



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství**

**VLIV OLEJOVÝCH ADITIV NA TRIBOLOGICKÉ
VLASTNOSTI DLC POVLAKŮ**

**EFFECT OF OIL ADDITIVES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES
OF DLC COATINGS**

Bakalářská práce

Studijní program: (B2343) Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: (2303R014) Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Zdeněk Tolde

Vojtěch Klečka

Praha 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	Vojtěcha KLEČKU
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	Vliv olejových aditiv na tribologické vlastnosti DLC povlaků
název anglicky:	Effect of oil additives on tribological properties of DLC coatings

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Na základě tribologických testů DLC povlaků v prostředí olejů, které budou modifikovány přidáním vybraných olejových aditiv, bude hodnocen vliv těchto přísad na průběh třecích vlastností a výsledného otěru.

Postup:

1. Literární rešerše
2. Návrh povlakového systému a testovacího prostředí
3. Příprava metalograficky leštěných substrátů a jejich napovlakování vybranou vrstvou
4. Testy mechanických a tribologických vlastností povlaků
5. Diskuze a závěry

Rozsah průvodní zprávy: 30 – 40 stran

Rozsah grafických prací: dle potřeby

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, xv, 560 p., [3] p. of plates. Tribology and interface engineering series, 56. ISBN 9780444527509.

[2] KALIN, M. a I. VELKAVRH. Non-conventional inverse-Stribeck-curve behaviour and other characteristics of DLC coatings in all lubrication regimes. Wear. 2013, vol. 297, 1-2, s. 911-918. DOI: 10.1016/j.wear.2012.11.010.

[3] KOSARIEH, S., A. MORINA, E. LAINÉ, J. FLEMMING a A. NEVILLE. Tribological performance and tribochemical processes in a DLC/steel system when lubricated in a fully formulated oil and base oil. Surface and Coatings Technology. 2013, vol. 217, 1-2, s. 911-918. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.11.065.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Zdeněk Tolde, ČVUT FS


Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015


Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

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.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 20.4.2015 Koleček
student


Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí ústavu




Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 28. dubna 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv olejových aditiv na tribologické vlastnosti DLC povlaků vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 19.6.2015


Vojtěch Klečka

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Cvrčkovi, Ph.D. za velmi cenné rady a připomínky, které mi během zpracovávání práce poskytl. Také bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňkovi Toldemu za pomoc při práci s tribometrem.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá pojmem tribologie jako celku. Popisuje druhy tření a opotřebení a jakým způsobem se tyto parametry měří. Popisuje též některé metody vedoucí ke snížení koeficientu tření a opotřebení součástí a jejich povrchů. V experimentální části se zabývá tribologickými vlastnostmi a jejich porovnáním na různých typech povrchů. Základ tvoří povrch s povlakem typu DLC a zjišťují se tribologické vlastnosti tohoto povrchu v prostředí oleje a porovnává se vliv dvou druhů olejových aditiv na tyto vlastnosti, jako jsou koeficient tření a opotřebení povrchu. Pro srovnání je přidáno prostředí bez jakéhokoliv mazání (na vzduchu) a práce hodnotí také další dva odlišné povrchy ve stejných prostředích. Měření tribologických vlastností bylo provedeno na laboratorním tribometru typu Pin (Ball)-on-disk.

Klíčová slova: tribologie, pin-on-disk, DLC, olej, aditiva, opotřebení, tření

Abstract

The bachelor thesis deals with the whole concept of tribology. It describes the types of friction and wear and how these parameters are measured. Thesis describes some methods to reduce the friction coefficient and wear of components and their surfaces too. The experimental part deals with the tribological properties and comparing them on different types of surfaces. The base of experimental part consist of the type of DLC coating surface and the tribological properties in the oily enviroment are detected and the effects of two different oil additives to these properties, such as friction coefficient and surface wear, are compared. The enviroment without any lubrication (only in the air) for DLC and other two different surfaces in the same enviroments are added for comparsion. The measurement of the tribological properties were performed on the laboratory tribometer type pin (ball)-on-disk.

Key words: tribology, pin-on-disk, DLC, oil, additives, wear, friction

Obsah

Úvod.....	8
I. Teoretická část	9
1. Tribologie.....	9
1.1 Definice tribologie	9
1.2 Historie tribologie	9
1.3 Ekonomický a technický význam tribologie.....	10
1.4 Typy opotřebení rozlišované v tribologii.....	11
2. Druhy tření.....	13
2.1 Suché tření.....	13
2.2 Mezné tření.....	13
2.3 Smíšené tření.....	14
2.4 Tření v kapalinách.....	14
3. Stribeckova křivka a koeficient tření	15
3.1 Popis Stribeckovi křivky	15
3.2 Vlivy na průběh Stribeckovi křivky.....	16
4. Měření koeficientu tření a opotřebení.....	18
4.1 Přístroje a metody měření tření	18
4.2 Metoda pin-on-disk	18
4.3 Metoda pin-on-slap, pin-on-plate, ball-on-flat.....	19
4.4 Hertzův tlak.....	20
5. Povlaky, materiály a metody pro snížení tření	20
5.1 DLC povlaky.....	21
5.2 Další metody a povlaky.....	21
II. Stanovení cílů práce	23
III. Experimentální část	24
6. Použité materiály a přístroje	24
6.1 Tribometr CSM Instruments	24
6.2 Povlak typu DLC.....	24
6.3 Vzorky pro porovnání tribologických vlastností.....	27
6.4 Použitý olej a aditiva.....	28
7. Parametry měření	29
8. Vyhodnocení měření	30
8.1 Metody a způsoby vyhodnocení.....	30
8.2 Vyhodnocení naměřených dat.....	32
Závěr	43
Seznam obrázků.....	44
Seznam tabulek	45
Seznam grafů	46
Použitá literatura a zdroje	47
Přílohy.....	49

Úvod

Každý den a v každém okamžiku jsou kolem nás různé předměty v kontaktu společně s předměty ostatními. Může se jednat o kontakt statický nebo při vzájemném pohybu předmětů o kontakt, při kterém vzniká tření. S těmito jevy se setkáváme neustále, stačí, když se rozhlédneme kolem nás, tak vše je v pohybu. Automobily, vlaková souprava, posun židle, tah tužky po papíru, ale i například lidská chůze, kdy při každém došlapu vzniká kontakt s podlahou apod. Jak je vidět, vědní disciplína zvaná tribologie zabývající se třením, opotřebením a v aplikacích, které si to vyžadují mazáním, má, respektive může mít, hodně široký záběr a uplatní se v mnoha oblastech. Jedná se především o oblasti průmyslu a to nejen strojírenského, ale i o oblast lékařství. Pokud dojde ke kontaktu dvou součástí, které se vzájemně pohybují, vždy dojde ke tření určité velikosti. Toto tření následně způsobuje opotřebení a nakonec může dojít až k destrukci některé ze součástí. V důsledku tření a opotřebení dochází ke značným ztrátám, ať už se jedná o energetické (např. v důsledku ztrát v ložiskách), tak finanční (např. výměna zničených dílů). Tyto jevy se ve většině případů snažíme minimalizovat a snažíme se najít takové řešení, aby ztráty byly co nejmenší. Existuje mnoho způsobů. Jedním z neznámějších je mazání. Co se týče automobilového průmyslu, každý se jistě setkal s oleji používanými k mazání motorů, převodovek a dalších součástí vozidel. I přesto to výrobcům nestačí a na trhu jsou k dispozici přídatné látky do olejů (aditiva), které by měly ještě zlepšit mazací účinky olejů. Otázkou je, zda tato aditiva opravdu přinášejí zlepšení, či jsou jen reklamním tahem jejich výrobců, a jak působí při kontaktu s moderními materiály užívanými v automobilovém průmyslu, které samy zlepšují odolnost proti opotřebením a snižují koeficient tření. Těmito materiály jsou například povlaky typu DLC.

I. Teoretická část

1. Tribologie

1.1 Definice tribologie

Tribologie je vědní disciplína, která se zabývá kontaktem povrchů těles a jejich vzájemným působením. Vzájemné působení může probíhat při pohybu nebo při pokusu o něj. Pohybů rozlišujeme několik druhů – kluzný, valivý, rotační, nárazový nebo kmitavý a ty mohou nastat i v různých kombinacích. Tribologie se zabývá třením, mazáním a opotřebením těles a vysvětluje jejich původ, příčiny a vznikající následky.

1.2 Historie tribologie

Historie označení tribologie jako vědní disciplíny, zabývající se kontaktem povrchů, jejich třením, mazáním a opotřebením, je v porovnání s dlouhou a obsáhlou historií zkoumání těchto jevů celkem krátká. Poprvé tento termín použil Dr. H. Peter Jost v Anglii v roce 1966, když publikoval tzv. Jostovu zprávu. Ta byla určena pro britský parlament a naznačovala, že použitím tribologických principů a zásad se dají ušetřit nemalé peníze. Samotné slovo je vytvořeno spojením řeckých slov tribos, což znamená tření a logos, které má význam věda.



Obrázek 1: Vyobrazení mazání ze starého Egypta [12]

Historie vědění o třecích procesech a zlepšení kluzných podmínek pomocí mazání sahá hluboko do historie. Je známo vyobrazení (obrázek 1) ze starého Egypta, kde dělník lije nějakou kapalinu pod transportní vozík, na němž je umístěna socha, kterou egyptané přesouvali na jiné místo. Toto vyobrazení je z období zhruba 2400 let před Kristem. Prvním známým vědcem z historie, který se přímo tribologií zabýval, je Leonardo da Vinci, který navrhl i první kuličkové ložisko. Zjistil, že koeficient tření je dán jako poměr třecí síly a normálové (kolmé) síly. Dalšími významnými badateli byl Guillaume Amontons a Charles-Augustin Coulomb, na základě jejichž teorií vznikly tři základní zákony o suchém tření:

1. koeficient tření je dán poměrem třecí a normálové síly
2. třecí síla není závislá na rychlosti pohybu
3. třecí síla není závislá na velikosti zdánlivé geometrické stykové plochy

Tyto zákony jsou všeobecně uznávány dodnes a tvoří základ pro veškeré teorie a výzkumy prováděné v tribologii. [4, 12]

1.3 Ekonomický a technický význam tribologie

Tribologie má pro současný průmysl obrovský význam. Vzhledem k tomu, že díky tření vznikají velké energetické ztráty, které například v roce 1978 činily až 30%, světový průmysl vynakládá nemalé peníze na výzkum v této oblasti, aby tyto ztráty eliminoval a tím ušetřil jak energii, tak eliminoval vzniklou finanční ztrátu. Příkladem může být Velká Británie, kde v Jostově zprávě z roku 1966 bylo uvedeno, že aplikace tribologických principů a jejich dodržování pomůže ušetřit až 515 miliónů liber ročně. Ve stanovisku Evropské unie z roku 2004 týkajícího se výzkumu a rozvoje nanotechnologií se uvádí, že ztráty energie způsobené třením tvoří zhruba 25% celosvětové spotřeby energie a náklady spojené s tribologickými procesy jsou odhadovány na 350 miliard EUR ročně. Z těchto dat je zřejmé, že výzkum v oblasti tribologie je jednou z hlavních cest, jak snížit náklady na výrobu a provoz všech druhů zařízení. [1, 12, 13]

Rozvoj aplikace tribologických principů do výroby, se příznivě projevuje na snížení tření a poklesu opotřebení. Jsou-li známy tribologické procesy (tření, mazání, opotřebení), principy se dají využít ke snížení nákladů, vznikajících v důsledku ztrát. Díky této vědní disciplíně se také může ušetřit více času, protože pokud nastává větší tření, více

se také součást opotřebovává a rychleji se tedy zkracuje její životnost. V důsledku toho se mohou vyskytovat poruchy, které například vyřadí z provozu výrobní linku a tím se zastaví celá výroba. Snížení tření může mít význam i z ekologického hlediska, kdy například snížením tření v ložiskách u nápravy automobilu se dosáhne menšího odporu, který musí motor překonávat, sníží se tudíž jeho spotřeba paliva a tím i emise vylučované do životního prostředí. Se třením se úzce váže opotřebení materiálů, které je ve většině případů nežádoucí a tribologie se jej snaží eliminovat mazáním součástí nebo například aplikováním takových povrchových vrstev, jež při vzájemném působení mají nízký koeficient tření a vysokou odolnost proti opotřebení, proto se již mazat nemusí. Oproti tomu, v některých aplikacích je opotřebení a vyšší tření žádoucí. Zvýšení tření je například žádoucí u brždění, u pneumatik nebo u obuvi při došlapu apod. Například u brzd velké tření způsobí zastavení či zpomalení vozu. U pneumatik, díky jejich přilnavosti se vozidlo udrží i v otáčkách ve správném směru. Dalším příkladem, kdy je opotřebení žádoucí, je ve strojírenské praxi hojně užívané obrábění. Při obrábění je žádoucí ovšem jen opotřebení (obrobení) výsledného výrobku ne nástroje.

1.4 Typy opotřebení rozlišované v tribologii

Při vzájemném působení dvou těles, obvykle po určitém čase, vzniká nějaké opotřebení. Tribologie rozlišuje celkem šest typů opotřebení, které se mohou vzájemně kombinovat či vznikat následkem opotřebení jiného.

Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení nastává tehdy, kdy se dotýkající povrchy dvou těles vzájemně pohybují. Při dotyku dochází k porušení povrchových vrstev těles, dojde k čisté kovovému styku a v důsledku vznikajícího tepla dojde ke vzniku mikrosvarů mezi oběma povrchy. Při dalším pohybu se tyto mikrosvary porušují a přenáší se materiál z jednoho povrchu na druhý. Tento jev se dá eliminovat použitím maziva mezi jednotlivé povrchy a tím bránit vzniku mikrosvarů. [1, 3, 4]

Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází nejčastěji v případě, že jsou umístěny do kontaktu dvě tělesa s rozdílnou tvrdostí povrchu. Rozdílem tvrdostí dochází k rozrývání povrchu měkčího tělesa tělesem s vyšší tvrdostí. Druhým případem, kdy může docházet

k abrazivnímu opotřebení, je situace, kdy se dostanou například nečistoty mezi dotýkající se povrchy a ty způsobují rýhy na povrchu, které následně zvyšují tření. Nečistoty také mohou vnikat do měkčího tělesa a svou tvrdostí poškozovat povrch tělesa tvrdšího. [1, 3, 4]

Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení může vznikat při kapalinovém či plynném mazání součástí. Při proudění kapaliny mezi tělesy mohou být unášeny malé částičky, které jsou hnány na povrch a mohou vytvářet na povrchu malé prohlubně či rýhy, které se následným působením dalších částiček nebo jen samotnou kapalinou mohou zvětšovat a vytvářet na povrchu prohlubně. Při tomto mechanismu opotřebení vzniká nerovnoměrné opotřebení. [3, 4]

Kavitační opotřebení

Principem kavitačního opotřebení je pokles tlaku při proudění mazací kapaliny. Pokud kapalina narazí na překážku (zlom, zúžení, ostrá hrana apod.), může dojít ke snížení tlaku v kapalině a tím ke vzniku dutiny, která je zaplněna párou. Po překonání překážky se tlak změní zpět, čímž dojde k rázu, který vyvolá deformaci a postupem času narušení povrchu tělesa mikrotrhlinami a s dalšími rázy, které jsou pravidelné, k uvolňování částic z povrchu součásti. Kavitační opotřebení je velice rychlé. [2, 3, 4]

