

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Záběhová fáze povlakovaných třecích dvojic

Running-in phase of coated friction pairs

AUTOR: František Švehla

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.

PRAHA 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma: Záběhová fáze povlakovaných třecích dvojic vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Cvrčka, Ph.D a Ing. Matěje Buřila. Dále prohlašuji, že jsem práci vypracoval pomocí legálního programového vybavení a že jsem uvedl veškeré použité zdroje informací.

František Švehla

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Švehla** Jméno: **František** Osobní číslo: **473698**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Záběhová fáze povlakovaných třecích dvojic

Název bakalářské práce anglicky:

Running-in phase of coated friction pairs

Pokyny pro vypracování:

Záběhová fáze povlaků zásadně ovlivňuje celkovou životnost tribologických systémů. Cílem práce bude detailně zmapovat třecí mechanismus mezi dvěma povlakovanými částmi v odlišném pracovním prostředí.

Postup:

1. Literární rešerše
2. Návrh a příprava vhodného povlaku pro třecí dvojici
3. Provedení a vyhodnocení tribologických testů na vzduchu a v oleji
4. Diskuze a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOLMBERG, K. a A. MATTHEWS. Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering. 2nd ed. Boston: Elsevier Science, c2009. Tribology and interface engineering series, 56. ISBN 9780444527509.
[2] BLAU, Peter J. On the nature of running-in. Tribology International [online]. 2005, 38(11-12), 1007-1012 [cit. 2020-04-29]. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.020. ISSN 0301679X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Matěj Buřil, ústav materiálového inženýrství FS


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

28.4.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Ladislavu Cvrčkovi, Ph.D a Ing. Matějovi Buřilovi za pomoc, odborné vedení a cenné rady.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá třením a otěrem DLC povlaků během záběhové fáze. Teoretická část je věnována problematice povlakování a tribologii. Praktická část se zabývá vyhodnocením záběhové fáze povlaků na vzduchu a v čistém PAO oleji.

Klíčová slova

Tribologie; záběhová fáze; DLC; PAO; třecí dvojice

Abstract

The bachelor's thesis deals with the friction and wear of DLC coatings during the running-in phase. In the theoretical part, the coating methods and the tribology are described. In the practical part, the running-in phase of coatings in air and in pure PAO oil is described.

Keywords

Tribology; Running-in; DLC; PAO, Friction pair

Zkratky

DLC – diamond-like carbon

PAO – polyalfaolefin

CCD - charge-coupled device

PVD - physical vapor deposition

CVD – chemical vapor deposition

PACVD - plasma assisted chemical vapour deposition

ZDDP - zinc dialkyldithiophosphates

Obsah

1.	Úvod.....	7
2.	Teoretická část	8
2.1	Tribologie	8
2.1.1	Tribochemie	8
2.1.2	Tření	9
2.1.3	Opotřebení	10
2.1.4	Maziva	12
2.1.5	Kluzné dvojice	12
2.1.6	Záběhová fáze	13
2.1.7	Testování mechanických vlastností povlaků.....	14
2.2	Metody povlakování.....	17
2.2.1	PVD (Physical Vapor Deposition)	17
2.2.2	Třecí dvojice DLC – DLC.....	21
3.	Experimentální část.....	24
3.1	Příprava vzorků.....	24
3.2	Mechanické vlastnosti povlaku	24
3.2.1	Stanovení tloušťky povlaku.....	24
3.2.2	Adheze povlaku	26
3.3	Tření a opotřebení	27
3.3.1	Metoda „Pin-on disk“	27
3.3.2	Na vzduchu	28
3.3.3	V čistém PAO oleji	30
3.3.4	Porovnání záběhové fáze na vzduchu a v PAO oleji	31
4.	Závěr	38

Úvod

Zvyšující se nároky na ekologii a ekonomiku provozu vyžadují čím dál větší požadavky na životnost a odolnost strojírenských součástí. Jednou z možností, jak vyhovět těmto požadavkům, je použití tvrdých otěruvzdorných povlaků, které mohou snížit ztráty při tření a zvýšit odolnosti vůči opotřebením. Pro dlouhodobé fungování povlakovaných částí je rozhodující záběhová fáze. Přesto se detailnímu porozumění dějů probíhajících při záběhu nevěnuje náležitá pozornost. Změny tření, teploty a míry opotřebením lze často pozorovat ihned na začátku posuvného pohybu a to mezi novými povrchy, které jsou neopotřebené.

Při záběhu jsou menší kontaktní plochy, tudíž jsou i větší tlaky a hrozí snížení životnosti povrchu nebo degradace povlaku v počáteční fázi záběhu.

Jednou z variant tribologických povlaků, které se osvědčily v širokém spektru průmyslových aplikací, jsou tvrdé otěruvzdorné povlaky DLC (diamond-like carbon) nebo jejich modifikace. Využívají se například na nástroje pro třískové obrábění nebo na nástroje pro tváření za studena. Uplatňují se i v automobilovém průmyslu, kde pomáhají zvýšit životnost dílů. Také nacházejí uplatnění v medicíně jako biomateriály [1], [2].

Cílem této bakalářské práce je popsat děje a průběh záběhové fáze během vzájemného tření povlakovaných dvojic. Pro experimenty byl vybrán povlak DLC, který bude testován v různých prostředích, na vzduchu a v čistém PAO (polyalfaolefin) oleji. Porovnán bude vliv těchto prostředí a zatěžovací síly na tření během záběhové fáze povlakovaných třecích dvojic.

2. Teoretická část

2.1 Tribologie

Tribologie je nauka o vědeckém výzkumu a technickém použití zákonitostí a poznatků pro vědní obory tření, opotřebení a mazání. Jde o vědu, která se zabývá určováním a změnou struktur a chování reálných přírodních a umělých tribologických systémů [3].

Pod pojmem tribologie budeme chápat interdisciplinární vědu, která se zabývá stavem a procesy v přirozených a umělých tribologických systémech a vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu [3].

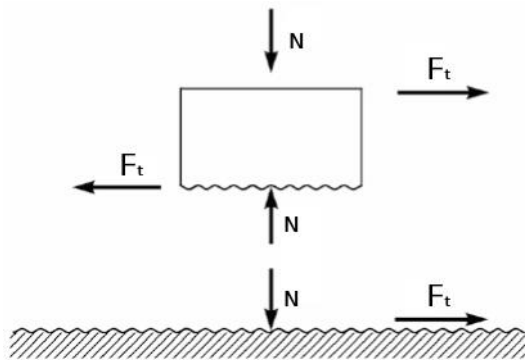
Uplatnění poznatků tribologie v praxi má vliv na snížení tření. Omezením tření se snižují materiálové ztráty vzniklé opotřebením strojních součástí a také energetické ztráty. To celé má velký vliv na ekonomii strojírenského provozu. V dalším důsledku to má vliv i na ekologii, protože se zvyšuje energetická účinnost stroje. V konečném důsledku se sníží i produkce emisí. Snížení opotřebení materiálů má i další ekologický i ekonomický význam. Není totiž nutné předčasně opotřebené část strojů nahrazovat novými [3], [4].

2.1.1 Tribochemie

Tribochemie obecně odkazuje na chemické jevy v tribologickém procesu, včetně chemických reakcí na kontaktních plochách mezi mazacími složkami a atmosférickými plyny. Tribochemická zkoumání jsou důležitá při odhalování mechanismů povrchových reakcí souvisejících s tribologií a při navrhování složení materiálů [5].

2.1.2 Tření

Tření je reakce vůči pohybu během skluzu nebo ovalování, k níž dochází, když se jedno těleso pohybuje tangenciálně vůči druhému, se kterým je v kontaktu. Tření není materiálová vlastnost, je to reakce. Třením vznikají ztráty



Obrázek 1 Pohyb tělesa po jiném tělese [6]

mechanické energie na začátku, v průběhu a na konci relativního pohybu navzájem se dotýkajících ploch. Tření je ve strojírenství určeno poměrem mezi třecí silou F_t a normálovou silou N a nazývá se součinitel tření f (obrázek 1). Třecí síla je součtem adhezní smykové síly a abrazivní rycí síly [3], [4], [6], [7].

Z hlediska funkce se dělí na:

- Tření jako žádoucí jev (např. brzdy, kolo a vozovka, třecí spojky).
- Tření jako nežádoucí jev, který snižuje účinnost mechanismů (valivá a kluzná ložiska, ozubené převody).

2.1.2.1 Hydrostatické tření

V hydrostatickém tření je mezi plochami dostatečně tlustý mazací film, který nese zátěž. Jeho tloušťka je udržována vnějším zdrojem tlaku (čerpadlo), které přivádí tekutinu mezi plochy. Z tohoto důvodu se tato tření často nazývají „zvenčí natlakovaná“. Vhodné jsou jak kapaliny, tak i plyny. Používají se v aplikacích s malým nebo žádným relativním pohybem mezi plochami, které se z různých důvodů nesmějí vzájemně dotýkat. Jeho nevýhodou je, že je potřeba čerpadlo na stlačení tekutiny [6], [7].

2.1.2.2 Hydrodynamické tření

Hydrodynamické tření vzniká, když se plochy pohybují v mazivu a mezi ně se protlačuje tenká vrstva maziva za pomoci viskózního strhávání. Tím vzniká tenký film mezi plochami. Tento film dokáže nést zatížení a nedochází

ke vzájemnému kontaktu ploch. Ovšem ke kontaktu dochází na začátku pohybu a na konci pohybu. Z Reynoldsova vztahu [8] vyplývá, že čím větší je vzájemná rychlost pohybu ploch, tím tlustší musí být mazací vrstva. To samé platí pro viskozitu [6], [7].

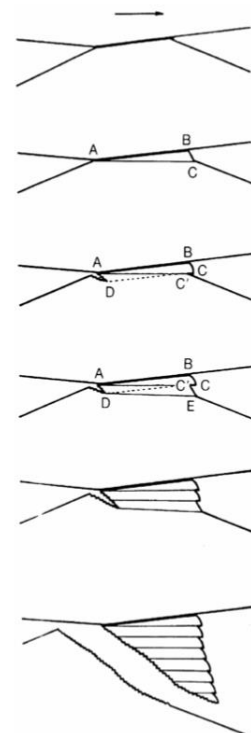
2.1.3 Opotřebení

Opotřebení je trvalý odběr materiálu z povrchu těles v důsledku jejich vzájemného pohybu nebo při pohybu média mezi nimi. Opotřebení není materiálová vlastnost. Neplatí vždy, že velikost tření je úměrná velikosti opotřebení. Příklady produktivního opotřebení je psaní tužkou, obrábění, leštění a holení, které vyžadují kontrolované opotřebení. Jinak je opotřebení nežádoucí téměř ve všech strojních aplikacích, jako jsou ložiska, těsnění, ozubená kola a vačky. Komponenty mohou potřebovat výměnu po odstranění relativně malého množství materiálu nebo pokud je povrch příliš zdrsňený.

V dobře navržených tribologických systémech je odstraňování materiálu velmi pomalý proces, ale je velmi stabilní a kontinuální. Opotřebení lze rozdělit na šest úplně odlišných typů, které mají společný jen úbytek materiálu z třecích ploch. Tyto typy jsou abraze, adheze, únava, eroze a náraz, chemický čili žíravý typ a opotřebení elektrickým obloukem. Dvě třetiny opotřebení připadá na abrazi a adhezi [3], [4], [6], [7].

2.1.3.1 Adhezní opotřebení

Adhezní opotřebení silně závisí na drsnosti povrchu. Nastává při kontaktu drsností dvou povrchů (obrázek 2). V místě styku dochází k pružné, ale i k plastické deformaci výstupků a nerovností, k porušení oxidační ochranné vrstvy a ke vzniku adhezních spojů, tzv. mikrosvarů. Při vzájemném pohybu jsou tyto svary stříhány a stávají se součástí druhého povrchu. Přitom dochází k vzájemné difúzi obou materiálů. Jak tření pokračuje, můžou se mikrosvary uvolnit z povrchu, na který byly přeneseny, a být přeneseny zpět na původní povrch. Ale mohou tvořit i volné částice, které opotřebovávají oba povrchy [3], [4], [6], [7], [9].

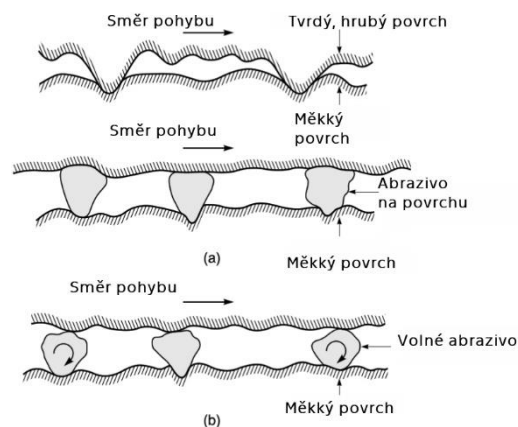


Obrázek 2 Schematické znázornění oddělení části materiálu, při adhezním opotřebení [6]

2.1.3.2 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení nastává, když tvrdší a drsnější povrch nebo tvrdé částice sklouznou po povrchu, který je měkkší a poškodí ho (obrázek 3).

