

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2019**

**MATĚJ  
BUŘIL**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Hodnocení záběhové fáze tribologických povlaků  
Evaluation of the running-in phase of tribological coatings

AUTOR: Bc. Matěj Buřil

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní a materiálové inženýrství

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

**PRAHA 2019**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Buřil** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **439127**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Hodnocení záběhové fáze tribologických povlaků**

Název diplomové práce anglicky:

**Evaluation of the running-in phase of tribological coatings**

Pokyny pro vypracování:

Pro tribologické systémy je záběhová fáze rozhodujícím parametrem ovlivňující životnost celého systému. V případě využití tribologických povlaků mohou parametry jako je bodové zatížení, teplotní namáhání nebo drsnost povrchu v prvotní fázi zásadně ovlivnit průběh tření a opotřebení. Cílem práce bude navrhnout vhodný povlakový systém a ověřit průběh tření a otěru v této fázi.

1. Literární rešerše
2. Návrh a příprava vhodného tribologického povlaku
3. Tribologické testy a jejich vyhodnocení
4. Diskuze a závěr

Seznam doporučené literatury:

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. BLAU, Peter J. On the nature of running-in. Tribology International. 2005, 38(11-12), 1007-1012. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.020. ISSN 0301679X.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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


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

**Ing. Zdeněk Tolde, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

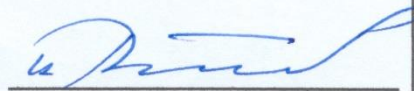
Datum zadání diplomové práce: **15.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
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

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

23.9.2019

Datum převzetí zadání

Buřil

Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma Hodnocení záběhové fáze tribologických povlaků vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ladislava Cvrčka, Ph.D. Dále prohlašuji, že jsem práci vypracoval pomocí legálního programového vybavení a že jsem uvedl veškeré použité zdroje informací.

V Praze 26. července 2019



Matěj Buřil

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Ladislavu Cvrčkovi, Ph.D, za odborné vedení práce, cenné rady, a v neposlední řadě za trpělivost. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D za naměřenou nanotvrdost a panu Ing. Martinovi Daňkovi za školení s optickým profilometrem.

# Anotace

Diplomová práce se zabývá záběhovým procesem, opotřebením a koeficientem tření DLC vrstev. V teoretické části se věnuje problematice tribologie jako celku se zaměřením na mazané a suché DLC kontakty. V praktické části se zaměřuje na vyhodnocení záběhové fáze kontaktu TiNb-DLC za sucha a v oleji PAO.

# Klíčová slova

Záběhová fáze; DLC; TiNb-DLC; Tribologie; PAO

# Abstract

This thesis deals with the running-in process, wear and friction coefficient of DLC layers. The theoretical part deals with the issue of tribology as a whole with a focus on lubricated and dry DLC contacts. The practical part is focused on the evaluation of the running phase contact TiNb-DLC during dry and lubricated conditions conditions using pure PAO oil.

# Keywords

Running-in; DLC; TiNb-DLC; Tribology; PAO

# Seznam zkratek

Zkratka	Význam zkratky	Překlad
AES	Auger electron spectroscopy	Augerova elektronová spektroskopie
AW	Anti-wear	Proti opotřebení
CVD	Chemical vapor deposition	Chemická depozice z plynné fáze
DLC	Diamond like carbon	Diamantu podobný uhlík
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy	Energeticky Disperzní Spektroskopie
EHL	Elastohydrodynamic Lubrication	Elastohydrodynamické mazání
EP	Extreme pressure	Extrémní tlak
GMO	Glycerol monooleate	Glycerol monooleát
MoDTC	Molybdenum dialkyl dithiocarbamate	Molybden-dialkyl-dithiokarbamát
PAO	Polyalphaolefin	Polyalfaolefin
PVD	Physical vapor deposition	Fyzikální depozice z plynné fáze
TEM	Transmission Electron Microscopy	Transmisní elektronový mikroskop
ZDDP	Zinc dialkyl dithiophosphate	Dialkyldithiofosfát zinečnatý

# Obsah

1 Úvod.....	1
2 Teoretická část .....	2
2.1 Tribologie.....	2
2.2 Tření.....	2
2.3 Opotřebením.....	3
2.4 Záběhová fáze.....	4
2.5 Teploty při záběhu.....	6
2.6 Nauhličení povrchu .....	7
2.7 Oleje.....	8
2.8 Tvorba mazacího kontaktu .....	9
2.9 DLC.....	10
2.10 Využití DLC povlaků.....	11
2.11 Tření DLC povlaků .....	12
2.12 Tření DLC v oleji .....	14
2.13 DLC mazání pomocí aditiv .....	14
2.14 DLC mazání a viskozita.....	17
3 Experimentální část.....	21
3.1 Příprava vzorku.....	21
3.2 Příprava experimentu.....	22
3.3 Mechanické vlastnosti povlaku .....	23
4 Tribologické vlastnosti .....	28
5 Závěr.....	40



# 1 Úvod

Moderní mechanické součásti mají stále rostoucí technické nároky na vyšší životnost a nižší energetické ztráty. Ovšem o tom, zda bude součást správně fungovat může rozhodovat už prvotní fáze záběhu kontaktních rozhraní. Záběh může být interpretován jako schopnost vytvářet hladké povrchy z původně hrubých. Při suchých až smíšených podmínkách mazání budou hladší povrchy vykazovat nižší kontaktní tlaky, a tudíž snižují rychlost opotřebení a riziko únavového poškození povrchu. DLC povlaky jsou dnes neodmyslitelnou součástí řady vysoce namáhaných strojírenských součástí. Kromě jejich technologického významu jsou povlaky DLC vědecky velice zajímavé, protože vykazují mnoho dosud neznámých tribologických vlastností mnohem složitějších, než které známe u klasických ocelových materiálů. I přes prokazatelný význam záběhového procesu pro správné fungování a dlouhou životnost součástí bylo v posledních letech publikováno pouze několik článků na toto téma.

Cílem této práce bylo detailně popsat a přiblížit proces záběhu u povlaků na bázi uhlíku v různém pracovním prostředí a navrhnout ideální záběhový proces pro danou třecí dvojici.

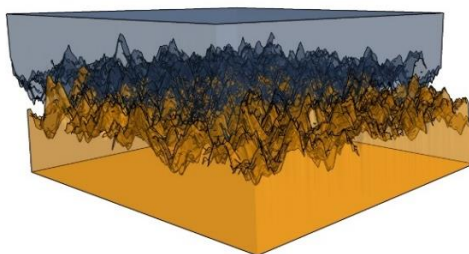
# 2 Teoretická část

## 2.1 Tribologie

Tribologie se zabývá interakcí dvou povrchů v relativním pohybu. Studuje zejména tření, opotřebenění a mazání. Tribologie je multidisciplinárním oborem, který zahrnuje řadu základních technických předmětů, jako je mechanika pevných látek, mechanika tekutin, chemie maziv, věda o materiálech a přenosu tepla. Řeší mnoho průmyslových problémů, k nimž patří životnost součástí, redukce vibrací a hluku, ekonomické náklady a energetické ztráty. Hraje také důležitou roli ve fungování mechanických součástí (ozubená kola, ložiska, těsnicí materiály), dopravních systémů (motory, brzdy, převodové prvky, pneumatiky) i v biomedicínských aplikacích (umělé kyčelní klouby, fixace, implantáty) [1] [2] [3] [4].

## 2.2 Tření

V tribologii termín tření označuje odpor vůči pohybu mezi dvěma pevnými látkami. Třecí síla vzniká především zachytáváním se mikronerovností povrchů (obr. 1) a současně vznikem adhezních mikrospojů. Třecí sílu rozdělujeme na statickou, která musí být překonána v počátku relativního pohybu mezi dvěma povrchy během působení nenulové normálové síly a kinetickou, která uvádí odpor vůči setrvání v relativnímu pohybu. Ve strojírenské tribologii je tření nejčastěji prezentováno pomocí součinitele tření. Součinitel tření je dán poměrem třecí síly  $F_t$  a normálové síly  $F_n$ . Koeficient tření závisí na řadě proměnných, jako je počáteční drsnost povrchů, čistota povrchů, normálová síla, rychlost pohybu, teplota, stav opotřebenění povrchu. Koeficient tření se také mění v průběhu životnosti součásti. [5] [6] [7].



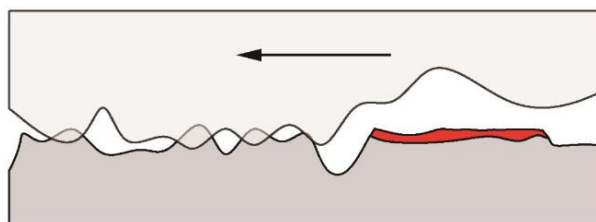
Obrázek 1 Ukázka topografie povrchu [7]

## 2.3 Opotřebení

Opotřebení je postupné nežádoucí odstraňování materiálu z povrchu tuhých těles při jejich vzájemném pohybu nebo při pohybu média účastnícího se tribologického procesu. Mezi hlavní mechanizmy opotřebení řadíme opotřebení adhezní, abrazivní a únavové. Kromě mechanických způsobů opotřebení může také docházet k chemickému nebo elektrickému opotřebení. Chemické opotřebení se často označuje jako korozní opotřebení. V případě elektrického opotřebení se nejčastěji jedná o elektrolýzu. Skutečné opotřebení je nejčastěji kombinací všech těchto mechanismů. Opotřebení může být minimalizováno tvorbou elastohydrodynamického mazání, použitím vhodných kombinací materiálů a povlaků nebo přidáním aditiv do maziva [6] [8] [9].

### 2.3.1 Adhezní opotřebení

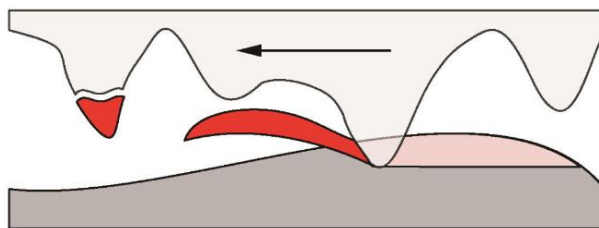
Adhezní opotřebení je druh opotřebení, ke kterému dochází při relativním pohybu dvou tuhých těles přitlačovaných k sobě nenulovou normálovou silou. Následkem toho dochází k porušování tenkých oxidických vrstev, k čistému kovovému styku a vzniku mikrosvarů, které jsou vzápětí porušovány (obr. 2). To vede k vytrhávání a přenosu částic jednoho materiálu na druhý. Intenzitu adhezního opotřebení velmi výrazně ovlivňuje přítomnost maziva. Mazivo v tomto případě zabraňuje vzniku mikrosvarů, takže dochází pouze k mikrodeformacím nerovností a tím k jejich vyhlazení. V případě selhání maziva může nastat zadření [10] [6] [5].



Obrázek 2 Schéma mechanismu adhezního opotřebení [11]

### 2.3.2 Abrazivní opotřebení

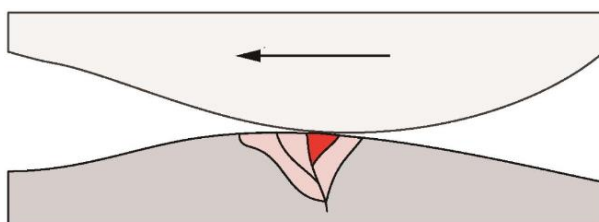
Abrazivní opotřebení je způsobeno pohybem drsného tvrdého materiálu nebo pohybem tvrdých abrazivních částic po měkčím povrchu. Může také dojít k zamáčknutí tvrdých částic do měkkého povrchu, což potom vede k rýhování tvrdší materiálu. Typickým projevem abrazivního opotřebení je vznik rýh na povrchu (obr. 3) funkční plochy. Na intenzitu abrazivního opotřebení má vliv zejména množství, tvar, velikost a tvrdost abrazivních částic [5] [12].



Obrázek 3 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [11]

### 2.3.3 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je vyvoláno cyklickými deformacemi, které jsou způsobeny střety nerovností a povrchových vad při vzájemném pohybu. Kontakty mezi nerovnostmi jsou doprovázeny vznikem velmi vysokých napětí. Dosahují-li tato napětí hodnot nad mezí kluzu, jde o nízkocyklovou únavu, jsou-li pod mezí kluzu, jde o vysokocyklovou únavu. Prvotní únavové trhliny vznikají v tenké povrchové vrstvě materiálu. Tyto trhliny se následně spojují až nastane vylamování částic z povrchu (obr. 4). Nejúčinnějším způsobem prevence únavového opotřebení je snížení součinitele tření mezi dvěma vzájemně působícími tělesy, nebo snížením tvrdosti povrchové vrstvy [5] [13] [12].



Obrázek 4 Schéma mechanismu únavového opotřebení [11]

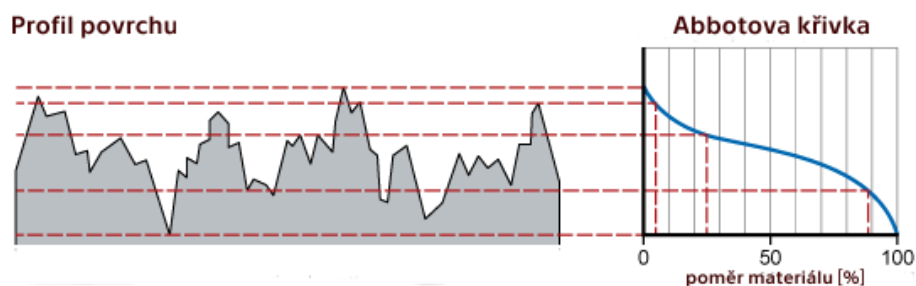
## 2.4 Záběhová fáze

Záběhem označujeme prvotní fázi časového průběhu opotřebení a tření. Doba potřebná k dosažení frikčního ustáleného stavu nemusí být nutně stejná jako doba potřebná k dosažení ustálené rychlosti opotřebení, přičemž poměr těchto dvou složek závisí na použitých materiálech. Všechny povrchy v mechanickém kontaktu mají určitou drsnost. Ta způsobuje, že zatížení je rozloženo pouze na vrcholcích mikronerovností a skutečná kontaktní plocha je tedy velmi malá. To způsobí vysoké lokální zatížení a vysoké teploty v jednotlivých vrcholcích nerovností. Takovéto místní tlaky často způsobují plastickou deformaci, studený spoj nebo mikrosvar. Může také dojít k rytí výstupků jedné plochy do druhé nebo při opakované elastické deformaci povrchu může nastat rozvoj mikrotrhliny. Tyto mechanismy vedou k postupnému

odstraňování vyčnívajících nepravidelností povrchu, čímž se zvyšuje skutečná plocha kontaktu, jak je ukázáno na obrázku 5. Plochu kontaktu lze vyjádřit pomocí Abbotovy křivky (obr. 6). Ta znázorňuje množství materiálu přítomného ve vybraných výškách profilu povrchu, který je k dispozici pro přenášení vnějšího zatížení působícího na kontakt a přímo souvisí se skutečnou plochou kontaktu, elektrickou a tepelnou vodivostí a odolností povrchu proti opotřebení. Během záběhu se kontaktní plocha postupně zvětšuje z prvotních 15-20% na konečných 60-80% povrchu [6] [14] [15] [16] [17] [18].



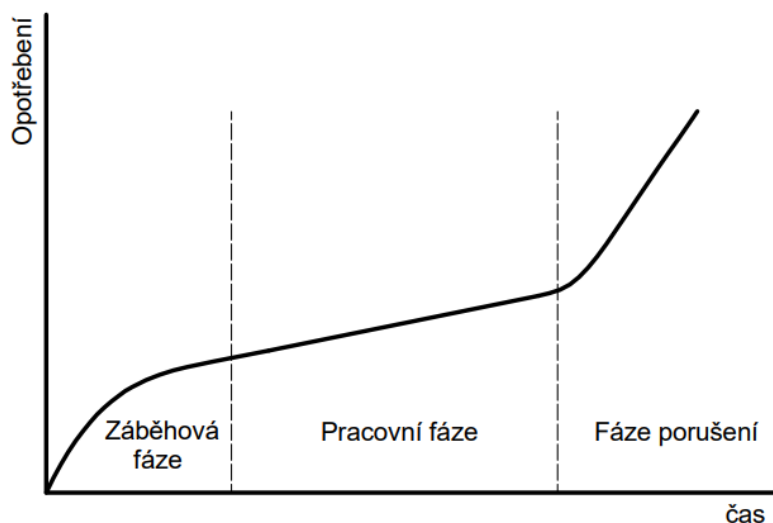
Obrázek 5 Topografie povrchu před a po záběhu [19]



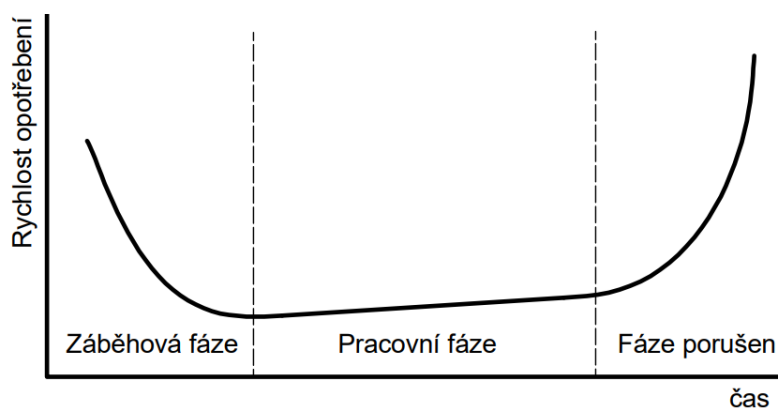
Obrázek 6 Abbotova křivka [18]

Změny drsnosti povrchu a snížení kontaktního tlaku mají také vliv na režim mazání. Vyhlazením povrchů dochází k zvýšení hodnoty parametru mazání  $\Lambda$ , což má za následek zvýšení separace povrchu a posun na Stribeckově křivce k smíšenému nebo EHL režimu mazání. Typická křivka opotřebení je znázorněna na obr.7. Zpočátku je opotřebení 50-100 x rychlejší než za normálních pracovních podmínek, ale se zvětšováním kontaktní plochy rychlost opotřebení razantně klesá obr.8. Pokud nedojde k správnému zarovnání povrchu během záběhu, mohou být kontaktní zatížení mnohonásobně vyšší, což může zapříčinit vyšší provozní teploty. Experimentální důkazy ukazují, že jak drsnost povrchu, tak relativní tvrdost třecí dvojice určují dobu záběhu a stav opotřebení. Aby bylo dosaženo úspěšného záběhu, musí dojít k vyhlazení povrchů a snížení kontaktního tlaku. Řízení záběhového

procesu může být cenným nástrojem pro prodloužení životnosti strojírenských tribosystémů a zajištění stabilního provozu. [6] [14] [15] [19] [20] [21].



