

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 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Švehla** Jméno: **František** Osobní číslo: **473698**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací 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**

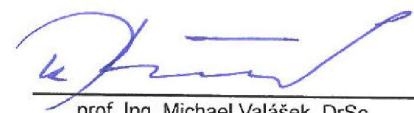
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

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

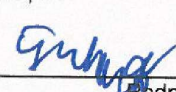
  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
\_\_\_\_\_  
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.

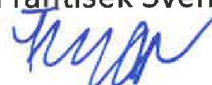
4. 6. 2020  
Datum převzetí zadání

  
\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## 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



## Poděkování

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

## **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; TiNb-DLC; PAO; Třecí dvojice

## **Abstract**

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

## **Keywords**

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

# 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.....                   | 20 |
| 3     | Experimentální část.....                       | 21 |
| 3.1   | Příprava vzorků.....                           | 21 |
| 3.2   | Mechanické vlastnosti povlaku .....            | 22 |
| 3.2.1 | Stanovení tloušťky povlaku.....                | 22 |
| 3.2.2 | Adheze povlaku .....                           | 23 |
| 3.3   | Tření a opotřebení .....                       | 25 |
| 3.3.1 | Metoda „Pin-on disk“ .....                     | 25 |
| 3.3.2 | Na vzduchu.....                                | 25 |
| 3.3.3 | V čistém PAO oleji .....                       | 27 |
| 3.3.4 | Porovnání tření na vzduchu a v PAO oleji ..... | 29 |
| 4     | Závěr.....                                     | 33 |

# 1 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. K porozumění záběhu se dlouho nevěnovala řádná pozornost. Při záběhu jsou menší kontaktní plochy, tudíž jsou i větší tlaky a hrozí snížení životnosti povrchu nebo degradace povlaku v počáteční fázi záběhu.

DLC (diamond-like carbon - diamantu podobný uhlík) povlaky nebo jejich modifikace se dnes stávají běžnou součástí strojírenských komponentů. Využívají se například na nástroje pro třískové obrábění a nástroje pro tváření za studena. Jsou uplatňovány i v automobilovém průmyslu, kde pomáhají zvýšit životnost dílů. Také nacházejí uplatnění v medicíně coby biomateriály [1], [2].

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

## 2 Teoretická část

### 2.1 Tribologie

Tribologie je základním technickým oborem, který využívá poznatky jak klasických technických, tak i přírodních věd. Základem slova tribologie je řecké slovo pro tření, což je tribos. Mezinárodní tribologická rada (Internacional Tribology Council – ITC) zavedla definici tribologie.

Podle této definice je tribologie věda i technologie zabírající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu a s nimi souvisejícími subjekty a praktikami [3].

Další uváděná definice je:

Tribologie je nauka o vědeckém výzkumu a technickém použití zákonitostí a poznatků pro vědní obory tření, opotřebením a mazání. Jde o vědu, která se zabývá určováním a změnou struktur a chování se všech možných 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 v převodovkách, ložiskách apod. 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 opotřebením materiálů má i další ekologický i ekonomický význam. Není totiž nutné předčasně opotřebené část stroje nahrazovat novými [3], [4].

#### 2.1.1 Tribochemie

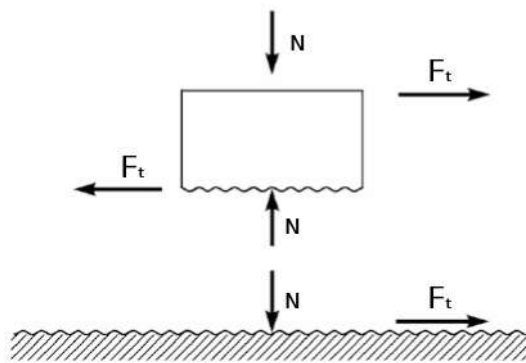
Tribochemie obecně odkazuje na chemické jevy v tribologickém procesu, včetně chemických reakcí na kontaktních plochách mezi mazacími složkami



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 vyplývá, že čím větší je vzájemná rychlost pohybu ploch, tím tlustší musí být mazací vrstva. To samé platí pro viskozitu [6], [7].

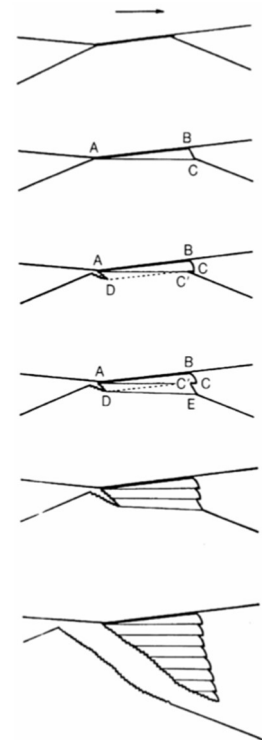
### 2.1.3 Opotřebení

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 společné 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], [8].

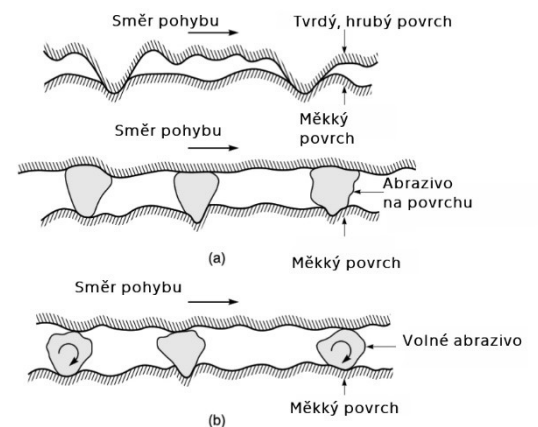


### 2.1.3.2 Abrazivní opotřebení

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



Obrázek 3 Nahoře se tvrdší a drsnější materiál otírá o méně drsnější materiál. (a) Brusný kotouč. (b) Volné 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], [9].

### 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. Účinnost tuhých maziv se snižuje 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], [9].

### 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. I silná vrstva vzduchu mezi dvěma pohyblivými povrchy je způsobem dobrého mazání [3], [4], [6], [7], [9].

## 2.1.5 Kluzné dvojice

Zvuk houslí i nepříjemné pískání při posuvu umělých materiálů mají stejnou příčinu - jeden materiál sklouzne po jiném materiálu, přitom vznikne energie, která způsobí zvuk, který slyšíme. Všechno to jsou kluzné dvojice, ve které má každý prvek kluzný kontakt vzhledem k druhému prvku. Charakterizovat jeden materiál není jednoduché, ale charakterizovat dva materiály jako kluznou dvojici je o řád těžší [8].

Především máme adhezi, která vzniká chemickým nebo fyzikálním spojením mezi dvěma materiály, které jsou v kontaktu. Aby se dosáhlo jakékoli formy spojení, musí se povrchové plochy přiblížit k sobě a musí se vzájemně dotýkat. Potom máme vzájemnou afinitu povrchů. Třetí důležitou skupinou ovlivňující podmínky jsou vnější parametry. Protože se materiály mění s teplotou a vlhkostí, bude efekt skluzu také ovlivněn teplotou a vlhkostí. Kluzné dvojice se většinou vyhodnocují jen pro ty dva zkoušené materiály. Přitom se určuje vzájemné opotřebení a součinitel tření [8].