U drsnějších povrchů dochází k zaklínění nerovností obou povrchů navzájem a k jejich odřezávání nebo k vyrývání rýh do měkkého materiálu. Při abrazivním opotřebení většinou nastávají dvě situace. V první situaci je tím tvrdším povrchem jeden z povrchů, například při mechanických operacích, jako je broušení, řezání a obrábění. Ve druhé situaci je tvrdým povrchem třetí těleso, obvykle malá částice abraziva, zachycená mezi dvěma dalšími povrchy. Ta je dostatečně tvrdá a je proto schopna otřít jeden nebo oba z protilehlých povrchů [3], [4], [6], [7].



Obrázek 3 Nahoře se tvrdší a drsnější materiál otírá o méně drsnější materiál. (a) Brusný kotouč. (b) abrazivo [6]

2.1.4 Maziva

Maziva jsou záměrně vpravována mezi funkční plochy těles za účelem nízkého tření a opotřebení. Maziva by měla být schopná vytvořit mezi povrchy souvislou vrstvu s dobrou přilnavostí a malým vnitřním třením. Měla by být chemicky stálá a nepůsobit korozivně na třecí plochy ani na další součásti (např. těsnění). Pojem „mazání“ se používá ve dvou různých situacích: tuhé mazání a tekuté mazání [6], [7], [10].

2.1.4.1 Tuhá maziva

Klíčovou charakteristikou tuhých maziv je to, že tyto pevné látky poskytují nízký součinitel tření díky jejich nízké odolnosti vůči stříhu, často spolu s jejich nízkou tvrdostí. Bylo identifikováno mnoho takových materiálů, ale z důvodů ochrany životního prostředí, zdraví a bezpečnosti osob se počet používaných životaschopných tuhých maziv snižuje. Patří mezi ně grafit, MoS₂ a nitridy boru. Účinnost tuhých maziv klesá s vyšší vlhkostí. Tuhá maziva se používají pro aplikace, ve kterých dochází ke kluznému styku, například kluzné ložisko pracující při vysokých zatíženích a nízkých rychlostech [6], [7], [10].

2.1.4.2 Tekutá maziva

Tekuté mazivo vytváří silný film mezi dvěma povrchy, které jsou v relativním pohybu, zabraňuje kontaktu ploch a může způsobit velmi nízké tření a zanedbatelné opotřebení. Tekutina může být kapalná nebo plynná. Mezi kapalná maziva patří minerální a syntetické oleje, ale může se použít i voda, například v čerpadlech. I silná vrstva vzduchu mezi dvěma pohyblivými povrchy je způsobem dobrého mazání [3], [4], [6], [7], [10].

2.1.5 Kluzné dvojice

Při kluzném vedení ve strojírenství vznikají kluzné dvojice, kde materiál jedné součásti klouže po materiálu druhé součásti [9]. Na kvalitu kluzu má vliv adheze mezi materiálem a povlakem na jeho povrchu, dále vzájemná afinita povrchů a parametry vnějšího prostředí.

Především máme adhezi, která vzniká chemickým nebo fyzikálním spojením mezi dvěma materiály, které jsou v kontaktu. Cílem je, aby adheze mezi povlakem a povlakovaným materiálem byla co největší. Potom máme vzájemnou afinitu materiálů povrchů, kterou můžeme chápat jako ochotu materiálu chemicky reagovat s druhým materiálem. Nově vznikající sloučeniny mohou mít pozitivní či negativní vliv na kvalitu kluzu. Mezi parametry vnějšího prostředí patří teplota a vlhkost. Protože se fyzikální vlastnosti materiálů v závislosti na změně teploty a vlhkosti mění, bude efekt skluzu také vnější teplotou a vlhkostí ovlivněn. Při vyhodnocování kluzných dvojic se zkoumá vzájemné opotřebení a součinitel tření [9].

2.1.6 Záběhová fáze

Změny tření, teploty a míry opotřebení se obvykle pozorují krátce po začátku posuvného kontaktu mezi novými, neopotřebovanými povrchy. Tyto dočasné výkyvy jsou často ignorovány nebo jednoduše akceptovány jako normální průběh provozu. Bylo však zjištěno, že je vhodnější součásti, jako jsou ložiska nebo převody, kontrolovaně zaběhnout. Když jsou dva nové povrchy umístěny k sobě, dotýkají se pouze ve vrcholech nejvyšších nerovností a skutečná kontaktní plocha je velmi malá (obrázek 4). Kvalitu povrchu a z toho vyplývající míru opotřebení materiálu lze odečíst z Abbottovy křivky. Čím strmější je tato křivka, tím dochází k většímu opotřebení. Jsou-li povrchy pod zatížením, vyčnívající nerovnosti se postupně odstraní a skutečná kontaktní plocha se zvětší. Nejprve je opotřebení poměrně rychlé, ale s rostoucí kontaktní oblastí se zmenšuje [11], [12], [13].



Obrázek 4 Abbottova křivka [14]

2.1.6.1 Flash temperature (blesková teplota)

„Flash temperature“ (blesková teplota) vzniká při vyšších tlacích a při vyšší drsnosti, kde zatížení působí na velmi malou kontaktní plochu, a při vysokých posuvných rychlostech. Dochází k rychlému a ke krátkému nárůstu teploty mezi dvěma povrchy. Intenzita produkce tepla spojená s difuzí jedné nebo obou o sebe třecích ploch vytváří lokální a přechodné zvýšení teploty jen několik mikronů hluboko pod povrchem. Předpokládá se, že tento vzestup teploty ovlivňuje několik důležitých tribologických procesů, včetně opotřebení. Celý proces bleskové teploty je velmi rychlý. Může způsobit vytváření oxidů, či vznik metalurgicky transformovaných povrchových vrstev. Kvůli tepelné roztažnosti může dojít ke změně lokální geometrie. Dokonce někdy dochází i k tání povrchu.

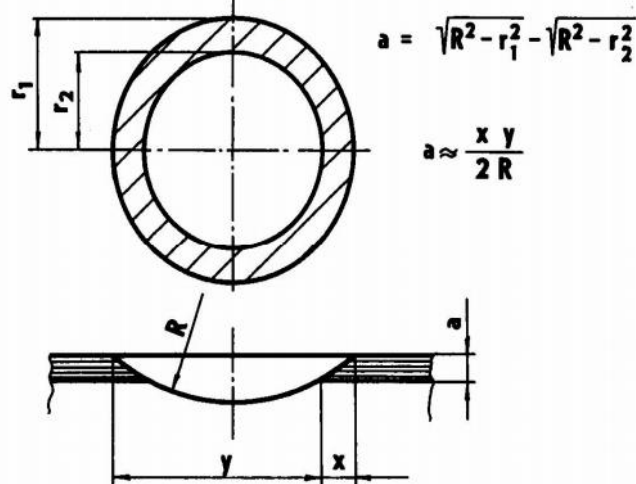
Pokud je kontakt ploch neustále mazán, je blesková teplota relativně malá a dochází k ustálenému stavu. Při suchém tření nebo v případě, že hrozí porucha mazání, mohou být bleskové teploty vyšší než součást ustáleného stavu. Kvůli tomu, že blesková teplota je velmi rychlá a současně dochází k lokálnímu ohřevu ve špatně přístupném místě, bylo vyvinuto několik metod k určení bleskové teploty. Těmito metodami například jsou zesílené CCD kamery na měření polymetrie nebo termočlánky [15], [16], [17], [18], [19].

2.1.7 Testování mechanických vlastností povlaků

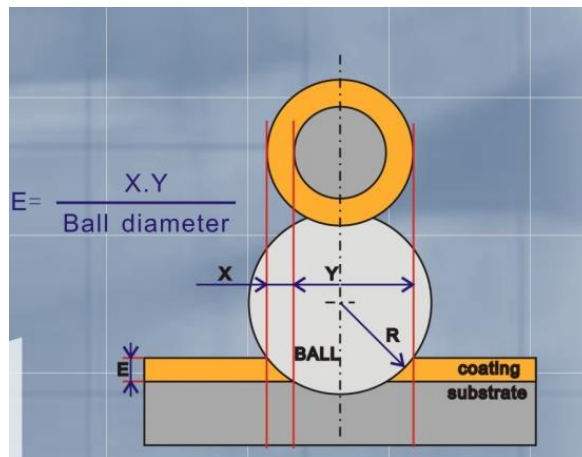
2.1.7.1 Tloušťka

Pro měření tloušťky povlaku se používá metoda kalotest (obrázek 6). Princip této metody spočívá v tom, že rotující ocelová kulička vybrousí do vzorku kulový vrchlík (callota). Za pomoci mikroskopického pozorování lze získat příslušné hodnoty, ze kterých lze vypočítat tloušťku povlaku, jak je znázorněno na obrázku 5. Ve vzorci hodnota a je tloušťka povlaku, r_1 je vnější poloměr mezikruží vrchlíku při pohledu zhora, r_2 je vnitřní poloměr tohoto mezikruží a R je poloměr kuličky [20], [21].

Stanovení tloušťky metodou „kalotest“



Obrázek 5 Kalotest [21]



Obrázek 6 Princip kalotestu [22]

2.1.7.2 Adheze

Testování adheze povlaků k základnímu materiálu metodou „scratch test“ je jednoduché a rychlé. Získané výsledky jsou však ovlivněny různými faktory. Mezi tyto faktory patří tloušťka povlaku, mechanické vlastnosti substrátu a také zkušební podmínky, jako je rychlost rytí, zatížení hrotu a jeho poloměr. Zkouška probíhá za pomoci přístroje, jehož indenter se pohybuje konstantní rychlostí při plynulém zvyšování zatížení. Měří se síla, při které dochází k porušení adheze povlaku [23].

Druhou možností testování adheze Mercedes test. I zde dochází k vpichu indentoru do povlaku. Za pomoci mikroskopu se vpich porovná

s normalizovanými obrázky, kde se posuzuje míra porušení povlaku okolo místa vpichu [21].

2.1.7.3 Pin-on-disk

Tribometr „pin-of-disk“ se používá pro testování rychlosti otěru a zjištění koeficientu tření povlaku. Vzorek je upevněn ve sklíčidle, které se může otáčet předem stanovenou rychlostí. Kulička je upevněna v pružném rameni, které je v kontaktu s rotujícím vzorkem, a které se může pohybovat bočně, a proto může měřit tangenciální síly mezi vzorkem a kuličkou se senzorem (obrázek 7).

Systém sběru dat zaznamenává třecí sílu jako funkci času nebo počtu otáček. Naměřená data se často přepočítávají tak, že koeficient tření se zobrazuje na stejných osách. Jakmile je test dokončen, skutečná míra opotřebení vzorku (1) a kuličky (2) může být vypočtena jedním ze dvou způsobů: prvním je použití profilometru k měření profilu napříč opotřebitelnou stopou.

Vzorec pro výpočet opotřebení vzorku při použití profilometru:

$$V_{vzorek} = 2\pi rS \quad (1)$$

kde:

V_{vzorek} = Objem úbytku materiálu

r = Poloměr stopy

S = Plocha řezu stopy

Vzorec pro výpočet opotřebení kuličky:

$$V_{kulička} = \frac{\pi A^3 B}{32D} \quad (2)$$

kde:

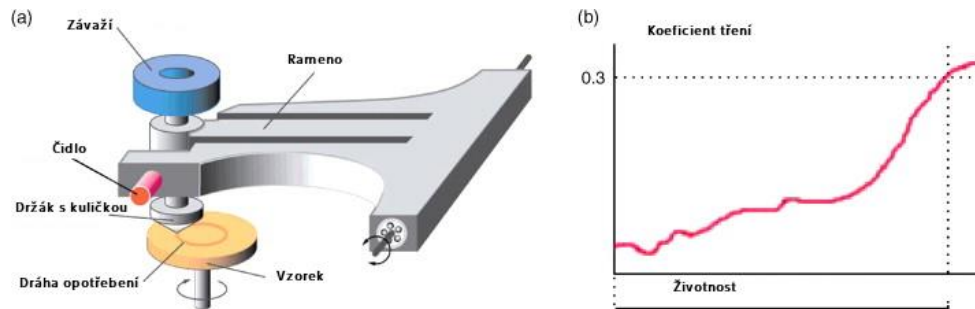
$V_{kulička}$ = Objem úbytku materiálu

A = Nejmeší průměr stopy

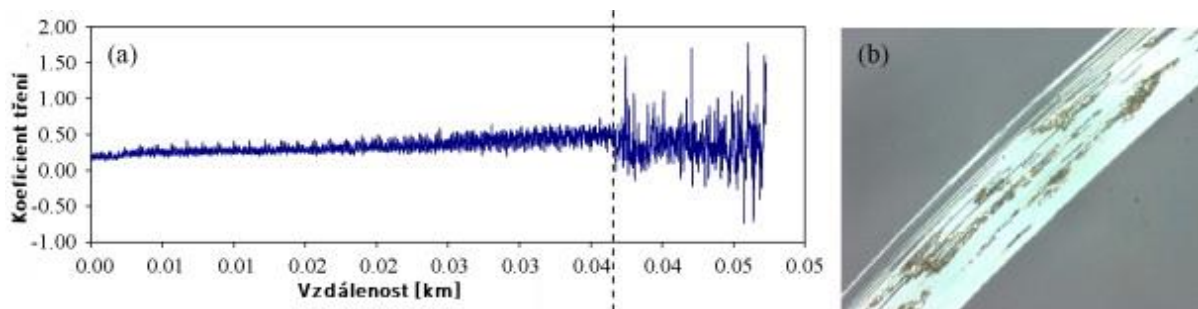
B = Průměr v kolmém směru

D = Průměr kuličky

Druhou metodou je zvážit vzorek před a po testování s velmi přesným vyvážením a vypočítat odstraněný materiál. Ovšem tato metoda je problematictější, protože zbytky vzniklé během zkoušky musí být zcela odstraněny, aby se zabránilo významné chybě. To je často obtížné u polymerů, protože úlomky mají tendenci se lepit na oba povrchy.