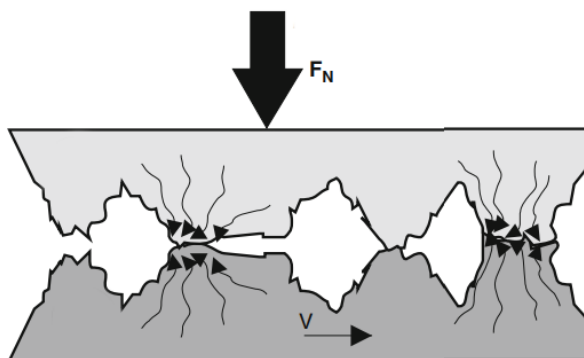
Obrázek 7 Časový průběh opotřebení [21] (upraveno)



Obrázek 8 Časový průběh rychlosti opotřebení [11] (upraveno)

## 2.5 Teploty při záběhu

Většina energie vznikající během procesu tření se přemění na teplo, což vede k významnému navýšení povrchové teploty. Zvýšení teploty na špičkách dotykových ploch (obr.9) může být velmi vysoké, ale délka trvání těchto teplot je krátká vzhledem k malé oblasti styku. Generované teploty jsou proto nazývány jako "flash temperatures" (bleskové teploty). Vysoká teplota kontaktu může způsobit opotřebení součástí, snížení tloušťky nebo dokonce selhání mazacího filmu, popřípadě i změny mechanismu mazání, ale také tvorbu oxidů, změnu lokální geometrie způsobenou tepelnou roztažností nebo může dokonce docházet k natavení povrchu [22] [23].



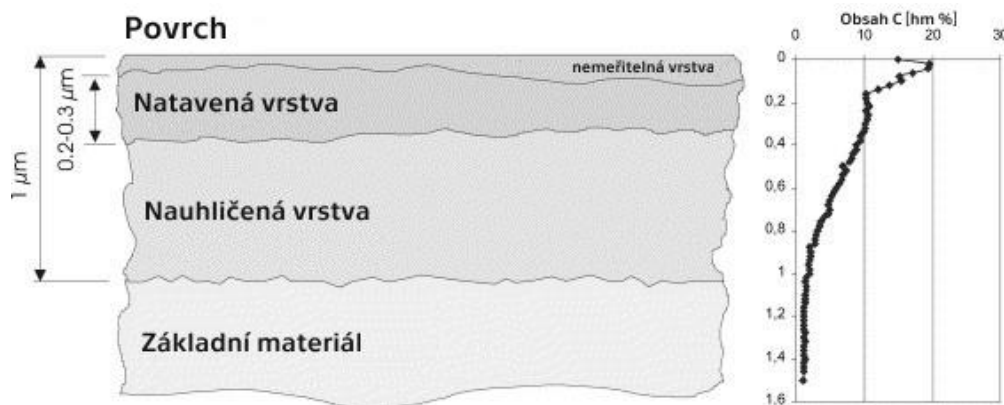
Obrázek 9 Kontakt dvou drsných povrchů v relativním pohybu [24]

Tvorba otěru, která souvisela s extrémními povrchovými teplotami kontaktních složek, byla často pozorována v aplikacích leteckého ozubení kvůli velmi vysokým provozním rychlostem [25]. Experimenty s kontakty mezi plochami vystavenými vratnému pohybu s nízkou amplitudou ukázaly, že dolní mezní blesková teplota je 400 °C pro mazané kontakty a 1000 °C pro suché kontakty. [26] Měření teploty povrchu je proto velmi důležité. Bohužel současné techniky měření stále neumožňují dostatečně spolehlivou detekci kontaktní teploty. Proto je nutné přistoupit k nepřímým důkazům pro odhad vysoké kontaktní teploty nebo použít simulační metody, což však vždy přináší další velkou míru nejistoty. Vyhodnocení teploty v kontaktu je v podstatě problémem přenosu tepla, kde je třecí teplo generované v kontaktu modelováno jako zdroj tepla pohybující se po povrchu. Celkový rozptýlený výkon v tribologickém systému je funkcí energie rozptýlené jako teplo. Integrální vyjádření celkové rozptýlené energie je součinem kluzné rychlosti, normálové síly a koeficientu tření. Předpokládá se, že teplota má svůj původ výhradně v rozhraní, což má za následek stejnou teplotu na povrchu obou pevných látek. Výsledný tepelný tok proniká oběma pevnými látkami. Teplo je také transportováno z oblasti kontaktu olejem. Výpočty však ukázaly, že tento příspěvek činí méně než 1 % [27].

## 2.6 Nauhličení povrchu

Nejspolehlivější důkaz o možné maximální kontaktní teplotě může být získán za mazaných podmínek tření. Vysoké teploty způsobují tepelné rozložení vazby uhlík-uhlík. Jediným zdrojem uhlíku pro nauhličení oceli byl zde uhlík z oleje (citace). Počáteční teplota pro tento proces nauhličení oceli je asi 400 ° C. Těsně u povrchu, který původně obsahoval 1,5 % hmotnostních procent uhlíku, byla zjištěna analýzou AES mezivrstvy s tloušťkou 200-300 nm, která obsahovala 10 % hmotnostních procent uhlíku. Na obrázku 10 je křivka popisující závislost obsahu uhlíku na hloubce, kde je

vidět kromě snižující se koncentrace uhlíku v substrátu, také existují body nelinearity přibližně u 7,0 %, 4,8 % a 2,1 % hmotnostních procent uhlíku. Tyto body se téměř přesně shodují s charakteristickými body fáze transformace v binárním diagramu Fe-C a naznačují teploty nad 1145 ° C. Analýzy TEM jsou navíc v souladu s těmito výsledky a potvrzují rozsáhlou tvorbu karbidů během tření [23] [28].



Obrázek 10 Schematické znázornění obsahu uhlíku v substrátu [23]

## 2.7 Oleje

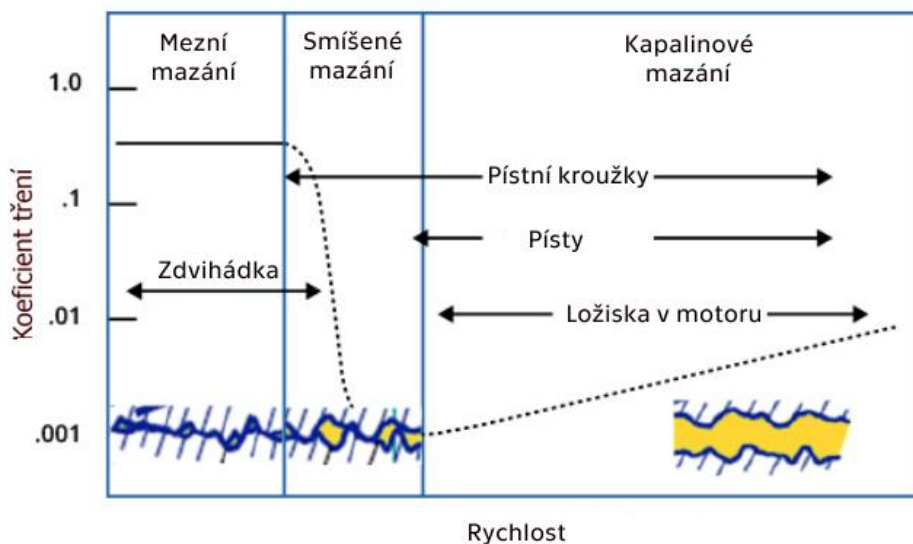
Správné a účinné mazání je nezbytné pro správné fungování tribologických systémů, především pro dosažení maximální životnosti součástí. V mnoha případech může selhání maziva vést k selhání celé součásti. Kromě hlavní funkce mazání přispívá olej také k chlazení, odstraňování nečistot, ochraně před korozí a tlumení hluku. Většina dnešních tekutých maziv se skládá ze základového oleje s množstvím přidaných aditiv. Podle původu základového oleje dělíme motorové oleje na minerální (ropné) a syntetické. Minerální oleje dělí na extrakční a hydrokrakové. Extrakční rafináty mají dosti velký podíl aromatických uhlovodíků, jež jsou velkým zdrojem tvorby karbonu, a tím i znečištění oleje. Hydrokrakové základové oleje obsahují nízké procento aromatických uhlovodíků a mají téměř nulový obsah síry. Syntetické základové oleje mají nulový obsah aromatických uhlovodíků a síry, lepší nízkoteplotní vlastnosti, viskozitní index a odparnost. Využívají se zejména polyalfaolefiny (PAO). Polyalfaolefiny jsou bezbarvé a bez zápachu, vysoce čisté isoparafinové syntetické kapaliny tvořené hydrogenovanými oligomery, vyrobené katalytickou polymerací lineárních alfaolefinů (alkenů). Aditiva se do olejů přidávají ke zlepšení specifických vlastností. Typů aditiv je několik. Nejdůležitější jsou detergenty (disperzanty), které zabraňují sedimentaci a tvorbě usazenin na povrchu mazaných předmětů. Dále je možné aditivací upravit viskozitu základových olejů a jejich



viskozitně teplotní závislosti. Aditiva také mohou zabraňovat stárnutí a tím podstatně prodlužovat funkčnost a celkovou životnost oleje [29] [30] [31] [32].

## 2.8 Tvorba mazacího kontaktu

K jakému druhu mazání bude v kontaktu docházet, lze stanovit pomocí Stribeckovy křivky obr. 11, která vyjadřuje závislost součinitele tření na rychlosti vzájemného pohybu, Gümbelově čísle nebo na parametru mazání  $\Lambda$ . Hodnota Gümbelova čísla je závislá na viskozitě a tlaku maziva a relativní rychlosti pohybu stykových ploch. Parametr mazání  $\Lambda$  je závislý na minimální tloušťce mazacího filmu a na redukované drsnosti třecích povrchů [33] [6]. Při nízkých rychlostech je koeficient tření neměnný. Tato oblast se označuje jako mezní stav mazání, ve kterém je tloušťka kapalného maziva velmi malá, odpovídá několika molekulám. Při středních rychlostech začíná koeficient tření strmě klesat, (oblast smíšeného mazání). Je to oblast, ve které dochází k tvorbě souvislého mazacího filmu ovšem ještě zde dochází i k občasným dotykům povrchových mikronerovností. V oblasti kapalinového mazání dochází k úplnému oddělení kluzných ploch [34] [6]. Při tomto typu mazání prakticky nedochází k opotřebení povrchu. Proto je snahou, aby strojní součásti fungovaly v tomto režimu mazání. [35] Tvar Stribeckovy křivky je dobře znám pro kontakt ocel/ocel. Pro jiný tribologický kontakt může mít zcela odlišný tvar [36].



Obrázek 11 Stribeckova křivka [37]

## 2.9 DLC

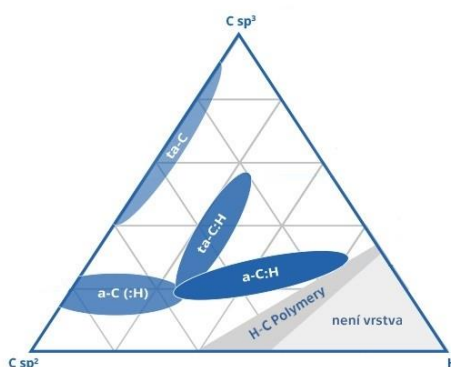
DLC je zkratkou z anglického „diamond like carbon“ (diamantu podobný uhlík). Jedná se o označení metastabilního stavu amorfního uhlíku, kde jsou atomy uhlíku vázány převážně pomocí sp<sup>2</sup> (grafitické) a sp<sup>3</sup> (diamantové) vazeb. Povlaky spojuje tvrdost diamantu a mazivost grafitu, tedy výsledná vysoká tvrdost a nízký koeficient tření (obr.12). Kromě toho jsou povlaky chemicky inertní s velice dobrou korozivzdorností. Navzdory četným výhodám, povlaky DLC vykazují také určité nežádoucí vlastnosti, jako je špatná adheze způsobená velkým zbytkovým pnutím nebo nízká tepelná stabilita nad 400 °C [38] [39] [40] [37]. Jedním ze způsobů, jak tyto nežádoucí vlastnosti zmírnit je dopace DLC vrstev různými kovovými prvky označovanými v literatuře jako Me-DLC. Ke zvýšení přilnavosti k substrátu se často také vytvářejí adhezní mezivrstvy tvořené čistými kovy Ti, Nb nebo Cr [41] [42]. Dopováním přísadového prvku se také narušuje inertnost povrchu, tím pádem začíná DLC vrstva reagovat s prostředím ve kterém se nachází. Avšak odolnost proti opotřebení Me-DLC povlaků je nižší než u čistých DLC [43]. Předpokládá se, že amorfní uhlíková matrice DLC filmu je zesíťována mnohem silněji než u povlaků dopovaných kovy [41]. Mezi časté dopanty patří zejména prvky Ti, Cr, Si, W [39] [40].



Obrázek 12 Struktura DLC [37]

DLC povlaky mohou být deponovány za použití různých PVD metod, jako je například magnetronové napařování, iontový svazek, katodové obloukové napařování nebo pomocí plazmové chemické depozice (PACVD) [44]. Obecně existují dva základní typy DLC povlaků: hydrogenované amorfní uhlíkové vrstvy označované jako (a-C:H) a bezvodíkové, s tetraedrálním amorfním uhlíkem (a-C). Při větším podílu (>80 %) sp<sup>3</sup> vazeb se často označují a-C vrstvy jako ta-C. (obr.13). Hydrogenované povlaky (a-C:H) se nejčastěji tvoří použitím uhlovodíkových plynů (např. metan,

acetylen, ethylen, cyklohexan atd.). Tyto DLC extrahované z uhlovodíkových plynů mohou obsahovat značné množství vodíku (10 až 50 %). Povlaky ta-C DLC jsou vytvářeny za použití pevných uhlíkových targetů. Povlaky získané z tuhých zdrojů uhlíku jsou v podstatě bez vodíku. [45]. Výsledky mechanických a tribologických zkoušek ukazují, že bezvodíkové DLC vrstvy mají extrémně vysokou tvrdost a velmi nízký součinitel tření v mezním mazacím režimu, ale tyto výborné tribologické vlastnosti jsou snižované jejich nízkou lomovou houževnatostí a nízkými parametry odolnosti proti únavě. [46].



Obrázek 13 Ternární diagram DLC vrstev [37]

## 2.10 Využití DLC povlaků

DLC má díky své jedinečné kombinaci vlastností, jako je nízký koeficient tření, vysoká tvrdost a chemické inertnost, mnoho různých průmyslových aplikací. V posledních letech byl nejrychleji rostoucím trhem pro aplikace DLC automobilový průmysl. Různé díly povlakované DLC přispívají k nízké spotřebě paliva a k vysoké spolehlivosti a životnosti komponentů. Jedním z nejrozšířenějších využití jsou systémy vstřikování paliva, které pracují u vznětových motorů při vysokých tlacích až 3.000 barů. Také skutečnost, že palivo slouží jako jediné mazací médium, činí tento systém tribologicky problematický. Tyto komponenty také pracují ve velice úzkém toleranční poli, díky čemuž je kladen vysoký důraz na minimalizování opotřebení. Společnosti Bosch uvádí, že vývoj moderních vysokotlakých vstřikovacích systémů byl umožněn pouze použitím DLC povlaků. Dalšími příklady využití DLC vrstev v automobilovém průmyslu (obr. 14) jsou například zdvihátka ventilů, vačky, ozubená kola, pístní kroužky, pístní čepy u motocyklů vidlice tlumičů. Unikátní a vynikající vlastnosti DLC vyústily v mnoho dalších aplikací. DLC se využívá kvůli svým antiadhezním vlastnostem proti některým polymerům na formy pro vstřikování

plastů, což má za následek lepší kvalitu povrchu výrobku, snazší vyjmutí dílů a čištění forem. DLC se také využívá na řezných nástrojích, kde však má kvůli špatné stabilitě nad 350 ° C pouze omezené využití. Proto se tyto povlaky především používají na vrtácích a frézách určených pro obrábění polymerů, kompozitů a hliníkových slitin. Dalším spotřebním materiálem povlakovaným DLC v hromadné výrobě je žiletka. Společnost Gillette zavedla v roce 1998 na mokré holicí strojky MACH3 DLC o tloušťce 150 nm [47] [48].

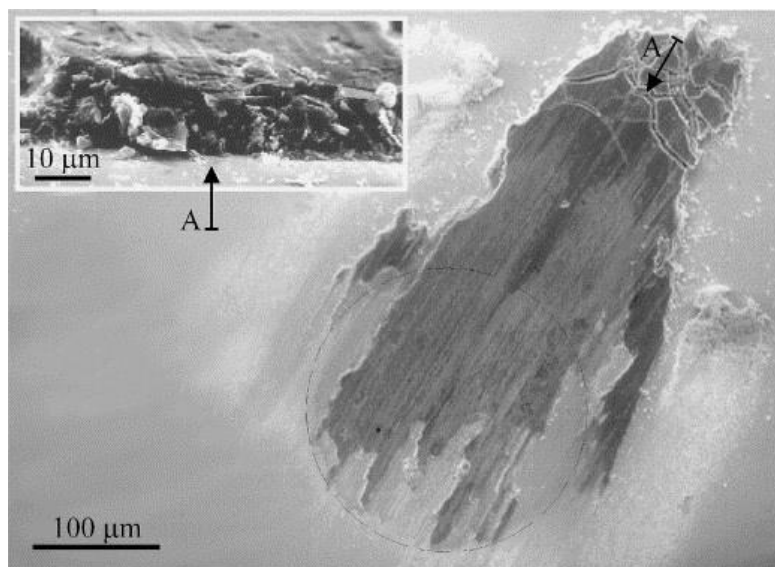


Obrázek 14 Ukázka součástí s povlakem DLC [49]

## 2.11 Tření DLC povlaků

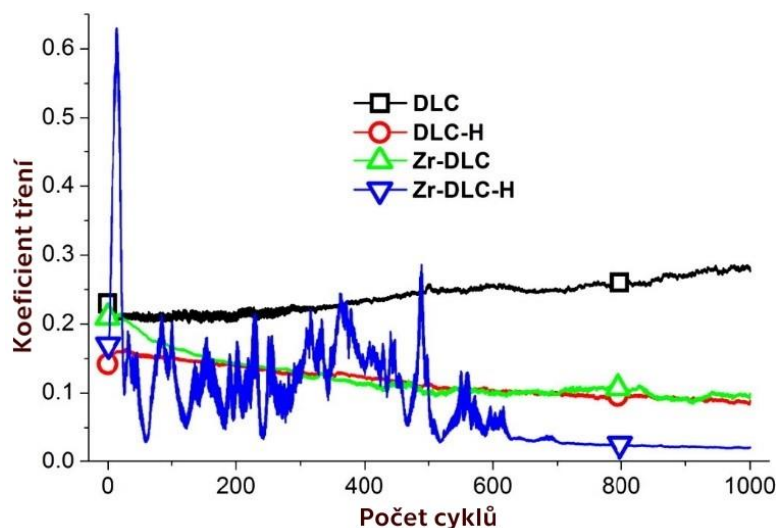
Tribologické vlastnosti čistých DLC povlaků silně závisí na jejich struktuře, zkušebních podmínkách a prostředí. Nehydrogenované povlaky obecně fungují lépe ve vlhkém prostředí, zatímco hydrogenované povlaky jsou vynikající v podmínkách suchého a inertního plynu a dosahují koeficientu tření v rozmezí 0,001–0,2 rychlost a opotřebení  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  mm<sup>3</sup> / Nm. Takové výsledky jsou na vzduchu nedosažitelné, protože kyslík a relativní vlhkost může zvýšit koeficienty tření až na 0,1-0,3. Dostatečné zvýšení teploty může vést k grafitizaci, tedy k transformaci termodynamicky meta-stabilní struktury sp 3 na stabilnější strukturu sp 2, což má za následek snížení odolnosti proti opotřebení. Přejícné teploty pro hydrogenované DLC povlaků jsou obecně v rozmezí 400–500 °C a tento proces grafitizace je doprovázen desorpcí vodíku začleněného do DLC matrice [50] [51]. Zatímco nehydrogenované povlaky jsou odolnější vůči oxidaci nebo fázové transformaci. Tvorba tribochemické vrstvy bohaté na uhlík mezi povrchem povlaku DLC a protějškem je typickým produktem suchého tření, které pozitivně ovlivňuje tribologické vlastnosti. Stabilní tribochemická vrstva potlačuje kolísání tření a snižuje

tření i opotřebení. Na obrázku 15 je vidět vytvoření vrstvy na ocelové kuličce 100Cr6, tato vrstva je tvořena zejména produkty opotřebení. Na začátku tvorby přenosové vrstvy se materiál po opotřebení převážně ukládá před kluznou plochou kuličky a později začne krycí vrstva pokrývat hlavní část kontaktní plochy. Jakmile je přítomna přenosová vrstva, je pozorován pokles opotřebení, protože DLC se posouvá proti své přenosové vrstvě. Kromě toho grafitické produkty opotřebení DLC působí také jako pevné mazivo [52].



