek lze dosáhnout výrazného snížení součinitele tření i bez použití klasických aditiv [8; 9].



Obr. 2-3 Průměrné hodnoty součinitele tření a-C:H/a-C:H se základovými oleji, minerální olej (M), slunečnicový olej (SO), nasycený syntetický ester (A-III), nenasycený syntetický ester (A-II), upraveno dle [8]

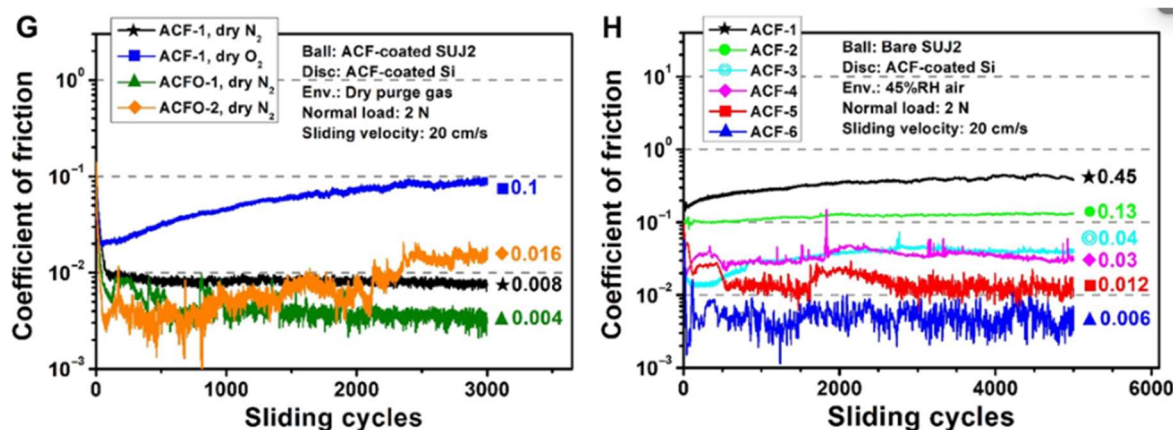
Výsledky Erdemira (2004) a De Barros Boucheta et al. (2007) ukazují, že hydrogenované DLC povlaky mohou za vhodných podmínek dosahovat součinitele tření pod hodnotou 0,01 (Obr. 2-4), která je často považována za hranici superlubricity [2; 10]. Při použití glycerolu nebo esterových maziv byly v atmosférických podmínkách dosaženy velmi nízké hodnoty tření. Za jeden z hlavních mechanismů je považována tvorba ochranné uhlíkové vrstvy s vyšším podílem sp^2 vazeb, která snižuje smykové napětí v kontaktu [3].



Obr. 2-4 Experimentální demonstrace režimu superlubricity pro a-C:H film při rychlostech 1, 10 a 15 cm/s, prostředí vzduchu, pokojová teplota, kontaktní tlak 2,89 GPa [3]

Makowski et al. (2017) doplnil, že důležitým parametrem je také schopnost maziva vytvořit stabilní film při vysokém zatížení a nízkých rychlostech [5]. Například PAO maziva mohou umožnit dosažení součinitele tření kolem 0,04 bez použití aditiv, zatímco polárnější maziva, například estery, mohou vést k ještě nižším hodnotám. Významnou roli zde hraje smáčivost, adsorpce na uhlíkový povrch a schopnost molekul maziva vytvořit meznou vrstvu s nízkým smykovým odporem.

Yin et al. (2024) a Chen et al. (2020) ukázali, že snížení tření není dáno pouze samotnou tvorbou tribofilmu, ale také jeho chemickou stabilitou [3; 6]. Za vhodných podmínek se mohou tvořit vrstvy s vyšším podílem sp^2 uhlíkových vazeb, které snižují adhezi mezi povrchy a umožňují snadnější kluz. Přítomnost vlhkosti však může tento proces narušovat, což vede ke zvýšení tření a destabilizaci ochranné vrstvy (Obr. 2-5) [6].



Obr. 2-5 Testované povlaky; g) tření mezi identickými dvojicemi povrchů v suchých plynných atmosférách; h) tření mezi povlaky a-C:H klouzajícími proti neupravené oceli v okolním vzduchu za účelem vyhodnocení vlivu vlhkosti [6]

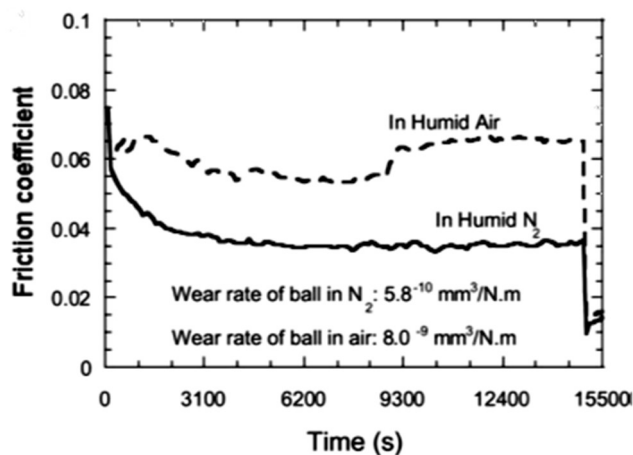
Uvedené studie ukazují, že nízké tření u DLC povlaků vzniká jako výsledek kombinace struktury povlaku, chemie maziva a provozních podmínek. Samotné snížení součinitele tření však nemusí automaticky znamenat příznivé tribologické chování celého systému. Pro technické využití je stejně důležité, zda je nízké tření doprovázeno také nízkým opotřebením a stabilitou povrchu. Proto je v následující části pozornost zaměřena na opotřebení DLC povlaků.

2.2.4 Opotřebení

Přestože je nízký součinitel tření jedním z hlavních požadavků na tribologický systém, sám o sobě neposkytuje úplnou informaci o jeho funkčnosti. U DLC povlaků může být nízké tření dosaženo i za podmínek, kdy současně dochází k chemickému nebo mechanickému poškození povrchu. Proto je nutné hodnotit společně nejen tření, ale také opotřebení a změnu topografie povrchu.

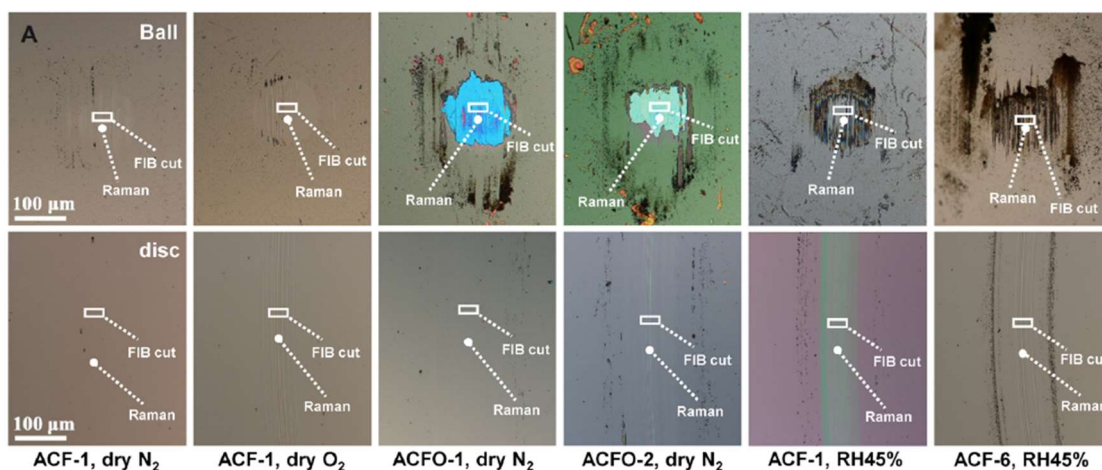
Opotřebení povrchů je jedním z hlavních faktorů, které limitují životnost mechanických součástí pracujících v podmínkách tenkého mazacího filmu. Na rozdíl od elastohydrodynamického mazání dochází v mezním a smíšeném režimu k částečnému nebo přímému kontaktu asperit, což zvyšuje riziko materiálových ztrát a poškození povrchových vrstev. Proto je důležité volit takové materiály a maziva, které kombinují nízké tření, vysokou mechanickou odolnost a omezenou chemickou reaktivitu s okolním prostředím.

DLC povlaky jsou z hlediska opotřebení výhodné zejména díky vysoké tvrdosti, nízké adhezi a chemické stabilitě. Ze studie Erdemir et al. (2004) vyplývá, že hydrogenované DLC vrstvy mohou v inertních podmínkách dosahovat velmi nízkého opotřebení, nižšího než 10^{-9} mm³/N·m, při současně velmi nízkém součiniteli tření [2]. Ve vzduchu se opotřebení sice zvyšuje (Obr. 2-6), ale stále může zůstat na nízké úrovni. Přítomnost vodíku v těchto vrstvách omezuje tvorbu reaktivních vazeb a snižuje citlivost na oxidaci a vlhkost [4].



Obr. 2-6 Míra opotřebení v prostředí s vlhkostí ve vzduchu a dusíku [2]

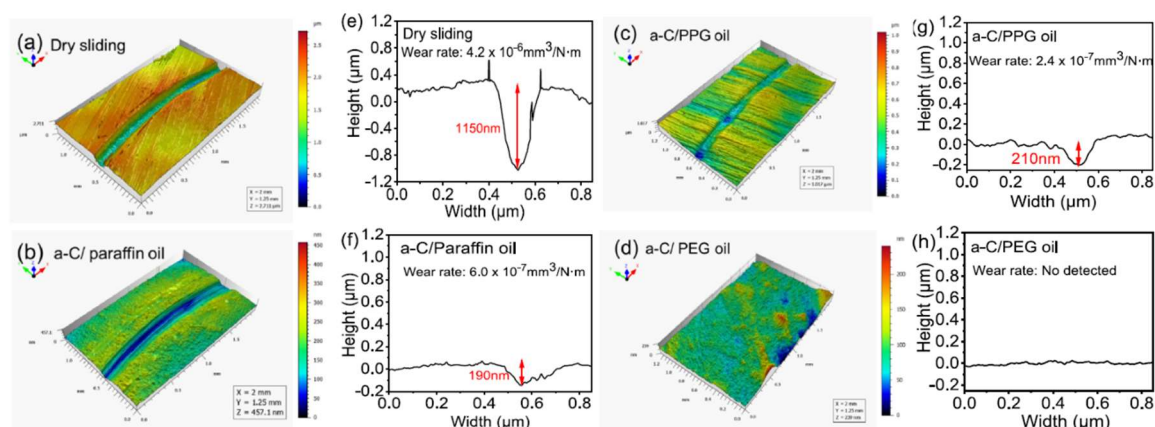
Chen et al. (2020) ukázal, že relativní vlhkost může významně ovlivnit nejen tření, ale také opotřebení DLC povlaků (Obr. 2-7) [6]. Při vyšší vlhkosti docházelo ke zvýšení součinitele tření, výraznějšímu poškození povrchu a vzniku oxidovaných struktur, které zhoršovaly ochranné vlastnosti tribofilmu. Tento výsledek ukazuje, že stabilita DLC povlaků v běžné atmosféře není dána pouze jejich mechanickou odolností, ale také schopností odolávat chemickým vlivům prostředí.



Obr. 2-7 Optické snímky znázorňující otěrové stopy na kuličce a otěrové dráhy na disku pro a-C:H povlaky v různých prostředích [6]

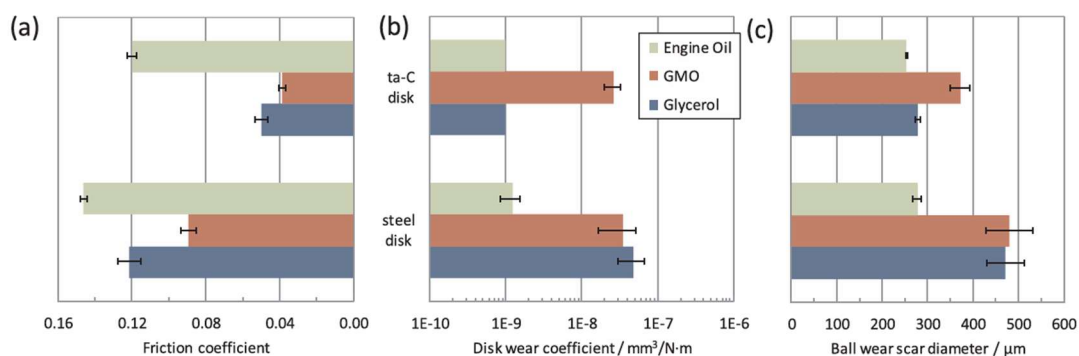
Významnou roli při ochraně proti opotřebení mohou sehrávat tribofilmy vznikající během tření. Yin et al. (2024) uvádí, že na povrchu hydrogenovaných DLC vrstev mohou vznikat nanometrické grafitické vrstvy, které snižují smykové napětí a současně omezují opotřebení [3]. Proces tvorby těchto vrstev je však podmíněn vhodnou kombinací povlaku, maziva a provozních podmínek.

Opotřebení amorfního uhlíkového povlaku a-C bylo sledováno také ve studii Lin et al. (2024), kde byly tribologické testy prováděny v konfiguraci ball-on-disc při zatížení 2 N, 800 ot/min a celkové kluzné dráze 6000 metrů [7]. Bez maziva docházelo k výraznému opotřebení (Obr. 2-8), což potvrzuje nutnost mazání v těchto kontaktech. Parafínový olej jako nepolární médium opotřebení snížil, ale stále byly pozorovány abrazivní stopy. Polární PPG poskytl lepší ochranu, zatímco lineární PEG vedl k téměř nulovému opotřebení.



Obr. 2-8 Míra opotřebení na základě 3D profilace opotřebovaných drah a hloubka opotřebení a měrné opotřebení při použití různých maziv [7]

Ve studii Makowski et al. (2017) byly z hlediska opotřebení rozlišeny dvě základní formy poškození: abrazivní a chemicky indukované [5]. Abrazivní opotřebení bylo minimální při použití hladkých ta-C povrchů a maziv, jako je glycerol nebo motorový olej (Obr. 2-9). Naopak chemické opotřebení bylo pozorováno u maziv obsahujících nenasycené mastné kyseliny. U GMO a olejové kyseliny došlo při teplotách nad 60 °C k výraznému nárůstu opotřebení o několik řádů.



Obr. 2-9 a) součinitel tření, b) opotřebení disku, c) opotřebení kuličky [5]

Z uvedených poznatků vyplývá, že vztah mezi třením a opotřebením u DLC povlaků není jednoznačný. Některá maziva mohou výrazně snížit součinitel tření, ale současně mohou podporovat chemicky indukované opotřebení. Pro další hodnocení je proto důležité sledovat nejen dosažení velmi nízkých hodnot tření, ale také mechanismy, které k nim vedou. Právě z tohoto důvodu je vhodné dále vymezit pojem superlubricity, který představuje teoretický limit nízkého tření, ale nemusí vždy znamenat optimální stav z hlediska opotřebení.

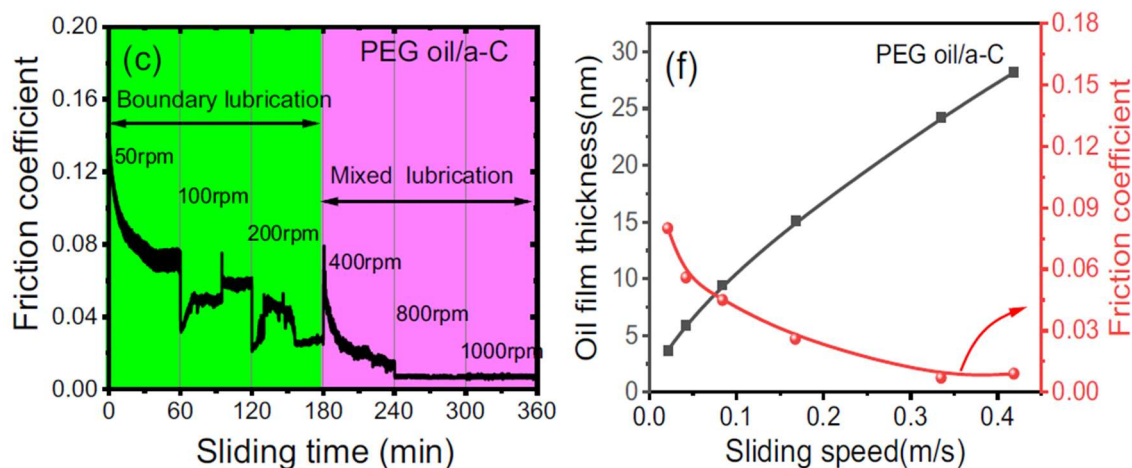
2.2.5 Superlubricita jako teoretické východisko

Nedopované DLC povlaky, zejména hydrogenované varianty, jsou v literatuře často spojovány s velmi nízkým třením a za vhodných podmínek také s možností dosažení superlubricity. Superlubricita je obvykle definována jako stav, kdy součinitel tření mezi kontaktními povrchy klesne pod hodnotu $\mu < 0,01$. Obecně je však tento jev spojován spíše s idealizovanými podmínkami, například s elastohydrodynamickým mazáním, suchým třením ve specifických atmosférách nebo s kontaktem velmi hladkých a chemicky pasivovaných povrchů.

V posledních letech se objevují studie, které se zaměřují také na možnost dosažení velmi nízkého tření v mezním režimu mazání, tedy při $\lambda < 1$, nebo ve smíšeném režimu mazání, tedy při $1 \leq \lambda \leq 3$ [7; 9; 11]. V těchto případech nejsou kontaktní povrchy zcela odděleny silným mazacím filmem, ale nízké tření může vznikat kombinací tenkého filmu, tribochemických reakcí a tvorby nízkosmykových vrstev. Dosažení superlubricity je proto v těchto podmínkách obtížnější a závisí na vlastnostech DLC povlaku, chemii maziva, průběhu záběhu a stabilitě vytvořené mezní vrstvy.

Studie Yin et al. (2024) ukázala, že během tření se na povrchu a-C:H vrstev mohou tvořit tribofilmy s převládající sp^2 hybridizací uhlíku, které snižují smykové napětí [3]. Tento proces je podporován nízkou chemickou reaktivitou povrchu a schopností vhodných molekul z maziva adsorbovat se na povrch. V některých případech bylo při použití vhodného maziva dosaženo součinitele tření v rozmezí 0,005 až 0,01 i při vysokém kontaktním tlaku.

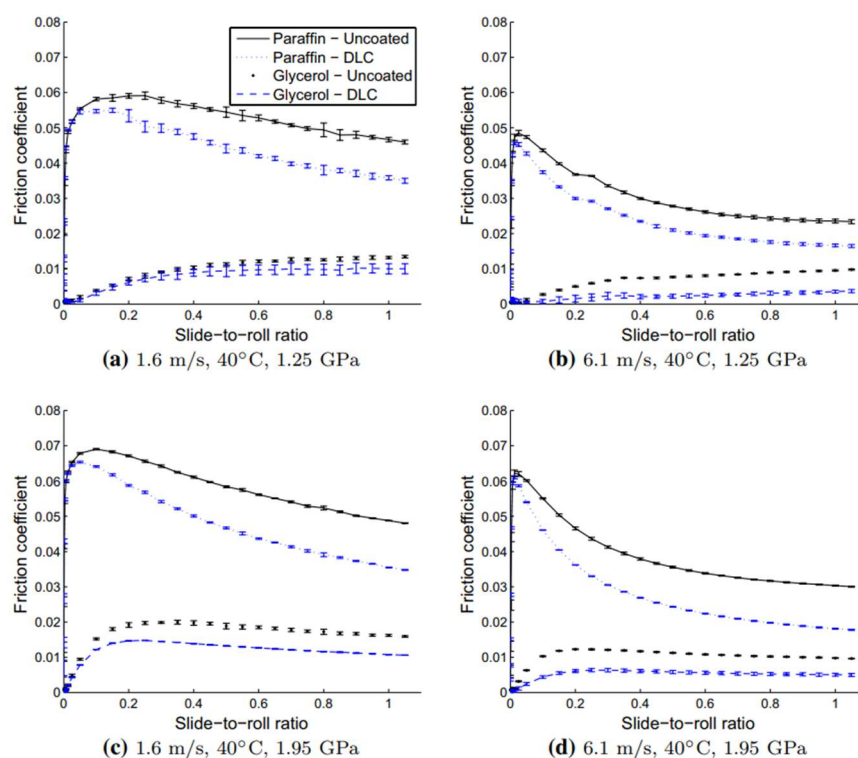
Ve studii Lin et al. (2024) bylo dosaženo součinitele tření $\mu \approx 0,009$ u dvojice ocel/a-C při použití polyethylenglykolového oleje PEG ve smíšeném režimu mazání (Obr. 2-10) [7]. Superlubricita zde nebyla dosažena při úplném oddělení povrchů, ale v režimu, kde se kombinoval tenký mazací film a částečný kontakt asperit. Tloušťka mazacího filmu se pohybovala přibližně v rozmezí 20–30 nm, přičemž rozhodující roli hrála tribochemická interakce mezi PEG olejem a povrchem. Autoři uvádějí tvorbu hydroxylovaných vrstev a uhlíkových kvantových teček, které mohly přispět ke snížení smykového odporu.



Obr. 2-10 Součinitel tření a tloušťka filmu při použití PEG a a-C povlaku [7]

V čistě mezním režimu, kdy byla tloušťka filmu nižší, přibližně 5–10 nm, superlubricita dosažena nebyla. Naopak docházelo k vyššímu opotřebení, zejména při použití nepolárních nebo hůře adsorbujících maziv, jako je parafinový olej nebo PPG [7]. Tento výsledek ukazuje, že samotná přítomnost kapaliny v kontaktu nestačí. Rozhodující je schopnost maziva interagovat s povrchem a vytvořit stabilní nízkosmykovou vrstvu.

Významným faktorem je také okolní prostředí. Chen et al. (2020) ukázal, že zvýšená vlhkost může narušit stabilitu tribofilmu a vést ke zvýšení součinitele tření [6]. Björling et al. (2019) naopak prokázal, že maziva jako glycerol mohou za vhodných podmínek podporovat vznik kluzkých vrstev a dosahovat velmi nízkého tření, jak je uvedeno na Obr 2-11 [10].



Obr. 2-11 Součinitel tření při použití glycerolu a parafínu při různých provozních podmínkách [10]

Dosažení velmi nízkého tření u DLC povlaků je tedy výsledkem komplexní interakce mezi strukturou povlaku, vlastnostmi maziva, provozními podmínkami a okolním prostředím. Pro tuto práci jsou tyto poznatky důležité zejména proto, že ukazují možné mechanismy vedoucí ke snížení tření v mezném a smíšeném režimu mazání. Superlubricita zde proto slouží jako teoretické východisko pro pochopení nízkotřecího chování DLC povlaků, nikoliv jako hlavní experimentální cíl. Proto je dále důležité zaměřit se na maziva a aditiva, která mohou tvorbu mezní vrstvy a snížení tření podporovat.

2.2.6 Maziva a aditiva vykazující superlubricitu

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, dosažení nízkého tření u DLC povlaků v mezném až smíšeném režimu je výrazně ovlivněno vlastnostmi maziva. Mazivo zde nepůsobí pouze jako médium s určitou viskozitou, ale také jako chemicky aktivní nebo pasivní složka, která může adsorbovat na povrch, vytvářet mezní vrstvy nebo se účastnit tribochemických reakcí.

V přirozeném atmosférickém prostředí je udržení velmi nízkého tření na DLC povlacích obtížnější než v řízené inertní atmosféře. Přítomnost kyslíku a vody může narušovat pasivaci povrchu, podporovat tvorbu oxidovaných skupin a destabilizovat vznikající tribofilm. Proto je nutné volit taková maziva a aditiva, která buď omezují nežádoucí chemické reakce, nebo naopak podporují vznik stabilní ochranné vrstvy přímo během tření.

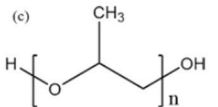
Polyoly

Polyoly, tedy vícesytné alkoholy, jsou z hlediska DLC povlaků zajímavé zejména díky přítomnosti hydroxylových skupin. Ty mohou podporovat vznik vodíkových vazeb, adsorpci na povrch a tvorbu stabilní mezní vrstvy.

Polypropylen glykol (PPG) $(C_3H_6O)_n$ je polární mazivo, které ve studii Lin et al. (2024) vykazovalo lepší tribologické chování než parafinový olej [7]. Součinitel tření klesal přibližně na hodnotu $\mu \approx 0,033$ a opotřebení DLC povrchu bylo výrazně nižší než u nepolárního maziva. Přesto však PPG nedosahoval tak příznivých výsledků jako PEG. Důvodem může být jeho molekulární struktura, ve které methylové skupiny vytvářejí sterické překážky a omezují účinnou adsorpci na povrch.

Polyethylen glykol (PEG) $(C_2H_4O)_n$ vykazoval ve stejné studii nejnižší součinitel tření a prakticky nulové opotřebení povrchu [7]. Klíčovou roli zde sehrála tribochemická interakce mezi molekulami PEG a povrchem, při které docházelo k hydroxylaci a tvorbě uhlíkových kvantových teček. PEG tak představuje významné polární mazivo s vysokou afinitou k uhlíkovým povrchům. Z tohoto důvodu je vhodný také jako základové mazivo pro hodnocení vlivu dalších aditiv.

Tab. 2-1 Fyzikální a reologické vlastnosti maziv PEG200 a PPG200 [7]

Oils	α (GPa ⁻¹)	η (mPa·S, 298 K)	Molecular structure diagram
PEG200 oil	4.0	50	
PPG200 oil	5.0	57	

Glycerol ($C_3H_8O_3$) je vysoce polární alkohol schopný vytvářet silné vodíkové vazby s povrchem. Díky vysoké chemické stabilitě a absenci nenasyčených vazeb může působit jako chemicky relativně pasivní, ale velmi účinné mazivo. Ve studii Makowski et al. (2017) dosahoval glycerol součinitele tření přibližně $\mu \approx 0,04\text{--}0,06$ a opotřebení ta-C povlaku bylo velmi nízké [5]. Mechanismus mazání je spojován s hydratačním efektem, vznikem hydroxylovaných povrchů a nízkým smykovým odporem vrstvy tvořené vodíkovými vazbami.

Tab. 2-2 Fyzikální a reologické vlastnosti glycerolu [5]

Fluid	Glycerol
Kinematic viscosity @ 40 °C [mPas]	270
Pressure viscosity @ 40 °C [GPa ⁻¹]	5.4
Thermal cond. @ amb. pressure [W/mK]	0.29
$\delta\eta/\delta T$ @ 40°C [mPas/K]	21 ^b

Mastné kyseliny a polární aditiva

Mastné kyseliny jsou významné jako modifikátory tření díky své molekulární stavbě. Obsahují polární karboxylovou skupinu, která může podporovat adsorpci na povrch, a dlouhý uhlovodíkový řetězec, který může přispívat k tvorbě uspořádané mezní vrstvy. Jejich účinek však závisí na délce řetězce, nasycenosti, rozpustnosti v základovém mazivu a chemické stabilitě při tření.

Olejoá kyselina ($C_{18}H_{34}O_2$) je nenasyená masná kyselina s jednou dvojnou vazbou v uhlovodíkovém řetězci. Ve studii Makowski et al. (2017) byla pozorována velmi rychlá aktivace třecího systému a pokles součinitele tření přibližně na $\mu \approx 0,045$ [5]. Současné však došlo k výrazné chemické degradaci povlaku. To ukazuje, že nenasyená vazba může podporovat tribochemickou aktivitu, ale zároveň zvyšovat riziko chemicky indukovaného opotřebení.

Stearová kyselina ($C_{18}H_{36}O_2$) je nasycená mastná kyselina se stejnou délkou uhlíkového řetězce jako olejová kyselina, ale bez dvojné vazby. Tato struktura ji činí chemicky stabilnější. Podle Makowski et al. (2017) vykazovala podobně nízké tření jako olejová kyselina, ale bez výrazného chemického opotřebení povlaku [5]. To naznačuje, že nasycené mastné kyseliny mohou být vhodné pro tvorbu mezných vrstev bez výrazné degradace DLC povrchu.

Palmitová kyselina ($C_{16}H_{32}O_2$) je rovněž nasycená mastná kyselina, ale s kratším uhlíkovým řetězcem než kyselina stearová [12]. Její tribologický účinek může být spojen s tvorbou adsorpční vrstvy, avšak její stabilita a účinnost závisí na konkrétním základovém mazivu a podmínkách kontaktu.

Kyselina boritá (H_3BO_3) se od mastných kyselin liší chemickou strukturou, a proto je vhodnější ji označovat jako doplňkové polární aditivum, nikoliv jako mastnou kyselinu [13]. Její účinek může být spojen s tvorbou vrstev na bázi boru nebo s ovlivněním polaritu a chemické aktivity mazací směsi.

Estery

Glycerol monooleát (GMO) ($C_{21}H_{40}O_4$) je ester vzniklý spojením glycerolu a olejové kyseliny. Obsahuje polární hydroxylové skupiny i nenasycený uhlovodíkový řetězec. Díky této kombinaci může vytvářet adsorpční vrstvy a zároveň vstupovat do tribochemických reakcí. Ve studii Makowski et al. (2017) vykazoval GMO nízký součinitel tření, přibližně $\mu \approx 0,045$, ale současně bylo pozorováno mírné opotřebení DLC vrstvy [5]. GMO tak představuje přechod mezi chemicky pasivním mazivem a reaktivním modifikátorem tření.

Methyl oleát ($C_{19}H_{36}O_2$) je jednoduchý ester olejové kyseliny. Neobsahuje hydroxylové skupiny, ale obsahuje nenasycený uhlovodíkový řetězec. Podle Makowski et al. (2017) může dosahovat nízkého součinitele tření, ale zároveň vést k výraznějšímu chemickému opotřebení ta-C povlaku [5]. Hlavním faktorem degradace zde pravděpodobně není polarita molekuly, ale přítomnost dvojné vazby.

Řepkový olej lze obecně chápat jako směs triglyceridů, přičemž orientačně bývá uváděn vzorec ($C_{57}H_{104}O_6$) pro typické triglyceridové složky. Ve studii Makowski et al. (2017) vykazoval vyšší součinitel tření než některá jednodušší maziva, ale stále zůstal v oblasti nízkého tření [5]. Přítomnost nenasycených řetězců však může přispívat k chemické aktivitě a případné degradaci DLC povlaku.

Nepolární uhlovodíky

Nepolární uhlovodíková maziva, například parafinový olej nebo PAO, vykazují obecně nižší afinitu k DLC povrchům. Jejich schopnost vytvářet adsorpční vrstvy je omezená, protože neobsahují polární funkční skupiny.

Parafinový olej ($C_{16}H_{34}$ až $C_{30}H_{62}$) ve studii Lin et al. (2024) vykazoval nejslabší synergii s DLC povlakem [7]. Jeho mazací schopnost byla omezena slabou adsorpcí na povrch, což vedlo k vyššímu součiniteli tření a výraznějšímu opotřebení. Ve studii sloužil především jako referenční nepolární médium.

Tab. 2-3 Fyzikální a reologické vlastnosti parafinového oleje [7]

Oils	α (GPa ⁻¹)	η (mPa·S, 298 K)	Molecular structure diagram
Paraffin oil	15	63	

Polyalphaolefin (PAO) ($C_{10}H_{20}$)_n je syntetický uhlovodíkový olej s dobrou chemickou stabilitou, ale bez polárních funkčních skupin. V kombinaci s DLC povlaky může poskytovat stabilní mazání, avšak jeho schopnost aktivně interagovat s povrchem je omezená. Absence polárních skupin snižuje možnost tvorby adsorpčních vrstev nebo tribochemických produktů, které by mohly výrazně snížit smykový odpor [10].

Z přehledu maziv a aditiv vyplývá, že jejich účinnost nelze hodnotit pouze podle polarit, viskozity nebo přítomnosti konkrétní funkční skupiny. Důležitá je také stabilita vznikající mezní vrstvy, chemická reaktivita molekul a jejich schopnost působit za konkrétních provozních podmínek. Proto je dále nutné zaměřit se na vliv rychlosti, teploty, zatížení a povrchové topografie, které mohou účinek maziva výrazně zesílit nebo naopak potlačit.

2.2.7 Vliv provozních podmínek a topografie povrchu

Účinek maziva a aditiv se v tribologickém kontaktu neprojevuje samostatně, ale vždy v kombinaci s konkrétními provozními podmínkami. Rychlost, zatížení, teplota a výchozí topografie povrchu určují, zda bude kontakt pracovat převážně v mezním režimu, nebo se začne přibližovat smíšenému režimu mazání. Tyto parametry současně ovlivňují záchyt, stabilitu mazací vrstvy i vznik opotřebení.

Rychlost skluzu ovlivňuje především schopnost maziva vytvářet film v kontaktu. Se zvyšující se rychlostí obvykle roste tloušťka mazací vrstvy a kontakt se může posouvat z mezního směrem ke smíšenému režimu. Ve studii Lin et al. (2024) byl v rozsahu rychlostí 0,021–0,42 m/s pozorován přechod z mezního do smíšeného mazání [7]. U PEG maziva bylo velmi nízkého tření dosaženo právě ve smíšeném režimu, kdy byl přítomen tenký film a současně probíhala tribochemická interakce s povrchem.

Kontaktní tlak má dvojí vliv. Na jedné straně může podporovat uhlazení povrchu a aktivaci tribochemických procesů, na druhé straně může při překročení určité meze vést k lokálnímu poškození povlaku. Studie ukazují, že u DLC povlaků lze dosáhnout nízkého tření i při vysokých kontaktních tlacích, pokud je použit vhodný mazací systém [5; 7]. Při příliš vysokém zatížení však může dojít k narušení mezní vrstvy a zvýšení opotřebení.

