

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Povlaky pro snížení tření a otěru v automobilových aplikacích
Coatings to reduce friction and wear in automotive applications

AUTOR: Matěj Buřil

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

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

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Buřil** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **439127**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Povlaky pro snížení tření a otěru v automobilových aplikacích

Název bakalářské práce anglicky:

Coatings to reduce friction and wear in automotive applications

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Bude navržen modifikovaný DLC povlak s cílem zlepšit schopnost vázat olejová aditiva na povrchu zdvihátek. Testovány budou tribologické vlastnosti modifikovaného povlaku v prostředí olejů použitých v reálném motoru.

Postup:

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

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] DOBRENIZKI, L., S. TREMMEL, S. WARTZACK, et al. Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings - Influence of engine oil, temperature and camshaft speed. Surface and Coatings Technology [online]. 2016, 308, 360-373 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.09.041. ISSN 02578972.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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


Ing. Zdeněk Tolde, ústav materiálového inženýrství FS


Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

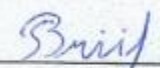

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma Povlaky pro snížení tření a otěru v automobilových průmyslových aplikacích 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 27, července 2107



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 panu Pavlovi Sachrovi za pomoc v laboratoři a za naměřenou nanotvrdot.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá snižováním koeficientu tření a opotřebením v motorových částech automobilů. V teoretické části se věnuje porovnání tribologických vlastností DLC povlaků a DLC povlaků dopovaných kovem. Dále zkoumá jejich mechanické vlastnosti jako je adheze, tvrdost a drsnost. V praktické části byla použita vrstva na bázi TiNb-DLC. Následně byla tato vrstva otestována na tribometru metodou pin-on disk v prostředí motorového oleje a porovnána s referenčním povlakem DLC.

Klíčová slova

Tribologie v olejích; DLC; TiNb-DLC; Zdvihátko; Koeficient tření

Abstract

The bachelor thesis deals with the reduction of coefficient of friction and wear in motor parts of automobiles. The theoretical part deals with the comparison of the tribological properties of DLC coatings and metal doped DLC coatings. It further examines their mechanical properties such as adhesion, hardness and roughness. The TiNb-DLC-based layer was used in the practical part. Subsequently, this layer was tested on the tribometer by the pin-on disk method in the engine oil environment and compared to the DLC reference coating.

Keywords

Oil Tribology; DLC; TiNb-DLC; Tappet; Coefficient of friction

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Tribologické vlastnosti DLC povlaků	9
2.1 Kinematika zdvihátka	9
2.2 Opotřebení a mazání vačkových mechanismů.....	11
2.2.1 Pitting.....	11
2.2.2 Polish wear	12
2.2.3 Scuffing.....	13
2.2.4 Teorie elastohydrodynamického mazání.....	13
2.3 DLC povlaky	14
2.4 Koeficient tření dopovaných DLC bez použití oleje	15
2.5 Koeficient tření DLC povlaků v olejích	16
2.6 Opotřebení dopovaných DLC bez použití olejů	22
2.7 Opotřebení DLC povlaků v olejích.....	23
2.8 Opotřebení funkčních ploch	24
2.9 Adheze a tvrdost Me-DLC povlaku.....	26
3 Praktická část.....	28
3.1 Příprava vzorků.....	28
3.2 Vyhodnocení povrchu zdvihátka.....	29
3.3 Mechanické vlastnosti TiNb-DLC a DLC.....	31
3.4 Tribologie povlaku TiNb-DLC.....	36
3.4.1 Koeficient tření.....	36
3.4.2 Opotřebení kuličky	37
4 Závěr	39
Seznam obrázků.....	40
Seznam literatury	42
Přílohy	46

Seznam zkratek

Zkratka	Význam zkratky	Překlad
AW	Anti-wear	Proti opotřebení
DLC	Diamond like carbon	Diamantu podobný uhlík
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy	Energiově Disperzní Spektroskopie
EP	Extreme pressure	Extrémní tlak
FM	Friction modifier	Modifikátor tření
GMO	Glycerol monooleate	Glycerol monooleát
MoDTC	Molybdenum dialkyl dithiocarbamate	Molybden-dialkyl-dithiokarbamát
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition	Chemická depozice vrstev za asistence plazmatu
PAO	Polyalphaolefin	Polyalfaolefin
RTG	Radioisotope Thermoelectric Generator	Radioizotopový termoelektrický generátor
ZDDP	Zinc dialkyl dithiophosphate	Dialkyldithiofosfát zinečnatý

1 Úvod

Povlaky DLC se stále více používají pro snížení tření a prodloužení životnosti vysoce namáhaných součástí spalovacích motorů. Ventilové vedení je jedním z klíčových systémů spalovacího motoru. Přispívá ke ztrátám způsobeným třením, a to zejména za zhoršených podmínek mazání při nižších rychlostech vačkového hřídele. Nízké rychlosti vačkového hřídele zapříčiňují 40 % z celkových ztrát ve spalovacím motoru, důsledkem vzniku neúplné mazacího filmu [1]. Výkon amorfnní uhlíkové vrstvy silně závisí na interakci mezi zdvihátkem, vačkou a mazivem. V tomto ohledu nabízí kontakt mezi zdvihátkem a vačkovým hřídelem vysoký potenciál pro snížení tření. Velmi složitá kinematika a opakující se zatížení klade vysoké nároky na DLC povlak.

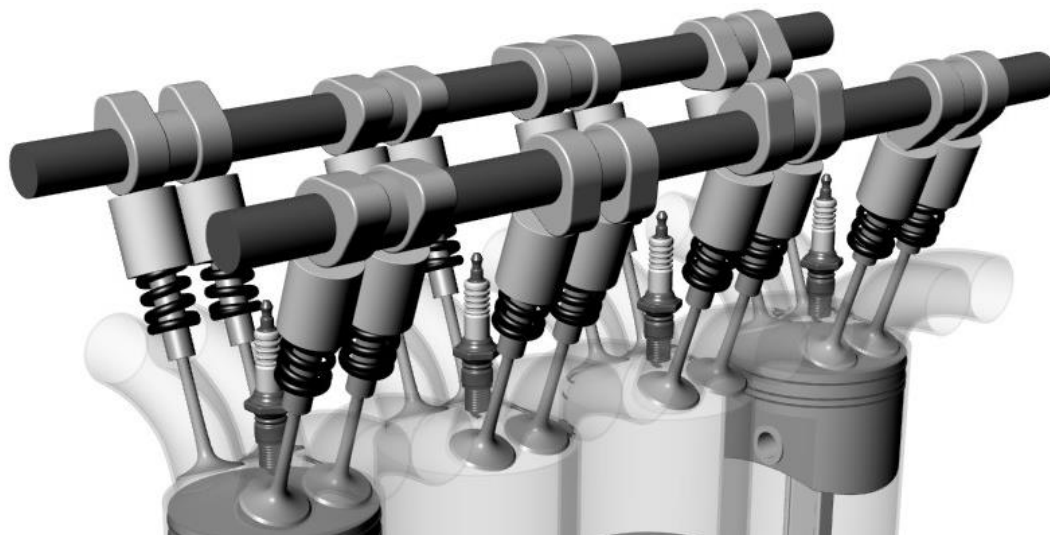
Cílem této práce bude modifikovat DLC vrstvu tak, aby se změnila její inertní povaha a dokázala na sebe vázat aditiva v olejích a tím ještě více snížit tření. Veškeré tyto parametry budou vyvíjeny pro použití ve studentské formuli CarTech.

2 Tribologické vlastnosti DLC povlaků

2.1 Kinematika zdvihátka

Výměna obsahu válce musí probíhat velice rychle, ventil se musí otevírat s poměrně velkým zrychlením, ovšem toto zrychlení nesmí být příliš velké, aby nedocházelo k velkým setrvačným silám a rázům.

Za kinematické veličiny zdvihátka považujeme zdvih, rychlost (první derivace zdvihu) a zrychlení (druhá derivace zdvihu). Veškeré tyto veličiny jsou nejvíce závislé na tvaru a rychlosti otáčení váčkového hřídele, ovšem záleží i na tom s čím je vačka v kontaktu. V našem případě se bude jednat o ploché kalíškové zdvihátko. Jeho pohyb je závislý na úhlu natočení vačky. Průběh kinematických veličin zdvihátka bude důležitý pro pozdější návržení velikosti zkušebních parametrů.



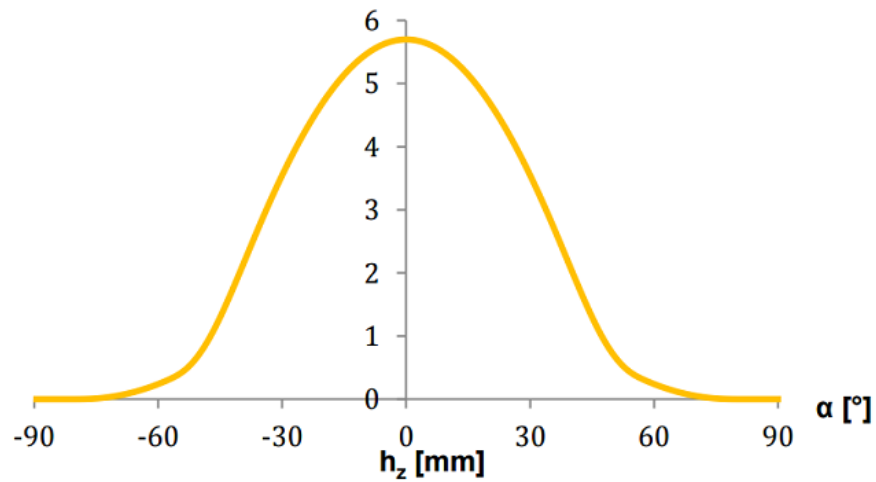
Obrázek 1 Vačkový mechanismus [1]

Vačka má takový tvar, aby v oblasti náběhu byla rychlost zdvihu co možná nejmenší. Díky tomu nedochází při otevírání k velkým rázům, které by měli za důsledek negativní vliv na DLC povlak. Tvar vačky určuje průběh výměny

obsahu válce. Typické závislosti úhlu natočení vačky na zdvih, rychlost a zrychlení je znázorněn na následujících obrázcích [2] [3] [4].

Průběh zdvihu zdvihátka

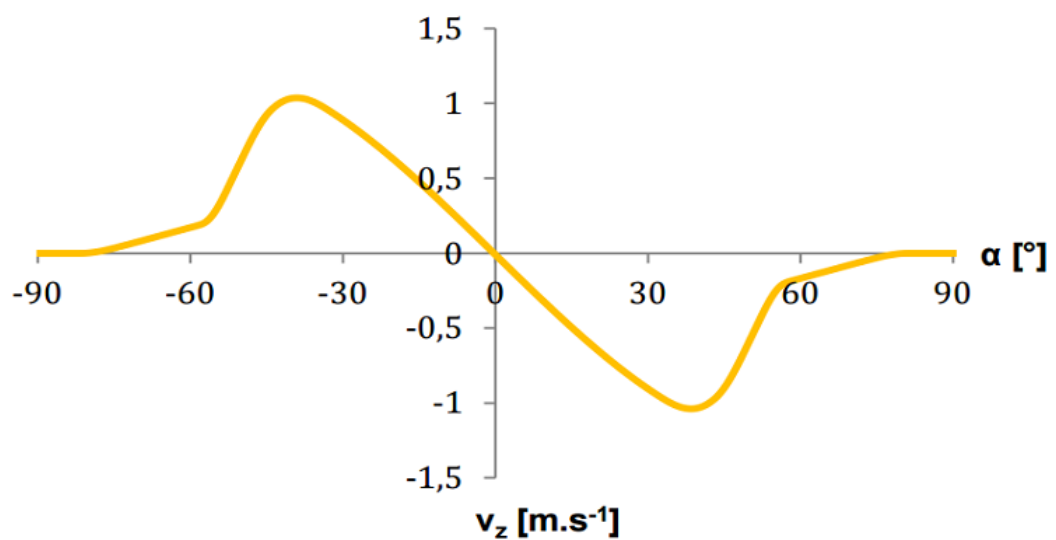
$$\dot{y} = y' \omega$$



Obrázek 2 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na zdvihu [3]

Průběh rychlosti zdvihátka

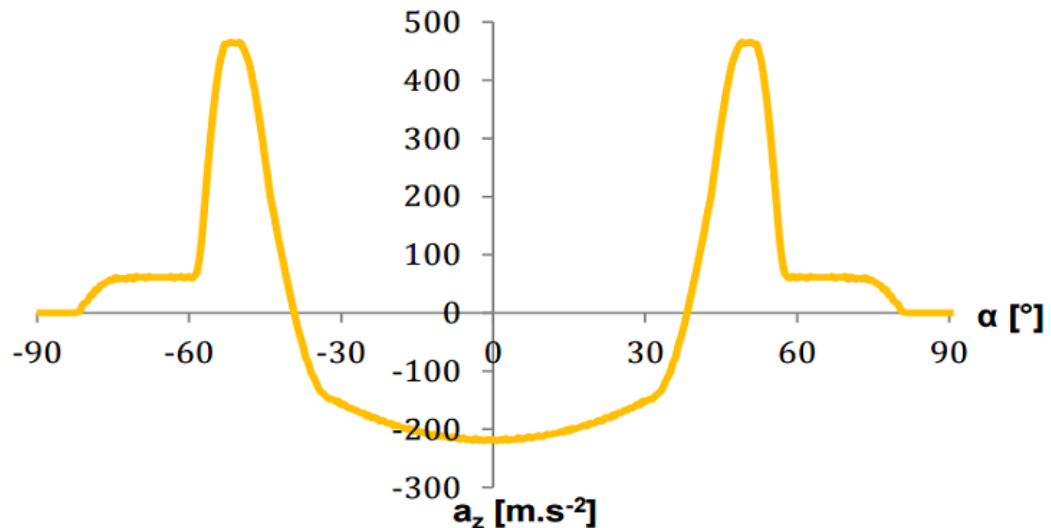
$$\ddot{y} = y'' \omega^2$$



Obrázek 3 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na rychlosti [3]

Průběh zrychlení zdvihátka

$$\ddot{y} = y'''\omega^3$$



Obrázek 4 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na zrychlení [3]

2.2 Opotřebení a mazání vačkových mechanismů

Tři hlavní formy opotřebení mezi vačkou a zdvihátkem jsou pitting, polish wear a scuffing. Pitting je způsoben nadměrným cyklicky se opakujícím kontaktním tlakem mezi vačkou a zdvihátkem. Polish wear je fáze opotřebení vyskytující se mezi pittingem a scuffingem. Scuffing je opotřebení, které vzniká u vysoce zatížených stykových ploch, které se po sobě smýkají a současně jsou nedostatečně mazané. Styk vačky se zdvihátkem patří do skupiny nekonformních povrchů, kde se uplatňuje teorie elastohydrodynamického mazání (EHD). K těmto druhům opotřebení může dojít jak na zdvihátku, tak i na vačce [5] [6].