Obrázek 15 Vytvoření přenosové vrstvy na kuličce 100Cr6 [51].

Na druhé straně by tvrdé abrazivní částice z opotřebení, přítomné v přenosové vrstvě, mohly vést k abrazivnímu opotřebení a výkyvům koeficientu tření. Dopováním DLC vrstev prvky Ti, W, Si, Zr vede k výrazným změnám vlastností povlaku, jako je změna struktury, morfologie, povrchové volné energie a mechanických vlastností. Dopované DLC povlaky často vykazují zlepšené tribologické vlastnosti nejen snížením tření a opotřebení, ale také stabilizací tribologických vlastností v různých zkušebních prostředích. Na obrázku 16 je vidět snížení koeficientu tření dopováním Zr, jak pro hydrogenované, tak i pro nehydrogenované povlaky. Tribologické vlastnosti povlaků jsou většinou ovlivňovány tvorbou a složením tribochemické vrstvy a vývojem kontaktního tlaku. I když obě tyto vlastnosti souvisejí, analýza fáze záběhu ukázala, že vývoj tření může souviset s tvorbou tribologické vrstvy, zatímco míra opotřebení odpovídá skutečnému kontaktnímu tlaku [52] [47].



Obrázek 16 Porovnání koeficientu tření mezi dopovaným a čistým DLC [52]

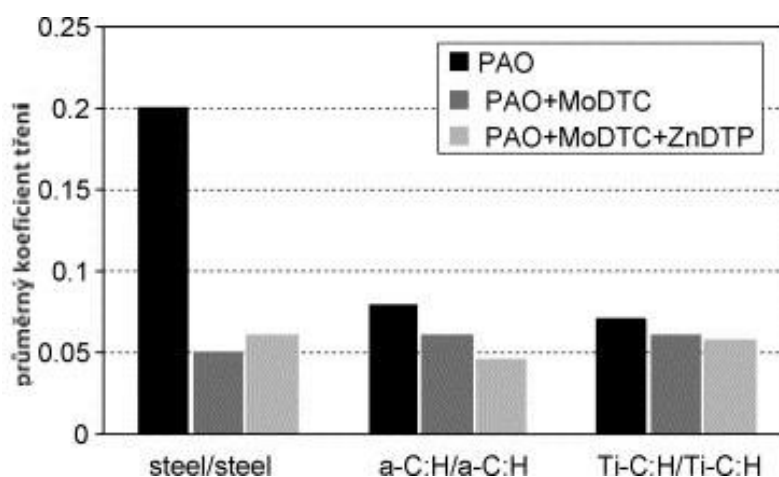
## 2.12 Tření DLC v oleji

Ve snaze vysvětlit úlohu DLC povlaků při redukci tření v závislosti na podmínkách mazání se v literatuře objevují různé mechanismy. V režimu hraničního mazání byla redukce tření spojena s grafitizací vrstvy povlaku DLC způsobená účinky mechanického namáhání a teploty. V elasto-hydrodynamickém režimu mazání bylo snížení tření původně přičítáno hraničnímu prokluzování na rozhraní kapalina/DLC v důsledku nízké povrchové energie povlaku. Aby však docházelo k hraničnímu skluzu, musí být mazivo ve své kapalné formě a povrchy musí být velmi hladké (pod  $R_{ms}=6$  nm). Stále více se proto usuzuje, že DLC působí jako tepelně izolační bariéra, která brání odvádění tepla vznikajícího v třecím kontaktu [53] [54]. To vede k vyšším teplotám mazacího filmu a v důsledku toho k snížení viskozity maziva a tím pádem k snížení tření. [54]. Zvýšené teploty v kontaktu mohou ovšem vést také k navýšení tření způsobeného přechodem smíšeného na mezní způsob mazání [53]. Kalin a Vižintin uvádějí, že u DLC kontaktů byly kontaktní teploty o 100–130 ° C vyšší než předem nastavené testovací teploty. Počáteční kontaktní teploty byly vyšší než teploty v ustáleném stavu přibližně o 250-260 ° C [55].

## 2.13 DLC mazání pomocí aditiv

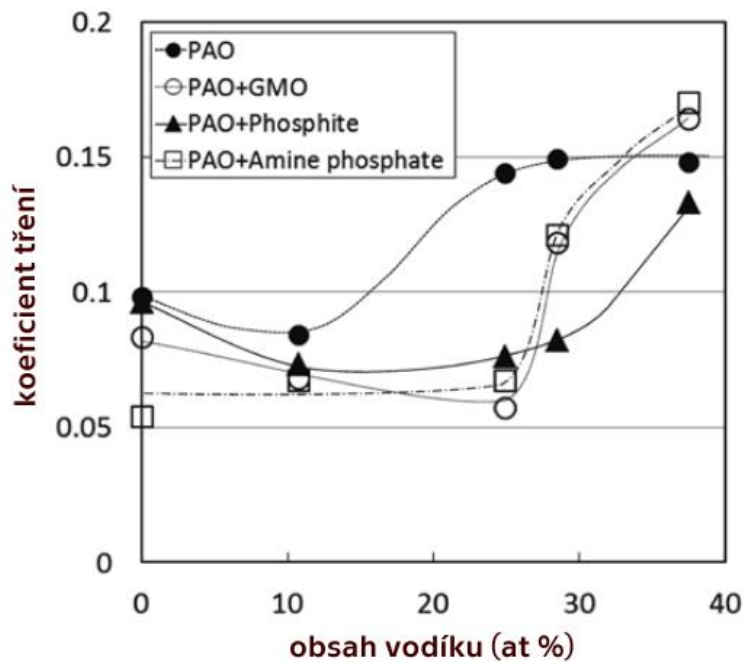
Vzhledem k inertnosti a nízké povrchové energii DLC vrstvy vykazují často zcela opačné chování než kontakty ocel/ocel. Klíčovým problémem mazání těchto povlaků je jejich nízká reaktivita, což činí jejich tribochemické interakce s lubrikanty a aditivy velmi omezenými. U ocelových kontaktů aditiva (EP) a (AW) tvoří tribochemické filmy, které snižují tření a opotřebení při mezním mazání. U DLC povlaků jsou názory na

tvorbu tribofilmu poměrně protichůdné. Někteří autoři uvádějí, že tribofilm se vytvořil na povlacích DLC, zatímco někteří uvádějí, že mezi DLC a aditivem nedošlo k žádné tribochemické reakci [56]. Zinek dialkyldithiofosfát (ZDDP) byl široce používán jako přísada proti opotřebení v motorových olejích, protože může rychle vytvářet tribofilm na třecí ploše. Výsledky výzkumu o tom, zda může ZDDP tvořit tribofilm na povrchu DLC, jsou protichůdné. Některé studie ukázaly, že ZDDP nemůže tvořit stabilní tribofilm na povrchu DLC, když obsah vodíku v DLC překročí 20 %. Kalin a Vižintin uvádí, že na DLC povlacích nebyl nalezen žádný tribologický účinek aditiv AW a EP, když byly kontaktní teploty nižší než 120-140 ° C [55]. I další autoři uvádějí, že při nízkých zkušebních teplotách (20 ° C) nemají aditiva vůbec žádný účinek. To jasně ukazuje důležitost teploty na chemickou reaktivitu mezi DLC povlakem a aditivem [57]. Na obrázku 17 jsou znázorněny ustálené koeficienty tření v čistém a v aditivovaném PAO oleji pro kontakty ocel/ocel, a-C:H/a-C:H a Ti-C:H/Ti-C:H při teplotě 100 ° C [58].



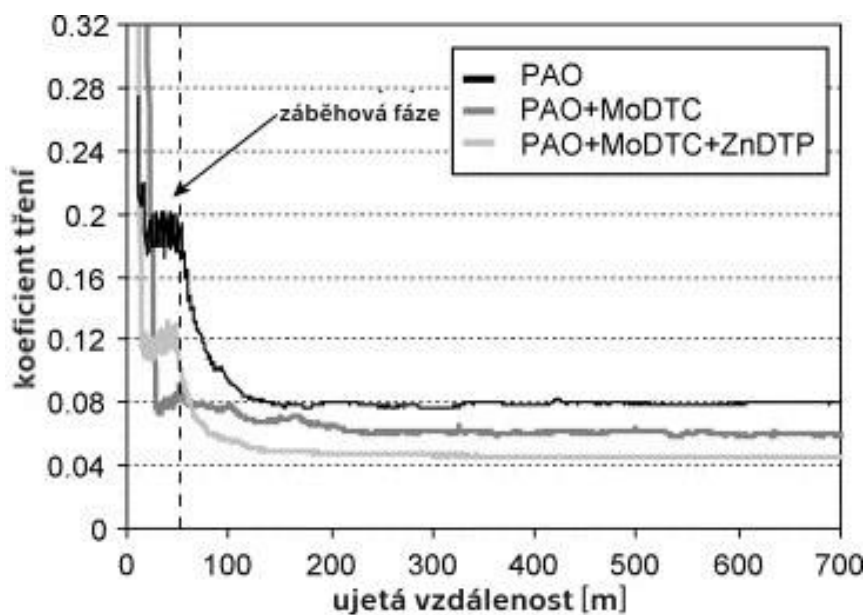
Obrázek 17 Průměrný součinitel tření dvojic DLC / DLC testovaných v různých podmínkách mazání v porovnání s ocel / ocel při 100 ° C. [58]

Některé studie ukazují, že lze narušit inertnost DLC povlaků dopováním W, H, Si. Tyto dopované vrstvy vykazovaly interakci s aditivem v oleji a tudíž docházelo ke zlepšení tribologické vlastnosti a tvorbě tribofilmu. Povlaky DLC obsahující kov se tak staly silnými kandidáty pro zlepšení životnosti a snížení třecích ztrát strojních součástí pracujících za normálních a těžkých kontaktních podmínek. Hirota také ukazuje, že koeficient tření a tribologické účinky aditiv silně závisí na obsahu vodíku v DLC vrstvě (obr. 18) [59].



Obrázek 18 Vliv obsahu vodíku v DLC vrstvě na interakci s aditivy [59]

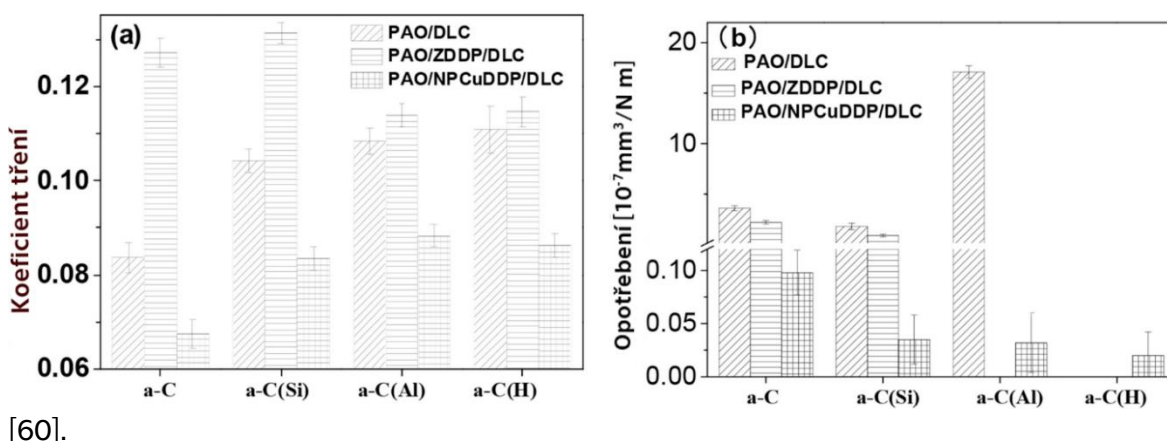
M.I. de Barros'Bouchet ukazuje že aditiva v olejích při 100 ° C reagují i s čistými DLC (a-C:H) a také že mají velký vliv na zlepšení záběhové fáze DLC povlaku (obr. 19) [58].



Obrázek 19 Koeficienty tření aC: H / aC: H pár v závislosti na klzné vzdálenosti za různých podmínek mazání při 100 ° C [58]



Většina maziv, která jsou v současné době používána pro snížení tření a opotřebení motorů, byla navržena pro interakci s povrchy na bázi železa. Proto jsou často ne zcela účinná pro použití u povrchů s DLC. Je také důležité si uvědomit, že existuje mnoho různých typů DLC povlaků, které se mohou chovat zcela odlišně. Výrobci maziv si musí být vědomi těchto rozdílů a být schopni vyrábět typy maziv, které jsou účinné s mnoha typy povlaků DLC [56]. Proto se hledají i jiné typy aditiv. Nano-částice jako přísady do motorového oleje mohou obohatit a vytvořit tribofilm na třecím povrchu, který nejenže působí proti tření a proti opotřebení, ale může také opravit opotřebovaný povrch. V experimentu byli použity čtyři druhy DLC aC, aC (Si), aC (Al) a aC (H) vrstev s použitím nano-aditivních částic mědi (NPCuDDP) a tradičního aditiva ZDDP v základním PAO oleji. Porovnáním tribologického mechanismu NPCuDDP a ZDDP lze získat následující závěry. Nano-aditivum mědi významně snížilo koeficient tření u všech testovaných typů DLC vrstev o přibližně 20 % a snížilo míru opotřebení o 2–3 řády ve srovnání s ZDDP, nebo bez jakýchkoli přísad viz obrázek 20

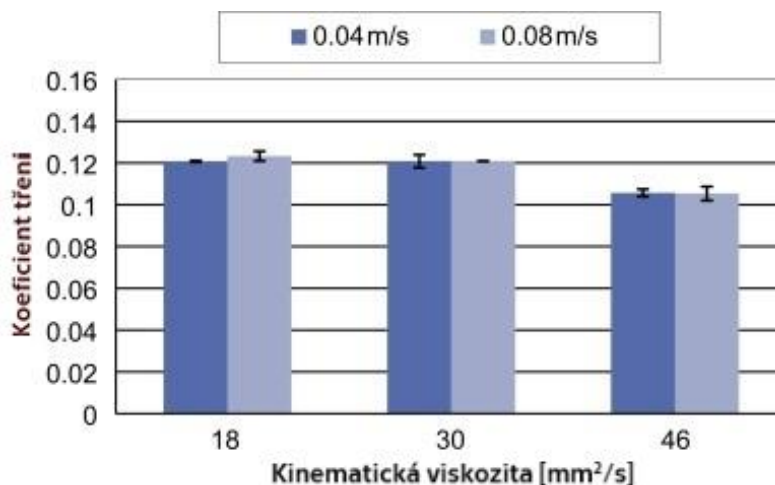


Obrázek 20 Součinitel tření (a) a rychlost opotřebení (b) DLC povlaků v oleji s aditivu [60].

## 2.14 DLC mazání a viskozita

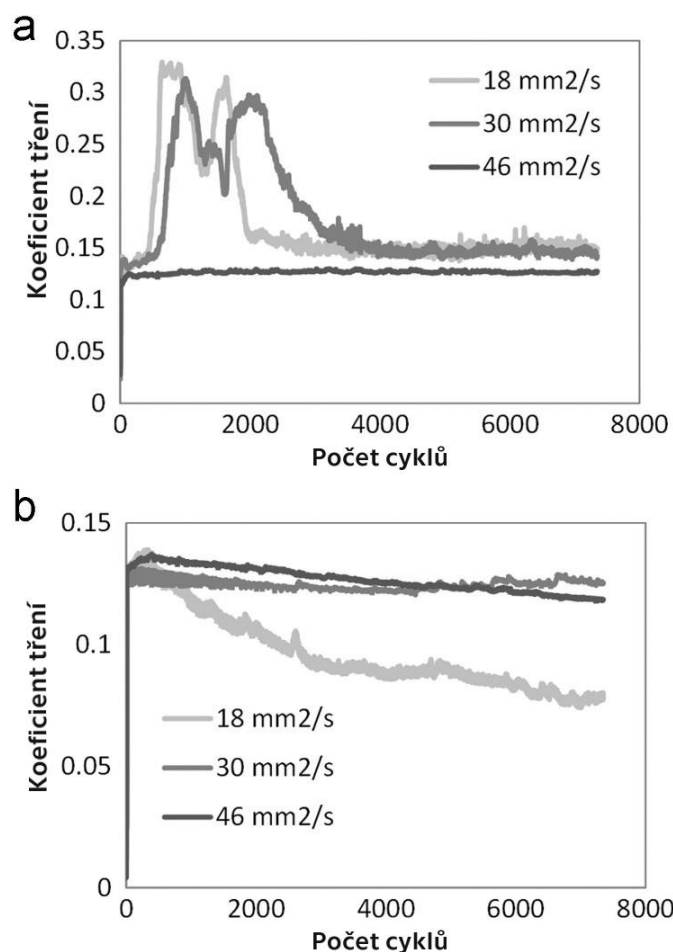
Viskozita popisuje schopnost oleje proudit za daných podmínek a teplot. Viskozita hraje důležitou roli ve všech režimech mazání. Například do značné míry určuje režim mazání a tloušťku olejového filmu a tím i separaci povrchu, což je velmi důležité zejména tam, kde je vyžadován elastohydrodynamický režim mazání. Výrobci maziv nejčastěji uvádějí kinetickou viskozitu při 40 °C a 100 °C. Označení PAO 4, PAO 6 a PAO 8 znamená, že kinetická viskozita je 4, 6 a 8 mm<sup>2</sup> / s při 100 °C a 18, 30 a 46 mm<sup>2</sup> / s při 40 °C [61]. I. Velkavrh ve své práci studoval třecí chování kontaktů DLC / DLC v různých viskózních třídách základních polyalfaolefinových olejů (PAO) s viskozitami 18, 30 a 46 mm<sup>2</sup>/s v rozsahu rychlostí od 0,04 do 0,41 m/s. Na obrázku

21 je vidět, že při rychlostech do 0,08 m/s nebyl pozorován téměř žádný vliv viskozity na koeficient tření u DLC vrstev. Viskozita i rychlost je tak nízká, že nemá žádný zásadní vliv na separaci povrchu [62].