### 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 někdy ignorovány nebo jednoduše akceptovány jako normální průběh provozu. Bylo však zjištěno, že je lepší součásti, jako jsou ložiska nebo převody, nechat 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). 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 [10].



Obrázek 2 Abbotova křivka [11]

#### 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. Tady intenzita produkce tepla spojená s tepelnou difuzí jednoho

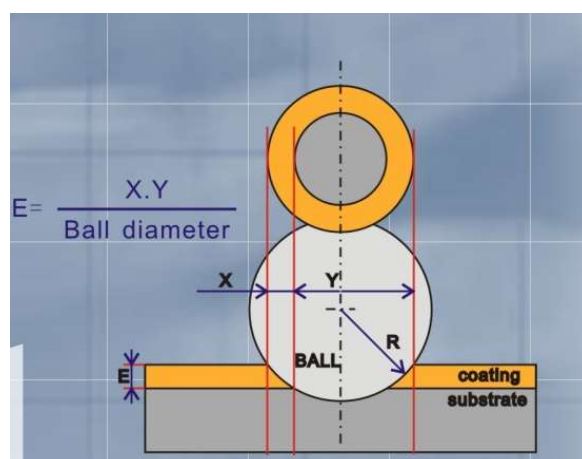
nebo obou o sebe třecích ploch vytváří lokální a přechodné zvýšení teploty jen několik mikronů hluboko do povrchu. Předpokládá se, že tento vzestup teploty ovlivňuje několik důležitých tribologických procesů, včetně opotřebení. Celý proces bleskové teploty je velmi rychlý. Může způsobit vytváření oxidů, 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 [12], [13], [14], [15], [16].

## 2.1.7 Testování mechanických vlastností povlaků

### 2.1.7.1 Tloušťka

Pro měření tloušťky povlaku se používá metoda kalotes (obrázek 5). 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 [17].



Obrázek 3 Princip kalotestu [18]

### 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. K nim patří tloušťka povlaku, mechanické vlastnosti substrátu a také zkušební podmínky, jako je rychlost rytí, zatížení hrotu a jeho poloměr [19].

### 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 6).

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:

$$V_{vzorek} = \pi r S \quad (1)$$

kde:

$V_{vzorek}$  = Objem úbytku materiálu

$r$  = Poloměr stopy

$S$  = Plocha stopy

Vzorec pro výpočet opotřebení kuličky:

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

kde:

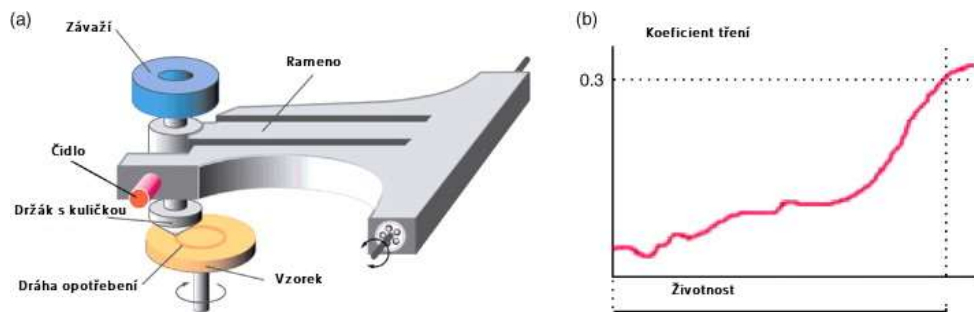
$V_{kulička}$  = Objem úbytku materiálu

$A$  = Nejmeší průměr stopy

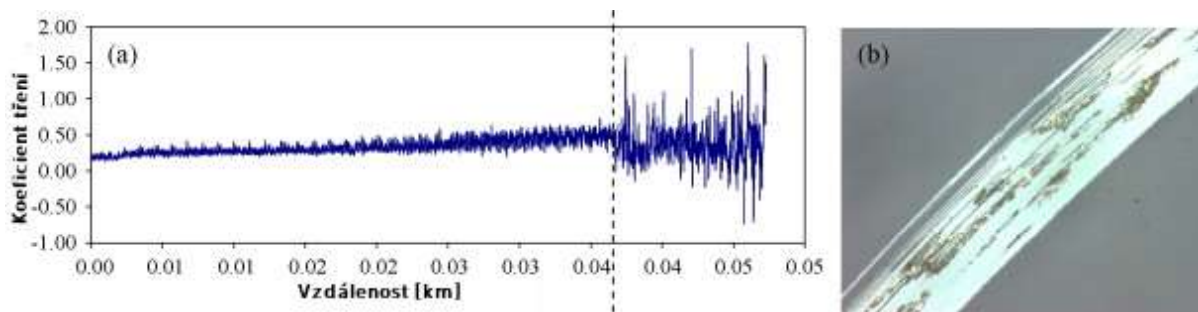
$B$  = Průměr v kolmém směru

$D$  = 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 4 Pin-on-disk [20]



Obrázek 5 Vyhodnocení metody Pin-on-disk [20]

Příklad průběhu tření je uveden na obrázku 7. 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 [20], [21].



## 2.2 Metody povlakování

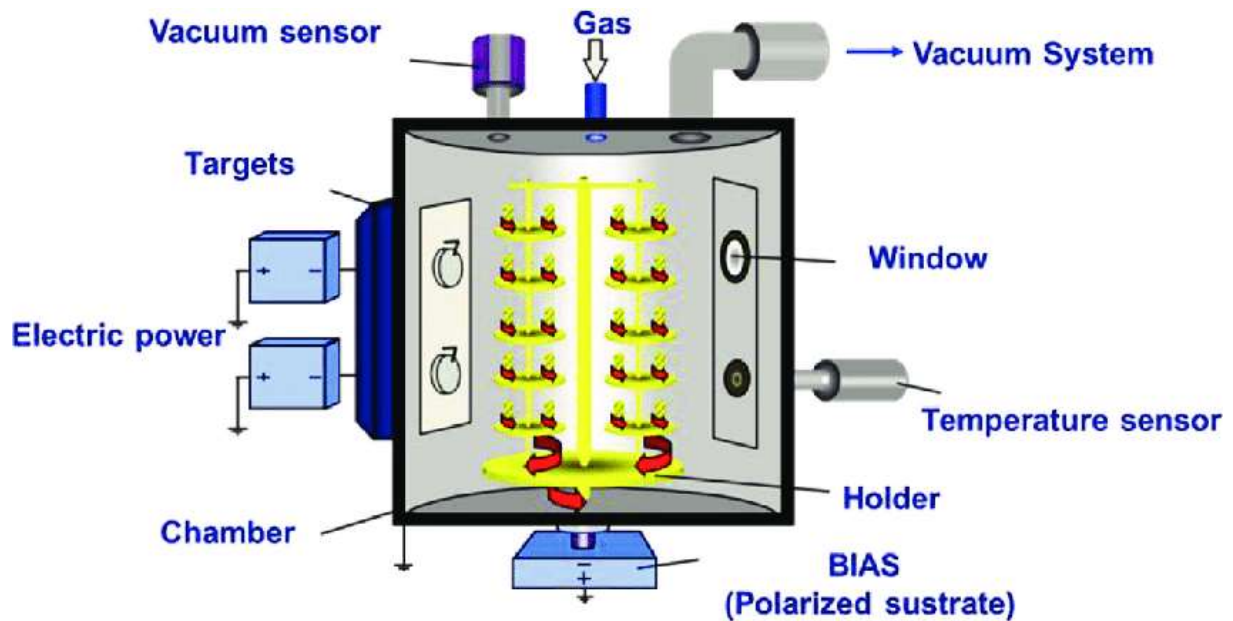
### 2.2.1 PVD (Physical Vapor Deposition)