2.2.1 Pitting

Jedná se o porušení plochy, projevující se vylamováním malých částí z povrchu zdvihátka. Vzniká přítomností vad na povrchu, které mají podobu rýh.

Vady na povrchu jsou koncentrátoři napětí, ze kterých se nadále může začít šířit trhlina do hloubky materiálu. Pokud trhlina dosáhne kritické hloubky, náhle se otočí směrem k povrchu a dojde k vytržení kusu zdvihátka, vznikají viditelné důlky. Tato chyba je primárně zapříčiněna překročení mezního kontaktního tlaku. Vysoký namáhání urychluje únavový charakter materiálu [6] [5].



Obrázek 5 Pitting [7]

2.2.2 Polish wear

Polish wear je obecný otěr na kontaktním povrchu. Za vhodných podmínek je otěr minimální, ale občas může dojít k velmi rychlému opotřebení, zvláště u kalených a tvrzených vaček v kontaktu s plochými zdvihátky. Často na první pohled neporušený povrch bude naznačovat, že je povrch lesklý a v dobrém stavu, ale rozměrové kontroly zjistí, že došlo k výraznému opotřebení [5] [6].



Obrázek 6 Polish wear [8]

2.2.3 Scuffing

Vzniká na vysoce zatěžovaných součástkách při vysokých rychlostech a nedostatečném mazání. Za těchto podmínek vzniká vrstva, která se ihned po vzniku trhá, a tím zhoršuje kvalitu povrchu. Obvykle je spojen se zabíháním nových součástí v motoru [9].



Obrázek 7 Scuffing [10]

2.2.4 Teorie elastohydrodynamického mazání

Přestože Newton již roku 1688 objasnil smykové napětí mezi vrstvami pohybující se tekutiny, samotný mechanismus kapalinového mazání byl postulován až na konci 19. století. Experimenty ukázali, že při dostatečné dodávce maziva jsou třecí povrchy válcovitých kluzných ložisek vzájemně odděleny tenkým filmem maziva. Nezávisí tedy na vlastnostech třecích povrchů, ale na hydrodynamickém působení maziva. Pohyb maziva ve spáře je možné považovat za laminární tok viskózní kapaliny. Roku 1886 byla publikována studie, ve které je na základě Navierových-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity odvozena rovnice popisující rozložení tlaku v klínové mezeře. Tato rovnice, označovaná jako Reynoldsova, je považována za základ teorie kapalinového mazání.

$$H_{min} = 4,9 \frac{U}{W_L}$$

Kde H_{min} je bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu, U je bezrozměrný parametr rychlosti a W_L je bezrozměrný parametr zatížení pro

liniový kontakt. Tato rovnice ovšem dávala v řadě případů podstatně menší tloušťky mazacího filmu, než byla aritmetická odchylka profilů. Následné výsledky studií ukázaly, že jsou-li vlivy elastické deformace třecích povrchů a změny viskozity maziva s tlakem uvažovány odděleně, nezpůsobují potřebný nárůst tloušťky mazacího filmu.

Teprve až Grubin publikoval roku 1949 první analytické řešení tloušťky mazacího filmu, které bralo v úvahu jak elastické deformace třecích povrchů, tak i závislost viskozity maziva na tlaku. Grubi odvodil rovnici, která umožňuje stanovit centrální tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu.

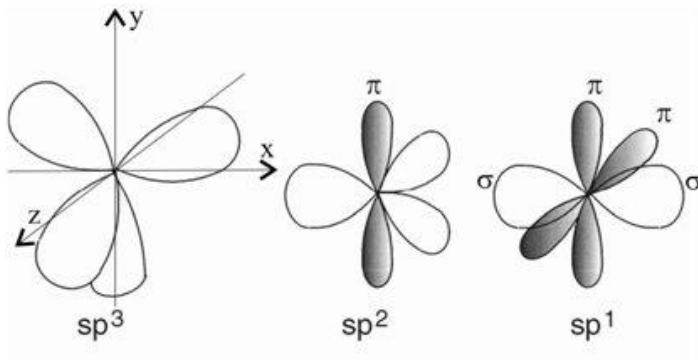
$$H_c = 1,95 \frac{U^{8/11} G^{8/11}}{W_L^{1/11}}$$

Kde H_c je bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu, G je bezrozměrný parametr materiálů zohledňující elastické vlastnosti obou třecích povrchů a viskozitně-tlakovou charakteristiku maziva. Druhá rovnice dává o jeden až dva řády vyšší hodnotu tloušťky mazacího filmu než první rovnice [11].

2.3 DLC povlaky

DLC je zkratkou z anglického „diamond like carbon“ (diamantu podobný uhlík). Jedná se o označení metastabilního stavu amorfního uhlíku, obsahujícího velký podíl zejména sp^3 vazeb. Tyto vrstvy vykazují velice příznivé tribologické vlastnosti, velkou tvrdost a chemickou netečnost. Proto mají tyto vrstvy rozsáhlé využití v automobilovém průmyslu. Uhlík může tvořit různé krystalické a neuspořádané struktury, je schopen existovat ve třech různých hybridních stavech sp^1 , sp^2 , sp^3 . V konfiguraci vazeb sp^1 , tvoří dva ze čtyř valenčních elektronů π vazbu ve směru osy x a zbylé dva tvoří σ vazbu ve směrech os y a z . V konfiguraci vazeb sp^2 tvoří tři ze čtyř valenčních elektronů σ vazby v jedné rovině a čtvrtý elektron tvoří π vazbu. V konfiguraci sp^3 jsou všechny valenční elektrony nasměřovány do čtyřstěnu, což vytváří velmi silné σ vazby k dalším atomům. Právě tyto silné σ vazby způsobují různé fyzikální vlastnosti, jako např. velmi vysokou tvrdost >80 GPa, odolnost proti plastické deformaci, vysokou tepelnou stabilitu [12]. DLC vrstvy lze dopovat různými prvky a měnit tak jejich chemické a fyzikální

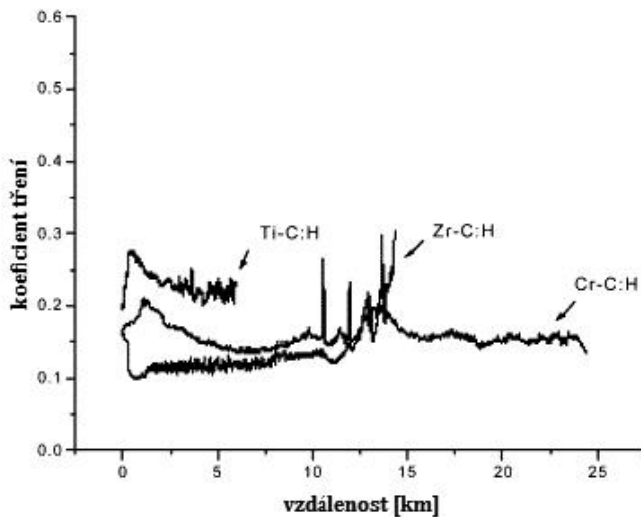
vlastnosti. Nejčastěji používanými prvky ke zlepšení tribologických vlastností jsou (Ti, Cr, Zr, W, Nb) [13].



Obrázek 8 vazby v DLC vrstvě [12]

2.4 Koeficient tření dopovaných DLC bez použití oleje

DLC vrstvy vykazují ve vakuu nebo prostředí inertního plynu velice nízký koeficient tření až 0,001 a rychlost opotřebení 10^{-10} - 10^{-11} mm³ / Nm. Takové výsledky jsou na vzduchu nedosažitelné, kyslík a relativní vlhkost může zvýšit koeficienty tření až na 0,1-0,3. Proto je snahou snížit jejich antioxidační schopnosti, a tedy odstranit tribologickou závislosti na okolním prostředí. Studie zaměřené na tyto problémy ukazují, že toho lze dosáhnout dopováním kovovými prvky (Ti, W, Ta, Si) [14]. Obrázek 9 porovnává třecí vlastnosti DLC povlaků dopovaných titanem, chromem a zirkoniem měřených v kontaktu s WC kuličkou při zatížení 10 N ve vzduchu o relativní vlhkosti 80%. Počáteční koeficient tření povlaku dopovaného Cr je 0,14, což je nižší než u dopovaného Ti (0,23) a Zr (0,21). Koeficient tření se následně u vrstvy Cr-DLC ustaluje na hodnotě 0,10 [15].



Obrázek 9 Závislost koeficientu tření na druhu dopování DLC vrstvy [15]

Tabulka 1 Průměrný koeficient tření dopovaných DLC povlaků [16]

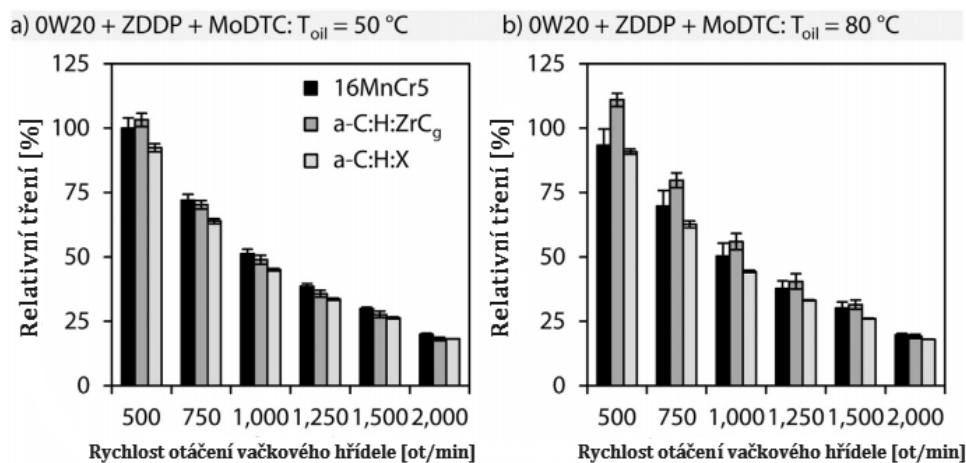
vrstva	koeficient tření μ
W-DLC	0,3
Nb-DLC	0,2
Ti-DLC	0,25

V tabulce jsou shrnuty koeficienty tření W-, Nb-, Ti-DLC povlaků. Všechna tyto měření byla provedena pomocí pin-on-disk tribometru s použitím saffrové kuličky při rychlosti 0,8 m/s v laboratorním prostředí s relativní vlhkostí 50-75 %. Tyto podmínky způsobují Hertzovo tření přibližně 2 GPa. Nejlepších tribologických vlastností dosahuje povlak dopovaný niobem s koeficientem tření pouhých $\mu=0,2$. Pokusy s použitím ocelové kuličky namísto saffrové vytvářejí stejný trend pro koeficienty tření [16].

2.5 Koeficient tření DLC povlaků v olejích

S cílem analyzovat průběh tření na zdvihátku byl proveden test závislosti koeficientu tření na rychlosti otáčení vačkového hřídele. Rychlost vačkového hřídele se pohybovala v rozmezí od 500 do 2000 otáček za minutu. Průběh tření získaného z testu je prezentován jako relativní tření [%] ve srovnání s nepovlakovanými zdvihátky z oceli 16MnCr5. K mazání stykové plochy byl použit minerální olej 0W20 obsahující dialkyldithiofosfát zinečnatý a molybden-dialkyl-

dithiokarbamát (ZDDP, MoDTC), v porovnání se syntetickým olejem polyalfaolefinem obsahujícího dialkyldithiofosfát zinečnatý a glycerol monooleát (PAO + ZDDP + GMO) obsahujícím aditiva proti opotřebení a extrémnímu tlaku. (AW, EP) přísady ZDDP a modifikátor tření (FM) GMO. Tento test byl proveden při dvou teplotách motorového oleje, a to při 50°C a 80°C. Výsledky experimentu jsou znázorněny na obrázku č. 10.