Obrázek 21 Rovnoměrné tření kontaktů DLC / DLC pro tři různé viskozity oleje při nízkých rychlostech posuvu [62].

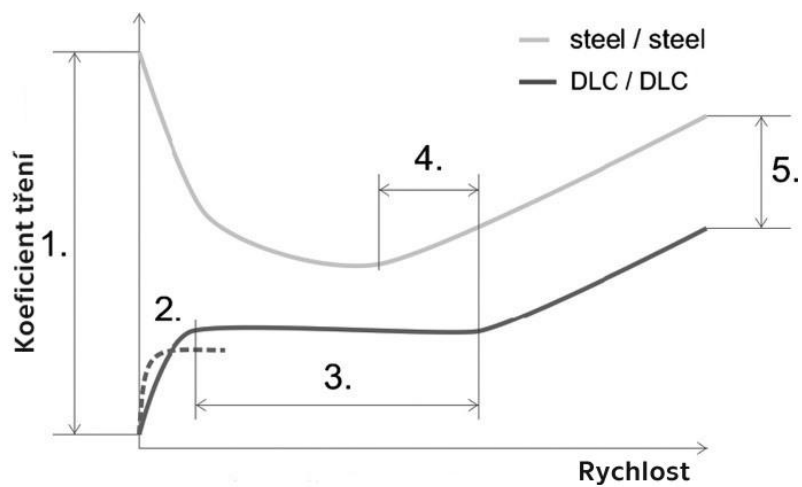
I. Velkavrh a M. Kalin ve své práci porovnávali vliv viskozity maziva na třecí chování kontaktů DLC/DLC a ocel/ocel. Použili tři polyalfaolefiny o různé kinematické viskozitě PAO 4, PAO 6 a PAO 8. Tribologické testy byly prováděny při teplotě okolí 25°C. Ve všech testech byla použita rychlost posuvu 0,01 m / s. Výsledky (obr. 22) ukázaly zcela odlišné chování kontaktů DLC / DLC ve srovnání s kontakty ocel / ocel, což bylo zvláště zajímavé z hlediska chování při tření. Použití maziva PAO v DLC / DLC kontaktu vedlo k vyššímu tření v porovnání s DLC / DLC bez mazání. Dále účinek viskozity oleje na tření DLC/DLC byl opačný než u kontaktu ocel/ocel. Vyšší viskozita oleje u DLC/DLC kontaktu zvyšovala tření, což je zcela odlišná reakce než u kontaktu ocel/ocel, kde vyšší viskozita tření snižuje. Ale olej s vyšší viskozitou snížil opotřebení jak ocelových, tak DLC povrchů. Viskozita tak chrání oba povrchy před opotřebením, ale má opačné účinky na tření, které se může snížit (ocel) nebo zvýšit (DLC) [41].



Obrázek 22 Součinitel tření v (a) oceli / oceli a (b) kontakty DLC / DLC mazané při 18, 30 a 46 mm<sup>2</sup> / s v PAO oleji [41]

Vzhledem k tomu, že DLC nevykazuje adhezi mezi nerovnostmi, která je typická pro ocel díky silným kovovým vazbám, olej již zde nemůže přispět ke snížení tření. Naopak síla potřebná pro stříh vrstev maziva v kontaktu je vyšší než snížení adheze nebo deformace, které jsou dvěma hlavními zdroji tření v mezním mazání běžných kovových povrchů. Tedy čím vyšší je délka molekulárního řetězce nebo viskozita, tím vyšší je soudržná energie vrstvy, a proto je zapotřebí více energie k jejímu rozbití nebo smyku, a tím je tření vyšší. Všechny výsledky tyto vztahy jasně potvrzují jak pro oleje PAO, tak pro čisté alkany. Oproti tomu v případě oceli olej výrazně snižuje adhezivní interakce a tím i tangenciální síly potřebné k rozbití kovových vazeb, které se jinak snadno vyskytují za nemazaných podmínek [23] [36]. M. Kalin ukazuje, že tvar Stribeckovy křivky (obr. 23) může být značně odlišný pro kontakt DLC/DLC. Především v oblasti mezního mazání má křivka inverzní tvar na rozdíl od klasické Stribeckovi křivky. Při nejnižších rychlostech je zde koeficient tření v kontaktu DLC / DLC nejnižší, namísto zvětšení, jak tomu bývá u kontaktu ocel/ocel. U DLC kontaktů byl také

přechodový bod odděluje smíšené a EHL režim mazání posunut směrem k vyšším rychlostem ve srovnání s ocelovými kontakty [36].

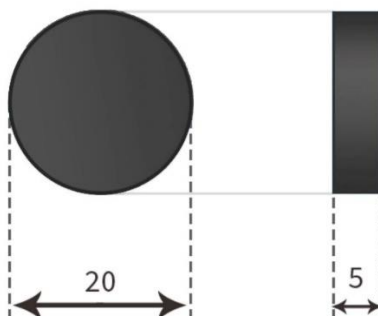


Obrázek 23 Porovnání Stribeckovy křivky pro kontakt DLC/DLC s ocel/ocel [36].

# 3 Experimentální část

## 3.1 Příprava vzorku

Celkem bylo připraveno 24 vzorků povlaku TiNb-DLC, který byl deponován na substrát o průměru 20 mm a výšce 5 mm (obr. 24) z oceli 1.2379 (19 573, X153CrMoV12) jejíž chemické složení je znázorněno v tabulce 1. 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. Ocel je sekundárně vytvrditelná a je vhodná pro následné deponování povlaků PVD nebo CVD.



Obrázek 24 ukázka vzorku [63]

Tabulka 1 chemické složení oceli 1.2379 ČSN EN ISO 4957

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
Hm %	1,45-1,6	0,20-0,60	0,10,-0,60	11,13	0,7-1	0,7-1	max 0,03	max 0,03

Povlaky 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 čištěny v argonové plazmě a následně povlakovány adhezní mezivrstvou TiNb, která byla deponována metodou nerovnovážného magnetronového naprašování z titan-niobového terče (Ti39Nb) v argonové atmosféře (99,999 %) po dobu 20 minut. Gradientní přechod z čistého TiNb na TiNb-C:H byl vytvořen zvyšováním toku acetyleny (čistota 99,6 %) z 20 sccm na konečných 70 sccm za dobu 15 minut. Funkční vrstva TiNb-C:H byla deponována metodou reaktivního magnetronového naprašování z terče Ti39Nb a tokem acetyleny 70 sccm, přičemž tento proces probíhal po dobu 4 hodin. Depoziční teplota byla 200 °C. použito bylo

pulzní předpětí – 120 V, na substrátech a terčích byla frekvence 40 kHz. Pracovní tlak byl  $4 \cdot 10^{-1}$  Pa a příkon na katodách 3 kW.

## 3.2 Příprava experimentu

Pro vyhodnocení záběhové fáze bylo provedeno 26 měření na vzduchu a 26 měření v čistém PAO oleji Labovac 14 od firmy Welch. Výrobce udává, že tento typ oleje má při 40 ° C viskozitu 47,9 mm<sup>2</sup>/s. Všechna měření byla uskutečněna metodou Pin-on-disk, při rychlostech 0,1, 1 a 10 cm/s a při normálovém zatížení 10 N a pokojové teplotě 20 až 24 ° C. V tabulce 2 je uveden čas a ujetá dráha na jednotlivých vzorcích. Rozsah rychlostí byl volen tak, aby pokryl různé zdroje tepla produkované v procesu tření. (při rychlosti 0,1 cm/s by měl být zdroj tepla prakticky zanedbatelný). A také aby kontaktní podmínky odpovídaly režimu hraničního mazání, kde tribologické účinky neovlivňují žádné hydrodynamické účinky. Pro každou rychlost bylo provedeno 9 měření s rozdílným počtem zatěžovacích cyklů (100, 200, 500, 1 000, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 100 000). Na každý vzorek o průměru 20 mm byly vytvořeny 3 stopy o poloměru 6, 7 a 8 mm. Pro úspory času byla nejdelší měření realizována na nejmenších poloměrech. Z důvodu vysoké časové náročnosti nebylo uskutečněno nejdelší měření 100 000 cyklů pro rychlost 0,1 cm/s. Toto měření by trvalo 43,6 dnů v tabulce 2 je označeno šedě.

Tabulka 2: časy měření, ujetá dráha a číslo vzorku

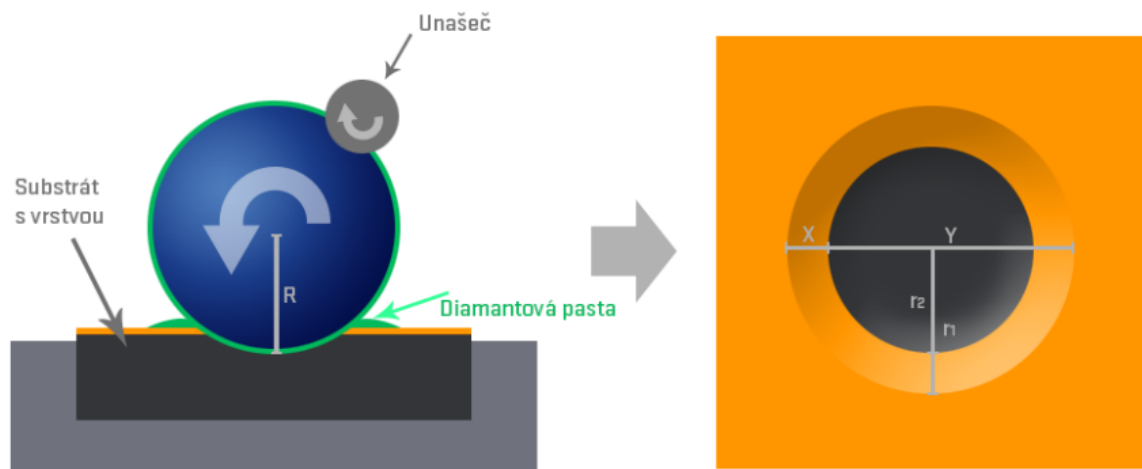
Vzduch										
V [cm/s]		0,1			1			10		
počet cyklů	dráha [m]	R [mm]	t	č. vzorku	R [mm]	t	č. vzorku	R [mm]	t	č. vzorku
100	5	8	1,4 hodin	A274	8	8,4 minut	A279	8	0,8 minut	A273
200	10	8	2,8 hodin	A268	8	16,8 minut	A283	8	1,7 minut	A290
500	25	8	7 hodin	A289	8	41,9 minut	A 276	8	4,2 minut	A 269
1 000	44	7	12,2 hodin	A274	7	1,2 hodin	A279	7	7,3 minut	A273
2 000	88	7	1 den	A289	7	2,4 hodin	A283	7	14,7 minut	A290
3 000	132	7	1,5 dne	A275	7	3,7 hodin	A276	7	22 minut	A 269
5 000	188	6	2,2 dne	A275	6	5,2 hodin	A283	6	31,4 minut	A 269
10 000	377	6	4,4 dnů	A289	6	10,5 hodin	A279	6	1 hodina	A290
100 000	3770	6	43,6 dnů		6	4,4 dnů	A274	6	10,5 hodin	A276

PAO										
V [cm/s]		0,1			1			10		
počet cyklů	dráha [m]	R [mm]	t	č. vzorku	R [mm]	t	č. vzorku	R [mm]	t	č. vzorku
100	5	8	1,4 hodin	A270	8	8,4 minut	A118	8	0,8 minut	A120
200	10	8	2,8 hodin	A284	8	16,8 minut	A267	8	1,7 minut	A278
500	25	8	7 hodin	A271	8	41,9 minut	A119	8	4,2 minut	A282
1 000	44	7	12,2 hodin	A284	7	1,2 hodin	A119	7	7,3 minut	A278
2 000	88	7	1 den	A271	7	2,4 hodin	A267	7	14,7 minut	A120
3 000	132	7	1,5 dne	A270	7	3,7 hodin	A118	7	22 minut	A282
5 000	188	6	2,2 dne	A284	6	5,2 hodin	A267	6	31,4 minut	A278
10 000	377	6	4,4 dnů	A280	6	10,5 hodin	A119	6	1 hodina	A282
100 000	3770	6	43,6 dnů		6	4,4 dnů	A118	6	10,5 hodin	A270

## 3.3 Mechanické vlastnosti povlaku

### 3.3.1 Stanovení tloušťky povlaku

Tloušťka povlaku TiNb-DLC byla měřena na Calotest Compact od firmy CSM Instruments a následně vyhodnocena na optickém mikroskopu NEOPHOT 32. Calotest umožňuje měření tloušťky povlaku pomocí vybroušení kulového vrchlíku do povrchu kuličkou s přídavkem abrazivní diamantové pasty (obr.25). Vzniklá kalota se poté vyhodnocuje na optickém mikroskopu, kde lze změřit průměry vzniklých soustředných kružnic a poté pomocí rovnice 1 vypočítat tloušťku jednotlivých vrstev.



Obrázek 25 Schéma kalotestu [63]

Rovnice (1) výpočet tloušťky povlaku:

$$t = \sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2} \quad (1)$$

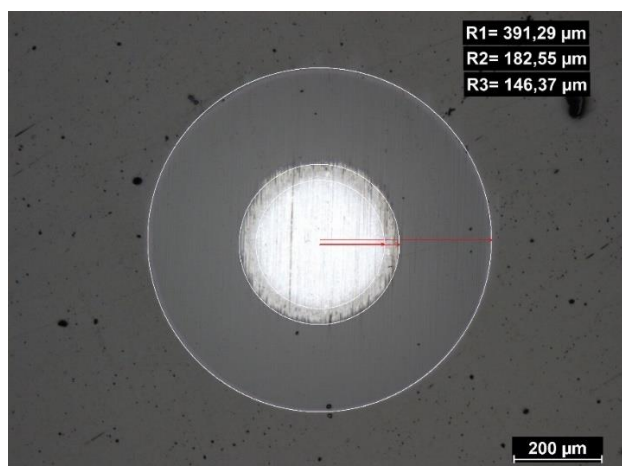
Kde:  $t$  = tloušťka povlakované vrstvy [mm]

$R$  = poloměr kuličky [mm]

$r_1$  = malý průměr vrstvy [mm]

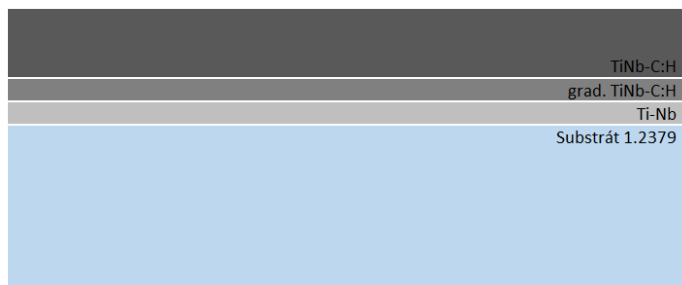
$r_2$  = velký průměr vrstvy [mm]

K vybroušení povlaku byla použita ocelové kulička o průměru 30 mm a abrazivní diamantová suspenze o velikosti zrn  $0 \mu\text{m}$  až  $0,2 \mu\text{m}$ , při 500 ot/min, po dobu 540 s. Snímek vybroušené kaloty do povlaku je znázorněn na obr. 26 a složení vrstvy povlaku TiNb-DLC je znázorněno na obr. 27.



Obrázek 26 Snímek kaloty vybroušené do povlaku TiNb-DLC

Nejprve byla na substrát deponována adhezní vrstva titan-niobu o tloušťce  $0,4 \mu\text{m}$ , na tuto vrstvu byla navyšováním toku acetylenu z  $20 \text{ sccm}$  na konečných  $70 \text{ sccm}$  vytvořena gradientní mezivrstva vrstva TiNb-C:H, která přešla až na vrchní funkční vrstvu TiNb-C:H, jelikož na kalotě není viditelný gradientní přechod z adhezní mezivrstvy TiNb na TiNb-C:H je možná určit pouze součet těchto vrstev, který činí  $3,99 \mu\text{m}$ . Celková tloušťka povlaku je  $4,39 \mu\text{m}$ . Souhrnné složení vrstvy je znázorněno na obrázku 27.

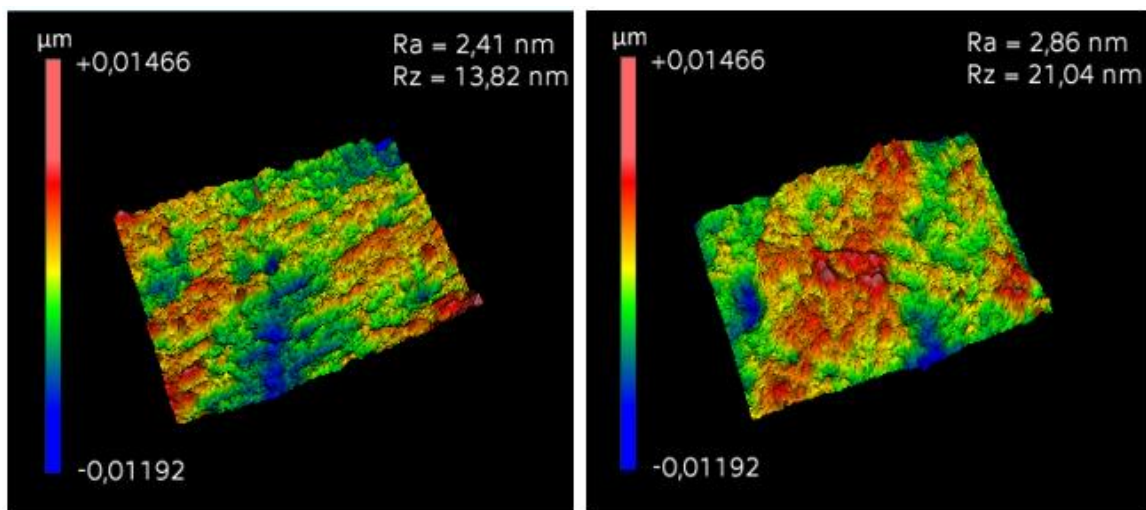


Obrázek 27 Složení vrstvy TiNb-DLC

### 3.3.2 Drsnost

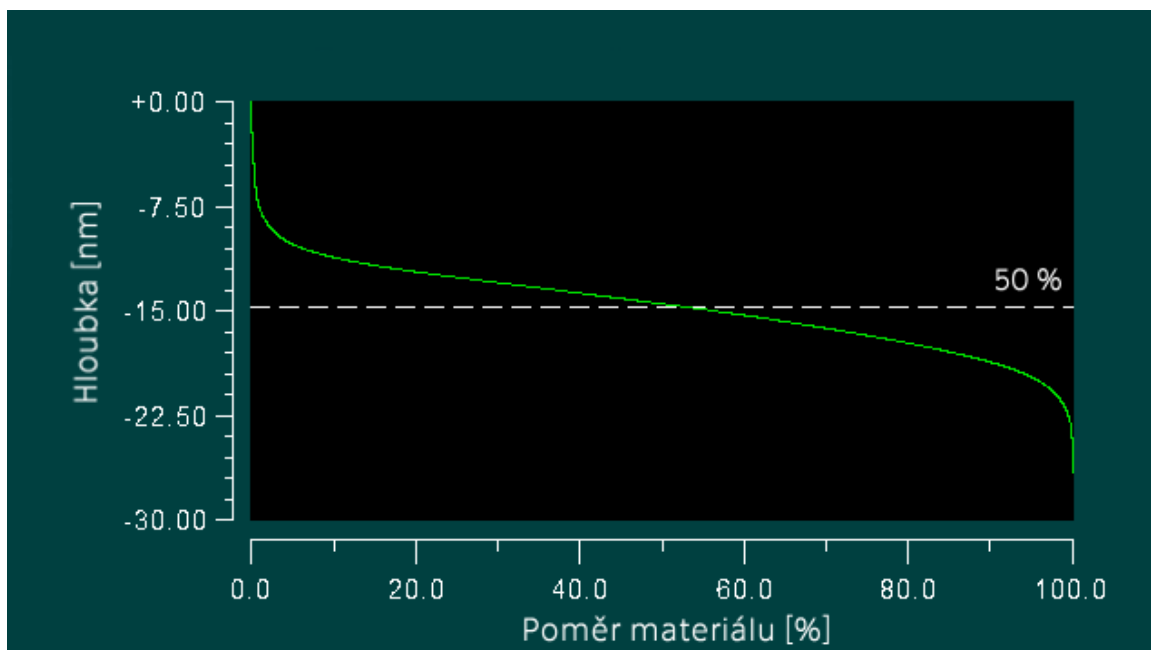
Drsnost je jedním z nejdůležitějších vlastností povrchu, který při záběhu hraje klíčovou roli na velikost opotřebení a tření. Proto byli na optickém profilometru ZYGO NewView7200 vyhodnoceny základní parametry drsnosti povlaku TiNb-DLC. Nejprve byl nasnímám detailní pohled na profil povrchu (obr.28), na kterém jsou výstupky vyznačeny červenou barvou a prohlubně barvou modrou. Na obrázku 28 je vidět plošná drsnost na ploše  $0,014 \text{ mm}^2$ , kde se parametr  $R_a$  pohyboval mezi  $2$  až  $3 \text{ nm}$  a parametr  $R_z$  mezi  $10$  až  $30 \text{ nm}$ . Dále byla drsnost měřena podél přímky o délce  $1 \text{ mm}$ . Zde byla průměrná hodnota  $R_a = 5 \text{ nm}$  a  $R_z = 40 \text{ nm}$ .