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 Vakuová depozice

Materiál ze zdroje za za pomocí 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 zahřívaných zdrojů (obrázek 8). Obecně jsou substráty namontovány ve výrazné vzdálenosti od zdroje odpařování, aby se snížilo sálavé zahřívání substrátu zdrojem tepla [22].



Obrázek 6 Příklad PVD napařovačky [23]

### 2.2.1.2 Magnetronové napařování

Magnetronové napařování je zdokonalená technologie klasického napařování. Napařování probíhá ve vakuu, kde je umístěná katoda, která je z materiálu, jenž se bude napařovat. Poblíž se umístí předmět, na kterém se bude vytvářet povlak z materiálu katody, tento předmět se nazývá terč. Před terčem je vytvořeno magnetické pole, jehož tvar je definován elektromagnetem nebo permanentními magnety. Toto zařízení se nazývá magnetron.

Elektrony, které při klasickém napařování 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 [24], [25].

### 2.2.1.3 PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)

Technologie PACVD (Chemická depozice vrstev za asistence plazmatu) je vakuový 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 od 2 do 3  $\mu\text{m}$  [26].

Tyto vrstvy jsou vytvářeny za pomoci elektrického výboje v plazmatu. Důležité je, aby molekuly pracovního plynu získaly dostatek energie. Výhodou je, že výroba dle této metody může probíhat i za teplot do 300°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[27].

#### 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 sypané 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 a optické vlastnosti, biokompatibilita a vynikající tribologické chování v mnoha inženýrských aplikacích.

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 [28]. 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 [28], [29] [30], [31].

## **2.2.2 Třecí dvojice DLC - DLC**

### **2.2.2.1 V mazivu**

Z počátku mají DLC povlaky v oleji nízký koeficient tření kvůli vysoké rychlosti strhávání. Po zaběhnutí dochází k vyhlazení povrchu, ale nedochází k výraznému opotřebení. Při měření pomocí metody pin-on-disk dochází k většímu opotřebení kotouče než kuličky. Po nějaké době dochází ke grafitizaci povrchu, což způsobuje snížení tření mezi plochami [28], [29], [32].

### **2.2.2.2 Na vzduchu**

Tření na vzduchu se dá rozdělit na suché (bez vzdušné vlhkosti) a vlhké (se vzdušnou vlhkostí).

Tření DLC povlaků je silně ovlivněno chemickými složkami prostředí. Má se za to, že vysoké tření DLC povlaků v inertním prostředí je způsobeno interakcí mezi kluznými povrchy a reaktivními složkami, jako je voda nebo kyslík. Ty potom mohou pasivovat povrch a tím snížit tření. Je také prokázáno, že tření DLC povlaků je silněji ovlivněno vodou než kyslíkem. Dochází k vytváření oxidů kvůli přítomnosti kyslíku a vodních par ve vzduchu. Důsledkem je tak tribochemický děj [5], [33].

## 3 Experimentální část

### 3.1 Příprava vzorků

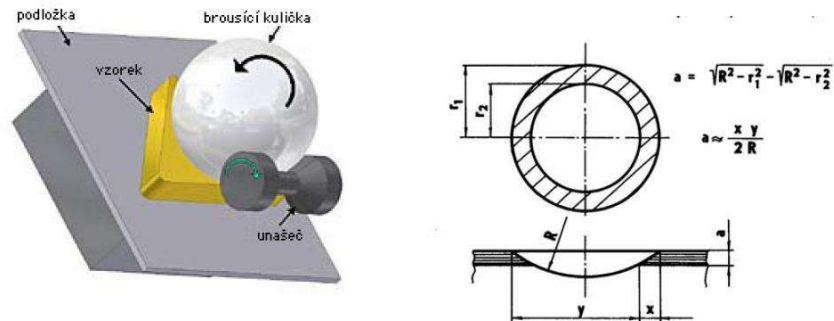
Základní materiál pro povlakování byl připraven ve formě vzorků o průměru 20 mm a výšce 4 mm, které byly broušeny a leštěny na leštičce Leco GPX 300. Vzorky byly z oceli X153CrMoV12. Tato ocel byla zakalená na tvrdost 62 HRC. Jedná se o nástrojovou ocel ledeburitického typu s výbornou odolností proti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

Povlaky TiNb-DLC (TiNb-C:H) byly připraveny na 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 TiNb, která byla deponována metodou nerovnovážného magnetronového naprašování z titanového (99,50 %) a niobového (99,95 %) terče v argonové atmosféře (99,999 %) po dobu 20 minut. Gradientní přechod z čistého TiNb na TiNb-C:H byl vytvořen zvyšováním toku acetyleny (99,60 %) z 20 sccm na konečných 70 sccm za dobu 15 minut. Funkční vrstva TiNb-C:H byla deponována metodou reaktivního magnetronového naprašování z titanového a niobového terče s tokem acetyleny 70 sccm, přičemž tento proces probíhal po dobu 4 hodin. Depoziční teplota byla 200 °C. Použito bylo pulzní předpětí – 75 V s frekvencí 40 kHz na substrátech. Pracovní tlak byl  $4 \cdot 10^{-1}$  Pa a příkon na titanové katodě 4 kW a niobové 3 kW v pulzním režimu s frekvencí 40 kHz.

## 3.2 Mechanické vlastnosti povlaku

### 3.2.1 Stanovení tloušťky povlaku

Tloušťka povlaku TiNb-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 9). Vzniklá kalota se poté vyhodnocuje na optickém mikroskopu, zde se změří průměry vzniklých vrstevnic. Pomocí rovnice se vypočítá tloušťka vrstvy (3).