Teplota ovlivňuje jak vlastnosti maziva, tak chemické procesy probíhající v kontaktu. Mírně zvýšená teplota může podpořit mobilitu molekul maziva, adsorpci a tvorbu mezní vrstvy. Současně však dochází ke snížení viskozity maziva, což může zhoršit únosnost filmu a zvýšit podíl přímého kontaktu asperit. Vliv teploty proto nelze hodnotit jednoznačně, protože může vést jak ke snížení, tak ke zvýšení tření v závislosti na typu maziva a povlaku.

Významnou roli hraje také topografie povrchu. Nižší drsnost může podporovat rovnoměrnější rozložení kontaktního tlaku, menší podíl přímého kontaktu asperit a snazší vytvoření stabilní mezní vrstvy. Vyšší drsnost naopak vede k vyšším lokálním tlakům a častějšímu přerušování mazacího filmu. Změna topografie během testu je zároveň projevem záběhu, opotřebení nebo tribologické adaptace kontaktu.

Z uvedených poznatků vyplývá, že tribologické chování DLC povlaků v mezním až smíšeném režimu je výsledkem současného působení materiálové struktury, chemie maziva, provozních podmínek a topografie povrchu. Pro hodnocení takového systému proto nestačí sledovat pouze součinitel tření, ale je nutné jej doplnit o opotřebení, změnu topografie a pozorování mazacího filmu. Na základě těchto souvislostí lze shrnout hlavní poznatky řešerše a vymezit oblasti, které dosud zůstávají nedostatečně objasněny.

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Tření u DLC povlaků

Výzkumy potvrzují, že tření DLC povlaků je ovlivněno jejich strukturou, přítomností vodíku a interakcí s protilehlým povrchem. Nedopované DLC povlaky dokážou dosáhnout nízkých součinitelů tření. Experimentálně byly prováděny v řízených atmosférách, zejména v suchém vodíku nebo dusíku, dosaženy hodnoty μ nižší než 0,01, tedy v oblasti superlubricity [9; 2; 3].

V reálném provozu však DLC povlaky obvykle působí v okolním prostředí, kde jsou vystaveny prostředí s výrazným obsahem kyslíku a vlhkosti. V těchto podmínkách dochází ke komplexním chemickým interakcím mezi DLC povrchem a složkami atmosféry. Právě kyslík a voda destabilizují C–H chemickou pasivaci a podporují tvorbu oxidačních skupin (např. C–O, C=O), což vede ke zvýšení smykového napětí na rozhraní kontaktu, nárůstu tření a destabilizaci ochranného tribofilmu [14]. Tyto efekty mohou významně omezit výhodné vlastnosti DLC povlaků.

Z rešerše vyplývá, že tato práce by měla směřovat k zachování nízkého tření DLC povlaků v reálných podmínkách běžné atmosféry bez nutnosti umělé regulace prostředí. Výzvou bude nejen stabilizace povrchu vůči oxidačním účinkům, ale také schopnost tribologického systému adaptovat se na proměnlivost vlhkosti a teploty v prostředí.

Přitom ve vědeckých studiích a literatuře dosud chybí experimentální data, která by systematicky sledovala vývoj tření DLC povlaků v běžném prostředí v čase a zároveň vzájemně porovnávala chování v inertoní a okolní atmosféře. Není rovněž známo, jaká koncentrace vlhkosti spouští degrační procesy ani zda je lze kompenzovat výběrem vhodného maziva nebo úpravou topografie povrchu.

Opotřebení u DLC povlaků

DLC povlaky jsou ceněny pro svou vysokou odolnost proti opotřebení, která vychází z jejich výrazné tvrdosti způsobené vysokým podílem sp^3 hybridizace uhlíku [2]. V inertních atmosférách, jako je suchý vodík nebo dusík, zůstává opotřebení minimální, protože povrch není vystaven oxidaci ani chemickému napadení. V běžné atmosféře však přítomnost kyslíku a vlhkosti přispívá k postupnému narušení tribochemicky aktivní vrstvy. Dochází ke zvýšení reaktivity povrchu, oslabování pasivace a vzniku lokálního adhezivního a abrazivního opotřebení [6].

Volba vhodného maziva má přitom na výsledné opotřebení zásadní dopad. Makowski et al. (2017) prokázal, že syntetické estery a polyalfaolefiny (PAO) bez aditiv umožňují tvorbu stabilních adsorpčních vrstev, které výrazně omezují přímý kontakt mezi protilehlými povrchy a snižují opotřebení až o 50 % ve srovnání s konvenčními minerálními oleji. Maziva bez aditiv navíc minimalizují riziko chemické degradace DLC vrstev, jelikož neobsahují agresivní sloučeniny, jako jsou sloučeniny síry nebo fosforu, které by mohly narušovat povrchovou integritu [8].

Přesto i DLC povlaky podléhají postupné degradaci, zejména při dlouhodobém vystavení vyšší relativní vlhkosti, kolísajícímu zatížení a teplotám typickým pro reálný provoz. Výzvou do budoucna zůstává optimalizace struktury DLC vrstev tak, aby kromě nízkého opotřebení zajistily i stabilní třecí chování v proměnlivých podmínkách okolního prostředí. To zahrnuje nejen sladění DLC povlaku s vhodnými typy maziv, ale také zajištění jejich stability, mazacího účinku a nízké rychlosti opotřebení při působení okolních vlivů prostředí.

Dosavadní výzkumy se zaměřují zejména na chování DLC povlaků v řízených laboratorních podmínkách. Pro aplikace v běžném prostředí se nabízí široký prostor pro doplnění poznatků o systémech, kde je sledován vývoj opotřebení při opakovaném zatížení, při různých úrovních vlhkosti nebo v kombinaci s reálně použitelnými mazivy či aditivami. Tato bílá místa výzkumu představují prostor pro experimentální hodnocení opotřebení, tření a vývoje tribovrstev během experimentu v běžné atmosféře bez umělého syčení prostředí plyny, například dusíkem.

Paleta použitelných maziv

Maziva hrají klíčovou roli při dosažení nízkého tření a minimalizaci opotřebení DLC povlaků, zejména v mezném a smíšeném režimu mazání, kde dochází k částečnému kontaktu asperit. U DLC je však situace specifická, protože kvůli chemické inertnosti povrchu bývá jejich interakce s běžnými EP/AW aditivy (ZDDP, MoDTC) omezená [8]. Výzkumy proto ukazují, že vhodnější volbou jsou polární maziva bez aditiv, která jsou schopna vytvářet stabilní adsorpční vrstvy na povrchu vrstev a-C:H nebo ta-C:H.

Výzkumy ukazují, že polární maziva bez aditiv, jako je glycerol, syntetické estery a PEG, vykazují na DLC nejvyšší stabilitu a nejnižší hodnoty tření [5; 7]. Glycerol dosahuje velmi nízkého tření ($\mu \approx 0,04\text{--}0,06$) díky hydratačním efektům, zatímco PEG umožňuje tvorbu tribochemických vrstev s uhlíkovými kvantovými tečkami, které stabilizují mazací film i při smíšeném mazání.

Naopak nepolární maziva, jako jsou parafínové oleje nebo PAO, vykazují nízkou afinitu k DLC povrchům, což vede ke slabší ochraně povlaku, vyššímu tření ($\mu > 0,08$) a rychlejšímu opotřebení [7]. Reaktivní maziva s nenasycenými řetězci (např. olejová kyselina nebo methyl oleát, sice snižují tření, ale současně vedou k chemickému poškození DLC struktury vlivem tribochemických reakcí [5].

Vzhledem k těmto poznatkům je zřejmé, že vhodnost maziva nelze posuzovat pouze podle dosaženého součinitele tření. Jako perspektivní se jeví hledání maziv či aditiv, která budou kombinovat fyzikální adsorpci s mírnou chemickou stabilizací povrchu i v běžné atmosféře. Zejména je potřeba ověřit dlouhodobou účinnost polárních a nepolárních maziv za reálných provozních podmínek, kde dosud chybí systematická data.

Superlubricita v mezném/smíšeném režimu mazání

Superlubricita DLC povlaků byla historicky pozorována především v ideálních podmínkách EHD mazání nebo v suchém režimu za inertní atmosféry [9]. Novější výzkumy však ukazují, že nízkých hodnot tření pod $\mu \approx 0,01$ lze dosáhnout i v mezném a smíšeném režimu mazání, kde dochází k částečnému kontaktu asperit a přítomnosti tenké mazací vrstvy [3; 7]. Klíčovou roli zde hraje schopnost DLC povlaků vytvářet tribochemicky aktivní vrstvy, které snižují smykové napětí na rozhraní kontaktu.

Významným faktorem pro stabilizaci superlubricity v těchto režimech je volba vhodného maziva. Polární maziva jako jsou PEG a glycerol prokázala schopnost podporovat tvorbu ochranných tribofilmů i při vysokém kontaktním tlaku a nízkých tloušťkách mazacích filmů [10]. Například použití PEG umožnilo dosažení součinitele tření $\mu \approx 0,009$ v režimu smíšeného mazání při zatížení přesahujícím 800 MPa. Tento efekt byl podmíněn tvorbou uhlíkových kvantových teček (CQDs) a hydroxylovaných vrstev, nikoliv tvorbou klasických transferových vrstev [7].

Přestože tyto výsledky potvrzují potenciál DLC povlaků dosáhnout superlubricity i mimo ideální podmínky, řada otázek zůstává otevřená. Zatím není jednoznačně popsáno, jaký je minimální rozsah parametrů, zejména vlhkosti, rychlosti skluzu a teploty, který umožňuje stabilní vznik superlubricity v běžné atmosféře [6].

Přestože byly opakovaně prokázány případy superlubricity v mezním a smíšeném režimu, dosud není dostatečně objasněno, zda je pro vznik stabilní superlubricity nezbytná záběhová fáze, nebo zda lze funkční tribovrstvu vytvořit okamžitě. Otázkou zůstává i míra vlivu výchozí topografie povrchu, zejména v mezním kontaktu, kde nosnost zajišťují jen styčné plochy s výčnělky. Dále chybí mapování vlivu jednotlivých provozních parametrů, tedy tlaku, teploty, rychlosti a vlhkosti, na vznik a stabilitu tribochemických vrstev zajišťujících superlubricitu. Výzkum by se měl proto zaměřit na nalezení hranic a mechanismů, které by umožnily dosažení nízkého tření i mimo umělé atmosférické prostředí.

Vstupující parametry pro dosažení superlubricity

Vznik a udržení stavu superlubricity je výsledkem komplexní interakce několika provozních parametrů, zejména kontaktního tlaku, skluzové rychlosti, teploty a chemického složení prostředí [4]. Studie ukazují, že mírně zvýšená teplota (50–100 °C) může podpořit tribochemickou aktivaci povrchu, a tím usnadnit vznik grafitizovaných nebo hydroxylovaných vrstev s nízkým smykovým odporem [9]. Naopak při příliš vysokých teplotách nebo při přítomnosti reaktivních plynů (O_2 , H_2O) dochází ke ztrátě pasivace a následnému nárůstu tření [6].

Kontaktní tlak hraje dvojí roli, na jedné straně přispívá k vyhlazení povrchu a aktivaci tribochemických reakcí, na druhé straně však může vést k přímému poškození povrchové vrstvy, pokud překročí kritickou mez. Experimenty ukazují, že u DLC povlaků lze i při zatíženích kolem 800–850 MPa dosáhnout superlubricity, pokud je použit vhodný mazací film, který stabilizuje tribochemicky aktivní oblast [7]. Rychlost skluzu ovlivňuje nejen tloušťku mazací vrstvy, ale také rychlost tvorby tribofilmu. Vyšší rychlosti ($> 0,3$ m/s) byly spojeny s růstem nízkotřecích struktur typu CQDs a přechodem do smíšeného mazacího režimu s $\mu < 0,01$.

V praxi je obtížné sladit všechny vstupní parametry tak, aby bylo dosaženo a udrženo stabilní superlubricity, zvláště v okolní atmosféře. Zvýšená vlhkost, změny teploty a zatížení destabilizují tribochemicky aktivní vrstvy a způsobují výkyvy tření. Ve studiích chybí systematické údaje o hraničních hodnotách tlaku, rychlosti či teploty, které superlubricitu umožňují nebo ruší. Experimentální ověření těchto mezních hodnot, zvláště v přirozené atmosféře s kolísajícími vlivy prostředí, by mohlo zásadně přispět k aplikovatelnosti DLC povlaků v technické praxi.

Výstupní veličiny a jejich vyhodnocení

Hodnocení superlubricity vyžaduje vysokou citlivost měřicí techniky i správnou interpretaci výsledků. Nejčastěji používanými metodami ve studiích jsou tribotesty typu pin-on-disk nebo ball-on-flat, které umožňují stanovit součinitel tření a průběh jeho změny v čase. Dále je nutné sledovat nejen samotné tření, ale i opotřebení, tloušťku mazacího filmu, chemické změny na povrchu a charakter tribofilmu [3].

Přestože existují zavedené experimentální protokoly, stále neexistuje jednotná metodika, která by umožnila jednoznačně porovnávat výsledky napříč různými laboratořemi. Mezi hlavní problémy patří rozdílné testovací, zejména zatížení, geometrie, doba trvání a prostředí, nejednotný způsob výpočtu součinitele tření a variabilita hodnocení tribochemických jevů. Tyto rozdíly ztěžují objektivní srovnání výstupů a omezují přenositelnost výsledků do praxe. Zvláštní výzvou zůstává testování v okolní atmosféře, kde přítomnost kyslíku a vlhkosti může ovlivňovat opakovatelnost, citlivost a stabilitu tribochemických procesů.

Z těchto důvodů je potřeba definovat hodnoticí rámec pro DLC povlaky, který bude zahrnovat nejen tření a opotřebení, ale také vývoj tribovrstvy v reálných provozních podmínkách. Ačkoli většina výzkumných pracovišť postupuje při hodnocení superlubricity obdobně, chybí jednotná a normalizovaná metodika, zejména pokud jde o posouzení jejího vzniku a časové stability. Vzhledem k této absenci standardizace je vhodné se inspirovat osvědčenými přístupy jednotlivých pracovišť a zohlednit je při tvorbě uceleného a prakticky využitelného hodnoticího systému. Komplexní tribologická a povrchová analýza je navíc prováděna jen výjimečně, což dále omezuje srovnatelnost výsledků.

2.4 Mezera v poznání

Mezery v poznání v oblasti tření DLC povlaků

Dosavadní výzkum tření DLC povlaků je silně orientován na experimenty v řízených, převážně inertních atmosférách. Přestože bylo opakovaně prokázáno dosažení velmi nízkých hodnot součinitele tření až v oblasti superlubricity, tyto výsledky nejsou přímo přenositelné do reálného provozu v běžné atmosféře. Chybí systematická data popisující dlouhodobý vývoj tření DLC povlaků při působení kyslíku a vodní páry, včetně přímého srovnání s inertním prostředím za identických mechanických podmínek. Není rovněž jasné, jak rychle dochází k degradaci povrchové pasivace a zda je tento proces vratný nebo kumulativní.

Mezery v poznání v oblasti opotřebení DLC povlaků

Přestože jsou DLC povlaky obecně považovány za vysoce odolné proti opotřebení, většina dostupných studií hodnotí opotřebení na základě krátkodobých testů nebo v konstantních laboratorních podmínkách. Chybí experimenty zaměřené na dlouhodobé a cyklické zatěžování v běžné atmosféře, které by umožnily identifikovat dominantní degradační mechanismy při kombinaci mechanického namáhání, oxidace a vlhkosti. Neexistuje ucelený popis vazby mezi vývojem tření, změnami tribochemických vrstev a rychlostí opotřebení v čase.

Mezery v poznání v oblasti použitelných maziv pro DLC

Ačkoli byly polární maziva bez aditiv identifikována jako perspektivní pro DLC povlaky, jejich dlouhodobá účinnost v běžné atmosféře není dostatečně ověřena. Chybí systematické srovnání polárních a nepolárních maziv z hlediska stability adsorpčních vrstev, vlivu na opotřebení a schopnosti kompenzovat negativní účinky vlhkosti a kyslíku. V literatuře nejsou dostupná data, která by hodnotila nejen okamžitý součinitel tření, ale i časový vývoj mazacího účinku a chemické stability DLC povlaku.

Mezery v poznání v oblasti superlubricity v mezném a smíšeném režimu

Superlubricita DLC povlaků v mezném a smíšeném režimu mazání byla prokázána pouze v omezeném rozsahu podmínek. Není dosud jasně určeno, jaký rozsah provozních parametrů, tedy tlaku, rychlosti, teploty a vlhkosti, umožňuje stabilní vznik superlubricity v běžné atmosféře. Zůstává otevřená otázka, zda je pro dosažení superlubricity nezbytná záběhová fáze, a jaký vliv má výchozí topografie povrchu na vznik tribochemických vrstev nesoucích nízké smykové napětí.

Mezery v poznání v oblasti vstupních parametrů superlubricity

V literatuře chybí systematické mapování mezních hodnot kontaktního tlaku, skluzové rychlosti a teploty, při nichž dochází ke vzniku nebo zániku superlubricity u DLC povlaků v okolní atmosféře. Dosavadní výsledky jsou často izolované a nelze z nich odvodit obecně platná kritéria. Absence těchto dat znemožňuje návrh tribologických systémů pracujících v oblasti stabilního extrémně nízkého tření mimo laboratorní podmínky.

Mezery v poznání v oblasti výstupních veličin a metod hodnocení

Hodnocení superlubricity DLC povlaků postrádá jednotnou a standardizovanou metodiku. Rozdíly v testovacích geometriích, provozních podmínkách a způsobech vyhodnocení tření a opotřebení výrazně komplikují srovnání výsledků mezi jednotlivými studiemi. Zvláště v běžné atmosféře není dostatečně řešena reprodukovatelnost měření a komplexní hodnocení tribovrstev. Chybí integrovaný hodnoticí rámec, který by propojil tření, opotřebení a povrchovou analýzu v čase.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Výzkumné otázky

Otázka 1:

Jak mastné kyseliny jako aditiva v základovém mazivu ovlivňují režim mezného mazání u nedopovaných DLC povlaků?

Otázka 2:

Jak zvýšení provozní teploty ovlivní součinitel tření v mezném až smíšeném režimu mazání?

Otázka 3:

Jaký má vliv počáteční povrchová drsnost na dosažení nízkého součinitele tření při mezném mazání?

3.2 Cíle výzkumu

Hlavním cílem práce je experimentálně zjistit vliv mastných kyselin jako aditiv do základového maziva a dalších modifikátorů tření spolu s provozními podmínkami na tření a opotřebení v kontaktech s DLC povlaky v mezném až smíšeném režimu mazání. Práce současně přispívá k objasnění mechanismů působení směsí maziv a aditiv z hlediska dosažení superlubricity.

Diplomová práce je orientovaná na **základní výzkum**.

Dílčí cíle:

- Zpracovat přehled tribologie DLC povlaků a modifikátorů tření dosahujících superlubricity
- Navrhnout experimenty a vzorky pro testování
- Navrhnout úpravy zařízení pro provedení experimentů
- Realizovat měření tření, topografie povrchu a vyvodit závěry

3.3 Hypotézy

Hypotéza 1:

Různá aditiva přidaná do PEG400 ovlivňují mezní mazání nedopovaných DLC povlaků rozdílnou schopností vytvářet a udržet tenký mazací film na rozhraní během záběhové fáze. Tento předpoklad vychází z poznání, že nízké tření u DLC není dáno pouze vlastnostmi povlaku, ale kombinací vlastností povrchu, maziva a podmínek v kontaktu [9; 4]. PEG jako polární mazivo je schopen při nízkých rychlostech vytvářet stabilní mezní vrstvy, které mohou za vhodných podmínek vést k velmi nízkému tření až k superlubrikačnímu chování [15; 7].

Přídavek mastných kyselin může tento efekt dále modifikovat, protože jejich dlouhé uhlíkové řetězce podporují tvorbu uspořádané mezní vrstvy a polární funkční skupiny zvyšují afinitu k povrchu. Účinnost tohoto mechanismu však bude záviset na schopnosti vytvořit souvislý film během záběhu a udržet jej i při zatížení. Vhodná kombinace maziva a aditiva tak může snížit podíl přímého kontaktu asperit, urychlit záběh a podpořit přechod z mezního do smíšeného režimu mazání [16; 17].

Hypotéza 2:

Stabilita mazacího filmu a průběh tření v mezním až smíšeném režimu jsou významně ovlivněny teplotními a zatěžovacími podmínkami v kontaktu. Se zvyšující se teplotou lze v určitém intervalu očekávat snížení tření v důsledku snazšího formování mazací vrstvy a lepší adaptace rozhraní během záběhu [12]. Tento efekt je zvláště významný u polárních maziv, jako je PEG, kde dochází ke změně reologických vlastností a schopnosti vytvářet mezní film.

Při vyšších teplotách však dochází ke snížení viskozity maziva, zhoršení únosnosti mazacího filmu a ke zvýšení podílu přímého kontaktu asperit, což vede ke zvýšení součinitele tření i opotřebení [5]. Lze proto předpokládat existenci teplotního intervalu, ve kterém dochází k optimalizaci tření a případně i k dosažení velmi nízkých hodnot tření typických pro superlubrikační režim [4; 6].

Hypotéza 3:

Průběh záběhu, formování mazacího filmu a výsledné tření jsou podmíněny počáteční povrchovou topografií DLC povlaků. Nižší povrchová drsnost umožňuje rovnoměrnější rozložení kontaktního tlaku, menší podíl přímého kontaktu asperit a snazší vytvoření souvislého mazacího filmu během záběhu. To vede ke stabilnějšímu tření a rychlejšímu přechodu do ustáleného stavu.

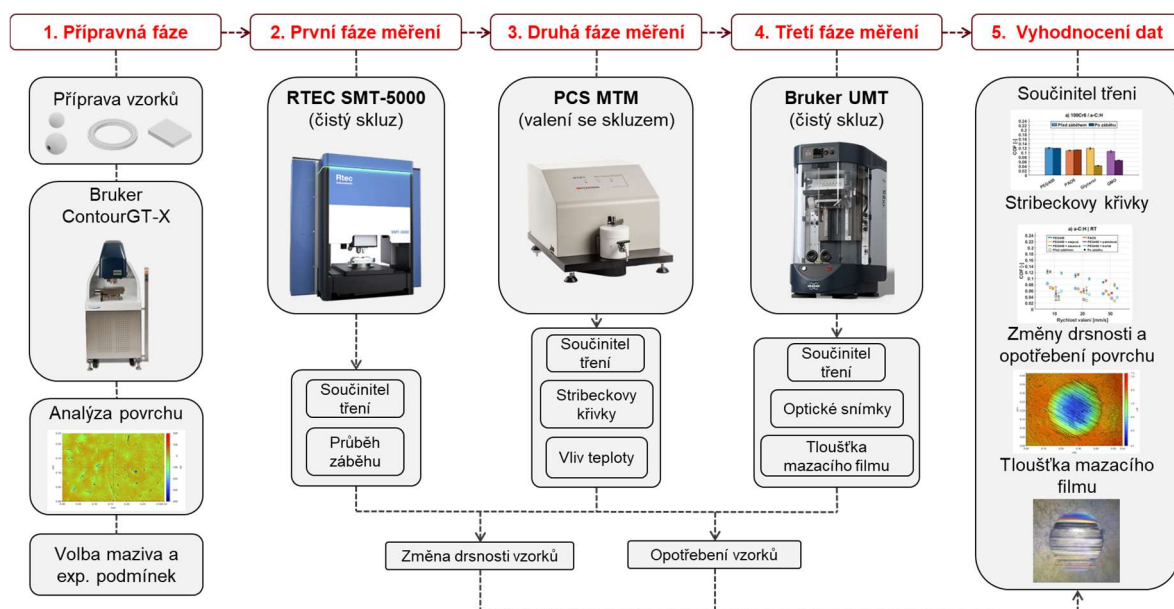
Naopak vyšší drsnost vede k vyšším lokálním tlakům, častějšímu přerušování mazacího filmu a zvýšenému opotřebení. Tento efekt může být zesílen u tvrdších povlaků, jako je ta-C, kde dochází k vyšším lokálním napětím, zatímco u a-C:H může být vliv částečně zmírněn vyšší reaktivitou povrchu díky přítomnosti vodíku [18; 4; 3]. Změna drsnosti před a po testu by měla souviset se stabilitou mazacího filmu a výsledným třením.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Experimentální hodnocení bylo založeno na kombinaci tribologických měření, optické profilometrie a optického sledování kontaktní oblasti. Jednotlivé metody byly zvoleny tak, aby poskytly vzájemně doplňující informace o chování DLC povlaků v mezním až smíšeném režimu mazání. Měření součinitele tření popisovalo třecí odezvu kontaktu v průběhu zatěžování, profilometrie sloužila k charakterizaci topografie povrchu a vyhodnocení opotřebení, zatímco optické sledování doplnilo tato data o informace o rozložení maziva a formování mazacího filmu v kontaktu.

Experimentální část práce byla provedena na vzorcích z oceli 100Cr6 s DLC povlaky typu a-C:H a ta-C, přičemž pro vlastní měření byly použity vzorky s nižší počáteční drsností. Tribologická měření byla realizována ve dvou pohybových režimech. Lineární reciproční kontakt typu ball-on-plate byl využit pro sledování časového vývoje součinitele tření a průběhu záběhu v režimu čistého skluzu. Měření v konfiguraci ball-on-disc umožnilo hodnotit třecí chování při valení se skluzem a stanovit Stribeckovy křivky v oblasti nízkých rychlostí. Jako maziva byla použita neaditivovaná maziva a směsi PEG400 s mastnými kyselinami, což umožnilo porovnat vliv složení maziva, aditiv, teploty a typu DLC povlaku na výsledné tribologické chování. Celkový postup experimentální práce je znázorněn na Obr. 4-1.

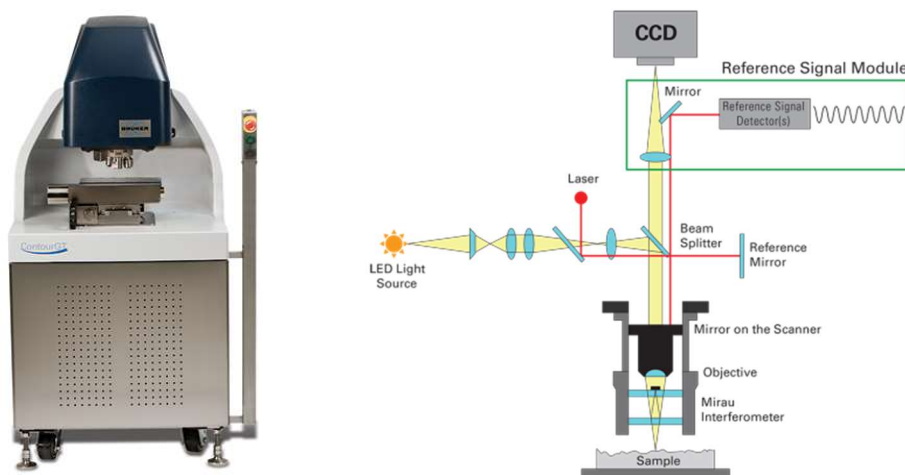


Obr. 4-1 Schéma postupu experimentální metodiky

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

Optický 3D profilometr

Pro bezkontaktní skenování topografie povrchu DLC a ocelových vzorků byl použit optický 3D profilometr Bruker ContourGT-X společnosti Bruker Corporation. Přístroj pracuje na principu interferometrie bílého světla (Obr. 4-2) a umožňuje 3D měření povrchu s vertikálním rozlišením až 0,01 nm a skenovacím rozsahem v ose z od 0,1 nm do 10 mm. Podle charakteru povrchu lze využít režim VSI (Vertical Scanning Interferometry), který umožňuje bezkontaktní 3D měření jemných nerovností povrchu v nanometrové oblasti. Zařízení je vybaveno výměnnými objektivy se zvětšením 2× až 50× a měření bylo zpracováno v softwaru Vision64. V této práci sloužil profilometr především k vyhodnocení topografie a homogenity povrchu, přičemž hlavním sledovaným parametrem byla plošná drsnost S_q .



Obr. 4-2 Zařízení Optický profilometr ContourGT-X [19] (vlevo) a schéma principu interferometrie (vpravo)

Tribometr RTEC SMT-5000

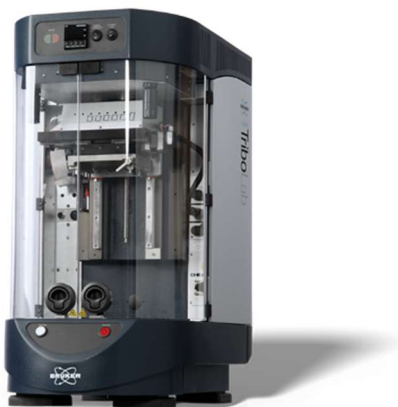
Tribometr RTEC SMT-5000 je zařízení určené pro tribologická měření se záznamem normálové a tangenciální síly v průběhu kontaktu. Zařízení umožňuje provádět měření při recipročním lineárním pohybu typu ball-on-plate, přičemž součinitel tření je stanoven z poměru třecí a normálové síly. Měřicí systém umožňuje modulární výměnu snímačů normálového zatížení podle požadovaného rozsahu a citlivosti měření. K dispozici jsou snímače pro velmi nízká zatížení a dále snímače s rozsahem do 1 N a 43 N. Pohyb stolu je řízen krokovými motory a během testu jsou kontinuálně zaznamenávány hodnoty normálové síly, třecí síly a polohy. Součástí zařízení je také optický modul pro vizuální kontrolu kontaktní oblasti s objektivem se zvětšením 5×.



Obr. 4-3 Tribometr RTEC SMT-5000 [20]

Tribometr UMT Bruker

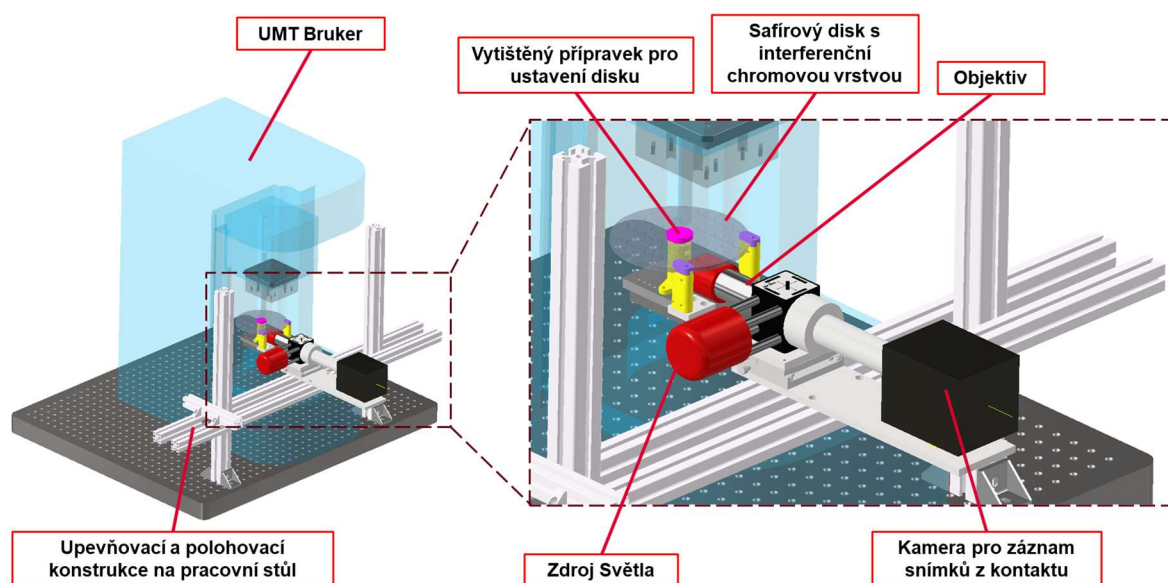
Jedná se o modulární tribometr určený pro tribologická měření s řízeným zatěžováním a záznamem normálové a tangenciální síly v průběhu kontaktu. Zařízení umožňuje zpětnovazební regulaci normálové síly a vyhodnocení součinitele tření z poměru třecí a normálové síly. Podle konfigurace může pracovat v rozsahu zatížení 1 mN až 2 kN, s využitím výměnných silových snímačů. Pro reciproční pohyb je uváděno maximální nastavení dráhy od 0,1 do 25 mm, při frekvenci až 60 Hz a polohové rozlišení přibližně 1 μm . Zařízení dále umožňuje záznam více synchronizovaných signálů s frekvencí až 200 kHz, což je vhodné pro detailní sledování průběhu tření během pohybového cyklu. V této práci byl tribometr využit v konfiguraci recipročního lineárního kontaktu typu ball-on-plate pro měření součinitele tření a současné optické pozorování kontaktní oblasti.



Obr. 4-4 Zařízení UMT Bruker TriboLab [21]

Optická aparatura pro sledování kontaktní oblasti pro UMT Bruker

Pro optické sledování kontaktní oblasti byl na Ústavu konstruování vytvořen první prototyp přídatné optické aparatury (Obr. 4-5) k tribometru UMT Bruker. Konstrukce aparatury umožňuje pozorovat kontakt přes transparentní disk, který je upevněn v testovací přípravku a zatěžován kuličkou z horní strany. Pod diskem je umístěna optická část tvořená kamerou a osvětlovacím systémem. Kamera je připojena k počítači a prostřednictvím ovládacího softwaru umožňuje pořizování snímků i videozáznamu kontaktní oblasti v reálném čase. Aparatura je zasunuta do prostoru pod diskem a její poloha je nastavována ručně pomocí šroubů tak, aby bylo možné vyhledat kontaktní oblast. V této práci byla využita ke sledování rozložení maziva a formování mazacího filmu přímo v kontaktu během recipročního tribologického testu.