Obrázek 28 Profil povrchu povlaku TiNb-DLC

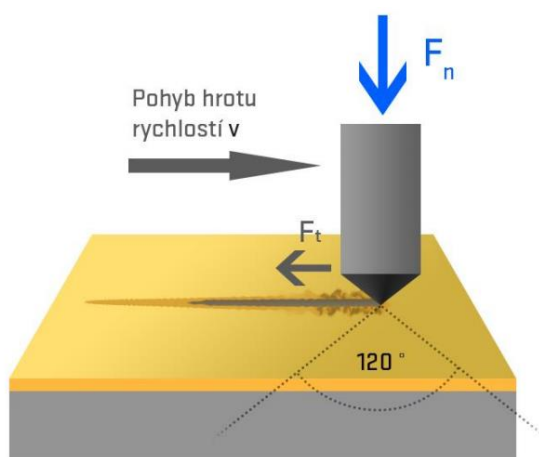
O tom, jak bude proces záběhu vypadat nám může nejvíce napovědět Abboova křivka. Abbotova křivka, znázorňuje množství materiálu přítomného ve vybraných výškách profilu povrchu, který je k dispozici pro přenášení vnějšího zatížení působícího na kontakt a přímo souvisí se skutečnou plochou kontaktu. Abbotova křivka (obr. 29) byla sestrojena z nasnímaných povrchů, které jsou zobrazeny na obrázku 28. Z této křivky je patrné, že 50 % kontaktní plochy se nachází v hloubce 15 nm. Také z této křivky můžeme říct, že profil povrchu se skládá z rovnoměrného zastoupení výčnělků a prohlubní.



Obrázek 29 Abbotova křivka povlaku TiNb-DLC

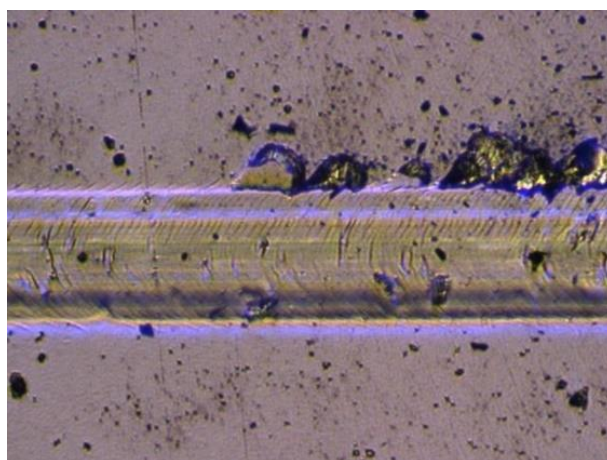
### 3.3.3 Vrypová zkouška

Adheze mezi DLC povlakem a kovovým substrátem hraje klíčovou roli pro zajištění spolehlivého provozu a dlouhé životnosti součástí. Vrypová zkouška často také označována jako Scratch test se používá k hodnocení adhezivně-kohezivnímu porušení povlaku. Zkouška spočívá v posuvu diamantového Rockwellova indentoru zatěžovaného kontinuálně narůstající silou s pohybem hrotu (obr. 30). Následně se pomocí mikroskopu a akustické emise generované v průběhu testu vyhodnocuje kritická síla při které dochází k porušení adheze.



Obrázek 30 Schéma vrypové zkoušky [63]

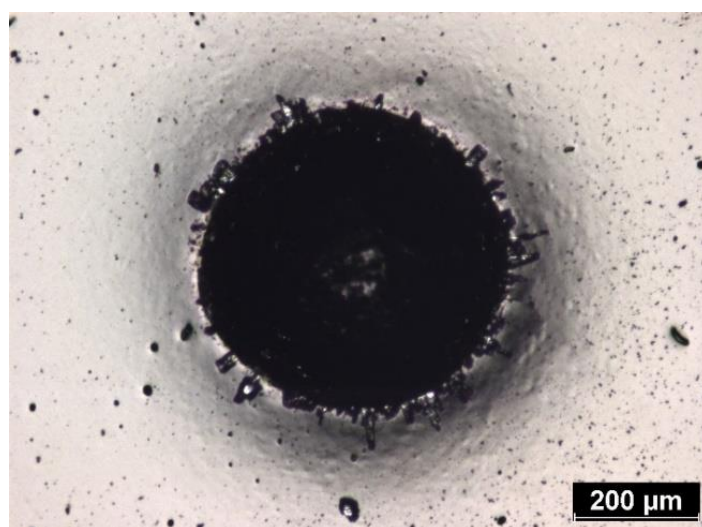
Povlak TiNb-DLC byl otestován pomocí vrypové zkoušky na zařízení Revetest Xpress Plus RSX+ od firmy CSM Instruments. Vryp byl vytvořen plynule zatěžovaným indentorem od zatěžovací síly 1 N až po 50 N na úseku 10 mm. První viditelné porušení adheze povlaku TiNb-DLC k substrátu nastalo při 26 N (obr. 31) a k souvislému porušení adheze došlo při zatížení 30 N.



Obrázek 31 Snímek z Vrypové zkoušky povlaku TiNb-DLC při zatížení 26 N

### 3.3.4 Indentační test

Další možností posouzení adheze povlaku k substrátu je indentační (vnikací) test, někdy též označovaný jako Mercedes test. Zkouška spočívá ve vpichu diamantového Rockwellova indentoru do vzorku. Vzniklý vpich se následně vyhodnocuje na optickém mikroskopu a rozděluje podle tabulky do šesti tříd. První třída popisuje jen drobné prasklinky, další pak vzrůstající stupeň poškození a poslední pak selhání adheze. Jako vyhovující se považují vzorky ve třídě HF 1 až HF 3. Na základě provedených 5 vpichů, z nichž jeden je vyobrazen na obr 32, byla adheze k substrátu vyhodnocena jako HF2. Na okraji vpichu je viditelné pouze drobné odlupování povlaku.



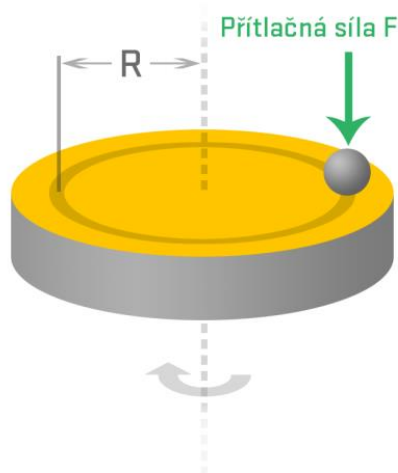
Obrázek 32 Snímek povlaku po indentačním testu

### 3.3.5 Nanotvrdost povlaku

Nanotvrdost je kontaktní metoda vyvinutá pro hodnocení mechanických vlastností velice tenkých vrstev. Měření nanotvrdosti do jisté míry vychází z Vikrsovy zkoušky, avšak zatěžuje se zde řádově nižšími přítláčními silami v jednotkách milinewtonů. Tvrdost byla měřena na Nanotvrdoměru a vyhodnocována pomocí metody Oliver Pharr [64]. Do povlaku TiNb-DLC bylo provedeno 10 vpichů. Zatěžovací síla indentoru se pohybovala okolo hodnoty 15 mN. Hloubka vtisku nepřesáhla 238 nm. Naměřená tvrdost povlaku je v průměru 14,42 GPa a modul pružnosti 130,86 GPa. Pro porovnání tvrdost kuličky 100Cr6 se pohybuje okolo 60 HRC  $\approx$  7 GPa

## 4 Tribologické vlastnosti

Metoda pin-on disk slouží k měření průběhu koeficientu tření a opotřebení. Test spočívá v interakci rotujícího vzorku (disku) a nejčastěji kuličky (pinu). Pin je zatížený předem danou silou, která je nejčastěji v rozmezí 1 až 10 N. Pin zatížený touto silou zanechá na disku kruhovou stopu. Schéma této metody je zobrazeno na obr. 33.



Obrázek 33 Schéma metody Pin-on-disk [63]

Po skončení testu se vyhodnocuje opotřebení kuličky a disku. Objemový úbytek materiálu na kuličce lze vypočítat jako vrchlík odebraný z předem známé koule podle rovnice 2. Ale protože se často provádí zkoušky na více poloměrech. Je zapotřebí objem opotřebení kuličky přepočítat pomocí rovnice Archarda a Hirsta (rovnice 4).

Rovnice (2) výpočet objemového úbytku pinu:

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

Kde:  $A$  = Nejmenší průměr stopy

$B$  = Průměr v kolmém směru

$D$  = Průměr kuličky

Po dokončení zkoušky je na disku viditelná opotřebovaná stopa ve tvaru kružnice o poloměru  $r$ . Pomocí optického profilometru lze nasnímat tvar této stopy a v řezu je možné určit plochu  $S$ . Na základě znalosti plochy, opotřebování stopy v řezu a poloměru, na kterém byla stopa vytvořena, se dá vypočítat objem odebraného materiálu na základě rovnice 3. A dále je za potřebí opět objem přepočítat podle ujeté vzdálenosti a zatížení podle rovnice 4.

Rovnice (3) výpočet objemového úbytku na disku:

$$V_{disk} = \pi r S \quad (3)$$

Kde:  $r$  = poloměr stopy

$S$  = plocha stopy

Rovnice (4) přepočítání pomocí Archarda a Hirsta:

$$W_{pin} = \frac{V_{pin}}{F_s} \quad W_{disk} = \frac{V_{disk}}{F_s} \quad (4)$$

Kde:  $F$  = normálové zatížení

$s$  = ujetá vzdálenost pinu po disku

## 4.1 Opotřebení kuličky

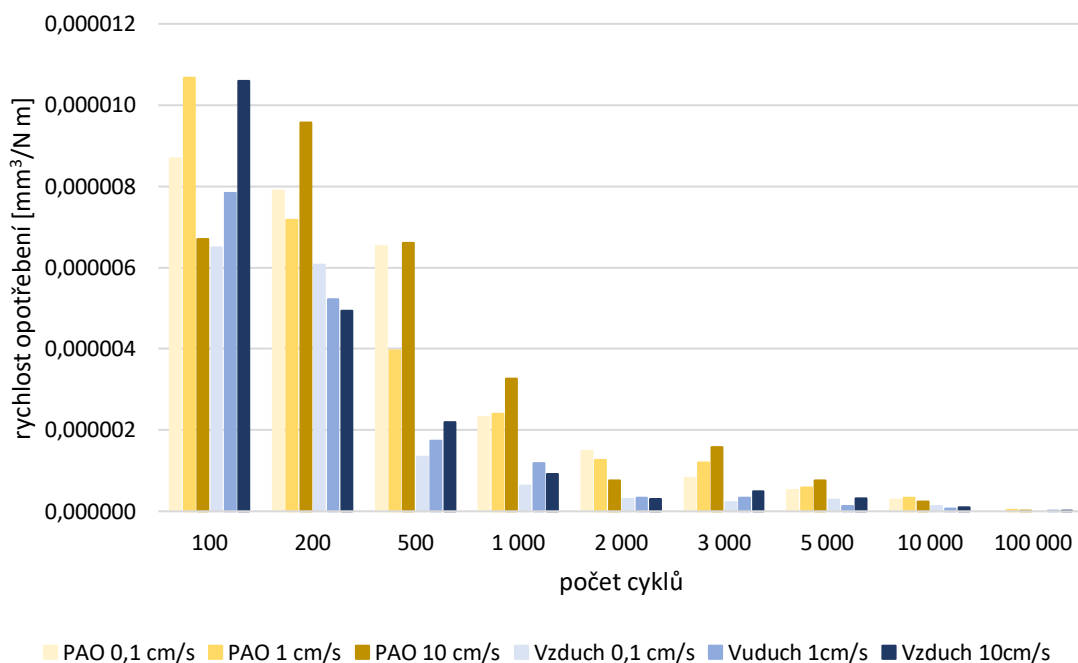
Opotřebení kuličky o průměru 6 mm vyrobené z chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6, jejíž chemické složení je znázorněno v tabulce 3, bylo měřeno na optickém mikroskopu Nikon SMZ1500, vyhodnoceno podle vzorce uvedeného v předchozí kapitole a následně přepočítáno podle rovnice Archarda a Hirsta. Kulička byla měřena po 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 100 000 cyklech při třech rychlostech 0,1, 1 a 10 cm/s.

Tabulka 3 Chemické složení oceli 100Cr6

Prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Hm %	0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,60	max 0,30	max 0,25	max 0,027	max 0,030

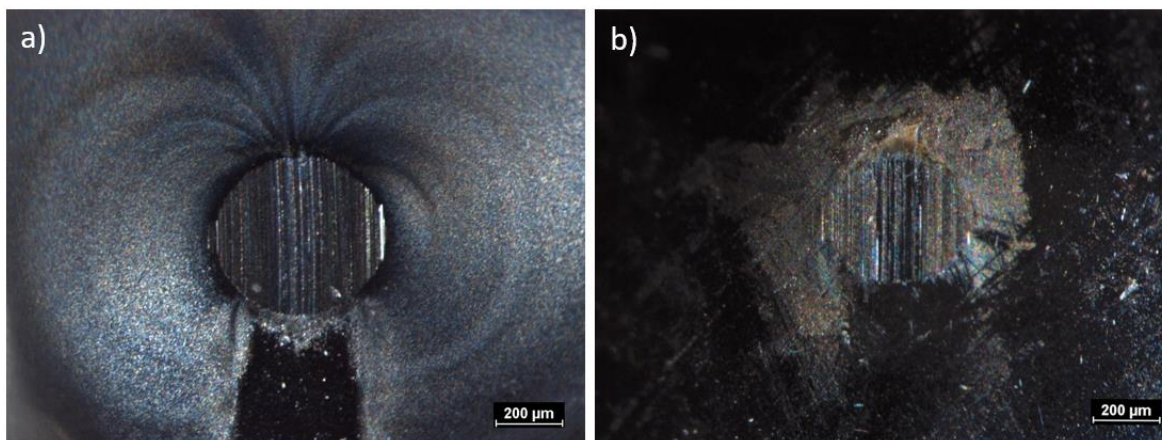
Průběžná analýza tribologického testu opotřebení kuličky jasně ukázala, že doba záběhu úzce souvisí s rychlým poklesem kontaktního tlaku. Na začátku experimentu má pin dokonale sférickou plochu, což způsobuje extrémně vysoký kontaktní tlak. Proto je opotřebení kuličky v prvotní fázi záběhu velice intenzivní. Při normálním zatížení 10 N se počáteční bodová kontaktní plocha značně zvětšuje a vytváří se viditelná kontaktní plocha o průměru přibližně 400  $\mu\text{m}$ , která je viditelná již po 100 cyklech. Kontaktní tlak pak tedy klesne na hodnotu 80 MPa. Po dosažení tohoto kontaktního tlaku opotřebení kuličky s narůstajícím počtem cyklů narůstá již velice pomalu. Z naměřených hodnot prezentovaných v grafu na obrázku 34 je patrné, že v prvotní fázi záběhu (100-200 cyklů) je v průměru rychlost opotřebení kuličky 250x větší než při 100 000 cyklech. Ale s narůstajícím počtem cyklů se zvětšuje kontaktní

plocha a rychlost opotřebení velice strmě klesá. Z obrázku je také vidět, že rychlost opotřebení kuličky byla v oleji po dosažení 500 cyklů přibližně 2x větší.



Obrázek 34 rychlost opotřebení kuličky v PAO a na vzduchu

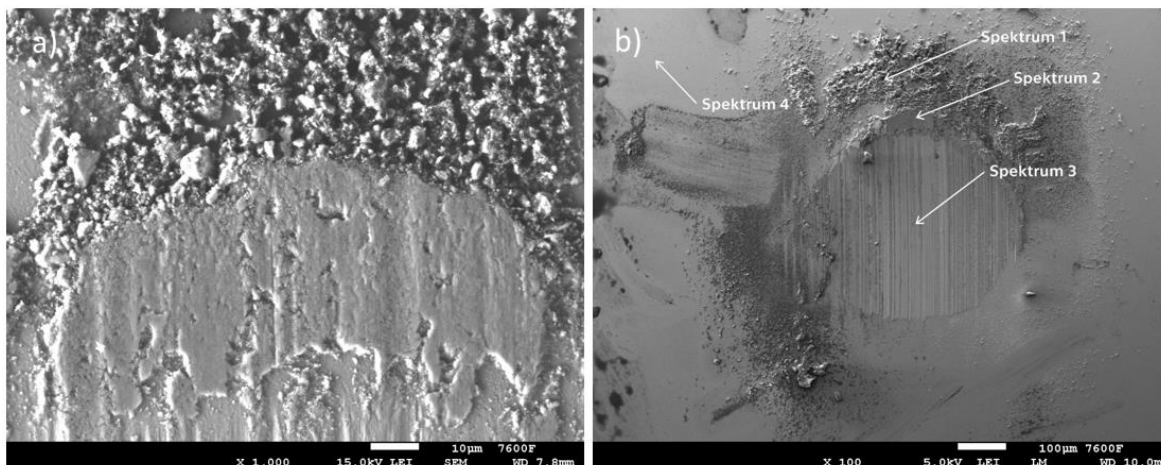
To je způsobeno tvorbou nárůstku na náběžné hraně kuličky při testech na vzduchu (obr. 35 b). Detailní pohled a chemický rozbor složení tohoto nárůstku bude probrán v následující kapitole. V oleji k tvorbě této tribologické vrstvy nedochází, jak je vidět na obrázku 35 a). Z obrázku je také zřejmé, že vzniklé opotřebení se v PAO oleji na povrchu kuličky usazuje po proudnicích, ze kterých je také možné usoudit, že na odtokové hraně vzniká vír, který zde kuličku čistí.