Obrázek 7 Pin-on-disk [24]



Obrázek 8 Vyhodnocení metody Pin-on-disk [24]

Příklad průběhu tření je uveden na obrázku 8. Počátek poruchy odpovídá v tomto případě zřetelné změně signálu tření na tribometru v důsledku rozpadu povlaku a vytvoření tribologického přenosového filmu, který je směsí povlakového materiálu, substrátu a materiálů kuličky. To vše se vzájemně ovlivňuje a má vliv na výsledný průběh koeficientu tření [24], [25].

2.2 Metody povlakování

2.2.1 PVD (Physical Vapor Deposition)

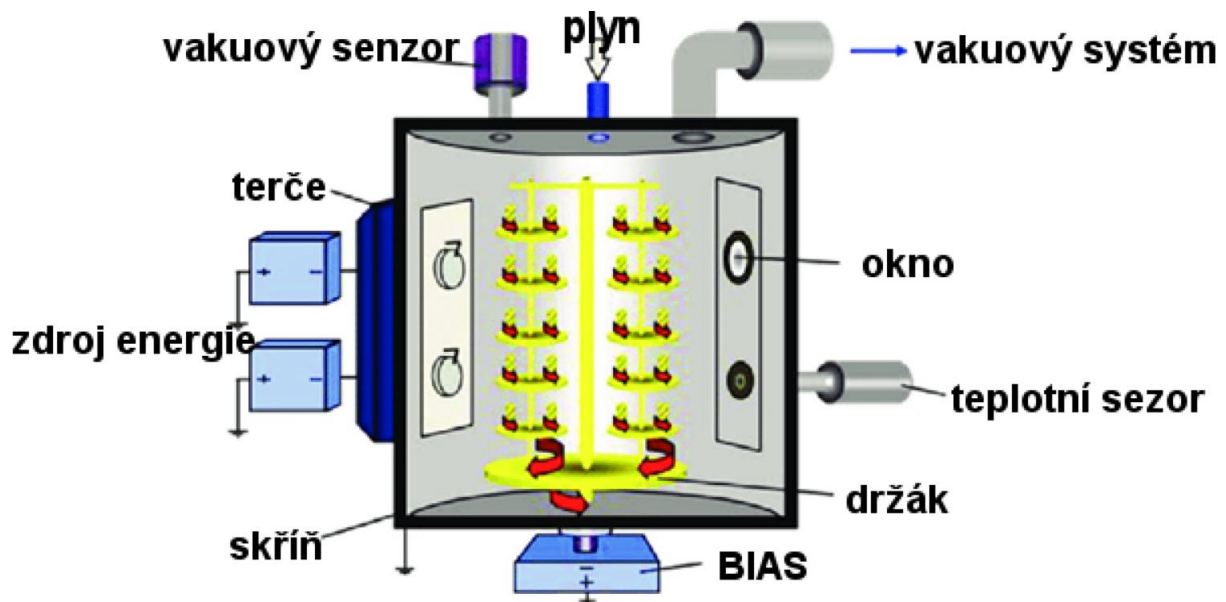
Metody PVD jsou depoziční procesy, ve kterých je materiál odpařován z pevného nebo kapalného zdroje ve formě atomů nebo molekul a transportován ve formě páry pomocí vakua nebo nízkotlakého plynu v prostředí k substrátu, kde kondenzuje. Procesy PVD se obvykle používají k nanášení povlaků

o tloušťkách v rozmezí od několika nanometrů do tisíce nanometrů; lze je také použít k vytvoření vícevrstvých povlaků, odstupňovaných kompozičních povlaků, velmi silných povlaků a samostatných struktur.

PVD metodu lze použít k nanášení prvků, slitin a sloučenin pomocí reaktivních depozičních procesů. Při reaktivních depozičních procesech se sloučeniny vytvářejí reakcí depozičního materiálu s okolním plynem, jako je dusík (např. nitrid titanu TiN), nebo společně s doplňujícím materiálem (např. karbid titanu TiC).

2.2.1.1 Vakuové napařování

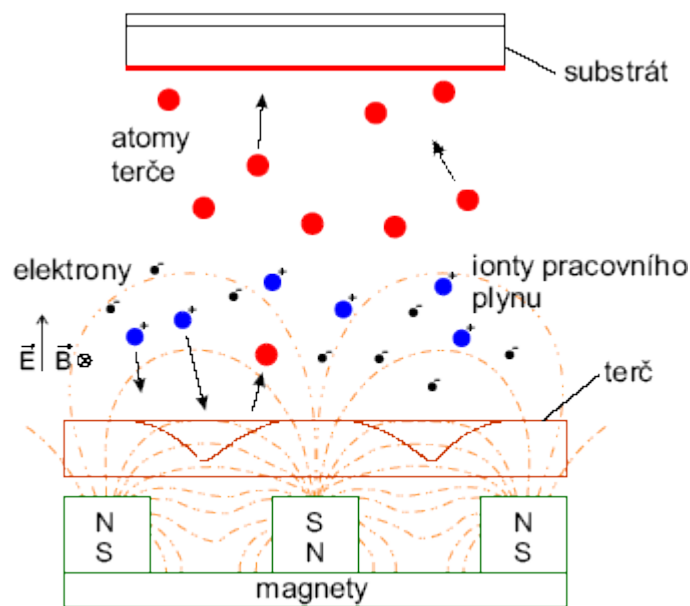
Materiál ze zdroje se za pomoci termického odpařování nanáší na substráty s malými nebo žádnými kolizemi s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Trajektorie odpařeného materiálu se nazývá linie vidění. Prostředí vakua také poskytuje schopnost redukovat plynnou kontaminaci v depozičním systému na nízkou úroveň. Tepelné odpařování se obecně provádí za použití tepelně zahříváných zdrojů (obrázek 9). Obecně jsou substráty umístěny v dostatečné vzdálenosti od zdroje odpařování, aby se snížilo sálavé zahřívání substrátu zdrojem tepla [26].



Obrázek 9 Příklad PVD napařovačky [27]

2.2.1.2 Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování je zdokonalená technologie klasického naprašování. Naprašování probíhá ve vakuu, kde je katoda (terč) z materiálu, jenž se bude rozprašovat. Poblíž se umístí předmět, na kterém se bude vytvářet povlak z materiálu katody. Před terčem je vytvořeno magnetické pole pomocí elektromagnetu nebo permanentními magnety. Toto zařízení se nazývá magnetron (obrázek 10).



Schematický náčrt magnetronu.

Obrázek 10 Magnetronové naprašování [28]

Elektrony, které při klasickém naprašování unikají z prostoru před terčem, se v tomto případě v důsledku Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. Tak se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, tím se i prodlužuje doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se tak pravděpodobnost ionizace dalších atomů pracovního plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku i při nižším napětí. Zejména nižší tlak se pozitivně projevuje ve větší čistotě vytvářených vrstev [29], [30].

2.2.1.3 PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)

Technologie PACVD je proces používaný k nanášení DLC povlaků. Všechny zdroje materiálu v PACVD procesu jsou v plynném stavu. Proto je tato technologie

vhodná pro rovnoměrné povlakování dílů, a to případně i bez nutnosti rotace. Typická tloušťka vrstev se pohybuje v rozmezí 2-6 μm [31].

Tyto vrstvy jsou vytvářeny za pomoci elektrického výboje, konkrétně doutnavého výboje, který generuje plazma. Důležité je, aby molekuly pracovního plynu získaly dostatek energie. Výhodou je, že výroba dle této metody může probíhat i za nízkých teplot, typicky kolem 200 °C. Je to tím, že nevyužíváme tepelné energie z ohřevu, ale energie plazmového výboje. Pokud dále zvyšujeme teplotu, dodáme atomům další energii. Atomy pak zaujímají více stabilní místa v tenké vrstvě na povrchu substrátu [32].

2.2.1.4 DLC povlaky

Uhlík je alotropní prvek, což znamená, že dokáže vytvářet více druhů struktur. Nejznámější je diamant a grafit, ale existuje více atomových uspořádání, např. fullereny, nanotrubičky, grafen, skelný uhlík a amorfní uhlík. Ukázalo se, že uhlíkové sypké materiály a tenké povlaky jsou užitečné v široké škále aplikací. Například grafit se používá pro obrábění elektrickým výbojem (EDM), skelný uhlík se používá jako materiál elektrod, diamantové a CVD diamantové povlaky se používají pro řezné nástroje, diamantové povlaky se používají jako chladiče v elektronických aplikacích. Mezi atraktivní vlastnosti amorfních uhlíkových povlaků patří vysoká tvrdost, chemická inertnost, laditelný elektrický odpor, optické vlastnosti, biokompatibilita a vynikající tribologické chování v mnoha inženýrských aplikacích [33].

K prvnímu použití DLC povlaků došlo v roce 1971 a bylo popsáno Aisenbergem a Chabotem, kteří prokázali, že jsou tyto povlaky odolné proti poškrábání a korozi. V posledních letech si povlaky DLC získaly velkou pozornost díky svým vynikajícím tribologickým vlastnostem, včetně velmi nízkého tření, vysoké tvrdosti, odolnosti vůči opotřebení, průhlednosti a chemické inertnosti, jakož i pro biotribologické aplikace kvůli jejich biologické inertnosti [34]. Mnohé z těchto vlastností činí povlaky DLC atraktivními pro automobilové díly.

V praxi existuje několik různých typů DLC povlaků. Mají mnohem horší vlastnosti než diamant, ale jejich nízká cena, nízká teplota nanášení a schopnost

nanášení na velké plochy způsobují, že DLC je konkurenceschopný povlakovací materiál. Vlastnosti DLC povlaků se odvíjejí od jejich chemického složení, což ovlivňuje vznik oxidů, grafitů a reakci na mazadla. Použití DLC povlaků není pouze omezeno na automobilový průmysl a medicínské uplatnění. Tyto povlaky nachází využití i na hard disky, žiletky, nože, nástroje a dekorativní účely [34], [35] [36], [37].

2.2.2 Třecí dvojice DLC – DLC

2.2.2.1 V mazivu

Jak už bylo v této práci napsáno, DLC mají velkou budoucnost v automobilovém průmyslu. Výrobci vysoce namáhaných automobilových dílů mají k dispozici řadu různých typů komerčně dostupných DLC povlaků. Na tuto skutečnost musí reagovat výrobci maziv. Ti mají za úkol vyrábět oleje, které budou vhodné v různých podmínkách pro mnoho typů DLC povlaků. K dispozici mají základní oleje a různá aditiva. Jedním z těchto aditiv je dialkyldithiofosforečnan zinečnatý (ZDDP). Předmětem současných studií je vliv aditiv včetně ZDDP na kompatibilitu olejů s různými typy DLC povlaků. Cílem je najít co nejvhodnější kombinaci maziva a DLC povlaků pro skutečné pracovní zatížení nejen v automobilu. Očekává se co nejnižší koeficient tření a co nejlepší kvalita mazacího filmu v celém rozsahu pracovních otáček stroje. Zanedbatelná pochopitelně není ani ekonomická stránka věci či technologie průmyslové výroby daného maziva.