Obr. 4-5 Přídatná optická aparatura pro sledování kontaktní oblasti na tribometru UMT Bruker

Tribometr MTM (Mini Traction Machine)

MTM (Mini Traction Machine) od společnosti PCS Instruments je tribometr určený pro měření tření v konfiguraci ball-on-disc, kde je možné kombinovat valivou a skluzovou složku pohybu. Hlavní výhodou zařízení je nezávislé řízení rychlosti kuličky a disku, díky kterému lze nastavit definovaný poměr skluzu k odvalování SRR (Slide-to-Roll Ratio). Zařízení tak umožňuje řízeně měnit podíl skluzu v kontaktu a sledovat třecí chování v širokém rozsahu mazacích režimů. Pracovní rozsah zařízení zahrnuje zatížení až 75 N, střední rychlost -4 až $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, hodnotu SRR 0-200% a teplotu maziva až $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [22]. V této práci bylo zařízení využito zejména pro rekonstrukci Stribeckových křivek v oblasti nízkých rychlostí a pro posouzení vlivu záběhu, teploty a složení maziva na třecí chování DLC povlaků.



Obr. 4-6 Zařízení Mini Traction Machine od PCS Instruments [22]

4.3 Materiál a testovací podmínky

4.3.1 Materiál a maziva

Pro experimentální část práce byly použity vzorky z ložiskové oceli 100Cr6, která sloužila jako základní substrát pro nanesení DLC povlaků. Vzorky byly připraveny ve formě destiček o rozměrech 20×30 mm, ložiskových kroužků s vnějším průměrem 47 mm a ocelových kuliček o průměru 6 mm. Vzorky uvedené v Tab. 4-1 byly následně povlakovány DLC vrstvami typu a-C:H a ta-C.

Tab. 4-1 Přehled připravených vzorků s DLC povlaky

DLC povlak	Destička	Ložiskový kroužek	Kulička $\varnothing 6$ mm
a-C:H	2x10 nm	2x10 nm	2x10 nm
a-C:H	2x50 nm	2x50 nm	2x50 nm
Ta-C	2x10 nm	2x10 nm	2x10 nm
Ta-C	2x50 nm	2x50 nm	2x50 nm

V závislosti na konfiguraci experimentu byly dále použity nepovlakované ocelové kuličky o průměru 8 mm pro optická měření a 19,05 mm kuličky pro měření na zařízení MTM. Pro optické sledování kontaktu byl použit transparentní safírový disk s chromovou vrstvou, který umožnil pozorování kontaktní oblasti během optického pozorování formování mazacího filmu.

Povrchy vzorků byly před nanesením DLC povlaků upraveny broušením a leštěním s cílem dosáhnout dvou úrovní počáteční plošné drsnosti, a to $S_q \approx 10$ nm a $S_q \approx 50$ nm. Podrobný postup přípravy vzorků je uveden v následující kapitole 4.4.1. Po depozici DLC povlaků došlo ke zvýšení výsledné drsnosti povrchu, přičemž jemně připravené povrchy vykazovaly hodnoty přibližně $S_q \approx 15\text{--}20$ nm a hrubší varianta přibližně $S_q \approx 70\text{--}80$ nm. Pro experimentální měření byly použity pouze vzorky s nižší výslednou drsností, protože lépe odpovídají inženýrským povrchům a zároveň umožňují citlivěji sledovat formování tenkých mazacích filmů a vliv maziv na třecí chování. Hrubší vzorky byly připraveny v rámci návrhu experimentu, ale do finálního experimentálního měření nebyly zahrnuty. Konkrétní přehled použitých materiálů je uveden v Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Přehled použitých materiálů a jejich vybraných vlastností

Materiál	Modul pružnosti E (GPa)	Poissonův poměr (-)	Tloušťka DLC vrstvy dle výrobce (μm)
100Cr6	210	0,3	-
a-C:H	100	0,25	2-4
ta-C	600	0,20	2-4
Safír	380	0,25	-

V rámci experimentů byla použita čistá maziva PEG400, PAO6, glycerol a GMO. Tato maziva byla zvolena tak, aby bylo možné porovnat rozdílný vliv polarity, charakteru molekulární struktury a přítomnosti funkčních skupin na tribologické chování DLC povlaků. PEG400 a glycerol představují polární maziva s hydroxylovými skupinami, zatímco PAO6 bylo použito jako nepolární syntetický uhlovodíkový olej. GMO bylo zařazeno jako esterové mazivo s polární částí molekuly a delším uhlovodíkovým řetězcem. Přehled použitých čistých maziv je uveden v Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Přehled použitých maziv bez aditiv

Mazivo	Charakter maziva	Polarita
PEG400	polyetherové mazivo	vysoká
PAO6	syntetický uhlovodíkový olej	nízká
Glycerol	vícesytný alkohol	vysoká
GMO	esterové mazivo	střední

Pro přípravu směsí bylo jako základové mazivo bylo prioritně použito PEG400, do kterého byla jednotlivě přidávána vybraná aditiva v koncentraci 5 hm.%. Použitými aditivy byly kyselina palmitová, kyselina olejová, kyselina stearová a kyselina boritá. Kyselina palmitová, olejová a stearová patří mezi mastné kyseliny a liší se délkou uhlíkového řetězce a stupněm nasycení. Společným znakem těchto kyselin je přítomnost karboxylové skupiny COOH, která tvoří polární část molekuly. Kyselina boritá byla zařazena jako anorganická kyselina bez uhlíkového řetězce. Přehled použitých aditiv je uveden v Tab. 4-4.

Tab. 4-4 Přehled aditiv použitých pro přípravu mazacích směsí

Aditivum	Chemický vzorec	Typ látky	Nasycenost	Aktivní skupina
Kyselina olejová	$C_{18}H_{34}O_2$	mastná kyselina	Nenasycená	karboxylová skupina COOH
Kyselina palmitová	$C_{16}H_{32}O_2$	mastná kyselina	Nasycená	karboxylová skupina COOH
Kyselina stearová	$C_{18}H_{36}O_2$	mastná kyselina	Nasycená	karboxylová skupina COOH
Kyselina boritá	H_3BO_3	anorganická kyselina	-	hydroxylové skupiny B–OH

4.3.2 Stanovení provozních podmínek

Volba konkrétních hodnot byla provedena na základě porovnání publikovaných studií zaměřených na DLC povlaky, maziva a podmínky tenkofilmového mazání. V jednotlivých pracích se použité provozní podmínky výrazně liší, protože jsou vždy přizpůsobeny konkrétnímu tribometru, kontaktní geometrii, materiálové dvojici, typu maziva a sledovanému mechanismu. Rozdíly se objevují zejména ve zvoleném zatížení, kontaktním tlaku, rychlosti pohybu, teplotě i délce testu. Z tohoto důvodu nebylo vhodné převzít jeden univerzální soubor parametrů. Pro tuto práci byly proto vybrány takové podmínky, které odpovídají rozsahu používanému v relevantních studiích a současně umožňují cíleně sledovat chování maziv a aditiv při nízkých rychlostech, vysokém kontaktním tlaku a omezené tloušťce mazacího filmu.

Přehled vybraných studií, které byly použity jako podklad pro návrh provozních podmínek, je uveden v Tab. 4-5. Do přehledu byly zahrnuty práce, které se svým zaměřením nejvíce blížily této diplomové práci, zejména z hlediska použitých DLC povlaků, maziv, kinematických konfigurací a oblasti mezního nebo smíšeného režimu mazání.

Tab. 4-5 Přehled vybraných studií použitých při návrhu provozních podmínek

Materiály	Mazivo / aditivum	Teplota / RH	Amplituda / čas testu	Rychlost / frekvence	Zatížení / Hertzův tlak	Konfigurace kontaktní	Studie
a-C, ocel	PEG, PPG, parafin, polyether, suchý kontakt	RT, RH $\approx$ 50 %	–	21–420 mm·s ⁻¹ , pro mezní režim 20–80 mm·s ⁻¹	2 N / 0,85 GPa	Ball-on-disc, rotační pohyb, přepočet na lineární rychlost	[7]
a-C:H	glycerol, parafin	40 °C	–	6,1 → 1,3 mm·s ⁻¹	1,25 a 1,95 GPa	Ball-on-disc, rotační	[10]
ta-C, a-C, 100Cr6	glycerol, GMO, kyselina olejová,	RT–80 °C, RH 40–70 %	1 mm / 1 h	50 Hz, přibližně 0,1 m·s ⁻¹	50 N / 1,7 GPa	Ball-on-plate, lineární oscilace	[5]
ta-C, a-C:H, ocel	glycerol, kyselina mléčná, kyselina	RT, RH $\approx$ 70 %	1 h	50 mm·s ⁻¹	5 N / přibližně 360 MPa	Pin-on-disc, rotační	[23]
ocel, a-C:H, ta-C	kyselina olejová, allylalkohol	RT	20 mm / 30 min	50 mm·s ⁻¹	5 N / 70 MPa	Ball-on-disc, rotační + lineární	[24]

Na základě porovnání těchto studií byly provozní podmínky nastaveny tak, aby odpovídaly oblasti nízkých rychlostí a vysokého kontaktního tlaku, kde se výrazně uplatňuje přímý kontakt asperit, adsorpce polárních složek maziva a případné tribochemické procesy. Normálové zatížení bylo stanoveno s ohledem na požadovaný Hertzův kontaktní tlak. U lineárních recipročních testů byl zvolen kontaktní tlak 1,5 GPa, který umožňuje studium chování kontaktu v podmínkách mezního mazání. U měření na zařízení MTM byl kontaktní tlak nastaven na 1 GPa tak, aby nedošlo k přetížení zařízení. Na tomto zařízení tak lze sledovat třecí chování při valení se skluzem a současně rekonstruovat Stribeckovy křivky v oblasti nízkých rychlostí.

Rychlostní podmínky byly voleny tak, aby bylo možné zachytit jak časový vývoj tření, tak vliv rychlosti na změnu mazacího režimu. U recipročních testů byla použita délka dráhy 5 mm a frekvence 2 Hz. Při tomto nastavení odpovídá průměrná kluzná rychlost hodnotě přibližně $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž okamžitá rychlost se v průběhu cyklu mění a v úvratích klesá na nulovou hodnotu. U zařízení MTM byla změna rychlosti využita pro stanovení Stribeckových křivek, přičemž pozornost byla zaměřena především na oblast nízkých rychlostí odpovídající meznímu až smíšenému režimu mazání.

Teplotní podmínky byly stanoveny s ohledem na vliv teploty na viskozitu maziva, stabilitu mazacího filmu a chování aditiv v kontaktu. Základní měření byla provedena při pokojové teplotě (RT), která odpovídá běžným laboratorním podmínkám. Pro vybraná měření na zařízení MTM byla použita také teplota 60 °C, aby bylo možné posoudit vliv zvýšené teploty na třecí chování maziv a směsí s mastnými kyselinami. Tato teplota byla zvolena jako dostatečně zvýšená pro ovlivnění vlastností maziva, ale zároveň taková, aby nedocházelo k extrémnímu tepelnému zatížení testovaného systému.

Doba měření byla zvolena s ohledem na možnost sledovat průběh záběhu a následnou stabilizaci třecí odezvy. U lineárních recipročních testů byla doba měření nastavena na 3600 s, což umožnilo vyhodnotit počáteční i ustálenou fázi tření. U měření na zařízení MTM byla doba testu nastavena na 1800 s, přičemž hlavním výstupem bylo stanovení třecí odezvy při změně rychlosti a porovnání Stribeckových křivek před a po záběhu.

Zvolené provozní podmínky tak umožnily porovnat jednotlivé mazací systémy, typy DLC povlaků a kontaktní režimy při zachování návaznosti na publikované experimentální práce. Přehled finálních podmínek použitých u jednotlivých zařízení je uveden v Tab. 4-6.

Tab. 4-6 Přehled provozních podmínek použitých při experimentálních měřeních

Podmínky experimentu	RTEC STM-5000	PCS MTM	Bruker UMT
Charakter kontaktu	čistý skluz	valení se skluzem	čistý skluz
Konfigurace	ball-on-plate	ball-on-disc	Ball-on-plate
Hertzův kontaktní tlak	1,5 GPa	1 GPa	1,5 GPa
Zatížení	10 N	36 N	20 N
Délka dráhy	5 mm	-	5 mm
Frekvence pohybu	2 Hz	-	2 Hz
Průměrná kluzná / valivá rychlost	20 mm·s ⁻¹	kroky / 20 mm·s ⁻¹	20 mm·s ⁻¹
Teplota	RT	RT / 60 °C	RT
Doba měření	3600 s	1800 s	3600 s

4.3.3 Koncepce experimentálního plánu

Experimentální plán byl rozdělen do tří navazujících fází, které se lišily kontaktní konfigurací, charakterem pohybu a typem získané informace. První fáze byla provedena na tribometru SMT-5000 v konfiguraci ball-on-plate při lineárním recipročním pohybu. Toto uspořádání odpovídalo čistému skluzu a bylo využito především pro sledování časového průběhu součinitele tření, průběhu záběhu a stability třecí odezvy. Výsledky z této fáze sloužily jako základní porovnání jednotlivých maziv, aditiv a materiálových dvojic v podmínkách mezního mazání.

Druhá fáze byla realizována na zařízení MTM v konfiguraci ball-on-disc, kde bylo možné kombinovat valivou a skluzovou složku pohybu. Tato část byla zaměřena na stanovení Stribeckových křivek v oblasti nízkých rychlostí a na posouzení vlivu rychlosti, záběhu a teploty na třecí chování. Zařazení této fáze umožnilo doplnit výsledky z čistého skluzu o režim valení se skluzem, který lépe vystihuje některé technické kontakty a současně umožňuje sledovat přechod mezi mazacími režimy.

Třetí fáze byla provedena na tribometru UMT Bruker v konfiguraci čistého skluzu, rozšířené o optickou aparaturu pro sledování kontaktní oblasti. Tato měření navazovala na lineární testy, ale kromě součinitele tření poskytovala také optickou informaci o rozložení maziva a formování mazacího filmu přímo v kontaktu. Díky tomu bylo možné lépe interpretovat, zda rozdíly v tření souvisejí pouze s materiálovou dvojicí a mazivem, nebo také se schopností maziva vytvořit souvislejší film během pohybu.

Po jednotlivých fázích bylo na optickém profilometru Bruker ContourGT-X provedeno hodnocení povrchu, zejména změny plošné drsnosti a opotřebení. Profilometrie tak tvořila společný navazující krok pro všechny experimentální části a umožnila propojit třecí odezvu s reálnou změnou topografie povrchu. Vlastní vyhodnocení dat bylo následně provedeno v softwaru MATLAB, kde byly zpracovány časové průběhy tření, vybrané části záběhu, Stribeckovy křivky a porovnání mezi jednotlivými mazacími systémy.

4.4 Metody

4.4.1 Příprava vzorů

Před nanesením DLC povlaků bylo nutné připravit povrch jednotlivých vzorků, jelikož následné opracování po povlakování není z důvodu vysoké tvrdosti DLC vrstev prakticky realizovatelné. Povrchy vzorků byly proto upraveny mechanickým broušením a následně, v případě vybraných vzorků, i leštěním. Broušení probíhalo mokrou metodou s využitím izopropylalkoholu (IPA) jako média, které zajišťovalo odplavování uvolněných částic a zabráňovalo jejich zpětnému zanášení do povrchu. Proces byl realizován postupně pomocí brusných papírů s rostoucí jemností, od zrnitosti P280 až po P5000, s cílem dosažení požadovaných hodnot povrchové drsnosti.

U vzorků určených pro nižší úroveň drsnosti byla provedena dokončovací úprava leštěním. Leštění probíhalo za použití brusných past o velikosti částic v rozmezí $3/2\ \mu\text{m}$ až $0-1\ \mu\text{m}$, čímž bylo dosaženo výsledné drsnosti přibližně $S_q \approx 10\ \text{nm}$. Povrchy upravené pouze broušením vykazovaly drsnost přibližně $S_q \approx 50\ \text{nm}$. Každý typ vzorku vyžadoval individuální přístup z hlediska volby postupu a počtu kroků broušení a leštění. Přehled finální úpravy jednotlivých vzorků je uveden v Tab. 4-7.

Tab. 4-7 Přehled broušených vzorků pro následné povlakování DLC povlaky

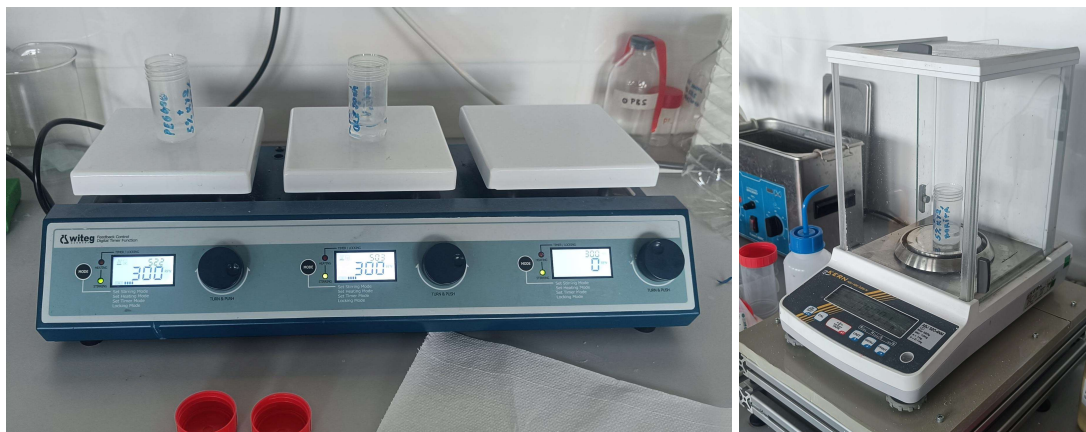
Vzorek	Drsnost S_q (nm)	Poslední použitý brusný papír	Dokončování
Destička	10 ± 2	#5000	Leštění
Destička	50 ± 5	#2000	-
Ložiskový kroužek	10 ± 2	#5000	Leštění
Ložiskový kroužek	50 ± 5	#2000	-
Kulička $\varnothing 6\ \text{mm}$	10 ± 2	-	Leštění

Během celého procesu přípravy byly hodnoty drsnosti průběžně kontrolovány pomocí optického profilometru. Měření bylo prováděno minimálně na čtyřech místech každého vzorku s cílem ověřit homogenitu povrchu a reprodukovatelnost dosažené povrchové drsnosti. Po dosažení požadovaných parametrů drsnosti S_q byly vzorky odeslány k nanesení DLC povlaků.

4.4.2 Příprava maziv

Jako základová maziva byla použita maziva PAO6, GMO, PEG400 a glycerol. Na základě literární rešerše byla k těmto základovým mazivům přidávána jednotlivá aditiva. Použitými aditivy byly mastné kyseliny, konkrétně kyselina palmitová, olejová a stearová, a dále kyselina boritá, přičemž každé aditivum bylo přidáváno samostatně pro přípravu jednotlivých mazacích směsí.

Požadované množství aditiva bylo odváženo na laboratorní analytické váze s rozlišením 0,1 mg a přidáno do předem odměřeného množství maziva tak, aby výsledná koncentrace činila 5 % hmotnosti celkové směsi. Každá směs obsahovala vždy pouze jedno aditivum, což umožnilo přímé porovnání jejich vlivu na tribologické chování. Proces vážení a přípravy směsí je znázorněn na Obr 4-7. Připravené směsi byly následně homogenizovány pomocí magnetické míchačky při teplotě 60 °C až do úplného rozpuštění kyseliny a vzniku homogenní směsi (Obr. 4-7 vlevo). Zvýšená teplota při homogenizaci byla zvolena za účelem zlepšení rozpustnosti aditiv a usnadnění jejich rovnoměrného rozptýlení v základovém mazivu. Po ukončení homogenizace byla maziva označena, uzavřena a uchovávána za laboratorních podmínek do doby provedení experimentů.



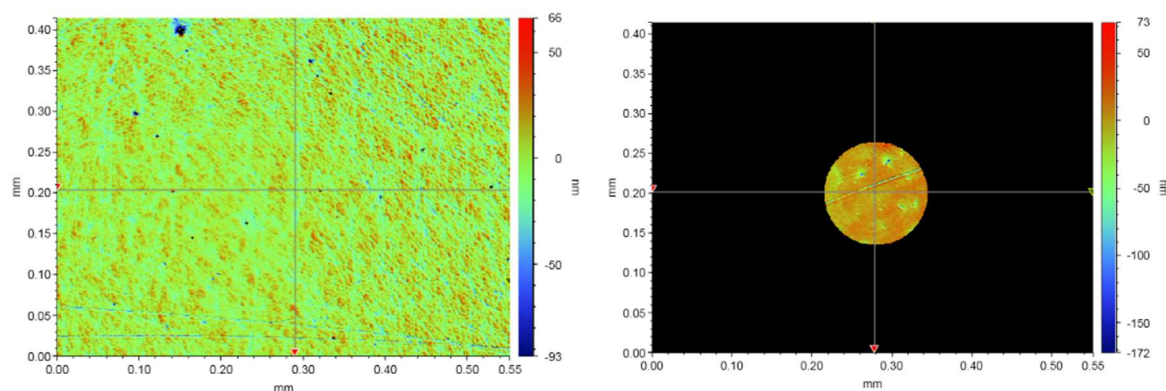
Obr. 4-7 Magnetická míchačka (vlevo) a laboratorní váha (vpravo)

4.4.3 Topografie povrchu

Měření topografie povrchu bylo prováděno před a po tribologických testech pomocí optického profilometru Bruker ContourGT-X. Před samotným měřením byly vzorky očištěny izopropylalkoholem, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků zbytkovým mazivem nebo produkty opotřebení. Pro každý vzorek bylo zvoleno vhodné zvětšení a rozlišení objektivu tak, aby byla zachycena oblast vlastního kontaktu mezi tělesy. Získaná 3D topografická data byla následně zpracována v softwaru Vision64.

V rámci zpracování byl nejprve odstraněn celkový tvar povrchu pomocí funkce *Terms Removal (F-Operator)*, čímž byl omezen vliv náklonu a geometrie vzorku. Následně byla aplikována filtrace pomocí *Gaussian Regression Filter*, která umožnila oddělit vlnitost povrchu od drsnostní složky relevantní pro další analýzu. Pro vyhodnocení byla dále využita funkce *Mask Data*, pomocí které byla vymezena oblast vlastního kontaktu. Takto upravená data byla použita pro kvantitativní porovnání stavu povrchu před a po tribologickém zatěžování.

Hodnoceným výstupem měření byla především plošná drsnost povrchu, vyjádřená parametrem S_q . Tento parametr charakterizuje celkovou amplitudu nerovností povrchu a umožňuje porovnat změny topografie vzniklé během tribologického testu. Vyhodnocení bylo prováděno v místě vlastního kontaktu mezi tělesy, tedy v oblasti přímého zatěžování povrchu. U kuliček byla počáteční oblast hodnocení určena podle poloměru kontaktní plochy stanoveného z Hertzovy teorie. Z této oblasti byly následně stanoveny vybrané parametry topografie povrchu, které sloužily k porovnání stavu před a po tribologickém testu.

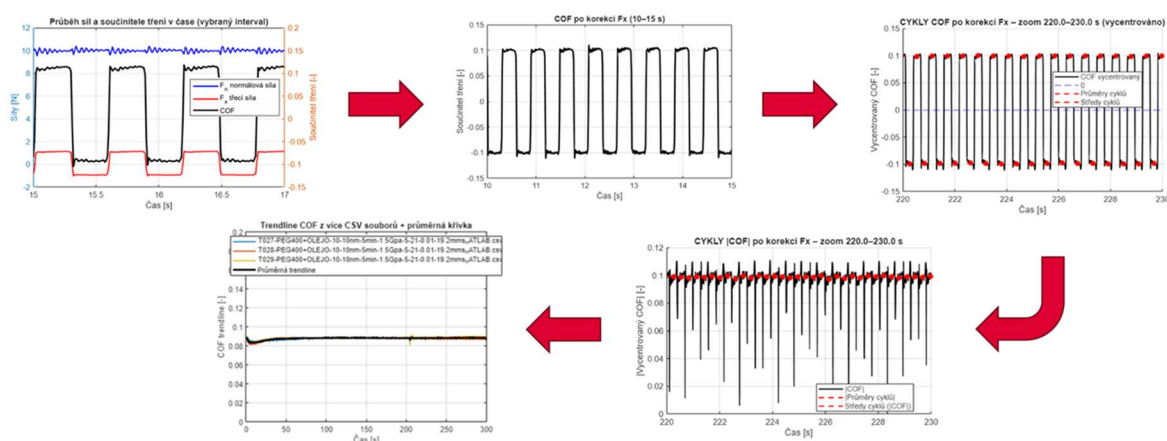


Obr. 4-8 Příklad vyhodnocení počáteční topografie povrchu před tribologickým testem: povrch a-C:H povlaku (vlevo) a vymezená kontaktní oblast na kuličce s povlakem a-C:H (vpravo)

4.4.4 Součinitel tření

Součinitel tření byl vyhodnocován z kontinuálně zaznamenaných dat jako poměr třecí síly F_x a normálové síly F_n . Normálová síla byla u jednotlivých experimentů nastavena podle požadovaného zatížení a odpovídajícího kontaktního tlaku. Výstupem vyhodnocení byl především časový průběh součinitele tření, případně jeho závislost na rychlosti v případě měření na zařízení MTM.

Naměřená data byla z jednotlivých zařízení exportována ve formátu CSV a následně zpracována pomocí vlastních skriptů v prostředí MATLAB. U recipročních testů na zařízeních SMT-5000 a UMT Bruker byl postup založen na úpravě signálu, detekci jednotlivých cyklů a odstranění dat v okolí úvratí, kde dochází ke změně směru pohybu. Každý cyklus byl rozdělen na dvě části odpovídající jednotlivým směrům pohybu. Pro obě části byla stanovena průměrná hodnota součinitele tření a výsledná hodnota cyklu byla určena jako průměr absolutních hodnot obou směrů. Pro porovnání počáteční a ustálené fáze testu byly dále vyhodnoceny hodnoty z prvních a posledních 200 cyklů. Schéma zpracování dat v prostředí MATLAB je znázorněno na Obr. 4-9.



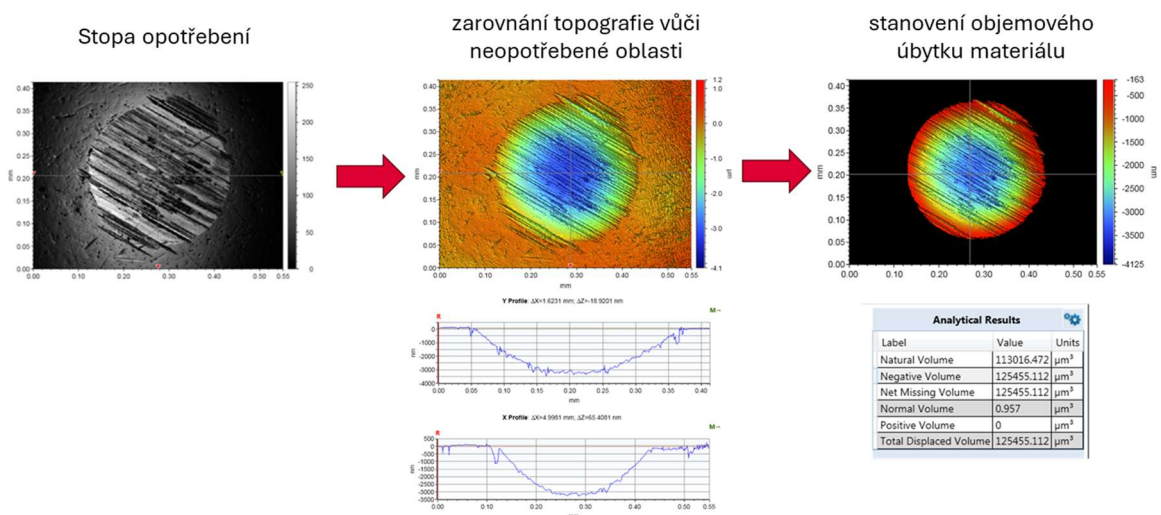
Obr. 4-9 Schéma zpracování dat součinitele tření v softwaru MATLAB

V případě zařízení MTM nebylo vyhodnocení prováděno po cyklech, ale podle jednotlivých kroků měření. Záznam byl rozdělen na rychlostní kroky před záběhem, záběhový krok a rychlostní kroky po záběhu. Záběhový krok byl realizován při rychlosti $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a trval 1800 s. Pro porovnání počáteční a koncové fáze záběhu bylo vyhodnoceno prvních a posledních 200 datových bodů, což odpovídá přibližně prvním a posledním 200 sekundám záznamu. Stribeckovy křivky byly stanoveny z 10 průměrných hodnot součinitele tření při rychlostech 5, 10, 20, 50, 100 a $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v jednotlivých rychlostních krocích před a po záběhu.

4.4.5 Opotřebení povrchu

Míra opotřebení byla vyhodnocována v oblasti kontaktu třecích dvojic pomocí optického profilometru Bruker ContourGT-X. Pro každý vzorek byla nasnímaná oblast obsahující stopu opotřebení. Získaná 3D data byla následně zpracována ve vyhodnocovacím softwaru Vision64. Nejprve byla pomocí funkce *Terms Removal (F-Operator)* provedena korekce tvaru povrchu a jeho zarovnání vzhledem k okolní neopotřebené oblasti. Následně byla pomocí funkce *Mask Data* vymezena oblast opotřebení, na kterou byla aplikována funkce *Volume* pro stanovení objemového úbytku materiálu.

Výsledkem vyhodnocení byla hodnota *net missing volume*, která představuje objem materiálu odstraněného z oblasti kontaktu. Tato hodnota byla vyjádřena v jednotkách μm^3 a sloužila k porovnání rozsahu opotřebení mezi jednotlivými vzorky. Vyhodnocení bylo doplněno vizuální analýzou povrchu, která umožnila posoudit charakter opotřebení a lokalizovat poškozené oblasti. Postupu vyhodnocení materiálového úbytku materiálu je uvedeno na Obr. 4-10.



Obr. 4-10 Vizualizace postupu při vyhodnocení materiálového úbytku materiálu

Na základě stanoveného objemového úbytku materiálu bylo dále vypočteno měrné opotřebení vzorku podle vztahu vycházejícího z Archardova zákona opotřebení:

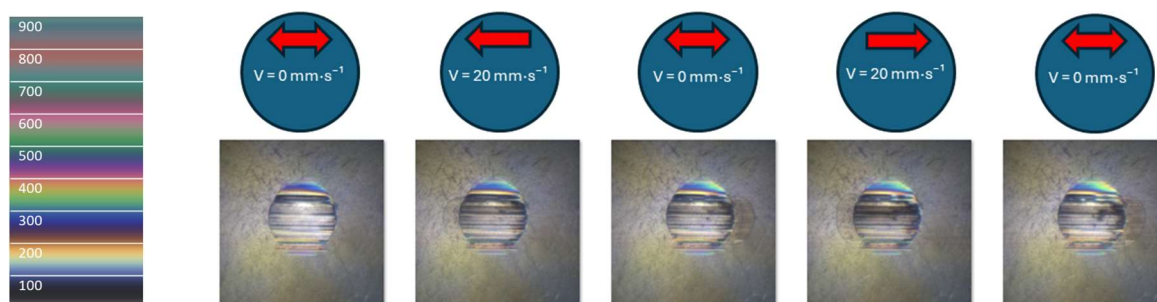
$$k = \frac{V}{F_n \cdot s} \quad (1)$$

kde k je měrné opotřebení ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), V je objemový úbytek materiálu v mm^3 , F_n je normálová síla newtonech a s je celková dráha tření v metrech. Pro výpočet byly hodnoty objemového úbytku převedeny z kubických mikrometrů na kubické milimetry μm^3 na mm^3 .

4.4.6 Měření tloušťky mazacího filmu

Vyhodnocení mazacího filmu bylo realizováno na tribometru UMT TriboLab Bruker s využitím přídavné optické aparatury vyvíjené na Ústavu konstruování, která je popsána v kapitole 4.2. Nejprve byl proveden třecí test pro záznam součinitele tření a vytvoření opotřebené kontaktní plochy. Následně byla původní konfigurace s destičkou nahrazena transparentním safírovým diskem s tenkou chromovou vrstvou a k zařízení byla upevněna optická aparatura. Chromová vrstva zvyšovala optický kontrast a umožňovala sledování interferenčních jevů v kontaktní oblasti, které souvisí se změnami tloušťky mazacího filmu.

Kontaktní oblast byla sledována přes safírový disk, proti kterému byla zatěžována ocelová kulička o průměru 8 mm. Optický záznam byl pořizován pomocí kamery připojené k počítači. Přestože byl zaznamenáván celý průběh kontaktu, pro následné porovnání byly vybrány snímky z reprezentativních poloh pohybového cyklu. Jednalo se o snímky z krajních poloh, kde byla rychlost pohybu nulová, a ze střední části třecí dráhy, kde byla při dráze 5 mm dosažena přibližně maximální rychlost pohybu $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ve vzdálenosti 2,5 mm od krajní polohy. Vybrané polohy kontaktu a odpovídající optické snímky použité pro další vyhodnocení jsou znázorněny na Obr. 4-11.



