

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Studijní program: B2341 Strojírenství

Obor: 3911 R 018 Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Ověření povlaků snižujících opotřebení třecích dvojic

Examination of contact layers reducing friction pair wear

Petr Bartoníček

KMT - B - 124

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Rufert - *Škoda auto a.s*

Rozsah práce a příloh :

Počet stran:	45
Počet obrázků:	31
Počet tabulek:	2
Počet příloh:	3 + přiložené CD

Oficiální zadání



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Katedra materiálu

ANOTACE

Studijní program: B2341 Strojírenství
Jméno: Petr Bartoníček
Téma práce: Ověření povlaků snižujících opotřebení třecích dvojic
Číslo BP: KMT - B - 124
Vedoucí BP: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. – KMT TU Liberec
Konzultant BP: Ing. Pavel Rufert – ŠKODA AUTO a.s.

Předložená bakalářská práce zkoumá tenké diamantové vrstvy aplikované za účelem snížení opotřebení a snížení pasivních odporů u třecích dvojic. Jedná se o nanovrstvy, vytvořené plazmaticky, metodou PACVD. Jako základní materiál pro povlakování byla použita ocel ČSN 41 5260

Klíčová slova: spalovací motor Škoda 1,2l,
povlaky,
uhlík,
PACVD,
měření tribologických vlastností



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Katedra materiálu

ANNOTATION

Study Program	B2341 Engineering
Name:	Petr Bartoníček
Theme Of Thesis:	Checking coatings opprobrious attrition frictional couples
Number Of Thesis:	KMT - B - 124
Leader Of Thesis:	Doc. Ing. František Stuchlík, CSc. – <i>KMT TU Liberec</i>
Consulter Of Thesis:	Ing. Pavel Rufert – <i>ŠKODA AUTO a.s.</i>

The submitted bachelor's thesis examines thin diamond layers applied in order to reduce wear and passive resistance of friction pairs. It deals with nanolayers, plasmatically produced by the PACVD method. The basic material used for coating was steel according to ČSN 41 5260.

Key Words: Skoda 1,2l internal combustion engine,
coatings,
carbon,
PACVD,
measurement of tribologic nature of a material

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Františku Stuchlíkovi, CSc. a Ing. Štěpánce Tůmové za jejich odborné vedení a všem členům katedry materiálu za jejich cenné připomínky, rady a pomoc, a všem dalším, kteří mi byli při mé bakalářské práci jakkoliv nápomocni. Mé díky také patří pracovníkům Centre Of Excellence NANODIAM z univerzity Politechnica Łódzka za pomoc při řešení experimentální části práce.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 26. května 2006

Podpis:

Petr Bartoníček
Palackého 28/10
293 01 Mladá Boleslav

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Spalovací motor Škoda 1,2l	10
2.1.1	Motor 1,2l pro vozy Fabia.....	10
2.1.2	Materiál a zpracování jednotlivých součástí motoru	11
2.1.3	Třecí dvojice v motoru	12
2.2	Povrchové úpravy a vrstvy.....	13
2.2.1	Vrstvy.....	13
2.2.2	Opotřebení.....	15
2.2.3	Tření.....	16
2.2.4	Technologie vytváření povlaků	16
2.2.4.1	Metoda CVD.....	18
2.2.4.2	Metoda PACVD.....	18
2.2.4.3	Metoda PVD	18
2.3	Chemické vazby	19
2.3.1	Kovalentní vazba	20
2.3.1.1	Vazba typu σ	20
2.3.1.2	Vazba typu π	21
2.3.2	Hybridizace.....	22
2.3.2.1	Hybridizace sp	23
2.3.2.2	Hybridizace sp^2	23
2.3.2.3	Hybridizace sp^3	23
2.4	Uhlík	24
2.4.1	Diamant	24
2.4.2	Grafit	25
2.4.3	Karbiny.....	27
2.5	Měření charakteristik povlaků.....	27
2.5.1	Určení tloušťky povlaků.....	27
2.5.2	Měření mikrotvrdomosti tenkých vrstev	28
2.5.3	Měření tribologických vlastností	29
3	Experimentální část.....	31
3.1	Návrh principu zkušebního zařízení na vyhodnocování vlastností třecích dvojic	31
3.2	Vyhodnocení diamantových nanovrstev	32
3.2.1	Metody nanášení diamantových nanovrstev	33
3.2.1.1	Metoda RF.....	34
3.2.1.2	Metoda MW/RF.....	36
3.2.1.3	Metoda PVD + CVD.....	37
3.2.2	Měření tribologických vlastností	38
3.2.3	Výsledky měření	40
4.	Závěr	42
5.	Použitá literatura	44
6.	Seznam příloh	45