V dnešní době nelze ovšem zanedbat ani ekologickou stopu, která výrobou maziva také vzniká. Obdobnými problémy se musí úspěšně potýkat i tvůrci a výrobci komerčních DLC povlaků. Od 70. let 20. století vznikla řada DLC povlaků jak základních tak s přídavkem různých prvků. V tomto ohledu se zkoumá vliv koncentrace vodíku, případně i wolframu. Ukazuje se, že obsah těchto prvků v DLC povlacích nemá velký vliv na koeficient tření. Jiná je však situace v případě adheze a tvorbě kvalitního filmu s vlivem na následné opotřebení. V těchto ohledech má koncentrace vodíku a wolframu zásadní vliv. Je předmětem

výzkumu zjistit, jaké koncentrace těchto prvků v DLC povlacích jsou optimální pro různá pracovní zatížení a různá maziva.

Výsledky mnoha studií jsou dosti protichůdné, ale vyplývá z nich, že ve filmotvorných vlastnostech DLC povlaků hraje důležitou pozitivní úlohu vodík. Při experimentech byla použita metoda pin-on-disk, kde kulička z určitého materiálu je v interakci s kotoučem ze stejného materiálu. Kulička i disk jsou potaženy stejným DLC povlakem a mazací film je vytvářen určitým olejem. Obecně platí, že počáteční tření mezi DLC povlaky je nízké a po dvouhodinovém záběhu se ještě snižuje. Po nějaké době dochází ke grafitizaci povrchu, což způsobuje snížení tření mezi plochami.

Důležitá je také rychlost pohybu. Některé DLC povlaky vytvářely plný separační film až při rychlostech vyšších než 3 m/s. Právě zde se projevila pozitivní role vodíku v DLC na kvalitu separačního filmu. Z hlediska maziva bylo zjištěno, že přísada ZDDP zlepšuje odolnost proti opotřebení u povlaků dopovaných wolframem. [34], [35], [38].

2.2.2.2 Na vzduchu a vodě

Ve strojírenství jsou běžně využívány olejové hydraulické systémy. Problémem pro životní prostředí jsou ovšem úniky těchto olejů, kterým nelze v provozních podmínkách dokonale zabránit. Uvažovaným řešením tohoto problému je náhrada oleje vodou. To však s sebou nese řadu technických problémů, které je třeba vyřešit. Mezi tyto problémy patří ovladatelnost stroje, koroze materiálů, spolehlivost a také tribologie. U tribologie je nutné vyřešit vysoké tření a velkou míru opotřebení ve vodním prostředí oproti hydraulickému oleji. Nadějným řešením se jeví použití DLC povlaků na styčných plochách strojů. Vědecké studie ukazují ve vodním prostředí u těchto povlaků nízké tření a vysokou odolnost proti opotřebení. Tyto studie se také zabývají využitím DLC povlaků v prostředí vzduchu [5], [39].

Uvedené studie vycházely z experimentů pomocí metody pin-on-disk. Na nerezové oceli AISI 440 C a AISI 301 byly nanášeny tři typy DLC povlaků: čistý DLC povlak a povlaky s přísadou fluoru nebo křemíku (F-DLC, Si-DLC). Zkoušky probíhaly v prostředí vody a na vzduchu. Cílem experimentů bylo porovnat

koeficienty tření a odolnosti proti opotřebení v závislosti na druhu povlaku a druhu prostředí [5], [39].

Co týče koeficientu tření, tak dle výsledků studií obecně platí, že po uplynutí záběhové fáze se tření snižuje. Ve vodním prostředí byla však doba trvání záběhové fáze mnohem kratší než na vzduchu, s výjimkou povlaku Si-DLC, kde tento rozdíl tak výrazný nebyl. Také kolísání koeficientu tření je ve vodě mnohem menší než na vzduchu. Jen opět u povlaku Si-DLC byl tento rozdíl zřetelně menší. Míra opotřebení byla u všech typů DLC povlaků ve vodním prostředí výrazně menší než v prostředí vzduchu. U F-DLC povlaku se ukázala míra opotřebení u obou ocelí zjevně větší než u povlaku DLC, respektive povlaku Si-DLC [5], [39].

Z hlediska tribologie studie zatím potvrzují, že s vhodným a vyzkoušeným typem DLC povlaku lze nahradit v hydraulických soustavách pracovních strojů olej vodou. Lze tak výrazně přispět k ochraně spodních a povrchových vod a v případě lodní dopravy i k ochraně světových moří [5], [39].

3. Experimentální část

3.1 Příprava vzorků

Základní materiál pro povlakování byl připraven ve formě vzorků o průměru 20 mm a výšce 4 mm, které byly broušeny a leštěny na leštičce Leco GPX 300. Vzorky byly z oceli X153CrMoV12. Tato ocel byla zakalená na tvrdost 62 HRC. Jedná se o nástrojovou ocel ledeburitického typu s výbornou odolností proti opotřebení, vysokou pevností v tlaku, s velkou prokalitelností a dobrou houževnatostí, je sekundárně vytvrditelná a vhodná pro následné deponování povlaků PVD nebo CVD.

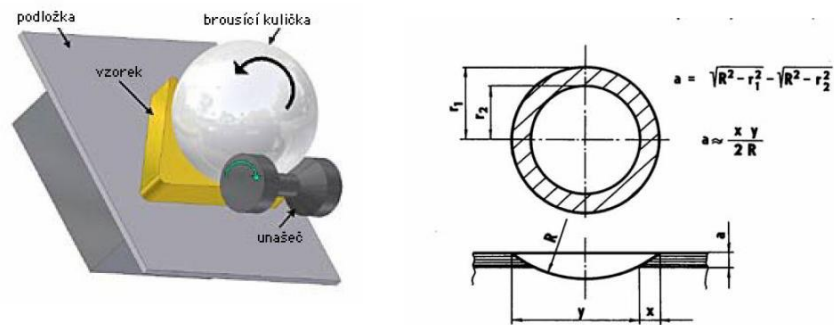
Povlaky DLC (a-C:H) byly připraveny v zařízení Hauzer Flexicoat 850 se dvěma rovinnými magnetrony. Před vlastní depozicí byly vzorky odmaštěny acetonem v ultrazvukové pračce Novatec a sušeny horkým vzduchem o teplotě 60 °C. Po umístění do depoziční komory byly vzorky čištěny v argonové plazmě a následně povlakovány adhezní mezivrstvou Cr, která byla deponována metodou nerovnovážného magnetronového naprašování z Cr (99,95 %) terčů v argonové atmosféře (99,999 %) po dobu 20 minut. Gradientní přechod z čistého Cr na Cr-C:H byl vytvořen zvyšováním toku acetyleny (99,60 %) z 20 sccm na konečných 70 sccm za dobu 15 minut. Funkční vrstva DLC byla deponována metodou PACVD s tokem acetyleny 70 sccm, přičemž tento proces probíhal po dobu 4 hodin. Depoziční teplota byla 200 °C. Použito bylo pulzní předpětí s frekvencí 40 kHz na substrátech. Pracovní tlak byl $4 \cdot 10^{-1}$ Pa.

3.2 Mechanické vlastnosti povlaku

3.2.1 Stanovení tloušťky povlaku

Tloušťka povlaku DLC byla měřena na zařízení Calotest Compact od firmy CSM Instruments a následně vyhodnocena na optickém mikroskopu. Kalotest umožňuje měření tloušťky povlaku pomocí vybroušení kulového vrchlíku do povrchu vzorku kuličkou s diamantovou pastou (obrázek 11). Vzniklá kalota

se poté vyhodnocuje na optickém mikroskopu, zde se změří průměry vzniklých vrstevnic. Pomocí rovnice se vypočítá tloušťka vrstvy (3).



Obrázek 11 Kalotest [40]

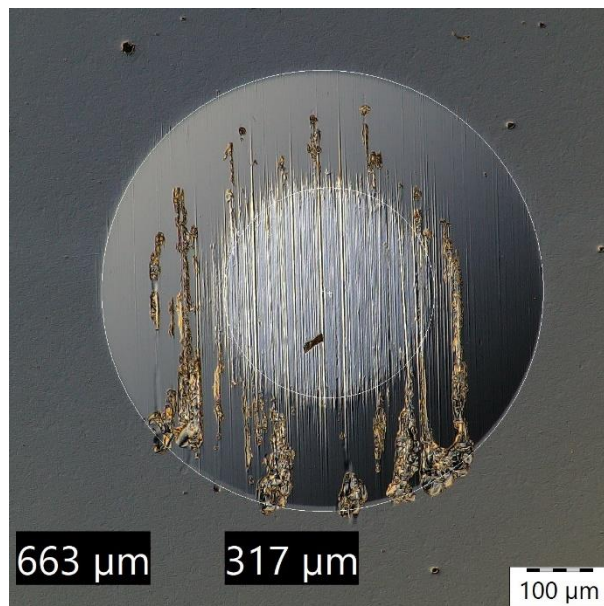
$$t = \sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2} \quad (3)$$

R= poloměr kuličky

r₁= poloměr velkého výbrusu

r₂= poloměr malého výbrusu

K vybroušení povlaku byla použita ocelová kulička o průměru 30 mm a abrazivní diamantová suspenze.



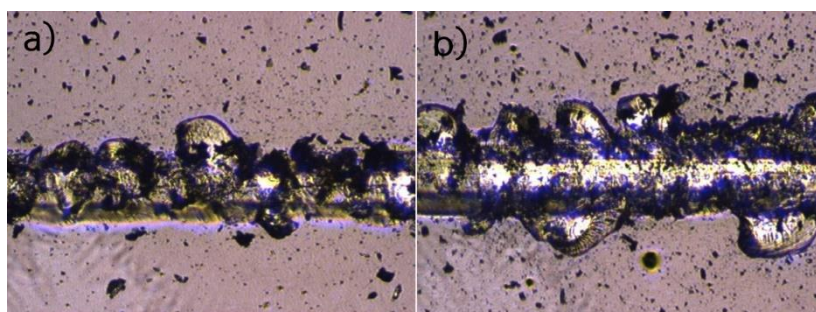
Obrázek 12 Kalotest

Z kalotestu (obrázek 12) bylo pomocí mikroskopu odečteno r₂= 663 μm, r₁=317 μm a určena celková tloušťka povlaku 2,8 μm.

3.2.2 Adheze povlaku

3.2.2.1 Vrypová zkouška („Scratch test“)

Adheze hraje u povlaků důležitou roli. Vrypová zkouška, často také označována jako „scratch test“, se používá k hodnocení adhezivně-kohezivního porušení povlaku. Zkouška spočívá v posuvu diamantového Rockwellova indentoru zatěžovaného kontinuálně narůstající silou s pohybem hrotu. Následně se měří kritická síla, při které dochází nejprve k porušení koheze (soudržnosti povlaku) s následným porušením adheze povlaku vůči základnímu materiálu. Testování bylo provedeno na zařízení CSM Instruments Revetest.



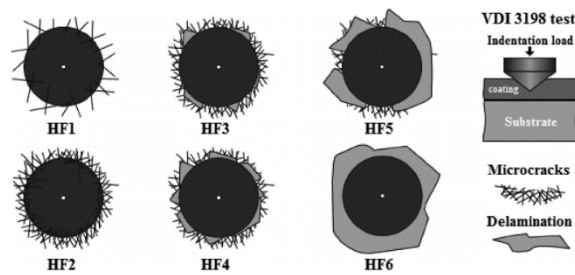
Obrázek 13 Scratch test - a) porušení koheze při 14 N a b) porušení adheze při 17 N

Ke koheznímu porušení povlaku (obrázek 13a) došlo při kritické síle 14 N a porušení adheze nastalo při 17 N (obrázek 13b).

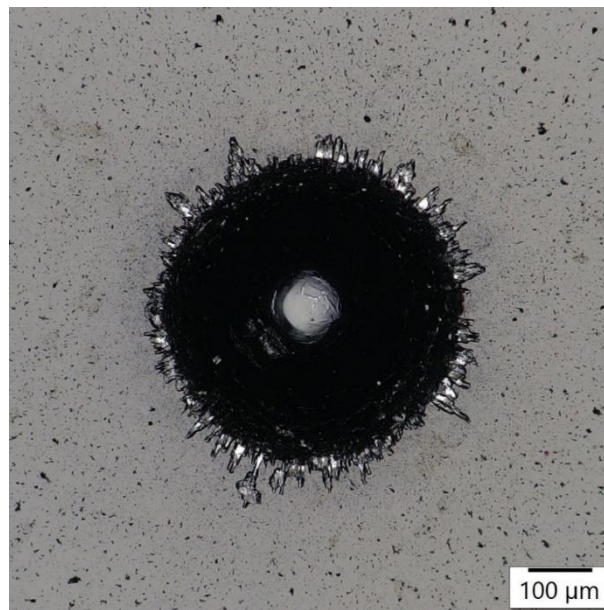
3.2.2.2 Indentační test („Mercedes test“)

Indentačním (vnikacím) testem se posuzuje adheze povlaku ke substrátu. Provádí se vpich diamantového Rockwellova indentoru do vzorku. Tímto vpichem vznikají praskliny a odlupování povlaku. Dále se na optickém mikroskopu tyto jevy vyhodnocují a určí se jedna ze šesti kategorií. Kde první kategorie HF1 je tou nejlepší a poslední HF6 je tou nejhorší (obrázek 14). HF1 až HF3 se považují za vzorky s dostatečnou adhezí.