Obrázek 7 Kalotest [34]

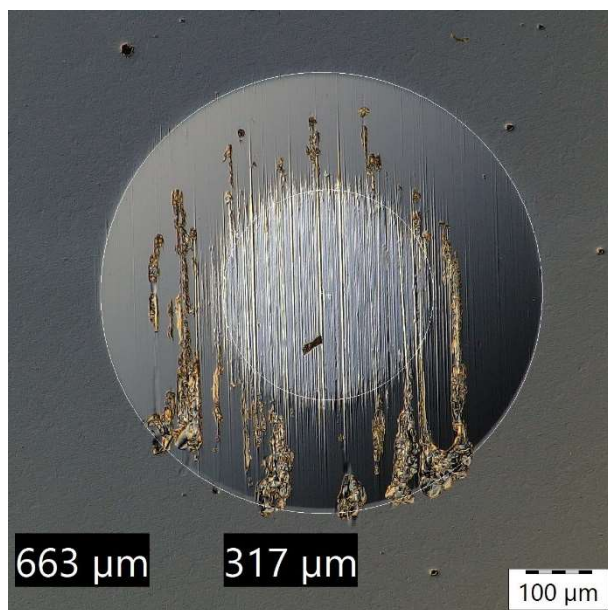
$$t = \sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2} \quad (3)$$

R= poloměr kuličky

r<sub>1</sub>= poloměr malého výbrusu

r<sub>2</sub>= poloměr velkého výbrusu

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



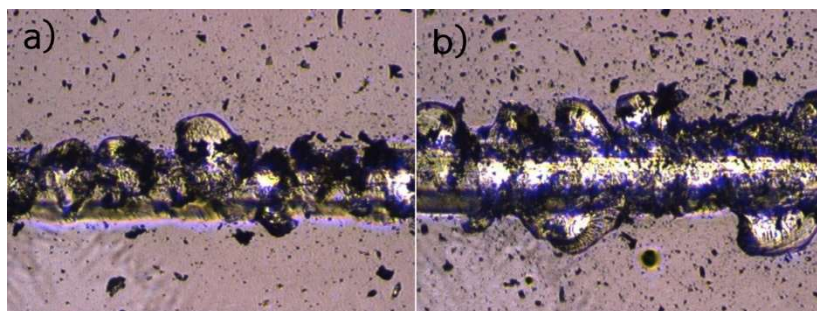
Obrázek 8 Kalotest

Z kalotestu (obrázek 10) bylo pomocí mikroskopu odečteno  $r_2= 663 \mu\text{m}$  a  $r_1=317 \mu\text{m}$ . Tloušťka povlaku vyšla  $2,8 \mu\text{m}$ .

## 3.2.2 Adheze povlaku

### 3.2.2.1 Vrypová zkouška („Scratch test“)

Adhéze 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.



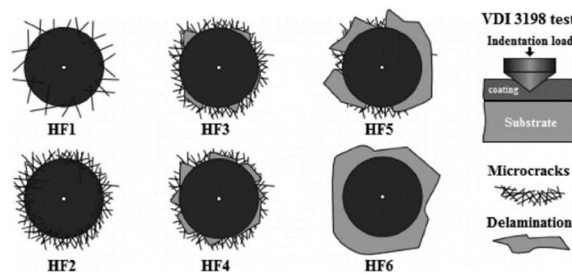
Obrázek 9 Scratch test - a) porušení koheze při 14 N a b) porušení adheze při 17 N

Ke koheznímu porušení povlaku (obrázek 11a) došlo při kritické síle 14 N a porušení adheze nastalo při 17 N (obrázek 11b).

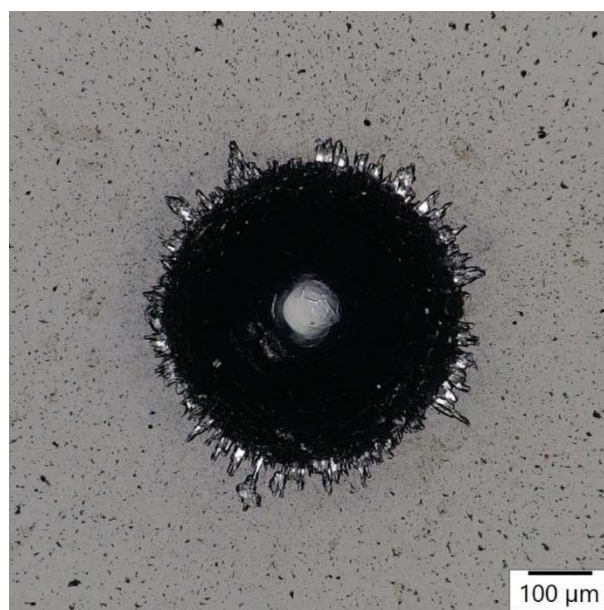
### 3.2.2.2 Indentační test („Mercedes test“)

Indentačním (vnikacím) testem se posuzuje adhéze 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 12). HF1 až HF3 se považují za vzorky s dobrou adhezí.

V našem případě (obrázek 13) na základě provedého testu a vyhodnocení na optickém mikroskopu, kde bylo na okraji vidět jen mírné odlupování povlaku, byla adhéze vyhodnocena jako HF3.



Obrázek 10 Tabulka vyhodnocování indentačního testu [35]



Obrázek 11 Výsledek indentačního testu



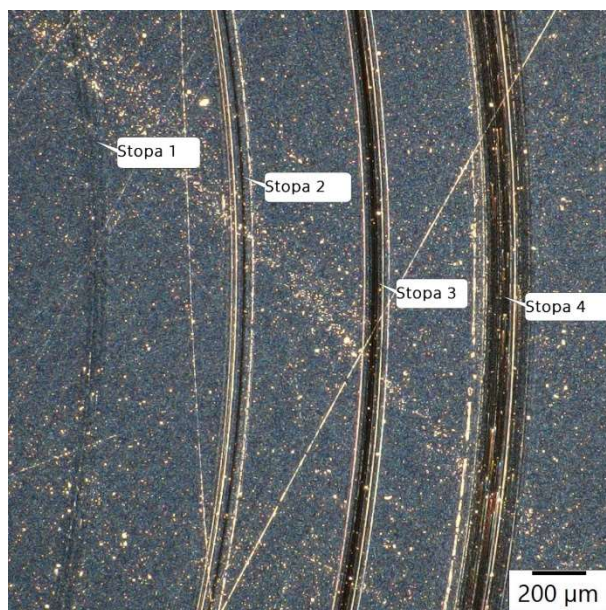
## 3.3 Tření a opotřebení

### 3.3.1 Metoda „Pin-on disk“

Metoda „pin-on disk“ slouží k měření průběhu koeficientu tření. 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.