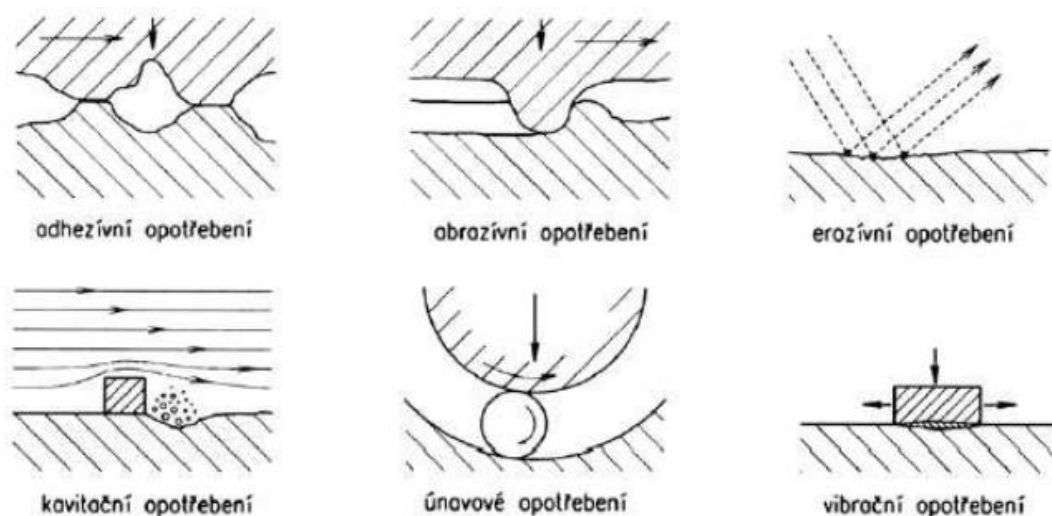
Únavové opotřebení

Únavové opotřebení spočívá v únavě povrchu součásti při delším namáhání povrchových vrstev materiálů. Na povrchu součásti začnou vznikat únavové trhliny, které způsobí uvolnění částic materiálu z povrchu součásti. Při větším vypadání částic mohou vzniknout na povrchu tělesa d'olíčky, podle nichž se někdy toto opotřebení nazývá d'olíčkové. [2, 3, 4]

Vibrační opotřebení

Při zatížení součásti, které má kmitavý charakter s malou amplitudou, dochází k vibračnímu opotřebení, při němž dochází ke vzniku malých částic. Tyto částice vypadají přibližně jako koroze a jejich působením mezi dvěma povrchy těles dochází k abrazivním

účinkům (abrazivnímu opotřebení) na povrchu těles. Tyto částice dokáží takto působit i na materiály, které mají velmi tvrdou povrchovou vrstvu. [3, 4]



Obrázek 2: Schématické zobrazení jednotlivých principů opotřebení [9]

2. Druhy tření

2.1 Suché tření

Pokud nejsou povrchy obou dotýkajících se těles mazány nebo jsou mazány, ale pohybují se vůči sobě jen malými rychlostmi (např. při rozběhu či zastavení mechanismu), dochází k suchému tření. Při tomto tření může docházet k deformacím nebo k adhezivnímu opotřebení. V důsledku deformací a adhezi dochází k velkému opotřebení, a tím i ke ztrátám, proto je (kromě aplikací, kde je velké tření žádoucí) snaha se tomuto druhu tření vyhnout, například použitím maziv. [2, 4]

2.2 Mezní tření

O mezním tření se dá hovořit v případě, že se mezi povrchy, které jsou v kontaktu, vytvoří velmi tenká vrstva molekul plynu nebo mazací kapaliny. V praxi toto tření vzniká při mazání součástí, které se pohybují vůči sobě malými rychlostmi nebo při zatížení velkými tlaky. [2, 4]

2.3 Smíšené tření

Pokud není vrstva maziva mezi součástmi dostatečně velká, aby od sebe oddělila výstupky obou povrchů, nazývá se toto tření jako tření smíšené. Tření smíšené je kombinací tření mezného a kapalinového. Mezné tření se týká nerovností vystupujících z povrchů součástí a mezi prohlubněmi součástí dochází ke tření kapalinovému, kdy jsou povrchy od sebe plně odděleny a nedotýkají se vůbec. [1, 3, 4]

2.4 Tření v kapalinách

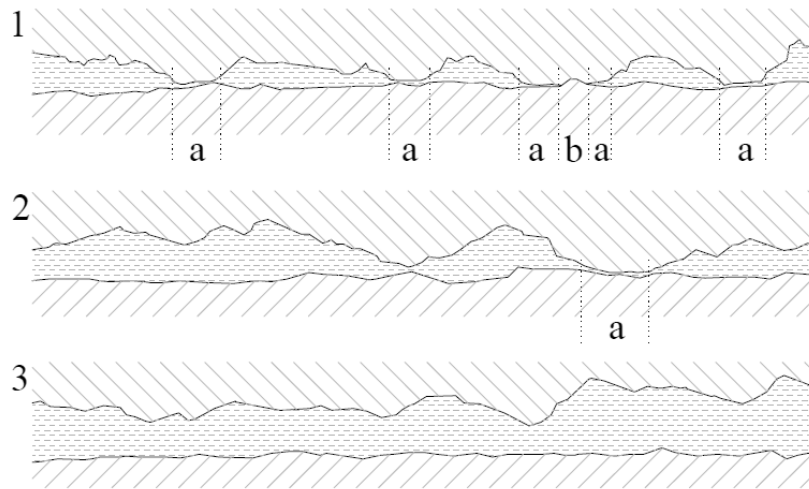
Při tření v kapalinách dochází k dokonalému oddělení ploch, kdy se mezi nimi vytvoří souvislá vrstva maziva a oddělí se tak od sebe i nevyšší výstupky na obou stýkajících se plochách. Tlak v mazivu musí být větší, než je tlak vznikající působením zatěžující síly. Součásti se tedy musí vůči sobě pohybovat dostatečně rychle, aby vznikl potřebný tlak v mazivu. Pokud jsou součásti vůči sobě při pohybu nakloněny, pohybem maziva do zúžení vznikne potřebný tlak, který zajistí oddělení součástí mazivem. Koeficient tření je v tomto případě velice malý a nedochází k téměř žádnému opotřebením kontaktních ploch součástí, ovšem s narůstající rychlostí se koeficient tření zvyšuje v důsledku vznikajícího tření v mazivu. Kapalinové tření a mazání se v některé literatuře též označuje jako hydrodynamické. [1, 2, 3, 4]

Elastohydrodynamické mazání a tření

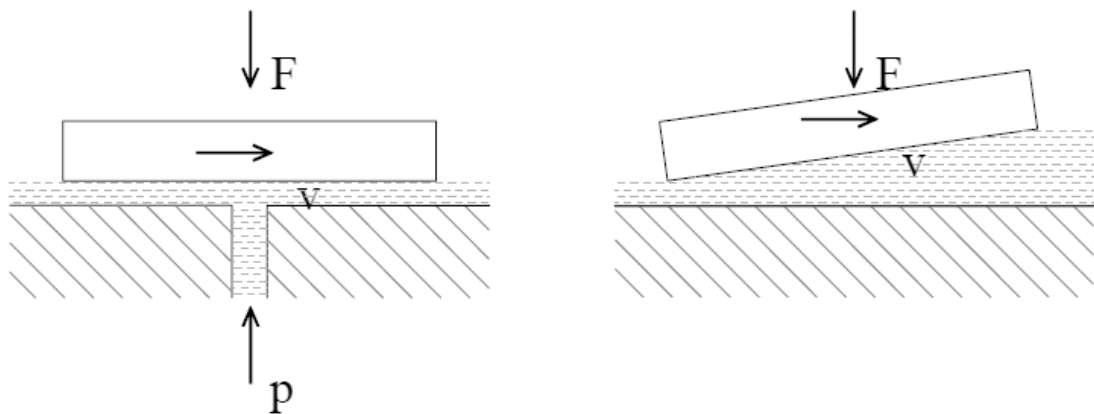
Valivá tělesa, která jsou vysoce zatížena a dostatečnou rychlostí se odvalují po povrchu tělesa druhého, způsobí pružnou (elastickou) deformaci v místě styku. Mazivo se nevytlačí ze stykové oblasti, vzroste prudce jeho viskozita a mezera mezi součástmi zůstane mazivem vyplněna. Po odvalení tělesa z místa původního styku dojde ke vrácení viskozity i deformovaných ploch na původní stav. [1, 4, 11]

Hydrostatické mazání

K udržení dostatečného tlaku k zajištění kapalinového tření mezi součástmi se také může užívat hydrostatického mazání. V tomto případě se mazivo přivádí pod tlakem do mezery mezi zatíženými součástmi. Vzájemná rychlost pohybu součástí nemusí být tak velká, aby vznikl tlak samočinně, tlak je vytvářen mimo třecí soustavu. [3]



Obrázek 3: Typy tření - 1 - mezní tření, 2 - smíšené tření, 3 - kapalinové tření [16]



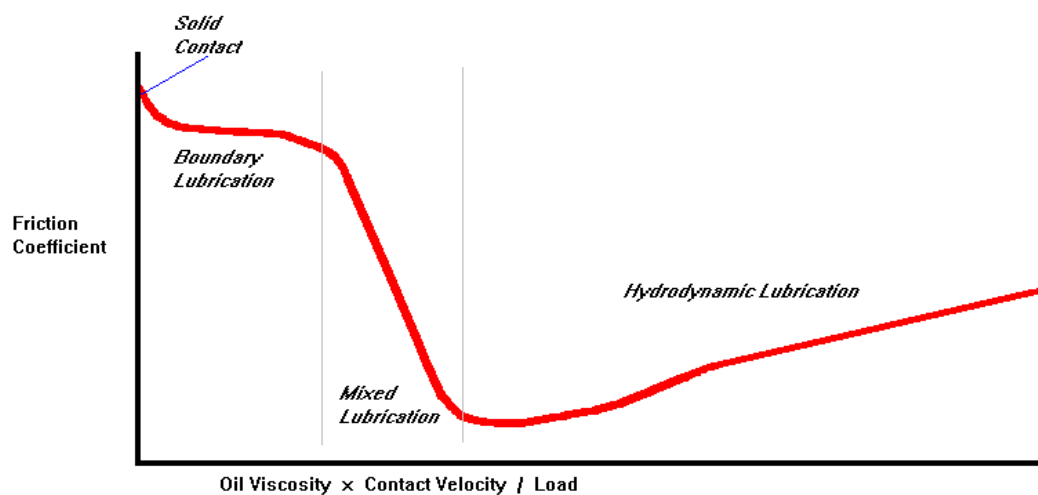
Obrázek 4: Hydrostatické (vlevo) a hydrodynamické tření a mazání [16]

3. Stribeckova křivka a koeficient tření

3.1 Popis Stribeckovy křivky

Již v letech 1900 až 1902 prováděl Stribeck testy tření mazaných kluzných a valivých ložisek a určil koeficient tření jako funkci zatěžující síly, rychlosti a teploty. Dnes obecně Stribeckova křivka znázorňuje závislost součinitele tření na viskozitě třecího prostředí, rychlosti a zatěžující síle (případně tlaku). Pokud se mechanismus nepohybuje, součinitel tření má nejvyšší hodnotu, a to i tehdy, je-li přítomno mazivo. Se započtím pohybu začíná součinitel tření klesat, ovšem tření je stále vysoké, jelikož při velmi malé

rychlosti probíhá mezi součástmi suché tření. Při dalším nárůstu rychlosti mazivo začne plnit částečně svou funkci a molekuly maziva se dostávají mezi povrchy, které jsou v kontaktu, a tím mazivo sníží částečně tření, tudíž se sníží i koeficient tření. Narůstá-li dále rychlost, mazivo se dostane mezi povrchy ve větších vrstvách a dochází ke tření smíšenému, při kterém se již dotýkají jen největší výčnělky na povrchu součástí. Kapalinové tření, kdy již mezi povrchy nedochází ke kontaktu, nastává při dalším zvyšování rychlosti. Při kapalinovém tření neboli hydrodynamickém (případně elasto-hydrodynamickém) v podstatě tření neprobíhá mezi jednotlivými povrchy součástí, ale probíhá přímo v mazivu. Při přechodu ze smíšeného tření na kapalinové bývá obecně koeficient tření nejnižší, při hydrodynamickém tření opět začne narůstat v důsledku vzrůstajícího tření v mazivu. [1, 5, 12]



Obrázek 5: Stribeckova křivka [18]

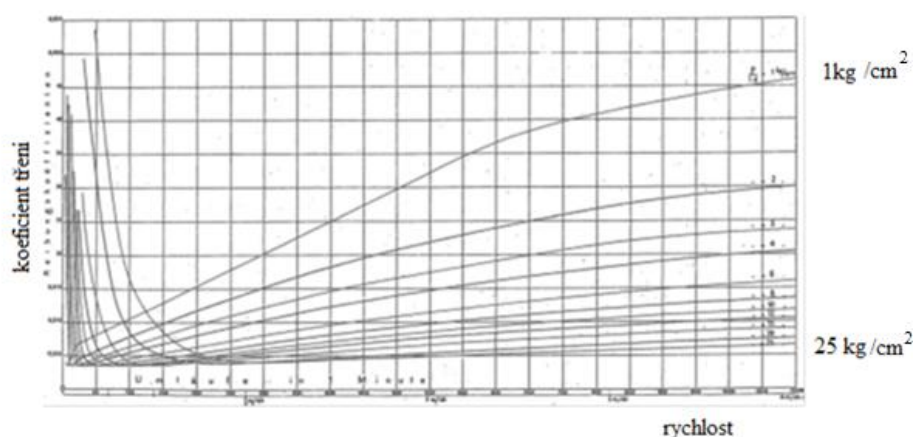
3.2 Vlivy na průběh Stribeckovy křivky

Na obrázku 5 je zobrazena Stribeckova křivka obecně, ovšem ve skutečnosti má na průběh křivky vliv mnoho faktorů. Jedním z vlivů je například vliv působící zatěžující síly, jak je vidět na obrázku 6. Se zvyšujícím se zatížením se zvětšuje oblast přechodu smíšeného a kapalinového tření a tudíž i snižuje koeficient tření. Oblast čistého hydrodynamického tření se posunuje k vyšším rychlostem. Naopak oblast mezního tření se rozšiřuje, jelikož při větším zatížení je potřeba dosáhnout vyšší rychlosti mezi povrchy k vytvoření vyššího tlaku v mazivu, aby došlo ke tření smíšenému či kapalinovému. [5]

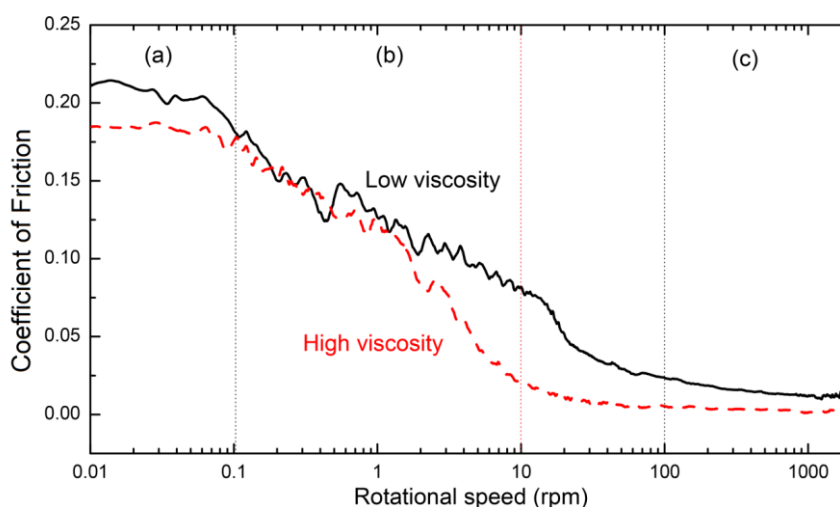
Dalším parametrem, který ovlivňuje průběh Stribeckovy křivky a tím i velikost koeficientu tření, je viskozita maziva. Jak je patrné z obrázku 7, při použití maziva s vyšší viskozitou je koeficient tření nižší a naopak. S viskozitou ovšem úzce souvisí i teplota. Se zvyšující se teplotou má viskozita tendenci klesat a tím se při stejném zatížení součástí při jiné teplotě mění koeficient tření. [14]

Jak je patrné z obrázku 8 má na velikost koeficientu tření vliv také drsnost povrchu. Tento vliv však s narůstající rychlostí klesá a nakonec se koeficient tření vyrovná. [14]

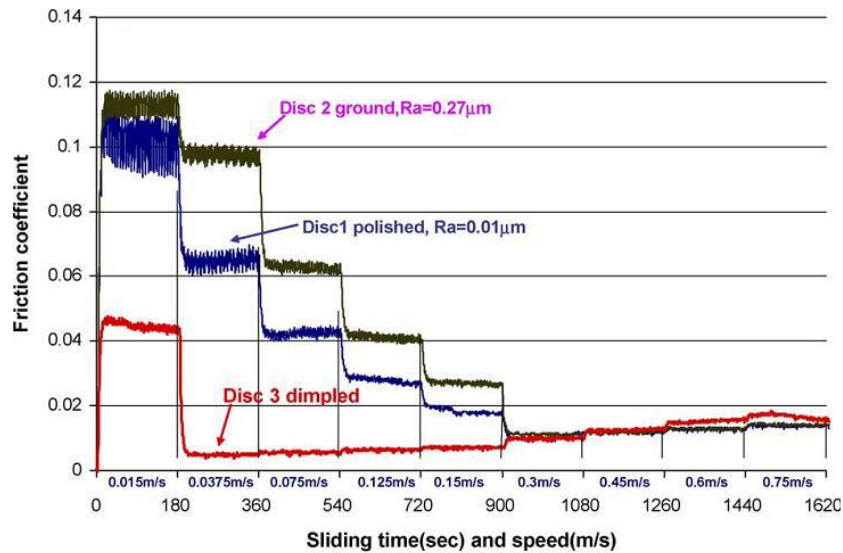
Na průběh Stribeckovy křivky má vliv i použitý materiál. Některé materiály mají například samomazné vlastnosti a pro určité aplikace je dostačující jejich použití bez maziva, čímž také klesají náklady.