Obr. 4-11 Škála pro vyhodnocení tloušťky mazacího filmu a snímky optické snímků kontaktní oblasti v krajních polohách a ve středu třecí dráhy

Pořízené snímky byly analyzovány v softwaru Achilles, který umožňuje vyhodnocení kontaktní oblasti na základě změn optického kontrastu. Z vyhodnocení byly získány hodnoty tloušťky mazacího filmu, které byly dále použity pro statistické porovnání jednotlivých maziv a materiálových kombinací. Kromě průměrné hodnoty byly využity také první a devátý decil, které popisují dolní a horní část rozdělení dat a omezují vliv ojedinělých extrémních hodnot.

4.5 Testované predikce

Predikce 1:

První série testů se zaměřuje na ověření hypotézy H1. V této sérii bude sledován vliv přídavku mastných kyselin do základového maziva PEG400 na třecí chování v mezném režimu mazání. Očekává se, že jednotlivé kyseliny povedou ke změně součinitele tření oproti čistému PEG400, přičemž rozdíly budou dány jejich schopností vytvářet mezní vrstvy na povrchu DLC. Tento vliv se projeví zejména v průběhu záběhu a ve stabilizované hodnotě tření.

Závislé proměnné: součinitel tření

Nezávislé proměnné: složení maziva, materiálová dvojice

Kontrolované proměnné: zatížení, délka dráhy, rychlost pohybu

Predikce 2:

Druhá série testů se zaměřuje na ověření hypotézy H2. V rámci této série bude sledován vliv provozní teploty na třecí chování systému PEG400 s přídavkem mastných kyselin v mezném až smíšeném režimu mazání. Očekává se, že změna teploty ovlivní viskozitu maziva, a tím i stabilitu mazacího filmu, což se projeví změnou průběhu tření, rychlosti záběhu a výsledné hodnoty součinitele tření.

Závislé proměnné: součinitel tření

Nezávislé proměnné: teplota, složení maziva, materiálová dvojice

Kontrolované proměnné: zatížení, délka dráhy, rychlost pohybu

Predikce 3:

Třetí série testů se zaměřuje na ověření hypotézy H3. V této sérii bude hodnocen vliv počáteční povrchové drsnosti DLC povlaků na třecí chování v mezném režimu mazání. Očekává se, že nižší drsnost povede k nižším hodnotám součinitele tření a rychlejšímu ustálení tření, zatímco vyšší drsnost povede k vyšší nestabilitě tření a většímu podílu přímého kontaktu asperit.

Závislé proměnné: součinitel tření

Nezávislé proměnné: povrchová drsnost Sq, typ DLC povlaku, složení maziva

Kontrolované proměnné: zatížení, délka dráhy, rychlost pohybu

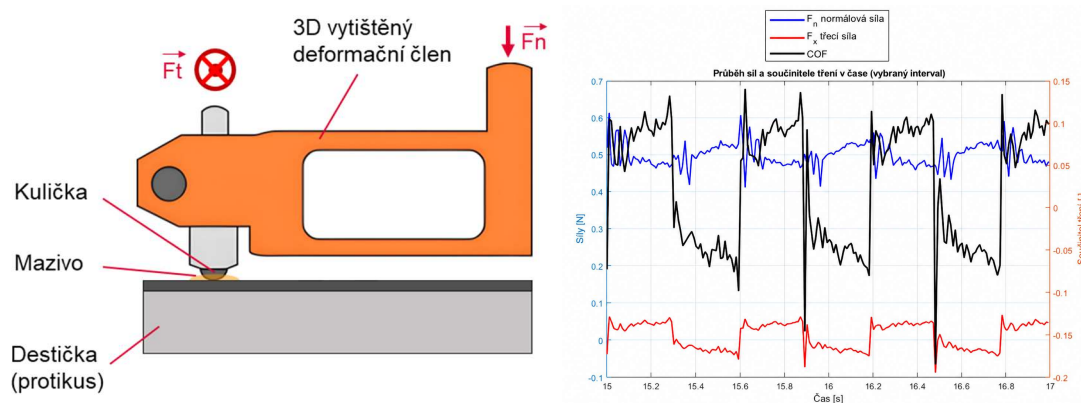
5 VÝSLEDKY

5.1 Vývoj a ladění měřících metod

Vývoj deformačního členu pro SMT-5000

Pro realizaci recipročních třecích testů na zařízení SMT-5000 bylo nutné navrhnout vlastní deformační člen umožňující stabilní přenos normálového zatížení do kontaktu. Konstrukce byla optimalizována pomocí MKP simulací s cílem minimalizovat odchylky zatížení během recipročního pohybu při současném zachování dostatečné tuhosti a citlivosti pro nízká zatížení. Finální konstrukční varianta byla dimenzována pro zatížení 0,5–10 N a vyrobena z materiálu PLA pomocí 3D tisku.

Funkčnost navrženého přípravku byla následně experimentálně ověřena při zatížení 0,5 N. Ověřovací test byl proveden na materiálové kombinaci 100Cr6/100Cr6 s mazivem PEG400. Cílem tohoto měření bylo ověřit, zda deformační člen umožňuje stabilně snímat změny normálové síly během jednotlivých třecích cyklů a současně vyhodnotit součinitel tření podle postupu popsáno v kapitole 4.4.2. Výsledky ukázaly, že i při nízkém zatížení bylo možné rozlišit jednotlivé cykly recipročního pohybu a sledovat průběh normálové síly i třecí odezvy v čase. Na Obr. 5-1 vlevo je znázorněno schéma finální konstrukční varianty deformačního členu a vpravo příklad záznamu z ověřovacího měření. Modrá křivka představuje průběh normálové síly, černá křivka průběh třecí síly a červená křivka odpovídá vypočtenému součiniteli tření.

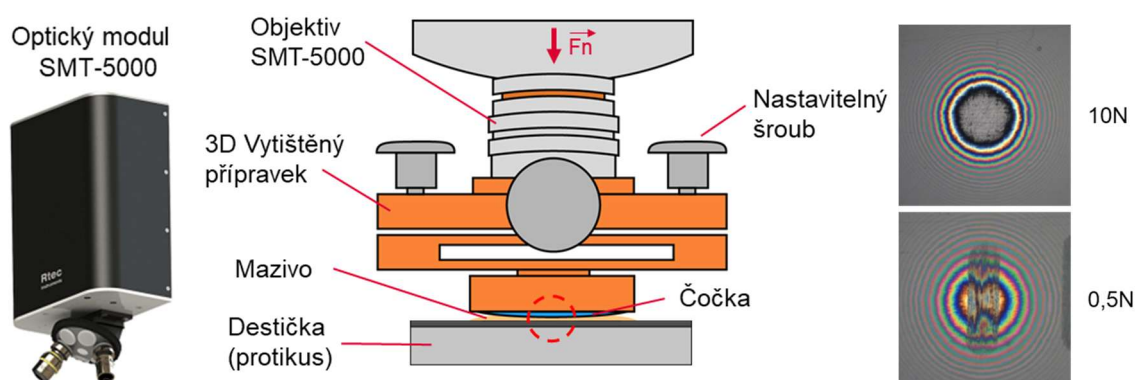


Obr. 5-1 Finální konstrukční varianta deformačního členu a průběh normálové síly (0,5 N) při ověřovacím měření na zařízení SMT-5000

Předběžné optické pozorování mazacího filmu na SMT-5000

Na zařízení SMT-5000 byla současně předběžně ověřována metoda optického pozorování tenkého mazacího filmu v kontaktu. Tato konfigurace byla laděna ještě před dodáním DLC povlaků, a proto byly první experimenty realizovány na kombinaci 100Cr6/100Cr6. Cílem bylo sledovat změny kontaktní oblasti v drážce destičky v souvislosti s formováním tenkého mazacího filmu během záběhové fáze.

Konfigurace byla navržena tak, aby byla čočka přes deformační člen přitlačena definovaným zatížením k objektivu bez rizika jeho poškození. Deformační člen tak současně zajišťoval stabilní přenos zatížení i ochranu optické soustavy během experimentu (Obr. 5-2).



Obr. 5-2 Schéma konfigurace předběžného optického pozorování mazacího filmu na zařízení SMT-5000

V průběhu experimentů se ukázalo, že při kombinaci DLC/DLC dochází k výraznějším změnám geometrie především na povrchu kuličky, zatímco povrchové změny na destičce nebyly pro danou konfiguraci dostatečně průkazné. Z tohoto důvodu byla metoda optického pozorování v další fázi přesunuta na zařízení Bruker UMT.

5.2 SMT-5000 - Čistý skluz (první fáze)

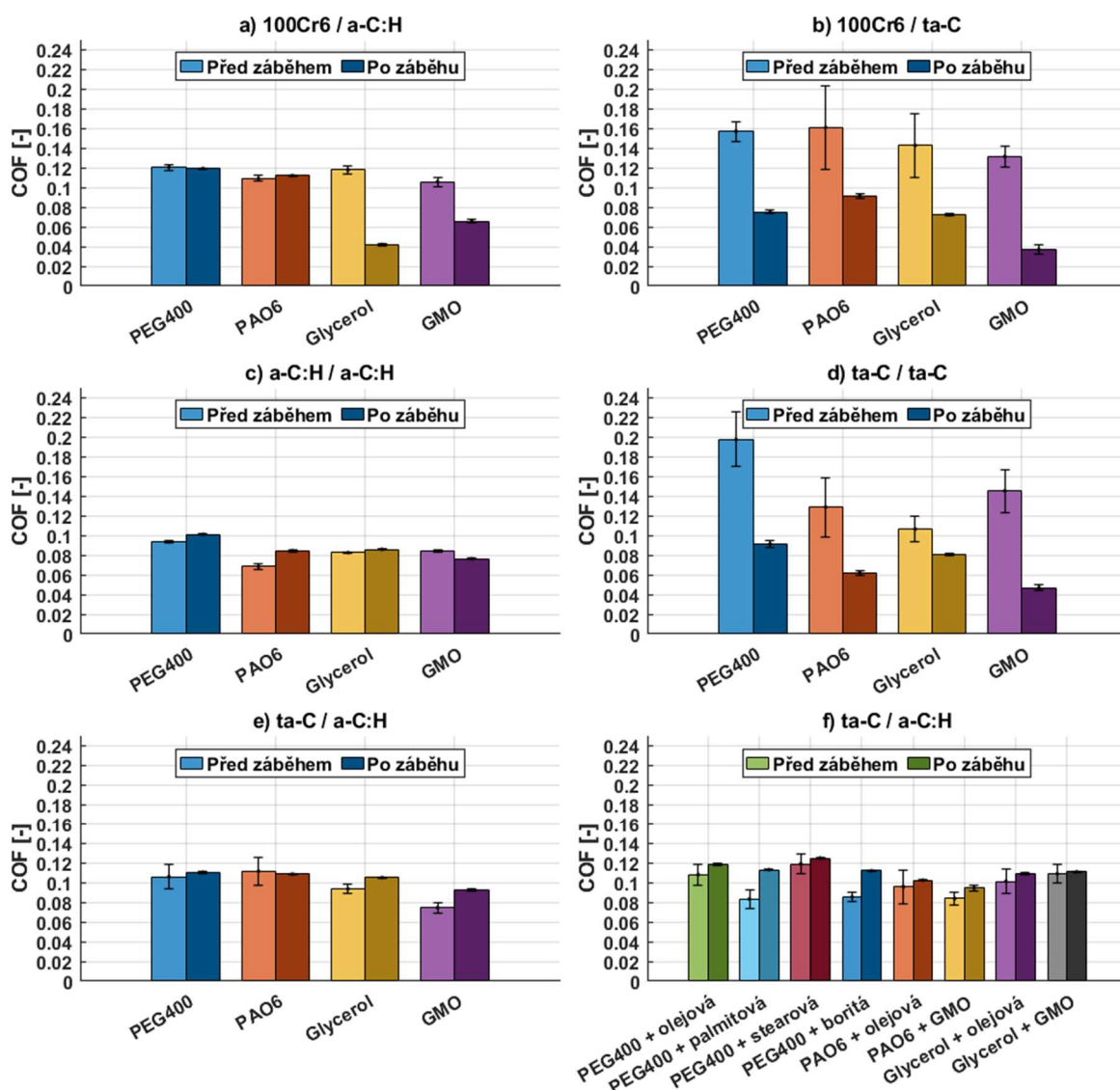
Po odladění metodiky měření bylo přistoupeno k testům na zařízení SMT-5000, které byly zaměřeny na porovnání třecího chování DLC kontaktů při čistém skluzu za pokojové teploty. Měření probíhalo v konfiguraci ball-on-plate s recipročním vratným pohybem. Hodnoceny byly materiálové kombinace 100Cr6/a-C:H, 100Cr6/ta-C, a-C:H/a-C:H, ta-C/ta-C a ta-C/a-C:H při použití čistých maziv PEG400, PAO6, glycerolu a GMO a dále směsí vybraných maziv s kyselinami. Testované směsi zahrnovaly tři mastné kyseliny a jednu anorganickou slabou kyselinu, konkrétně kyselinu boritou. Pro posouzení průběhu záběhu byly hodnoty součinitele tření vyhodnoceny jako průměr z prvních a posledních 200 cyklů testu.

Cílem této části nebylo pouze porovnat jednotlivé hodnoty součinitele tření, ale především určit základní trendy v chování kontaktů s DLC povlaky při použití čistých maziv a směsí základového maziva s aditivy. Kromě součinitele tření byla proto dále vyhodnocena také změna topografie povrchu a opotřebení kontaktu. Chybové úsečky v grafech vyjadřují rozptýl hodnot v rámci vyhodnocovaného úseku měření. Vzhledem k omezenému počtu opakování jednotlivých kombinací slouží uvedené odchylky především k posouzení stability třecího chování v daném úseku měření.

5.2.1 Součinitel tření

Součinitel tření jednotlivých materiálových kombinací před a po záběhu je znázorněn na Obr. 5-3. Experimentální data zahrnují kombinace 100Cr6/a-C:H, 100Cr6/ta-C, a-C:H/a-C:H, ta-C/ta-C a ta-C/a-C:H při použití čistých maziv a vybraných aditivovaných směsí. Hodnoty před záběhem byly stanoveny jako průměr součinitele tření z prvních 200 cyklů tribologického testu, zatímco hodnoty po záběhu odpovídají průměru z posledních 200 cyklů měření.

U kontaktu 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-3a) byly hodnoty součinitele tření při použití PEG400 a PAO6 poměrně stabilní a rozdíly mezi stavem před a po záběhu byly malé. Výraznější změna byla pozorována u glycerolu a GMO, kde došlo po záběhu k poklesu součinitele tření. Tento pokles byl patrný zejména u glycerolu, což naznačuje změnu třecího chování kontaktu během zatěžování. Kontakt 100Cr6/ta-C (Obr. 5-3b) vykazoval výraznější záběhovou odezvu než kombinace 100Cr6/a-C:H. U všech čistých maziv došlo po záběhu k poklesu součinitele tření. Nejnižší konečné hodnoty byly dosaženy při použití GMO a glycerolu. Výsledky tak ukazují, že povlak ta-C byl v této konfiguraci citlivější na typ maziva a průběh záběhu.



Obr. 5-3 Součinitel tření vybraných materiálových kombinací DLC povlaků při použití čistých a aditivovaných maziv před a po záběhu. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy

Podobný rozdíl mezi oběma typy DLC povlaků byl patrný také u symetrických kontaktů a-C:H/a-C:H a ta-C/ta-C. Kombinace a-C:H/a-C:H (Obr. 5-3c) vykazovala celkově nižší a stabilnější hodnoty tření. Rozdíly mezi jednotlivými mazivy i mezi stavem před a po záběhu byly poměrně malé. Naproti tomu kontakt ta-C/ta-C (Obr. 5-3d) vykazoval výraznější pokles součinitele tření po záběhu, zejména při použití PEG400, PAO6 a GMO. To potvrzuje, že kontakty obsahující ta-C jsou výrazněji ovlivněny záběhovým procesem. U kombinace ta-C/a-C:H při použití čistých maziv (Obr. 5-3e) byly hodnoty součinitele tření vyrovnanější než u kontaktu ta-C/ta-C. PEG400 a PAO6 vykazovaly pouze menší rozdíly mezi stavem před a po záběhu, zatímco u glycerolu a GMO byly výsledné hodnoty po záběhu nižší. Z hlediska tření tak tato nesymetrická materiálová dvojice působila stabilněji než kontakt ta-C/ta-C.

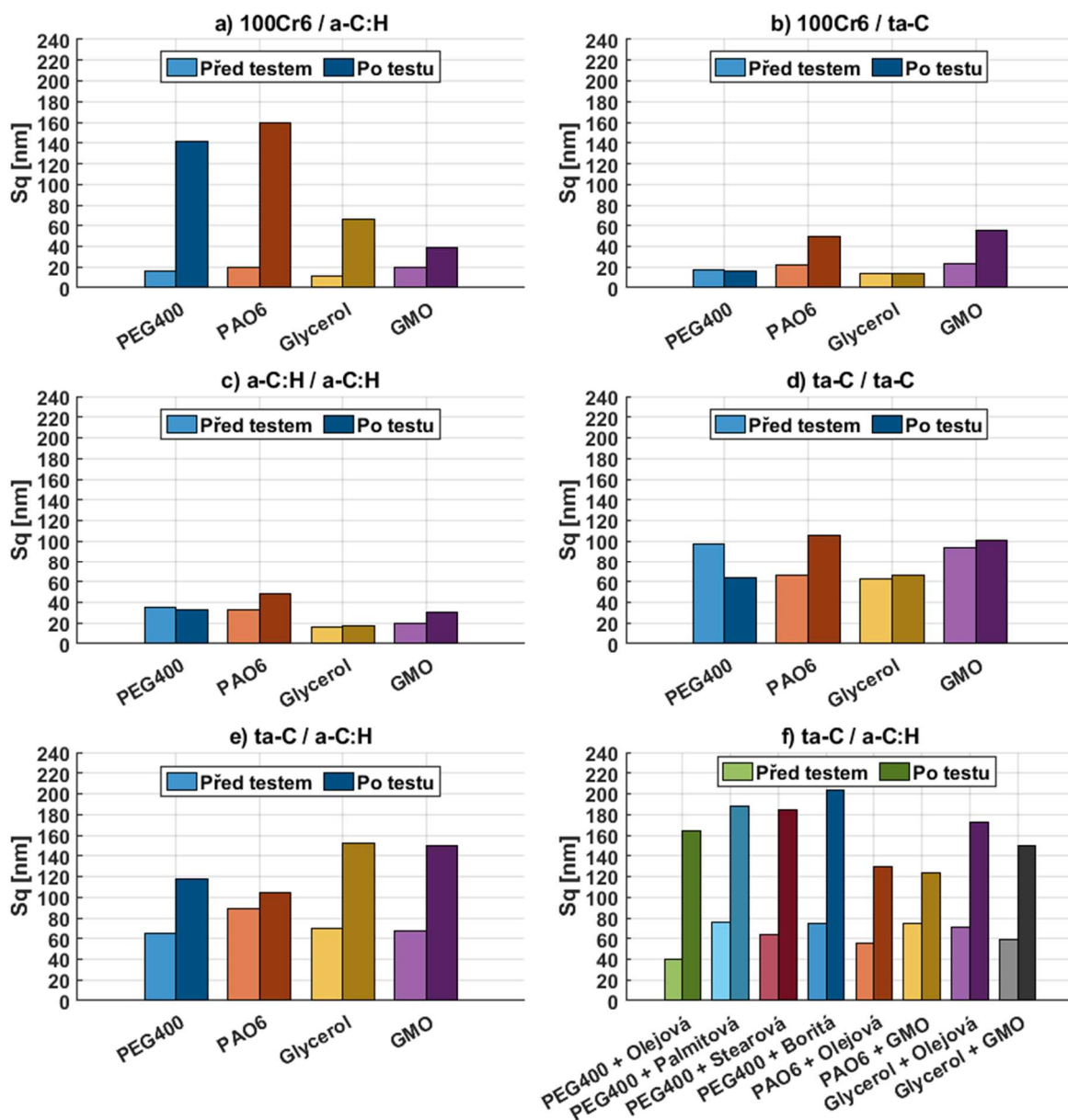
Při použití aditivovaných směsí u kontaktu ta-C/a-C:H (Obr. 5-3f) nebylo pozorováno jednoznačné snížení součinitele tření oproti čistým mazivům. Směsi PEG400 s kyselinami vykazovaly hodnoty v podobném rozsahu a u části z nich došlo po záběhu spíše k mírnému zvýšení tření. Nejnížší hodnoty v této skupině byly patrné u směsi PEG400 s kyselinou palmitovou, avšak rozdíly mezi jednotlivými aditivy nebyly natolik výrazné, aby bylo možné jednoznačně určit nejúčinnější kyselinové aditivum.

Z celkového pohledu výsledky ukazují, že hlavní rozdíly v třecím chování byly dány především typem DLC povlaku a materiálovou kombinací. Kontakty s ta-C vykazovaly výraznější změny během záběhu a větší citlivost na použité mazivo, zatímco kontakty s a-C:H byly stabilnější. U čistých maziv se příznivě projevovalo zejména GMO, především u kombinací obsahujících ta-C. Přídavek kyselinových aditiv však u kombinace ta-C/a-C:H nevedl k jednoznačnému zlepšení třecího chování. Výsledky tedy naznačují, že nízký součinitel tření není dán pouze přítomností aditiva, ale celkovou interakcí mezi povlakem, mazivem a průběhem záběhu.

5.2.2 Změna topografie povrchu

Po třecích testech byla pomocí optické profilometrie vyhodnocena změna plošné drsnosti S_q na kuličce, protože na destičce nevznikalo k pozorovatelné změně. Toto vyhodnocení doplňuje samotné hodnocení součinitele tření, protože umožňuje posoudit, zda stabilizace třecího kontaktu probíhala současně se změnou charakteru povrchu. Změny topografie byly sledovány s cílem zhodnotit vliv použitých maziv a materiálových kombinací na povrch po testování v režimu čistého skluzu.

U kontaktu 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-4a) docházelo po testování k výraznému zvýšení hodnot S_q téměř u všech použitých maziv. Největší nárůst byl zaznamenán při použití PEG400 a PAO6, kde výsledná drsnost výrazně převyšovala hodnoty před testem. Méně výrazná změna byla pozorována při použití GMO, zatímco u glycerolu byl nárůst střední. Tento výsledek naznačuje, že kontakt ocel/a-C:H byl z hlediska změny povrchové topografie poměrně citlivý na použité mazivo. V případě kontaktu 100Cr6/ta-C (Obr. 5-4b) byly změny S_q obecně nižší než u kombinace 100Cr6/a-C:H. Při použití PEG400 a glycerolu zůstávaly hodnoty S_q po testu téměř beze změny, zatímco výraznější nárůst byl patrný u PAO6 a GMO. Z porovnání obou kontaktů ocel/DLC tedy vyplývá, že ta-C povlak v kombinaci s ocelí vykazoval po testování stabilnější charakter povrchu než a-C:H.



Obr. 5-4 Změna plošné drsnosti S_q na kuličce u vybraných materiálových kombinací DLC povlaků před a po třecím testu. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy.

U symetrického kontaktu a-C:H/a-C:H (Obr. 5-4c) byly změny topografie po testování malé. Hodnoty S_q se u většiny maziv měnily pouze mírně a celkově zůstávaly na nízké úrovni. Nejmenší změny byly pozorovány při použití PEG400 a glycerolu, zatímco u PAO6 a GMO došlo k mírnému zvýšení drsnosti. Tato kombinace tak vykazovala nejstabilnější povrchovou odezvu ze sledovaných materiálových párů.

Naproti tomu kontakt ta-C/ta-C (Obr. 5-4d) vykazoval vyšší absolutní hodnoty S_q již před testem a současně i výraznější závislost na použitém mazivu. Při použití PEG400 došlo po testu ke snížení hodnoty S_q , což může odpovídat částečnému zahlazení povrchu během záběhu. U PAO6, glycerolu a GMO byl naopak pozorován nárůst drsnosti. Oproti kontaktu a-C:H/a-C:H je tedy topografie kontaktu ta-C/ta-C více ovlivněna jak počátečním stavem povrchu, tak samotným průběhem třecího testu.

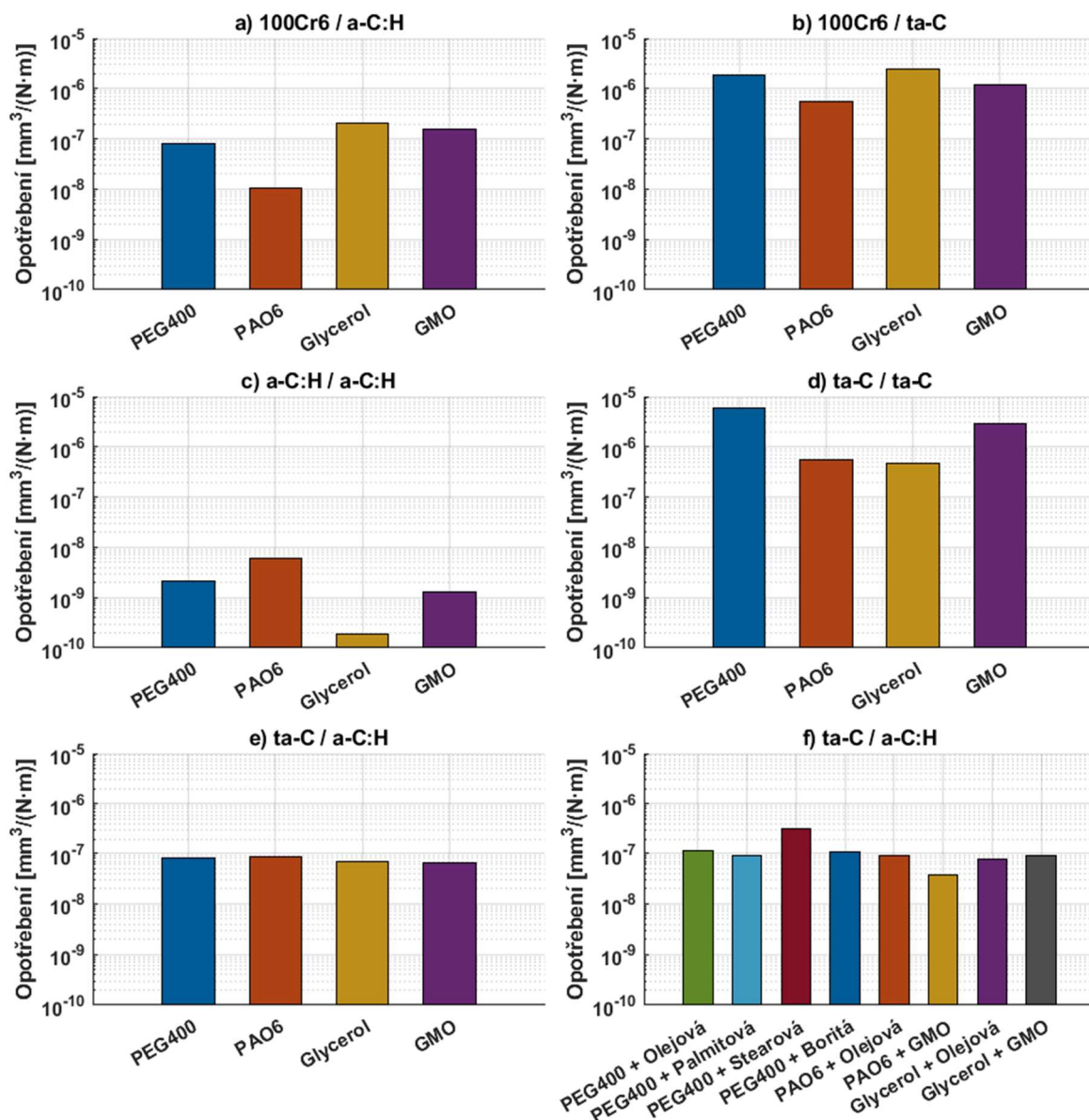
Další část vyhodnocení byla zaměřena na nesymetrický kontakt ta-C/a-C:H. Při použití čistých maziv (Obr. 5-4e) došlo po testování ke zvýšení hodnot S_q u všech sledovaných maziv. Nejvýraznější změny byly zaznamenány při použití glycerolu a GMO, kde výsledné hodnoty S_q dosahovaly nejvyšších hodnot v této skupině. U PEG400 a PAO6 byl nárůst také patrný, avšak méně výrazný. Tato materiálová kombinace tedy vykazovala větší změnu povrchu než symetrický kontakt a-C:H/a-C:H. Při použití aditivovaných směsí u kontaktu ta-C/a-C:H (Obr. 5-4f) byly změny topografie ještě výraznější. Nejvyšší hodnoty S_q po testu byly pozorovány u směsí PEG400 s kyselinou palmitovou, stearovou a boritou. Výrazný nárůst byl patrný také u směsí s olejovou kyselinou a u kombinací PAO6 nebo glycerolu s dalšími aditivy. Přídavek kyselinových aditiv tedy u této materiálové kombinace nevedl ke stabilizaci povrchu ve smyslu nižší hodnoty S_q , ale naopak se projevil výraznější změnou kontaktní oblasti.

Z celkového porovnání vyplývá, že změna topografie povrchu nebyla určena pouze použitým mazivem, ale výrazně závisela také na materiálové kombinaci. Nejmenší změny byly pozorovány u kontaktu a-C:H/a-C:H, zatímco výraznější povrchovou odezvu vykazovaly kombinace 100Cr6/a-C:H a ta-C/a-C:H. U kontaktů obsahujících ta-C se změna S_q projevila rozdílně podle typu protikusu a maziva. Výsledky proto ukazují, že parametr S_q je nutné hodnotit společně s průběhem tření a opotřebením, protože samotné zvýšení nebo snížení drsnosti nemusí jednoznačně vypovídat o kvalitě mazacího režimu.

5.2.3 Opotřebení

Dalším sledovaným parametrem bylo opotřebení způsobené na kuličce u jednotlivých materiálových kombinací. Výsledky jsou vzhledem k výrazným rozdílům mezi materiálovými kombinacemi zobrazeny v logaritmickém měřítku (Obr. 5-5). Opotřebení bylo hodnoceno společně se součinitelem tření a změnou topografie povrchu, protože nízká hodnota tření nemusí automaticky znamenat také nízký materiálový úbytek. Cílem bylo porovnat vliv typu DLC povlaku, materiálové dvojice a použitého maziva na odolnost kontaktu vůči opotřebení.

U kombinace 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-5a) byly hodnoty opotřebení celkově nižší než u kontaktu 100Cr6/ta-C. Nejnižší opotřebení bylo zaznamenáno při použití PAO6, zatímco vyšší hodnoty byly pozorovány u glycerolu a GMO. Tento výsledek ukazuje, že pokles součinitele tření po záběhu, který byl u glycerolu a GMO patrný, nebyl automaticky spojen s nižším materiálovým úbytkem.



Obr. 5-5 Opotřebení na kuličce u vybraných materiálových kombinací DLC povlaků při použití čistých a aditivovaných maziv. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy.

U kombinace 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-5a) byly hodnoty opotřebení celkově nižší než u kontaktu 100Cr6/ta-C. Nejnižší opotřebení bylo zaznamenáno při použití PAO6, zatímco vyšší hodnoty byly pozorovány u glycerolu a GMO. Tento výsledek ukazuje, že pokles součinitele tření po záběhu, který byl u glycerolu a GMO patrný, nebyl automaticky spojen s nižším materiálovým úbytkem.

Kontakt 100Cr6/ta-C (Obr. 5-5b) vykazoval výrazně vyšší hodnoty opotřebení u všech použitých čistých maziv. Nejvyšší opotřebení bylo zaznamenáno při použití glycerolu, PEG400 a GMO, zatímco PAO6 vykazoval nižší hodnotu. V této materiálové kombinaci tedy ta-C povlak sice vykazoval výraznou záběhovou odezvu z hlediska tření, současně však docházelo k vyššímu materiálovému úbytku.

Kombinace a-C:H/a-C:H (Obr. 5-5c) vykazovala nejnižší opotřebení ze všech sledovaných materiálových kombinací. Hodnoty se pohybovaly v oblasti velmi nízkých řádů, zejména při použití glycerolu, PEG400 a GMO. Tento výsledek odpovídá také stabilnímu průběhu tření a menším změnám topografie povrchu po testu. Naopak kontakt ta-C/ta-C (Obr. 5-5d) vykazoval výrazně vyšší opotřebení než a-C:H/a-C:H. Nejvyšší hodnota byla pozorována při použití PEG400, vysoké opotřebení bylo zaznamenáno také u GMO. Přestože u této kombinace docházelo během testu k výraznému poklesu součinitele tření, materiálový úbytek zůstal vysoký. Tento výsledek potvrzuje, že příznivý vývoj tření nemusí být vždy doprovázen nízkým opotřebením.

U kombinace ta-C/a-C:H při použití čistých maziv (Obr. 5-5e) byly hodnoty opotřebení poměrně vyrovnané. Všechna sledovaná maziva se pohybovala v podobném řádu a rozdíly mezi nimi byly menší než u symetrického kontaktu ta-C/ta-C. Tato materiálová dvojice tak představovala stabilnější variantu z hlediska opotřebení, protože nevykazovala tak vysoký materiálový úbytek jako kontakt ta-C/ta-C. Při použití směsí u kontaktu ta-C/a-C:H (Obr. 5-5f) byly rozdíly mezi jednotlivými mazivy výraznější. Nejvyšší opotřebení bylo spojeno se směsí PEG400 s kyselinou stearovou. Naopak nižší hodnoty byly pozorovány u směsi PAO6 + GMO a některých směsí s glycerolem nebo PEG400. Výsledky tak ukazují, že přídavek aditiva nemusí vést k jednoznačnému snížení opotřebení a jeho účinek závisí na kombinaci základového maziva, aditiva a materiálového páru.