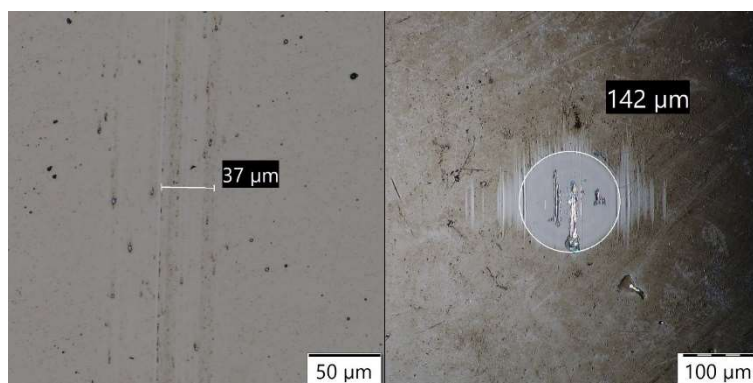
### 3.3.2 Na vzduchu



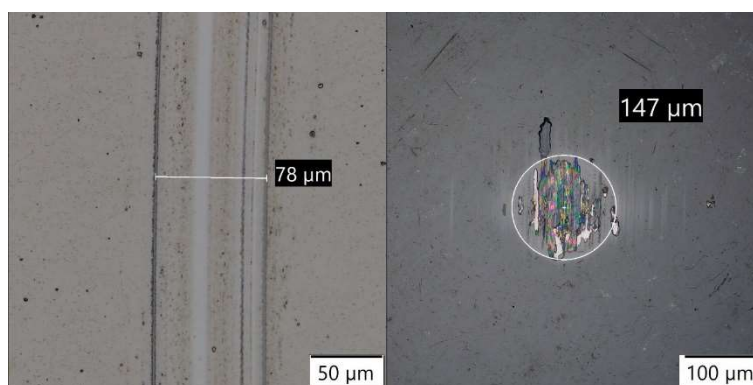
Obrázek 12 Vzniklé stopy na vzduchu

Tabulka 1 Podmínky testu na vzduchu

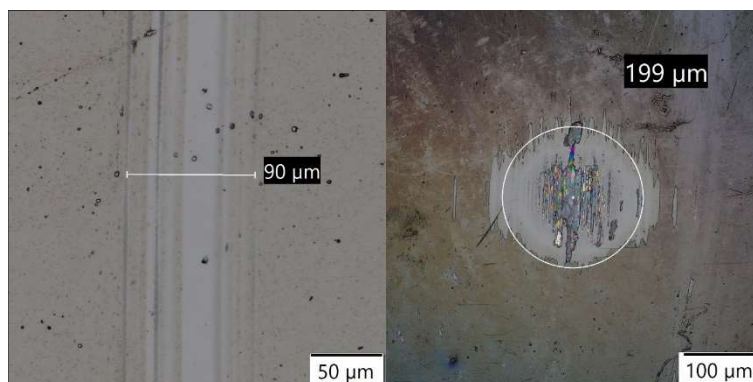
|         | Zatížení F [N] | Poloměr [mm] | $\mu_{\text{vzduch}}$ [1] |
|---------|----------------|--------------|---------------------------|
| Stopa 1 | 1              | 6            | 0,14-0,15                 |
| Stopa 2 | 2              | 6,5          | 0,14-0,16                 |
| Stopa 3 | 5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



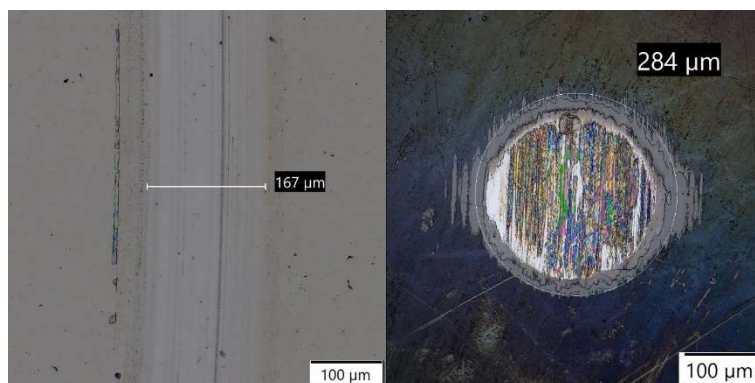
Obrázek 13 Vlevo: Vzniklá stopa po zatížení 1N. Vpravo: Kulička po zatížení 1 N



Obrázek 14 Vlevo: Vzniklá stopa po zatížení 2 N. Vpravo: Kulička po zatížení 2 N



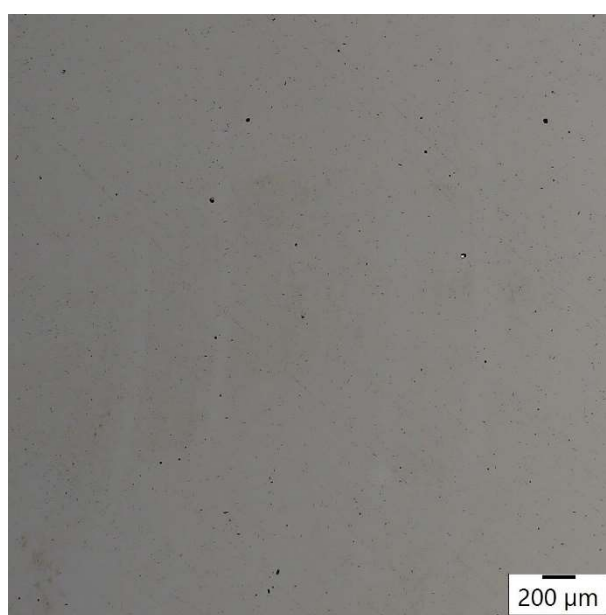
Obrázek 15 Vlevo: Vzniklá stopa po zatížení 5N. Vpravo: Kulička po zatížení 5 N



Obrázek 16 Vlevo: Vzniklá stopa po zatížení 10 N. Vpravo: Kulička po zatížení 10 N

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 14. Obrázky 15 až 18 ukazují postupný úbytek povlaku na kuličce během zatížení. Na obrázku 18 již vidíme základní materiál kuličky ve většině oblasti kontaktní plochy, což znamená, že už nedocházelo ke tření povlaku TiNb-DLC - TiNb-DLC, ale docházelo ke tření TiNb-DLC vůči základnímu materiálu kuličky. Tím vzrostl koeficient tření na hodnotu 0,18 až 0,20. Na obrázcích 15 až 17 je vidět, že opotřebení závisí na zatížení, ale koeficient tření zůstává stejný.

### 3.3.3 V čistém PAO oleji

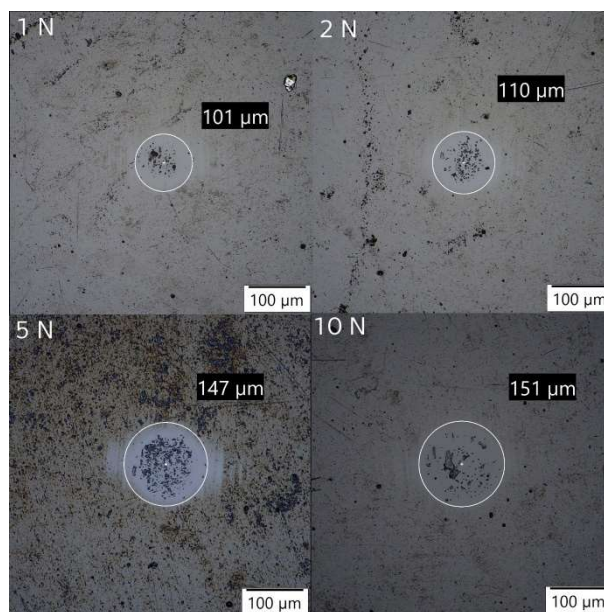


Obrázek 17 Vzniklé stopy v čistém PAO oleji (nešlo použít tmavý filter, protože na vzorku nebyly vidět náznaky vzniklých stop)

V čistém PAO oleji nevznikají stopy na vzorku (obrázek 19). Je to způsobeno tím, že 1000 cyklů je málo na to, aby se projevila stopa na vzorku v čistém PAO.