Obrázek 6: Vliv zatížení na průběh Stribeckovy křivky [5]



Obrázek 7: Vliv viskozity na koeficient tření [14]



Obrázek 8: Vliv drsnosti povrchu na průběh koeficientu tření [14]

4. Měření koeficientu tření a opotřebení

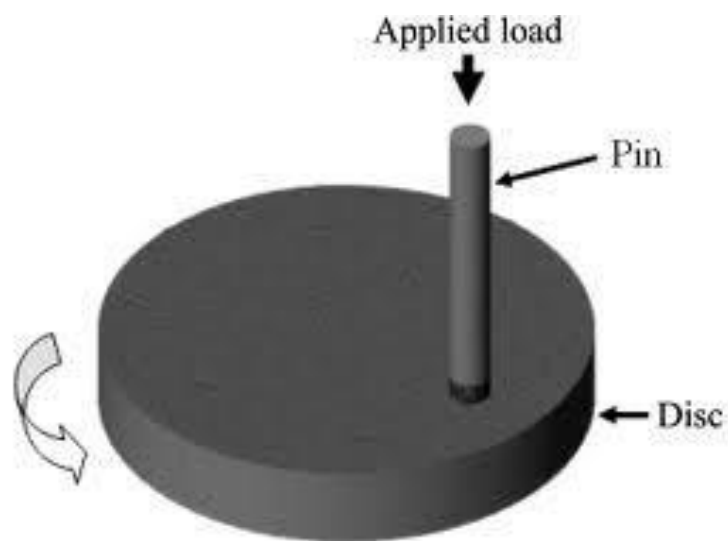
4.1 Přístroje a metody měření tření

Existuje několik různých druhů přístrojů a metod měření, pomocí kterých se zjišťuje koeficient tření, opotřebení. Každá z metod je zanesena do norem. Pro měření se využívají americké normy ASTM a při měření je nutné se podle nich řídit, aby byly výsledky zkoušek relevantní. Vzhledem k velkému množství metod, pomocí kterých se zkoušky provádějí, jsou zde popsány podrobněji zkoušky, které se pro svou relativní jednoduchost a přiblížení se skutečným aplikacím používají nejčastěji k měření opotřebení a koeficientu tření.

4.2 Metoda pin-on-disk

Jednou z nejčastěji využívaných metod pro měření koeficientu tření, je metoda pin-on-disk (někdy označována ball-on-disk, dle použitého tělíska), která se provádí na zařízení zvaném tribometr. Metodou pin-on-disk se měří koeficient tření při kontaktu dvou předem vybraných materiálů, které se například testují pro možnost budoucího využití na určitou aplikaci. Pro měření se připraví z požadovaných materiálů disk a tělísko (pin). Disk se otáčí předem stanovenými otáčkami. Tělísko se umístí do ramene, a to se následně zatíží stanovenou silou. Poté se ještě nasimuluje takové prostředí, ve kterém by měly v budoucnu třecí procesy probíhat (například mazání kapalným mazivem). Nejčastěji

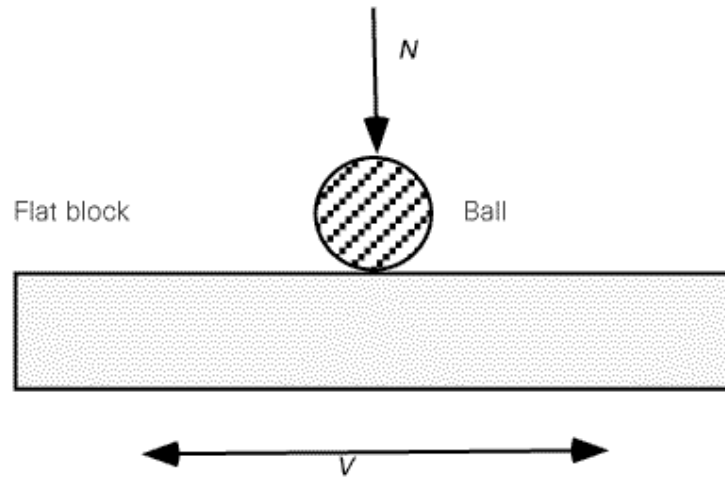
používanými tělísky jsou kulička nebo váleček s malým průměrem. Vzhledem k tomu, že tělísko se v průběhu zkoušky může opotřebovat, je vhodnější použití válečku, jehož průřez zůstává i po opotřebení konstantní a nedojde k naměření nepřesných výsledků v důsledku rozložení zatěžující síly do větší plochy. Pomocí metody pin-on-disk lze celkem snadno zjistit velikost opotřebení a tím i odolnost materiálu proti opotřebení. Při nastavení stejných parametrů testu pro různé materiály, lze podle objemu opotřebovaného materiálu za určitou dobu porovnat, jak moc se dané materiály opotřebovávají. Toto měření lze provádět dle americké normy ASTM G99 – 05. [7, 10]



Obrázek 9: Schéma metody pin-on-disk [19]

4.3 Metoda pin-on-slap, pin-on-plate, ball-on-flat

Ačkoli je uváděno pro tuto metodu více názvů, vždy se jedná o stejnou metodu nebo hodně podobnou. V amerických normách je tato metoda uvedena pod označením ASTM G133 – 05 (2010) s pojmenováním ball-on-flat. Tato metoda spočívá v napodobení ve strojírenské praxi hojně využívaného vzájemného pohybu dvou součástí, kdy se po stejné dráze vratně pohybuje součást tam a zpět. Již z názvů vyplývá, že testování bude probíhat pomocí tělíska, které má většinou tvar kuličky či válečku, obdobně jako u metody pin-on-disk. Tělísko se vyrobí z materiálu, který se má otestovat. Vyrobené tělísko se po umístění do tribometru přitlačí silou k destičce, po které se následně úvratově tře. Destička je také vyrobena z materiálu, na který jsou požadavky na testování. [10]



Obrázek 10: Schéma metody ball-on-flat [20]

4.4 Hertzův tlak

Důležité je zmínit, že při zatěžování tělísek v počáteční fázi měření, kdy se tělísko ještě nehýbe, vznikají v místě dotyku maximální tlaky, které se nazývají Hertzovy. Tyto tlaky mohou způsobit v místě kontaktu s diskem elastickou či plastickou deformaci a jejím následkem se vytvoří v disku důlek nebo se zdeformuje kulička. S následným pohybem tyto tlaky klesají, jelikož se tělísko opotřebovuje a tlak se rozloží do větší plochy.[3]

5. Povlaky, materiály a metody pro snížení tření

Nároky automobilového průmyslu na snížení tření a opotřebení pohonných částí vozidel, snížení spotřeby a zároveň zvýšení výkonu zapříčinily v tribologii vývoj nových metod a materiálů, které mají nižší koeficient tření, lepší kluzné vlastnosti a větší odolnost proti opotřebení. Existuje řada metod, které se neustále testují a zdokonalují. Problém opotřebování a tření není ovšem jen problematikou strojírenského průmyslu. Další velkou oblastí, kde probíhá rozsáhlý výzkum je oblast kloubních implantátů, kde je velké namáhání a nároky na materiál. U těchto aplikací, je oproti aplikacím například v automobilovém průmyslu, důležitá biokompatibilita materiálu. Samozřejmě je velice důležitá vysoká odolnost proti opotřebení, jelikož v těchto případech je většinou výměna „součástí“ značně obtížnější než výměna v průmyslu. V současné době existuje několik běžně používaných materiálů a jejich kombinací. Nejčastěji je to kov, nerezová ocel, slitiny titanu, keramika či keramické povlaky, plast. Tyto materiály se také vzájemně

kombinují. Největším problémem je u těchto aplikací s opotřebením a uvolňováním otěrových částic, které se poté podílejí na dalším a vážnějším opotřebením. Při aplikaci materiálů tedy velmi záleží na koeficientu tření a na mazání. Za účelem snížení otěrových částic a opotřebením se v problematice kloubních náhrad experimentuje také s DLC povlaky, díky kterým by bylo možné použít na kloubní náhrady apod. i materiály, které nejsou plně kompatibilní s tělním prostředím a DLC povlakem je oddělit od tohoto prostředí. [9, 15]

5.1 DLC povlaky

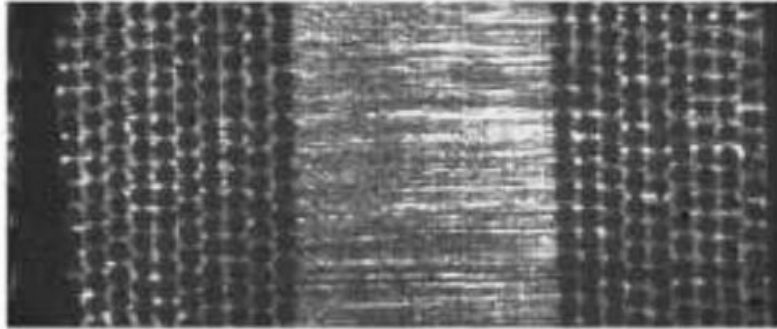
Jednou z metod ke snížení tření a opotřebením, které se dnes věnuje velká pozornost, je nanášení povlaků typu DLC. Název tohoto typu povlaku vznikl z anglického pojmenování diamond like carbon. Vrstva typu DLC se snaží napodobit vlastnosti diamantu – vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebením. DLC povlaky mají velmi nízký koeficient tření a vysokou odolnost otěru oproti běžným materiálům a jsou anti-adhezivní. Kombinuje se tedy základní materiál neboli substrát, který může být houževnatý, s tvrdou a odolnou povrchovou vrstvou. Obecně je vrstva tvořena amorfní strukturou grafitického uhlíku, diamantového uhlíku a vodíku, které v různém poměru poskytují různé vlastnosti povlaku. Uhlík, který je ve vrstvě bohatě obsažen, funguje jako dobré tuhé mazivo. Dále lze také DLC vrstvy modifikovat přidáním různých prvků, které ovlivňují výsledné vlastnosti povlaku. [6, 8]

5.2 Další metody a povlaky

Ke snížení tření a zvýšení odolnosti proti opotřebením se využívá také povlaků na bázi titanu. Mezi nejznámější povlaky patří TiN a TiAlN, které jsou hojně využívány pro povlakování rezných nástrojů. Tyto povlaky kombinují houževnatost a vysokou odolnost proti opotřebením. Samozřejmostí je nízký koeficient tření. Díky některým typům povlaků není nutné v určitých aplikacích použít mazivo, jelikož například materiál typu TiC má díky uhlíku dobré samomazné vlastnosti. Povlaky TiC mohou být nanášeny i ve velmi malých nano-strukturních vrstvách. [8, 17]

Povlaky se dnes nevyžívají jen ke snížení tření, ale i ke snížení tepelných ztrát. Pro tento účel se využívají keramické povlaky. Tyto povlaky ovšem nemají potřebné tribologické vlastnosti z hlediska tření a tudíž se stále pracuje na vývoji takových povlaků, které by kombinovaly tyto parametry. [8]

Pro snížení tření se nevyužívá jen povlakování, ale moderní průmysl hledá ideální parametry pro využití metody LST (Laser surface texturing), kdy jsou do povrchu vytvořeny mikrodůlky (obrázek 9), v kterých se zadržuje mazivo. Jak již název napovídá, jedná se o důlky vytvořené laserem. Tato metoda je však stále ve zkušebním stádiu. [8]



Obrázek 11: Fotografie částečné struktury typu LST [8]

II. Stanovení cílů práce

V předchozí kapitole jsou popsány základní teoretické informace ohledně tribologických vlastností, jako jsou tření a opotřebení. Jsou zde zmíněny také moderní metody, které by měly vést ke snížení tření a opotřebení součástí. Těmito metodami mohou být například DLC povlaky či různá maziva. Pokud bychom hovořili o mazivech v automobilovém průmyslu, nejčastěji se setkáme s mazivy olejovými. Na trhu se také objevují další přídavné látky do olejů – aditiva. Otázkou je, pokud se použijí v kombinaci s rozšiřujícími se povlaky DLC, jestli mají nějak výrazné zlepšující účinky.

Cíle této práce tedy jsou:

- Volba testovaných povrchů
 - o Zvolit typ DLC vrstvy a připravit vzorky s tímto povlakem
 - o Zjistit parametry DLC povlaku – jeho tloušťku pomocí kalotestu a jeho adhezi k substrátu pomocí scratchtestu
 - o Připravit dva odlišné povrchy pro srovnání s povlakem DLC – vzorek základního materiálu (substrátu) a vzorek s nitridovaným povrchem
- Provést testy tribologických vlastností vzorků
 - o Zvolit olej a vybrat dvě odlišná aditiva
 - o Stanovit testovací parametry
 - o Provést tribologické zkoušky všech vzorků v různých prostředích na tribometru
- Vyhodnocení a srovnání naměřených parametrů
 - o Vyhodnotit provedené tribologické zkoušky DLC povlaku, substrátu a nitridovaného vzorku
 - o Porovnat vliv aditiv na koeficient tření a opotřebení vzorků
 - o Porovnat tribologické vlastnosti DLC povlaku proti odlišným vzorkům

III. Experimentální část

6. Použité materiály a přístroje

6.1 Tribometr CSM Instruments

K měření tření a opotřebení různých povrchů a materiálů lze využít mnoho metod a přístrojů. Pro experiment měření tribologických vlastností povlaku DLC v olejovém prostředí byl využit tribometr typu Pin-on-disk od firmy CSM Instruments. Měření na tomto tribometru spočívá v rotaci zkušebního vzorku (disku), který je v kontaktu se statickým partnerem (pinem), který může být zatížen různou silou, čímž vzniká určitá třecí síla a opotřebení. Pro měření lze upnout různé velikosti vzorků. Jako pin se zde využívá tělísko ve tvaru kuličky. Parametry měření, jako jsou rychlost otáčení disku, počet otáček, ujetá vzdálenost či například poloměr otáčení pinu, jsou libovolně nastavitelné. Měření lze také provádět za zvýšených teplot (až do teploty 850°C), jelikož tribometr disponuje vlastní pecí.

Tribometr lze využít i pro měření v kapalinách. Tento konkrétní model ovšem nedisponoval nádobkou na kapalinu a proto pro měření v oleji bylo nutné příslušnou nádobku vyrobit. Princip měření byl stejný jako za sucha pouze s tím rozdílem, že disk byl umístěn v naplněné nádobce a byl pod vrstvou oleje s aditivy.

Jako pin byla při tomto měření využita kulička o průměru 6 mm z oceli 1.2067 (100Cr6, 14 109). Tato ocel je běžně využívána k výrobě valivých těles ložisek – kuličky, válečky, kuželíky. Vyznačuje se tvrdým povrchem, který je odolný proti opotřebení.

Tabulka 1: Chemické složení kuličky – ocel 1.2067

Chemické složení [%]	C	Mn	Si	Cr	Ni max	Cu max	P max	S max
	0,90-1,10	0,30-0,50	0,15-0,35	1,30-1,65	0,30	0,25	0,027	0,030

6.2 Povlak typu DLC

Pro daný experiment bylo nejprve nutné zvolit vhodný povlak typu DLC a tento povlak připravit. Vzhledem k různým modifikacím DLC povlaků, které je možno volit, byl

po konzultaci s vedoucím práce pro experiment zvolen povlak DLC dopovaný titanem, který se označuje Ti-C:H. Nedopovaný povlak DLC je povrchově uzavřený a chemicky neaktivní, proto byl zvolen dopovaný povlak, na kterém se mohou vytvářet oxidy titanu, které by mohly s olejem či aditivou vytvářet tribochemické vrstvy.