Obrázek 35 Porovnání opotřebení kuličky po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v oleji a) a na vzduchu b)

## 4.2 Chemická analýza kontaktu

Chemické složení produktů vznikajících v kontaktu bylo vyhodnocováno metodou EDS (energeticky disperzní spektroskopie). Tato metoda je založena na sběru rentgenova záření, které je vyvoláno vzájemným působením elektronů a materiálu. Toto charakteristické rentgenovo záření je pro každý prvek jiné specifické energie, která slouží k identifikaci prvků obsažených ve vzorku. EDS analýza uskutečněná na elektronovém mikroskopu JOEL JSM-7600F na kuličce naznačuje, že nárůstek, který se tvoří na náběžné hraně kuličky (spektrum 2) na obrátku 36) je tvořen zejména produkty opotřebení z povlaku tedy směsí uhlíku s niobem a titanem jak je zřejmé z tabulky 5 ve které jsou uvedeny všechny uskutečněné bodové analýzy chemického složení v atomových procentech a tabulky 6 ve které je složení uvedeno v hmotnostních procentech. V kontaktu na vzduchu také na rozdíl od mazaného kontaktu PAO olejem dochází k vzdušné oxidaci. To může vest ke vzniku velice tvrdých oxidů již zmíněných prvků. Dále je z EDS analýzy patrné, že na kontaktní ploše kuličky (spektrum 3) nedochází ke vzniku tribochemické vrstvy pouze je zde lehce zvýšená koncentrace niobu oproti základnímu materiálu (spektrum 4). Chemická analýza povlaku ukázala, že povlak TiNb-DLC je tvořen především uhlíkem a přibližně 5 % niobu a 3 % titanu atomového podílu. To představuje hmotnostní zastoupení niobu 24 % a titanu 8 %.



Obrázek 36 Snímek opotřebení kuličky na vzduchu po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s pořízený na elektronovém mikroskopu a) detailní pohled na nárůstek b) ukázka vyhodnocovaných bodových spekter metodou EDS

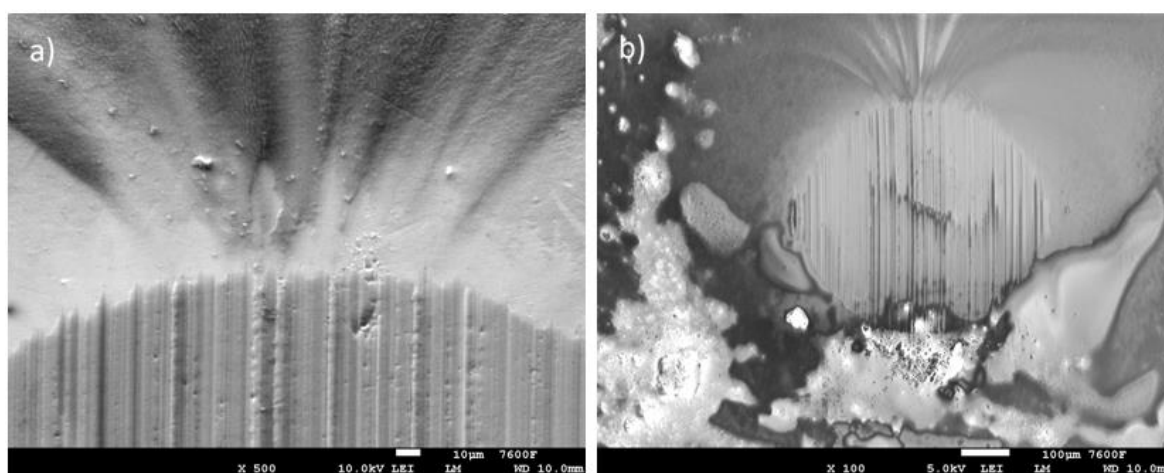
Tabulka 5 Chemické složení spekter 1 až 4 v atomových procentech

Atomová %	C	O	Nb	Ti	Fe	Cr	Si	Cu	Mn
Spektrum 1	78,43	15,46	0,82	0,47	4,72	0,09	-	-	-
Spektrum 2	55,3	31,15	7,37	4,53	1,65	-	-	-	-
Spektrum 3	25,58	-	0,11	-	72,29	1,25	0,51	0,11	0,16
Spektrum 4	21,81	-	0,02	-	75,57	1,52	0,53	0,53	0,29

Tabulka 6 Chemické složení spekter 1 až 4 v hmotnostních procentech

Hmotnostní %	C	O	Nb	Ti	Fe	Cr	Si	Cu	Mn
Spektrum 1	60,51	15,89	4,90	1,44	16,95	0,30	-	-	-
Spektrum 2	30,80	23,11	31,74	10,07	4,28	-	-	-	-
Spektrum 3	6,90	-	0,23	-	90,73	1,46	0,32	0,16	0,20
Spektrum 4	5,68	-	0,04	-	91,54	1,71	0,32	0,36	0,34

Kulička po experimentu v PAO oleji byla čištěna v acetonu, ale z obrázku 37b na kterém je vyobrazen celkový pohled na opotřebenou kuličku je vidět, že ani po 24 hodinovém čištění v acetonu nedošlo k dokonalému odstranění oleje. Což mělo za následek zkreslení EDS analýzy. Přesto můžeme konstatovat, že opotřebení, které se na kuličce zachycuje je stejně jako na vzduchu tvořené primárně produkty z povlaku TiNb-DLC. Dále můžeme konstatovat, že zvýšená koncentrace niobu byla nalezena ve světlych proudnicích. Elektronová mikroskopie také potvrdila, že se na kuličce v PAO oleji netvoří nárůstky (obr 37a).

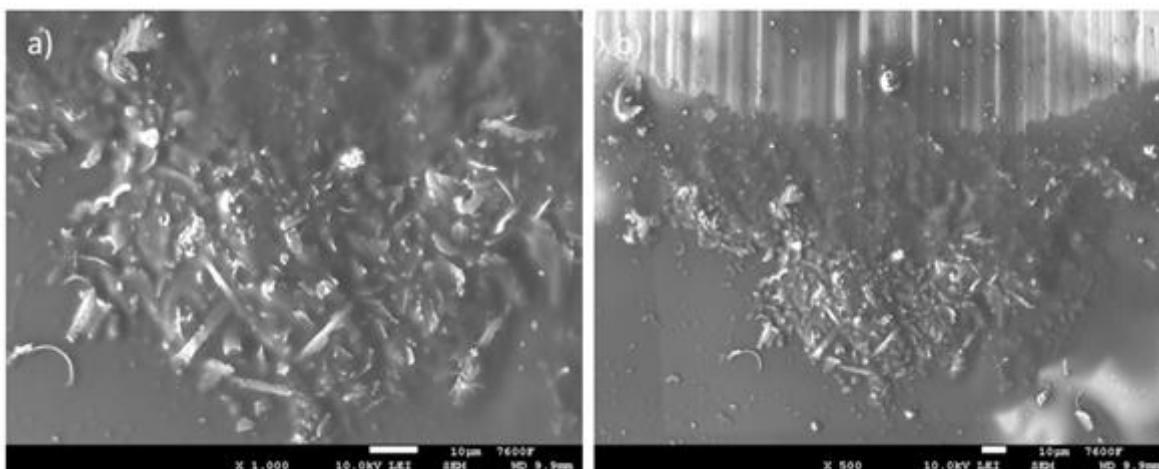


Obrázek 37 Snímek opotřebení kuličky v PAO po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s pořízený na elektronovém mikroskopu a) detailní pohled na náběžnou hranu kuličky b) celkový pohled na opotřebenou kuličku

Opotřebení z kuličky se usazuje ve víru, který vzniká na odtokové hraně. Na obr. 38 jsou vidět hoblinky vzniklé abrazivním opotřebením tvrdším povlakem TiNb-DLC. Jak



již bylo řečeno, kuličku se nepodařilo zcela očistit, proto jsou zde hoblinky vlivem elektronového svazku zapečené do zbytků po oleji

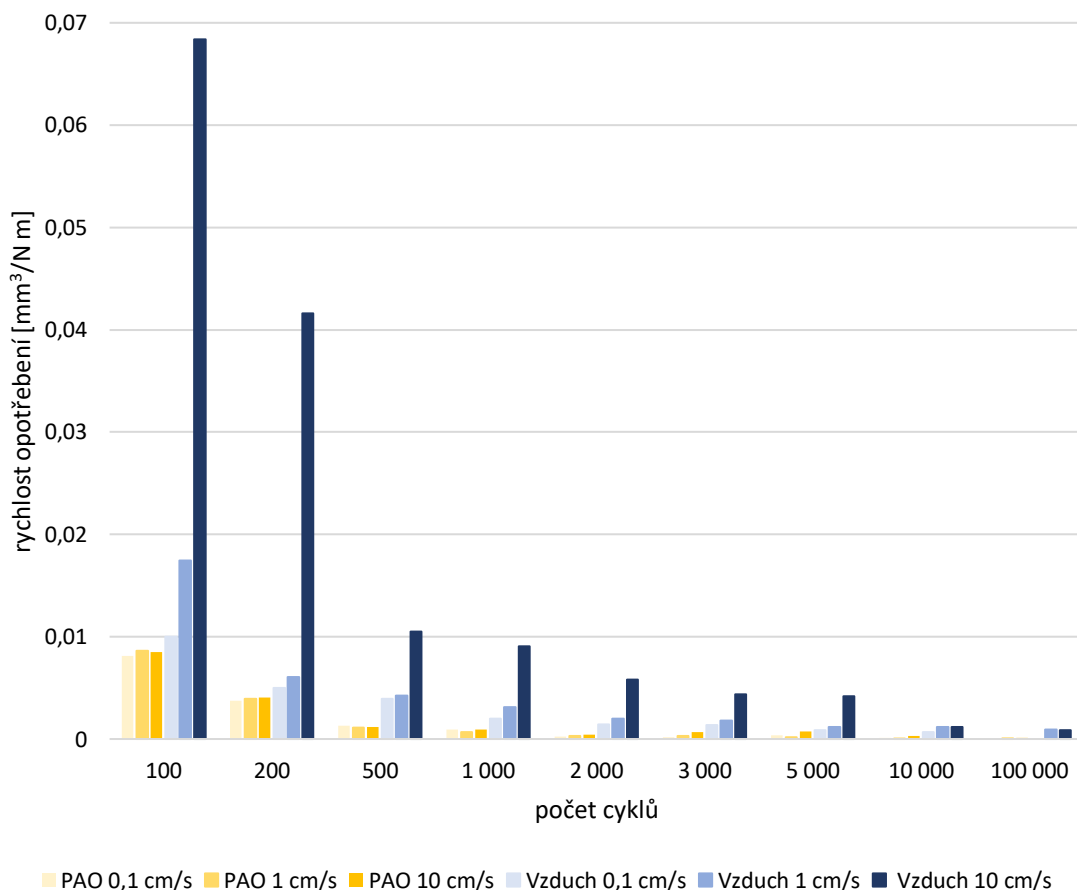


Obrázek 38 Zachycené hoblinky z kuličky na odtokové hraně kuličky v PAO oleji: a) zvětšení 1000 a b) zvětšení 500

## 4.3 Opotřebení povlaku na disku

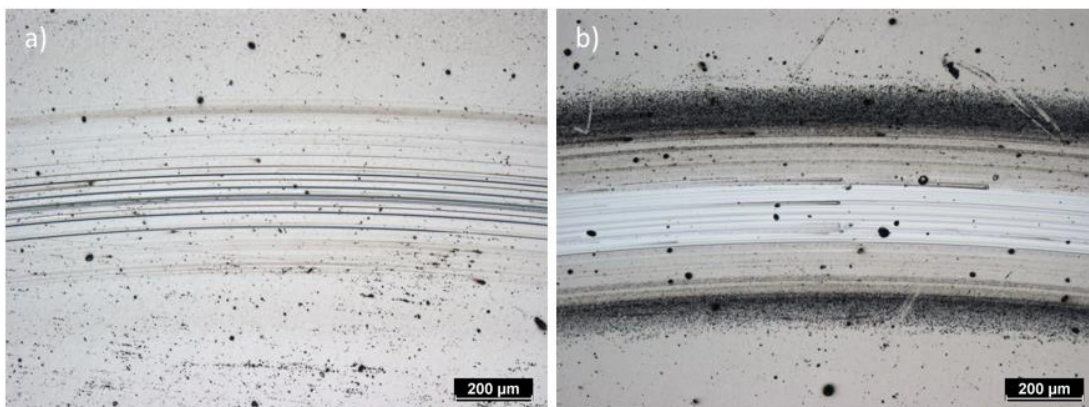
Objem odebraného materiálu z disku má většinou daleko složitější geometrii, než udává norma ASTM G 99–034. Ta předpokládá, že vzniklá stopa odpovídá tvarem pinu, který tuto spotu vytvořil. Proto je potřeba použít optický profilometr, se kterým je tuto složitou geometrii možné nasnímat a určit plochu stopy která se následně přepočítá na objem opotřebení. Spoty vzniklé v povlaku TiNb-DLC po zkouškách Pin-on-disc na vzduchu a v čistém PAO oleji při rychlostech 0,1, 1 a 10 cm/s na poloměrech 6, 7 a 8 mm, po 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 100 000 cyklů, byly měřeny na optickém profilometru ZYGO NewView7200. Všechny vzorky byly před měřením očištěny v ultrazvukové pračce v acetonu. Z naměřených hodnot (obr. 41) je patrné, že rychlost opotřebení je u nemazaných kontaktů několikanásobně větší. Také lze říci, že u mazaných kontaktů nebyla pozorována závislost rychlosti opotřebení na rychlosti posuvu. Proto můžeme jednoduše porovnat rychlost opotřebení v PAO oleji s jednotlivými rychlostmi na vzduchu. Porovnáním rychlosti posuvu 10 cm/s zjistíme, že v oleji dochází mezi 100-200 cykly k 8x nižší rychlosti opotřebení než na vzduchu. Při rychlosti 1 cm/s dochází v PAO oleji k 2,5x nižší rychlosti opotřebení a u rychlosti 0,1 cm/s k 1,5x. Po 500 cyklech se paradoxně rozdíl v rychlost opotřebení PAO oleji na vzduchu zvětšují. To bude zřejmě způsobeno vznikem nárůstku na kuličce u nemazaného kontaktu. Nárůstek díky své malé ploše zvyšuje kontaktní napětí a společně s možným obsahem tvrdých oxidů a karbidů má za následek zvýšenou rychlost opotřebení povlaku. U suchého nemazaného kontaktu na vzduchu dochází

se vzrůstající rychlostí k výrazně větší rychlosti opotřebení povlaku. V prvotní fázi záběhu 100 - 5 000 cyklů je rychlost opotřebení při rychlosti 10 cm/s 7x větší než porovnání s rychlostmi 0,1 cm/s a 4x větší v porovnání s rychlostí 1 cm/s. Ale s narůstajícím počtem cyklů se rozdíly v rychlosti opotřebení vyrovnávají. Při 10 000 cyklech je u rychlosti 10 cm/s rozdíl v opotřebení pouze 1,7x větší v porovnání s rychlostí 0,1 cm/s a pro rychlost 1 cm/s. je velikost rychlost opotřebení prakticky stejná.



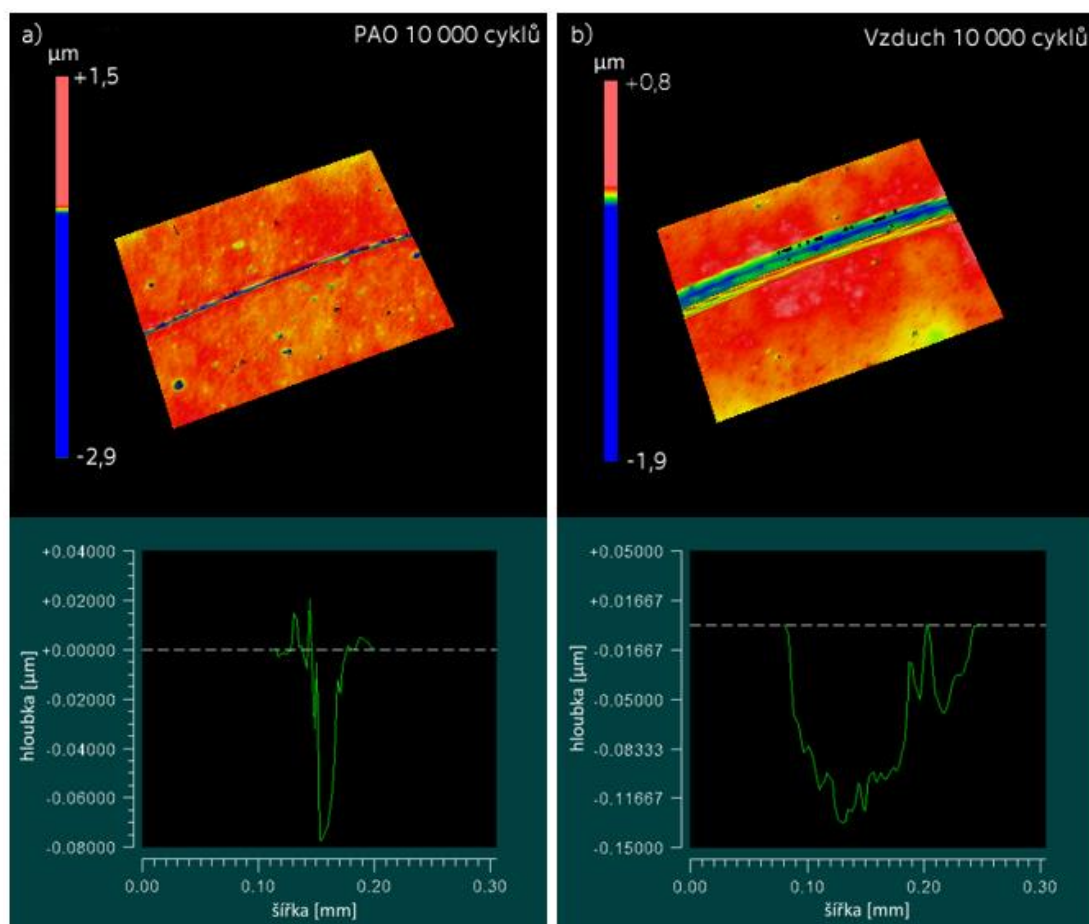
Obrázek 39 Rychlost opotřebení povlaku TiNb-DLC v PAO oleji a na vzduchu

Na obrázku 40 je znázorněno porovnání stop vytvořených v povlaku TiNb-DLC po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v PAO oleji (obr. 40a) s na vzduchu (obr. 40b). Z obrázku je patrné, že se na vzduchu vzniklé opotřebení ukládá v těsné blízkosti stopy, kdežto v oleji se opotřebení vlivem proudícího oleje v blízkosti stopy neusazuje. Je také třeba říct, že v oleji docházelo k podstatně menšímu opotřebení povlaku. Dále si můžeme všimnout, že stopa, která byla vytvořena na vzduchu (obr. 40b) je uprostřed zcela čistá. To může být další důkaz o tom, že na vzduchu dochází ke kontaktu pouze přes nárůstek, protože šíře tohoto čistého pásu ve stopě odpovídá šíři nárůstku na kuličce.