Tabulka 2 Podmínky testu v čistém PAO

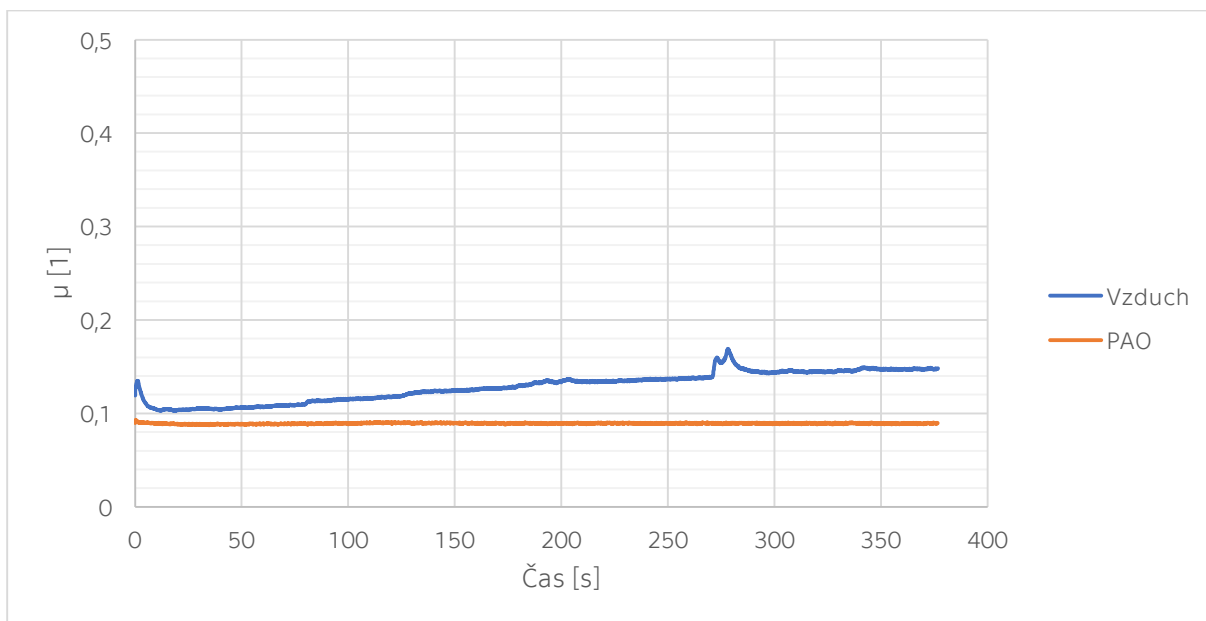
|         | Zatížení F [N] | Poloměr [mm] | $\mu_{PAO}$ [1] |
|---------|----------------|--------------|-----------------|
| Stopa 1 | 1              | 6            | 0,09            |
| Stopa 2 | 2              | 6,5          | 0,09            |
| Stopa 3 | 5              | 7,5          | 0,08    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



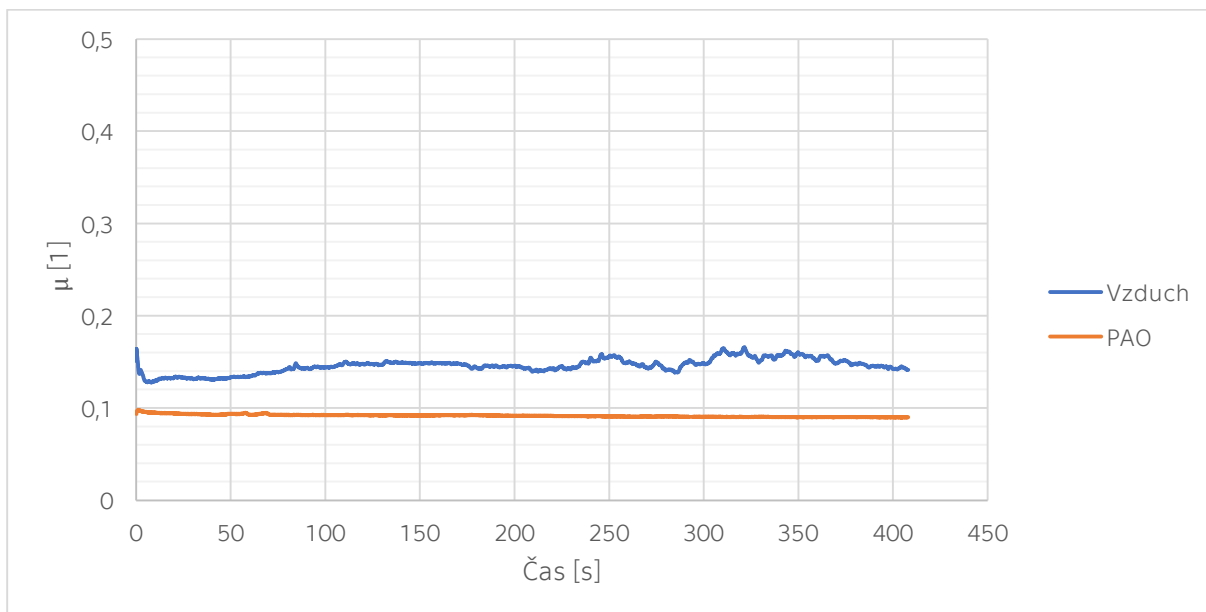
Obrázek 18 Opatření kuliček při různém zatížení

V čistém PAO oleji docházelo k nepatrnému opotřebení kuliček (obrázek 20). To bylo způsobeno hydrodynamickými 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.

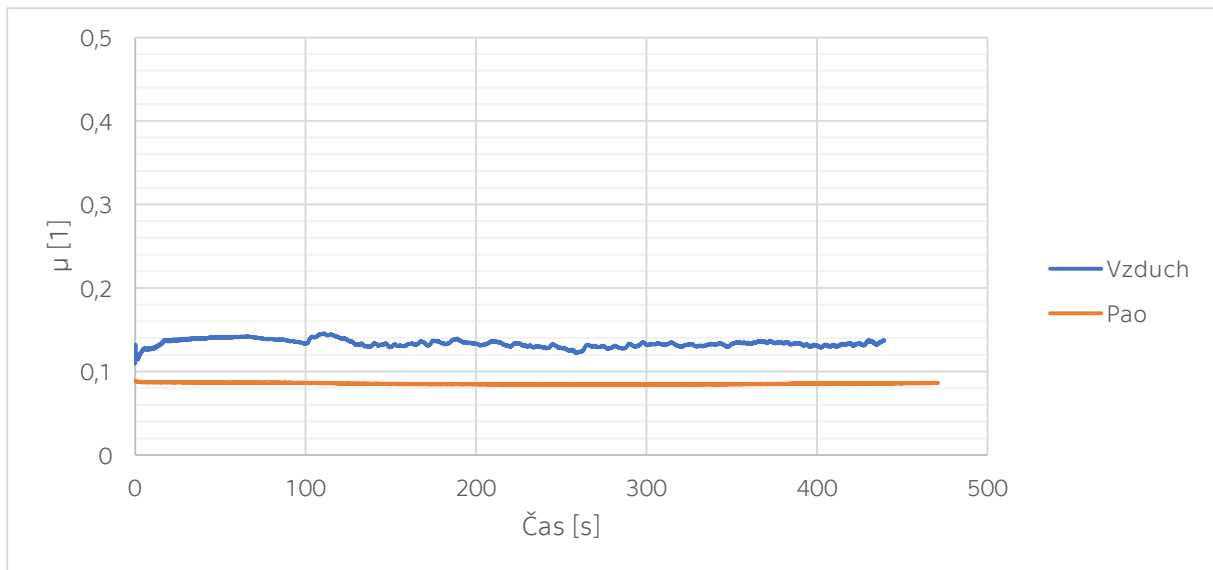
### 3.3.4 Porovnání tření na vzduchu a v PAO oleji