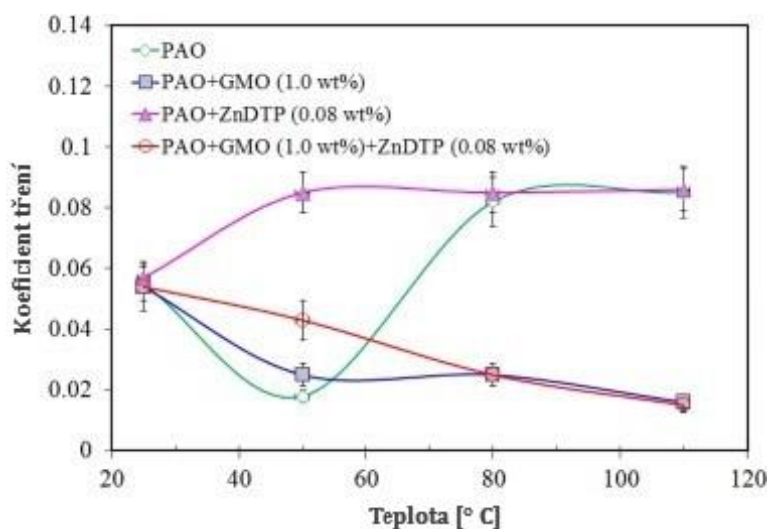


Obrázek 10 Třecí charakteristika (0W20 + ZDDP + MoDTC) [17]

Lze pozorovat zvyšující se relativní tření se zvyšujícími se otáčkami vačkového hřídele. Tento trend můžeme přičíst měnícím se podmínkám mazání. Při nízkých rychlostech vačkového hřídele $n=1000$ otáčkách je tribologický kontakt převážně tvořen smíšenými podmínkami mazání vedoucím k větším třecím silám. Při vyšších rychlostech vačkového hřídele $n>1000$ otáčkám za minutu je nosný mazací film tvořen elastohydrondamicky (EHL). Tento posun v mazacích podmínkách významně sníží třecí síly. Při teplotě oleje 50°C a otáčkách vačkového hřídele $n=500$ otáček za minutu má povlakované zdvihátko vrstvou a-C:H:ZrC_g o málo vyšší relativní tření ve srovnání s nepovlakovaným a-C:H:X zdvihátkem. Ale už při otáčkách $n\geq 750$ otáčkách za minutu přispívá DLC povlak ke snížení relativního tření. Zejména při vyšších rychlostech vačkového hřídele se ukazuje, že má ZrC_g velmi podobné vlastnosti jako a-C:H:X. Nárůst teploty oleje z 50°C na 80°C vede k z výšení třecích sil u DLC a C:H:ZrC_g. Třecí síly jsou pro ZrC_g při teplotě oleje 80°C v průměru o 11,4% vyšší, než u nepovlakovaného zdvihátka. Můžeme předpokládat, že přísady ZDDP a MoDTC mají lepší interakci s nepovlakovanými zdvihátky při vyšší teplotách. Povlakovaná zdvihátka mají velmi

špatné tribo-chemické vlastnosti. Na povrchu tudíž nedochází k žádné chemické reakci, která by měla za následek vytvoření vrstvy mazacího filmu. Tyto vlastnosti lze přičíst chemické inertnosti ZrCg. Tento efekt je dále posilován při vyšších teplotách oleje [17].

Průměrné hodnoty koeficientu tření mezi vrstvou DLC v kontaktu s ocelí v závislosti na teplotě oleje jsou uvedeny na obr. 11. Povlak ta-C vykazoval nízké koeficienty tření kolem 0,05-0,06 ve všech pozorovaných typech maziv při 25 °C. Zkoušky ukazují, že v čisté PAO při 50 °C vykazuje povlak ta-C velmi nízký koeficient tření, přibližně 0,018. Ovšem s narůstající teplotou oleje se začíná koeficient tření velice výrazně zhoršovat a za teploty 100 °C je koeficient tření přibližně 0,09. Olej PAO + GMO vykazoval velmi nízký koeficient tření s hodnotami kolem 0,025 mezi 50 až 80 °C. Nejnižší hodnota tření v PAO + GMO byla pozorována při 110 °C, což bylo přibližně 0,016. PAO + ZnDTP vykazovalo relativně vysoké hodnoty tření ve všech teplotách v rozmezích 40 až 110°C se stabilní hodnotou mírně pod 0,09. V případě oleje PAO + GMO + ZnDTP se koeficient tření snížil na přibližně 0,05 při 50 °C, který byl vyšší než samotný GMO a nižší než samotný ZnDTP. Při vyšších teplotách vykazoval olej GMO + ZnDTP podobný třecí charakter jako PAO pouze s GMO.

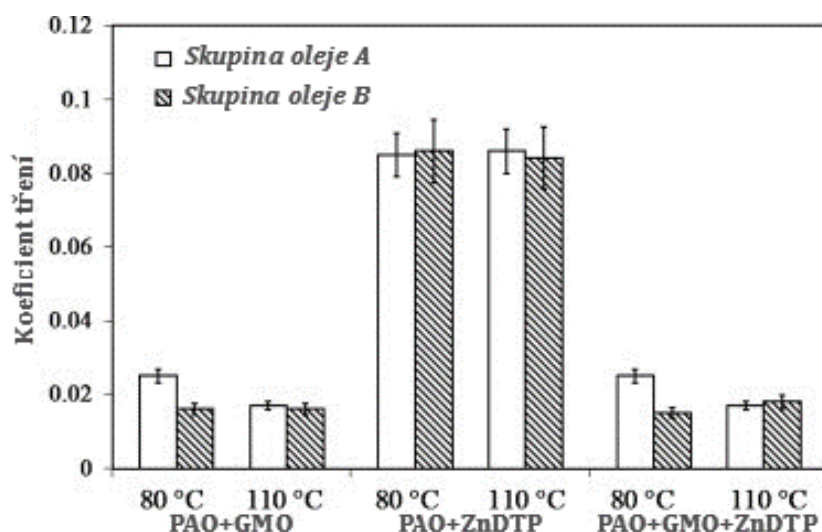


Obrázek 11 Změna koeficientů tření jako funkce teploty pomocí maziv skupiny [18]

Tabulka 2 složení olejů skupiny A a B [18]

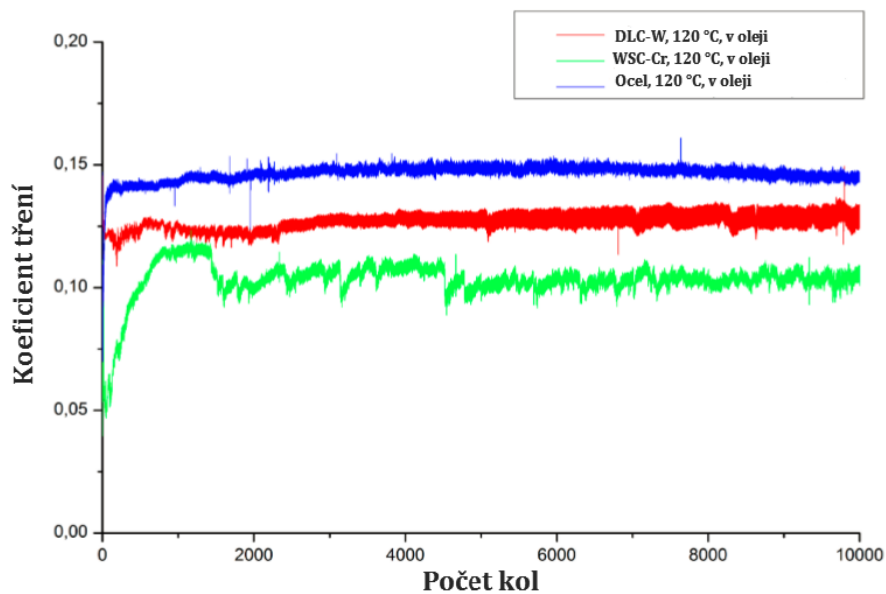
Olej	Základní olej (PAO) (wt%)	GMO (wt%)	ZnDTP (wt%)
<i>Skupina A</i>			
PAO	100	-	-
PAO+GMO	99	1	-
PAO+ZnDTP	99,82	-	0,08
PAO+GMO+ZnDTP	98,82	1	0,08
<i>Skupina B</i>			
PAO+GMO	99,5	0,5	-
PAO+ZnDTP	99,86	-	0,04
PAO+GMO+ZnDTP	98,86	0,5	0,04

Vliv koncentrace aditiv na koeficienty tření je srovnán na obr. 12. Ve všech testech byla pozorována velmi malá změna tření, když byla koncentrace aditiva snížena na polovinu. V případě PAO + GMO měla nízká koncentrace přísady GMO nižší koeficient tření. Tento účinek byl výraznější při zkouškách za 80 ° C. Je zřejmé, že snížení koncentrace přidané látky ZnDTP a maziva PAO + ZnDTP nezměnilo charakter tření. U maziva PAO + GMO + ZnDTP měla nízká koncentrace přísad výrazně nižší koeficient tření za 80 ° C, než vysoká koncentrace přísad. Tento účinek však nebyl pozorován, když teplota vzrostla na 110 ° C [18].

**Obrázek 12** Vliv koncentrace aditiva na koeficient tření v [18]

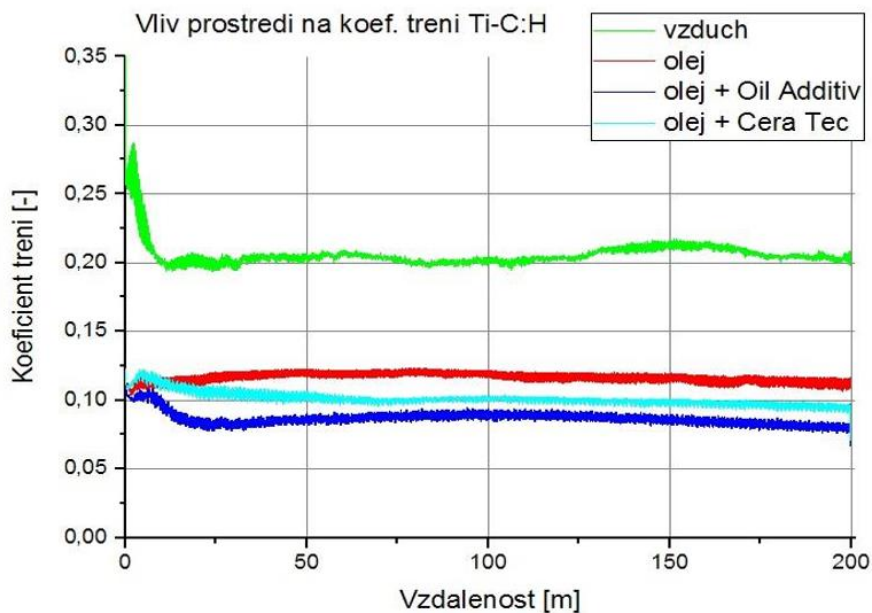
Podle studie provedené na elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze, která porovnávala dva různé typy povlaků zdvihátek, a to DLC-W a WSC-Cr s nepovlakovaným povrchem v motorovém oleji o teplotě 120 ° C vyplývá, že depozice vrstvy DLC-W na povrch zdvihátka pomohla snížit tření a další snížení

vykazuje vrstva WSC-Cr. Koeficient tření DLC.W se pohyboval okolo hodnoty 0,12. Výsledky tohoto experimentu jsou znázorněny na obr. 13 [19].



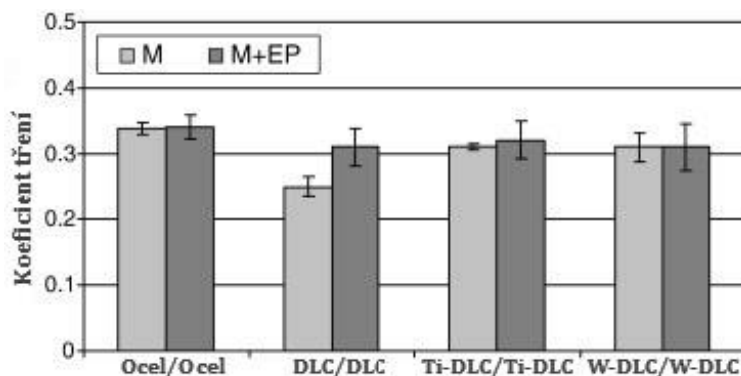
Obrázek 13 Porovnání DLC-W a WSC-Cr vrstev oproti standartnímu zdvihátku [19]

V bakalářské práci [20] na téma Vliv olejových aditiv na tribologické vlastnosti DLC povlaků, se uvádí výsledky (obr. 14) vlivu rozdílných typů maziv na DLC vrstvu dopovanou titanem. Z obrázku je patrné, že na snížení tření měl největší přínos olej s příměsí Cera Tec. Cera Tec je tvořeno minerálním olejem s příměsí mikro keramických částic na bázi hexagonálního nitridu bóru. Tyto částice zabraňují přímému kontaktu kovu na kov. Ale i olej s aditivem, kterými v tomto případě je MoS_2 , což je v podstatě tuhé mazivo podobné grafitu o něco snižuje tření v porovnání s čistým olejem bez příměsí.



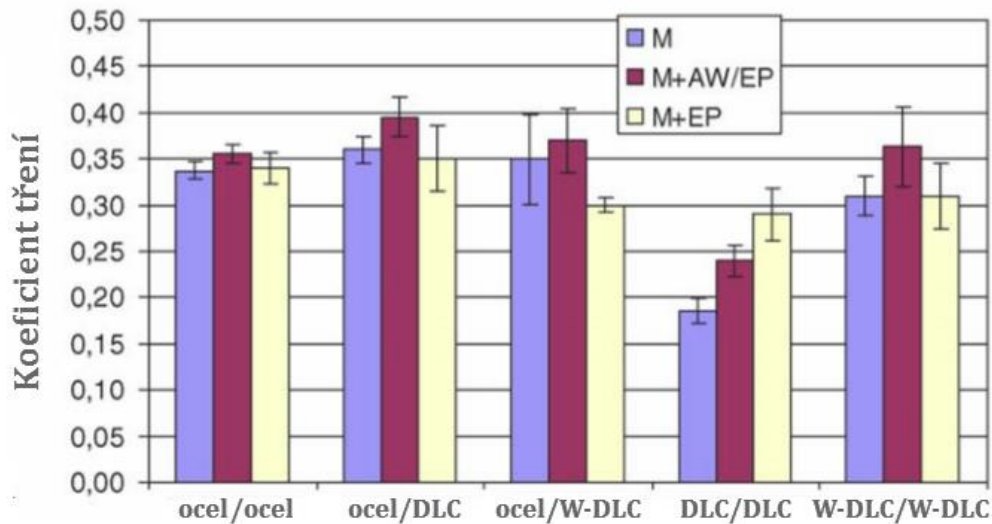
Obrázek 14 Vliv maziv na koeficient tření Ti-C:H [20]

Z obrázku 15, který zachycuje průměrné hodnoty koeficientu tření je patrné, že aditiva EP koeficient tření nesnižují, ba naopak ho často zvyšují. EP je aditivum a snižuje především opotřebení, jak bude uvedeno v následující kapitole. I v tomto článku nejlépe dopadá čistý DLC povlak v kombinaci s čistým olejem. Ale i přes to, všechny povlaky vykazovali nižší tření, než tomu bylo v případě referenčního ocelového kontaktu [21].