Tento povlak byl připraven na povlakovacím zařízení Flexicoat 850 od firmy Hauzer se dvěma rovinnými magnetrony metodou magnetronového naprašování. Před vlastní depozicí byly substráty odmaštěny acetonem v ultrazvukové pračce a sušeny horkým vzduchem. Po umístění do depoziční komory byly vzorky čištěny v argonové plazmě a následně povlakovány adhezni mezivrstvou čistého Ti, která byla deponována metodou nerovnovážného magnetronového naprašování z titanových terčů (99,5 % Ti grade 1) v argonové atmosféře (99,999 %). Gradientní přechod z čistého Ti na Ti-C:H byl vytvořen zvyšováním toku acetyleny (čistota 99,6 %). Funkční vrstva Ti-C:H byla deponována při zvoleném toku acetyleny 80 sccm (kubický centimetr za sekundu) za použití pulzního předpětí na substrátech a terčích s frekvencí v rozmezí od 20 kHz do 50 kHz.

Parametry a proces povlakování byly následující:

- Ohřev (tlak $2,5 \cdot 10^{-2}$ Pa, teplota 180 °C, čas 90 minut)
- Čištění (teplota 210 °C)
- Depozice Ti (magnetronové naprašování, tlak $3,0 \cdot 10^{-1}$ Pa, teplota 220 °C, terč Ti, tok plynu: Ar 100 sccm, předpětí - 80 V, příkon na katodách 3 kW, čas 20 minut)
- Depozice Ti-C:H (reaktivní magnetronové naprašování, tlak $3,0 \cdot 10^{-1}$ Pa, teplota 180 °C, terč Ti, toky plynů C₂H₂ 80 sccm a Ar 100 sccm, předpětí - 80 V, příkon na katodách 3 kW, čas 30 minut)

Povlak byl nanášen na destičku o průměru 40 mm, která byla základním materiálem (substrátem) pod povlak. Destička byla vyrobena z materiálu 1.2379 (X153CrVMo12-1, 19 573), který je jednou z nejpoužívanějších chromových ocelí na světě a běžně se tedy vyskytuje v nejrůznějších aplikacích. Tento materiál má vysokou odolnost proti opotřebení a otěru, dobrou houževnatost, vysokou pevnost v tlaku a rozměrovou stálost. Ocel je sekundárně vytvrditelná a díky tomu je to materiál vhodný pro následné chemicko-tepelné zpracování (nitridace, CVD, PVD).

Tabulka 2: Chemické složení substrátu - ocel 1.2379

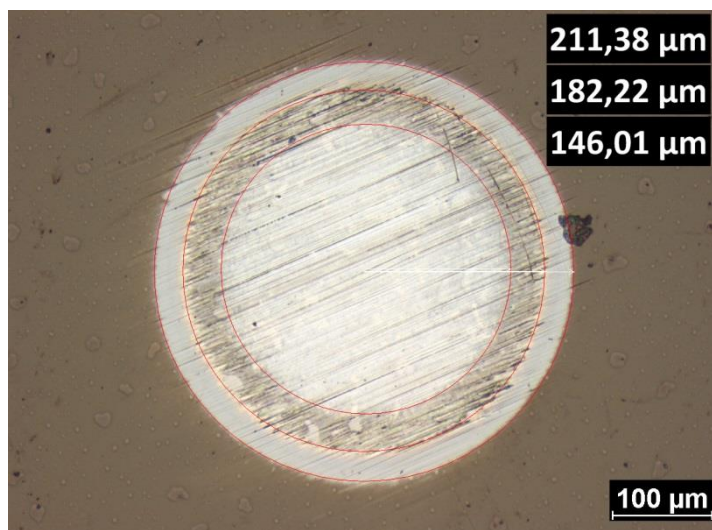
Chemické složení [%]	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P max	S max
	1,45-1,6	0,2-0,6	0,1-0,6	11,0-13,0	0,7-1,0	0,7-1,0	0,03	0,03

Ti-C:H vrstva byla následně otestována pomocí vrypové zkoušky (scratch testu) na zařízení Revetest Xpress Plus RSX+ od firmy CSM Instruments. Zkušební tělísko se umístilo do přístroje a po nastavení parametrů zkoušky se postupným zatěžováním od 1 N do 100 N vytvořil v tělísku vryp. Následným pozorováním vrypu pod mikroskopem byla pomocí této zkoušky změřena adheze povlaku k substrátu. Porušení adheze povlaku k substrátu se začínalo projevovat přibližně při hodnotě zatížení 55 N. Toto porušení je viditelné na obrázku 12.



Obrázek 12: Porušení adheze povlaku k substrátu při zatížení 55 N

Vrstva byla také podrobena testu na přístroji Calotest® Compact od firmy CSM Instruments. Na povrchu tělíska byla rotací kuličky o průměru 30 mm, pokryté vodní diamantovou suspenzí o zrnitosti 0-0,2 μ , po dobu 15 s, při 500 rpm (otáčky za minutu), vybroušena povlakovaná vrstva. Pod mikroskopem byl výbrus pozorován a na základě pozorování byla vypočtena tloušťka povlakované vrstvy.



Obrázek 13: Výsledek provedeného kalotestu s poloměry jednotlivých vrstev tělíska

Vzorec pro výpočet tloušťky povlakované vrstvy:

$$s = \sqrt{R_s^2 - \frac{d^2}{4}} - \sqrt{R_s^2 - \frac{D^2}{4}} \quad (1)$$

kde... s – tloušťka povlakované vrstvy [mm]

R_s – poloměr kuličky [mm]

d – malý průměr vrstvy [mm]

D – velký průměr vrstvy [mm]

Výpočet tloušťky Ti-C:H vrstvy:

$$s = \sqrt{15^2 - \frac{0,362^2}{4}} - \sqrt{15^2 - \frac{0,422^2}{4}} = 3,92034 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \doteq \underline{\underline{0,39 \mu\text{m}}}$$

Výpočet celkové tloušťky vrstvy včetně mezivrstvy čistého Ti a gradientního přechodu:

$$s = \sqrt{15^2 - \frac{0,292^2}{4}} - \sqrt{15^2 - \frac{0,422^2}{4}} = 7,73557 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \doteq \underline{\underline{0,77 \mu\text{m}}}$$

6.3 Vzorky pro porovnání tribologických vlastností

Ke srovnání tribologických vlastností Ti-C:H povlaku byl zvolen vzorek základního materiálu, který byl volen jako substrát pro povlakování – tj. materiál 1.2379 o chemickém složení a vlastnostech uvedených v kapitole 6.2 Povlak typu DLC. Tento

vzorek měl v průměru také 40 mm. Byl vakuově zakalen a jeho povrch byl metalograficky vyleštěn. Tvrdost tohoto vzorku byla změřena na 61 HRC a byla naměřena laboratorním mikrotvrdoměrem Leco M-400-G1.

Jako třetí vzorek k testování byl použit též vzorek základního materiálu o průměru 40 mm, který byl ovšem nitridován na zařízení Flexicoat 850 od firmy Hauzer za účelem zvýšení tvrdosti povrchu materiálu a změny chemických vlastností povrchu. Plazmová nitridace byla provedena v atmosféře N₂. Plyn byl dodatečně ionizován pomocí plazmového zdroje. Vzorek po nitridaci byl metalograficky leštěn, aby se dosáhlo stejných parametrů drsnosti jako u vzorku základního materiálu. Tvrdost nitridované vrstvy vzrostla na hodnotu 70 HRC a byla změřena také na mikrotvrdoměru Leco M-400-G1.

Parametry a proces nitridace byl následující:

- Ohřev (tlak $3,0 \cdot 10^{-3}$ Pa, teplota 530 °C, čas 75 minut)
- Čištění (tlak $1,5 \cdot 10^{-1}$ Pa, teplota 530 °C, čištění 30 minut, plazmový zdroj)
- Nitridace (tlak $2,0 \cdot 10^{-1}$ Pa, teplota 530 °C, tok plynu N₂ 60 sccm, 240 minut)

6.4 Použitý olej a aditiva

Pro experiment vlivu olejových aditiv na tribologické vlastnosti DLC povlaků bylo nutné zvolit dvě rozdílná olejová aditiva a samozřejmě nějaký motorový olej. Vzhledem k tomu, že kvalitní komerčně využívané oleje již obsahují mnoho přídatných prvků a nemusel by být vliv dalších aditiv patrný, bylo rozhodnuto pro experiment použít možná co nejobyčejnější motorový olej. Byl zvolen motorový olej výrobce Paramo s označením TRYSK M6A SAE30, což by mělo zaručit bezproblémové použití oleje v rozsahu okolních teplot -5°C až 35°C. Typickými vlastnostmi tohoto oleje je ochrana motoru před opotřebením, proti korozi, udržování vnitřního prostoru motoru v čistotě a také se vyznačuje nízkou odparností.

Prvním vybraným aditivem, je aditivum s označením Cera Tec, které vyrábí firma Liqui Molly. Toto aditivum je vhodné do všech používaných motorových olejů. Přísada je tvořena minerálním olejem, do kterého jsou přimíchány mikro keramické částice na bázi hexagonálního nitridu boru. Tyto mikro částice by měly vyplňovat mikroskopické nerovnosti v kovu a zabraňovat tím přímému kontaktu kovu na kov. Tím by se mělo dle výrobce nejen snížit opotřebení a tření dvou kontaktních ploch.

Jako druhé aditivum, které bylo zvoleno, je také vyráběno firmou Liqui Molly. Jeho označení je prosté – Oil Additiv a hodí se do všech motorových olejů. Jedná se o mazací látku, která obsahuje MoS_2 (molybden disulfid), což je v podstatě tuhé mazivo podobné grafitu. Mazivo vytváří na kluzných plochách odolný mazací film, který by měl snížit tření a opotřebení a zlepšit celkový chod např. motoru. V důsledku těchto vlastností by se měla snížit spotřeba paliva a oleje a nemělo by tak často docházet k poruchám.

7. Parametry měření

Důležitým krokem při provádění experimentu bylo nastavení parametrů měření na tribometru. Vzhledem k průběhu Stribeckovy křivky, na kterém je jasně patrná závislost mezi rychlostí kontaktu dvou součástí a druhem tření, bylo nutné tuto závislost zohlednit. Pro výsledky experimentu bylo důležité, aby kontakt odpovídal meznímu či případně smíšenému tření, kdy lze rozdíly v opotřebení různých povrchů snáze pozorovat než například při hydrodynamickém tření. Zároveň bylo nutné stanovit přijatelný čas měření, jelikož bylo plánováno celkem dvanáct měřících cyklů.

Po přečtení několika vědeckých článků a prací zabývajících se tribologickými měřeními a porovnání parametrů měření v nich uvedených, byl zvolen určitý kompromis, který z těchto článků a požadovaného času měření vychází. Normálové zatížení pinu F_n jsem zvolil obvyklých 5 N, vzdálenost L byla při každém měření nastavena na 200 m, což odpovídalo, při rychlosti otáčení 5 cm/s, času měření 66 min a 40 s. Na každém disku byla provedena celkem čtyři měření a to na poloměru otáčení R (výsledný poloměr dráhy opotřebení na disku) 7 mm pro čistý olej, 9,5 mm pro olej s aditivem Cera Tec (8,5 mm v případě povrchu Ti-C:H, jelikož při měření na $R = 9,5$ mm byly špatně nastavené parametry a bylo nutné měření opakovat), 12 mm pro olej s aditivem Oil Additiv a 14,5 mm pro měření bez oleje a aditiv.

Důležité bylo také stanovit množství oleje a přidaných aditiv. Množství oleje bylo stanoveno tak, aby byl celý pin po celou dobu měření pod vrstvou oleje a to na 20 ml. Výrobce aditiv stanovuje poměr, v jakém mají být aditiva přidána do oleje. Po přepočtu objemu aditiv na zvolený objem oleje 20 ml, bylo určeno množství přísady Cera Tec na hodnotu 1,25 ml a přísady Oil Additiv na 1 ml. Množství bylo vždy odměřeno pomocí odměrných válců.

8. Vyhodnocení měření

8.1 Metody a způsoby vyhodnocení

Vyhodnocení opotřebení

Opotřebení vzorků bylo vyhodnoceno podle americké normy ASTM G 99 – 034, která nese název Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus (standartní testovací metoda pro testování opotřebení pomocí přístroje Pin-on-disk). V této normě je uveden vzorec pro výpočet objemu otřené materiálu jednak pro disk, tak i pro kuličku.

Opotřebení kuličky:

$$V_p = \frac{\pi \cdot h}{6} \cdot \left(\frac{3 \cdot d^2}{4} + h^2 \right) \quad (2)$$

kde... V_p – objem úbytku materiálu na pinu [mm^3]

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}}$$

r – poloměr kuličky (pinu) [mm]

d – průměr otřené plošky na kuličce [mm]

Opotřebení disku:

$$V_d = 2\pi R \cdot \left[r^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) \cdot \sqrt{4r^2 - d^2} \right] \quad (3)$$

kde... V_d – objem úbytku materiálu na disku [mm^3]

r – poloměr kuličky (pinu) [mm]

R – poloměr dráhy opotřebení na disku [mm]

d – šířka dráhy (stopy) opotřebení na disku [mm]

Při vyhodnocování opotřebení disku se též určuje míra opotřebení v závislosti na vzdálenosti, kterou disk urazil a velikosti zatížení nebo na počtu otáček, které vykonal a velikosti zatížení.

Míra opotřebení v závislosti na počtu otáček a velikosti zatížení:

$$W = \frac{S_o}{n \cdot F_n} = \frac{\left[r^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) \cdot \sqrt{4r^2 - d^2} \right]}{n \cdot F_n} \quad (4)$$

kde... w – míra opotřebení [mm^3/Nm]

S_o – průřez stopy [mm]

n – počet otáček disku [-]

F_n – normálová zatěžující síla [N]

r – poloměr kuličky (pinu) [mm]

d – šířka dráhy (stopy) opotřebení na disku [mm]

Míra opotřebení disku v závislosti na délce dráhy a velikosti zatížení:

$$W = \frac{V_d}{L \cdot F_n} \quad (5)$$

kde... w – míra opotřebení [mm^3/Nm]

V_d – objem úbytku materiálu na disku [mm^3]

L – uražená vzdálenost disku [mm]

F_n – normálová zatěžující síla [N]

Pro vyhodnocení a odměření šířky stopy a změření průměru opotřebení kuličky bylo využito laboratorních mikroskopů společně s vyhodnocovacím softwarem NIS Elements, který je produktem firmy Nikon. V tomto softwaru, po propojení mikroskopu s počítačem, kde je tento program nainstalován, lze zjednodušeně a zrychleně snímat obraz zkoumaných objektů a následně využít výkonné funkce, jako například právě odměřování vzdáleností, rozměrů apod.

Vyhodnocení tření

Třecí síla je funkcí síly normálové a závisí na parametrech (koeficientech tření) povrchů součástí, mezi kterými dochází ke tření. V experimentální části získáváme právě koeficient tření povrchů v různých tribologických prostředích. Třecí síla byla zaznamenána vlastními senzory tribometru. Pro výpočet koeficientu existuje jednoduchý vzorec.

Vzorec pro výpočet koeficientu tření:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (6)$$

kde... μ – koeficient tření [-]

F_t – třecí síla [N]

F_n – normálová zatěžující síla [N]

Zaznamenání tření, respektive koeficientu tření při experimentu probíhalo automaticky již v průběhu chodu tribometru. Tribometr je propojen s počítačem, na kterém je nainstalován software TriboX dodávaný firmou CSM Instruments. Přes tento software se nastavují parametry měření a tribometr se pomocí něj ovládá. Při spuštění měření se tímto softwarem zaznamenává průběh koeficientu tření. Po skončení měření software finálně vyhodnotí průběh koeficientu tření v podobě grafu. Lze též vygenerovat protokol o měření a uložit zaznamenaná data.

Zaznamenaných dat bylo následně využito ke zpracování grafů, které znázorňují průběh koeficientu tření v různých prostředích na odlišných typech povrchu. K vytvoření grafů bylo použito softwaru Origin 2015 společnosti OriginLab. V tomto softwaru lze vytvářet velké množství typů grafů a data pro vytvoření grafů lze libovolně filtrovat.