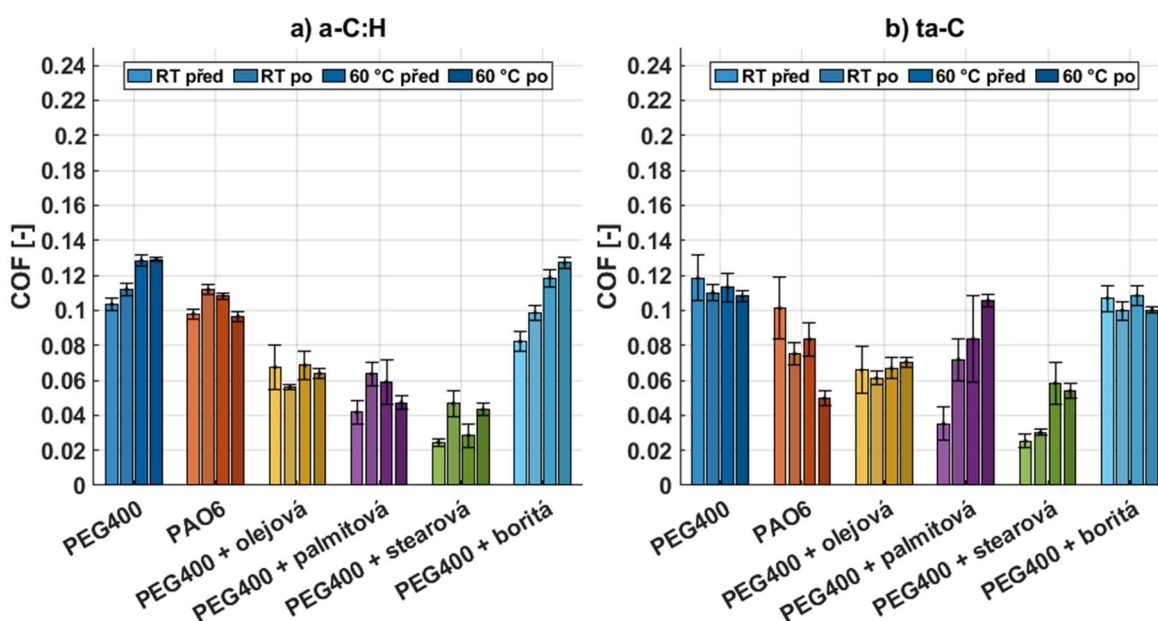
Z celkového porovnání vyplývá, že nejnižší a nejstabilnější opotřebení vykazovaly kontakty obsahující a-C:H, zejména kombinace a-C:H/a-C:H. Naopak kontakty 100Cr6/ta-C a ta-C/ta-C vykazovaly vyšší materiálový úbytek, přestože u nich byl v některých případech pozorován pokles součinitele tření po záběhu. Kombinace ta-C/a-C:H představovala mezi těmito případy vyrovnanější variantu, protože dosahovala nižšího opotřebení než ta-C/ta-C a současně si zachovala relativně stabilní třecí chování. Výsledky tedy potvrzují, že součinitel tření, změnu topografie a opotřebení je nutné hodnotit společně, protože mezi nimi nebyla pozorována jednoduchá přímá závislost.

5.3 MTM – Valení se skluzem (druhá fáze)

Druhá fáze experimentálního měření byla realizována na zařízení MTM v konfiguraci ball-on-disc se skluzem. Testování probíhalo s využitím 19,05mm ocelové kuličky v kontaktu s DLC povlakem při nastaveném skluzovém poměru $SRR = 20\%$. Tato hodnota byla zvolena tak, aby byl v kontaktu zachován dostatečný podíl skluzu a současně bylo možné sledovat chování maziva v oblasti mezního až smíšeného režimu mazání. V rámci této části byly porovnávány povlaky a-C:H a ta-C při pokojové teplotě a při teplotě 60 °C. Hodnocen byl součinitel tření během záběhu, změna topografie povrchu a průběh Stribeckových křivek v oblasti nízkých rychlostí.

5.3.1 Součinitel tření

Součinitel tření pro kombinace 100Cr6 s DLC povlaky a-C:H a ta-C při pokojové teplotě a při teplotě 60 °C je uveden na Obr. 5-6. Hodnoty jsou rozděleny na stav před záběhem a po záběhu, což umožňuje posoudit nejen samotnou úroveň tření, ale také změnu třecího chování během testu. Porovnávány byly základové mazivo PEG400, PAO6 a směsi PEG400 s vybranými kyselinami.



Obr. 5-6 Součinitel tření při RT a 60 °C pro kombinace 100Cr6 s DLC povlaky a-C:H (a) a ta-C (b) před záběhem a po záběhu

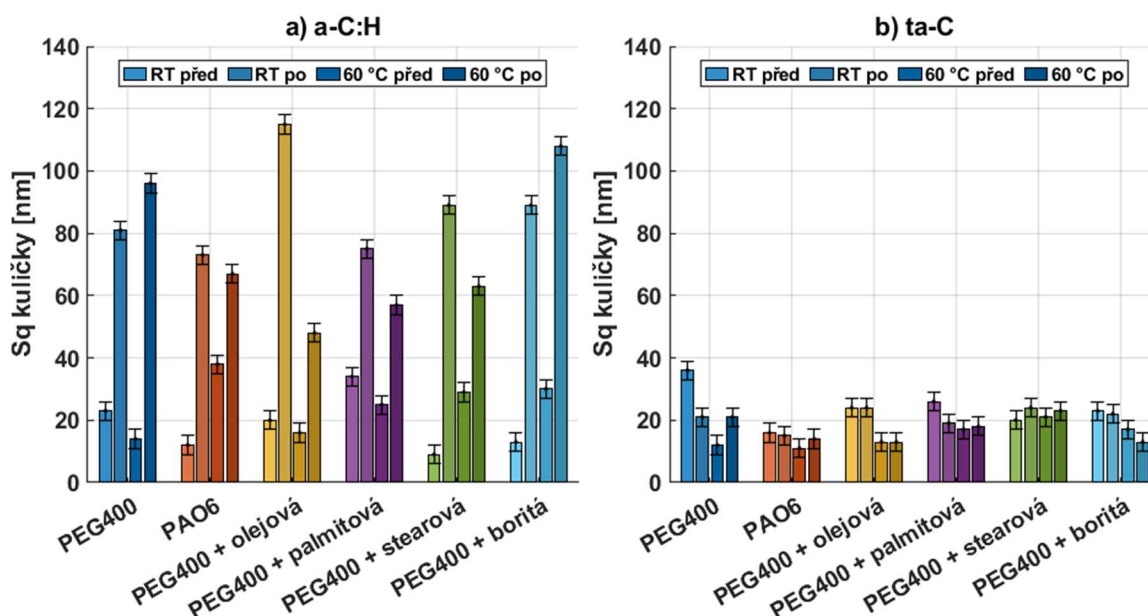
U povlaku a-C:H, znázorněného na (Obr. 5-6a), byly při použití PEG400 zaznamenány vyšší hodnoty součinitele tření, přičemž při teplotě 60 °C došlo po záběhu k mírnému nárůstu. PAO6 vykazovalo oproti PEG400 nižší hodnoty a poměrně stabilní průběh mezi počáteční a závěrečnou částí testu. Výraznější rozdíly byly patrné u směsí PEG400 s kyselinami. Zejména směsi s kyselinou stearovou a palmitovou vedly k nižším hodnotám součinitele tření, především při pokojové teplotě. U kyseliny borité byl naopak patrný nárůst tření, zejména při teplotě 60 °C. Výsledky tak ukazují, že u povlaku a-C:H nebyla nízká hodnota tření dána pouze zvýšenou teplotou, ale především konkrétním složením mazacího systému. U povlaku ta-C, uvedeného na (Obr. 5-6b), byla třecí odezva více závislá na použitém mazivu. PEG400 vykazoval relativně stabilní hodnoty při obou teplotách, bez výrazného snížení po záběhu. Při použití PAO6 byl pozorován výraznější pokles součinitele tření po záběhu, zejména při teplotě 60 °C. Nízké hodnoty byly dále zaznamenány u směsi PEG400 s kyselinou stearovou, a to hlavně při pokojové teplotě. Naopak směs s kyselinou palmitovou vykazovala u ta-C výrazný nárůst tření po záběhu, zejména při teplotě 60 °C. Kyselina boritá vedla k hodnotám blízkým PEG400, přičemž vliv teploty nebyl tak výrazný jako u některých ostatních směsí.

Z porovnání obou povlaků vyplývá, že teplota ani složení maziva nepůsobily na a-C:H a ta-C stejným způsobem. Povlak a-C:H vykazoval u většiny maziv stabilnější průběh tření, zatímco u ta-C byly patrnější změny mezi stavem před záběhem a po záběhu. Nejnížší hodnoty součinitele tření byly obecně spojeny se směsí PEG400 s kyselinou stearovou, případně palmitovou u povlaku a-C:H. Výsledky tedy ukazují, že třecí chování při valení se skluzem je určeno kombinací typu DLC povlaku, teploty a schopnosti maziva nebo aditiva vytvořit stabilní meznou vrstvu.

5.3.2 Změna topografie povrchu

Na vyhodnocení součinitele tření navazovalo hodnocení změny topografie povrchu na kuličce po třecím testu. Pomocí optické profilometrie byla porovnána plošná drsnost Sq před a po záběhu při pokojové teplotě a při 60 °C. Cílem bylo posoudit, zda změny třecího chování souvisejí také se změnou charakteru povrchu během valení se skluzem.

U povlaku a-C:H, znázorněného na (Obr. 5-7a), byly změny topografie po testování výrazné a silně závislé na použitém mazivu i teplotě. Při použití PEG400 došlo naopak ke snížení hodnoty Sq po testu jak při pokojové teplotě, tak při 60 °C, což tuto kombinaci odlišovalo od ostatních mazacích systémů. Naproti tomu u PAO6 a u všech sledovaných směsí PEG400 s kyselinami byl po testování patrný nárůst drsnosti. Nejvýraznější zvýšení bylo zaznamenáno zejména u směsí s kyselinou olejovou, stearovou a boritou. U kyseliny borité byly současně vysoké výsledné hodnoty Sq patrné zejména při 60 °C, zatímco u kyseliny olejové byl nárůst výraznější při pokojové teplotě. Výsledky tedy ukazují, že povlak a-C:H byl na změnu provozních podmínek citlivější a jeho topografie se během testu měnila ve větším rozsahu. U povlaku ta-C, uvedeného na (Obr. 5-7b), byla změna topografie podstatně menší. Ve většině případů se hodnoty Sq po testování mírně snížily nebo zůstaly téměř beze změny. Výraznější pokles byl patrný především u PEG400 a částečně také u směsi s kyselinou boritou. U PAO6, kyseliny olejové a kyseliny palmitové byly rozdíly mezi stavem před a po testu pouze malé. Mírné zvýšení bylo pozorováno v podstatě pouze u směsi s kyselinou stearovou při pokojové teplotě. Ve srovnání s povlakem a-C:H tak ta-C vykazoval celkově stabilnější charakter povrchu a menší citlivost na změnu teploty i složení maziva.



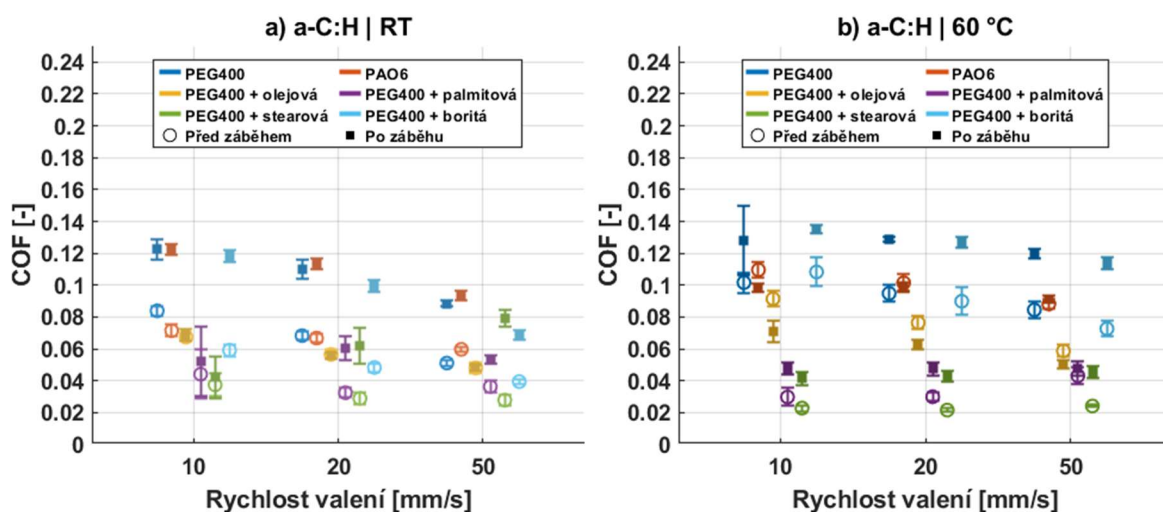
Obr. 5-7 Změna topografie povrchu kuličky při RT a 60 °C pro kombinace 100Cr6 s DLC povlaky a-C:H (a) a ta-C (b) před a po záběhu.

Z celkového porovnání vyplývá, že povlak ta-C si během testování zachovával stabilnější topografii než a-C:H. Zatímco u a-C:H se změny Sq výrazně lišily podle typu maziva a v řadě případů docházelo k výraznému nárůstu drsnosti, u ta-C byly výsledky vyrovnanější a změny většinou méně výrazné. Současně se potvrdilo, že nízký součinitel tření nemusel být vždy doprovázen malou změnou topografie.

5.3.3 Stribeckovy křivky

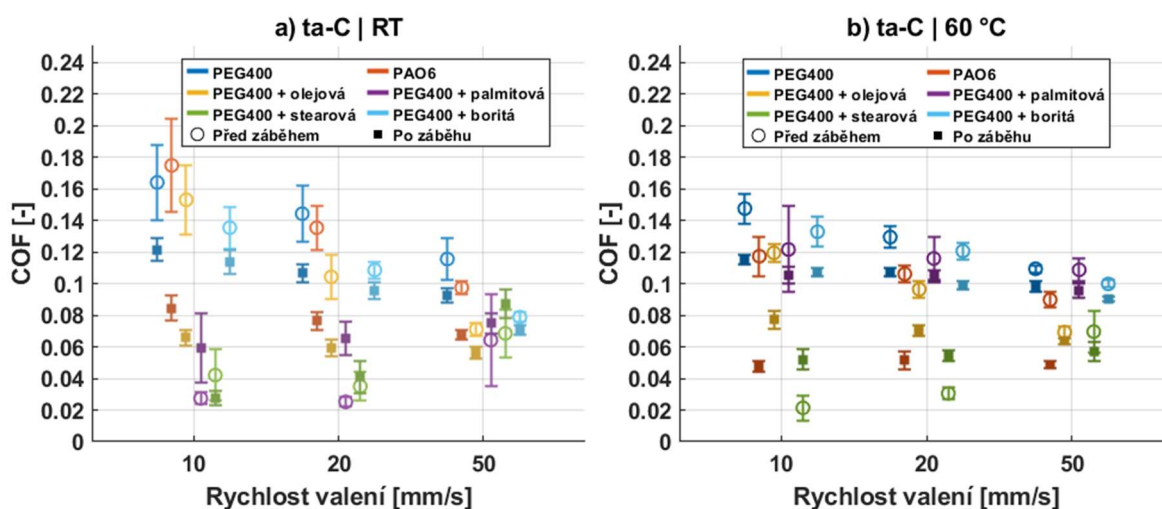
Součástí druhé fáze měření bylo také vyhodnocení Stribeckových křivek, které umožňuje posoudit vliv rychlosti valení na třecí chování jednotlivých mazacích systémů. Primárně je sledována oblast nízkých rychlostí 10, 20 a 50 mm·s⁻¹, která odpovídá především meznému, případně částečně smíšenému režimu mazání. Pokud se součinitel tření se zvyšující se rychlostí výrazně nemění, lze předpokládat přetrvávající mezní mazání. Naopak pokles součinitele tření s rostoucí rychlostí může naznačovat částečný přechod směrem ke smíšenému režimu.

U povlaku a-C:H při pokojové teplotě (Obr. 5-8a) byly po záběhu u většiny maziv zaznamenány nižší hodnoty součinitele tření než před záběhem. Nejnížší hodnoty vykazovaly především směsi PEG400 s kyselinou stearovou a palmitovou, které se v celém sledovaném rozsahu rychlostí pohybovaly výrazně níže než základová maziva PEG400 a PAO6. U PEG400 a PAO6 zůstávaly hodnoty tření vyšší a jejich změna s rostoucí rychlostí nebyla tak výrazná, což ukazuje na převažující mezní mazání. Při teplotě 60 °C (Obr. 5-8b) byl charakter průběhů u povlaku a-C:H částečně odlišný. U některých maziv byly hodnoty po záběhu vyšší než při pokojové teplotě, zejména u PEG400 a kyseliny borité. Směsi s kyselinou stearovou a palmitovou si však i při zvýšené teplotě zachovaly nízké hodnoty součinitele tření. To naznačuje, že jejich příznivý vliv nebyl dán pouze teplotou, ale pravděpodobně také schopností vytvořit stabilnější meznou vrstvu v kontaktu.



Obr. 5-8 Stribeckovy křivky před a po záběhu pro povlak a-C:H při RT (a) a 60 °C (b)

U povlaku ta-C při pokojové teplotě (Obr. 5-9a) byly celkově pozorovány vyšší hodnoty součinitele tření než u a-C:H, zejména před záběhem a při nižších rychlostech. Výraznější rozptyl hodnot byl patrný především u PEG400, PAO6 a kyseliny borité. Po záběhu však u části maziv docházelo k poklesu tření, přičemž nejnižší hodnoty byly zaznamenány u kyseliny stearové a palmitové. Tyto směsi tedy vykazovaly příznivější třecí chování i u ta-C povlaku, a to zejména po záběhu. Při teplotě 60 °C (Obr. 5-9b) byly průběhy u ta-C povlaku vyrovnanější. Rozdíly mezi jednotlivými rychlostmi byly menší než při pokojové teplotě a u většiny maziv se hodnoty součinitele tření pohybovaly v užším rozsahu. Výrazně nízké hodnoty byly opět spojeny se směsí PEG400 s kyselinou stearovou, zatímco kyselina palmitová vykazovala spíše vyšší hodnoty po záběhu. To ukazuje, že u ta-C povlaku může být vliv jednotlivých kyselin výrazně odlišný a není možné jej hodnotit pouze podle přítomnosti aditiva jako takového.



Obr. 5-9 Stribeckovy křivky před a po záběhu pro povlak ta-C při RT (a) a 60 °C (b)

Z celkového porovnání Stribeckových křivek vyplývá, že většina sledovaných systémů pracovala převážně v oblasti mezního mazání, případně na přechodu do smíšeného režimu. Nejvýraznější změna tření s rostoucí rychlostí byla opakovaně pozorována u systémů s kyselinou stearovou a palmitovou. Naopak PEG400 a PAO6 vykazovaly stabilnější průběhy s vyššími hodnotami tření, což ukazuje na omezenější schopnost vytvoření účinné mazací vrstvy v daném rozsahu rychlostí. Celkově byly rozdíly mezi mazivy výraznější při pokojové teplotě, zatímco při 60 °C docházelo spíše ke stabilizaci průběhů, zejména u ta-C povlaku.

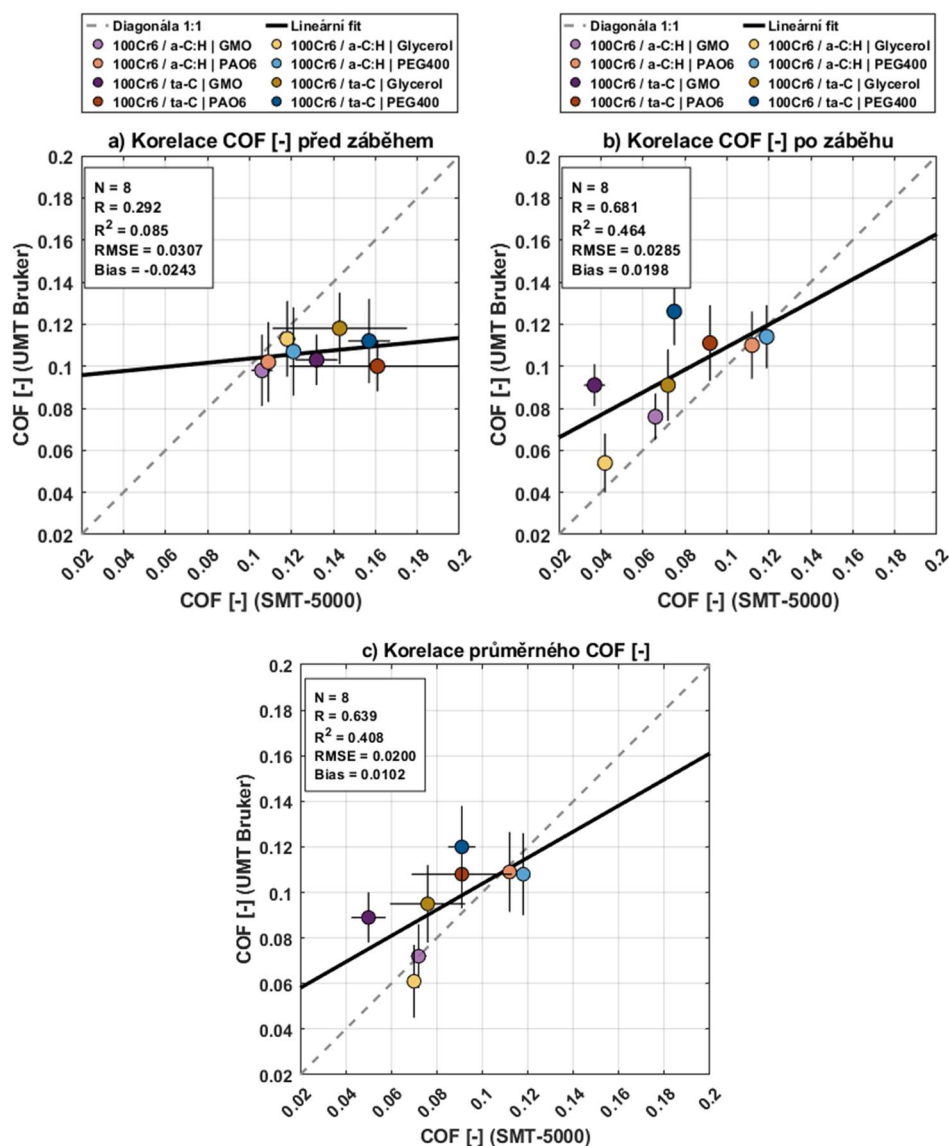
5.4 UMT Bruker – Čistý skluz s optikou (třetí fáze)

Třetí fáze experimentálního měření byla realizována na zařízení UMT Bruker v konfiguraci čistého skluzu s možností optického pozorování kontaktu během testování. Touto metodou lze rozšířit interpretaci tribologických trendů pozorovaných na zařízení SMT-5000, ověřit jejich přenositelnost na odlišnou experimentální konfiguraci a současně vytvořit podmínky vhodné pro optické sledování mazacího filmu. Pro zajištění porovnatelnosti byly použity podobné provozní podmínky jako u měření na zařízení SMT-5000. Hlavní rozdíl spočíval v použití 8 mm ocelové kuličky namísto 6 mm kuličky použité při měření na SMT-5000.

5.4.1 Součinitel tření

Za účelem porovnání obou zařízení byla provedena korelace hodnot součinitele tření mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker. Vyhodnoceny byly hodnoty na začátku testu, na konci testu a také průměrná hodnota součinitele tření pro shodné materiálové kombinace a mazací systémy. Cílem tohoto porovnání nebylo ověřit absolutní shodu hodnot mezi zařízeními, ale posoudit, zda UMT Bruker zachycuje podobné trendy třecího chování jako zařízení SMT-5000.

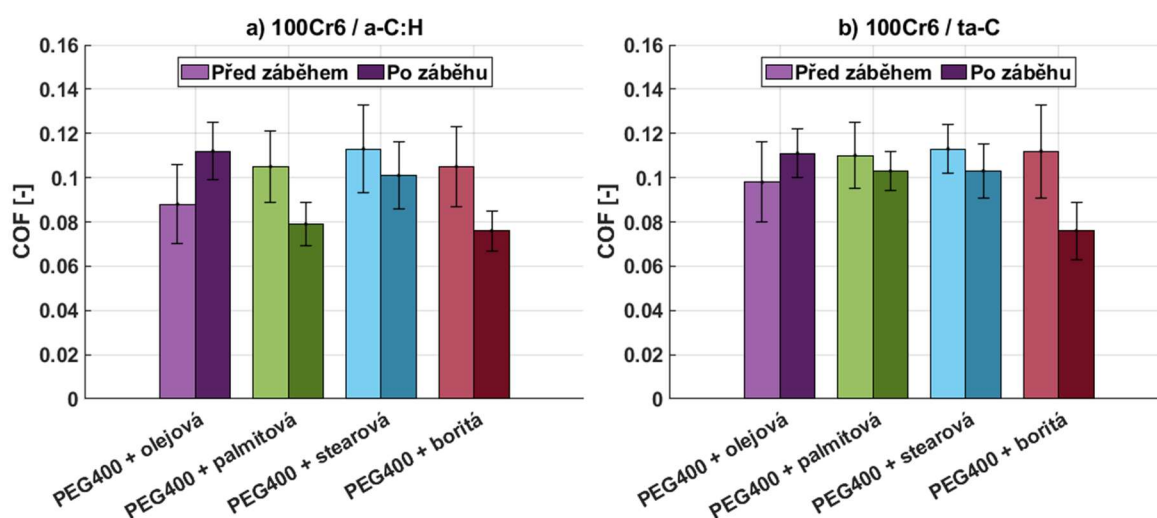
Na začátku testu byla korelace mezi oběma zařízeními poměrně nízká (Obr. 5-10a). Hodnota korelačního koeficientu $R = 0,29$ ukazuje, že počáteční fáze testu byla výrazně ovlivněna rozdílnou konfigurací kontaktu, geometrií kuličky a lokálními podmínkami záběhu. To se projevilo větším rozptylem hodnot a horší návazností na diagonálu 1:1, která představuje ideální shodu mezi zařízeními. Na konci testu byla shoda mezi zařízeními výraznější (Obr. 5-10b). Korelační koeficient dosáhl hodnoty $R = 0,68$, což ukazuje na lepší shodu trendů po ustálení kontaktu. Část bodů se současně nacházela blíže diagonále 1:1 než v počáteční fázi testu. Absolutní hodnoty součinitele tření sice nebyly ve všech případech totožné, ale po záběhu zařízení UMT Bruker zachycovalo podobnější charakter třecí odezvy jako SMT-5000.



Obr. 5-10 Korelace součinitele tření mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker na začátku testu (a), na konci testu (b) a pro průměrnou hodnotu COF (c)

Podobný závěr vyplývá také z porovnání průměrných hodnot součinitele tření (Obr. 5-10c). Korelační koeficient $R = 0,64$ naznačuje střední míru shody mezi oběma zařízeními. Průměrné hodnoty částečně vyrovnávají rozdíly mezi počáteční a závěrečnou fází testu, přesto však zůstává patrné, že zařízení neposkytují zcela identické hodnoty. Tento rozdíl je očekávatelný vzhledem k odlišné konstrukci zařízení, rozdílným kontaktním podmínkám a odlišnému způsobu vedení třecího kontaktu.

Pro samotné zařízení UMT Bruker byly dále vyhodnoceny hodnoty součinitele tření u směsí PEG400 s vybranými kyselinami. U kontaktu 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-11a) byly hodnoty před záběhem u jednotlivých směsí poměrně rozdílné. Po záběhu došlo u kyseliny olejové ke zvýšení součinitele tření, zatímco u kyseliny palmitové a borité byl patrný pokles. Směs s kyselinou stearovou vykazovala vyšší počáteční hodnotu, ale po záběhu došlo k mírnému snížení. Nejnižší konečné hodnoty byly u této materiálové kombinace dosaženy u směsi s kyselinou boritou a palmitovou. U kontaktu 100Cr6/ta-C (Obr. 5-11b) byly počáteční hodnoty součinitele tření mezi jednotlivými kyselinami více vyrovnané. Po záběhu došlo k výraznějšímu poklesu zejména u kyseliny borité, zatímco u kyseliny olejové a stearové zůstaly hodnoty po záběhu vyšší. Kyselina palmitová vykazovala pouze mírnou změnu mezi počáteční a závěrečnou částí testu. Ve srovnání s kontaktem 100Cr6/a-C:H tak kontakt 100Cr6/ta-C působil z hlediska počátečních hodnot vyrovnaněji, ale konečný stav byl výrazněji ovlivněn konkrétním typem kyseliny.



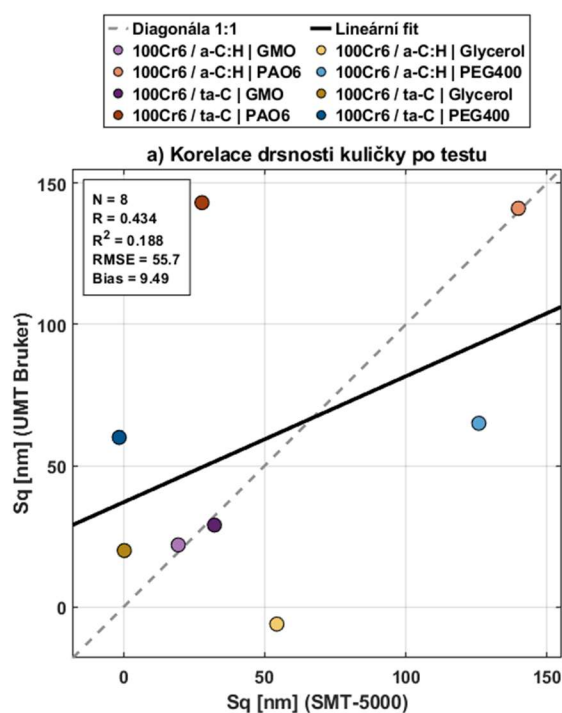
Obr. 5-11 Součinitel tření směsí PEG400 s vybranými kyselinami na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) před záběhem a po záběhu

Z porovnání vyplývá, že zařízení UMT Bruker nereplikuje hodnoty ze zařízení SMT-5000 přesně, ale po záběhu poskytuje srovnatelný trend třecího chování. To je důležité zejména proto, že UMT Bruker bylo dále využito pro optické pozorování mazacího filmu. Výsledky tedy ukazují, že optická konfigurace nepracovala v tribologicky zcela odlišném režimu, ale navazovala na trendy pozorované při měření na SMT-5000. Současně je patrné, že účinek kyselinových aditiv závisel nejen na samotném složení maziva, ale také na typu DLC povlaku a průběhu záběhu.

5.4.2 Změna topografie povrchu

Na vyhodnocení součinitele tření navazovalo hodnocení změny topografie povrchu na kuličce po provedeném měření součinitele tření. Vyhodnocení bylo zaměřeno na plošnou drsnost S_q kuličky a současně na ověření, zda se změny topografie pozorované na zařízení SMT-5000 projevují podobně také v konfiguraci UMT Bruker. Na rozdíl od součinitele tření je změna drsnosti výrazně citlivější na lokální podmínky kontaktu, proto nelze očekávat zcela přímou shodu mezi oběma zařízeními.

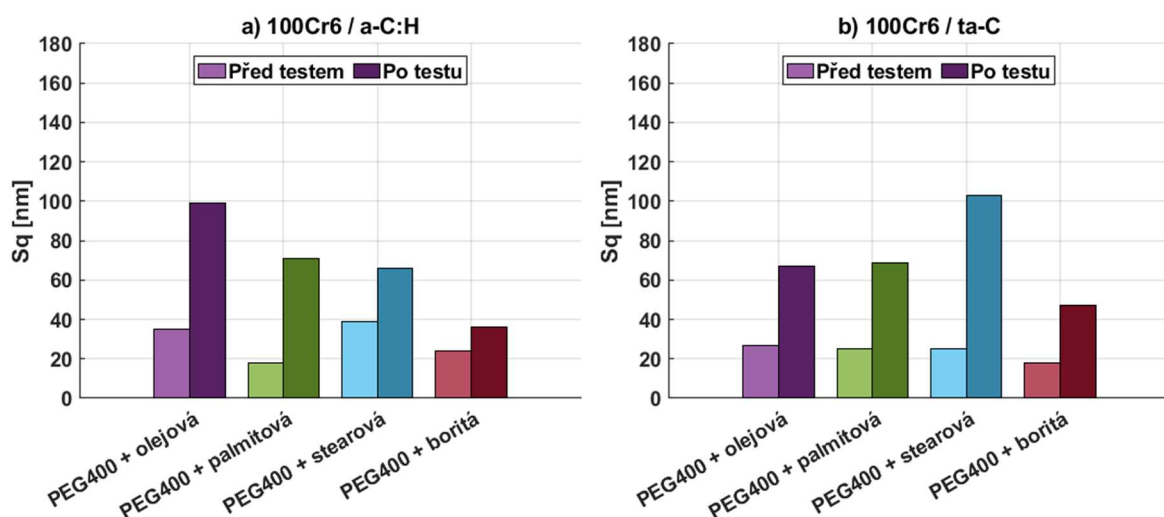
Korelace drsnosti kuličky po testu mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker vykazovala pouze částečnou shodu (Obr. 5-12). Hodnota korelačního koeficientu $R = 0,43$ byla nižší než v případě součinitele tření po záběhu. Některé body se nacházely v blízkosti diagonály 1:1, u části systémů však byly patrné výraznější odchylky. To ukazuje, že výsledná topografie byla ovlivněna nejen typem maziva a povlaku, ale také rozdílnou geometrií kontaktu, velikostí kuličky, lokálním průběhem záběhu a polohou vyhodnocované oblasti.