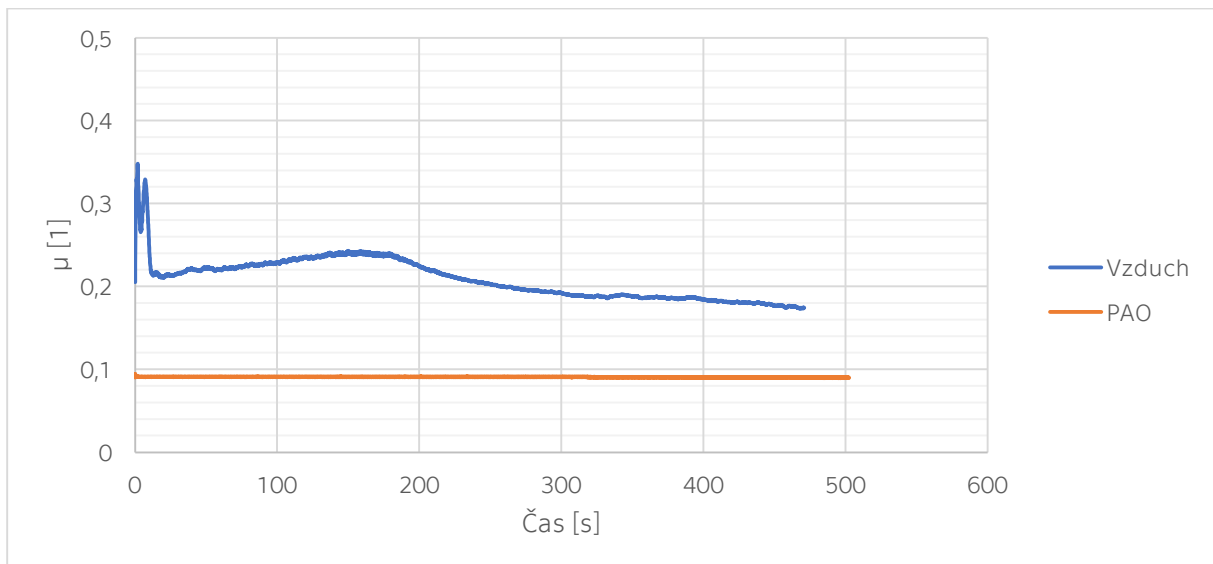
Obrázek 19 Porovnání koeficientu tření při zatížení 1 N



Obrázek 20 Porovnání koeficientu tření při zatížení 2 N



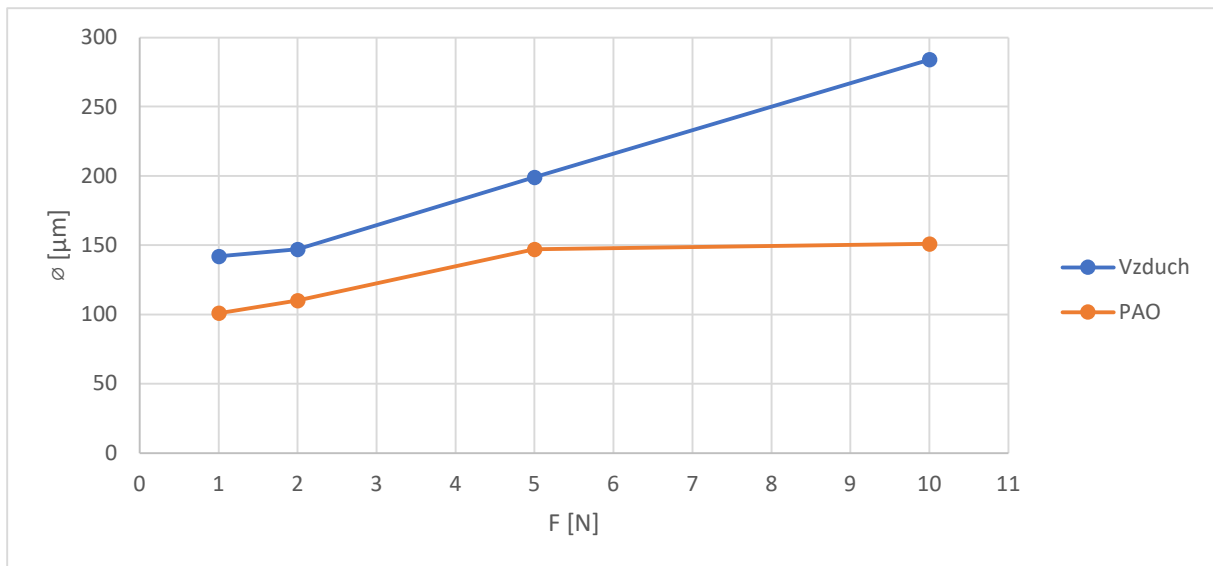
Obrázek 21 Porovnání koeficientu tření při zatížení 5 N



Obrázek 22 Porovnání koeficientu tření při zatížení 10 N

Tabulka 3 Porovnání koeficientů tření

| Zatížení F [N] | $\mu_{\text{vzduch}}$ [1] | $\mu_{\text{PAO}}$ [1] |
|----------------|---------------------------|------------------------|
| 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 23 Porovnání průměrů vzniklých ploch na kuličkách

Tření na vzduchu nemá tak dobré výsledky jako v čistém PAO oleji (obrázky 21 až 24). 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.

V čistém PAO oleji dochází k okamžitému ustálení a ke stabilitě koeficientu tření. Oproti tomu na vzduchu dochází v závislosti na zatížení k postupnému ustálení koeficientu tření na určité hodnotě. Což můžeme vidět na obrázku 21, kde zatížení je 1 N. Zde dochází k pomalému růstu koeficientu tření a k jeho ustálení na hodnotě 0,14 až 0,15. Což je odlišné od dějů na obrázcích 22 a 23. Na nich je vidět, že s rostoucím zatížením se zkracuje doba ustálení na trvalých hodnotách.

Při pokusu s 10 N došlo k okamžitému porušení kuličky. Toto porušení znamenalo značný růst koeficientu tření nejspíše proto, že k 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 jsem spočítal působící kontaktní tlaky mezi vzorkem a kuličkou (4).