8.2 Vyhodnocení naměřených dat

Šířka stopy po kuličce a opotřebení disku

Při každé provedené tribologické zkoušce vzniklo díky tření mezi kuličkou (pinem) a vzorkem (diskem) určité opotřebení disku. Toto opotřebení má v důsledku rotačního pohybu disku charakter kruhové stopy, která je pro každý materiál a prostředí různě široká, tj. na vzorcích vzniklo různě velké opotřebení. Stopy byly proměřeny na mikroskopu a pomocí softwaru NIS Elements byla proměřena na třech místech jejich šířka. Následně z těchto tří hodnot byl vypočten jejich průměr pro každý vzorek a prostředí. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

Vyhodnocení opotřebení disku bylo provedeno dle vzorců, které jsou uvedeny v normě ASTM G 99 – 034. Tyto vzorce jsou uvedeny v odstavci 8.1 a konkrétně je to vzorec (3) pro výpočet objemu opotřebenosti disku V_d a vzorec (5) pro výpočet míry opotřebení w v závislosti na zatížení a délce dráhy. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.

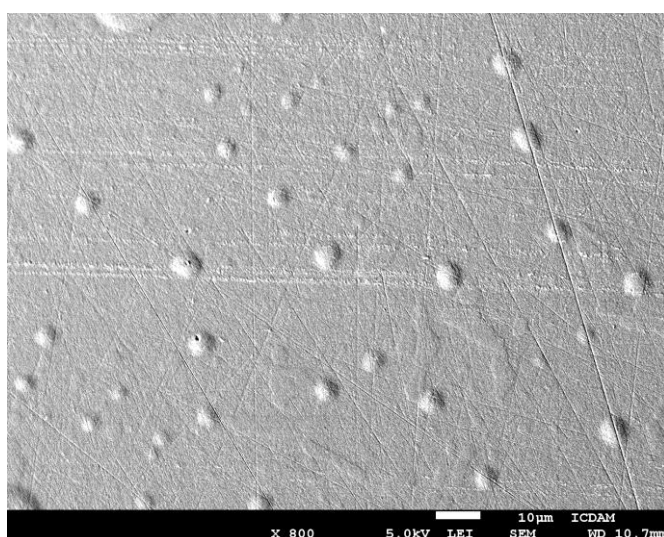
Z naměřených a vypočtených hodnot jasně vyplývá, že na vzduchu je substrát nejméně odolný vůči opotřebení. S předpokládaným nárůstem tvrdosti u nitridované vrstvy roste i její odolnost vůči opotřebení. U Ti-C:H povlaku je šířka stopy i velikost opotřebení na vzduchu jasně nejnižší a tento povlak tedy odpovídá předpokládaným vlastnostem a potvrzuje důvod, proč je využíván. Toto tribologické prostředí ovšem není v reálných automobilových (motorových) aplikacích žádoucí, ale vzhledem k výsledkům lze říci, že pokud by došlo například k úniku oleje a mazání nebylo dostačující, Ti-C:H povlak alespoň nějakou dobu vydrží a například motor by se hned nemusel zadřít.

V čistém oleji šířka stopy i opotřebení značně pokleslo u všech povrchů (procentuálně nejvíce u substrátu a to o 92%, nitridovaného vzorku o 85% a u Ti-C:H o 75%). Tento trend se dal očekávat a jen se reálně potvrdilo, z jakého důvodu se olejových maziv v motorech, převodovkách apod. využívá.

Z pohledu přidání a následující funkčnosti aditiv, byl po vyhodnocení měření výsledek na první pohled dosti překvapující. Výrobce aditiv uvádí, že s jejich pomocí by se mělo dosáhnout ještě většího snížení tření a opotřebení, ovšem dle vypočtených hodnot jde spíše o trend opačný a to hlavně u Ti-C:H povlaku, kde byla očekávána velikost opotřebení nejnižší. Ovšem po bližším prozkoumání stop pod mikroskopem bylo zjištěno, že stopy u substrátu a nitridované vrstvy jsou možná o něco málo širší než u čistého oleje, ale opotřebení je srovnatelné v případě přísady Oil Additiv či dokonce nižší při použití Cera Tecu. U Ti-C:H je pokles opotřebení patrný ještě mnohem více, hlavně pak u přísady Oil Additiv, kdy je stopa viditelná jen nepatrně a při aplikaci aditiva nedošlo téměř k žádnému poškození a opotřebení (obrázek 14). Přísada Cera Tec dle dokumentace nejspíše způsobila u Ti-C:H to, že částičky keramiky (hexagonálního nitridu boru) se uchytily na povrchu a pin se dotýkal těchto částic (obrázek 16). Oproti vypočtenému opotřebení tedy to reálně zřejmě tyto přísady opravdu snížily.

Rozdíl mezi vypočtenými hodnotami opotřebení a hodnotami viditelnými na snímcích je s největší pravděpodobností způsoben aplikací vzorce z normy. Norma počítá totiž s tím, že šířka stopy odpovídá vyryté prohlubni od pinu, který se vůbec neopotreboval. Pro přesný výpočet velikosti opotřebení disku by bylo nutné proměřit profil stopy a přes průřez tohoto profilu dopočítat výsledné opotřebení. Dalším zpřesněním výpočtu opotřebení by mohlo být provedení chemické analýzy stopy a jejího okolí, kdy by se mohlo ukázat, že stopa viditelná na snímcích je tvořena z části, či zcela, usazeným mazivem.

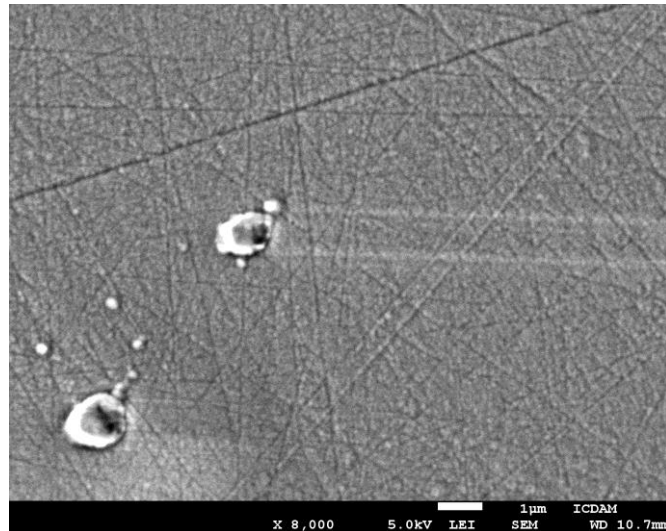
Snímky stop jsou k nahlédnutí v přílohách bakalářské práce (strana 47 – 50).



Obrázek 14: Stopa na Ti-C:H v oleji + MoS₂



Obrázek 15: Stopa na Ti-C:H v oleji + Cera Tec a viditelnost keramických částic



Obrázek 16: Detail keramických částic uchycených na povrchu povlaku Ti-C:H

Tabulka 3: Šířky stop po kuličce na jednotlivých površích

prostředí	šířka stopy [μm]	povrch		
		substrát	nitridovaná vrstva	Ti-C:H povlak
vzduch	d1	839,93	381,49	141,19
	d2	833,66	382,77	142,73
	d3	828,69	381,56	141,44
	průměr d	834,09	381,94	141,79
olej	d1	65,06	56,86	35,83
	d2	64,90	55,14	35,68
	d3	65,38	58,75	35,83
	průměr d	65,11	56,92	35,78
olej + Oil Additiv	d1	69,91	78,00	113,82
	d2	69,74	77,85	110,34
	d3	69,82	77,92	113,82
	průměr d	69,82	77,92	112,66
olej + Cera Tec	d1	53,62	61,82	125,05
	d2	53,52	61,63	126,52
	d3	53,62	61,82	125,26
	průměr d	53,59	61,76	125,61

Tabulka 4: Velikost opotřebení a míry opotřebení jednotlivých povrchů disků

prostředí	parametr	povrch		
		substrát	nitridovaná vrstva	Ti-C:H povlak
vzduch	V_d [mm ³]	6439,32	2940,55	1090,96
	w [mm ³ /Nm]	0,006439	0,002941	0,001091
olej	V_d [mm ³]	241,83	211,41	132,89
	w [mm ³ /Nm]	0,000242	0,000211	0,000133
olej + Oil Additiv	V_d [mm ³]	444,55	496,13	717,35
	w [mm ³ /Nm]	0,000445	0,000496	0,000717
olej + Cera Tec	V_d [mm ³]	270,12	311,31	566,54
	w [mm ³ /Nm]	0,000270	0,000311	0,000567

Opotřebení pinu

Při kontaktu pinu s diskem došlo také k opotřebení kuličky. Toto opotřebení se zde projevilo vytvořením plošky na kuličce. Tato ploška má kruhový charakter a její poloměr byl změřen také pomocí mikroskopu a softwaru NIS Elements. K vytvoření plošky, respektive opotřebení, došlo však pouze v prostředí vzduchu a také u Ti-C:H povlaku. U základního materiálu a nitridované vrstvy v olejovém prostředí k opotřebení kuličky nedocházelo. Vypočtené opotřebení dle vzorce (4) je uvedeno v tabulce 5.

Stejně jako u opotřebení disků, tak i v případě pinů, je dle očekávání nejvyšší opotřebení u vzorků, které byly testovány bez použití maziva. Nejvyšší opotřebení pinu je zaznamenáno po kontaktu se substrátem, následuje vzorek s nitridovanou vrstvou a nejmenší opotřebení pinu je po kontaktu s povlakovaným vzorkem Ti-C:H. Z těchto údajů je patrné, že jak nitridovaná vrstva, tak i povlak Ti-C:H snižují při kontaktu nejen opotřebení disku, ale také opotřebení druhé součásti.

V případě, kdy byl použitý olej, se nevyskytuje u substrátu ani u nitridovaného disku na kuličce žádné opotřebení. Opotřebení není patrné ani s přidáním obou druhů aditiv. Pro vysvětlení tohoto jevu by bylo nutné provést zkoušky tribochemie, jelikož je možné, že se na kuličce vytvoří určitý ochranný film. Vzhledem k tomu, že se kuličky využívají v ložiskách, kde je nutné eliminovat tření a opotřebení mazivem, teoretickou variantou může být určitá tribochemická reakce mezi povrchem materiálu kuličky a olejem – materiál kuličky je přímo volen tak, aby tato reakce vznikla a nedocházelo k výraznému opotřebení.

Co se týče hodnot velikosti opotřebení kuličky, které byly získány měřením v olejovém prostředí u Ti-C:H povlaku, přidáním oleje se průměr plošky vzniklé opotřebením mírně zvýší. Důvodem může být kontakt kuličky s vysoce odolným povrchem Ti-C:H, kdy kulička v podstatě „převzme“ opotřebení na sebe.

Přidáním aditiv opotřebení kuličky ještě více vzroste. U obou je nárůst srovnatelný. Zvýšení otěru pinu u přísady Cera Tec může být způsobeno působením mikro keramických částic, kterým sice Ti-C:H povlak odolá a zároveň díky nim u povlaku opotřebení klesne, ovšem na nepovlakovanou kuličku, která je zároveň v kontaktu s odolným Ti-C:H povlakem, můžou mít částice opačný vliv. Stejný vzrůst opotřebení je ale též po přidání Oil Additiv na bázi MoS₂, kde je působení keramických částic vyloučeno. Kulička tedy může být opotřebována kontaktem s odolnějším Ti-C:H povlakem, který je zároveň ještě více chráněn daným aditivem.

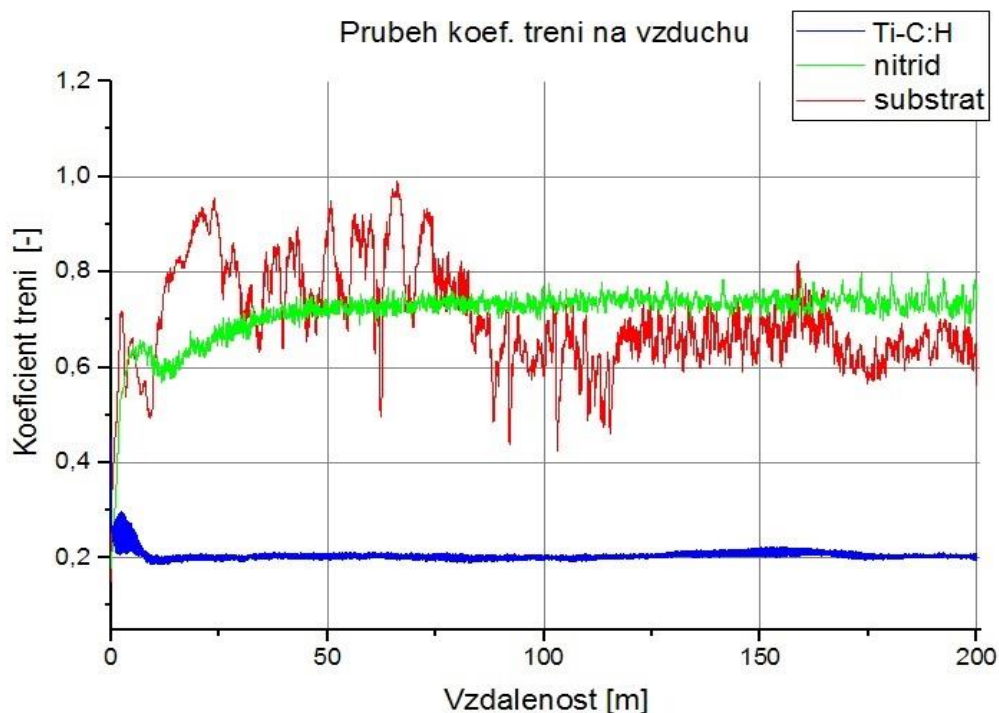
Snímky opotřebení kuličky jsou uvedeny v přílohách (stana 51 – 52).

Tabulka 5: Velikost opotřebení pinu

Prostředí	parametr	povrch		
		substrát	nitridovaná vrstva	Ti-C:H povlak
Vzduch	V_p [mm³]	$2422,99 \cdot 10^{-5}$	$744,44 \cdot 10^{-5}$	$7,48 \cdot 10^{-5}$
	\emptyset plošky d [mm]	1,10	0,82	0,26
Olej	V_p [mm³]	-	-	$9,96 \cdot 10^{-5}$
	\emptyset plošky d [mm]	-	-	0,30
olej + Oil Additiv	V_p [mm³]	-	-	$21,47 \cdot 10^{-5}$
	\emptyset plošky d [mm]	-	-	0,44
olej + Cera Tec	V_p [mm³]	-	-	$22,46 \cdot 10^{-5}$
	\emptyset plošky d [mm]	-	-	0,45

Koeficient tření dle prostředí

Výstupem provedených tribologických zkoušek je nejen opotřebení, ale také tření. Všechna data a informace o průběhu koeficientu tření byla z každého měření zaznamenána pomocí programu TriboX. Data byla následně zpracována do grafů, které jsou rozděleny podle jednotlivých prostředí. V každém z grafů je záznam průběhu koeficientu tření na každém ze tří povrchů.