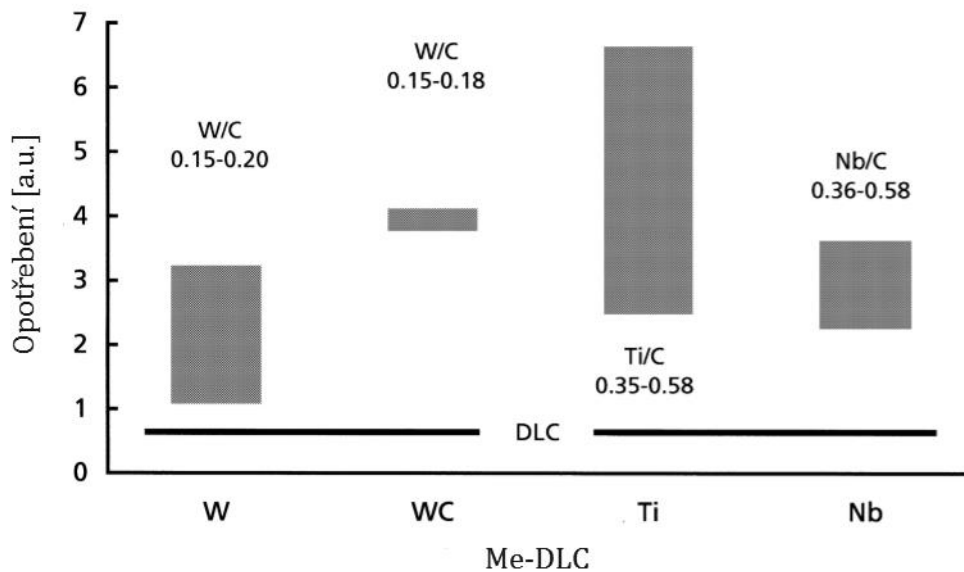
Obrázek 15 Závislost koeficientu tření na mazivu [21]

V předchozích částech této kapitoly jsem se věnoval kontaktu DLC povlaku s kovem, ale koeficient tření se může výrazně měnit, pokud je DLC povlak v kontaktu s jiným, než-li kovovým povrchem. Na obr. 16 je srovnání tří druhů maziv s různými protějšími stykovými plochami. Z tohoto obrázku je patrné, že nejlepší výsledků dosahuje kontakt povrchů DLC/DLC v minerálním oleji [22].



Obrázek 16 Závislost koeficientu tření na mazivu a protějším povrchu [22]

2.6 Opotřebení dopovaných DLC bez použití olejů



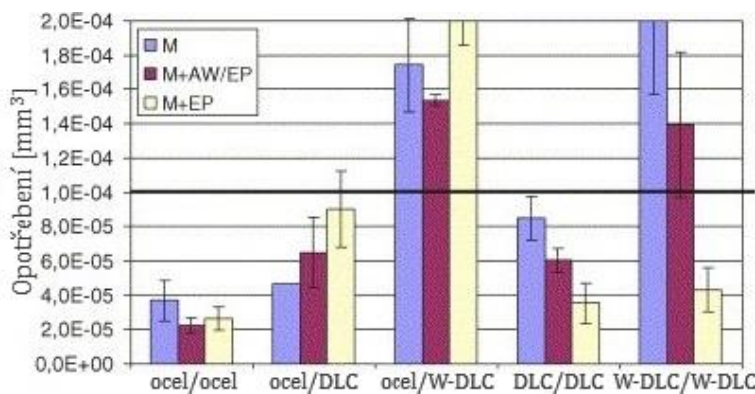
Obrázek 17 Porovnání oěru dopovaného W, WC, Ti a Nb [16]

Minimální rychlosti opotřebení byly zjištěny u povlaků W-DLC. Povlaky Ti- a Nb-DLC vykazují střední míru opotřebení, nicméně všechny povlaky Me-DLC zkoumané v této studii mají zřetelně nižší odolnost proti opotřebení než DLC povlaky bez obsahu kovů. Předpokládá se, že amorfní uhlíková matrice DLC filmu je zesíťována mnohem silněji než u povlaků dopovaných kovy. Vliv kovové složky

na opotřebení zůstává nejasný. Je pravděpodobné, že zbytky krystalitů ovlivňují stabilitu sítě amorfního uhlíku. K podpoře těchto hypotéz však je zapotřebí více informací o struktuře filmu, včetně velikosti a distribuci krystalů [16].

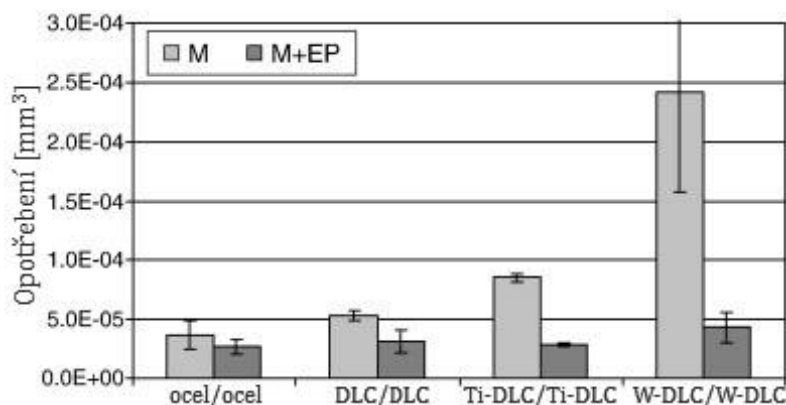
2.7 Opotřebení DLC povlaků v olejích

Obrázek 18 znázorňuje míru opotřebení mezi jednotlivými stykovými kontakty testovaných v minerálním oleji. Nejnižší opotřebení ze zkoušených povlaků vykazoval kontakt ocel/ocel, a to bez ohledu na použité aditivum. Podle očekávání oba typy aditiv v oleji snižují opotřebení. Zcela odlišné chování je vidět u kontaktem ocel/DLC tady naopak aditiva opotřebení zvyšují, a to především pak aditivum EP, které zvyšuje opotřebení až o 50 %. S přihlédnutím na koeficient tření z předcházející kapitoly se jeví nejvýhodnějším kontaktem styková plocha nedopovaných povlaků DLC/DLC [22].



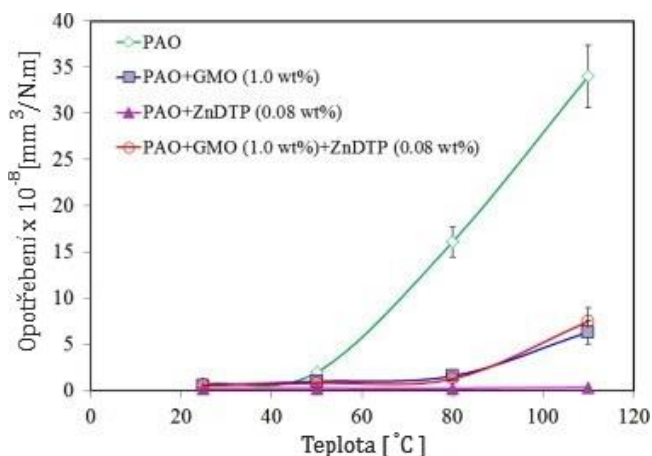
Obrázek 18 opotřebení jednotlivých povlaků [22]

Toto chování potvrzuje i následující článek. Objem opotřebení všech testovaných kombinací materiálu v závislosti na použitém mazivu je uveden na obrázku 19. Při použití pouze základní oleje bez přísad bylo zjištěno nejmenší opotřebení u páru ocel/ocel. Lze to vysvětlit vyšší polaritou oceli ve srovnání s DLC povlakem, a tím i vyšší afinitou k mazivu. Výsledky také ukazují, že dopované DLC vrstvy titanem a wolframem mají horší výsledky než-li nedopovaná DLC vrstva. Opotřebení všech vrstev se snížilo přidáním aditiva EP k základnímu oleji. Výsledky také ukazují, že velikost opotřebení s EP aditivem bylo pro Ti-DLC nižší než pro W-DLC. Nejnižší míru opotřebení v tomto testu vykazovala vrstva Ti-DLC s mazivem s příměsí EP aditiva. Je však zajímavé, že se opotřebení s EP snížilo daleko více u DLC povlaku dopovaným kovem než u samotné oceli. Je to zřejmě způsobené lepší interakcí mezi povlakem a olejem [21].



Obrázek 19 Opotřebení oceli v kontaktu s vybranými povlaky v minerálním oleji [21]

Na obrázku 20 je znázorněna rychlost opotřebení substrátu povlakovaného ta-C v závislosti na teplotě oleje s různými aditivy. Zvyšující se teplota oleje obecně vede k zvýšenému otěru ve všech mazivech. Do 50°C mají všechny oleje velice podobný průběh opotřebení, avšak od 50°C se zdá, že aditiva začínají plnit svou úlohu. U čistého PAO oleje vede zvýšená teplota nad 50°C k výraznému nárůstu opotřebení. Nejlepších výsledků dosahoval ve všech teplotách olej s příměsí GMO a ZnDTP [18].

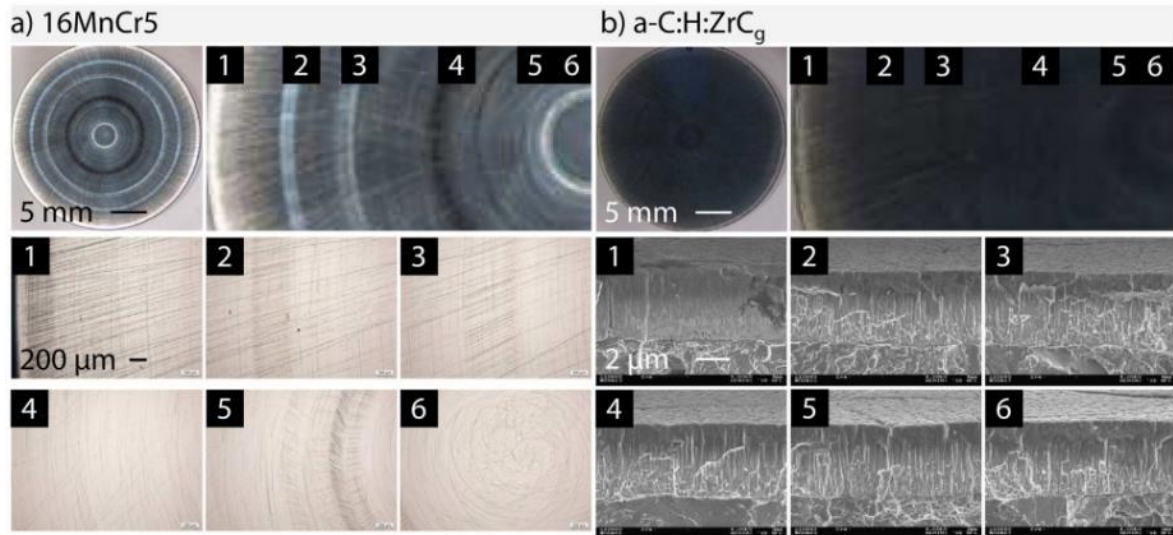


Obrázek 20 Závislost teploty oleje na opotřebení povlaku [18]

2.8 Opotřebení funkčních ploch

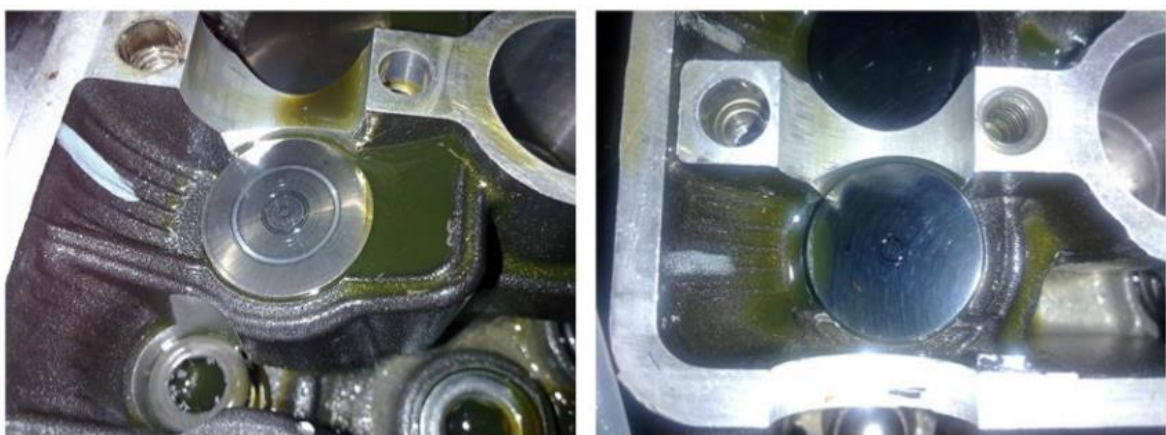
Na obrázku 21a je vidět zřetelně kruhové opotřebení povrchu, které lze připsat rotačnímu pohybu vačky. V závislosti na uhlu natočení vačky se na povrchu vytváří hluboké bodové a rozsáhlé abrazivní opotřebení (obr. 2 a) v polohách 1 až 6. Abrazivní opotřebení je způsobeno změnou průběhu Hertzova kontaktu. Aritmetická drsnost R_a v průměru na pozicích 1 až 6 byla $R_a = (0,023 \pm 0,003) \mu\text{m}$. Vzhledem k tomu, že k žádné viditelné opotřebení na funkčních plochách

potážených a-C:H:ZrC_g nedochází a tloušťka povlaku zůstává na celém průřezu stejná 4,38 μm, můžeme říct, že k žádnému abrazivnímu opotřebení nedochází [17].



Obrázek 21 Porovnání zdvihátek povlakem dopovaným zirkoniem s ocelovým [17]

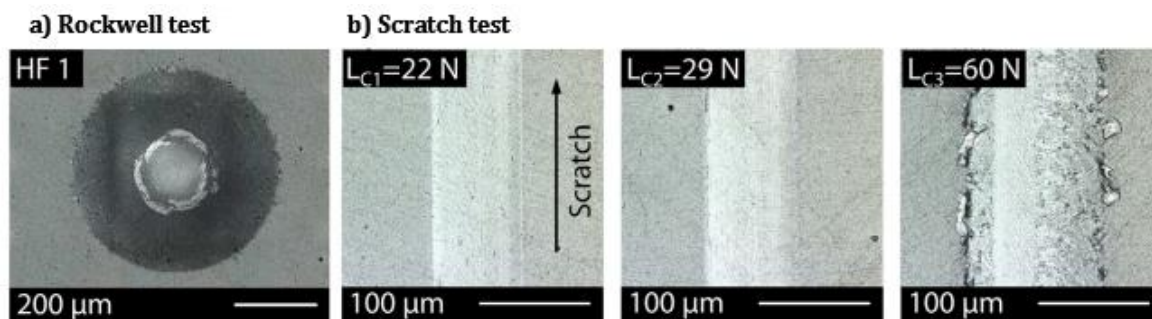
Výsledky DLC-W ve srovnání se standartními zdvihátky formule Cartech jsou patrné na obr. 22. Je zjevné že DLC-W povlak podléhá pouze velmi malému opotřebení. Typické opotřebení ventilových zdvihátek je charakterizováno radiálními kruhy na povrchu. Tento typ opotřebení nebylo na DLC-W vrstvě pozorován [19].