Obr. 5-12 Korelace drsnosti kuličky po testu mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker

Samostatné vyhodnocení zařízení UMT Bruker pro směsi PEG400 s vybranými kyselinami je uvedeno na Obr. 5-13. U kontaktu 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-13a) došlo po testování ke zvýšení hodnot S_q u všech sledovaných kyselinových směsí. Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán u směsi PEG400 s kyselinou olejovou, kde výsledná hodnota S_q dosahovala přibližně 100 nm. Výraznější zvýšení bylo patrné také u kyseliny palmitové a stearové. Naopak u směsi s kyselinou boritou byl nárůst drsnosti menší a výsledná hodnota S_q zůstala ze sledovaných směsí nejnižší.

U kontaktu 100Cr6/ta-C (Obr. 5-13b) byl po testování rovněž patrný nárůst drsnosti u všech kyselinových směsí. Nejvyšší výsledná hodnota S_q byla zaznamenána u směsi PEG400 s kyselinou stearovou, kde došlo k výraznému zvýšení oproti počátečnímu stavu. Zvýšení drsnosti bylo patrné také u kyseliny olejové, palmitové a borité, avšak u těchto směsí byly výsledné hodnoty nižší než u kyseliny stearové. V porovnání s kontaktem 100Cr6/a-C:H nebyl tedy ta-C povlak z hlediska změny topografie jednoznačně stabilnější pro všechny kyselinové směsi, protože výsledný stav povrchu výrazně závisel na konkrétním typu kyseliny.



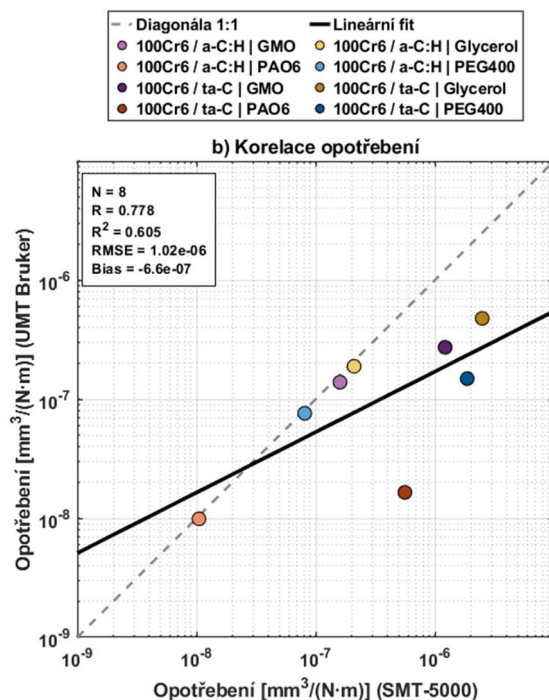
Obr. 5-13 Změna drsnosti povrchu po testování na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) při použití směsí PEG400 s vybranými kyselinami

Z celkového pohledu je patrné, že změna topografie na zařízení UMT Bruker nebyla určena pouze typem DLC povlaku, ale také konkrétním složením maziva. Korelace se zařízením SMT-5000 byla slabší než u součinitele tření, což potvrzuje vyšší citlivost topografie na lokální podmínky měření. Výraznější změna S_q zároveň nemusí automaticky znamenat horší třecí chování, protože součinitel tření, změna topografie a opotřebení nemusí být ve vzájemně jednoduché přímé závislosti. Proto je vhodné změny S_q dále hodnotit společně s opotřebením a optickým pozorováním mazacího filmu.

5.4.3 Opotřebení

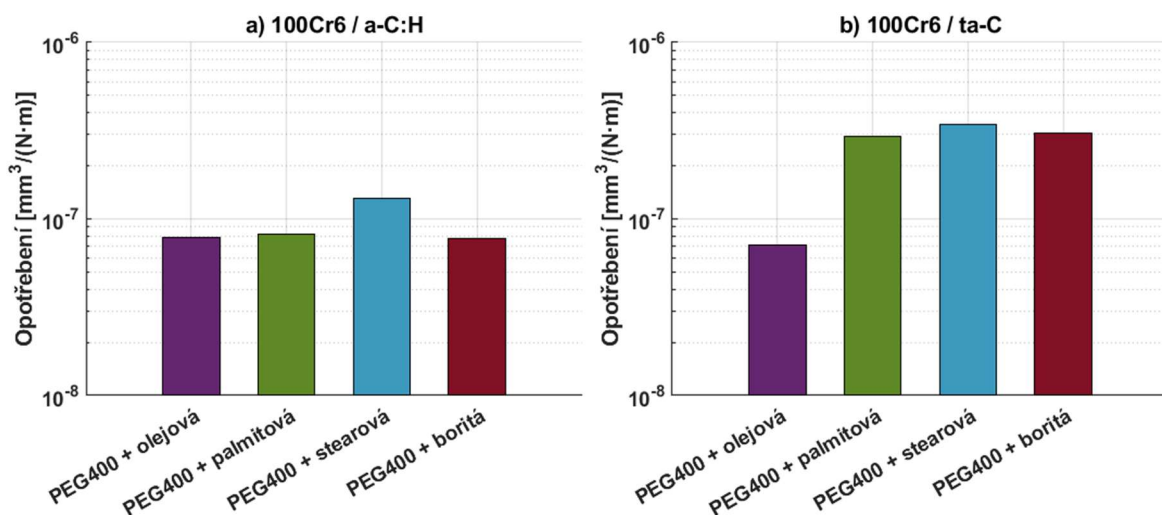
Další část vyhodnocení byla zaměřena na opotřebení kuličky po tribologických testech provedených na zařízení UMT Bruker. Cílem bylo porovnat míru opotřebení jednotlivých mazacích systémů a současně ověřit, zda lze trendy opotřebení pozorované na zařízení SMT-5000 přenést také do konfigurace UMT Bruker s optickým sledováním kontaktu.

Korelace opotřebení mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker vykazovala ze sledovaných veličin nejlepší shodu (Obr. 5-14). Hodnota korelačního koeficientu $R = 0,77$ ukazuje, že relativní pořadí některých mazacích systémů z hlediska opotřebení bylo mezi zařízeními částečně zachováno. Přestože část bodů ležela mimo diagonálu 1:1, celkový trend byl výraznější než v případě změny topografie. Odchylny od ideální shody lze spojit zejména s rozdílnou geometrií kontaktu, velikostí kuličky, lokálním průběhem záběhu a odlišným způsobem zatížení kontaktní oblasti.



Obr. 5-14 Korelace opotřebení na kuličce mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker

Samostatné vyhodnocení opotřebení na zařízení UMT Bruker pro směsi PEG400 s vybranými kyselinami je uvedeno na Obr. 5-15. U kontaktu 100Cr6/a-C:H (Obr. 5-15a) se hodnoty opotřebení pohybovaly přibližně ve stejném řádu. Nejnížší hodnoty byly zaznamenány u směsi PEG400 s kyselinou olejovou, palmitovou a boritou. Mírně vyšší opotřebení vykazovala směs s kyselinou stearovou, která dosahovala nejvyšší hodnoty v rámci této materiálové kombinace. Rozdíly mezi jednotlivými kyselinami však nebyly tak výrazné jako u kontaktu s ta-C. U kontaktu 100Cr6/ta-C (Obr. 5-15b) byly rozdíly mezi kyselinovými směsmi výraznější. Nejnížší opotřebení bylo zaznamenáno u směsi PEG400 s kyselinou olejovou, zatímco směsi s kyselinou palmitovou, stearovou a boritou vykazovaly podstatně vyšší hodnoty. Ve srovnání s kontaktem 100Cr6/a-C:H tak kombinace 100Cr6/ta-C vykazovala u většiny kyselinových směsí vyšší míru opotřebení, především u kyseliny palmitové, stearové a borité. To ukazuje, že příznivý vliv kyselinového aditiva na tření nemusí automaticky znamenat i nižší opotřebení.



Obr. 5-15 Míra opotřebení na kuličce po testování na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) při použití směsí PEG400 s vybranými kyselinami

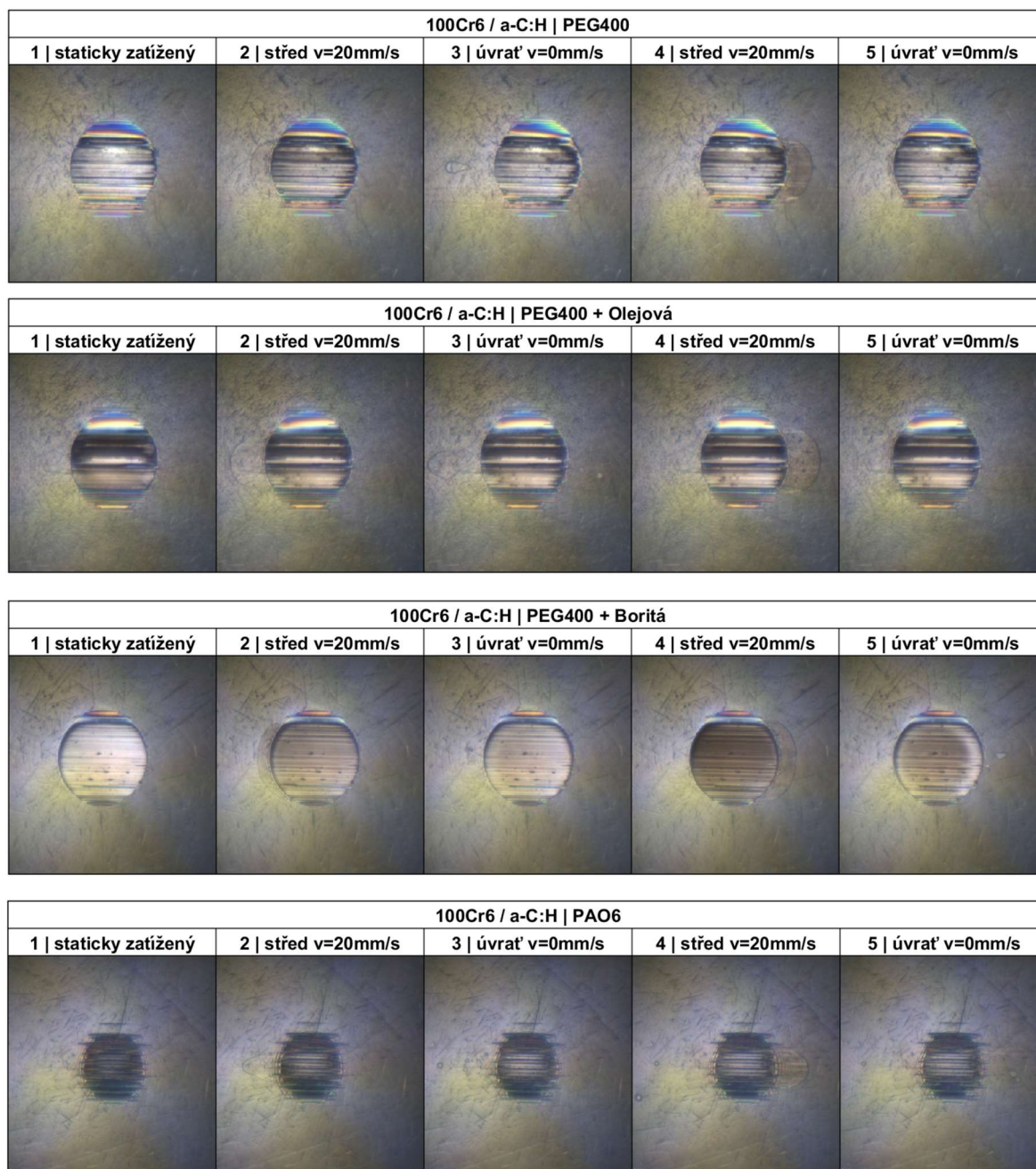
Z porovnání opotřebení vyplývá, že zařízení UMT Bruker zachytilo podobnější trendy jako SMT-5000 než v případě změny topografie. Přesto nebyla shoda absolutní, což potvrzuje, že opotřebení je stále citlivé na konkrétní konfiguraci kontaktu. Výsledky zároveň ukazují, že nízký součinitel tření nemusí být přímo spojen s nízkým opotřebením. Pro celkové hodnocení mazacího systému je proto nutné posuzovat součinitel tření, opotřebení a změnu topografie společně.

5.4.4 Optické pozorování mazacího filmu

Součástí třetí fáze experimentálního měření bylo optické pozorování kontaktu během tribologického testu na zařízení UMT Bruker. Cílem této části bylo posoudit, jak se jednotlivé mazací systémy chovají v konfiguraci čistého skluzu a zda jsou schopny během pohybu vytvářet opticky pozorovatelný mazací film. Toto měření navazovalo na předchozí hodnocení součinitele tření, změny topografie a opotřebení, jeho hlavní přínos však spočíval v možnosti přímo sledovat změnu charakteru kontaktu mezi statickým zatížením a pohybem.

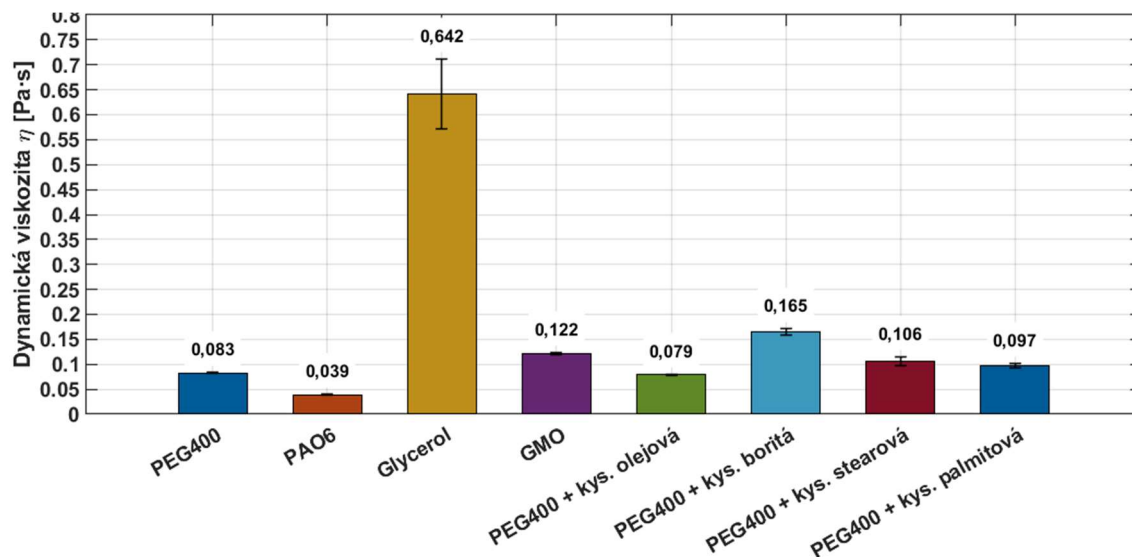
Pro optické pozorování byl jako protikus použit safírový disk s chromovou vrstvou. Tato konfigurace byla zvolena z důvodu zlepšení interferenčního kontrastu v oblasti kontaktu, protože samotný nepovlakovaný safír neposkytoval pro dané uspořádání dostatečně vhodné podmínky pro pozorování mazacího filmu. Chromová vrstva tak umožnila zřetelnější rozlišení kontaktní oblasti a lepší vyhodnocení změn mazacího filmu mezi statickým stavem a pohybem.

Vybrané optické snímky kontaktu jsou uvedeny na Obr. 5-16. Každá sekvence obsahuje statický snímek kontaktu, snímky pořízené při pohybu přibližně $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a snímky v úvratích. Ze snímků je patrné, že jednotlivá maziva vytvářela odlišný optický obraz kontaktu. U některých systémů docházelo během pohybu k rozšíření tmavší oblasti v kontaktu, což lze spojovat s výraznějším optickým oddělením povrchů mazacím filmem. Naopak u jiných maziv byl optický rozdíl mezi statickým stavem a pohybem méně výrazný.



Obr. 5-16 Vybrané snímky tloušťky mazacího filmu pro statický kontakt a pro rychlost $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ během prvního cyklu pro jednotlivá maziva a směsi

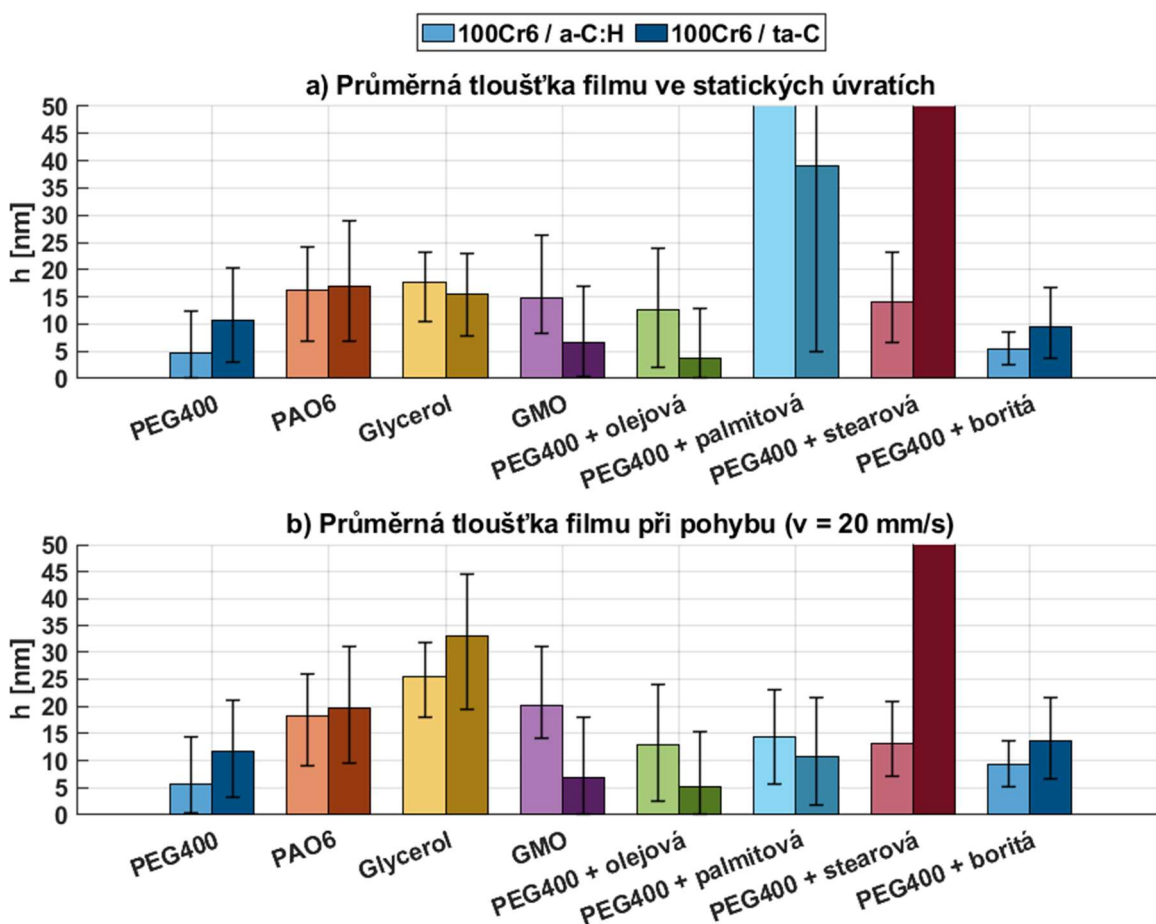
Aby bylo možné rozdíly mezi mazivy lépe interpretovat, byla jako doplňkové hodnocení provedena reologická charakterizace použitých maziv. Cílem tohoto měření nebylo přímo stanovit tloušťku mazacího filmu v tribologickém kontaktu, ale ověřit, zda se jednotlivá maziva a směsi s aditivy liší svou dynamickou viskozitou. Měření bylo provedeno při jedné teplotě formou smykového testu typu shear rate sweep, při kterém byla sledována závislost viskozity na smykové rychlosti. Výsledky jsou shrnuty na Obr. 5-17.



Obr. 5-17 Dynamická viskozita použitých maziv a směsí s aditivy

Průměrná opticky vyhodnocená tloušťka mazacího filmu ve statických úvratích a při pohybu je uvedena na Obr. 5-18. Ve statických úvratích (Obr. 5-18a) byly mezi jednotlivými mazivy patrné výrazné rozdíly. Vyšší hodnoty byly zaznamenány zejména u glycerolu, PAO6 a některých směsí PEG400 s kyselinami. Nejvýraznější hodnoty vykazovaly především směsi s kyselinou palmitovou a stearovou, u nichž však byly současně patrné větší rozptyly. U kombinace 100Cr6/ta-C se směsí PEG400 s kyselinou stearovou je nutné výsledek interpretovat opatrně, protože kontaktní plochy nebyly vůči sobě správně kolmé a kontakt částečně probíhal mimo původně opotřeбенou oblast. Tato hodnota proto nemůže být považována za plně reprezentativní pro skutečnou tloušťku mazacího filmu v opotřeбенé stopě. To naznačuje, že opticky pozorovaná vrstva nebyla ve všech případech homogenní a její vyhodnocení mohlo být ovlivněno lokálním rozložením maziva v kontaktu i geometrickými podmínkami měření.

Při pohybu kontaktu rychlostí přibližně $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 5-18b) byly hodnoty tloušťky filmu obecně srovnatelné nebo vyšší než ve statickém stavu, avšak chování jednotlivých maziv nebylo jednotné. Glycerol a GMO vykazovaly výraznější opticky pozorovaný film, což může souviset s jejich vyšší viskozitou a schopností udržet mazivo v kontaktu. PAO6 vykazovalo nižší viskozitu, ale v optickém vyhodnocení nevykazovalo vždy nejnižší hodnoty filmu. Hodnota pro směs PEG400 s kyselinou stearovou u kombinace 100Cr6/ta-C však byla ovlivněna geometrickou odchylkou kontaktu, a proto nebyla použita jako hlavní podklad pro obecné hodnocení schopnosti této směsi vytvářet mazací film. To ukazuje, že při čistém skluzu se na formování filmu nepodílí pouze viskozita, ale také lokální vtahování maziva, geometrie kontaktu, poloha kontaktní oblasti a charakter mezní vrstvy.



Obr. 5-18 Průměrná opticky vyhodnocená tloušťka mazacího filmu ve statických úvratích (a) a při pohybu rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) pro kontakty 100Cr6/a-C:H a 100Cr6/ta-C na zařízení UMT Bruker

Z výsledků je patrné, že změna tloušťky filmu nebyla pro všechna maziva stejná. U některých systémů, například u glycerolu nebo GMO, docházelo k nárůstu tloušťky filmu při pohybu, což může naznačovat účinnější vtahování maziva do kontaktu. Naopak u některých směsí PEG400 s kyselinami byl rozdíl záporný, zejména u kyseliny palmitové.

U kyseliny stearové je tento trend nutné hodnotit opatrně, protože u kombinace 100Cr6/ta-C bylo optické vyhodnocení ovlivněno nesprávnou vzájemnou orientací kontaktních ploch. Obecně však může záporný rozdíl souviset s tím, že statický snímek zachycoval lokálně nahromaděné mazivo v úvrati, zatímco při pohybu mohlo docházet k jeho přerozdělení nebo vytlačení z části kontaktní oblasti.

Porovnání optického vyhodnocení s reologickými daty ukazuje, že mezi viskozitou a tloušťkou filmu existuje pouze částečná souvislost. Glycerol a GMO patřily mezi viskóznější maziva a současně vykazovaly výraznější opticky pozorovaný film, zatímco PAO6 mělo nejnížší viskozitu a obecně menší schopnost vytvářet výraznou mazací vrstvu. Tento trend však neplatil jednoznačně pro všechny systémy. Směs PEG400 s kyselinou boritou měla vyšší viskozitu než některé ostatní směsi, ale nevykazovala odpovídající nárůst tloušťky filmu. Naopak směs s kyselinou palmitovou vykazovala v některých případech výraznou optickou odezvu, přestože její viskozita nebyla nejvyšší. U směsi s kyselinou stearovou nebylo možné v případě kombinace 100Cr6/ta-C provést jednoznačné zobecnění, protože opticky vyhodnocená hodnota byla ovlivněna geometrií kontaktu. Samotná dynamická viskozita tedy není dostačujícím parametrem pro vysvětlení formování mazacího filmu. Kromě ní se uplatňuje také polarita maziva, adsorpce molekul na povrchu, stabilita mezní vrstvy, homogenita filmu a lokální podmínky v kontaktu.

Z celkového porovnání optických a reologických výsledků vyplývá, že jednotlivé mazací systémy vykazovaly rozdílnou schopnost formování mazacího filmu během čistého skluzu. Vyšší opticky pozorovaná tloušťka filmu byla obecně spojena s výraznějším oddělením kontaktních povrchů během pohybu, zejména u glycerolu, GMO a vybraných směsí PEG400 s kyselinami. Výsledek pro směs PEG400 s kyselinou stearovou u kombinace 100Cr6/ta-C však nebyl zahrnut jako plně reprezentativní, protože byl zatížen geometrickou odchylkou kontaktu. Reologické měření zároveň potvrdilo, že schopnost vytvářet opticky pozorovatelný film není řízena pouze dynamickou viskozitou. Pokud by tomu tak bylo, nejvyšší tloušťku filmu by vykazoval glycerol, případně směs PEG400 s kyselinou boritou, což se jednoznačně nepotvrdilo.

Výsledky tedy naznačují, že tloušťka a charakter mazacího filmu jsou dány kombinací viskozitních vlastností, chemického složení maziva, lokálního vtahování maziva do kontaktu a stability vznikající vrstvy. Současně nebyla pozorována jednoznačná přímá vazba mezi opticky vyhodnocenou tloušťkou filmu, součinitelem tření a opotřebením. Reologická data proto slouží pouze jako podpůrné vysvětlení rozdílů mezi mazivy, nikoli jako samostatný ukazatel výsledného třecího a opotřebovacího chování.

6 DISKUZE

Diskuze je zaměřena především na vzájemné souvislosti mezi součinitelem tření, změnou topografie povrchu, opotřebením a formováním mazacího filmu. Současně jsou diskutovány možné tribochemické mechanismy, které mohly vést k pozorovanému chování jednotlivých maziv a DLC povlaků.

6.1 Interpretace výsledků

Výsledky této práce ukazují, že tribologické chování DLC povlaků v mezním až smíšeném režimu mazání nelze vysvětlit pouze typem použitého povlaku nebo samotným složením maziva. Rozhodující je vzájemná interakce mezi povrchem, mazivem, aditivem, kontaktní geometrií a provozními podmínkami. Tento závěr odpovídá také poznatkům z literatury, podle kterých je nízké tření u DLC povlaků podmíněno nejen vlastnostmi samotné uhlíkové vrstvy, ale také stavem kontaktního rozhraní, chemickou aktivitou maziva, tvorbou tribofilmu a podmínkami záběhu [8; 4; 9].

Tento princip je patrný i z výsledků. V jednotlivých experimentech se ukázalo, že stejná maziva nevykazovala shodné chování pro a-C:H a ta-C, stejně jako stejné DLC povlaky nereagovaly shodně při změně maziva, teploty nebo typu pohybu. Z tohoto důvodu bylo nutné hodnotit součinitel tření společně se změnou topografie, opotřebením a optickým pozorováním mazacího filmu. Samotná hodnota COF proto nestačí k úplnému vysvětlení chování kontaktu. Přesnější interpretaci celého tribologického systému umožňuje až její propojení se změnou topografie, opotřebením a mazacím filmem.

6.1.1 Vymezení stavu před a po záběhu

Stav před záběhem byl u recipročních testů uvažován jako průměrné chování kontaktu během prvních 200 cyklů měření. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na rozdílný průběh ustalování součinitele tření u jednotlivých materiálových kombinací. U některých kontaktů došlo k ustálení COF již během prvních desítek cyklů, zatímco u jiných se hodnota tření ustalovala postupně, zpravidla však nepřesahovala interval 200 cyklů.

U měření na zařízení MTM nebylo vhodné pracovat s počtem cyklů, protože záznam byl členěn podle jednotlivých rychlostních kroků. Pro záběhový krok proto bylo obdobně vyhodnoceno prvních 200 datových bodů, což odpovídalo přibližně prvním 200 s měření. Tento interval představuje sjednocenou hodnotící oblast pro popis počáteční odezvy kontaktu bez nutnosti stanovovat individuální délku záběhu pro každou materiálovou kombinaci zvlášť.

Stav po záběhu byl u recipročních testů vyhodnocen z posledních 200 cyklů hodinového testu, které reprezentují ustálené třecí chování kontaktu. U zařízení MTM bylo pro porovnání koncové fáze záběhu použito posledních 200 datových bodů záběhového kroku, tedy přibližně posledních 200 s měření. V této fázi se předpokládá, že již proběhlo počáteční přizpůsobení protilehlých povrchů, zahrnující změnu drsnosti, úpravu reálné kontaktní plochy a vytvoření stabilnější mezní vrstvy. V některých případech však mohlo dojít také k výraznější změně kontaktní geometrie vlivem opotřebení, zejména u systémů s povlakem ta-C, kde docházelo k probroušení povlaku z kuličky na ocelový podklad, zvětšení kontaktní plochy a snížení lokálního kontaktního tlaku. Tento jev je dále rozebírán v diskuzi a byl zohledněn při interpretaci opotřebení, změny topografie a rozdílů mezi záběhovou a ustálenou fází. Doba testu jedné hodiny tak byla pro sledované kombinace z pohledu ustálení třecí odezvy dostačující.

6.1.2 Porovnání systémů čistého skluzu a valení se skluzem

Zařízení SMT-5000 a UMT Bruker pracovaly v režimu posuvně-vratného pohybu za čistého skluzu, zatímco zařízení MTM využívalo valení se skluzem (při $SRR = 20\%$). Tyto režimy se liší především poměrem mezi skluzovou a unášivou složkou pohybu, způsobem vniknutí maziva do kontaktu a intenzitou opakovaného zatěžování stejného místa povrchu. V čistém skluzu je jedno místo na kuličce vystaveno opakovanému smykovému namáhání, zatímco ve valivě-skluzovém kontaktu se kontaktní oblast na kuličce průběžně mění. To může významně ovlivnit tvorbu i rozrušování tenké mazací vrstvy mezi povrchy.

Při hodnocení mezního mazání je proto nutné uvažovat rovnováhu mezi procesy tvorby mezní vrstvy a procesy jejího narušování nebo odstraňování. Mezní vrstva přitom nemusí vznikat pouze mechanickým rozprostřením maziva, ale také fyzikálními a chemickými procesy na povrchu, například adsorpcí složek maziva nebo oxidací na povlaku. V čistém skluzu lze očekávat vyšší podíl rozrušování mezní vrstvy, protože skluzová složka je dominantní a stejné místo povrchu je zatěžováno opakovaně. Současně může docházet k výraznějšímu opotřebení kuličky, změně její geometrie a tím i k průběžné změně jak nominální, tak i reálné kontaktní plochy. S růstem kontaktní plochy se může snižovat kontaktní tlak, což dále mění podmínky v rozhraní. Tyto procesy mohou přispívat k rozdílům v opotřebení mezi jednotlivými konfiguracemi s a-C:H a ta-C, které jsou patrné při porovnání výsledků čistého skluzu (Obr. 5-5a–d, Obr. 5-14).

Naopak ve valivě-skluzovém kontaktu se kromě skluzu uplatňuje také unášivá složka, která podporuje přívod maziva do kontaktu. U MTM bylo použito $SRR = 20 \%$, tedy poměr skluzové rychlosti k unášivé rychlosti byl v poměru 0,2. Ve srovnání s čistým skluzem, kde lze uvažovat $SRR = 200\%$, je tak relativní podíl skluzu desetkrát nižší. Rozdíl je také v zatěžování stejného místa povrchu kuličky. Při kontaktní oblasti přibližně 0,25 mm a obvodu kuličky přibližně 60 mm se stejné místo ve valivě-skluzovém kontaktu vrací do kontaktu až po průchodu necelých 250 kontaktních délek. MTM proto lépe vystihuje vliv rychlosti na tvorbu mazacího filmu a umožňuje sledovat přechod mezi mezným a smíšeným režimem pomocí Stribeckových křivek (Obr. 5-8a,b, Obr. 5-9a,b). Čistý skluz a valení se skluzem tedy neposkytují stejné informace. Čistý skluz tak více prověřuje odolnost mezní vrstvy a povrchu vůči opakovanému smykovému namáhání, zatímco valivě-skluzový kontakt lépe vystihuje schopnost maziva vytvořit a udržet film při dané rychlosti.

Studie Björling et al. [10] ukazuje, že kombinace DLC a glycerolu může dosahovat nízkého tření ve valivě-skluzovém EHL kontaktu. Tento mechanismus však nelze přímo převést na čistý posuvně-vratný skluz, protože třecí odezva je zde výsledkem několika současně probíhajících procesů. Vedle přizpůsobování topografie, opotřebení povrchu a změny kontaktní plochy může docházet také k tvorbě mazací vrstvy různého charakteru. V některých případech se může jednat pouze o velmi tenkou meznou vrstvu na úrovni jednotek nanometrů, případně až monomolekulární vrstvu, zatímco při příznivějších podmínkách může vznikat silnější mazací film dosahující desítek až stovek nanometrů. V provedených experimentech proto nelze tyto dílčí procesy zcela oddělit, ale jejich společný vliv se nejvýrazněji promítá právě do počáteční části testu, která je dále v textu uvažována jako interval záběhu.