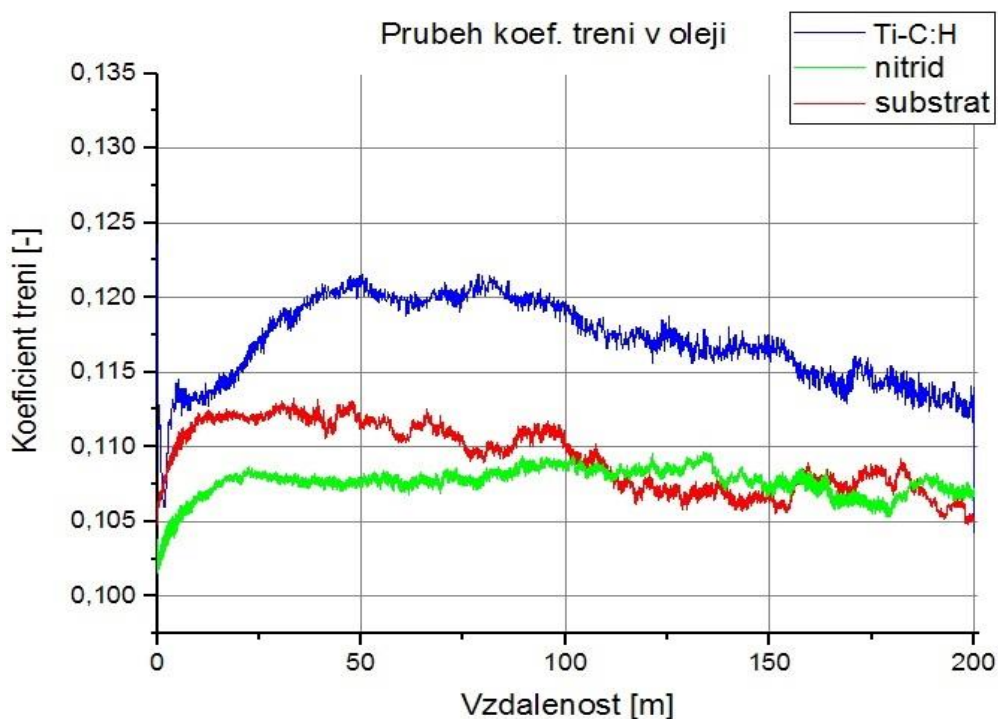


Graf 1: Průběh koeficientu tření na vzduchu

Při pohledu na průběhy koeficientů tření v tribologickém prostředí vzduchu se potvrdila druhá hlavní vlastnost povlaků typu DLC – nízký koeficient tření. V tomto případě je jeho průběh stabilní a průměrná hodnota $\mu = 0,206$. Jediný výkyv je viditelný v záběhové fázi měření.

Obdobný průběh koeficientu tření vykazuje také nitridovaný disk. Oproti průběhu u Ti-C:H jsou zde patrné mírné výkyvy v průběhu, které mohly být způsobeny působením otěrových částic. Hodnota tření je ovšem vyšší, což se dalo předpokládat. Průměrná hodnota byla zaznamenána na hodnotě $\mu = 0,704$.

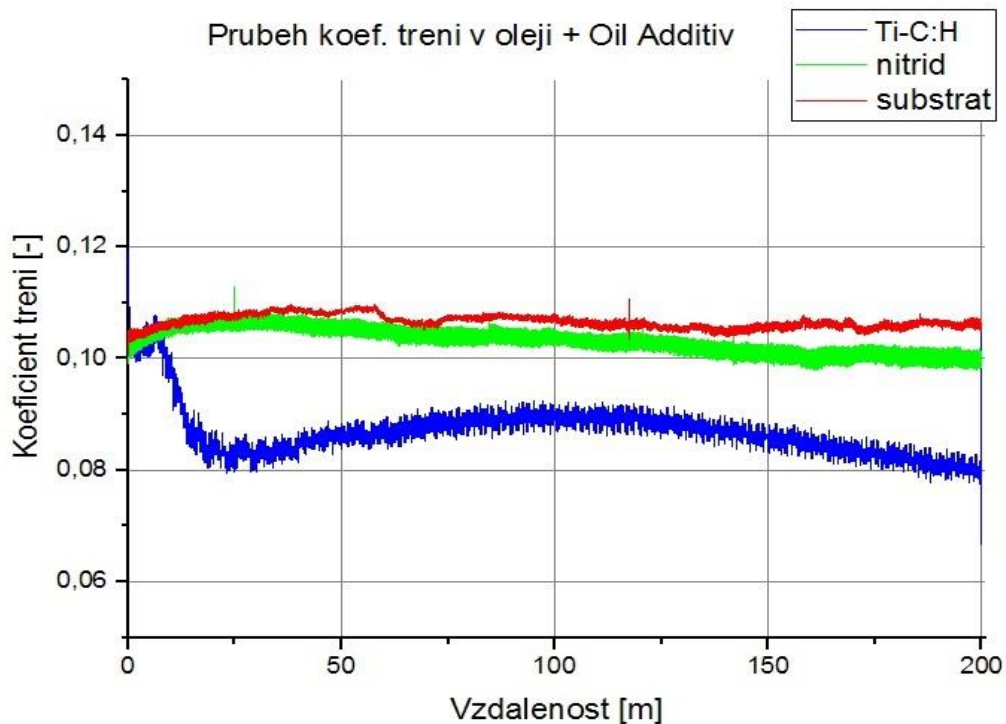
V průběhu měření koeficientu tření na substrátu bylo zaznamenáno mnoho otěrových částic, které zůstávaly v otěrové stopě a díky nimž je průběh koeficientu tření velmi roztřesený. Jeho průměrná hodnota z měření je o dvě setiny vyšší než u nitrídané destičky ($\mu = 0,725$). Po mírném ustálení záběhové fáze se ovšem velikost tření snížila pod úroveň koeficientu tření nitrídané vrstvy, rozdíl je ovšem malý, jak je možné vidět na grafu 1.



Graf 2: Průběh koeficientu tření v oleji

V oleji se koeficient tření, stejně jako opotřebení, snížil. Výrazně ke snížení došlo u nitrídané vrstvy a substrátu, kde průběh koeficientu tření po zaběhnutí je opět téměř totožný (průměrná hodnota u substrátu $\mu = 0,109$ a u nitrídané vrstvy $\mu = 0,108$).

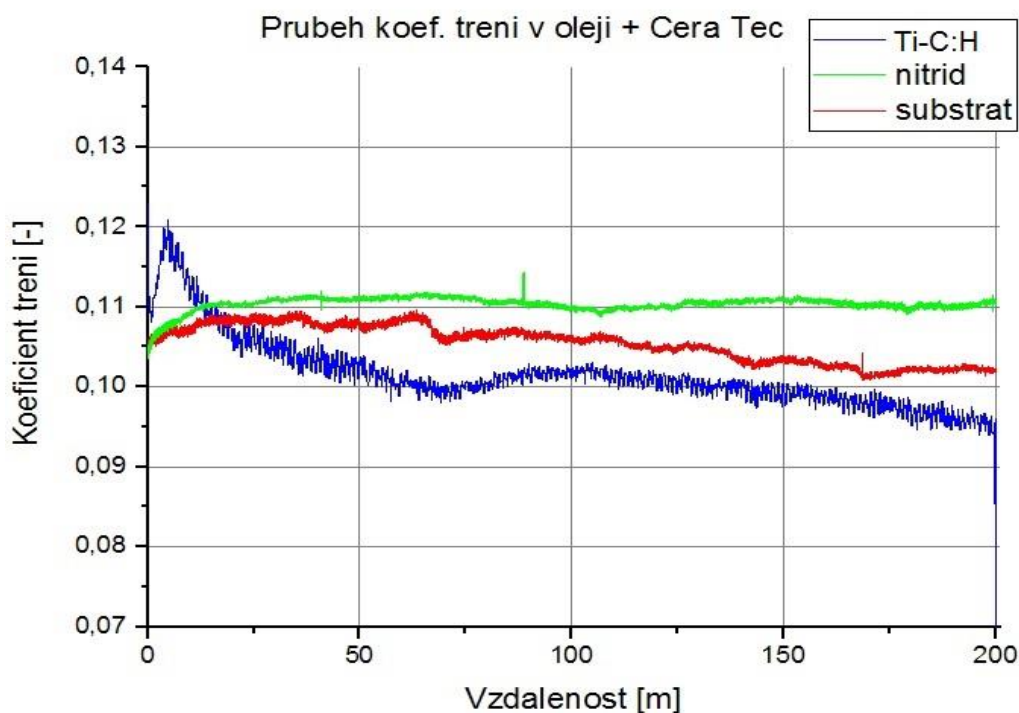
Snížil se také koeficient tření u Ti-C:H povlaku, který je ovšem o zhruba setinu vyšší ($\mu = 0,116$) než u ostatních povrchů, ale v průběhu měření postupně klesal a je možné, že by se vyrovnal nebo dokonce snížil pod hodnotu ostatních typů povrchu. Zda by k tomuto poklesu skutečně došlo, by se dalo zjistit dalším měřením, které by muselo trvat déle, respektive disk by musel urazit větší vzdálenost.



Graf 3: Průběh koeficientu tření v oleji + Oil Additiv

I po přidání přísady typu MoS_2 jsou stále hodnoty koeficientu tření vyjma Ti-C:H povlaku obdobně vysoké. Při porovnání prostředí oleje a oleje s Oil Additiv se průměrný koeficient tření téměř nezměnil (zde nitridovaná vrstva $\mu = 0,104$; substrát $\mu = 0,107$), ale změnil se charakter průběhu. V tomto případě byl průběh stabilnější než v případě předchozím. Kromě zvýšené stability průběhu μ se u těchto dvou povrchů při měření výrazný vliv přísady Oil Additiv neprojevil.

Co se týče Ti-C:H povlaku, jeho koeficient tření přidáním aditiva poklesl na průměrnou hodnotu $\mu = 0,083$. Tento pokles může být způsoben vytvořením chemické vrstvy mezi pinem a diskem, která by mohla způsobit i snížení opotřebení disku. Růst této vrstvy může být způsoben tribochemickými jevy, kdy se MoS_2 může teoreticky navázat k povrchu. I když nepatrně, tak na Ti-C:H povlaku aditivum zjevně funguje, ale k prokázání by bylo třeba udělat více tribologických testů.



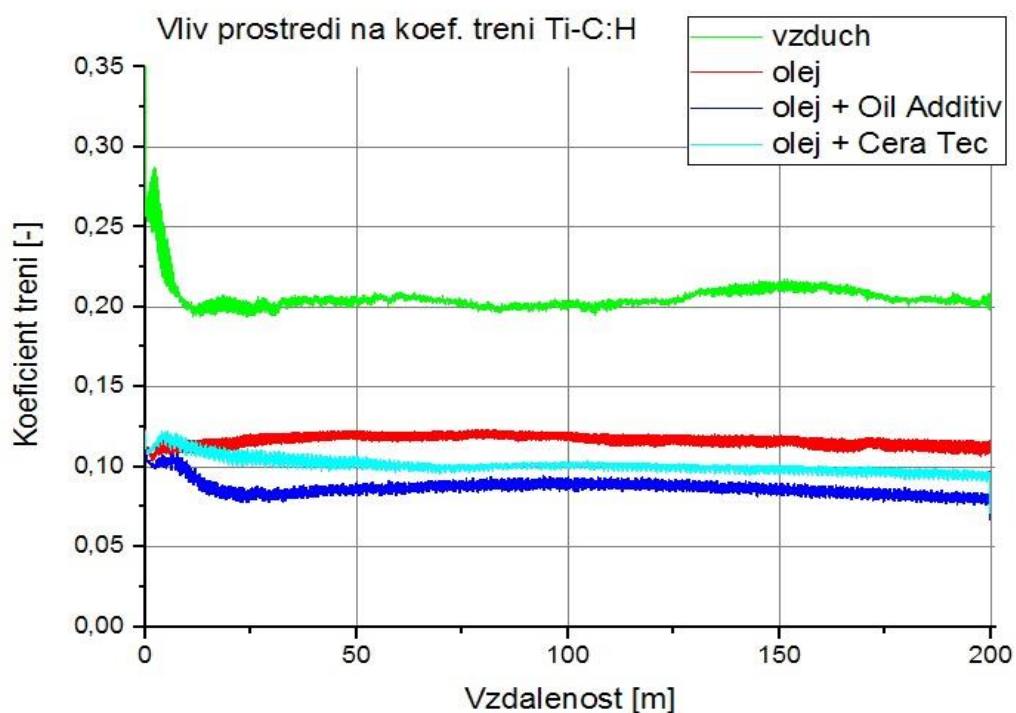
Graf 4: Průběh koeficientu tření v oleji + Cera Tec

Přidání přísady Cera Tec se na velikosti tření substrátu opět mění jen v řádu tisícín ($\mu = 0,105$), ale průběh není tak stabilní jako u druhé přísady. Vliv této přísady u tohoto povrchu ale také není patrný. V případě nitridované vrstvy zůstává koeficient tření také obdobný jako v případě tření v oleji či oleji s přísadou Oil Additiv ($\mu = 0,110$).

U Ti-C:H povlaku oproti přísadě s MoS_2 koeficient tření v tomto případě mírně vzrostl ($\mu = 0,096$), v průběhu měření ale mírně klesal. Je možné, že jak již bylo ukázáno u opotřebení, že se v průběhu měření keramické částice uchytily na povrchu povlaku a tím povrch následně chránily proti opotřebení a vzniklou menší plochou dotyku s pinem snižovaly tření. Je totiž patrné, že z počátku měření byl koeficient tření vyšší podobně jako v čistém oleji a po zaběhnutí (v tomto případě nejspíše uchycení částecek) začal zřejmě díky tomu klesat.

Koeficienty tření Ti-C:H povlaku v odlišném tribologickém prostředí

V předchozích grafech jsou sice vyneseny všechny průběhy koeficientu tření u všech povrchů, ale kvůli rozřídění hodnot do grafů dle prostředí není tolik patrný vliv aditiv na koeficient tření povlaku Ti-C:H. Pro přehlednost jsou tedy hodnoty koeficientu tření zobrazeny v grafu 5. Zde je již jasně patrné, že po přidání aditiv do oleje se tření nepatrně snížilo a průběhy v mazivu se stabilizovaly.



Graf 5: Průběhy koeficientu tření povlaku Ti-C:H v různých tribologických prostředích

Závěr

Tribologie je velice obsáhlá vědní disciplína, která zasahuje do všech oblastí života a pro současný průmysl je jednou z klíčových rolí, jak snížit ztráty a tím i náklady způsobené třením a opotřebením. Během posledních let je ke snižování těchto parametrů využíváno také moderních materiálů, jako jsou povlaky typu DLC. Tyto materiály se dnes využívají také v automobilovém průmyslu a lze očekávat jejich širší rozvoj například i v motorové oblasti, kde se nyní využívají ke snížení tření a opotřebením hlavně nejrozličnější typy olejových maziv. Do motorových olejů jsou dnes již standardně v různém množství přidávána aditiva přímo výrobcem olejů. Na trhu lze ale také sehnat dodatečné přísady do olejů, které by také měly dva hlavní tribologické parametry snižovat. Jejich účinek není však jednoznačně prokázán.

V této práci bylo cílem ověřit vliv těchto aditiv hlavně na moderní materiál typu DLC, zde konkrétně titanem dopované DLC, které se označuje Ti-C:H. Pro porovnání vlivu byly připraveny ještě dva odlišné povrchy – nitridovaná vrstva a základní materiál použitý jako substrát pro Ti-C:H povlak. U základního materiálu a nitridované vrstvy, se výrazný vliv aditiv z provedených testů neprokázal a obyčejný motorový olej vykazoval velmi obdobné vlastnosti jako daná aditiva. Jediným rozdílem oproti čistému oleji bylo zklidnění průběhu koeficientu tření, což by mohlo mít za účinek zklidnění chodu motoru. V případě Ti-C:H povlaku také došlo použitím přísad v oleji k mírnému zklidnění průběhu koeficientu tření. Tento koeficient se také u obou přísad snížil, i když jen o malou hodnotu (u Oil Additiv více, u Cera Tec o něco méně). Na opotřebení měla také větší vliv přísada Oil Additiv, kdy nedošlo téměř k žádnému otěru. U přísady Cera Tec docházelo zřejmě uchycování mikro keramických částic na povrchu povlaku a posuvem pinu po těchto částicích se snížilo též opotřebení vlastního povlaku. U všech aditiv, ať už se jedná o aditiva přímo v olejích nebo přídavná aditiva, je možné vytváření chemických vazeb s různými povrchy či tvoření mazacího filmu mezi kontaktními povrchy. Tyto vazby či filmy mohou následně ovlivňovat jak průběh koeficientu tření, tak i velikost opotřebením.

Mírný vliv přídavných aditiv byl tímto experimentem prokázán, ovšem je otázkou, jak by dopadlo například delší měření nebo jak by se projevilo zlepšení při více měřeních. Důležité by také bylo porovnat jejich vliv při zatížení a podmínkách, které by odpovídaly více reálné aplikaci.