Obrázek 40 Porovnání stopy vytvořené v povlaku TiNb-DLC pomocí optického mikroskopu po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v PAO oleji a) a na vzduchu b)

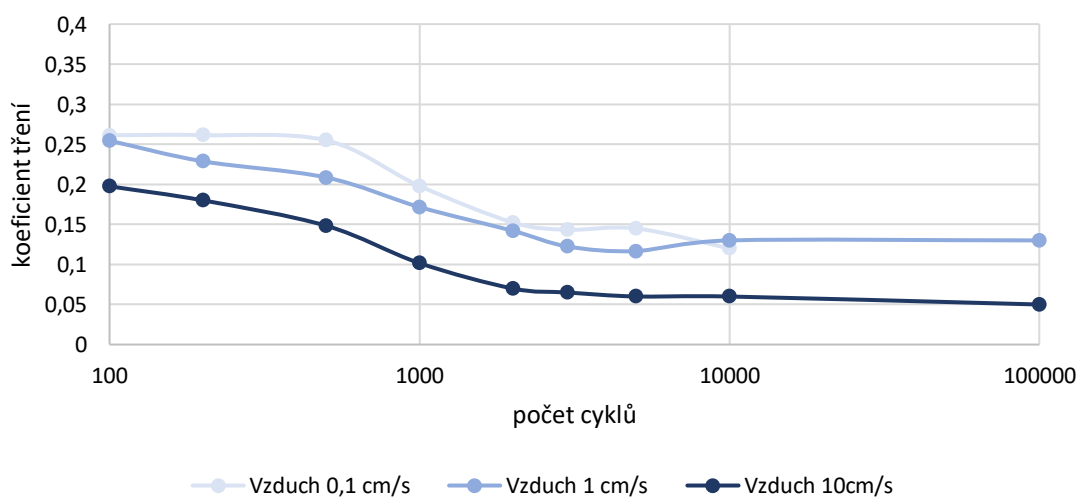
Porovnání nasnímaných stop na optickém profilometru obr. 41 je patrné, že na vzduchu vznikají daleko širší a hlubší stopy. Po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s vznikala v PAO oleji stopa o šířce 89 µm, hloubce 0,08 µm a ploše v průřezu 1,25 µm<sup>2</sup>. Při stejných podmínkách na vzduchu vznikala stopa o šířce 172 µm, hloubce 0,13 µm a ploše v průřezu 12,08 µm<sup>2</sup>.



Obrázek 41 Porovnání stopy vytvořené v povlaku TiNb-DLC pomocí optického profilometru po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v PAO oleji a) a na vzduchu b)

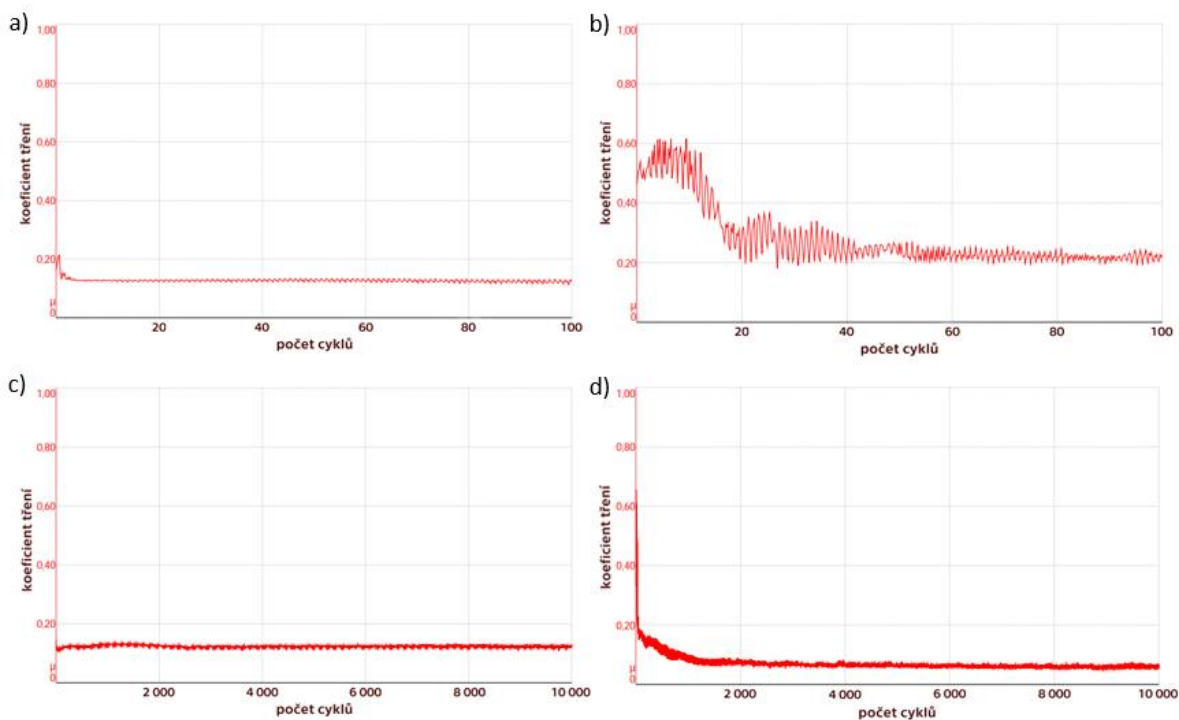
## 4.4 Tření

Koeficient tření byl měřen na tribometru THT-S-CE-0000 metodou pin-on-disc. Před každým měřením byla kulička i disk očištěny v acetonu. Měření probíhalo na vzduchu a v čistém PAO oleji o viskozitě 47,9 mm<sup>2</sup>/s při rychlostech 0,1, 1 a 10 cm/s na poloměrech 6, 7 a 8 mm. Z naměřených hodnot byl vyhodnocen ustálený koeficient tření pro 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 3 000, 5 000, 10 000, 100 000 cyklů. Následně byly tyto hodnoty zprůměrovány a vyneseny do grafů, které jsou uvedeny na obrázcích 42 a 44. Počet cyklů je pro větší přehlednost na ose vyneseny v logaritmickém měřítku. Průběžné vyhodnocení koeficientu tření ukazuje postupné klesání s posuvnou vzdáleností, což naznačuje úspěšný záběhový proces. Na vzduchu bylo dosaženo ustáleného koeficientu tření u všech tří rychlostí přibližně po 2 000 cyklech, poté se pokles koeficientu tření velice zpomalil. Na vzduchu byl pozorován rychlejší pokles koeficientu tření s vyšší rychlostí posuvu a také nejvyšší rychlost vedla k nejnižším hodnotám koeficientu tření po konci experimentu. Průměrný ustálený koeficient tření po 2 000 cyklech se u rychlostí 0,1 cm/s a 1 cm/s pohyboval okolo 0,15, u rychlosti 10 cm/s se hodnota koeficientu pohybovala okolo hodnoty 0,06. To je způsobené rychlejší tvorbou opotřebením povlaku, ze kterého se následně tvoří tribologická vrstva, která snižuje koeficient tření.



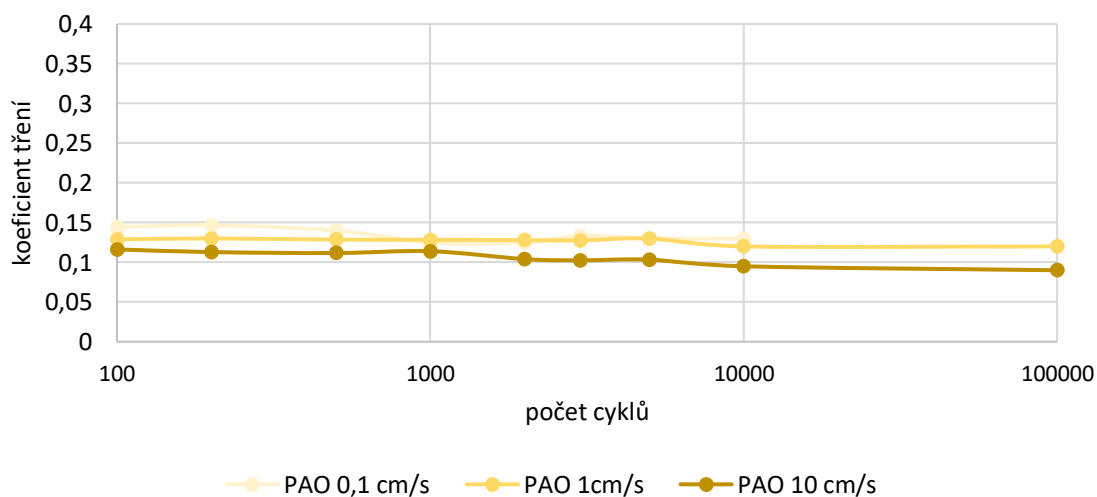
Obrázek 42 Porovnání koeficientu tření rychlostí posuvu 0,1, 1 a 10 cm/s na vzduchu

V PAO oleji byl ustálený stav koeficientu tření prakticky od začátku až do konce, jak je vidět z obrázku 43, ve kterém jsou porovnány záznamy průběhu koeficientu tření po prvních 100 cyklech v PAO oleji (obr.43a) a na vzduchu (obr.43b) s prvními 10 000 cyklů v PAO oleji (obr. 43c) a na vzduchu (obr. 43d).



Obrázek 43 Porovnání průběhu koeficientu tření během prvních 100 cyklů v PAO oleji a) a na vzduchu b) s prvními 10 000 cyklů v PAO oleji c) a na vzduchu d)

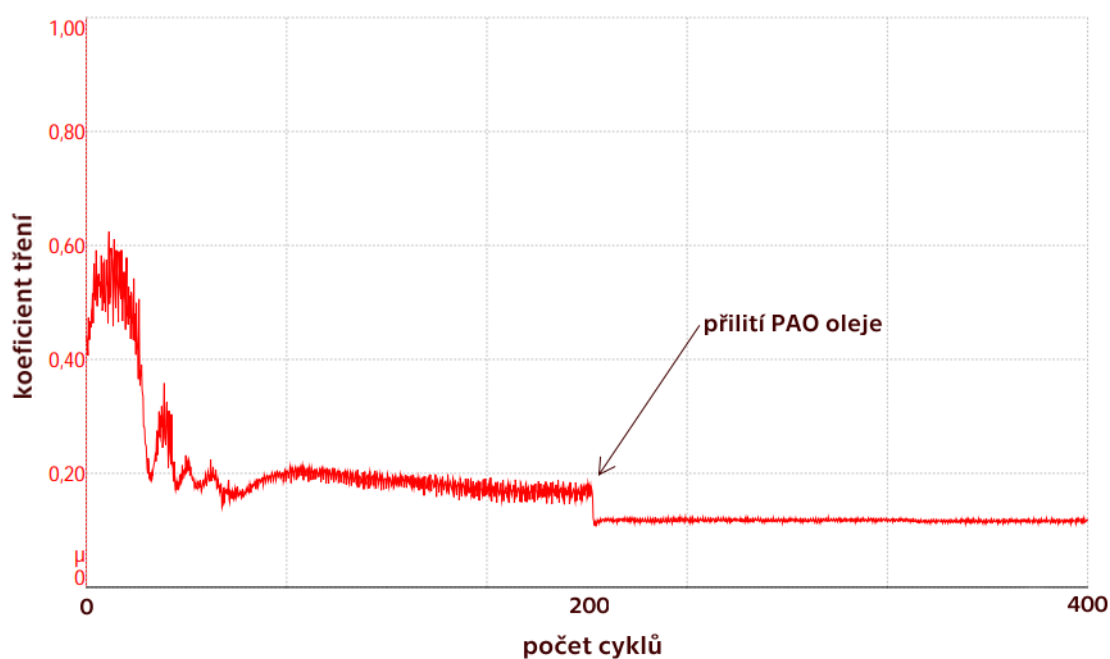
Ale i zde je možné pozorovat nejnižší koeficient tření při nejvyšších rychlostech posuvu (obr. 44). Srovnáním průběhu koeficientu tření na vzduchu a v PAO oleji můžeme konstatovat, že v oleji je od začátku až do konce koeficient tření velice stabilní a má hodnotu okolo 0,13, kdežto na vzduchu se ustáleného tření dosahuje až po zhruba 2 000 cyklech, ale konečný koeficient tření je nižší nebo stejný jako v oleji



Obrázek 44 Porovnání koeficientu tření rychlostí posuvu 0,1, 1 a 10 cm/s v PAO oleji

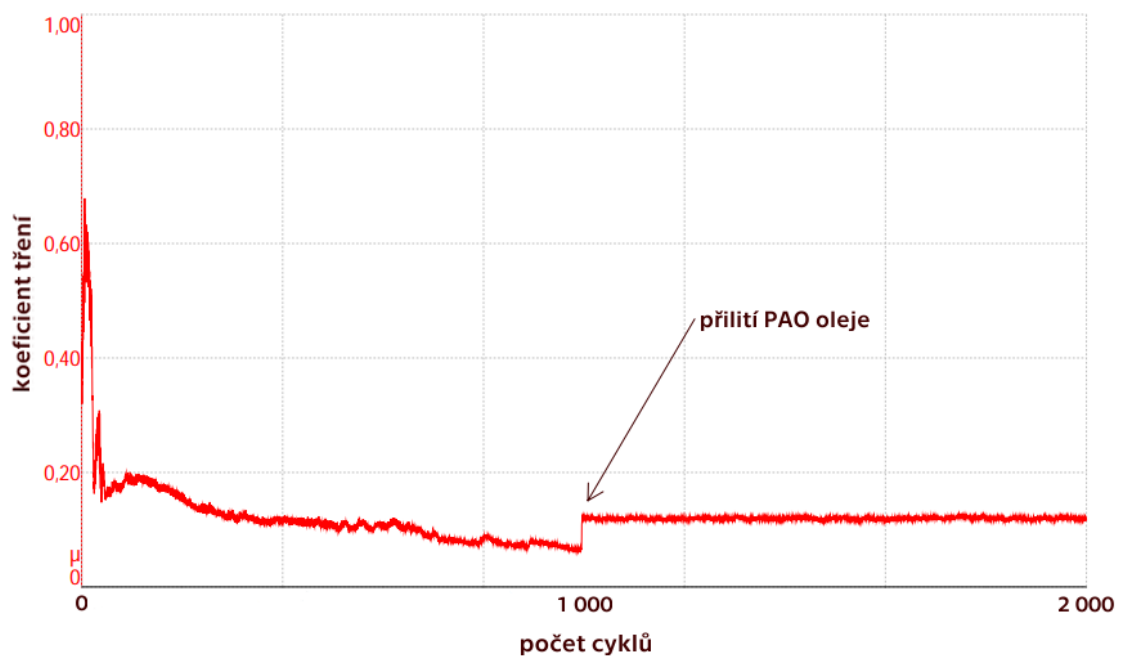
Úloha oleje v mazání kontaktu DLC/ocel je proto nejasná. Z naměřených křivek vyplývá, že olej v tomto kontaktu přispívá pouze k nižším hodnotám koeficientu tření

v prvotní fázi záběhu a dále pouze přispívá k větší stabilitě koeficientu tření v průběhu celého záběhu. Pro lepší pochopení tribologického chování kontaktu DLC/ocel byly provedeny dva experimenty, které spočívaly v kombinaci suchého a mazaného kontaktu. Experimenty začínaly v nemazaných podmínkách, ale během testu byl do kontaktu přidán olej. V prvním experimentu byl v průběhu měření koeficientu tření metodou Pin-on-disc přidán olej po 200 cyklech, následně měření pokračovalo 200 cyklů v PAO oleji. Z naměřené křivky (obr.45) je patrné, že se koeficient tření po přidání oleje snížil z ustáleného stavu na vzduchu 0,17 na 0,12 v oleji.



Obrázek 45 Průběh koeficientu tření po přilítí PAO oleje po 100 cyklech

V druhém experimentu byl olej do kontaktu přidán po 1 000 cyklech a dále zkouška pokračovala 1 000 cyklů v PAO oleji. Z křivky záznamu koeficientu tření (obr.46) je vidět, že v tomto případě došlo ke zvýšení koeficientu tření po přidání oleje z 0,07 na vzduchu na 0,12 v oleji. Výsledky tohoto experimentu jasně ukazují, že v kontaktech DLC/ocel olej přispívá ke snížení koeficientu tření pouze v prvotní fázi záběhu. V pozdější fázi olej naopak tření zvyšuje, což je pravděpodobně způsobeno poruchou tribologické vrstvy, která se tvoří na vzduchu.



Obrázek 46 Průběh koeficientu tření po přilítí PAO oleje po 1 000 cyklech

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo přiblížit proces záběhu tribologických povlaků DLC. Záběhové chování kontaktu TiNb-DLC/ocel bylo hodnoceno při třech rychlostech 0,1, 1, a 10 cm/s za podmínek suchého a mazaného prostředí. Pro úspěšný proces záběhu jsou klíčové tři procesy, snížení kontaktního tlaku, vyhlazování povrchové drsnosti a případně vytvoření tribologické vrstvy. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno:

1. Na vzduchu dochází k tvorbě nárůstku na náběžně hraně kuličky, který chrání kuličku před opotřebením, ale způsobuje větší opotřebení povlaku
2. Tření u mazaných kontaktů je nižší pouze v prvotní fázi záběhu dokud u suchého kontaktu nedojde k vytvoření nárůstku. Vzniklý nárůstek přispívá k snížení koeficientu tření až na hodnotu okolo 0,06.
3. Na vzduchu dojde k ustálenému koeficientu tření až po 2 000 cyklech, kdežto u mazaných kontaktů PAO olejem je koeficient tření ustálený od začátku až do konce a pohybuje se okolo 0,13. PAO olej tak přispívá k větší stabilitě celého procesu záběhu.
4. U nemazaných kontaktů na vzduchu rychlost opotřebení povlaku strmě narůstá narůstající rychlostí posuvu, u mazaných kontaktů nebyla pozorována závislost rychlosti posuvu na rychlost opotřebení povlaku.

Z provedených experimentů tedy lze doporučit provádět záběh DLC povlaků v oleji. Pokud by byl nutný záběh při suchých podmínkách na vzduchu je vhodné ho učinit při co nejnižší rychlosti.