Obrázek 22 Porovnání opotřebení standartních zdvihátek a zdvihátek s DLC-W vrstvou [19]

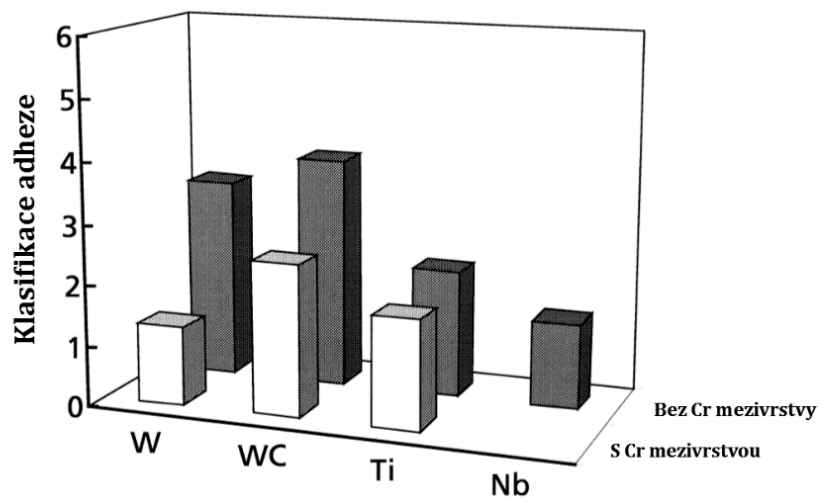
2.9 Adheze a tvrdost Me-DLC povlaku

Adheze mezi DLC povlakem a kovovým substrátem hraje klíčovou roli pro zajištění spolehlivého provozu a dlouhé životnosti. DLC se používá v široké škále průmyslových aplikací v různých prostředích. Použití povlaku však může být omezeno kvůli jejich vysoké hladině zbytkového pnutí. Souběžná depozice vhodné adhezní mezivrstvy, respektující chemické a mechanické vlastnosti substrátu a povlaku nebo dopováním kovových prvků (Cr, Ti, W atd.) přímo do uhlíkové matrice může úspěšně snížit zbytkové napětí a zlepšit adhezi. Takové povlaky jsou často označovány v literatuře jako povlaky Me-C (: H) nebo Me-DLC, kde Me znamená kovový prvek [13]. I další články potvrzují, že kov dopovaný do DLC filmů (Me-DLC) hraje velkou roli při snižování vnitřního pnutí a zlepšování přilnavosti k podkladu [23]. Zkouška podle Rockwella na obr. 23 a) je kvalifikována jako HF1. Během zkoušky nenastaly trhliny ani odlupování povlaku. Scratch test byl proveden pro tři různé zatěžovací síly od 22 N až po 60N. Výsledky Scratch testu byli vyhodnocen také jako HF1 [17]. Kompozitní vrstvy dopované chrómem mají nejvyšší mikrotvrdost (3100Hv (10 g)), dopované Titan mají (2560Hv) a Zirkonem (2700Hv). Zkoušky Rockwell, které byly provedeny na všech povlacích Me-C: H ukazovaly na kritérium přilnavosti HF2, což naznačuje příznivé adhezní vlastnosti těchto povlaků [15].



Obrázek 23 Rockwell a Scratch test provedený na DLC vrstvě dopované Zirkonem [17]

Klasifikace adheze povlaků byla prováděna pomocí Rockwell testu při zatížení 150 kp. Podle klasifikace VDI hodnota 1 znamená vynikající adhezi, kdežto hodnota 6 znamená úplnou delaminaci okolo vpichu. Obr. 24 srovnává DLC vrstvu dopovanou wolframem, karbidem wolframu, titanem, niobem s použitím mezivrstvy chromu a bez mezivrstvy. Mezivrstva chromu vede k výraznému zlepšení adheze u povlaku dopovaným wolframem a karbidem wolframu, zatímco pro povlak Nb-DLC nejsou pro dosažení velmi dobré adheze nutné žádné mezivrstvy [16].



Obrázek 24 adheze DLC vrstvy k substrátu [16]

3 Praktická část

3.1 Příprava vzorků

Povlak byl nanášen na substrát z oceli 1.2379 (19 573, X153CrMoV12) zakalenou na tvrdost 60 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. Vzorek o průměru 40 mm a výšce 5mm byl důkladně broušen a leštěn na leštičce Leco GPX 300 od drsnosti P60 přes P120, P400, P1200 až po 9 a 3 μm diamantovou suspenzi při těchto parametrech nastavení: otáčky spodního brousícího kotouče 150 rpm, otáčky hlavy 40 rpm protiběžného směru. Přítlak byl v rozmezí 15 až 20 N. Nakonec byl vzorek sušen na 60°C po dobu 10 minut.

Tabulka 3 chemické složení oceli 1.2379 ČSN EN ISO 4957

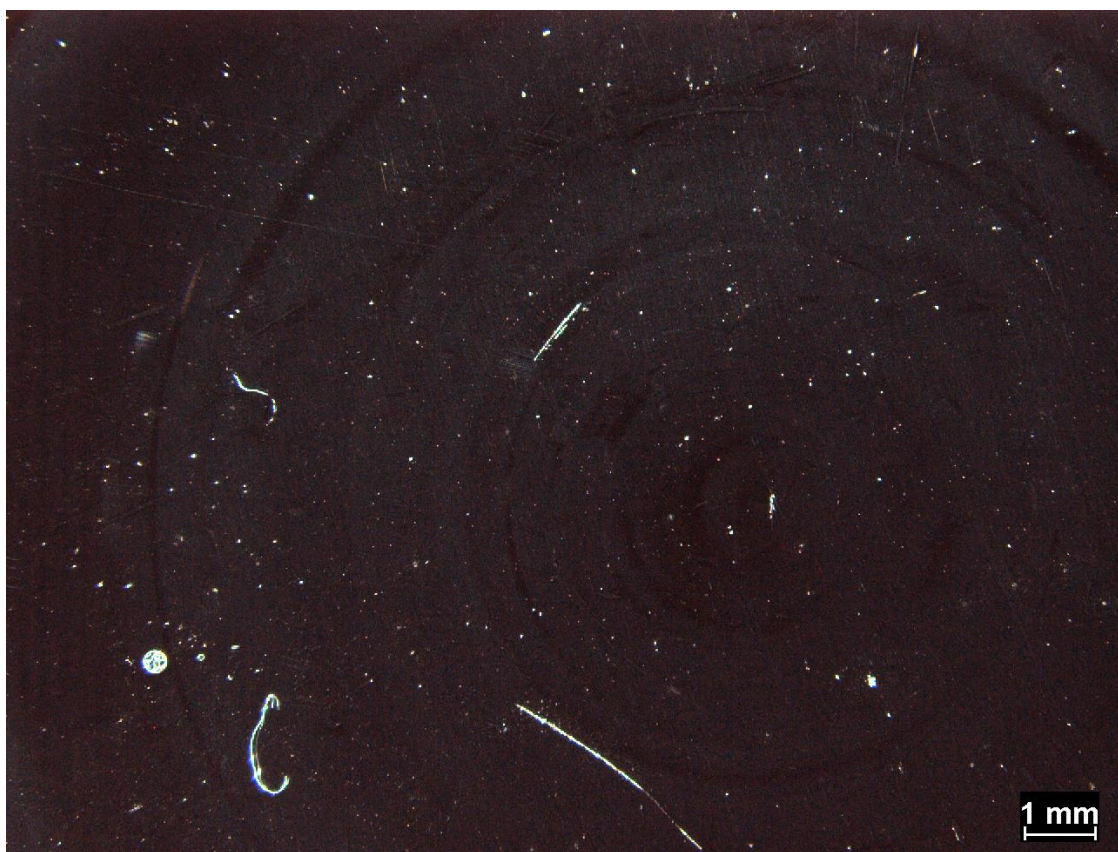
	C	Mn	Si	P max	S max	Cr	Mo	V
%	1,45-1,6	0,2-0,6	0,1-0,6	0,03	0,03	11,13	0,7-1	0,7-1

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 %). Gradientní přechod z čistého TiNb na TiNb-C:H byl vytvořen zvyšováním toku acetyleny (čistota 99,6 %) z 20 sccm na konečných 60 sccm. Funkční vrstva TiNb-C:H byla deponována metodou reaktivního magnetronového naprašování z terče Ti39Nb a tokem acetyleny 60 sccm. Funkční vrstva a-C:H byla deponována metodou PACVD z acetyleny a tokem 250 sccm. Depoziční teplota pro oba povlaky byla 200 °C. Použito bylo pulzní předpětí – 75 V

(TiNb-CH) a -740 V (a-C:H) na substrátech a terčích s frekvencí v rozmezí od 20 kHz do 50 kHz. Pracovní tlak byl $3,0 \cdot 10^{-1}$ Pa a příkon na katodách 5 kW.

3.2 Vyhodnocení povrchu zdvihátka

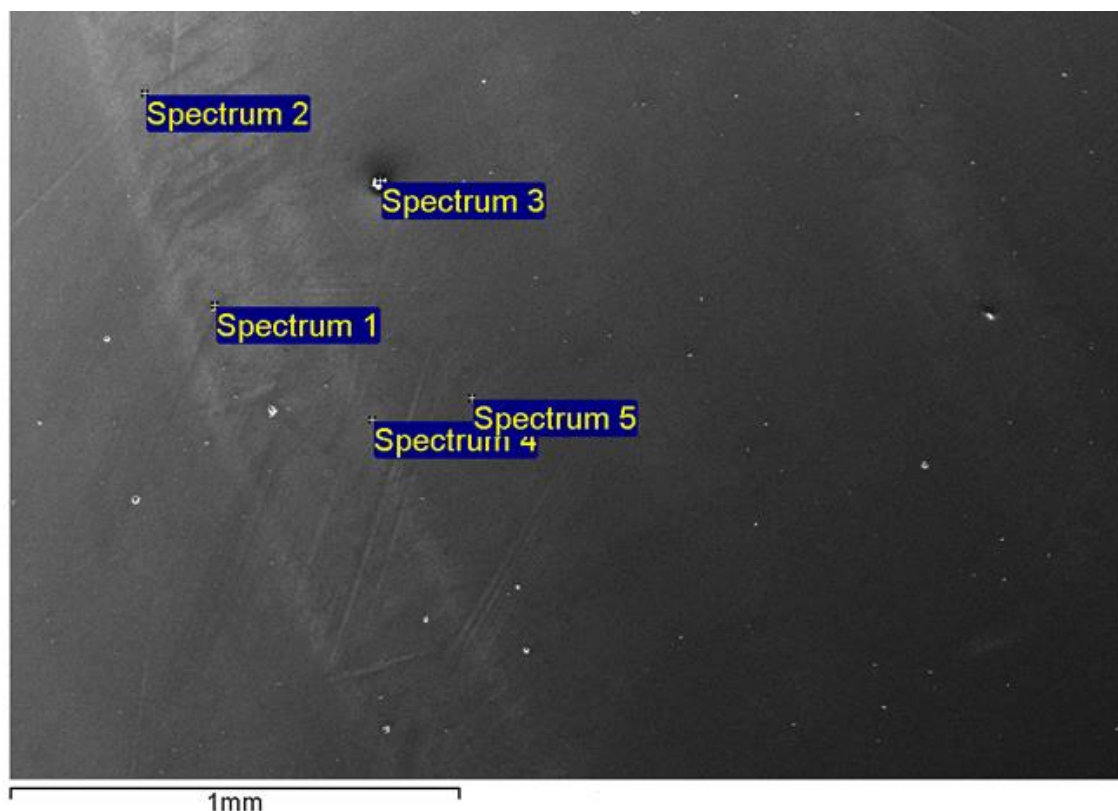
Povlak zdvihátka, který je na obrázku 27 nevykazuje žádné velké známky opotřebení. Pro rozsáhlejší opotřebení by byl potřebný několikanásobně delší chod v motoru. Zdvihátko ujelo ve formuli Fs08 teamu CarTech přibližně 600 km závodního zatížení. Na povrchu je vidět mírné kruhové opotřebení, které je způsobeno rotačním pohybem vačky. Tečky na povrchu nejspíše nevznikly při zátěži v motoru, ale při samotné aplikaci DLC vrstvy. Vrypy jsou zapříčiněné pravděpodobně kovovými vměstkami, které se do oleje mohou dostat i z jiných úseku motoru, protože ventilový rozvod nemá samostatný olejový oběh.



Obrázek 25 Povrch zdvihátka povlakovaný DLC vrstvou po ujetí 600 km

Chemický rozbor povrchu zdvihátka byl zjišťován metodou EDS (energie disperzní spektroskopie). Při ozáření materiálu elektrony vzniká rentgenové záření, které je vyvoláno vzájemným působením elektronů a materiálu. Toto

charakteristické RTG záření je pro každý prvek jiné specifické energie, která je užita k identifikaci prvků obsažených ve vzorku [24] [25]. Vyhodnocení opotřebenění bylo provedeno pomocí této metody na elektronovém mikroskopu JOEL JSM-7600F. Usuzujeme, že vačka na zdvihátku zanechala otěr díky špatným tribochemickým vlastnostem způsobených inertním povrchem DLC vrstvy. Elektronový mikroskop zobrazuje těžké prvky světleji než prvky lehké. Na obrázku 26 je snímek erozní zóny z povrchu zdvihátka, na kterém byla provedena bodová spektrální analýza.