V našem případě (obrázek 15) na základě provedého testu a vyhodnocení na optickém mikroskopu, kde bylo na okraji vidět jen mírné odlupování povlaku, byla adheze vyhodnocena jako HF3.



Obrázek 14 Tabulka vyhodnocování indentačního testu [41]



Obrázek 15 Výsledek indentačního testu

3.3 Tření a opotřebení

3.3.1 Metoda „Pin-on disk“

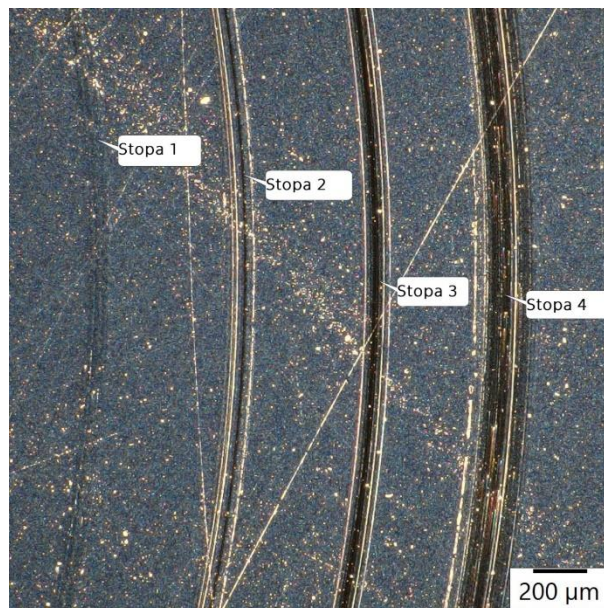
Metoda „pin-on disk“ slouží k měření průběhu koeficientu tření a určení rychlosti opotřebení. Test byl prováděn na tribometru CSM Instruments THT-S-CE-0000. Test spočívá v tření rotujícího vzorku (disku) a nejčastěji kuličky (pinu). Kulička je zatížena předem danou silou. Kulička zatížená touto silou zanechá na disku kruhovou stopu o poloměru r . Po skončení testu se vyhodnocuje opotřebení kuličky a vzorku.

Pro vyhodnocení záběhové fáze bylo provedeno měření na vzduchu a měření v čistém PAO oleji. Použity byly následující parametry testu: lineární rychlost 10 cm/s, 1000 cyklů a to při různém normálovém zatížení 1, 2, 5 a 10 N

a pokojové teplotě 20 až 24 °C. Následně se měřily na optickém mikroskopu výsledné šířky stop a na kuličce průměr vzniklé plochy.

3.3.2 Na vzduchu

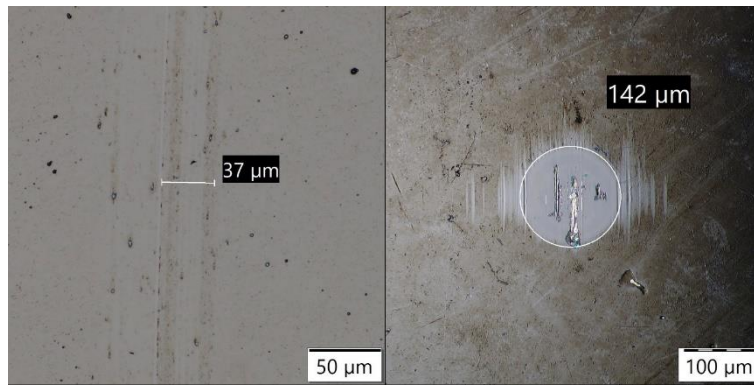
Při testu, kde bylo zatížení kuličky nastaveno na 10 N, došlo k porušení povlaku na kuličce, což je patrné i na stopě 4 na obrázku 16. Obrázky 17 až 20 ukazují postupný úbytek povlaku na kuličce během zatížení. Na obrázku 20 již vidíme základní materiál kuličky ve většině oblasti kontaktní plochy, což znamená, že už nedocházelo ke tření povlaku DLC - DLC, ale docházelo ke tření DLC vůči základnímu materiálu kuličky. Tím vzrostl koeficient tření na hodnotu 0,18 až 0,20. Na obrázcích 17 až 19 je vidět, že opotřebení závisí na zatížení, ale koeficient tření zůstává stejný. Vyhodnocení testu je uvedeno v tabulce 1.



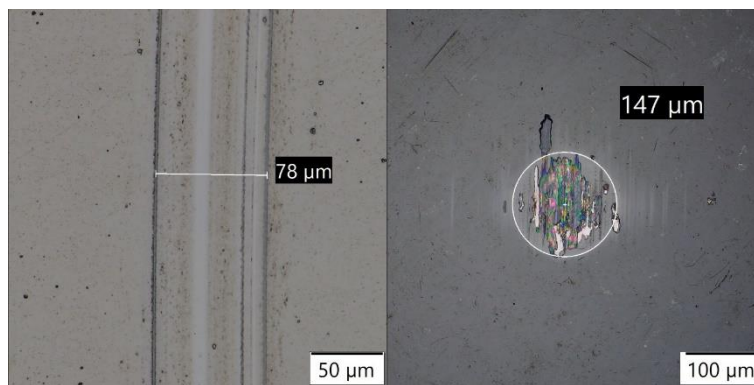
Obrázek 16 Vzniklé stopy na vzduchu

Tabulka 1 Koeficient tření na vzduchu

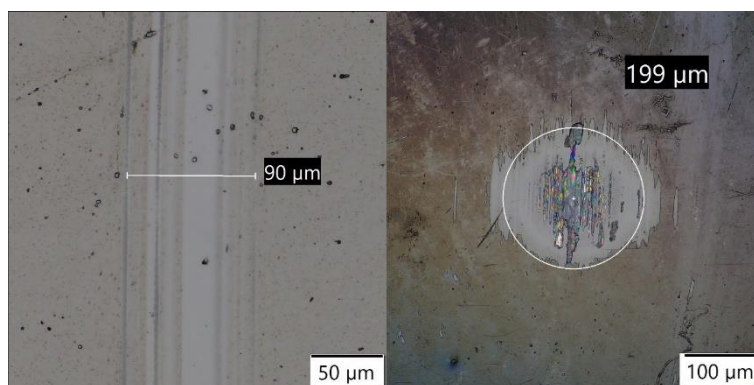
	Zatížení F [N]	Poloměr [mm]	μ_{vzduch} [-]
Stopa 1	1	6	0,14-0,15
Stopa 2	2	6,5	0,14-0,16
Stopa 3	5	7	0,13-0,14
Stopa 4	10	7,5	0,18-0,20



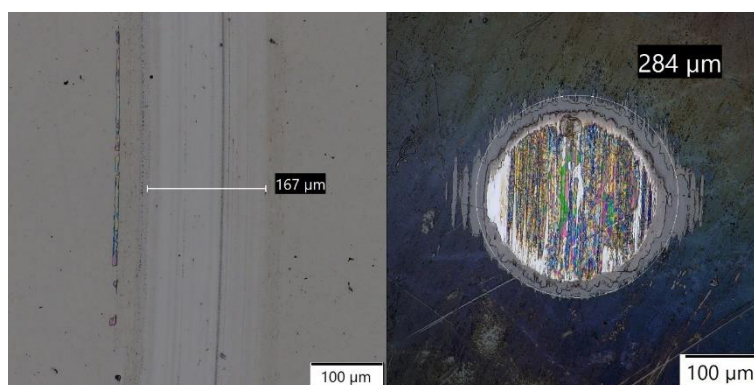
Obrázek 17 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 1 N



Obrázek 18 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 2 N



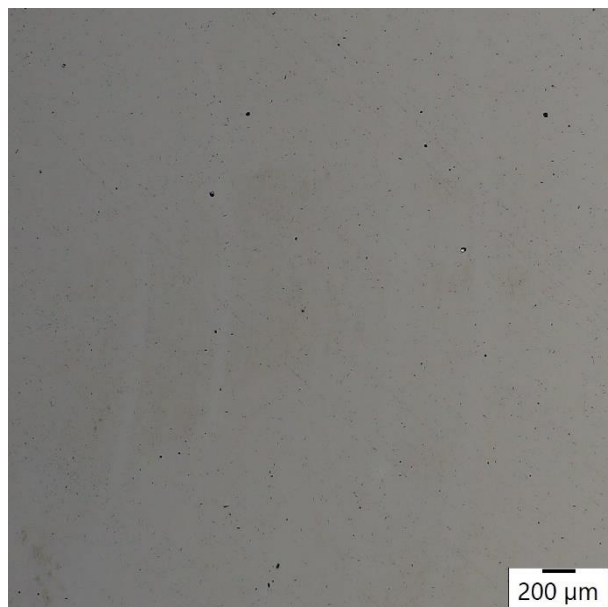
Obrázek 19 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 5 N



Obrázek 20 Vlevo: Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 10 N

3.3.3 V čistém PAO oleji

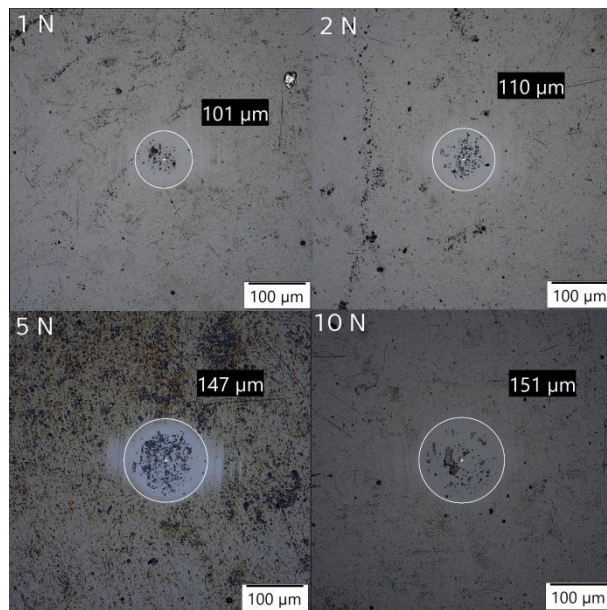
V čistém PAO oleji byly stopy opotřebění pouze minimální (obrázek 21) pro zvolený počet 1000 cyklů.



Obrázek 21 Vzniklé stopy v čistém PAO oleji byly minimální (nebylo je možné vyhodnotit)

Tabulka 2 Koeficient tření v PAO

	Zatížení F [N]	Poloměr [mm]	μ_{PAO} [-]
Stopa 1	1	6	0,09
Stopa 2	2	6,5	0,09
Stopa 3	5	7,5	0,08
Stopa 4	10	8	0,09