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

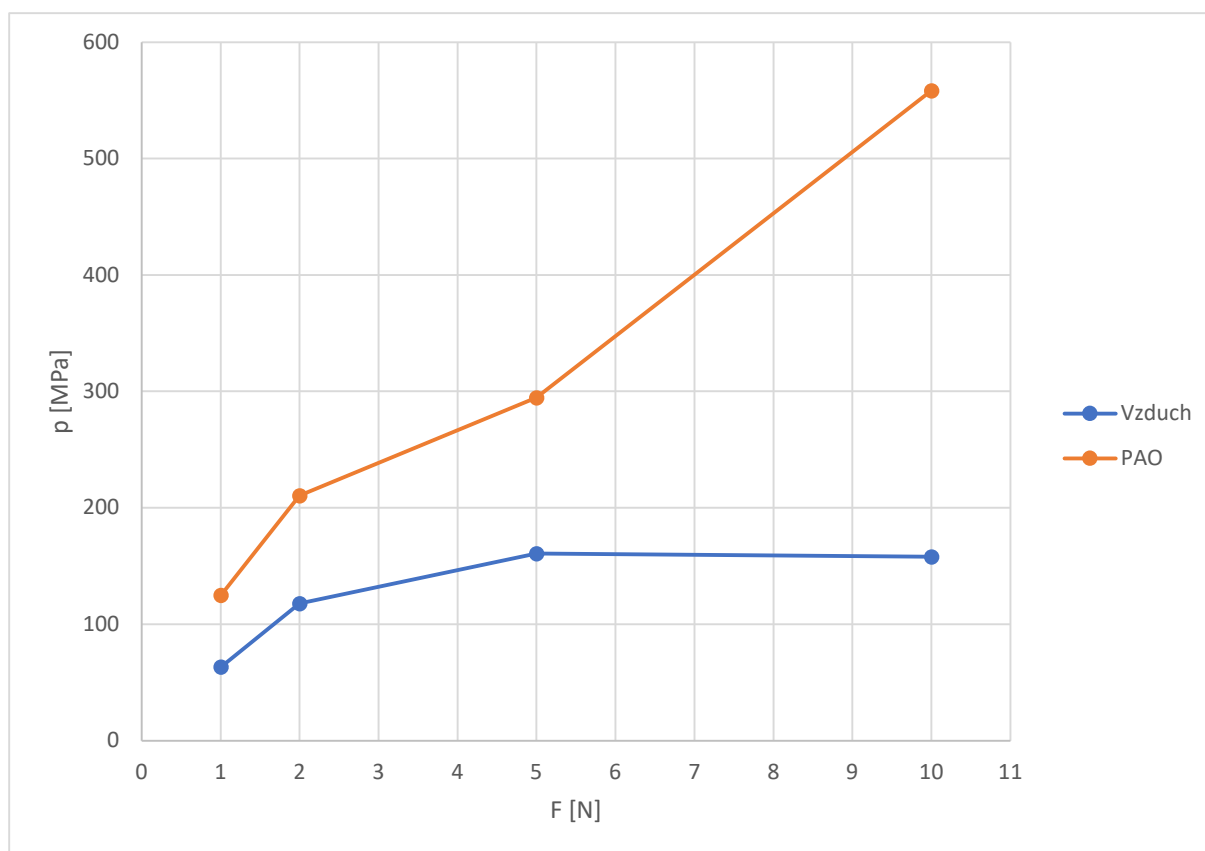
kde:

p = Kontaktní tlak

F = Zatěžující síla

S = Plocha na kuličce

| Zatěžující síla | Vzduch |                      |         | Čistý PAO olej |                      |         |
|-----------------|--------|----------------------|---------|----------------|----------------------|---------|
| F [N]           | d [μm] | S [mm <sup>2</sup> ] | p [MPa] | d [μm]         | S [mm <sup>2</sup> ] | 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 24 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 26.

## 4 Závěr

Záběhová fáze třecí dvojice TiNb-DLC - TiNb-DLC byla hodnocena při podmínkách, kdy lineární rychlost byla 10 cm/s, počet cyklů 1000 a normálová zatěžovací síla 1, 2, 5 a 10 N. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno:

Koeficient tření se ustálí ihned v počáteční fázi v PAO oleji, ale na vzduchu ne. Olej přispívá k celkové stabilitě záběhové fáze.

Koeficient tření v PAO oleji nezáleží na zatížení. Dosahoval při různém zatížení stejných hodnot okolo 0,08 až 0,09.

Koeficient tření na vzduchu se po čase ustálil na hodnotě 0,13 až 0,15. Toto platí ne zcela pro to měření, kde zatížení bylo 10 N. Zde došlo k porušení kuličky.

Na vzduchu vznikaly viditelné stopy, které se s rostoucím zatěžováním zvětšovaly, kdežto v oleji se viditelné stopy nevytvořily. Opotřebenění kuliček na vzduchu je také mnohem výraznější než v oleji.

## 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](https://cs.qwe.wiki/wiki/Diamond-like_carbon)
- [3] BLAŠKOVITŠ, Pavel, Marián DZIMKO a Jozef BALLA. *Tribológiá*. 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=1124639>.
- [8] TRAPP, Martin a Fang CHEN. *Automotive Buzz, Squeak and Rattle - Mechanisms, Analysis, Evaluation and Prevention* [online]. 1. N/A: Elsevier, 2012 [cit. 2020-04-29]. ISBN 978-0-7506-8496-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpABSRMAE1/automotive-buzz-squeak/automotive-buzz-squeak>
- [9] 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>
- [10] BLAU, Peter. On the nature of running-in: *Tribology International*. *ScienceDirect* [online]. 2005, **38**(11-12), 1007-1012 [cit. 2019-11-12]. ISSN ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>.
- [11] 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>
- [12] 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>

- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] 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/>
- [17] 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>
- [18] Calotest. *Tribotechnic* [online]. CLICHY: Tribotechnic, 2015 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.tribotechnic.com/en/products/calotest>
- [19] ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. *Anti-abrasive nanocoatings*. 1. Boston, MA: Elsevier, 2014. ISBN isbn978-0-85709-211-3.
- [20] 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>
- [21] 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>

- [22] MATTOX, Donald. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (2nd Edition)* [online]. 2. N/A: Elsevier, 2010 [cit. 2020-04-29]. ISBN 978-0-8155-2037-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPVDPV04/handbook-physical-vapor/handbook-physical-vapor>
- [23] GARCÍA, José A., Pedro J. RIVERO, Rocío ORTIZ, Iban QUINTANA a Rafael J. 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>
- [24] BISHOP, Charles. *Vacuum deposition onto webs, films, and foils*. 1. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2007. ISBN isbn978-0-8155-1535-7.
- [25] 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>
- [26] PACVD technologie. *Ionbond* [online]. Humpolec: IHI Ionbond AG, 2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/cz/technologie/pacvd/>
- [27] 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.
- [28] VENGDUSAMY, 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>
- [29] VENGDUSAMY, 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>
- [30] 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/S0925963594053251>

- [31] 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>
- [32] 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>
- [33] 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>
- [34] 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.
- [35] FLORES-RENTERÍA, M. A., M. ORTIZ-DOMÍNGUEZ, M. KEDDAM et al. A Simple Kinetic Model for the Growth of Fe<sub>2</sub>B 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>