Obrázek 26 Erozní zóna na zdvihátku

Výsledky chemického složení jsou zaznamenány v následující tabulce 4. Metoda vyhodnocení EDS neumožňuje detekci vodíku, kterého by tato vrstva mohla obsahovat kolem 15%, dále také může být toto měření ovlivněno atomárním uhlíkem. Maximální hodnota prvku zastoupeného ve vrstvě je označena zelenou barvou, naopak minimální hodnota je označena modře.

Tabulka 4 Procentuální zastoupení prvků na povrchu zdvihátka

	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Max	Min
C	80,99	78,34	38,01	80,08	82,76	82,76	78,34
Si	0,25	0,02	0,07	0,02	0,01	0,25	0,01
V	8,33	9,80	33,25	9,13	7,93	33,25	7,93
Cr	7,86	8,38	25,95	7,36	6,49	25,95	6,49
Mn	1,27	1,97	0,00	1,90	1,88	1,97	1,27
Fe	0,80	1,16	1,36	1,19	0,88	1,36	0,80
Mo	0,49	0,33	1,35	0,32	0,04	1,35	0,04

Z následujícího vyhodnocení jsem odstranil spektrum číslo 3, protože se zjevně jedná o úlomek z vačky nebo z jiné části motoru, ne o námi vyhodnocovaný otěr. Pro porovnání otěru jsem vybral spektrum 2 jako představitele erozní zóny a spektrum 5 jako představitele otěrem nedotčené plochy. Porovnání obou spekter je znázorněno v tabulce 5.

Tabulka 5 Porovnání spectra 2 s spectrem 5

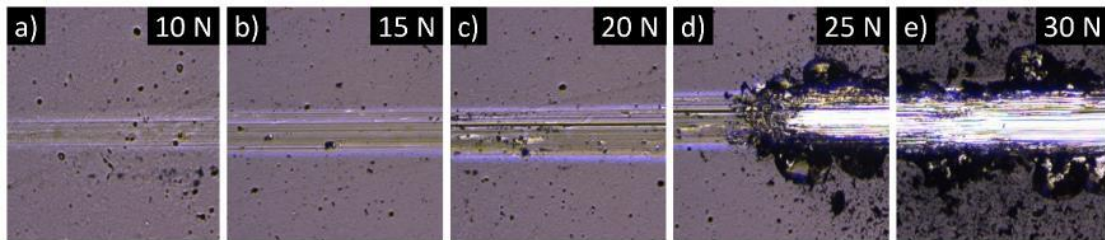
	Spectrum 2	Spectrum 5	rozdíl	procentuální rozdíl
C	78,34	82,76	4,42	5,64%
Si	0,02	0,01	0,01	50,00%
V	9,80	7,93	1,87	19,08%
Cr	8,38	6,49	1,89	22,55%
Mn	1,97	1,88	0,09	4,57%
Fe	1,16	0,88	0,28	24,14%
Mo	0,33	0,04	0,29	87,88%

Ve spektru 2 jsou zvýšené koncentrace především chromu, vanadu, molibdenu a železa. Vanad a chrom je časná legura nástrojových ocelí z nichž je vyrobena i vačková hřídel.

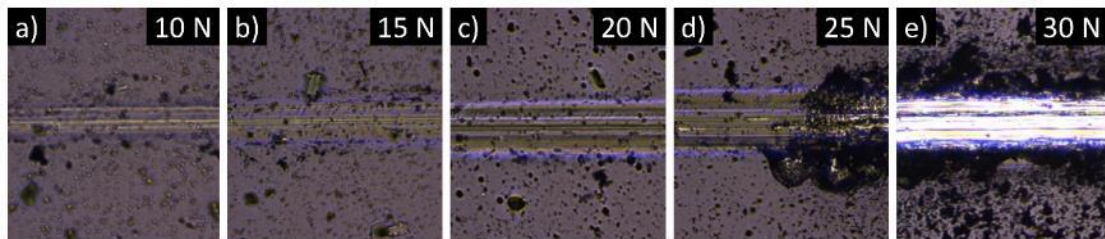
3.3 Mechanické vlastnosti TiNb-DLC a DLC

Vrypová zkouška často také označována jako Scratch test se používá k hodnocení adheze a koheze povlaku. Zkouška spočívá ve vedení diamantového indentoru zatěžovaného silou po povrchu vzorku. Následně se pomocí mikroskopu a akustické emise generované v průběhu testu vyhodnocuje kritická síla, při které dochází k odtržení povlaku od substrátu [27] [28]. Povlak TiNb-DLC i DLC byl testován 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 100 N na úseku 10 mm. Adheze substrátu s povlakem TiNb-DLC se začala porušovat při 25 N, jak je viditelné na obrázku 27d. Dobrá adheze povlaku k zdvihátku je velice důležitá, neboť na zdvihátku dochází k přenosu velkých rázů od vačky. U dobře optimalizovaných DLC vrstev může nastat porušení adheze až při 40 N. Srovnávaný referenční povlak DLC vykazoval stejný průběh porušení adheze, jak je zřejmé z obrázku 28.

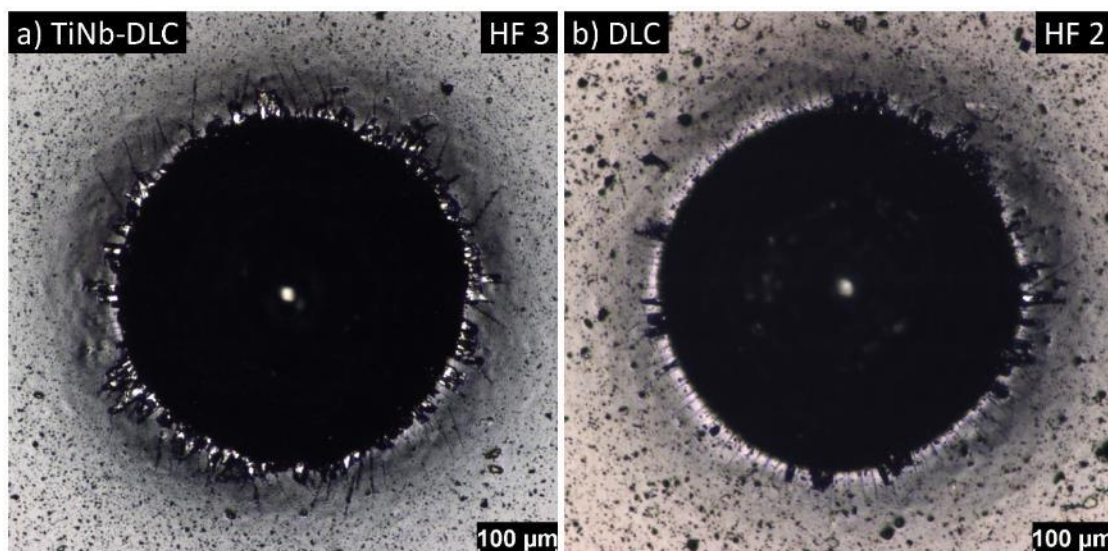


Obrázek 27 Vrypová zkouška povlaku TiNb-DLC



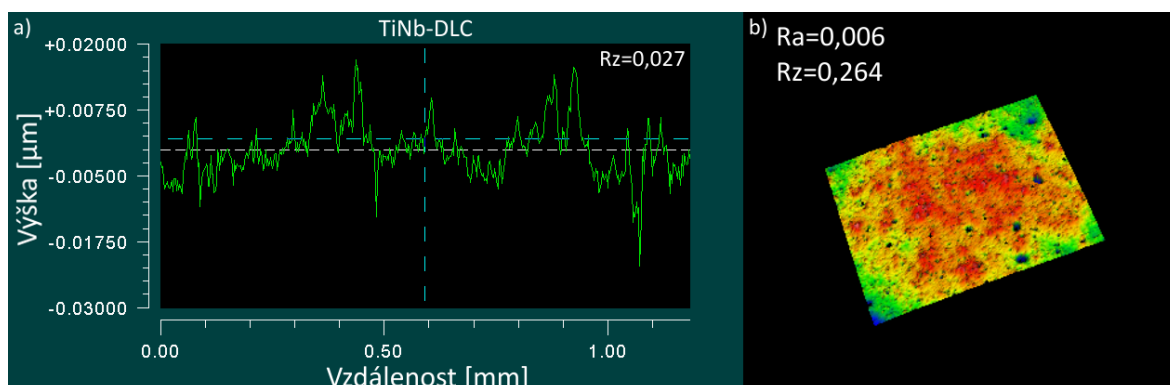
Obrázek 28 Vrypová zkouška povlaku DLC

Jednou z nejjednodušších metod vyhodnocení adheze je Rockwell test, někdy též označovaný jako Mercedes test. Zkouška spočívá v pichu diamantovým kuželem o vrcholovém úhlu 120° do vzorku. Pro vyhodnocení testu se používá mikroskop a tabulka rozdělující vzniklé poškození 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 [29]. Zkouška byla provedena na tvrdoměru EMCOTEST M4C G3. Výsledky této zkoušky jsou znázorněny na obrázku 31. Adhezi povlaku TiNb-DLC (obrázek 29a) jsem klasifikoval jako HF 2, na okraji jsou viditelné trhlinky a odlupování povlaku. Stejně hodnocení je i pro povlak DLC (obrázek.29b)

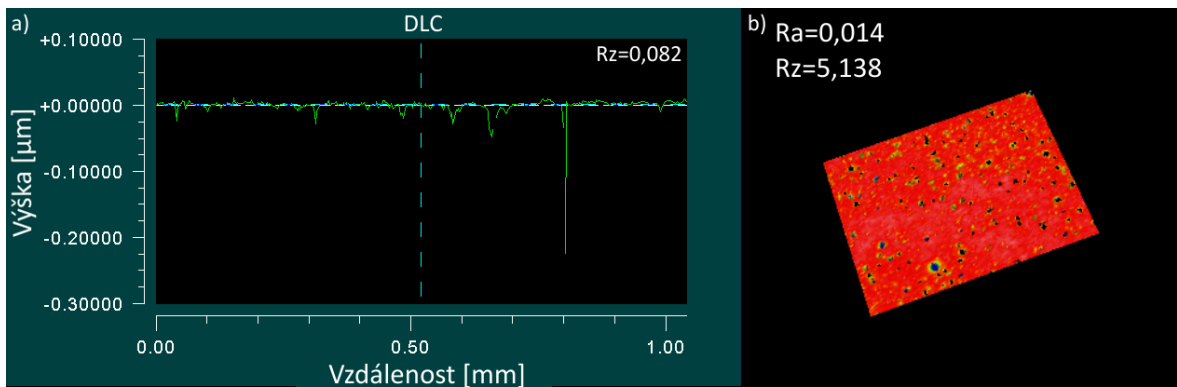


Obrázek 29 Porovnání povlaků TiNB-DLC a DLC Rockwell testem

Drsnost je jedním z nejdůležitějších vlastností povrchu, který může značně ovlivňovat tribologické vlastnosti. Profil vrstvy byl měřen pomocí optického profilometru Zygo NewView 7200. Cílem tohoto měření bylo porovnat proces vytváření povlaku čistého DLC použitého ve formuli CarTech Fs08 a nově vyvinutého povlaku TiNb-DLC. Lepší plošnou drsnost měřenou na ploše $2,35 \mu\text{m}^2$ vykazovala vrstva TiNb-DLC $R_a=0,006 \mu\text{m}$ a $R_z=0,264 \mu\text{m}$ (obrázek 30b), nedopované DLC mělo o poznání horší profil povrchu $R_a=0,014 \mu\text{m}$ a $R_z=5,138 \mu\text{m}$ (obrázek. 31b). Pro detailnější přehled o povrchu byla provedena i lineární analýza na vzdálenosti přibližně 1 mm, na kterém dosahovala vrstva TiNb-DLC $R_z=0,027 \mu\text{m}$ a DLC $R_z=0,082 \mu\text{m}$. Průběh drsnosti je znázorněny obr. 30a pro vrstvu TiNb-DLC a výsledky čistého DLC na jsou obr. 31a. Při záběhu v motoru dochází k sražení výčnělků a tím i k snižování velikosti R_a .



Obrázek 30 Profil povrchu TiNb-DLC



Obrázek 31 Profil povrchu DLC

Aby bylo možné posoudit nanotvrdost vrstvy, bylo nutné změřit tloušťku povlaku s použitím přístroje Calotest Compact od firmy CSM Instruments a následně vyhodnotit na optickém mikroskopu NEOPHOT 32. Calotest umožňuje měření tloušťky povlaku vybroušením kulového vrchlíku na povrchu za pomoci abrazní diamantové pasty a ocelové kuličky o různých poloměrech.

Vzorec pro výpočet tloušťky povlaku:

$$t = \sqrt{R^2 - r_1^2} - \sqrt{R^2 - r_2^2}$$

Kde: t = tloušťka povlakované vrstvy [mm]

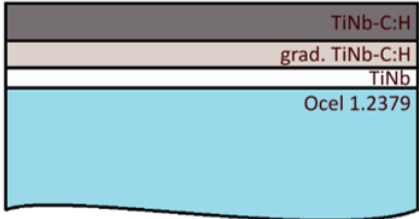
R = poloměr kuličky [mm]

r_1 = malý průměr vrstvy [mm]

r_2 = velký průměr vrstvy [mm]

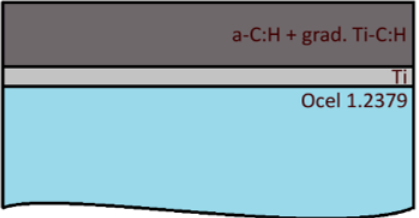
K vybroušení povlaku byla použita ocelové kulička o průměru 30 mm a abrazivní diamantová suspenze o velikosti zrn 0,2 μm až 0,5 μm , při 500 ot/min. po dobu 60 s. Tloušťka povlaku TiNb-DLC je znázorněna na obr. 34. Nejprve byla na substrát deponována adhezní vrstva titan-niobu o tloušťce 0,65 μm , na tuto vrstvu byla pozvolným navyšováním toku acetylenu vytvořena gradientní mezi vrstva TiNb-C:H s tloušťku 1,40 μm , která přešla až na vrchní vrstvu TiNb-C:H o tloušťce 1,97 μm . Celková tloušťka povlaku TiNb-DLC je 4,02 μm . U porovnávané vrstvy DLC byla na substrát deponována vrstva titanu o tloušťce 0,40 μm . Vrstva DLC nevykazuje viditelnou gradientní přechodovou vrstvu Ti-C:H, takže je možné určit pouze celkovou vrstvu a-C:H, která má 4,54 μm . Celková tloušťka povlaku DLC je 4,94 μm . Výsledky obou kalotestů jsou vidět na obr. 32 a obr. 33.