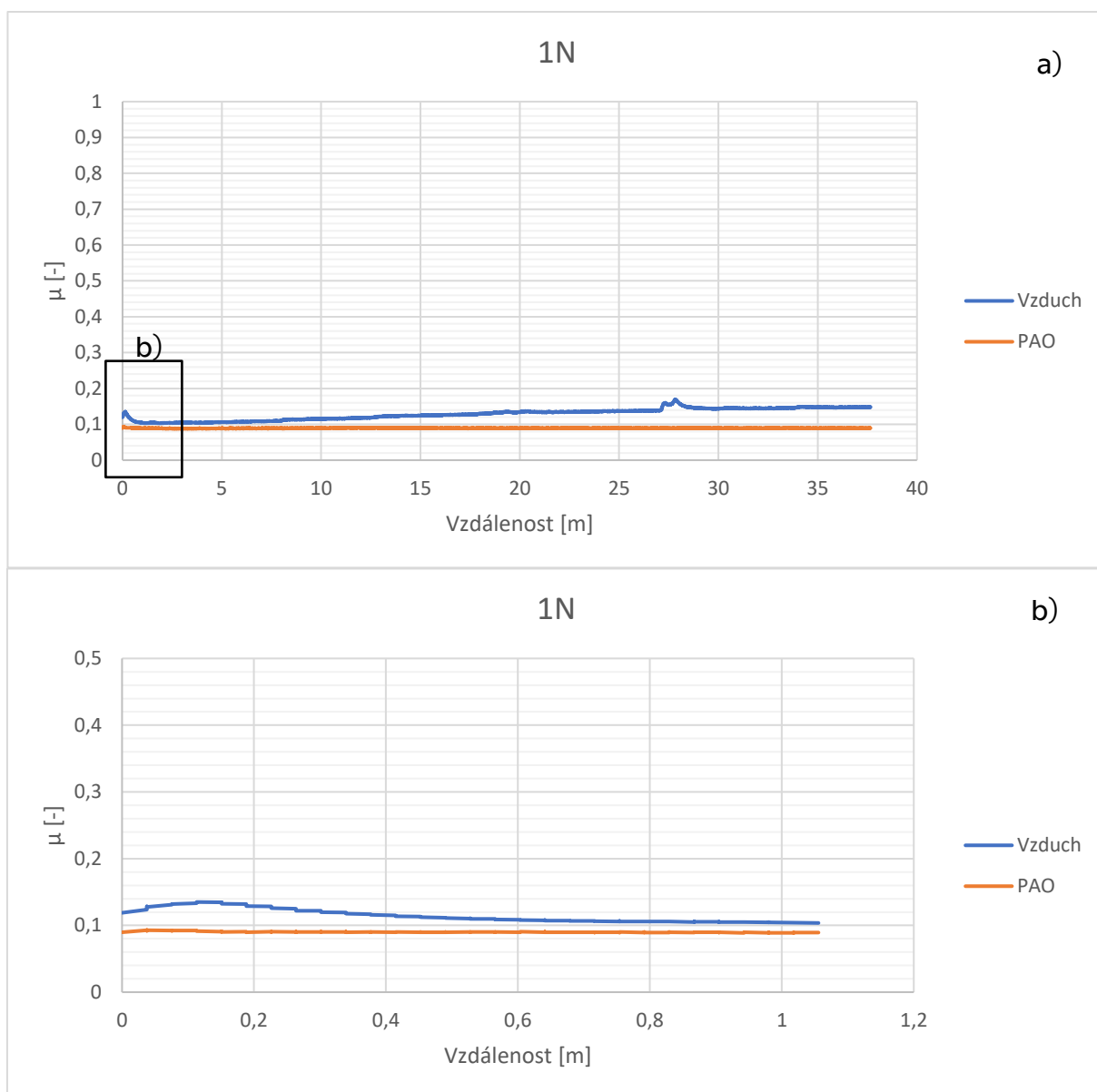


Obrázek 22 Opatření kuliček při zatížení 1N, 2N, 5N a 10N

V čistém PAO oleji docházelo k nepatrnému opotřebení kuliček (obrázek 22). To bylo způsobeno účinky v oleji. Olej se zde dostává mezi kuličku a vzorek a vytváří tenký film. Tento film částečně nese zátěž a snižuje kontaktní plochu. Díky tomu se snižuje vzájemné opotřebení. Výsledky tohoto testu jsou uvedeny v tabulce 2.

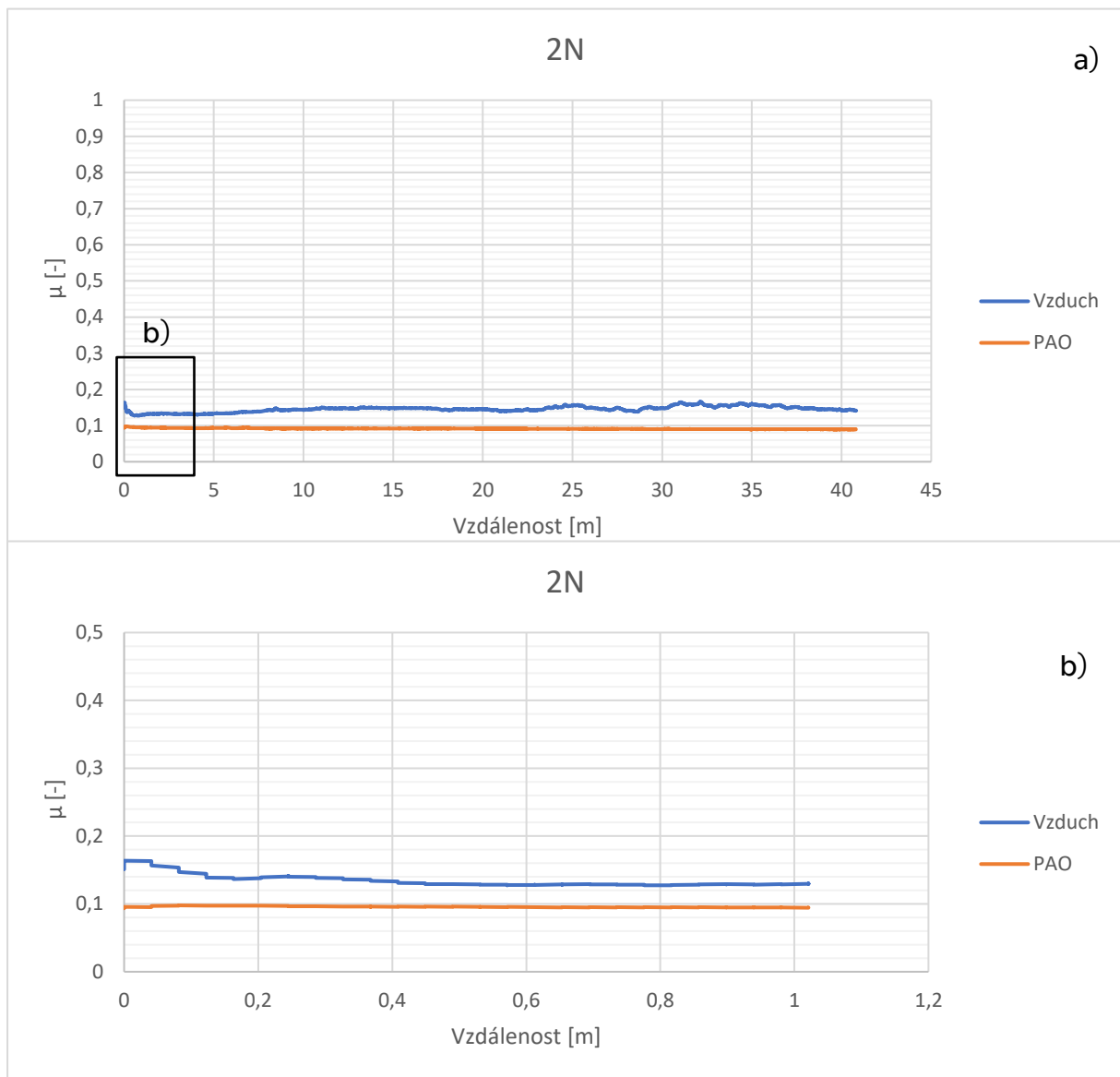
3.3.4 Porovnání záběhové fáze na vzduchu a v PAO oleji

Tření na vzduchu nemá tak dobré výsledky jako v čistém PAO oleji, jak je uvedeno v tabulce 3 (obrázky 23 až 27). To je způsobeno tím, že dochází k postupnému úbytku povlaku na kuličce i na vzorku. Tím v místě tření vzniká třetí těleso, které se ze začátku chová jako abrazivo, ale po čase se zjemní a stává se tuhým mazivem. A tím dochází k ustálení koeficientu tření na 0,13 až 0,15. Oproti tomu čistý PAO olej zamezuje značnému úbytku povlaku jak na kuličce, tak i na vzorku. Děje se to tím, že čistý PAO olej vyplachuje stopu, kde by případně mohlo vznikat třetí těleso, které by se chovalo abrazivně.



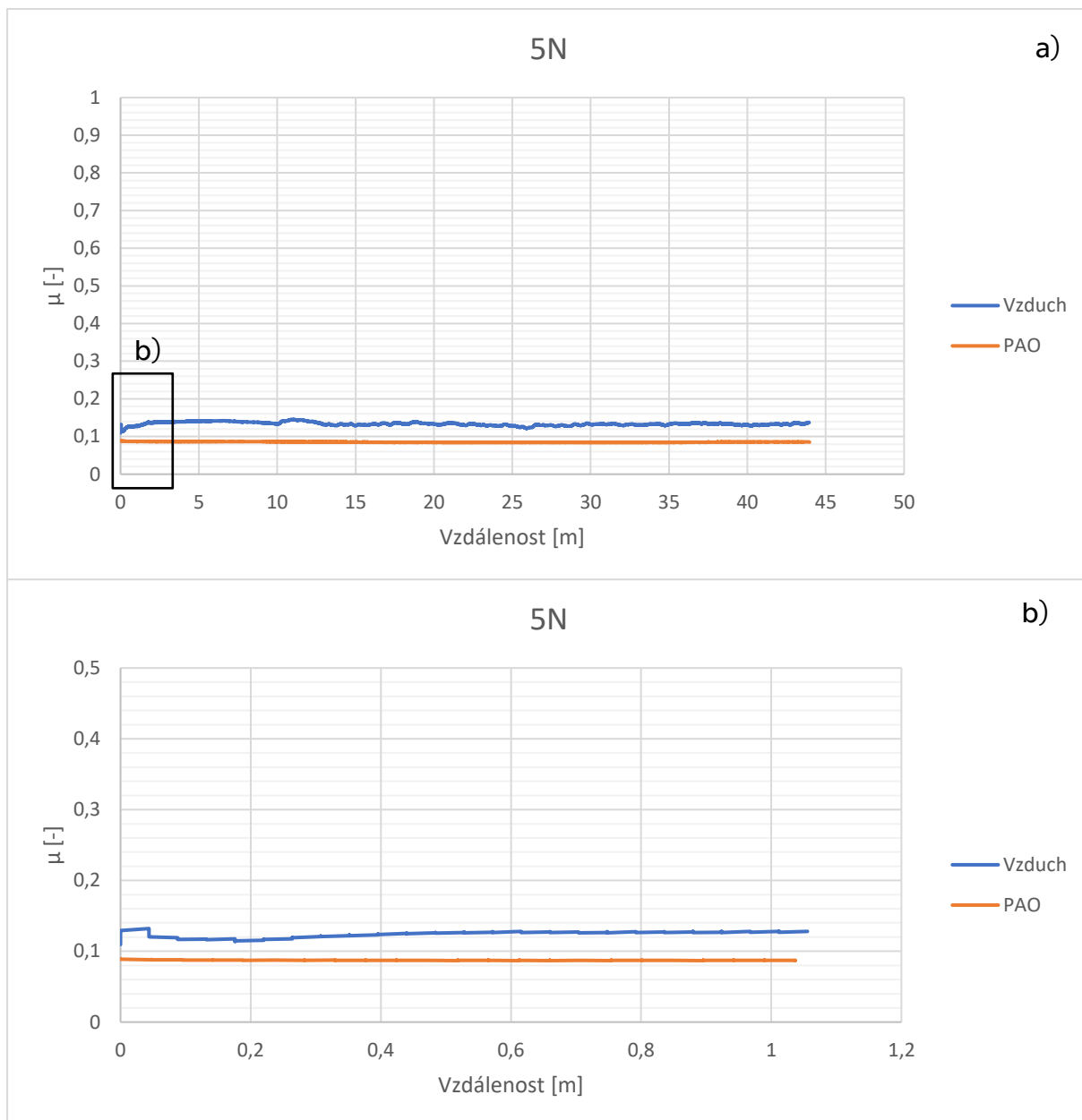
Obrázek 23 Průběh koeficientu tření při zatížení 1N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze

Na obrázcích 23, 24, 25 a 26 je vidět, že v čistém PAO oleji dochází k okamžitému ustálení a ke stabilitě koeficientu tření. Grafy jsou si velice podobné, bez ohledu na zatížení. Oproti tomu na vzduchu je zřetelné, že dochází v závislosti na zatížení k postupnému ustálení koeficientu tření na určité hodnotě. Což můžeme vidět na obrázku 23, kde zatížení je 1 N. Zde dochází k pomalému růstu koeficientu tření a k jeho ustálení na hodnotě 0,14 až 0,15.