6.1.3 Porovnání metod a přenositelnost výsledků mezi zařízeními

Porovnání zařízení SMT-5000 a UMT Bruker bylo provedeno proto, že obě metody pracovaly v čistém posuvně-vratném skluzu za srovnatelných provozních podmínek, přičemž UMT Bruker navíc umožnil optické sledování mazacího filmu. Cílem tedy nebylo získat shodné absolutní hodnoty COF, ale ověřit, zda se při stejných materiálových dvojicích a mazivech opakují hlavní trendy tření, opotřebení a změny povrchu.

Výsledky ukázaly pouze částečnou přenositelnost. Nejnížší shoda byla patrná na v intervalu záběhu, kdy korelace COF mezi zařízeními dosahovala nízké hodnoty (Obr. 5-10a, $R = 0,29$). Tento rozdíl lze přisuzovat hlavně citlivosti počáteční fáze kontaktu na výchozí topografii kuličky, počáteční přizpůsobování povrchů a tvorbu tenké mezní vrstvy. Po ustálení kontaktu se shoda zlepšila (Obr. 5-10b, $R = 0,68$) a střední korelace byla patrná také u průměrných hodnot COF z celého testu (Obr. 5-10c, $R = 0,64$).

Nejlepší přenositelnost byla zjištěna u opotřebení (Obr. 5-14, $R = 0,77$). To lze vysvětlit tím, že opotřebení vystihuje jednu kumulativní hodnotu pro celý proces, který je nominálně silně závislý na zatížení a skluzové dráze, jež jsou dobře řízené u obou zařízení. Rozdíly mezi zařízeními tedy nelze vysvětlovat odlišným typem pohybu, ale spíše rozdílnou dynamikou zařízení, tuhostí uchycení a způsobem buzení pohybu. U SMT-5000 byl použit deformační člen o tuhosti dostačující pro experimentální měření a pohyb krokovým motorem, zatímco u UMT Bruker byl pohyb řízen servomotorem přes klikový mechanismus, což mohlo vést k hladšímu průběhu pohybu.

U obou zařízení mohly být kritické úvratě, kde dochází ke krátkodobému zastavení a změně směru. V třecích datech však nebyly pozorovány výrazné lokální nárůsty ani poklesy během cyklu, které by naznačovaly přechod mezi mazacími režimy a ani samotné opotřebení u úvratí cyklů nebylo výrazně vyšší. SMT-5000 tak sloužil hlavně jako screeningová metoda pro hodnocení tření a záběhu, zatímco UMT Bruker při obdobném typu kontaktu doplnil třecí data o optické sledování mazacího filmu.

6.1.4 Vliv maziva a mastných kyselin

Vliv mastných kyselin v mazivu PEG400 nebyl v čistém posuvně-vratném skluzu jednoznačně průkazný. U kombinací s povlaky nebyly pozorovány výrazné rozdíly v součiniteli tření ani v opotřebení (Obr. 5-3, Obr. 5-10, Obr. 5-14). Přídavek kyselin se tedy v tomto režimu neprojevil jako hlavní faktor, který by systematicky snižoval COF nebo opotřebení. U změny topografie byl patrný pouze mírný nárůst drsnosti kuličky, nejvýrazněji při použití kyseliny borité (Obr. 5-4).

Výraznější účinek byl patrný ve valivě-skluzovém kontaktu ($SRR = 20\%$). U kombinace 100Cr6/a-C:H vedly mastné kyseliny k nižším hodnotám COF, zejména kyselina olejová, stearová a palmitová (Obr. 5-6a). Tento efekt lze spojit s lepším vnikáním maziva do kontaktu a možností tvorby mezní vrstvy, kde karboxylová skupina podporuje adsorpci a uhlovodíkový řetězec může snižovat smykové napětí [9; 8]. U kombinace 100Cr6/ta-C byl vliv slabší, i když u kyseliny olejové a stearové se hodnoty COF pohybovaly spíše níže (Obr. 5-6b).

Rozdílná odezva obou povlaků může souviset s jejich odlišnou povrchovou chemií. Povlak a-C:H je hydrogenovaný, zatímco ta-C je bezvodíkový a obecně může vykazovat jinou reaktivitu povrchu. Autoři studií uvádějí [25; 17], že rozdílná struktura a chemické složení DLC povlaků mohou ovlivňovat adsorpci maziva, vznik mezních vrstev a průběh tribochemicky nebo tribomechanicky aktivovaných reakcí. To může být jedním z důvodů, proč stejné kyseliny nepůsobily stejně na povlaky a-C:H a ta-C.

Z hlediska drsnosti měla u valivě-skluzového kontaktu kulička u kombinací 100Cr6/a-C:H tendenci zhrubnout, zatímco u 100Cr6/ta-C docházelo spíše k vyhlazení nebo zachování původní drsnosti (Obr. 5-7a,b). Tento výsledek je zajímavý i vzhledem k rozdílné tvrdosti použitých materiálů. Kalená ocel 100Cr6 dosahuje orientačně tvrdosti přibližně 7–8 GPa, zatímco a-C:H povlaky se obvykle pohybují přibližně v rozmezí 15–25 GPa a ta-C povlaky mohou dosahovat přibližně 44–68 GPa. Z hlediska samotného poměru tvrdostí by proto měla být nejvíce abrazivní kombinace 100Cr6/ta-C, kde může být povlak přibližně 6–9× tvrdší než ocelový protikus. Naopak u kombinace 100Cr6/a-C:H je tento poměr nižší, přibližně 2–4×. Přesto nebylo u 100Cr6/ta-C pozorováno výraznější zhrubnutí kuličky, což ukazuje, že výsledná změna topografie nebyla určena pouze rozdílem tvrdostí. Významnou roli pravděpodobně hrálo především zahluštění povrchu během záběhu a stabilita mezní vrstvy, která mohla omezit přímý abrazivní kontakt asperit. Tyto faktory mohly potlačit očekávaný vliv rozdílné tvrdosti materiálové dvojice, a proto se u kombinace 100Cr6/ta-C neprojevovalo výraznější zhrubnutí povrchu, přestože ta-C vykazuje podstatně vyšší tvrdost než ocelový protikus.

Použití směsí s kyselinami mohlo vést ke snížení tření, zejména ve valivě-skluzovém kontaktu u kombinace 100Cr6/a-C:H, neznamenal však automaticky snížení drsnosti povrchu. Výsledky ukazují, že třecí odezvu a změnu topografie je nutné hodnotit společně, protože nízký součinitel tření může být dosažen i při současné změně povrchového profilu. Z praktického hlediska se tedy mastné kyseliny jeví jako přínosnější pro snížení tření ve valivě-skluzovém kontaktu, zatímco v čistém posuvně-vratném skluzu jejich účinek nebyl jednoznačně pozorován. Nižší a stabilnější drsnost přitom zůstává důležitá, protože zvyšuje šanci na přechod do příznivějšího mazacího režimu, kde může být tření dále sníženo lepším oddělením povrchů mazacím filmem.

6.1.5 Vliv teploty a mazacího režimu

Vliv teploty nebyl tak výrazný, jak bylo původně předpokládáno, a neprojevil se jednotně u všech materiálových kombinací. Toto porovnání bylo provedeno pouze u valivě-skluzového kontaktu na zařízení MTM, kde byly testy realizovány při RT a při 60 °C. Zvýšení teploty může na jedné straně podporovat adsorpci a tribochemickou aktivitu povrchu, současně však snižuje viskozitu maziva a tím i schopnost vytvořit únosný mazací film [4; 12]. V naměřených datech nebyla pozorována výrazná změna COF pouze v důsledku zvýšení teploty, přesto byl patrný vliv mastných kyselin na třecí chování. To naznačuje, že jejich účinek mohl souviset spíše s chemickou afinitou k povrchu a tvorbou mezní vrstvy než se samotnou teplotní aktivací při 60 °C.

U kombinace 100Cr6/a-C:H se některé směsi chovaly příznivěji při RT, zatímco při 60 °C jejich účinek zeslábl nebo se zhoršil (Obr. 5-6a). U kombinace 100Cr6/ta-C byla odezva více závislá na konkrétním mazivu. Například PAO6 při 60 °C po záběhu snižovalo COF, zatímco PEG400 s kyselinou palmitovou vedl k jeho nárůstu (Obr. 5-6b). Teplota tedy nepůsobila jako samostatný rozhodující faktor, ale její vliv se projevil až v kombinaci s konkrétním mazivem a typem DLC povlaku. To by mohlo odpovídat poznatkům ze studií [9; 12], podle nichž je tření DLC povlaků řízeno současně strukturou povlaku, přítomností vodíku, okolním prostředím, tribochemií a provozními podmínkami. Zvýšení teploty může podporovat grafitizaci nebo tvorbu ochranných tribochemických vrstev, ale tento účinek závisí na typu DLC povlaku a chemii maziva. V této práci se proto ukázalo, že samotná teplota 60 °C není univerzálním mechanismem snížení COF, ale pouze jedním z faktorů ovlivňujících stabilitu mezní vrstvy a třecí odezvu.

Stribeckovy křivky neukázaly výrazný pokles ani nárůst COF se změnou rychlosti (Obr. 5-8a,b, Obr. 5-9a,b). To naznačuje, že se kontakt ve sledovaném rozsahu rychlostí neposouval výrazně do jiného mazacího režimu, ale zůstával převážně v oblasti mezního až smíšeného mazání. Pokud by docházelo k výraznější tvorbě souvislého mazacího filmu, bylo by možné očekávat zřetelnější pokles COF s rostoucí rychlostí. Z pohledu Stribeckových křivek se obecně lépe projevíly kombinace s a-C:H, které napříč většinou maziv dosahovaly nižších hodnot COF než kombinace s ta-C. U ta-C byly hodnoty tření vyšší a citlivější na volbu maziva a v menší mírně i teploty.

Při interpretaci výsledků je nutné rozlišit valivě-skluzový kontakt od čistého posuvně-vratného skluzu. V čistém skluzu je stejné místo kuličky opakovaně zatěžováno smykem, což může podporovat lokální nárůst teploty, intenzivnější mechanické namáhání a rychlejší narušování mezní vrstvy. Ve valivě-skluzovém kontaktu naopak vstupuje do kontaktu postupně nový povrch kuličky, takže jedno konkrétní místo není zatěžováno souvisle. Na základě přepočtu z otáček lze odhadnout, že stejné místo povrchu kuličky vstupuje do kontaktu přibližně jednou za 3 s, a není tedy zatěžováno kontinuálně jako při čistém skluzu. Tím se snižuje intenzita opakovaného zatěžování jednoho místa a současně vzniká časový prostor pro opětovnou adsorpci molekul maziva, obnovu mezní vrstvy nebo proběhnutí lokálních tribochemických reakcí. Současně je mazivo ve valivě-skluzovém kontaktu lépe vtahováno do kontaktu, což může podporovat stabilnější mazací podmínky než při čistém skluzu. V této práci však nebyla samostatně hodnocena energie disipovaná třením ani lokální teplota přímo v kontaktu, proto je tento vliv uvažován pouze jako možný doprovodný mechanismus. Výsledky teplotního porovnání z MTM proto nelze přímo převádět na čistý skluz.

Z praktického hlediska nelze zvýšení teploty na 60 °C považovat za univerzální cestu ke snížení tření. Příznivější chování bylo dosaženo pouze u některých kombinací maziva a povlaku. Obecně se jako vhodnější pro dosažení nižšího COF ve valivě-skluzovém kontaktu jevíly kombinace s a-C:H, zatímco ta-C vyžadoval vhodnější volbu maziva a byl citlivější na změnu teploty.

6.1.6 Vliv typu DLC povlaku na třecí chování

Z porovnání a-C:H a ta-C vyplývá, že oba typy DLC povlaků vykazovaly rozdílné chování. Povlak a-C:H se obecně projevoval stabilnějším průběhem COF a menší citlivostí na použitý mazací systém. Naproti tomu ta-C vykazoval výraznější odezvu na čistá maziva i směsi s kyselinami, zejména během intervalu záběhu. Tento rozdíl může souviset s odlišnou strukturou povlaků, kdy a-C:H je hydrogenovaný, zatímco ta-C je bezvodíkový. To může ovlivnit reaktivitu povrchu, tvorbu mezní vrstvy a průběh tribochemicky nebo tribomechanicky aktivovaných reakcí [4; 16; 9; 15].

U kontaktu 100Cr6/a-C:H byly hodnoty COF pro PEG400 a PAO6 poměrně stabilní a rozdíly před a po záběhu byly malé (Obr. 5-3a). Kontakt 100Cr6/ta-C vykazoval výraznější změnu během intervalu záběhu a u některých čistých maziv docházelo po záběhu k poklesu COF, zejména u GMO a glycerolu (Obr. 5-3b). Tento pokles mohl souviset nejen s přizpůsobením povrchů a tvorbou mezní vrstvy, ale také s vyšší viskozitou těchto maziv oproti PEG400 a PAO6 (Obr. 5-17).

Podobný rozdíl byl patrný i u kontaktů podobných materiálů. Kombinace a-C:H/a-C:H vykazovala stabilnější odezvu (Obr. 5-3c), zatímco ta-C/ta-C byla více ovlivněna typem maziva (Obr. 5-3d). Kontakt ta-C/a-C:H se choval mezi těmito krajními případy (Obr. 5-3e). Literatura často uvádí vysoký potenciál ta-C pro dosažení velmi nízkého tření při použití vhodných organických maziv [15; 16]. V této práci se však tento potenciál neprojevil jednoznačně, pravděpodobně kvůli odlišným kontaktním podmínkám, použitým mazivům, průběhu intervalu záběhu a tomu, že nižší COF nebyl vždy spojen s nízkým opotřebením.

Samotné zhodnocení hodnoty COF nestačí pro zhodnocení volby povlaku a proto je potřeba to propojit se změnou drsnosti povrchu a opotřebením. Kombinace a-C:H/a-C:H vykazovala malou změnu hodnoty S_q (Obr. 5-4c) a zároveň nejnižší opotřebení (Obr. 5-5c). Naopak ta-C/ta-C vykazoval větší vliv maziva a vyšší opotřebení, zejména při použití PEG400 a GMO (Obr. 5-4d, Obr. 5-5d). U hybridních konfigurací 100Cr6/a-C:H a 100Cr6/ta-C bylo opotřebení vzájemně podobnější než u symetrických kontaktů, přesto se lišil průběh COF a odezva na mazivo (Obr. 5-5a,b). Pokles COF u ta-C proto nelze automaticky spojovat pouze se stabilní meznou vrstvou nebo příznivou tribochemickou reakcí.

U kombinací s vyšším opotřebením mohlo docházet ke změně kontaktní geometrie, zvětšení kontaktní plochy a snížení kontaktního tlaku. U kombinace ta-C/ta-C navíc docházelo k probroušení povlaku v první desetině testu až na ocelový podklad, čímž se původní kontakt DLC/DLC majoritně měnil na kontakt s ocelí. To může vysvětlovat obdobné opotřebení mezi ta-C/ta-C a 100Cr6/ta-C. Podobný princip popisují Makowski et al. [5], kteří ukazují, že velmi nízké tření u ta-C může být doprovázeno chemicky indukovaným opotřebením a změnou kontaktní plochy.

Z praktického hlediska se jako stabilnější řešení jevil povlak a-C:H, zejména v konfiguraci a-C:H/a-C:H, kde bylo dosaženo nízkého a stabilního COF, malé změny topografie a nejnižšího opotřebení. Povlak ta-C má podle literatury potenciál pro velmi nízké tření, ale v těchto experimentech nebyl tento efekt univerzálně potvrzen.

6.1.7 Vztah mezi třením, opotřebením a změnou kontaktního tlaku

Výsledky čistého posuvně-vratného skluzu ukazují, že snížení COF nemusí vždy představovat pouze projev účinnějšího mazání, ale může být také důsledkem změny kontaktní geometrie během opotřebení. U kombinací s ta-C docházelo často současně k vyššímu opotřebení, které mohlo zvětšovat kontaktní plochu a tím snižovat kontaktní tlak. V některých případech se kontaktní tlak u čistého skluzu mohl snížit přibližně z počáteční hodnoty 1,5 GPa až na hodnoty blízké jeho desetině. Taková změna kontaktních podmínek mohla sama ovlivnit hodnotu COF na konci testu.

Tento vztah je dobře patrný při porovnání symetrických kontaktů. Kombinace a-C:H/a-C:H vykazovala opotřebení přibližně v řádu 10^{-8} až 10^{-10} mm³/(N·m), zatímco u kombinace ta-C/ta-C se hodnoty pohybovaly přibližně v řádu 10^{-5} až 10^{-6} mm³/(N·m) (Obr. 5-5c,d). U této kombinace ta-C/ta-C v některých případech docházelo k poklesu COF (Obr. 5-3d). To naznačuje, že nižší tření zde nemuselo být vždy spojeno s nižším opotřebením povrchu.

Podobný trend je patrný i u hybridních konfigurací. Při porovnání Obr. 5-5a,b se kombinace 100Cr6/a-C:H pohybovala přibližně o jeden řád níže než kombinace 100Cr6/ta-C. U ta-C/ta-C navíc během testu docházelo k probroušení povlaku až na ocelový podklad, čímž se původní kontakt DLC/DLC částečně měnil na kontakt s ocelí. To může vysvětlovat, proč se opotřebení u ta-C/ta-C v některých případech přibližovalo kombinaci 100Cr6/ta-C.

U valivě-skluzového kontaktu nebyly pozorovány tak výrazné změny kontaktního tlaku jako u čistého skluzu. To souvisí s odlišným zatěžováním povrchu kuličky, kdy se kontaktní oblast průběžně mění a stejné místo není vystaveno tak intenzivnímu opakovanému smykovému namáhání. Vztah mezi COF, opotřebením a změnou kontaktní geometrie se proto nejvýrazněji projevil právě u čistého skluzu.

Korelace opotřebení mezi SMT-5000 a UMT Bruker byla ze sledovaných veličin nejlepší (Obr. 5-14, $R = 0,77$), což podporuje význam opotřebení jako stabilnějšího ukazatele celkového poškození kontaktu. Podobný princip popisuje Makowski et al. [5], který uvádí, že velmi nízké tření u ta-C může být doprovázeno chemicky indukovaným opotřebením a změnou kontaktní plochy.

Z praktického hlediska je proto vhodnější hodnotit nízký COF vždy společně s opotřebením a změnou topografie. Za příznivější se nejvíce kombinace s nejnižší okamžitou hodnotou tření, ale kombinace, která současně omezuje opotřebení a změnu kontaktní geometrie. V tomto směru vycházela nejlépe kombinace a-C:H/a-C:H, zatímco u ta-C bylo nutné rozlišit, zda pokles COF souvisel se stabilní meznou vrstvou, nebo se změnou kontaktu vlivem opotřebení.

6.1.8 Optické pozorování mazacího filmu

Optické pozorování na zařízení UMT Bruker doplnilo hodnoty COF o informaci, zda se během pohybu v kontaktu vytváří pozorovatelný mazací film. Umožnilo tak lépe propojit třecí odezvu se stavem kontaktní oblasti.

Snímky na Obr. 5-16 ukazují, že jednotlivá maziva se lišila nejen opticky vyhodnocenou tloušťkou filmu, ale také charakterem kontaktní oblasti. Rozdíly byly patrné zejména ve velikosti a tvaru kontaktní plochy, v přítomnosti stop po záběhu a v lokálním rozložení světlých a tmavých oblastí v chromatických interferogramech. U některých systémů se během pohybu objevovala oblast tmavě šedých až černých tónů, což poukazuje na větší oddělení povrchů mazivem a vznik pozorovatelné mazací vrstvy. Naopak v místech se světlejšími šedými odstíny, která odpovídala nižší opticky vyhodnocené tloušťce filmu, byly zřetelnější stopy po opotřebení, lokální vyhlazení povrchu a orientace jemných nerovností vzniklých během záběhu. Tyto rozdíly ukazují, že optické snímky nezachycují pouze přítomnost maziva v kontaktu, ale také lokální změny topografie a charakter kontaktní oblasti po tribologickém zatěžování.

Z hlediska reologie maziv a směsí na Obr. 5-17 se ukazuje, že nejnižší viskozitu mělo PAO6 a nejvyšší glycerol. Přídavek palmitové, stearové a zejména borité kyseliny zvyšoval viskozitu PEG400. Tento trend se však přímo nepromítl do tloušťky filmu. Při pohybu rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byl výraznější opticky vyhodnocený film pozorován u vybraných směsí PEG400 s mastnými kyselinami, zejména u palmitové a stearové kyseliny v závislosti na materiálové dvojici (Obr. 5-18b). Naopak směs s kyselinou boritou měla relativně vyšší viskozitu, ale nevytvořila tomu odpovídající film.

Samotná viskozita tedy nestačí k vysvětlení formování mazacího filmu. Významnou roli pravděpodobně hrála také polarita maziva, smáčivost, adsorpce na povrch, lokální tok maziva a geometrie kontaktu. Tento závěr odpovídá studiím Amann et al. [14] a Lin et al. [7], které zdůrazňují význam interakce maziva s uhlíkovým povrchem.

Z praktického hlediska bylo optické pozorování přínosné hlavně tím, že ukázalo rozdíly ve schopnosti jednotlivých maziv vytvořit pozorovatelný film. Nejvýraznější film byl pozorován u směsí PEG400 s vybranými mastnými kyselinami, zejména palmitovou a stearovou, zatímco samotná viskozita tento trend plně nevysvětlovala. Tento výsledek však neznamená, že mazivo s největší opticky vyhodnocenou tloušťkou filmu je automaticky nejlepší z hlediska celého tribologického chování, tedy z hlediska součinitele tření, opotřebení a změny topografie povrchu. U některých maziv byly totiž rozdíly v tloušťce filmu výraznější než rozdíly v samotném tření. To může souviset s tím, že kontakt se stále nacházel převážně v mezním režimu mazání.

6.2 Omezení práce

Počet opakování a statistická nejistota

Vzhledem k rozsahu experimentální matice nebylo možné provést tři opakování pro všechny kombinace povlaků, maziv a provozních podmínek. Opakovatelnost byla proto ověřena na vybraných reprezentativních konfiguracích kontaktu 100Cr6/a-C:H, které se lišily použitým mazacím systémem podle konkrétního zařízení. Pro Bruker UMT byla zvolena směs PEG400 s kyselinou palmitovou, pro SMT-5000 čistý PEG400 a pro MTM směs PEG400 s kyselinou stearovou.

U opakovaných testů byla opakovatelnost orientačně posouzena pomocí difference mezi měřeními. Rozdíly v součiniteli tření a opotřebení se zpravidla pohybovaly do 10 %, což umožňuje porovnávat hlavní trendy mezi mazivy, povlaky a zařízeními. U koncové drsnosti byly rozdíly vyšší, přibližně do 20 %, což odpovídalo zhruba 10–20 nm. Procentuální vyjádření je však u drsnosti nutné hodnotit opatrně, protože stejný absolutní rozdíl má jiný význam u hladších a drsnějších povrchů. Přesnější vyhodnocení by vyžadovalo vyšší počet měřených míst nebo opakování.

Omezením zůstává, že u změny drsnosti a opotřebení byla po testu vždy hodnocena pouze jedna plocha daného experimentu. Tyto veličiny mohou být citlivé na lokální charakter opotřebení a zvolenou oblast měření. Ačkoli nebyla trojnásobná opakování provedena u všech materiálových kombinací, jednotlivé výsledky nejsou interpretovány izolovaně, ale především ve vztahu k opakujícím se trendům mezi skupinami maziv, povlaků a zařízení. Závěry práce jsou proto stavěny hlavně na opakujících se rozdílech napříč experimentálními skupinami, nikoliv na izolovaných hodnotách jednoho měření.

Nepřímé ověření tribochemických mechanismů

Tato práce se zaměřila především na vyhodnocení třecí odezvy, změny topografie, materiálového úbytku, opotřebení a optického pozorování mazacího filmu. Tyto veličiny umožnily trendově posoudit chování jednotlivých mazacích systémů a určit, u kterých kombinací docházelo ke stabilizaci tření, změně kontaktní oblasti nebo výraznějšímu opotřebení. Na jejich základě bylo možné navrhnout pravděpodobné mechanismy působení maziv a aditiv, přímé chemické a strukturní ověření vzniklých mezných vrstev však nebylo hlavním cílem této práce.

Toto omezení je důležité zejména u kombinací, kde bylo nízké tření doprovázeno výrazným materiálovým úbytkem. V některých případech byly hodnoty opotřebení u neaditivovaných maziv nižší než u směsí s mastnými kyselinami, což naznačuje, že samotný pokles COF nemusí znamenat příznivější tribologické chování celého systému. Bez přímé chemické analýzy nelze rozhodnout, zda pozorované snížení COF souviselo například s hydroxylací povrchu, grafitizací, oxidací, adsorpcí mastných kyselin, mechanochemickou fragmentací maziva, změnou kontaktní geometrie nebo naopak s tribokorozním působením dané kyseliny. Literatura přitom ukazuje, že právě chemie povrchu a tribofilmu patří mezi klíčové faktory nízkého tření u DLC povlaků [3; 4; 5; 9; 25]. Pro potvrzení navržených mechanismů a detailnější pochopení dílčích rozdílů mezi neaditivovanými mazivy a směsmi s mastnými kyselinami by proto bylo vhodné v navazujícím výzkumu využít Ramanovu spektroskopii, XPS, nebo elektronovou mikroskopii.

Rozdílné konfigurace tribologických zařízení

Použití tří tribologických zařízení představuje především přínos této práce, protože umožnilo hodnotit chování DLC povlaků v rozdílných kontaktních a kinematických podmínkách. Zařízení SMT-5000 a UMT Bruker umožnila sledovat čistý posuvně-vratný skluz, zatímco MTM doplnilo výsledky o valivě-skluzový kontakt a změnu rychlosti v oblasti mezného až smíšeného mazání. UMT Bruker navíc rozšířil třecí měření o optické sledování mazacího filmu, což umožnilo propojit COF, změnu topografie, opotřebení a formování mazací vrstvy. Cílem proto nebylo dosáhnout shodných absolutních hodnot mezi zařízeními, ale posoudit, zda se podobné trendy opakují napříč různými konfiguracemi.

Tato rozdílnost vedla ke složitější interpretaci, protože absolutní hodnoty mezi zařízeními nebylo možné přímo převádět. Současně však umožnila hledat obecnější návaznosti mezi třením, opotřebením, změnou topografie a tvorbou mazacího filmu. Právě trendy, které se opakovaly napříč různými konfiguracemi, lze považovat za významnější a lépe přenositelné do praxe než výsledky získané pouze z jednoho typu třecího testu.

Omezené ověření vlivu drsnosti a změny kontaktního tlaku

Vliv počáteční drsnosti nebyl systematicky ověřen na více úrovních topografie přímo u DLC povlaků. Hlavní experimentální část byla zaměřena na hladší povrchy, což umožnilo lépe porovnat vliv maziva, typu povlaku a průběhu záběhu při srovnatelné výchozí topografii. Tento přístup byl vhodný pro oddělení vlivu mazacího systému, ale neumožnil plně posoudit, jak by se změnilo tření a opotřebení při vyšší počáteční drsnosti DLC povlaků, zejména u kontaktů DLC/DLC.

Výsledky však ukázaly, že změna topografie během testu měla pro interpretaci význam. Pomocí změny S_q , opotřebení a změny kontaktní geometrie bylo možné sledovat, zda se povrch během testu vyhlazoval, zdrsňoval nebo docházelo k výraznějšímu poškození. Se změnou velikosti kontaktní plochy souvisela také změna kontaktního tlaku. U některých kombinací s ta-C mohlo vyšší opotřebení zvětšit kontaktní plochu a tím snížit kontaktní tlak. Pokles COF proto nemusel být vždy dán pouze lepším mazáním, ale také změnou kontaktní mechaniky. Tento vztah je popisován i v literatuře u ta-C, kde může být nízké tření doprovázeno chemicky indukovaným opotřebením a změnou kontaktní plochy [5].

V této práci byla hlavní pozornost věnována vlivu maziva, typu DLC povlaku a kontaktní kinematiky, zatímco počáteční drsnost DLC povlaků nebyla systematicky variována. Pro detailnější posouzení vlivu topografie by bylo vhodné uvažovat zejména kombinace DLC povlaků mezi sebou, například a-C:H/a-C:H, ta-C/ta-C a ta-C/a-C:H, protože právě zde počáteční drsnost DLC povrchu přímo ovlivňuje aktivní kontaktní rozhraní, záběh a tvorbu mezní vrstvy.

Omezení optického a reologického vyhodnocení mazacího filmu

Optické pozorování na zařízení UMT Bruker umožnilo porovnat rozdíly mezi jednotlivými mazivy a sledovat změnu charakteru kontaktu při přechodu ze statického stavu do pohybu. Přestože byla metodika navržena tak, aby nejprve proběhl tribologický test a následně byla při zachování polohy kuličky doplněna optická aparatura se safírovým diskem, nelze vyloučit mírnou změnu vzájemné polohy kuličky a disku. Kontaktní podmínky při optickém pozorování proto nemusely být ve všech případech zcela totožné s podmínkami během původního třecího testu. Získané hodnoty proto představují opticky vyhodnocený stav kontaktu, nikoliv přesné absolutní stanovení tloušťky mazacího filmu. Tento přístup byl vhodný především pro vzájemné porovnání maziv, ale neumožňuje jednoznačně určit skutečný mazací režim pouze z optických hodnot.

Interpretaci optického pozorování mohlo dále ovlivnit samotné nastavení kontaktu. Sledovaná oblast mezi diskem a kuličkou nemusela být ve všech případech dokonale rovnoběžná, protože její poloha byla dána přípravkem a metodou ustavení vzorku. Případné malé naklonění kontaktu mohlo ovlivnit rozložení maziva v zorném poli a tím i opticky vyhodnocenou tloušťku filmu. Výsledky optiky je proto vhodné chápat hlavně jako porovnání rozdílů mezi mazivy za stejnou metodikou, nikoliv jako přesné absolutní stanovení tloušťky filmu.

Interpretaci dále omezuje rozsah reologických měření. Viskozita maziv byla měřena pouze pro vybrané podmínky a sloužila především ke vzájemnému porovnání maziv a směsí. Výsledky ukázaly, že viskozita souvisí s formováním opticky pozorovaného filmu pouze částečně. Nejvyšší opticky vyhodnocený film nebyl zaznamenán u nejviskóznějšího maziva, což potvrzuje, že samotná viskozita nestačí k vysvětlení chování maziva v kontaktu. Pro přesnější interpretaci by bylo vhodné znát viskozitu při více teplotách a smykových rychlostech odpovídajících reálným podmínkám v kontaktu a doplnit také měření smáčivosti jednotlivých maziv na DLC povlacích.

Vliv prostředí a rozsah zobecnitelnost výsledků

Testy byly realizovány v okolní atmosféře, což je z hlediska praktické využitelnosti důležité. Řada studií [3; 4; 6] hodnotí DLC povlaky v řízených podmínkách, například v dusíku, bez přítomnosti kyslíku, při definované vlhkosti nebo za suchých podmínek. Takové prostředí umožňuje lépe oddělit jednotlivé mechanismy, ale jeho přenos do běžné technické praxe může být omezený. V této práci proto byly DLC povlaky hodnoceny v běžných laboratorních podmínkách, kde se relativní vlhkost pohybovala přibližně mezi 20–30 % a kontakt mohl být ovlivněn vlhkostí, kyslíkem i adsorpcí molekul z okolí. Tento aspekt je důležitý zejména u PEG400, který je hygroskopický, a může tedy do určité míry reagovat na vlhkost okolního prostředí.

Současně je nutné zohlednit, že okolní atmosféra nebyla aktivně řízena a nebyl proveden chemický rozbor samotných povlaků. Nebyl tedy stanoven přesný obsah vodíku ani poměr sp^2/sp^3 vazeb u jednotlivých DLC vrstev. Použité povlaky však představují komerčně dostupné vrstvy, u nichž lze předpokládat stabilní a opakovatelný výrobní proces. Přesto může každý výrobce produkovat mírně odlišný typ daného povlaku, například z hlediska obsahu vodíku, vnitřní struktury, drsnosti nebo podílu sp^2/sp^3 vazeb. Tyto vlastnosti přitom mohou ovlivnit reaktivitu povrchu, pasivaci, tvorbu mezní vrstvy i stabilitu nízkého tření [4; 8; 18]. Výsledky proto nelze chápat jako izolované působení samotného maziva nebo aditiva, ale jako odezvu konkrétního komerčního systému v běžných laboratorních podmínkách.

Testované kombinace byly zvoleny jako perspektivní systémy na základě rešerše a zaměření práce. Výsledky proto platí především pro vybrané nedopované DLC povlaky, maziva a směsi s mastnými kyselinami. Nelze je automaticky přenášet na DLC povlaky s dopováním nebo jiným obsahem vodíku, protože tyto parametry mohou zásadně ovlivnit reakci povrchu s mazivem.