## 6 Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka topografie povrchu [7].....	2
Obrázek 2 Schéma mechanismu adhezního opotřebení [11].....	3
Obrázek 3 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení [11] .....	4
Obrázek 4 Schéma mechanismu únavového opotřebení [11] .....	4
Obrázek 5 Topografie povrchu před a po záběhu [19].....	5
Obrázek 6 Abbotova křivka [18] .....	5
Obrázek 7 Časový průběh opotřebení [21] (upraveno).....	6
Obrázek 8 Časový průběh rychlosti opotřebení [11] (upraveno) .....	6
Obrázek 9 Kontakt dvou drsných povrchů v relativním pohybu [24] .....	7
Obrázek 10 Schematické znázornění obsahu uhlíku v substrátu [23] .....	8
Obrázek 11 Stribeckova křivka [37] .....	9
Obrázek 12 Struktura DLC [37] .....	10
Obrázek 13 Ternární diagram DLC vrstev [37].....	11
Obrázek 14 Ukázka součástí s povlakem DLC [49].....	12
Obrázek 15 Vytvoření přenosové vrstvy na kuličce 100Cr6 [51]. .....	13
Obrázek 16 Porovnání koeficientu tření mezi dopovaným a čistým DLC [52] .....	14
Obrázek 17 Průměrný součinitel tření dvojic DLC / DLC testovaných v různých podmínkách mazání v porovnání s ocel / ocel při 100 ° C. [58].....	15
Obrázek 18 Vliv obsahu vodíku v DLC vrstvě na interakci s aditivou [59] .....	16
Obrázek 19 Koeficienty tření aC: H / aC: H pár v závislosti na kluzné vzdálenosti za různých podmínek mazání při 100 ° C [58].....	16
Obrázek 20 Součinitel tření (a) a rychlost opotřebení (b) DLC povlaků v oleji s aditivou [60].....	17
Obrázek 21 Rovnoměrné tření kontaktů DLC / DLC pro tři různé viskozity oleje při nízkých rychlostech posuvu [62].....	18
Obrázek 22 Součinitel tření v (a) oceli / oceli a (b) kontakty DLC / DLC mazané při 18, 30 a 46 mm <sup>2</sup> / s v PAO oleji [41] .....	19
Obrázek 23 Porovnání Stribeckovy křivky pro kontakt DLC/DLC s ocel/ocel [36].....	20
Obrázek 24 ukázka vzorku [63].....	21
Obrázek 25 Schéma kalotestu [63].....	23
Obrázek 26 Snímek kaloty vybroušené do povlaku TiNb-DLC.....	24
Obrázek 27 Složení vrstvy TiNb-DLC .....	24
Obrázek 28 Profil povrchu povlaku TiNb-DLC .....	25
Obrázek 29 Abbotova křivka povlaku TiNb-DLC.....	25
Obrázek 30 Schéma vrypové zkoušky [63] .....	26
Obrázek 31 Snímek z Vrypové zkoušky povlaku TiNb-DLC při zatížení 26 N .....	26
Obrázek 32 Snímek povlaku po indentačním testu.....	27
Obrázek 33 Schéma metody Pin-on-disk [63] .....	28
Obrázek 34 rychlost opotřebení kuličky v PAO a na vzduchu.....	30
Obrázek 35 Porovnání opotřebení kuličky po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v oleji a) a na vzduchu b) .....	30
Obrázek 36 Snímek opotřebení kuličky na vzduchu po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s pořízený na elektronovém mikroskopu a) detailní pohled na nárůstek b) ukázka vyhodnocovaných bodových spekter metodou EDS .....	31
Obrázek 37 Snímek opotřebení kuličky v PAO po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s pořízený na elektronovém mikroskopu a) detailní pohled na náběžnou hranu kuličky b) celkový pohled na opotřebení kuličky .....	32
Obrázek 38 Zachycené hoblinky z kuličky na odtokové hraně kuličky v PAO oleji: a) zvětšení 1000 a b) zvětšení 500 .....	33
Obrázek 39 Rychlost opotřebení povlaku TiNb-DLC v PAO oleji a na vzduchu .....	34

Obrázek 40 Porovnání stopy vytvořené v povlaku TiNb-DLC pomocí optického mikroskopu po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v PAO oleji a) a na vzduchu b) ..	35
Obrázek 41 Porovnání stopy vytvořené v povlaku TiNb-DLC pomocí optického profilometru po 10 000 cyklech při rychlosti 10 cm/s v PAO oleji a) a na vzduchu b)	35
Obrázek 42 Porovnání koeficientu tření rychlostí posuvu 0,1, 1 a 10 cm/s na vzduchu .....	36
Obrázek 43 Porovnání průběhu koeficientu tření během prvních 100 cyklů v PAO oleji a) a na vzduchu b) s prvními 10 000 cyklů v PAO oleji c) a na vzduchu d) .....	37
Obrázek 44 Porovnání koeficientu tření rychlostí posuvu 0,1, 1 a 10 cm/s v PAO oleji	37
Obrázek 45 Průběh koeficientu tření po přilítí PAO oleje po 100 cyklech .....	38
Obrázek 46 Průběh koeficientu tření po přilítí PAO oleje po 1 000 cyklech .....	39

## 7 Bibliografie

- [1] RENOUF, Mathieu, Francesco MASSI, Nicolas FILLOT a Aurélien SAULOT. Numerical tribology of a dry contact. *Tribology International*. 2011, **44**(7-8), 834-844. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.02.008. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X11000491>
- [2] *Materials Tribology* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.lehigh.edu/~intribos/materialstribology.html>
- [3] JIN, Z a J FISHER. Tribology in joint replacement. *Joint Replacement Technology*. Elsevier, 2008, , 31-55. DOI: 10.1533/9781845694807.1.31. ISBN 9781845692452. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845692452500020>
- [4] LANDOLT, D. a S. MISCHLER. Introduction. *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*. Elsevier, 2011, , -. DOI: 10.1016/B978-1-84569-966-6.50023-3. ISBN 9781845699666. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845699666500233>
- [5] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-02935-0.
- [6] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1621-8.
- [7] Friction. *Wikipedia* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Friction>
- [8] FATU, Aurelian a Dominique BONNEAU. Finite Element Method for Fluid Film Bearings. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA: Springer US, 2013, , 1146-1157. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5\_39. ISBN 978-0-387-92896-8. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-92897-5\\_39](http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-92897-5_39)
- [9] BHUSHAN, Bharat. *Modern tribology handbook* [online]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001 [cit. 2019-06-30]. ISBN 08-493-8403-6.
- [10] WANG, X.Z. a S.H. MASOOD. Influence of Control Parameters on Tool Wear for Sheet Metal Stamping Die with Various Die Radius Arc Profiles. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. Elsevier, 2016 [cit. 2019-06-30]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.04024-8. ISBN 9780128035818. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818040248>
- [11] HONG, Wei, Wenjian CAI, Shaoping WANG a Mileta M. TOMOVIC. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2018, **31**(5), 867-882 [cit. 2019-06-30]. DOI:

10.1016/j.cja.2017.11.016. ISSN 10009361. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1000936117302637>

- [12] *OPOTŘEBENÍ STROJNÍCH SOUSTAV A VZNIK PORUCH* [online]. b.r. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf>
- [13] 14 Fatigue Wear. *Engineering TriBology* [online]. Elsevier, 1993, , 657-681 [cit. 2019-06-30]. Tribology Series. DOI: 10.1016/S0167-8922(08)70588-1. ISBN 9780444892355. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167892208705881>
- [14] BLAU, Peter J. On the nature of running-in. *Tribology International*. 2005, **38**(11-12), 1007-1012. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.020. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X05001994>
- [15] SJÖBERG, S., M. SOSA, M. ANDERSSON a U. OLOFSSON. Analysis of efficiency of spur ground gears and the influence of running-in. *Tribology International*. 2016, **93**, 172-181. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.08.045. ISSN 0301679X. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15003886>
- [16] CHOUDHURY, S.K. a S. CHINCHANIKAR. 1.3 Finish Machining of Hardened Steel. *Comprehensive Materials Finishing* [online]. Elsevier, 2017, , 47-92 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09149-9. ISBN 9780128032497. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818091499>
- [17] PETROPOULOS, G.P, A.A TORRANCE a C.N PANDAZARAS. Abbott curves characteristics of turned surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2003, **43**(3), 237-243 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.1016/S0890-6955(02)00240-7. ISSN 08906955. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695502002407>
- [18] *Vlastnosti povrchu stykových ploch* [online]. b.r. [cit. 2019-07-15]. 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>
- [19] WEN, Shizhu a Ping HUANG. *Principles of tribology*. 2nd edition. Hoboken, NJ, 2017. ISBN 978-111-9214-892.
- [20] SO, H a R.C LIN. The combined effects of ZDDP, surface texture and hardness on the running-in of ferrous metals. *Tribology International*. 1999, **32**(5), 243-253. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00043-2. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X99000432>
- [21] TORBACKE, Marika, Asa Kassman RUDOLPHI a Elisabet KASSFELDT. *Lubricants: introduction to properties and performance*. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. ISBN 978-111-8799-741.

- [22] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 07-506-7304-4.
- [23] 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: 10.1016/S0301-679X(01)00083-4. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X01000834>
- [24] Flash Temperatures. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA: Springer US, 2013,, 1194-1194. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5\_100492. ISBN 978-0-387-92896-8. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-92897-5\\_100492](http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-92897-5_100492)
- [25] LI, Sheng a Anusha ANISETTI. On the flash temperature of gear contacts under the tribo-dynamic condition. *Tribology International* [online]. 2016, **97**, 6-13 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.027. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X16000396>
- [26] UMAR, Muhammad, Riaz Ahmad MUFTI a Muhammad KHURRAM. Effect of flash temperature on engine valve train friction. *Tribology International* [online]. 2018, **118**, 170-179 [cit. 2019-03-09]. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.09.030. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X17304450>
- [27] SHAKHVOROSTOV, D., K. PÖHLMANN a M. SCHERGE. An energetic approach to friction, wear and temperature. *Wear* [online]. 2004, **257**(1-2), 124-130 [cit. 2019-07-01]. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.010. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164803006033>
- [28] KALIN, Mitjan a Jože VIŽINTIN. Key governing factors for the tribochemical changes in the interface films. *Thinning Films and Tribological Interfaces, Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Elsevier, 2000,, 655-666. Tribology Series. DOI: 10.1016/S0167-8922(00)80169-8. ISBN 9780444505316. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167892200801698>
- [29] *Specifikace motorových olejů* [online]. b.r. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.pneu-asistent.cz/oleje/specifikaceOLEJU.pdf>
- [30] Maziva. *ČESKÁ ASOCIACE PETROLEJÁŘSKÉHO PRŮMYSLU A OBCHODU* [online]. 2012 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/info/maziva-c137>
- [31] GRUBER, Roland. Tribology: the science of keeping bearings running. *World Pumps*. 2006, **2006**(482), 36-39. DOI: 10.1016/S0262-1762(06)71146-4. ISSN 02621762. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262176206711464>
- [32] VELKAVRH, Igor a Mitjan KALIN. Comparison of the effects of the lubricant-molecule chain length and the viscosity on the friction and wear of diamond-like-carbon coatings and steel. *Tribology International*. 2012, **50**, 57-65. DOI:

10.1016/j.triboint.2012.01.008. ISSN 0301679X. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X12000333>

- [33] STIFTER, Jan. *NÁVRH A REALIZACE PŘÍDAVNÉHO MODULU LABORATORNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TŘENÍ V MAZANÝCH KONTAKTECH*. Brno, 2016. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Josef Frýza.
- [34] GALDA, Lidia, Pawel PAWLUS a Jaroslaw SEP. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve. *Tribology International*. 2009, **42**(10), 1505-1512. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.001. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09001765>
- [35] ZHANG, Y., N. BIBOULET, C.H. VENNER a A.A. LUBRECHT. Prediction of the Stribeck curve under full-film Elastohydrodynamic Lubrication. *Tribology International*. 2019. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.01.028. ISSN 0301679X. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X19300362>
- [36] KALIN, M. a I. VELKAVRH. Non-conventional inverse-Stribeck-curve behaviour and other characteristics of DLC coatings in all lubrication regimes. *Wear*. 2013, **297**(1-2), 911-918. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.010. ISSN 00431648. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164812003481>
- [37] DLC Coatings. *Hef USA* [online]. 2015 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [http://www.hefusa.net/pvd\\_coating/DLC-coatings.html](http://www.hefusa.net/pvd_coating/DLC-coatings.html)
- [38] PÍSAŘÍK, Petr. *Antibacterial, mechanical and surface properties of Ag-DLC films prepared by dual PLD for medical applications* [online]. 2017 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493116326923>
- [39] SWIATEK, Lidia. *Multi-doped diamond like-carbon coatings (DLC-Si/Ag) for biomedical applications fabricated using the modified chemical vapour deposition method* [online]. 2016 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092596351630067X?via%3Dihub>
- [40] MANNINEN, Noora Kristiina. *Silver surface segregation in Ag-DLC nanocomposite coatings* [online]. 2014 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897214011736>
- [41] CHANG, WANG a WU. *Catalysis effect of metal doping on wear properties of diamond-like carbon films deposited by a cathodic-arc activated deposition process* [online]. 2002, , 241-247 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609002008015>
- [42] SHARIFAHMADIAN, Omid a Farzad MAHBOUBI. A comparative study of microstructural and tribological properties of N-DLC/DLC double layer and single layer coatings deposited by DC-pulsed PACVD process. *Ceramics International* [online]. 2019, **45**(6), 7736-7742 [cit. 2019-03-10]. DOI:

10.1016/j.ceramint.2019.01.076. ISSN 02728842. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884219300793>

- [43] BEWILOGUA, K. *Effect of target material on deposition and properties of metal-containing DLC (Me-DLC) coatings* [online]. 2000 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897200006666>
- [44] GHASEMI, Mahsa Haji, Behrooz GHASEMI a Hamid Reza Mohamadian SEMNANI. Wear performance of DLC coating on plasma nitrided Astaloy Mo. *Diamond and Related Materials* [online]. 2019, **93**, 8-15 [cit. 2019-03-10]. DOI:  
10.1016/j.diamond.2019.01.016. ISSN 09259635. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925963518307982>
- [45] ERDEMIR, Ali a Jean Michel MARTIN. Superior wear resistance of diamond and DLC coatings. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* [online]. 2018, **22**(6), 243-254 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1016/j.cossms.2018.11.003. ISSN 13590286. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359028618300950>
- [46] PÍŠKA, Miroslav. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM Spektrum* [online]. 2014 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
- [47] HAUERT, R. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications. *Tribology International* [online]. 2004, **37**(11-12), 991-1003 [cit. 2019-06-27]. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.07.017. ISSN 0301679X. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X04001355>
- [48] 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. 2019-06-27]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.017. ISSN 02578972. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897214007257>
- [49] *The College of Engineering, Design, Art and Technology* [online]. b.r. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://cedat.mak.ac.ug/wp-content/uploads/2013/12/dlc.jpg>
- [50] ZHOU, Z.F., K.Y. LI, I. BELLO, C.S. LEE a S.T. LEE. Study of tribological performance of ECR-CVD diamond-like carbon coatings on steel substrates. *Wear*. 2005, **258**(10), 1589-1599. DOI: 10.1016/j.wear.2004.10.005. ISSN 00431648. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164804003795>
- [51] KALIN, Mitjan a Jože VIŽINTIN. The tribological performance of DLC coatings under oil-lubricated fretting conditions. *Tribology International*. 2006, **39**(10), 1060-1067. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.02.040. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X06000521>

- [52] VITU, ESCUDEIRO POLCAR a CAVALEIRO. *Sliding properties of Zr-DLC coatings: The effect of tribolayer formation* [online]. 2014, , 734-745 [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897214007026>
- [53] RAISIN, Jonathan, Nicolas FILLOT, Philippe VERGNE a David DUREISSEIX. Numerical simulation of lubricated DLC-coated point contacts under infinite sliding conditions. *Tribology International*. 2019, **133**, 136-151. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.12.032. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X1830611X>
- [54] HABCHI, W. Thermal analysis of friction in coated elastohydrodynamic circular contacts. *Tribology International*. 2016, **93**, 530-538. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.01.017. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15000274>
- [55] KALIN, M. a J. VIŽINTIN. Real contact temperatures as the criteria for the reactivity of diamond-like-carbon coatings with oil additives. *Thin Solid Films*. 2010, **518**(8), 2029-2036. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.08.055. ISSN 00406090. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609009015326>
- [56] VENGDUSAMY, Balasubramaniam, Jonathan H. GREEN, Gordon D. LAMB a Hugh A. SPIKES. Tribological properties of tribofilms formed from ZDDP in DLC/DLC and DLC/steel contacts. *Tribology International*. 2011, **44**(2), 165-174. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.10.023. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10002665>
- [57] PODGORNIK, B., D. HREN a J. VIŽINTIN. Low-friction behaviour of boundary-lubricated diamond-like carbon coatings containing tungsten. *Thin Solid Films*. 2005, **476**(1), 92-100. DOI: 10.1016/j.tsf.2004.09.028. ISSN 00406090. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609004013781>
- [58] DE BARROS'BOUCHET, M.I., J.M. MARTIN, T. LE-MOGNE a B. VACHER. Boundary lubrication mechanisms of carbon coatings by MoDTC and ZDDP additives. *Tribology International*. 2005, **38**(3), 257-264. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.08.009. ISSN 0301679X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X04001653>
- [59] HIROTAKA, a YAMAMOTO. *Mechanical and Tribological Properties of DLC Films for Sliding Parts* [online]. 2017 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: [http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr\\_35/055-060.pdf](http://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_35/055-060.pdf)
- [60] ZHANG, Yujuan, Shengmao ZHANG, Deen SUN, Guangbin YANG, Chuanping GAO, Changhua ZHOU, Chunli ZHANG a Pingyu ZHANG. Wide adaptability of Cu nano-additives to the hardness and composition of DLC coatings in DLC /PAO solid-liquid composite lubricating system. *Tribology International* [online]. 2019, **138**, 184-195 [cit. 2019-06-15]. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.05.043. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X1930310X>



- [61] GRUBER, Roland. Tribology: the science of keeping bearings running. *World Pumps*. 2006, **2006**(482), 36-39. DOI: 10.1016/S0262-1762(06)71146-4. ISSN 02621762. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262176206711464>
- [62] VELKAVRH, I., M. KALIN a J. VIŽINTIN. The influence of viscosity on the friction in lubricated DLC contacts at various sliding velocities. *Tribology International*. 2009, **42**(11-12), 1752-1757. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.022. ISSN 0301679X. Dostupné také z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09001017>
- [63] KAVÁN, František. *Využití plazmaticky vytvořených tenkých vrstev pro vysokoteplotní aplikace* [online]. Liberec, 2015 [cit. 2017-07-27]. Dostupné z:  
<http://space.fkdesign.cz/private/BP.pdf>. Bakalářská práce. Vedoucí práce Petr Louda.
- [64] OLIVER, W.C. a G.M. PHARR. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*. 1992, **7**(6), 1564-1583. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564. ISSN 0884-2914. Dostupné také z:  
[https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400017039/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400017039/type/journal_article)