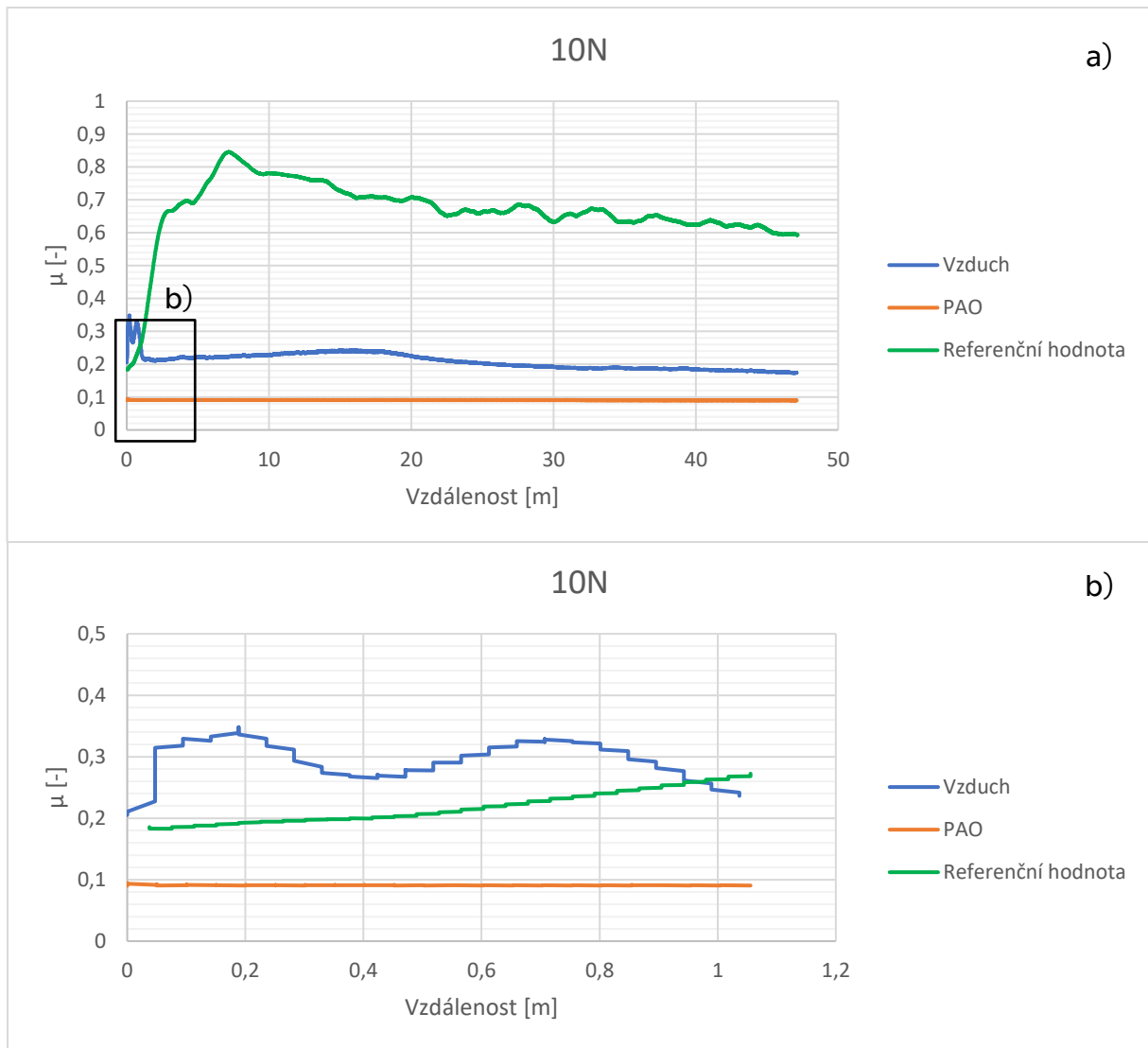
Obrázek 24 Průběh koeficientu tření při zatížení 2N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze

Na obrázcích 24 a 25 jsou vidět odlišné děje než na obrázku 23. Na nich je vidět, že s rostoucím zatížením se zkracuje doba ustálení na trvalých hodnotách.



Obrázek 25 Průběh koeficientu tření při zatížení 5N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze

Na obrázcích 23a, 24a a 25a je vidět, že při měření na vzduchu se doba záběhu v závislosti na zatížení zkracuje.

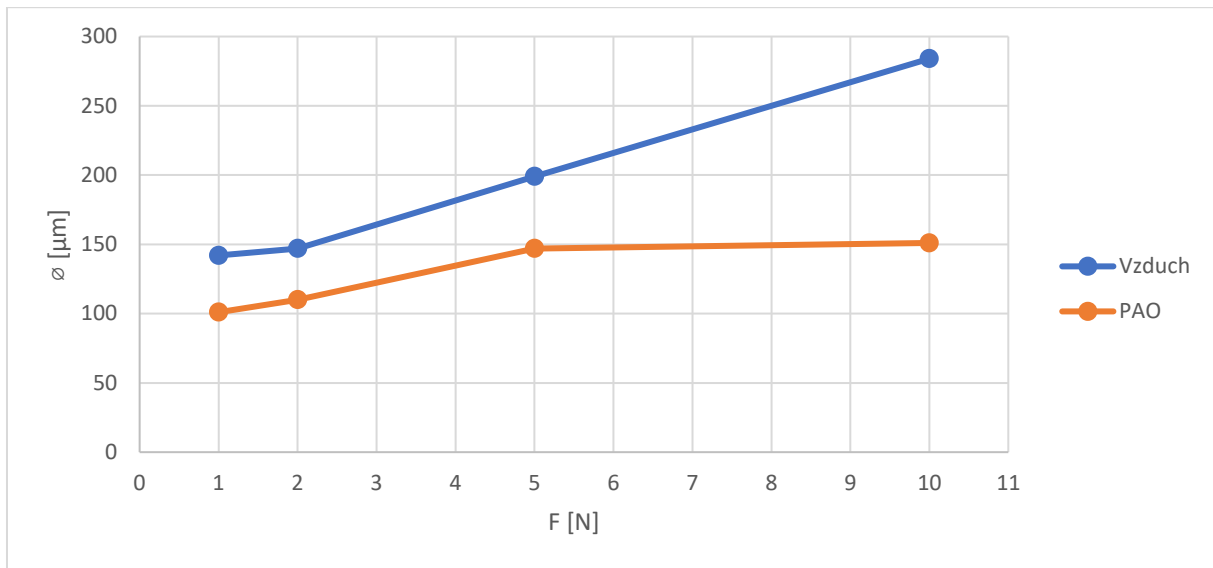


Obrázek 26 Průběh koeficientu tření při zatížení 10N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze

Zajímavý průběh koeficientu tření je vidět na obrázku 26b. Zelená křivka znázorňuje průběh referenční hodnoty, což je koeficient tření dvou ocelových materiálů bez DLC povlaku na vzduchu. Při měření povlakovaných materiálů na vzduchu došlo na začátku záběhové fáze k poškození DLC povlaku, což se projevilo dvěma vlnami viditelnými na detailu modré křivky (obrázek 26 b). Přesto po zaběhnutí se koeficient tření rychle ustálil na nízkých hodnotách a jeho průběh kopíroval křivku povlakovaných materiálů v PAO oleji. Kdežto křivka nepovlakovaných ocelí ve vzduchu během záběhové fáze rychle stoupala vzhůru a ustálila se na násobně vyšších hodnotách než u ocelích povlakovaných.

Tabulka 3 Porovnání koeficientů tření mezi měřeními na vzduchu a v oleji PAO

Zatížení F [N]	$\mu_{\text{vzduch}} [-]$	$\mu_{\text{PAO}} [-]$
1	0,14-0,15	0,09
2	0,14-0,16	0,09
5	0,13-0,14	0,08
10	0,18-0,20	0,09



Obrázek 27 Porovnání průměrů vzniklých ploch na kuličkách

Při pokusu s 10 N došlo k okamžitému porušení kuličky. Toto porušení znamenalo značný růst koeficientu tření nejspíše proto, že porušení kuličky nastalo okamžitě a tím vzniklé třetí těleso se chovalo ze začátku značně abrazivně. Až po chvíli se třetí těleso začalo chovat jako tuhé mazivo a docházelo ke značnému poklesu koeficientu tření.

Z naměřených ploch na kuličkách a ze zatěžující síly byly spočítány působící kontaktní tlaky mezi vzorkem a kuličkou (4).

$$p = \frac{F}{S} \quad (4)$$

kde:

p ... kontaktní tlak

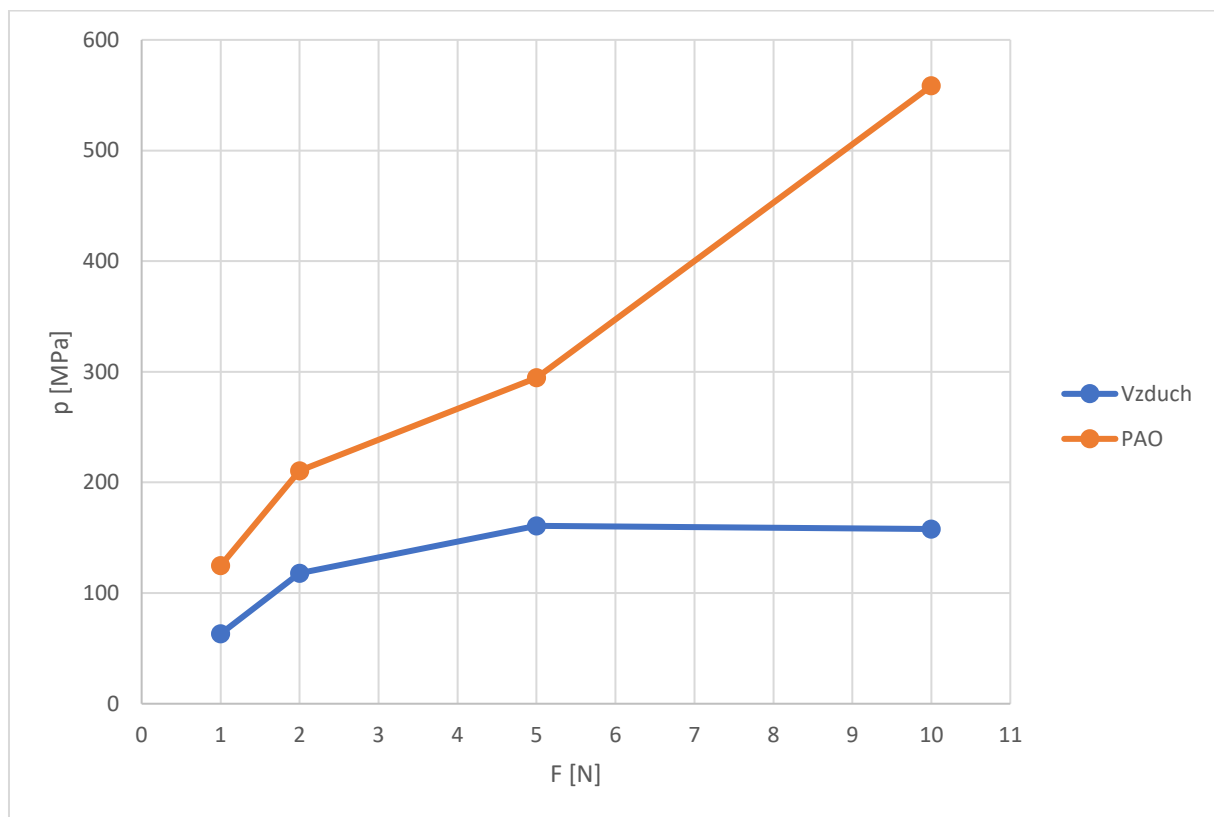
F ... zatěžující síla

S ... plocha na kuličce

d ... průměr vrchlíku na kuličce

Tabulka 4 Vypočítané kontaktní tlaky mezi kuličkou a vzorkem

Zatěžující síla F [N]	Vzduch			Čistý PAO olej		
	d [μm]	S [mm ²]	p [MPa]	d [μm]	S [mm ²]	p [MPa]
1	142	0,016	49,59	101	0,032	98,02
2	147	0,017	92,55	110	0,038	165,28
5	199	0,031	126,25	147	0,068	231,38
10	284	0,063	123,98	151	0,072	438,57



Obrázek 28 Porovnání kontaktních tlaků vzniklých mezi kuličkou a vzorkem

Tím, že nedocházelo k značnému úbytku materiálu a vzniku plošky na kuličce v čistém PAO oleji, výrazně vzrostl kontaktní tlak mezi kuličkou a vzorkem, jak můžeme vidět na obrázku 28 a v tabulce 4. Naproti tomu na vzduchu kontaktní tlak od zatížení 2 N již nerostl.

4. Závěr

Záběhová fáze třecí dvojice DLC - DLC byla hodnocena při konstantní lineární rychlosti v závislosti na rostoucí zatěžovací síle ve dvou různých pracovních prostředích, na vzduchu a v PAO oleji. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno:

1. Koeficient tření se ustálí ihned v počáteční fázi v PAO oleji. Na vzduchu k ustálení dochází později. Olej přispívá k celkové stabilitě záběhové fáze.
2. Koeficient tření v PAO oleji nezáleží na zatížení. Dosahoval při různém zatížení stejných hodnot v rozmezí 0,08-0,09.
3. Koeficient tření na vzduchu se ustálil na hodnotě v rozmezí 0,13-0,15. Při zatížení 10 N ale došlo k celkovému porušení povlaku na kuličce.
4. Na vzduchu vznikaly viditelné třecí stopy, které se s rostoucím zatěžováním zvětšovaly, v oleji se viditelné stopy nevytvořily. Opotřebení kuliček na vzduchu je také mnohem výraznější než v oleji.

Provedené tribologické testy potvrdily předpoklad, že záběhová fáze třecí dvojice DLC - DLC je složitý proces. V dostupných zdrojích není zcela jasně uveden důvod, proč dochází k menšímu opotřebení materiálu na kuličkách než na discích. Pro pochopení tohoto jevu by bylo potřeba uskutečnit větší počet experimentů, aby byly jejich výsledky statisticky průkazné.