TiNb-DLC	
Vrstva:	Tloušťka vrstvy:
TiNb-C:H	1,97 μm
grad. TiNb-C:H	1,40 μm
TiNb	0,65 μm
Suma	4,02 [μm]



Obrázek 32 Složení vrstvy TiNb-DLC

DLC	
Vrstva:	Tloušťka vrstvy:
a-C:H + grad. Ti-C:H	4,54 μm
Ti	0,40 μm
Suma	4,94 [μm]



Obrázek 33 Složení vrstvy DLC

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 přitlačnými silami v jednotkách mili Newtonů. U moderních měření nanotvrdosti se již nepoužívá Vickersův čtyřboký jehlan, ale Berkovichův trojboký jehlan. To z důvodu zachování stejného poměru hloubky a plochy vtisku, ale také u tohoto jehlanu lze vybrousit špičku do bodu. Tuto metodu lze považovat za nedestruktivní zkoušku (NDT). [29] Tvrdost byla měřena na Nanotvrdoměru a vyhodnocována pomocí metody Oliver Pharr. Na každém vzorku bylo provedeno 9 vpichů. Zatěžovací síla indentoru se pro povlak TiNb-DLC pohybovala okolo hodnoty 15 mN a pro povlak DLC okolo hodnoty 17 mN. Hloubka vtisku v obou případech nepřesáhla 300 nm. Jak bylo předpokládáno, vrstva DLC vykazovala větší tvrdost $12,07 \pm 0,65$ GPa i modul pružnosti $93,42 \pm 4,77$ GPa, než vrstva TiNb-DLC, u které byla naměřena tvrdost $10,26 \pm 0,55$ GPa a modul pružnosti $85 \pm 1,65$ GPa. Z relativně malých chyb měření lze usuzovat, že oba povlaky mají velice dobrou homogenitu. Výsledky jsou znázorněny v následující tabulce 6.

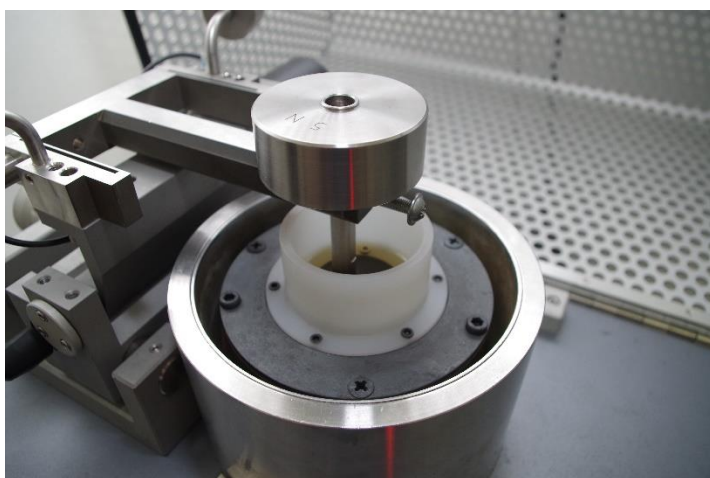
Tabulka 6 Porovnání tvrdosti a modulu pružnosti vrstev TiNb-DLC a DLC

Povlak:	Tvrdost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]
TiNb-DLC	$10,26 \pm 0,55$	$85,00 \pm 1,65$
DLC	$12,07 \pm 0,65$	$93,04 \pm 4,77$

3.4 Tribologie povlaku TiNb-DLC

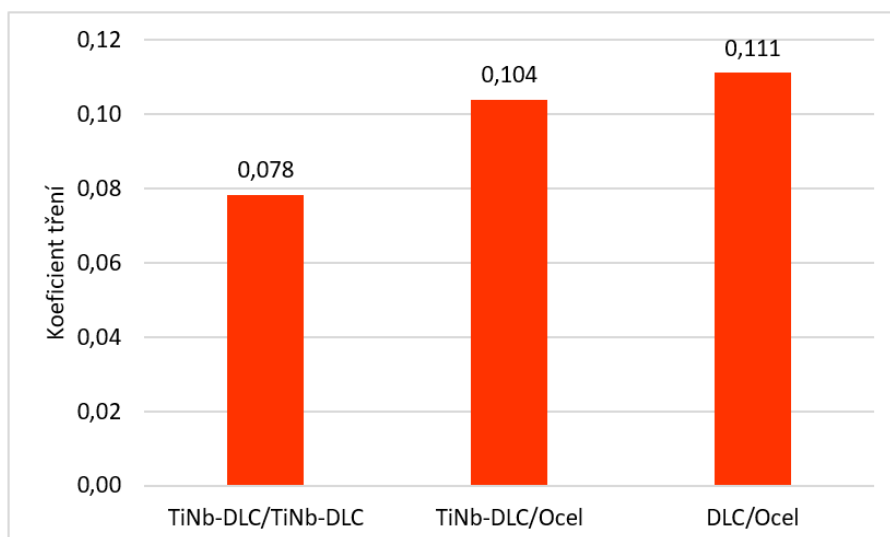
3.4.1 Koeficient tření

Při tribologickém kontaktu dvou povrchů dochází k energetickým ztrátám a opotřebení. Metoda pin-on disk slouží k měření průběhu koeficientu tření během testu. Kromě součinitele tření lze také získat informace o adhezivně-kohezním chování povlaku. Test spočívá v interakci rotujícího vzorku (disku) a nejčastěji kuličky (pinu). Pin je zatížený předem danou silou, která na disku zanechá charakteristickou kruhovou stopu. Tento proces lze provádět i v přítomnosti lubrikantů a to až do teploty 800 °C [26] [20].



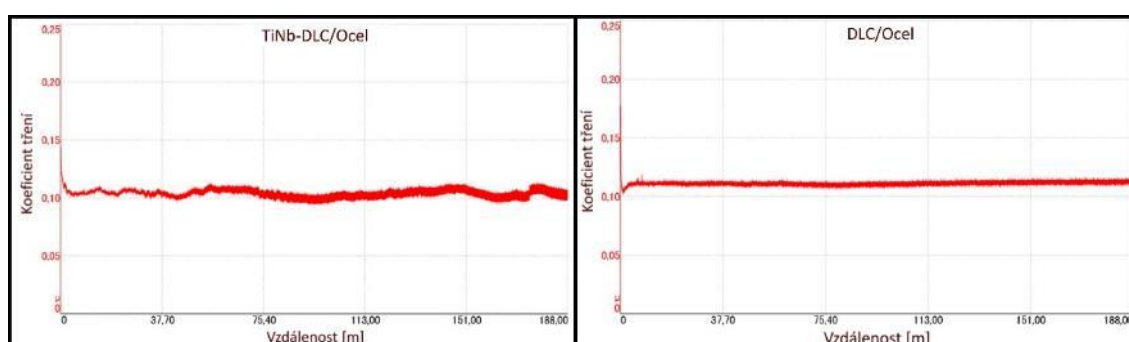
Obrázek 34 Ukázka konfigurace měření v olejové lázni

Koeficient tření byl měřen na tribometru THT-S-CE-0000 metodou pin on disc v syntetickém oleji elf Moto4 Maxi Tech 10W-30. Tento typ oleje je přímo využíván v motoru formule student FS08 týmu CarTech. Aby bylo možné porovnávat měření s co nejvíce ostatními studiemi, zvolil jsem nejčastější normálovou zatěžovací sílu $F_N=5N$. Důležité také bylo vhodně nastavit rychlost otáčení vzorku, aby nedocházelo k vytvoření hydrodynamického způsobu mazání, který by sice měl za následek snížení tření i opotřebení, ale my jsme se snažili zkoušet povlak v mezních podmínkách mazání, při kterých je povlak daleko více namáhán. Kulička (Pin) o průměru 6 mm urazila na každém vzorku vzdálenost 188m, což odpovídalo při rychlosti kuličky 5 m/s času zkoušky 62,6 minut. Z důvodu vysokého vytížení tribometru bylo možné na každém vzorku provést pouze 2 měření. Poloměry dráhy kuličky se pohybovaly v rozmezí 6 - 12 mm Pro navození věrohodnějších podmínek byl olej zahříván na provozní teplotu motoru, a to na 70°C. Měření probíhalo na třech typech kontaktů: DLC/ocel, který je zatím v automobilovém průmyslu nejčastější, na TiNb-DLC/ocel a na TiNb-DLC/ TiNb-DLC.



Obrázek 35 Průměr koeficient tření

Aby měl motor vysoký výkon a zároveň co možná nejmenší spotřebu paliva je důležité eliminovat veškeré pasivní odpory v motoru. V tomto ohledu se zdá nejperspektivnější třecí kontakt mezi povlakovanou kuličku a diskem TiNb-DLC jak je patrné z obrázku 35, který zachycuje průměrnou hodnu koeficientu tření měřenou po fázi záběhu (po 20 m), kontakt TiNb-DLC/ TiNb-DLC má koeficient tření pouhých $\mu=0,078$, to by v praxi znamenalo napovlakovat nejen zdvihátka ale také vačkový hřídel. Ale i kontakt TiNb-DLC/ocel dosahoval nižšího koeficientu tření, než referenční kontakt DLC/ocel o 0,007. Porovnáním na obrázku 36 zjistíme, že kontakt TiNb-DLC měl daleko neklidnější průběh koeficientu tření než referenční čisté DLC, je možné že docházelo k vytváření chemicky vázané vrstvy a k jejímu následnému odtrhávání. Veškeré průběhy koeficientu tření jsou k nahlédnutí v příloze 1 na obrázcích 39,40 a 41.

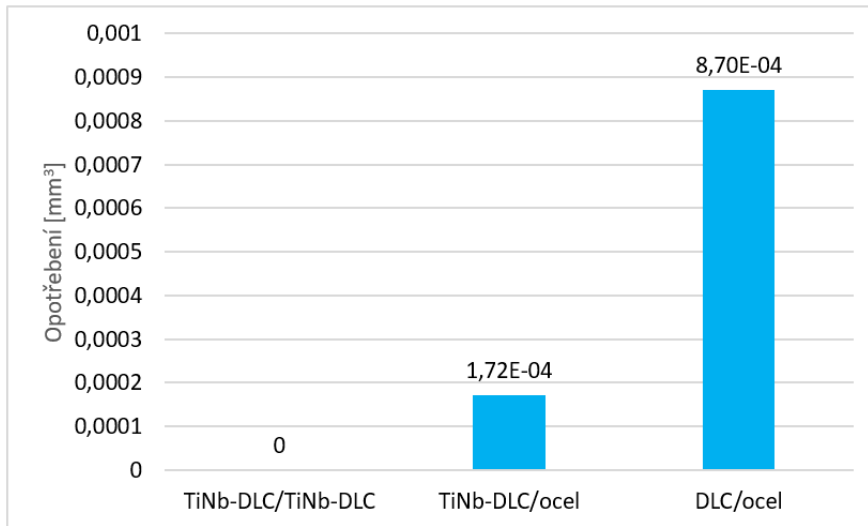


Obrázek 36 Porovnání průběhu koeficientu tření mezi TiNb-DLC/Ocel a DLC/Ocel

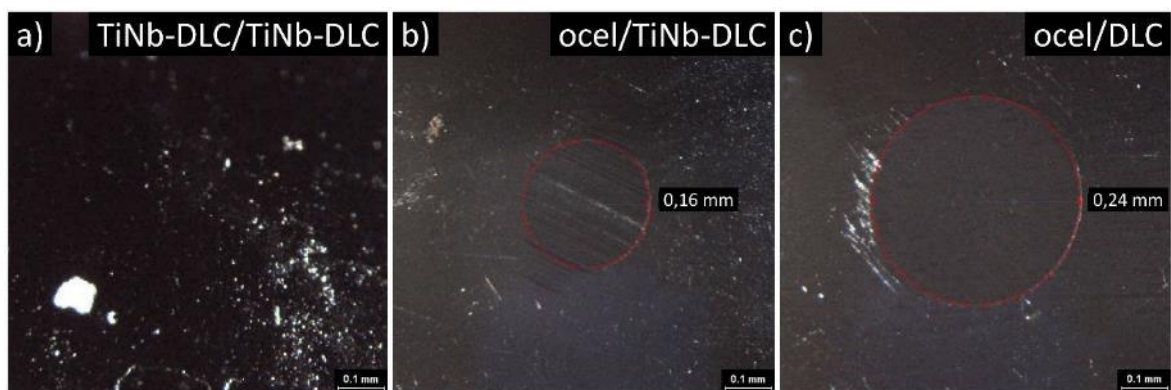
3.4.2 Opotřebení kuličky

Výsledky opotřebení byli měřeny na optickém mikroskopu Nikon SMZ1500.a následně vyhodnoceny podle normy ASTM G 99 – 034. Kontakt TiNb-DLC/ TiNb-DLC dosahoval nejen nejmenšího koeficientu tření ale také prakticky

neměřitelného opotřebení kuličky. Na nepovlakovaných pinech z oceli 100Cr6 již měřitelné opotřebení bylo. Ocelová kulička měla v kontaktu s TiNb-DLC o 80 % menší úbytek materiálu než v kontaktu se standartním čistým DLC. Pro potvrzení tohoto výborného výsledku by ovšem mělo být nutné udělat daleko více měření. Porovnání opotřebení je znázorněno na obrázku 37 a 38.