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Vyobrazení mazání ze starého Egypta</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 2: Schématické zobrazení jednotlivých principů opotřebení</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3: Typy tření - 1 - mezní tření, 2 - smíšené tření, 3 - kapalinové tření</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4: Hydrostatické (vlevo) a hydrodynamické tření a mazání</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5: Stribeckova křivka</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6: Vliv zatížení na průběh Stribeckovy křivky</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7: Vliv viskozity na koeficient tření</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 8: Vliv drsnosti povrchu na průběh koeficientu tření</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9: Schéma metody pin-on-disk</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 10: Schéma metody ball-on-flat</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 11: Fotografie částečné struktury typu LST</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 12: Porušení adheze povlaku k substrátu při zatížení 55 N</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13: Výsledek provedeného kalotestu s poloměry jednotlivých vrstev tělíska</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 14: Stopa na Ti-C:H v oleji + MoS₂.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 15: Stopa na Ti-C:H v oleji + Cera Tec a viditelnost keramických částic</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 16: Detail keramických částic uchycených na povrchu povlaku Ti-C:H.....</i>	<i>35</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Chemické složení kuličky – ocel 1.2067</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2: Chemické složení substrátu - ocel 1.2379</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3: Šířky stop po kuličce na jednotlivých površích</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 4: Velikost opotřebení a míry opotřebení jednotlivých povrchů disků</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5: Velikost opotřebení pinu</i>	<i>37</i>

Seznam grafů

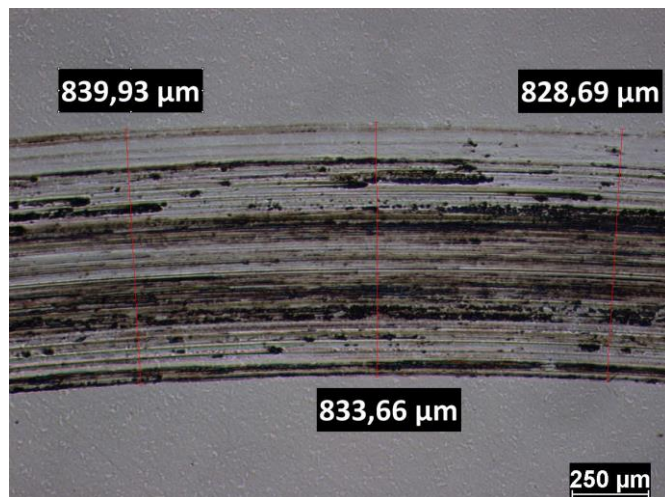
<i>Graf 1: Průběh koeficientu tření na vzduchu.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 2: Průběh koeficientu tření v oleji.....</i>	<i>39</i>
<i>Graf 3: Průběh koeficientu tření v oleji + Oil Additiv</i>	<i>40</i>
<i>Graf 4: Průběh koeficientu tření v oleji + Cera Tec</i>	<i>41</i>
<i>Graf 5: Průběhy koeficientu tření povlaku Ti-C:H v různých tribologických prostředích..</i>	<i>42</i>

Použitá literatura a zdroje

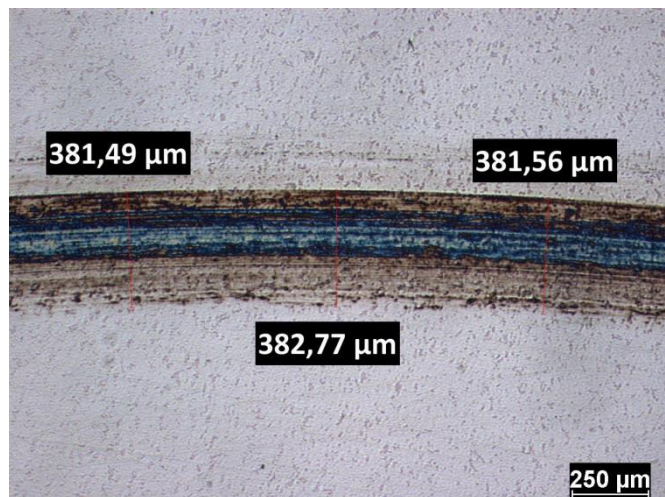
- [1] CZICHOS, Horst. *Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear*. New York: distributors for the U.S. and Canada, Elsevier North Holland, 1978, xiii, 400 s. ISBN 04-444-1676-5.
- [2] MOORE, Desmond F. *Principles and applications of tribology*. New York: Pergamon Press, xii, 388 s. ISBN 00-801-7902-9.
- [3] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 212 s. ISBN 80-01-01621-8.
- [4] ŠTĚPINA, Václav, VESELÝ Václav. *Maziva v tribologii*. Bratislava. Vydavatelství Slovenské akademie věd, 1985, 408 s.
- [5] WOYDT, Mathias a Rolf WÄSCHE. *The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens*. *Wear*. 2010, vol. 268, 11-12, s. 1542-1546. DOI: 10.3403/30247438.
- [6] KALIN, M., I. VELKAVRH, Rolf WÄSCHE a Mathias WOYDT. *Non-conventional inverse-Stribeck-curve behaviour and other characteristics of DLC coatings in all lubrication regimes*. *Wear*. 2013, vol. 297, 1-2, s. 1998-2005. DOI: 10.1007/978-3-642-22647-2_274.
- [7] KRÍŽ, A.; HÁJEK, J. *Tribologická analýza „PIN-on-DISC“*. 2005. *Metal 2005*. 7 s. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_05/papers/70.pdf
- [8] PEŠEK, M. *Snižování tření a opotřebení u spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=525
- [9] BALOUNOVÁ, H. *Studium tření náhrad kyčelního kloubu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Vrbka, Ph.D.
- [10] TATÍČEK, J. *Konstrukce tribometru pro studium vlivu opotřebení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Omasta.
- [11] Příručka pro údržbu ložisek firmy SKF, Mazání, s. 204-207. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.spssol.cz/~vyuka/TRIDY/3.C/CAD/3%C2%B0P%C5%98EVODOVKA/LO%C5%BDISKA%20SKF/Prirucka%20SKF%20pro%20udrzbu%20lozisek_vysoke%20rozliseni/20.%20Mazani.pdf
- [12] Prezentace firmy Bruker, SHAFFER, *Tribology 101 – Introduction to the Basics of Tribology*. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Tribology_101_Webinar-1_Intro_and_Basics_29-Jan-2013.pdf
- [13] Stanovisko Evropského hospodářského a sociálního výboru ke sdělení Komise: Směrem k evropské strategii pro nanotechnologie, publikováno v úředním věstníku EU 28.6.2005, odst. 7.1.1. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2005:157:0022:0033:CS:PDF>

- [14] DUANJIE Li. *Continuous Stribeck Curve Measurement Using Pin-on-Disk Tribometer*. Měření firmy NANOVEA pro prezentaci tribometru, 2013. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z <http://www.nanovea.com/Application%20Notes/stribeckcurvetribology.pdf>
- [15] JOSKA, L., J. FOJT a H. MORAVEC. *Korozní vlastnosti DLC vrstev legovaných zirkoniem / Corrosion properties of DLC layers alloyed with zirconium*. *Koroze a ochrana materiálu*. 2013, vol. 57, issue 1. DOI: 10.2478/v10227-011-0022-7.
- [16] Výukový materiál Technické univerzity Liberec. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
- [17] Odborný článek na webu časopisu MM Průmyslové spektrum, *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>
- [18] Obrázek 5. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.synlube.com/SynLube_Magic2.htm
- [19] Obrázek 9. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z <http://triblab.teipir.gr/images/pinondisk.png>
- [20] Obrázek 10. [online]. [cit. 2014-12-19]. Dostupný z http://www.nature.com/nature/journal/v387/n6635/fig_tab/387791a0_F1.html

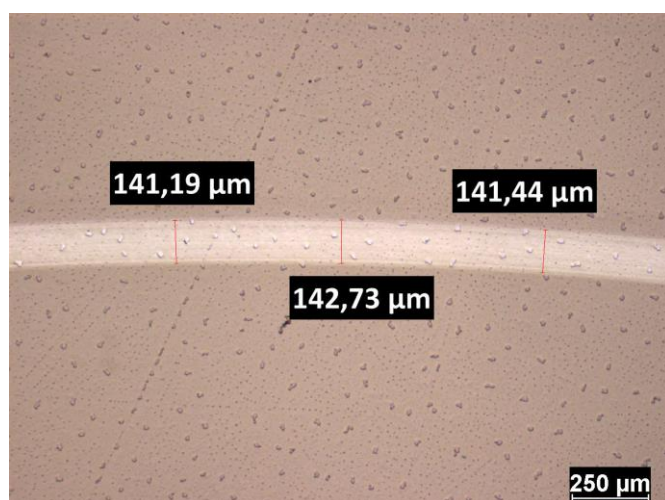
Přílohy



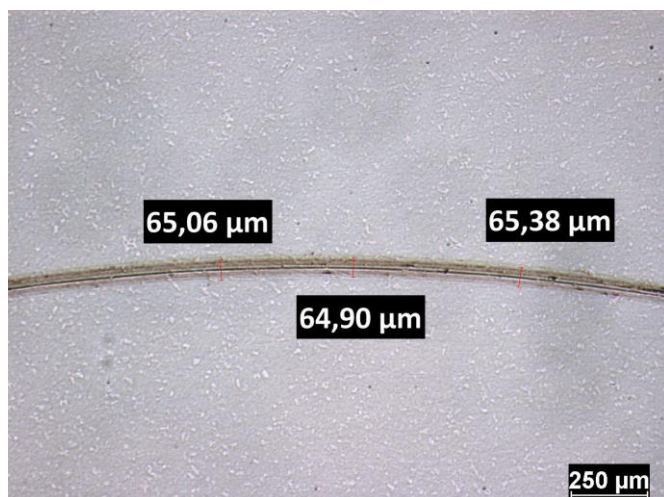
Obrázek P 1: Stopa na substrátu po zkoušce na vzduchu



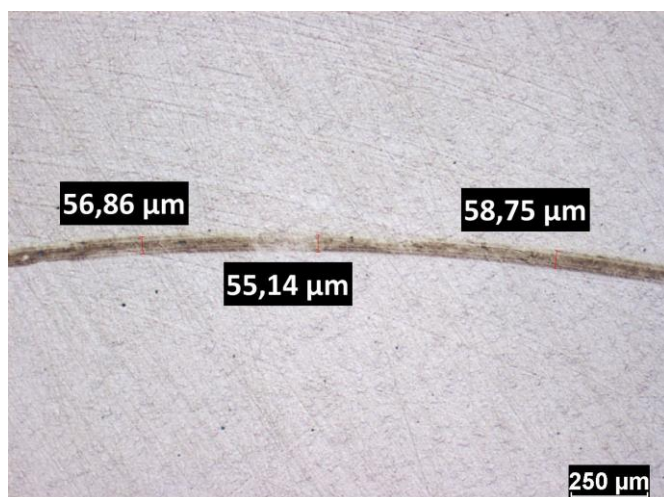
Obrázek P 2: Stopa na nitridované vrstvě po zkoušce na vzduchu



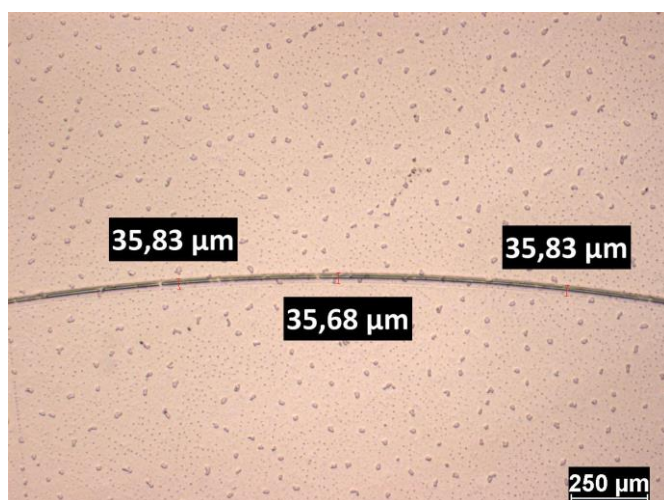
Obrázek P 3: Stopa na DLC povlaku po zkoušce na vzduchu



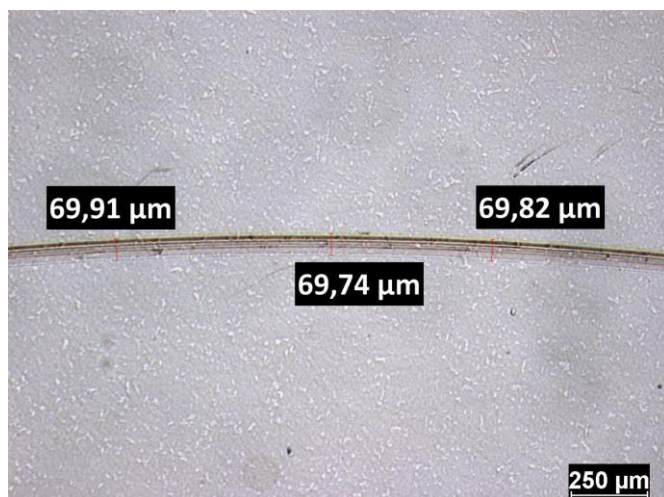
Obrázek P 4: Stopa na substrátu po zkoušce v čistém oleji



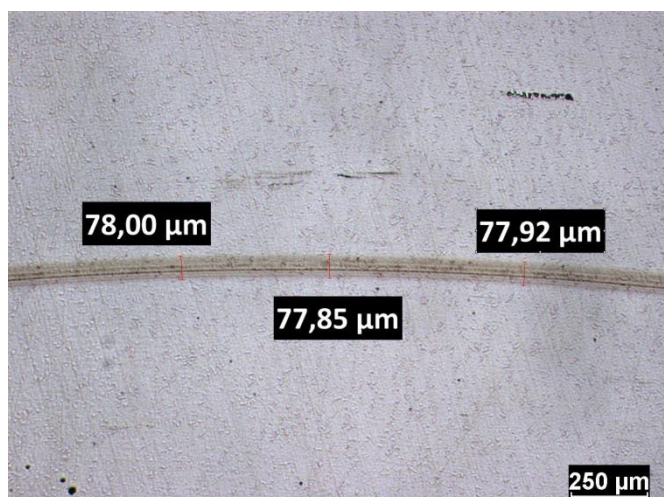
Obrázek P 5: Stopa na nitridované vrstvě po zkoušce v čistém oleji



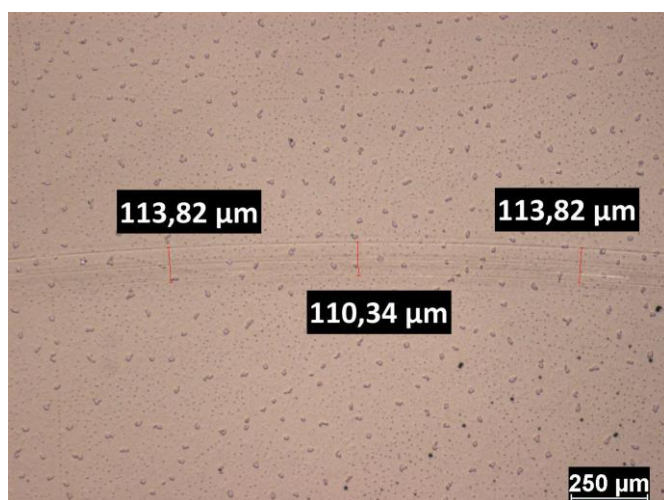
Obrázek P 6: Stopa na DLC povlaku po zkoušce v čistém oleji



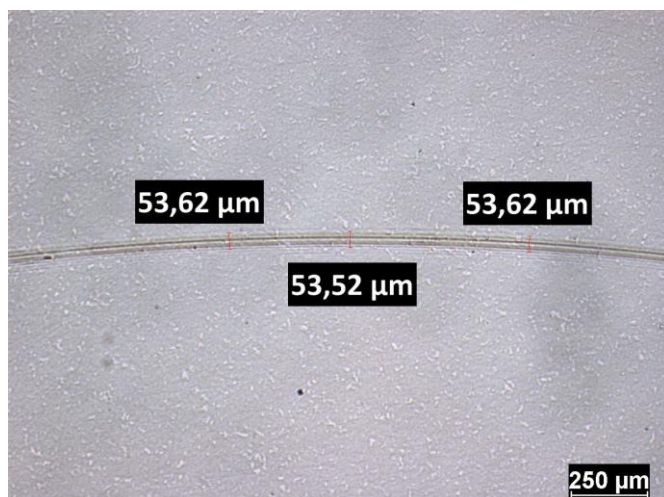
Obrázek P 7: Stopa na substrátu po zkoušce v oleji + Oil Additiv