Dalším možným důvodem, proč dochází k rozdílům v naměřené šířce třecí stopy a rozměrů vrchlíku na testovací kuličce, je působení třetího tělesa. Toto ovšem nebylo možné provedenými zkouškami průkazně dokázat.

Literatura

- [1] Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu. *MM Spektrum* [online]. Bratislava: MM Průmyslové spektrum, 2020 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [2] Diamantový uhlík - Diamond-like carbon. Qwe [online]. Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-07-31]. Dostupné z: https://cs.qwe.wiki/wiki/Diamond-like__carbon
- [3] BLAŠKOVITŠ, Pavel, Marián DZIMKO a Jozef BALLA. Tribológia. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa). ISBN ISBN 80-05-00 633-0.
- [4] BEČKA, Jan. Tribologie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
- [5] WU, Xingyang, Akihiro TANAKA, Takako NAKAMURA a Tsuguyori OHANA. Gaseous Tribochemical Products of Hydrogenated DLC Film and Stainless Steel Pair in Air Detected by Mass Spectrometry: Tribology Letters. Springer Science [online]. Springer US, 2015, 24(67), 57-62 [cit. 2019-11-10]. DOI: Xingyang WuEmail authorTsuguyori OhanaEmail authorTakako NakamuraAkihiro Tanaka. ISSN ISSN 1573-2711. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11249-014-0448-3>
- [6] BHUSHAN, Bharat a Paul PETRALIA. Principles and Applications of Tribology: Tribology in Practice Ser. [online]. 2. N/A: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013 [cit. 2019-11-13]. ISBN ISBN 9781118403006. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1117006>
- [7] ZENG, Hongbo. Polymer Adhesion, Friction, and Lubrication [online]. 1. N/A: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013 [cit. 2019-11-13]. ISBN ISBN 9781118505137. Dostupné z:

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=112463>
9.

- [8] Laminární a turbulentní proudění. <https://physics.mff.cuni.cz/> [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5
- [9] TRAPP, Martin a Fang CHEN. Automotive Buzz, Squeak and Rattle - Mechanisms, Analysis, Evaluation and Prevention [online]. 1. N/A: Elsevier, 2012 [cit. 2021-07-15]. ISBN 978-0-7506-8496-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpABSRMAE1/automotive-buzz-squeak/automotive-buzz-squeak>
- [10] BRUCE, Robert. The Handbook of Lubrication and Tribology: Theory and Design: Theory and Design. Baton Rouge, UNITED STATES: CRC Press LLC, 2012. ISBN 9781420069099. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=945462>
- [11] BLAU, Peter. On the nature of running-in: Tribology International. ScienceDirect [online]. 2005, 38(11-12), 1007-1012 [cit. 2019-11-12]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>.
- [12] KŘÍŽ, Antonín a Jiří HÁJEK. TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI SYSTÉMU TENKÁ VRSTVA-SUBSTRÁT. 1. Hradec nad Moravicí: Metal, 2004.
- [13] Zvyšování spolehlivosti součástí superfinišováním [online]. 2001 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-spolehlivosti-soucasti-superfinisovanim>
- [14] Vlastnosti povrchu stykových ploch. SKF [online]. NA: NA, NA [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/seals/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/specifications-for-effective-sealing-systems/counter-surface-finish-properties/index.html>

- [15] REDDYHOFF, Tom, Aaron SCHMIDT a Hugh SPIKES. Thermal Conductivity and Flash Temperature. *Tribology Letters*. 2019, 67(1), 22. DOI: 10.1007/s11249-018-1133-8. ISSN 1573-2711. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1133-8>
- [16] KALIN, Mitjan a Jože VIŽINTIN. Comparison of different theoretical models for flash temperature calculation under fretting conditions. *Tribology International*. 2001, 34(12), 831-839. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00083-4). ISSN 0301-679X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X01000834>
- [17] STACHOWIAK, Gwidon a Andrew BATCHELOR. *Engineering Tribology* [online]. 4. N/A: Elsevier Science & Technology, 2013 [cit. 2019-11-14]. ISBN 9780123970473. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1402495>
- [18] SUTTER, G. a N. RANC. Flash temperature measurement during dry friction process at high sliding speed. *Wear* [online]. 2010, 268(11-12), 1237-1242 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.01.019. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164810000323>
- [19] SUZUKI, S. a F.E. KENNEDY. Measurement of flash temperature and contact between slider and magnetic recording disk. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 25(5), 3728-3730 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1109/20.42415. ISSN 00189464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/42415/>
- [20] JAKUBÉCZYOVÁ, Dagmar, Marek KOČÍK a Pavol HVIZDOŠ. Multicomponent Thin Films Deposited by PVD ARC and LARC Technology. *Materials Science* [online]. 2014, 20(1), 36-41 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.5755/j01.ms.20.1.3716. ISSN 2029-7289. Dostupné z: <http://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/3716>

- [21] Tenké vrstvy. Opi.zcu [online]. 2006 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf
- [22] Calotest. Tribotechnic [online]. CLICHY: Tribotechnic, 2015 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.tribotechnic.com/en/products/calotest>
- [23] ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. Anti-abrasive nanocoatings. 1. Boston, MA: Elsevier, 2014. ISBN isbn978-0-85709-211-3.
- [24] NAIR, Rahul, Drew GRIFFIN a Nicholas RANDALL. The use of the pin-on-disk tribology test method to study three unique industrial applications. Wear [online]. 2009, 267(5-8), 823-827 [cit. 2019-12-04]. DOI: 10.1016/j.wear.2009.02.026. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164809002567>
- [25] VETTER, J. 60 years of DLC coatings: Historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications. Surface and Coatings Technology [online]. 2014, 257, 213-240 [cit. 2019-12-04]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.017. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897214007257>
- [26] MATTOX, Donald. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (2nd Edition) [online]. 2. N/A: Elsevier, 2010 [cit. 2021-07-15]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPVDPV04/handbook-physical-vapor/handbook-physical-vapor>
- [27] GARCÍA, José, Pedro RIVERO, Rocío ORTIZ, Iban QUINTANA a Rafael RODRÍGUEZ. Advanced Surface Treatments for Improving the Biocompatibility of Prosthesis and Medical Implants. Advanced Surface Engineering Research [online]. InTech, 2018 [cit. 2020-07-14]. DOI: 10.5772/intechopen.79532. ISBN 978-1-78984-339-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advanced-surface-engineering->

research/advanced-surface-treatments-for-improving-the-biocompatibility-of-prosthesis-and-medical-implants

- [28] Příprava vzorku [online]. 2004 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/povrch/xps/aparatura1.html>
- [29] BISHOP, Charles. Vacuum deposition onto webs, films, and foils. 1. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2007. ISBN isbn978-0-8155-1535-7.
- [30] LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. Odborné časopisy [online]. Plzeň: ELEKTRO, 2003 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>
- [31] PACVD technologie. Ionbond [online]. Humpolec: IHI Ionbond AG, 2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/cz/technologie/pacvd/>
- [32] GÜNZEL, Martin. Metody depozice tenkých vrstev pomocí nízkoteplotního plazmatu. České Budějovice, 2013.. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
- [33] HNILICA, František, Ladislav JOSKA, Vítězslav BŘEZINA, Sonia BARTÁKOVÁ a Ladislav CVRČEK. POVRCHOVÁ ÚPRAVA TITANOVÝCH SLITIN POVLAKY DLC [online]. In: Rožnov pod Radhoštěm: Metal, 2010, s. 8 [cit. 2021-06-27]. Dostupné z: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_10/lists/papers/165.pdf
- [34] VENGUDUSAMY, Balasubramaniam, Riaz MUFTI, Gordon LAMB, Jonathan GREEN a Hugh SPIKES. Friction properties of DLC/DLC contacts in base oil: Tribology International. ScienceDirect [online]. 2011, 44(7-8), 922-932 [cit. 2019-11-10]. ISSN ISSN 0301-679X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X11000600>
- [35] VENGUDUSAMY, Balasubramaniam, Jonathan GREEN, Gordon LAMB a Hugh SPIKES. Tribological properties of tribofilms formed from ZDDP in DLC/DLC

- and DLC/steel contacts: Tribology International. ScienceDirect [online]. 2011, 44(2), 165-174 [cit. 2019-11-10]. ISSN ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X10002665#f0010>
- [36] BULL, S.J. Tribology of carbon coatings: DLC, diamond and beyond: Diamond and Related Materials. ScienceDirect [online]. 1995, 4(5-6), 827-836 [cit. 2019-11-10]. ISSN ISSN 0925-9635. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925963594053251>
- [37] TANAKA, Yuto. Diamond-Like Carbon Films: Materials Science and Technologies [online]. 1. N/A: Nova Science Publishers, Incorporated, 2012 [cit. 2019-11-14]. ISBN ISBN 9781613249093. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=3019731>
- [38] VENGUDUSAMY, Balasubramaniam, Jonathan GREEN, Gordon LAMB a Hugh SPIKES. Influence of hydrogen and tungsten concentration on the tribological properties of DLC/DLC contacts with ZDDP: Wear. ScienceDirect [online]. 2013, 298–299(1), 109-119 [cit. 2019-11-10]. ISSN ISSN 0043-1648. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164813000306>
- [39] TANAKA, A., M. SUZUKI a T. OHANA. Friction and Wear of Various DLC Films in Water and Air Environments: Tribology Letters. Springer Science [online]. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2004, 17(4), 917-924 [cit. 2019-11-10]. ISSN ISSN 1573-2711. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-004-8100-2>
- [40] PERTLÍK, Dan. VLIV PODLOŽKY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POVLAKŮ PŘI MAGNETRONOVÉM NAPRAŠOVÁNÍ. Praha, 2016.. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, Ústav materiálového inženýrství. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vladimír Starý, CSc.
- [41] FLORES-RENTERÍA, M., M. ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M. KEDDAM et al. A Simple Kinetic Model for the Growth of Fe₂B Layers on AISI 1026 Steel During the

Powder-pack Boriding. High Temperature Materials and Processes [online]. 2015, 34(1), 1-11 [cit. 2020-07-18]. DOI: 10.1515/htmp-2014-0004. ISSN 2191-0324. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/htmp.2015.34.issue-1/htmp-2014-0004/htmp-2014-0004.xml>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Pohyb tělesa po jiném tělese [6].....	9
Obrázek 2 Schematické znázornění oddělení části materiálu, při adhezním opotřebení [6].....	11
Obrázek 3 Nahoře se tvrdší a drsnější materiál otírá o méně drsnější materiál. (a) Brusný kotouč. (b) abrazivo [6]	11
Obrázek 4 Abbottova křivka [14]	13
Obrázek 5 Kalotest [21].....	15
Obrázek 6 Princip kalotestu [22].....	15
Obrázek 7 Pin-on-disk [24]	17
Obrázek 8 Vyhodnocení metody Pin-on-disk [24]	17
Obrázek 9 Příklad PVD napařovačky [27]	18
Obrázek 10 Magnetronové napařování [28].....	19
Obrázek 11 Kalotest [40]	25
Obrázek 12 Kalotest	25
Obrázek 13 Scratch test - a) porušení koheze při 14 N a b) porušení adheze při 17 N.....	26
Obrázek 14 Tabulka vyhodnocování indentačního testu [41].....	27
Obrázek 15 Výsledek indentačního testu	27
Obrázek 16 Vzniklé stopy na vzduchu	28
Obrázek 17 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 1 N.29	
Obrázek 18 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 2 N.29	
Obrázek 19 Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 5 N.29	

Obrázek 20 Vlevo: Vlevo je vzniklá stopa a vpravo opotřebení kuličky při zatížení 10 N.....	29
Obrázek 21 Vzniklé stopy v čistém PAO oleji byly minimální (nebylo je možné vyhodnotit).....	30
Obrázek 22 Opotřebení kuliček při zatížení 1N, 2N, 5N a 10N.....	31
Obrázek 23 Průběh koeficientu tření při zatížení 1N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze	32
Obrázek 24 Průběh koeficientu tření při zatížení 2N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze	33
Obrázek 25 Průběh koeficientu tření při zatížení 5N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze	34
Obrázek 26 Průběh koeficientu tření při zatížení 10N: a) celkový průběh a b) detail záběhové fáze	35
Obrázek 27 Porovnání průměrů vzniklých ploch na kuličkách	36
Obrázek 28 Porovnání kontaktních tlaků vzniklých mezi kuličkou a vzorkem.....	37

Seznam tabulek

Tabulka 1 Koeficient tření na vzduchu.....	28
Tabulka 2 Koeficient tření v PAO.....	30
Tabulka 3 Porovnání koeficientů tření	36
Tabulka 4 Výsledky testů	37