6.3 Směry budoucího výzkumu

Další výzkum by měl být zaměřen především na přímé ověření mechanismů, které byly v této práci hodnoceny nepřímě. Vhodné by bylo doplnit chemickou a strukturní analýzu otěrových stop pomocí Ramanovy spektroskopie nebo XPS. Tyto metody by umožnily určit, zda snížení tření souviselo s grafitizací, oxidací, adsorpcí mastných kyselin, mechanochemickou fragmentací maziva nebo pouze se změnou kontaktní geometrie vlivem opotřebení. To je důležité zejména u ta-C, kde může být nízké tření doprovázeno výraznějším opotřebením [5; 9; 16; 25].

V návaznosti na optické pozorování by měl být rozšířen reologický a smáčivostní popis maziv. Viskozitu směsí je vhodné měřit při více teplotách a smykových rychlostech a doplnit měření kontaktního úhlu na a-C:H a ta-C povlacích. Propojení viskozity, smáčivosti a opticky vyhodnocené tloušťky filmu by pomohlo určit, zda je tvorba filmu řízena hlavně vlastnostmi maziva, nebo interakcí maziva s povrchem [7; 14].

Dalším směrem je přesnější určení mazacího režimu, například pomocí lambda poměru. K tomu je nutné propojit tloušťku filmu, viskozitu, rychlost, zatížení a drsnost obou povrchů [5; 18]. Současně by bylo vhodné zlepšit ustavení optické aparatury pro sledování mazacího filmu, aby bylo možné přesněji zachovat polohu kontaktu mezi třecím testem a optickým pozorováním. To by umožnilo ověřit, zda se při testech v konfiguraci pin-on-plate nevytváří vlivem opotřebení taková kontaktní geometrie, která sama podporuje vtahování maziva, snižuje kontaktní tlak a přispívá k výslednému mazacímu účinku. Tento aspekt je důležitý zejména u systémů s vyšším opotřebením, kde může změna kontaktní plochy ovlivnit nejen tlakové poměry, ale také výslednou hodnotu COF.

6.4 Verifikace hypotéz

Otázka 1:

Jak mastné kyseliny jako aditiva v základovém mazivu ovlivňují režim mezného mazání u nedopovaných DLC povlaků?

Zkrácení hypotézy 1

„Mastné kyseliny přidané do PEG400 mohou ovlivnit mezné mazání DLC povlaků tvorbou mezné vrstvy během intervalu záběhu. Tento předpoklad vychází z toho, že nízké tření u DLC není dáno pouze samotným povlakem, ale také interakcí mezi povrchem, mazivem a podmínkami v kontaktu [9; 4]. U polárních maziv, jako je PEG, může docházet k tvorbě stabilnější mezní vrstvy při nízkých rychlostech [15; 7]. Přídavek mastných kyselin může tento efekt dále měnit díky polární funkční skupině a uhlovodíkovému řetězci, které mohou podporovat adsorpci a snížení smyku v rozhraní [16; 17].“

ČÁSTEČNĚ POTVRZENO

Vliv mastných kyselin se neprojevil jednoznačně ve všech testovaných režimech. V čistém posuvně-vratném skluzu nebyly u kombinací s DLC pozorovány výrazné rozdíly v COF ani v opotřebení oproti čistému PEG400. Přídavek kyselin se tedy v tomto režimu neprojevil jako hlavní faktor, který by systematicky snižoval tření nebo opotřebení.

Výraznější vliv byl pozorován ve valivě-skluzovém kontaktu se $SRR = 20 \%$, zejména u kombinace 100Cr6/a-C:H, kde směsi PEG400 s kyselinou stearovou a palmitovou vedly k nižším hodnotám COF. U 100Cr6/ta-C byl tento efekt méně jednoznačný a více závisel na konkrétní kyselině a teplotě. Optické pozorování zároveň ukázalo, že některé směsi PEG400 s mastnými kyselinami, zejména palmitovou a stearovou, vytvářely výraznější pozorovatelný film, ale samotná tvorba filmu neznamenal automaticky nejlepší celkové tribologické chování.

Mastné kyseliny mohou ovlivnit třecí chování a tvorbu mazací vrstvy, ale jejich účinek závisel na typu DLC povlaku, konkrétní kyselině a kinematice kontaktu. V čistém skluzu se jejich přínos neprojevil výrazně, zatímco ve valivě-skluzovém kontaktu byl patrný hlavně u a-C:H.

Otázka 2:

Jak zvýšení provozní teploty ovlivní součinitel tření v mezném až smíšeném režimu mazání?

Hypotéza 2

„Teplota může ovlivnit třecí chování v mezném až smíšeném režimu mazání změnou viskozity maziva a podmínek pro tvorbu mezní vrstvy. Vyšší teplota může v některých případech podporovat adsorpci nebo tribochemickou aktivitu povrchu [12]. Současně však snižuje viskozitu maziva, což může omezit únosnost mazacího filmu a zvýšit podíl přímého kontaktu asperit [5]. Lze proto předpokládat, že vliv teploty nebude samostatný, ale projeví se až v kombinaci s konkrétním mazivem, typem DLC povlaku a provozními podmínkami [4; 6].“

ČÁSTEČNĚ POTVRZENO

Vliv teploty nebyl tak výrazný, jak bylo původně předpokládáno. Porovnání RT a 60 °C bylo provedeno pouze u valivě-skluzového kontaktu na zařízení MTM. Zvýšení teploty nevedlo k obecnému poklesu COF. U některých kombinací se tření snížilo, u jiných zůstalo podobné nebo se zvýšilo. Například u 100Cr6/ta-C vedlo PAO6 při 60 °C po záběhu ke snížení COF, zatímco PEG400 s kyselinou palmitovou vedl naopak k jeho nárůstu.

Stribeckovy křivky zároveň neukázaly výrazný pokles ani nárůst COF se změnou rychlosti, což naznačuje, že se kontakt ve sledovaném rozsahu rychlostí neposouval výrazně do jiného mazacího režimu, ale zůstával převážně v oblasti mezného až smíšeného mazání. U kombinací s a-C:H byly hodnoty COF obecně nižší než u ta-C, zatímco ta-C byl citlivější na volbu maziva a částečně i na teplotu.

Teplota třecí chování ovlivnila, ale nebyla samostatným rozhodujícím faktorem. Její účinek se projevil až v kombinaci s konkrétním mazivem, typem DLC povlaku a podmínkami kontaktu.

Otázka 3:

Jaký má vliv počáteční povrchová drsnost na dosažení nízkého součinitele tření při mezném mazání?

Hypotéza 3

„Počáteční povrchová topografie DLC povlaků může ovlivnit průběh intervalu záběhu, tvorbu mazací vrstvy a výsledné tření. Nižší drsnost by měla podporovat rovnoměrnější rozložení kontaktního tlaku, menší podíl přímého kontaktu asperit a snazší vytvoření souvislejší mazací vrstvy [18]. Naopak vyšší drsnost může vést k vyšším lokálním tlakům, narušování mazací vrstvy a zvýšenému opotřebení [4]. Tento efekt může být rozdílný pro a-C:H a ta-C, protože oba povlaky se liší strukturou, obsahem vodíku a povrchovou reaktivitou [3].“

ČÁSTEČNĚ POTVRZENO / NEPŘÍMO OVĚŘENO

Hypotéza nebyla ověřena přímým systematickým porovnáním více úrovní počáteční drsnosti, protože hlavní experimentální část byla zaměřena převážně na hladší povrchy. Přímé potvrzení vlivu počáteční drsnosti proto není možné. Výsledky však nepřímo ukázaly, že změna topografie během testu měla významný vliv na interpretaci COF i opotřebení.

U kombinace a-C:H/a-C:H byly změny topografie malé a současně bylo dosaženo nejnižšího opotřebení. Naopak u kombinací s ta-C, zejména ta-C/ta-C, docházelo k výrazně vyššímu opotřebení a změně kontaktní geometrie, přestože v některých případech COF po záběhu klesal. To ukazuje, že stabilní povrch a nízké opotřebení jsou pro hodnocení systému stejně důležité jako samotná hodnota tření. U některých kombinací mohlo vyšší opotřebení zvětšit kontaktní plochu a snížit kontaktní tlak, takže pokles COF nemusel být dán pouze lepším mazáním.

Práce neověřila vliv více počátečních drsností, ale prokázala, že vývoj topografie během testu, změna kontaktní plochy a opotřebení zásadně ovlivňují třecí odezvu. Pro přímé potvrzení hypotézy by bylo nutné doplnit systematické testy na více úrovních počáteční drsnosti.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá experimentálním studiem tribologického chování DLC povlaků v podmínkách mezného až smíšeného režimu mazání. Hlavní pozornost je věnována vlivu mastných kyselin jako aditiv do základového maziva PEG400, typu DLC povlaku, provozní teploty a změny topografie povrchu na součinitel tření, opotřebení a formování mazacího filmu. Koncept superlubricity je v práci využit jako vymezení oblasti, ke které tato práce přispívá snahou o snížení tření v mezném až smíšeném režimu mazání a rozšířením provozních podmínek s nízkým součinitelem tření, přičemž zejména maziva PEG400 a glycerol umožňují dosažení superlubricity v kapalinovém režimu.

Tribologické experimenty proběhly na třech tribologických zařízeních. RTEC SMT-5000 sloužil pro hodnocení čistého posuvně-vratného skluzu, PCS MTM pro sledování vlivu rychlosti a teploty ve valivě-skluzovém kontaktu a UMT Bruker pro propojení třecí odezvy s optickým pozorováním mazacího filmu. Přínosem těchto konfigurací je porovnání stejných materiálových a mazacích systémů s odlišnou kinematikou pohybu. Ukázalo se, že maziva a aditiva neovlivňují stejně efektivně tření při čistém skluzu a při valení se skluzem, protože jejich chování závisí na kontaktní kinematice a schopnosti vytvářet mazací vrstvu. Pro tyto konfigurace nebyly hodnoceny pouze výsledky tření, ale také opotřebení, změny topografie a formování mazacího filmu. Tímto přístupem bylo možné popsat vliv kinematiky bodových kontaktů a pochopit rozdíly ve funkci mastných kyselin ve vztahu k DLC povlakům s ohledem na tření, opotřebení a změny topografie povrchu.

Výsledky ukázaly, že přídavek mastných kyselin do PEG400 nevedl k univerzálnímu zlepšení tribologického chování. V čistém posuvně-vratném skluzu nebyl jejich vliv na tření jednoznačně průkazný. Výraznější účinek byl pozorován ve valivě-skluzovém kontaktu, zejména u kombinace 100Cr6/a-C:H, kde směsi s mastnými kyselinami přispěly k výraznému snížení tření až o 60 % oproti samotnému PEG400.

Z hlediska typu DLC povlaku se jako stabilnější systém projevuje vodíkový a-C:H. V čistém posuvně-vratném skluzu dosahuje kombinace a-C:H/a-C:H oproti bezvodíkové kombinaci ta-C/ta-C přibližně o dva řády nižšího opotřebení, až na úroveň 10^{-9} mm³/N·m. Tento rozdíl ukazuje na význam vodíku v povlaku, který dokáže stabilizovat kontaktní oblast.

Hlavní poznatky práce lze shrnout následovně:

- Mastné kyseliny v PEG400 nevedou k univerzálnímu snížení tření, kdy jejich funkce závisí na typu povlaku a kinematice kontaktu.
- Kinematická konfigurace kontaktu má výrazný vliv na výsledné chování jednotlivých kombinací povlaku a maziva, protože stejné mazivo nevykazuje stejnou funkci při čistém skluzu a při valení se skluzem.

- Ve valivě-skluzovém kontaktu snižují směsi s mastnými kyselinami u kombinace 100Cr6/a-C:H tření až o 60 % oproti čistému PEG400.
- Zvýšení provozní teploty směsí s mastnými kyselinami na 60 °C se neproказuje jako primární faktor vedoucí k výraznému snížení tření, jelikož snížení součinitele tření dosahovalo pouze 10 % a zároveň nedošlo k výraznému zvýšení drsnosti povrchu nad 20 %.
- Optické pozorování umožnilo přímo zachytit rozdíly ve formování mazacího filmu mezi jednotlivými mazivy a doplnilo tribologická data o důležitou informaci z kontaktní oblasti.

Navazující výzkum by se mohl zaměřit na chemickou analýzu otěrových stop a povrchových vrstev vzniklých během testu. Dále by mohla být navržena možná zlepšení optického pozorování mazacího filmu, včetně rozšíření o měření smáčivosti či teplotní závislosti viskozity maziv. Přínosné by bylo dále ověřit perspektivní kombinace s povlakem a-C:H ve valivě-skluzovém režimu a doplnit je o vzorky s vyšší počáteční drsností. Další měření by se mohla zaměřit na užší výběr směsí PEG400 s olejovou, palmitovou a stearovou mastnou kyselinou, které v této práci vykazovaly nejvýraznější vliv na tření. U těchto směsí by bylo vhodné podrobněji ověřit citlivost na změnu kontaktního tlaku a rychlosti pohybu, aby bylo možné přesněji určit rozsah provozních podmínek, ve kterých daná kombinace DLC povlaku a maziva dosahuje nejpriznivějšího tribologického chování.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Jedním z výstupů této diplomové práce je připravený rukopisu, který bude dále sloužit jako podklad odborného článku určeného k publikování v odborném časopise.

Název článku:

Effect of Polyethylene Glycol and Fatty Acid Additives on the Friction, Wear and Lubricant Film Formation of DLC Coatings under Boundary-to-Mixed Lubrication

Autoři:

Bc. Michael Koutný, Ing. Petr Šperka Ph.D.

Abstrakt (EN):

Low friction and wear reduction in DLC-coated contacts strongly depend on lubricant chemistry, coating structure and contact kinematics, especially under boundary-to-mixed lubrication. This study investigates a-C:H and ta-C coatings lubricated with PEG400 and PEG400 modified with 5 wt.% palmitic, oleic, stearic and boric acid. The coatings were tested in three configurations: reciprocating pure sliding, rolling/sliding contact at 20% SRR and reciprocating sliding with optical lubricant film observation.

Fatty acid additives did not provide a universal reduction in friction or wear. Their effect was weak in pure sliding but more pronounced in rolling/sliding contact, particularly for 100Cr6/a-C:H, where PEG400 with stearic and palmitic acid reduced friction. The a-C:H coating showed more stable friction, lower wear and smaller topographical changes than ta-C. In contrast, ta-C was more sensitive to lubricant composition and run-in, and friction reduction was sometimes accompanied by increased wear and contact geometry changes. Increasing the temperature to 60 °C did not generally decrease friction. Optical observation showed different film-forming behaviour among lubricants, but film thickness alone did not explain the tribological response. The results show that DLC-lubricant systems must be evaluated by combining friction, wear, surface topography and lubricant film formation rather than by coefficient of friction alone.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SAMIEE, Mohsen; SEYEDRAOUFI, Zahra-Sadat; ABBASI, Mehrdad; ESHRAGHI, Mohammad Javad a ABOUEI, Vahid. Scientometric Study of Diamond-Like Carbon Coatings as Wear-Resistant Coatings. Online. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023, roč. 34, č. 1, s. 83-91. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-09022-w>. [cit. 2026-05-17].
- [2] ERDEMIR, Ali. Genesis of superlow friction and wear in diamondlike carbon films. Online. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 11-12, s. 1005-1012. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.07.018>. [cit. 2025-04-27].
- [3] YIN, Xuan; MU, Linyuan; JIA, Zihang; PANG, Haosheng; CHAI, Chunpeng et al. Nanostructure of Superlubricating Tribofilm Based on Friction-Induced a-C: H Films under Various Working Conditions: A Review of Solid Lubrication. Online. *Lubricants*. 2024, roč. 12, č. 2. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants12020040>. [cit. 2025-04-27].
- [4] YU, Qingyuan; CHEN, Xinchun; ZHANG, Chenhui a LUO, Jianbin. Influence Factors on Mechanisms of Superlubricity in DLC Films: A Review. Online. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020, roč. 6. ISSN 2297-3079. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00065>. [cit. 2025-04-27].
- [5] MAKOWSKI, Stefan; SCHALLER, Frank; WEIHNACHT, Volker; ENGLBERGER, Gregor a BECKER, Michael. Tribochemical induced wear and ultra-low friction of superhard ta-C coatings. Online. *Wear*. 2017, roč. 392-393, s. 139-151. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.08.015>. [cit. 2025-04-20].
- [6] CHEN, Xinchun; YIN, Xuan; QI, Wei; ZHANG, Chenhui; CHOI, Junho et al. Atomic-scale insights into the interfacial instability of superlubricity in hydrogenated amorphous carbon films. Online. *Science Advances*. 2020, roč. 6, č. 13. ISSN 2375-2548. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1272>. [cit. 2025-04-27].
- [7] LIN, Yanfei; LIU, Xiaoqiang; YANG, Jun a ZHANG, Xinghua. Solid/liquid hybrid lubrication behaviors of amorphous carbon film coupling with nonpolar and polar base oils. Online. *Diamond and Related Materials*. 2024, roč. 149. ISSN 09259635. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111646>. [cit. 2025-04-20].

- [8] ZAHID, Rehan; HASSAN, Masjuki Bin Haji; VARMAN, Mahendra; MUFTI, Riaz Ahmad; KALAM, Md. Abul et al. A Review on Effects of Lubricant Formulations on Tribological Performance and Boundary Lubrication Mechanisms of Non-Doped DLC/DLC Contacts. Online. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2016, roč. 42, č. 4, s. 267-294. ISSN 1040-8436. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10408436.2016.1186599>. [cit. 2025-04-27].
- [9] ERDEMIR, Ali a ERYILMAZ, Osman. Achieving superlubricity in DLC films by controlling bulk, surface, and tribochemistry. Online. *Friction*. 2014, roč. 2, č. 2, s. 140-155. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-014-0055-1>. [cit. 2024-10-09].
- [10] BJÖRLING, Marcus a SHI, Yijun. DLC and Glycerol: Superlubricity in Rolling/Sliding Elastohydrodynamic Lubrication. Online. *Tribology Letters*. 2019, roč. 67, č. 1. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1135-1>. [cit. 2025-04-27].
- [11] ZENG, Qunfeng a ZHANG, Wenling. A Systematic Review of the Recent Advances in Superlubricity Research. Online. *Coatings*. 2023, roč. 13, č. 12. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings13121989>. [cit. 2025-04-27].
- [12] MOBARAK, H.M.; MASJUKI, H.H.; MOHAMAD, E. Niza; KALAM, M.A.; RASHEDUL, H.K. et al. Tribological properties of amorphous hydrogenated (a-C:H) and hydrogen-free tetrahedral (ta-C) diamond-like carbon coatings under jatropa biodegradable lubricating oil at different temperatures. Online. *Applied Surface Science*. 2014, roč. 317, s. 581-592. ISSN 0169-4332. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.168>. [cit. 2025-11-16].
- [13] LONG, Yun; BOUCHET, Maria-Isabel De Barros; LUBRECHT, Ton; ONODERA, Tasuku a MARTIN, Jean Michel. Superlubricity of glycerol by self-sustained chemical polishing. Online. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42730-9>. [cit. 2025-09-30].
- [14] AMANN, Tobias; KAILER, Andreas; OBERLE, Natalie; LI, Ke; WALTER, Michael et al. Macroscopic Superlow Friction of Steel and Diamond-Like Carbon Lubricated with a Formanisotropic 1,3-Diketone. Online. *ACS Omega*. 2017, roč. 2, č. 11, s. 8330-8342. ISSN 2470-1343. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01561>. [cit. 2025-04-27].

- [15] KANO, Makoto. Green Superlubrication by Hydrogen-Free Amorphous Carbon with Human Friendly Lubricants. Online. *Sensors and Materials*. 2017, s. 771. ISSN 0914-4935. Dostupné z: <https://doi.org/10.18494/sam.2017.1630>. [cit. 2026-04-27].
- [16] LONG, Yun; GALIPAUD, Jules; WEIHNACHT, Volker; MAKOWSKI, Stefan; MARTIN, Jean Michel et al. Achieving superlubricity using selected tribo-pairs lubricated by castor oil and unsaturated fatty acids. Online. *Tribology International*. 2022, roč. 169, s. 107462. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107462>. [cit. 2026-04-27].
- [17] MA, Kailing; KOU, Yuanli; ZHANG, Guangan; SHANG, Lunlin; CHEN, Lin et al. Effect of doping elements on the tribological behavior and mechanism of diamond-like carbon film under oleic acid lubrication. Online. *Diamond and Related Materials*. 2025, roč. 159, s. 112921. ISSN 0925-9635. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112921>. [cit. 2026-04-27].
- [18] WANG, Yinhui; DENG, Wenli; CHEN, Xinchun; QI, Wei; ZHANG, Chenxi et al. The effect of roughness level of a-C:H films on its tribological behaviors rubbing against steel and self-mated materials. Online. *Tribology International*. 2023, roč. 187, s. 108754. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108754>. [cit. 2026-04-27].
- [19] BRUKER. *3D Optical Profiler ContourGT-X*. Online. BRUKER. Correlating Advanced 3D Optical Profiling Surface Measurements to Traceable Standards. 2016. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/3d-optical-profilers/resource-library/an-558-correlating-advanced-3d-optical-profiling-surface-measurements-to-traceable-standards.html>. [cit. 2025-11-02].
- [20] RTEC INSTRUMENTS. *Indentation and Scratch Tester SMT-5000*. Online. RTEC INSTRUMENTS. Indentation and Scratch Tester SMT-5000. 2024. Dostupné z: <https://rtec-instruments.com/indentation-and-scratch-testers/indentation-and-scratch-tester-smt-5000/>. [cit. 2025-11-02].
- [21] BRUKER. *UMT TriboLab*. Online. BRUKER. Bruker. 2026. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/test-and-measurement/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab.html>. [cit. 2026-05-10].

- [22] PCS INSTRUMENTS. *MTM*. Online. PCS INSTRUMENTS. PCS Instruments. 2026. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/instruments/mtm/>. [cit. 2026-05-10].
- [23] YOSHIDA, Kentaro; HORIUCHI, Takahiro; KANO, Makoto a KUMAGAI, Masao. Or0404—Effect of a Tribochemical Reacted Film on Friction and Wear Properties of DLC Coatings. Online. *Plasma Processes and Polymers*. 2009, roč. 6, č. S1. ISSN 1612-8850. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ppap.200930405>. [cit. 2025-11-16].
- [24] KANO, M a YOSHIDA, K. Ultra Low Friction of DLC Coating with Lubricant. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010, roč. 258, s. 012009. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/258/1/012009>. [cit. 2026-05-21].
- [25] KUWAHARA, Takuya; ROMERO, Pedro A.; MAKOWSKI, Stefan; WEIHNACHT, Volker; MORAS, Gianpietro et al. Mechano-chemical decomposition of organic friction modifiers with multiple reactive centres induces superlubricity of ta-C. Online. *Nature Communications*. 2019, roč. 10, č. 1. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08042-8>. [cit. 2026-05-18].

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka / symbol	Jednotky	Význam
DLC	—	Diamond-Like Carbon, diamantový uhlíkový povlak
a-C	—	amorfní uhlík
a-C:H	—	hydrogenovaný amorfní uhlík
ta-C	—	tetraedrální amorfní uhlík
ta-C:H	—	hydrogenovaný tetraedrální amorfní uhlík
Si-DLC	—	DLC povlak dopovaný křemíkem
W-DLC	—	DLC povlak dopovaný wolframem
DLC/DLC	—	kontakt dvou DLC povlaků
sp ²	—	typ hybridizace uhlíku, grafitická vazba
sp ³	—	typ hybridizace uhlíku, diamantová vazba
COF	—	součinitel tření
μ	—	součinitel tření
λ	—	parametr mazacího režimu / poměr tloušťky filmu k drsnosti povrchu
Sq	nm	plošná střední kvadratická drsnost povrchu
Ra	nm / μm	aritmetická střední drsnost povrchu
h	nm	tloušťka mazacího filmu
F	N	síla

Zkratka / symbol	Jednotky	Význam
Fn	N	normálová síla
Fx	N	třecí síla ve směru pohybu
p	MPa / GPa	kontaktní tlak
T	°C	teplota
v	m/s	rychlost pohybu
SRR	%	poměr skluzu a valení
RH	%	relativní vlhkost
W	mm ³ /(N·m)	koeficient opotřebení
V	mm ³ / μm ³	objemový úbytek materiálu
s	m	kluzná dráha
t	s	čas
n	ot/min	otáčky za minutu
hm.%	%	hmotnostní procenta
wt.%	%	hmotnostní procenta
PEG	—	polyethylenglykol
PEG400	—	polyethylenglykol s molární hmotností přibližně 400 g/mol
PEG200	—	polyethylenglykol s molární hmotností přibližně 200 g/mol
PPG	—	polypropylenglykol

Zkratka / symbol	Jednotky	Význam
PPG200	—	polypropylenglykol s molární hmotností přibližně 200 g/mol
PAO	—	polyalfaolefin
PAO6	—	polyalfaolefinové základové mazivo
GMO	—	glycerol monooleát
CQDs	—	uhlíkové kvantové tečky
EHD	—	elastohydrodynamické mazání
EHL	—	elastohydrodynamické mazání
EP/AW	—	extreme pressure / anti-wear aditiva
ZDDP	—	zinek-dialkyldithiofosfát
MoDTC	—	molybden-dithiokarbamát
SMT-5000	—	tribometr pro reciproční testy čistého skluzu
UMT	—	Universal Mechanical Tester / tribometr Bruker UMT
MTM	—	Mini Traction Machine
RTEC	—	označení výrobce / typu tribologického zařízení
PRISMA	—	metodika / diagram výběru literárních zdrojů
XPS	—	rentgenová fotoelektronová spektroskopie
TOF-SIMS	—	hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů s časem letu
MKP	—	metoda konečných prvků

Zkratka / symbol	Jednotky	Význam
PLA	–	polylaktid, materiál použitý pro 3D tisk
CSV	–	datový soubor s hodnotami testů
H1, H2, H3	–	hypotézy práce
RT	°C	pokojová teplota
O ₂	–	molekulární kyslík
H ₂ O	–	voda
C–H	–	chemická vazba uhlík–vodík
C–O	–	chemická vazba uhlík–kyslík
C=O	–	karbonylová skupina
COOH	–	karboxylová skupina
OH	–	hydroxylová skupina

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<i>Obr. 1-1 Vývoj ročního počtu publikací zaměřených na DLC povlaky a jejich celkové rozdělení podle vědeckých časopisů, upraveno dle [1]</i>	11
<i>Obr. 2-1 PRISMA diagram výběru a validace literárních zdrojů</i>	14
<i>Obr. 2-2 Ternární diagram DLC povlaků [2]</i>	15
<i>Obr. 2-3 Průměrné hodnoty součinitele tření $a\text{-C:H}/a\text{-C:H}$ se základovými oleji, minerální olej (M), slunečnicový olej (SO), nasycený syntetický ester (A-III), nenasyčený syntetický ester (A-II), upraveno dle [8]</i>	17
<i>Obr. 2-4 Experimentální demonstrace režimu superlubricity pro $a\text{-C:H}$ film při rychlostech 1, 10 a 15 cm/s, prostředí vzduchu, pokojová teplota, kontaktní tlak 2,89 GPa [3]</i>	18
<i>Obr. 2-5 Testované povlaky; g) tření mezi identickými dvojicemi povrchů v suchých plynných atmosférách; h) tření mezi povlaky $a\text{-C:H}$ klouzajícími proti neupravené oceli v okolním vzduchu za účelem vyhodnocení vlivu vlhkosti [6]</i>	19
<i>Obr. 2-6 Míra opotřebení v prostředí s vlhkostí ve vzduchu a dusíku [2]</i>	20
<i>Obr. 2-7 Optické snímky znázorňující otěrové stopy na kuličce a otěrové dráhy na disku pro $a\text{-C:H}$ povlaky v různých prostředích [6]</i>	20
<i>Obr. 2-8 Míra opotřebení na základě 3D profilace opotřebených drah a hloubka opotřebení a měrné opotřebení při použití různých maziv [7]</i>	21
<i>Obr. 2-9 a) součinitel tření, b) opotřebení disku, c) opotřebení kuličky [5]</i>	21
<i>Obr. 2-10 Součinitel tření a tloušťka filmu při použití PEG a $a\text{-C}$ povlaku [7]</i>	23
<i>Obr. 2-11 Součinitel tření při použití glycerolu a parafínu při různých provozních podmínkách [10]</i>	23
<i>Obr. 4-1 Schéma postupu experimentální metodiky</i>	37
<i>Obr. 4-2 Zařízení Optický profilometr ContourGT-X [19] (vlevo) a schéma principu interferometrie (vpravo)</i>	38
<i>Obr. 4-3 Tribometr RTEC SMT-5000 [20]</i>	39
<i>Obr. 4-4 Zařízení UMT Bruker TriboLab [21]</i>	39
<i>Obr. 4-5 Přídavná optická aparatura pro sledování kontaktní oblasti na tribometru UMT Bruker</i>	40
<i>Obr. 4-6 Zařízení Mini Traction Machine od PCS Instruments [22]</i>	41
<i>Obr. 4-7 Magnetická míchačka (vlevo) a laboratorní váha (vpravo)</i>	48

<i>Obr. 4-8 Příklad vyhodnocení počáteční topografie povrchu před tribologickým testem: povrch a-C:H povlaku (vlevo) a vymezená kontaktní oblast na kuličce s povlakem a-C:H (vpravo)</i>	49
<i>Obr. 4-9 Schéma zpracování dat součinitele tření v softwaru MATLAB.....</i>	50
<i>Obr. 4-10 Vizualizace postupu při vyhodnocení materiálového úbytku materiálu</i>	51
<i>Obr. 4-11 Škála pro vyhodnocení tloušťky mazacího filmu a snímky optické snímků kontaktní oblasti v krajních polohách a ve středu třecí dráhy</i>	52
<i>Obr. 5-1 Finální konstrukční varianta deformačního členu a průběh normálové síly (0,5 N) při ověřovacím měření na zařízení SMT-5000</i>	54
<i>Obr. 5-2 Schéma konfigurace předběžného optického pozorování mazacího filmu na zařízení SMT-5000</i>	55
<i>Obr. 5-3 Součinitel tření vybraných materiálových kombinací DLC povlaků při použití čistých a aditivovaných maziv před a po záběhu. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy</i>	57
<i>Obr. 5-4 Změna plošné drsnosti Sq na kuličce u vybraných materiálových kombinací DLC povlaků před a po třecím testu. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy.</i>	59
<i>Obr. 5-5 Opatření na kuličce u vybraných materiálových kombinací DLC povlaků při použití čistých a aditivovaných maziv. Panely: a) 100Cr6/a-C:H, b) 100Cr6/ta-C, c) a-C:H/a-C:H, d) ta-C/ta-C, e) ta-C/a-C:H s čistými mazivy, f) ta-C/a-C:H s aditivovanými mazivy.....</i>	61
<i>Obr. 5-6 Součinitel tření při RT a 60 °C pro kombinace 100Cr6 s DLC povlaky a-C:H (a) a ta-C (b) před záběhem a po záběhu</i>	63
<i>Obr. 5-7 Změna topografie povrchu kuličky při RT a 60 °C pro kombinace 100Cr6 s DLC povlaky a-C:H (a) a ta-C (b) před a po záběhu.</i>	65
<i>Obr. 5-8 Stribeckovy křivky před a po záběhu pro povlak a-C:H při RT (a) a 60 °C (b) ..</i>	66
<i>Obr. 5-9 Stribeckovy křivky před a po záběhu pro povlak ta-C při RT (a) a 60 °C (b)</i>	67
<i>Obr. 5-10 Korelace součinitele tření mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker na začátku testu (a), na konci testu (b) a pro průměrnou hodnotu COF (c)</i>	69
<i>Obr. 5-11 Součinitel tření směsí PEG400 s vybranými kyselinami na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) před záběhem a po záběhu.....</i>	70
<i>Obr. 5-12 Korelace drsnosti kuličky po testu mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker.</i>	71
<i>Obr. 5-13 Změna drsnosti povrchu po testování na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) při použití směsí PEG400 s vybranými kyselinami</i>	72

<i>Obr. 5-14 Korelace opotřebení na kuličce mezi zařízeními SMT-5000 a UMT Bruker</i>	73
<i>Obr. 5-15 Míra opotřebení na kuličce po testování na zařízení UMT Bruker pro kontakty 100Cr6/a-C:H (a) a 100Cr6/ta-C (b) při použití směsí PEG400 s vybranými kyselinami</i>	74
<i>Obr. 5-16 Vybrané snímky tloušťky mazacího filmu pro statický kontakt a pro rychlost 20 mm·s⁻¹ během prvního cyklu pro jednotlivá maziva a směsi.....</i>	75
<i>Obr. 5-17 Dynamická viskozita použitých maziv a směsí s aditivou</i>	76
<i>Obr. 5-18 Průměrná opticky vyhodnocená tloušťka mazacího filmu ve statických úvratích (a) a při pohybu rychlostí 20 mm·s⁻¹ (b) pro kontakty 100Cr6/a-C:H a 100Cr6/ta-C na zařízení UMT Bruker.....</i>	77

12 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Fyzikální a reologické vlastnosti maziv PEG200 a PPG200 [7]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 2-2 Fyzikální a reologické vlastnosti glycerolu [5].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 2-3 Fyzikální a reologické vlastnosti parafinového oleje [7]</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 4-1 Přehled připravených vzorků s DLC povlaky.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4-2 Přehled použitých materiálů a jejich vybraných vlastností</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4-3 Přehled použitých maziv bez aditiv.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4-4 Přehled aditiv použitých pro přípravu mazacích směsí</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 4-5 Přehled vybraných studií použitých při návrhu provozních podmínek</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 4-6 Přehled provozních podmínek použitých při experimentálních měřeních</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 4-7 Přehled broušených vzorků pro následné povlakování DLC povlaky.....</i>	<i>47</i>

13 SEZNAM PŘÍLOH