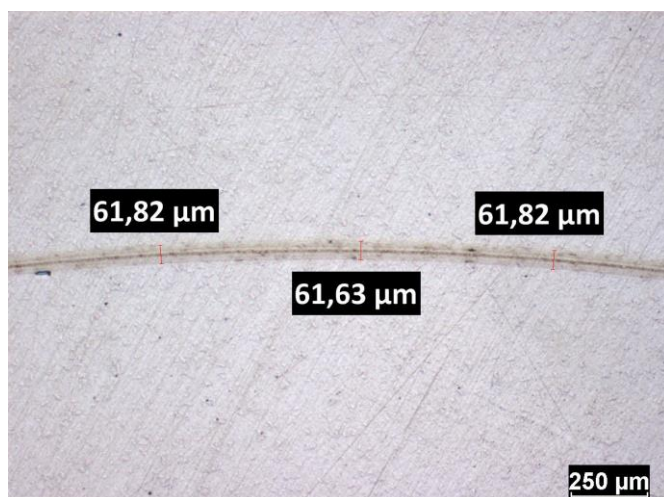
Obrázek P 8: Stopa na nitridované vrstvě po zkoušce v oleji + Oil Additiv



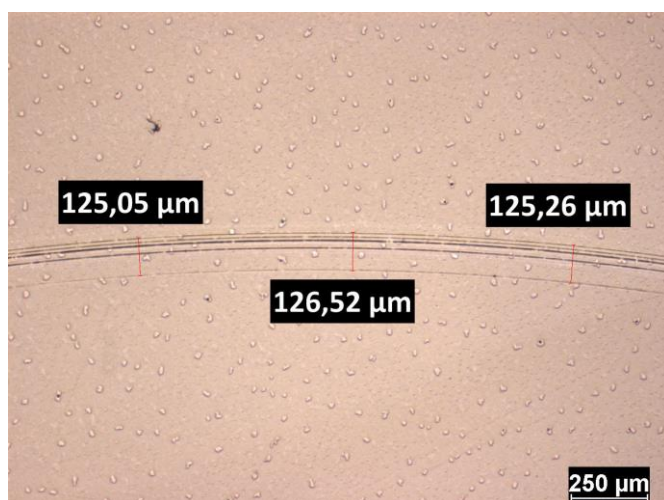
Obrázek P 9: Stopa na DLC povlaku po zkoušce v oleji + Oil Additiv



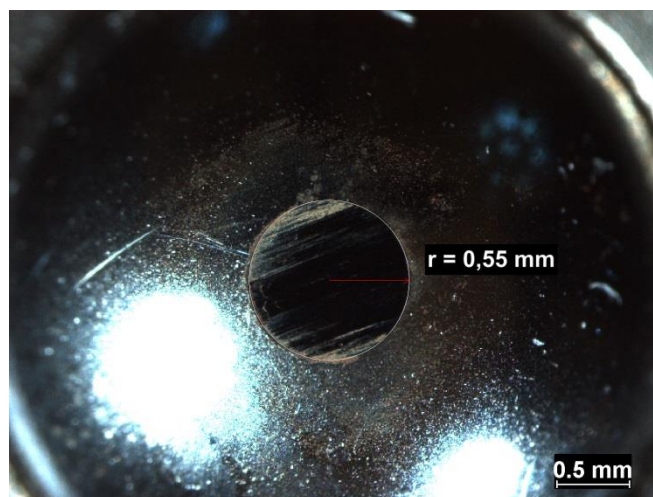
Obrázek P 10: Stopa na substrátu po zkoušce v oleji + Cera Tec



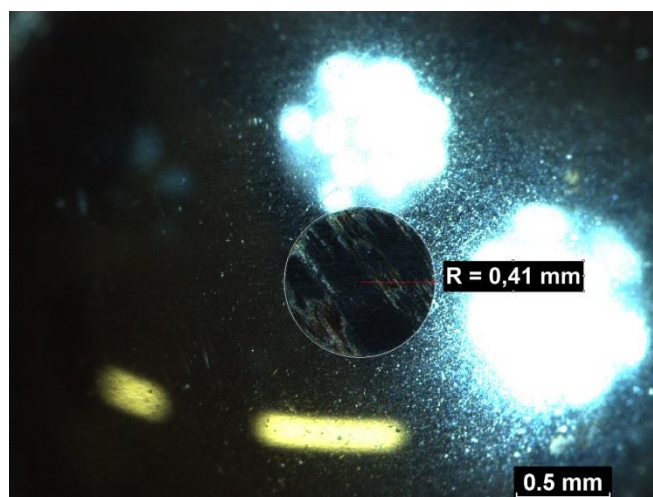
Obrázek P 11: Stopa na nitridované vrstvě po zkoušce v oleji + Cera Tec



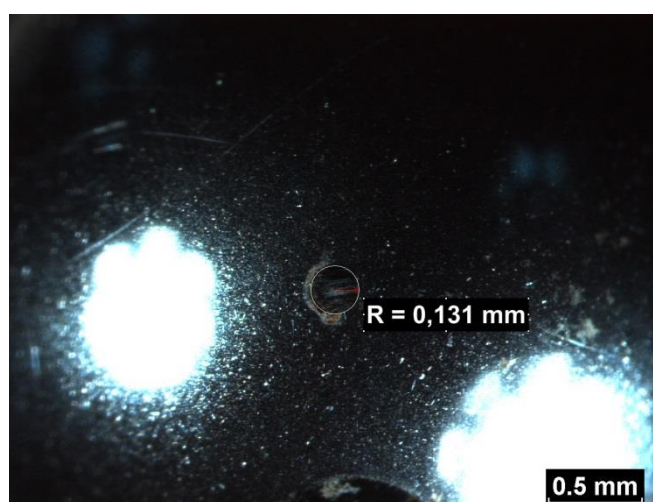
Obrázek P 12: Stopa na DLC povlaku po zkoušce v oleji + Cera Tec



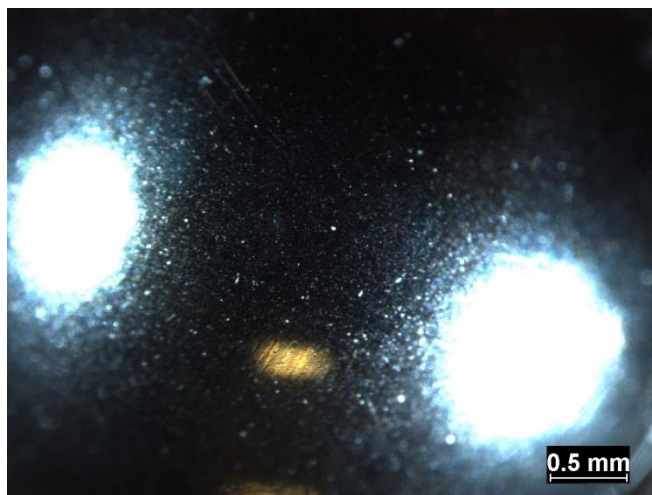
Obrázek P 13: Otěr na kuličce po kontaktu se substrátem na vzduchu



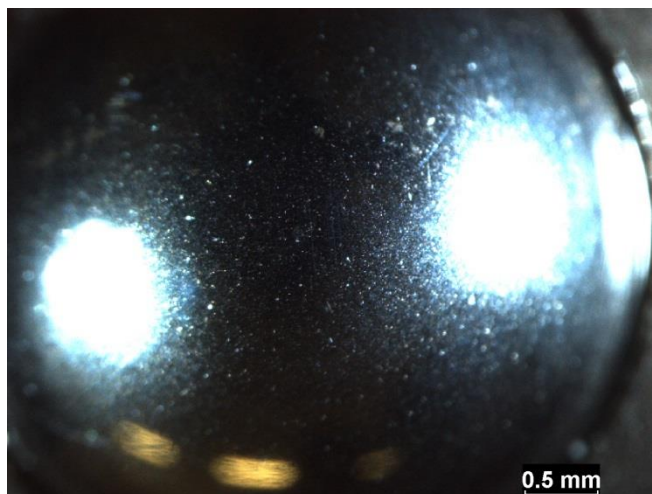
Obrázek P 14: Otěr na kuličce po kontaktu s nitridovanou vrstvou na vzduchu



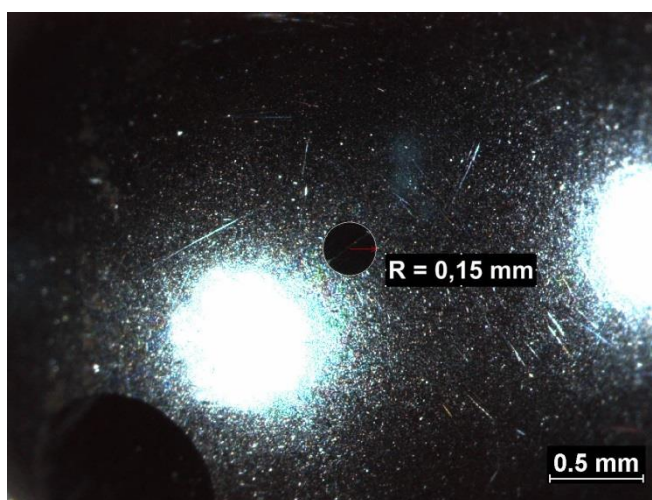
Obrázek P 15: Otěr na kuličce po kontaktu s DLC povlakem na vzduchu



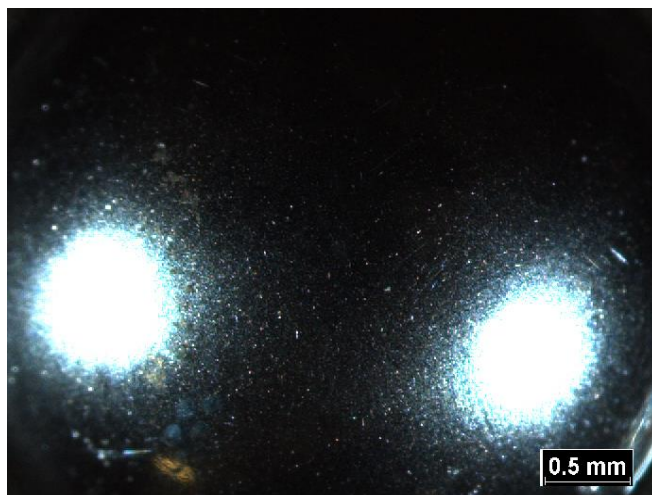
Obrázek P 16: Snímek kuličky po kontaktu se substrátem v oleji



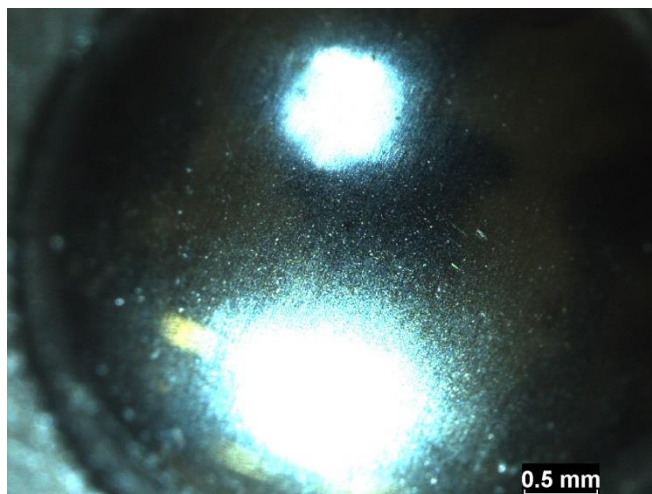
Obrázek P 17: Snímek kuličky po kontaktu s nitridovanou vrstvou v oleji



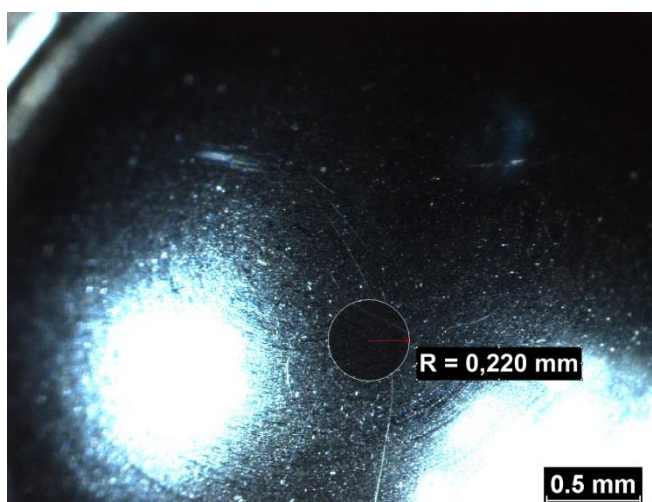
Obrázek P 18: Otěr na kuličce po kontaktu s DLC povlakem v oleji



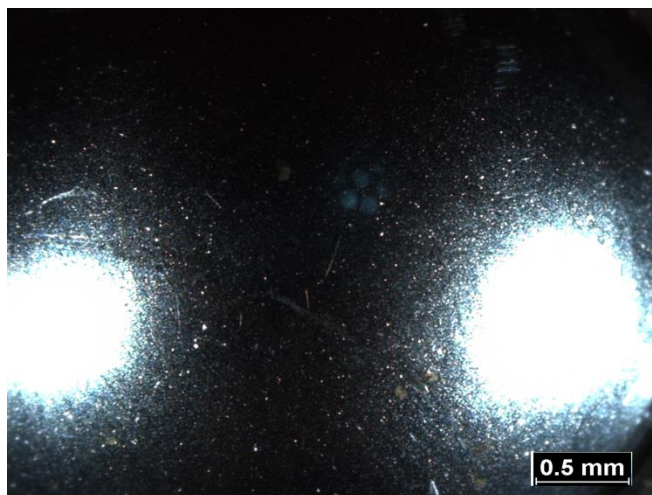
Obrázek P 19: Snímek kuličky po kontaktu se substrátem v oleji + Oil Additiv



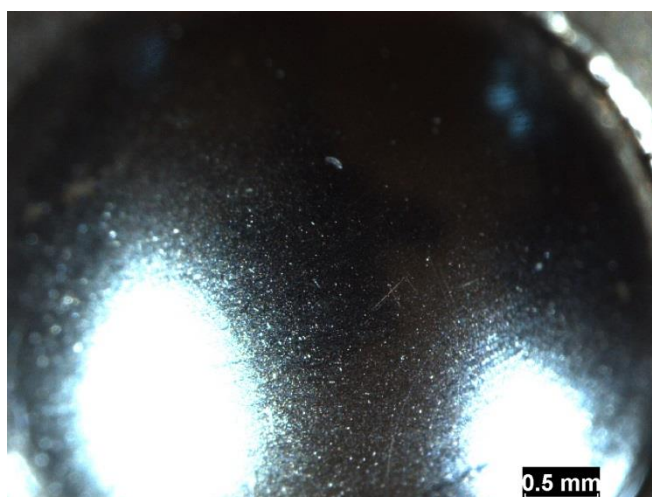
Obrázek P 20: Snímek kuličky po kontaktu s nitridovanou vrstvou v oleji + Oil Additiv



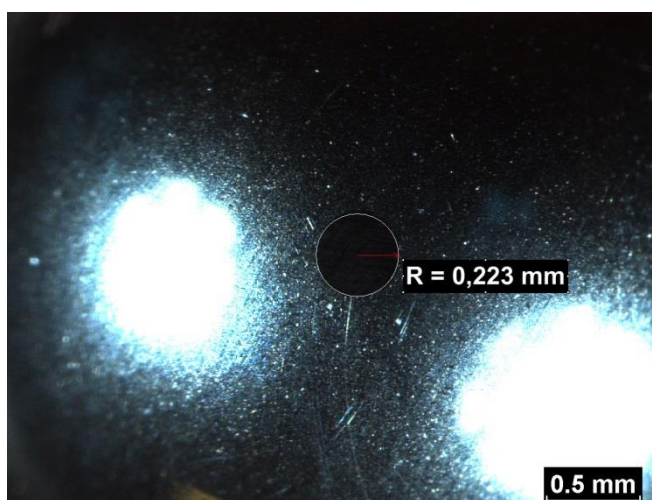
Obrázek P 21: Otěr na kuličce po kontaktu s DLC povlakem v oleji + Oil Additiv



Obrázek P 22: Snímek kuličky po kontaktu se substrátem v oleji + Cera Tec



Obrázek P 23: Snímek kuličky po kontaktu s nitridovanou vrstvou v oleji + Cera Tec



Obrázek P 24: Otěr na kuličce po kontaktu s DLC povlakem v oleji + Cera Tec