Obrázek 37 Porovnání opotřebení kuliček po ujetí 188m



Obrázek 38 Opotřebení kuliček po ujetí 188 m

4 Závěr

Cílem této práce bylo modifikovat standartní DLC vrstvu za účelem snížení koeficientu tření a opotřebení v motorové části mezi zdvihátkem a vačkou. Na základě provedených experimentů jsem dospěl k následujícím poznatkům:

1. Největší potenciál má povlak na obou částech stykové plochy s vrstvou TiNb-DLC. Toto uspořádání by přineslo snížení koeficientu tření o 0,033 a také by se velice zlepšila otěruvzdornost.
2. Vrstva TiNb-DLC také přispívá k velice malému snížení tření v kontaktu s ocelí, ovšem výrazně přispěla k zmenšení otěru na ocelové kuličce. Toto výrazné snížení opotřebení by mohlo být způsobeno tvorbou tribochemické mezivrstvy.
3. Dopováním titanu a niobu do uhlíkové matrice se snížila tvrdost vrstvy přibližně o 2 GPa a modul pružnosti o 8 GPa, ale nedošlo ke zhoršení adheze.

Pro ověření získaných poznatků by bylo nutné testování v reálném motoru, díky kterému by bylo možné prokázat příznivý vliv snížení pasivních ztrát v motoru na zvýšení točivého momentu, výkonu ale také na snížení spotřeby.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Vačkový mechanismus [1]	9
Obrázek 2 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na zdvihu [3]	10
Obrázek 3 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na rychlosti [3]	10
Obrázek 4 Závislost úhlu natočení vačkové hřídele na zrychlení [3]	11
Obrázek 5 Pitting [7].....	12
Obrázek 6 Polish wear [8].....	12
Obrázek 7 Scuffing [10]	13
Obrázek 8 vazby v DLC vrstvě [12]	15
Obrázek 9 Závislost koeficientu tření na druhu dopování DLC vrstvy [15].....	16
Obrázek 10 Třecí charakteristika (0W20 + ZDDP + MoDTC) [17].....	17
Obrázek 11 Změna koeficientů tření jako funkce teploty pomocí maziv skupiny [18].....	18
Obrázek 12 Vliv koncentrace aditiva na koeficient tření v [18]	19
Obrázek 13 Porovnání DLC-W a WSC-Cr vrstev oproti standartnímu zdvihátku [19]	20
Obrázek 14 Vliv maziv na koeficient tření Ti-C:H [20].....	21
Obrázek 15 Závislost koeficientu tření na mazivu [21]	21
Obrázek 16 Závislost koeficientu tření na mazivu a protějším povrchu [22]	22
Obrázek 17 Porovnání otěru dopovaného W, WC, Ti a Nb [16].....	22
Obrázek 18 opotřebení jednotlivých povlaků [22]	23
Obrázek 19 Opotřebení oceli v kontaktu s vybranými povlaky v minerálním oleji [21].....	24
Obrázek 20 Závislost teploty oleje na opotřebení povlaku [18].....	24
Obrázek 21 Porovnání zdvihátek povlakem dopovaným zirkoniem s ocelovým [17].....	25
Obrázek 22 Porovnání opotřebení standartních zdvihátek a zdvihátek s DLC-W vrstvou [19].....	25
Obrázek 23 Rockwell a Scratch test provedený na DLC vrstvě dopované Zirkonem [17].....	26
Obrázek 24 adheze DLC vrstvy k substrátu [16]	27
Obrázek 25 Povrch zdvihátka povlakovaný DLC vrstvou po ujetí 600 km	29
Obrázek 26 Erozní zóna na zdvihátku	30
Obrázek 27 Vrypová zkouška povlaku TiNb-DLC.....	32
Obrázek 28 Vrypová zkouška povlaku DLC	32
Obrázek 29 Porovnání povlaků TiNB-DLC a DLC Rockwell testem.....	33
Obrázek 30 Profil povrchu TiNb-DLC.....	33
Obrázek 31 Profil povrchu DLC	34
Obrázek 32 Složení vrstvy TiNb-DLC	35
Obrázek 33 Složení vrstvy DLC.....	35

Obrázek 34 Ukázka konfigurace měření v olejové lázni	36
Obrázek 35 Průměr koeficient tření	37
Obrázek 36 Porovnání průběhu koeficientu tření mezi TiNb-DLC/Ocel a DLC/Ocel	37
Obrázek 37 Porovnání opotřebení kuliček po ujetí 188m	38
Obrázek 38 Opotřebení kuliček po ujetí 188 m.....	38
Obrázek 39 Průběh koeficientu tření TiNb-DLC/TiNb-DLC.....	46
Obrázek 40 Průběh koeficientu tření TiNb-DLC/ocel.....	46
Obrázek 41 Průběh koeficientu tření DLC/ocel	47

Seznam literatury

- [1] DOBRENIZKI, , TREMMEL, WARTZACK et al. *Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings – Influence of engine oil, temperature and camshaft speed* [online]. 2016 [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897216309252>
- [2] *2017 Design Contest*. In: *Keywordsuggest* [online]. b.r. [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <http://keywordsuggest.org/gallery/382494.html>
- [3] LAWES, , HAINSWORTH a FITZPATRICK. Impact wear testing of diamond-like carbon films for engine valve-tappet surface. In: *Elsevier.com* [online]. 2010 [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810000505>
- [4] *DYNAMICKÝ VÝPOČET ROZVODU ŠESTIVÁLCOVÉHO MOTORU S 24 VENTILY*. Brno, 2013. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce RADIM DUNDÁLEK
- [5] *NÁVRH VAČKY* [online]. In: . 2013 [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2419>
- [6] NEALE, M. *The tribology handbook*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 07-506-1198-7.
- [7] *KONSTRUOVÁNÍSTROJŮ mechanismy: Opotřebenía mazánívačkových mechanismů* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-07-06].
- [8] *Worn Hydraulic tappets and camshaft* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <https://www.clubpolo.co.uk/topic/220317-worn-hydraulic-tappets-and-camshaft/>
- [9] *VW and Audi TDI camshaft inspection and replacement - SOHC PD engine* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.myturbodiesel.com/wiki/camshaft-lobe-wear-inspection-and-replacement-on-tdi-pd-engine/>
- [10] URBAN, FILIP. *KONTAKT VAČKY A ZDVIHÁTKA*. Brno, 2012. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce PETR ŠPERKA
- [11] *Valve Lifter* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.autozone.com/repairinfo/common/repairInfoMain.jsp?target>

- [12] VRBKA, Martin. *STUDIUM VLIVU CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE NA ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ TŘECÍCH POVRCHŮ*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] LOUDA, Martin. *Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu* [online]. b.r. [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu>
- [14] 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>
- [15] ZHAO, , LI, JI, WANG, ZHOU a CHEN. *Ti-DLC films with superior friction performance* [online]. 2010, , 342-349 [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963510000282?via%3Dihub>
- [16] 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>
- [17] BEWILOGUA, , COOPER, SPECHT, SCHRÖDER, WITTORF a GRISCHKE. *Effect of target material on deposition and properties of metal-containing DLC (Me-DLC) coatings* [online]. 2000 [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897200006666?via%3Dihub>
- [18] ABDULLAH TASDEMIR, , WAKAYAMA, TOKOROYAMA, KOUSAKA, UMEHARA, MABUCHI a HIGUCHI. *The effect of oil temperature and additive concentration on the wear of non-hydrogenated DLC coating* [online]. 2014 [cit. 2017-07-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X14001479>
- [19] POLCAR, Tomáš. *Aplikace tenkých vrstev na zdvihátka ventilů motoru formule CTU CarTech* [online]. 2012 [cit. 2017-07-03]. Dostupné z: http://cvutmedialab.org/fileadmin/user_upload/ATV_zprava.pdf

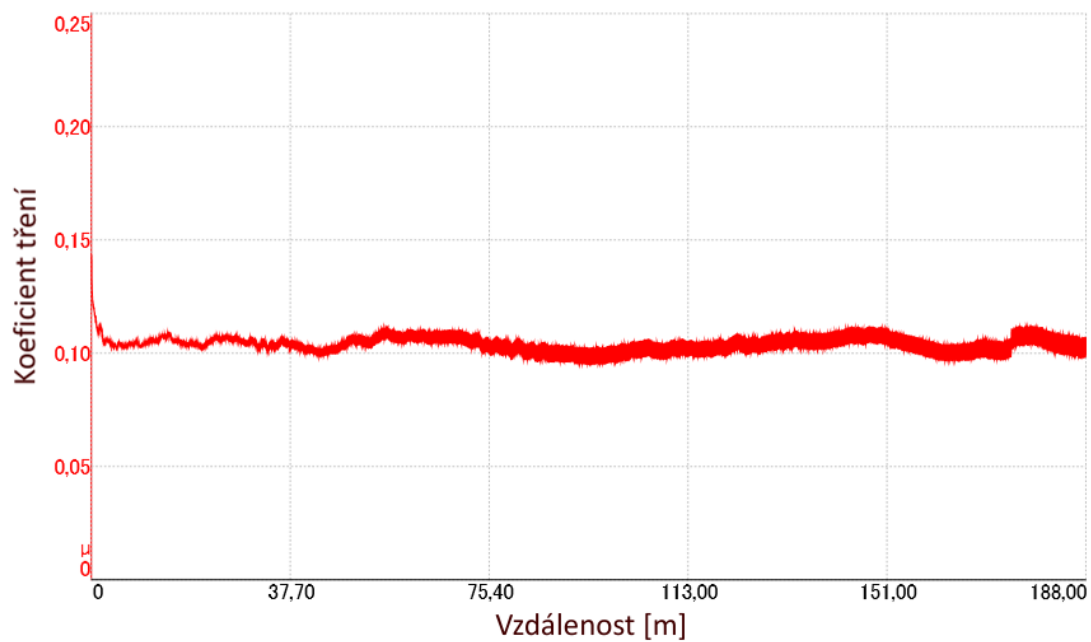
- [20] KLEČKA, Vojtěch. *VLIV OLEJOVÝCH ADITIV NA TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI DLC POVLAKŮ*. Praha, 2015. ČVUT Fakulta strojní. Vedoucí práce Ladislav Cvrček
- [21] KALIN, , ROMAN, OŽBOLT a VIŽINTIN. *Metal-doped (Ti, WC) diamond-like-carbon coatings: Reactions with extreme-pressure oil additives under tribological and static conditions* [online]. 2010 [cit. 2017-07-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609010002907>
- [22] KALIN, M. *A comparison of the tribological behaviour of steel/steel, steel/DLC and DLC/DLC contacts when lubricated with mineral and biodegradable oils* [online]. b.r., 2006 [cit. 2017-07-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805004540>
- [23] DAI, , WU a WANG. *Preparation, characterization and properties of Cr-incorporated DLC films on magnesium alloy* [online]. 2010, , 1307-1315 [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963510002268>
- [24] CAIS, Jaromír. *Elektronová mikroskopie. Metalografie* [online]. 2015 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektronova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analiza_metodicka_p_rirucka.pdf
- [25] WDS. *Enpedie* [online]. 2013 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: <http://enpedie.cz/wiki/WDS>
- [26] NOVOTNÝ, Tomáš. *Studium mechanických vlastností tenkých vrstev*. Brno, 2012. Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA. Vedoucí práce Vilma Buršíková
- [27] *Nanoindentace a vrypová zkouška* [online]. b.r. [cit. 2017-07-16]. Dostupné z: http://www.rcptm.com/wpcontent/uploads/2015/12/vp4_Katalog_RCPT_M_nanotest_cs.pdf
- [28] FOŘT, Tomáš. *CHARAKTERIZACE NANOSTRUKTUR DEPONOVANÝCH PVD A CVD TECHNOLOGIEMI* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-07-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20198. DOKTORSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce JAROSLAV SOBOTA.

- [29] 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.
- [30] KŘÍŽ, Antonín. *Tribologická analýza Pin-on-disk* [online]. 2004 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf

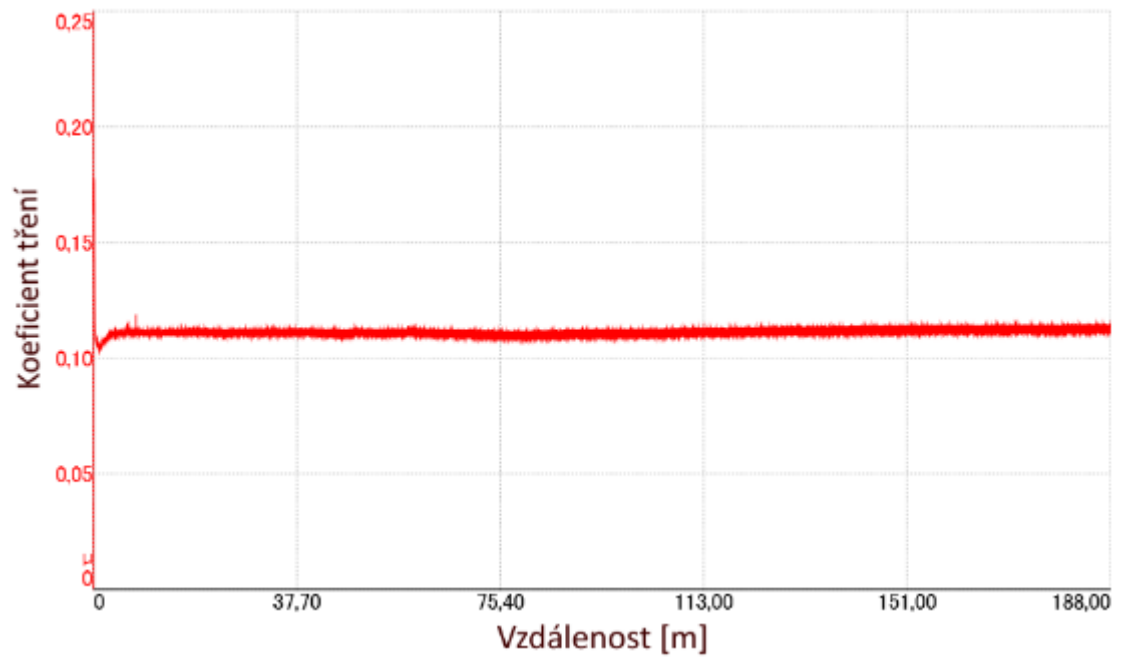
Přílohy



Obrázek 39 Průběh koeficientu tření TiNb-DLC/TiNb-DLC



Obrázek 40 Průběh koeficientu tření TiNb-DLC/ocel



Obrázek 41 Průběh koeficientu tření DLC/ocel