Seznam použitých zkratk a symbolů

HTP	vysoký točivý moment (High Torque Performance)
OHC	ventilový rozvod - vačková hřídel v hlavě válce (Over Head Camshaft)
MPI	vícebodové vstřikování (Multipoint Injection)
E-Gas	elektronická vazba mezi pedálem a škrtkací klapkou
CVD	chemická depozice vrstev (Chemical Vapour Deposition)
PVD	fyzikální depozice vrstev (Physical Vapour Deposition)
IBAD	(Ion Beam Assisted Deposition)
PACVD	fyzikálně chemická depozice vrstev ((Plasma Assisted CVD)
JAR	Jihoafrická republika
AO	atomový orbita
MO	molekulový orbital
HAO	hybridizovaný AO
r	poloměr koule [mm]
d, D	průměry kaloty [mm]
Ra	střední aritmetická hodnota drsnosti [μm]
RF	radiofrekvence (radiofrequency) [W]
MW	mikrovlny (microwave) [W]
V _b	předpětí na elektrodě RF [V]

1 Úvod

Mnohé užité vlastnosti kovů a slitin jsou určovány stavem povrchu. Při mechanickém zatěžování těles mohou mít vlastnosti povrchu velký vliv, zejména při cyklickém namáhání. Proto se trvale věnuje velká pozornost jak poznání vlastností povrchu, tak i jejich zlepšování nebo vytváření povlaků se zcela odlišnými vlastnostmi.

Pomocí správné aplikace tribotechniky lze dosáhnout významných úspor v oblastech snížení spotřeby energie k pohonu strojů, zvýšení životnosti strojů a zařízení, snížení nákladů na údržbu a opravy strojů.

O významu povrchů a povlaků svědčí velký počet teoretických i experimentálních prací, které charakterizují rozvíjející se obor povrchového inženýrství. [4]

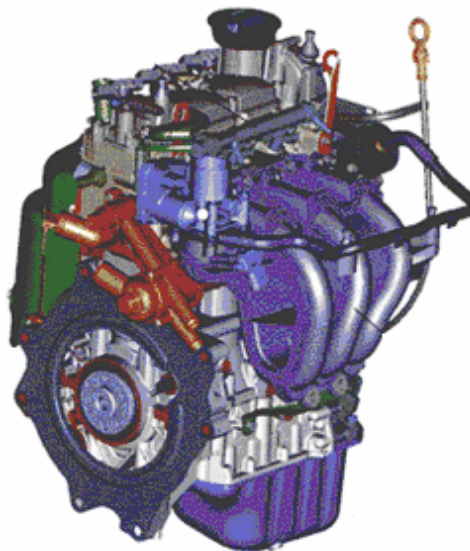
Teoretická část předložené bakalářské práce se zabývá rozбором motorů Škoda 1,2l, rozdělením a vytvářením vrstev. Dále zahrnuje popis typů chemických vazeb, uhlíku a jeho alotropických modifikací. Na konec jsou uvedeny možnosti měření charakteristik vrstev.

V experimentální části je popsán teoretický návrh přístroje na měření tribologických vlastností, přesněji třecí síly. V další části byly popsány způsoby vytváření uhlíkových vrstev metodou PACVD. Pomocí přístroje TESTER T11 byly aplikované uhlíkové vrstvy vyhodnoceny a data zpracována do grafů.

2 Teoretická část

2.1 Spalovací motor Škoda 1,2l

Spalovací motor je stroj, který vnitřním nebo vnějším spálením paliva přeměňuje jeho chemickou energii na mechanickou práci působením na píst nebo využitím reakční síly. Jeho účinnost je výrazně menší než u motoru elektrického, odpadní teplo tvoří cca 80% vložené energie.



Obr. 2.1.: Motor Škoda 1,2 [1]

2.1.1 Motor 1,2l pro vozy Fabia

Nové motory škoda (obr. 2.1) se vyrábějí ve dvou verzích, a to se dvěma a se čtyřmi ventily na válec.

Motor Škoda 1,2l HTP/40 kW je řadový, kapalinou chlazený, zážehový tříválec se čtyřikrát uloženým klikovým hřídelem a jedním protiběžným vyvažovacím hřídelem. Blok i hlava válců jsou zhotoveny z hliníkové slitiny. Ventilový rozvod je OHC se dvěma ventily pro každý válec.

Motor je vybaven bezdotykovým elektronickým zapalováním se třemi zapalovacími cívkami, nasazenými přímo na zapalovacích svíčkách, sekvenčním vícebodovým vstřikováním paliva MPI a elektronickým ovládáním škrtkové klapky bez mechanické vazby na pedál plynu, tzv. E-Gas. Zapalování i vstřikování je řízeno novým motomanagementem, optimalizovaným pro dosažení co nejnižší spotřeby paliva. [1]

Technické parametry:

motor

1,2 HTP/40kW

počet válců/ventilů na válec	3/2	
objem motoru	1198 cm ³	
max. výkon	40kW / 4750min ⁻¹	
max. točivý moment	106Nm / 3000min ⁻¹	
kombinovaná spotřeba	5,9l / 100km	[1]

2.1.2 Materiál a zpracování jednotlivých součástí motoru

Blok válců - tlakový odlitek z hliníkové slitiny

Vložky válců - odlitek z šedé litiny, zalité do bloku při výrobě

Olejová vana - výlisek z plechu

Hlava válců - hliníková slitina

Kliková hřídel - odlitek z tvárné litiny, hřídel je uložen na 4 ložiskách v bloku motoru, na hřídeli je 6 vyvažovacích závaží, v bloku motoru je vyvažovací hřídel, který má stejné otáčky, ale opačný smysl otáčení

Ojnice - kované, ocel

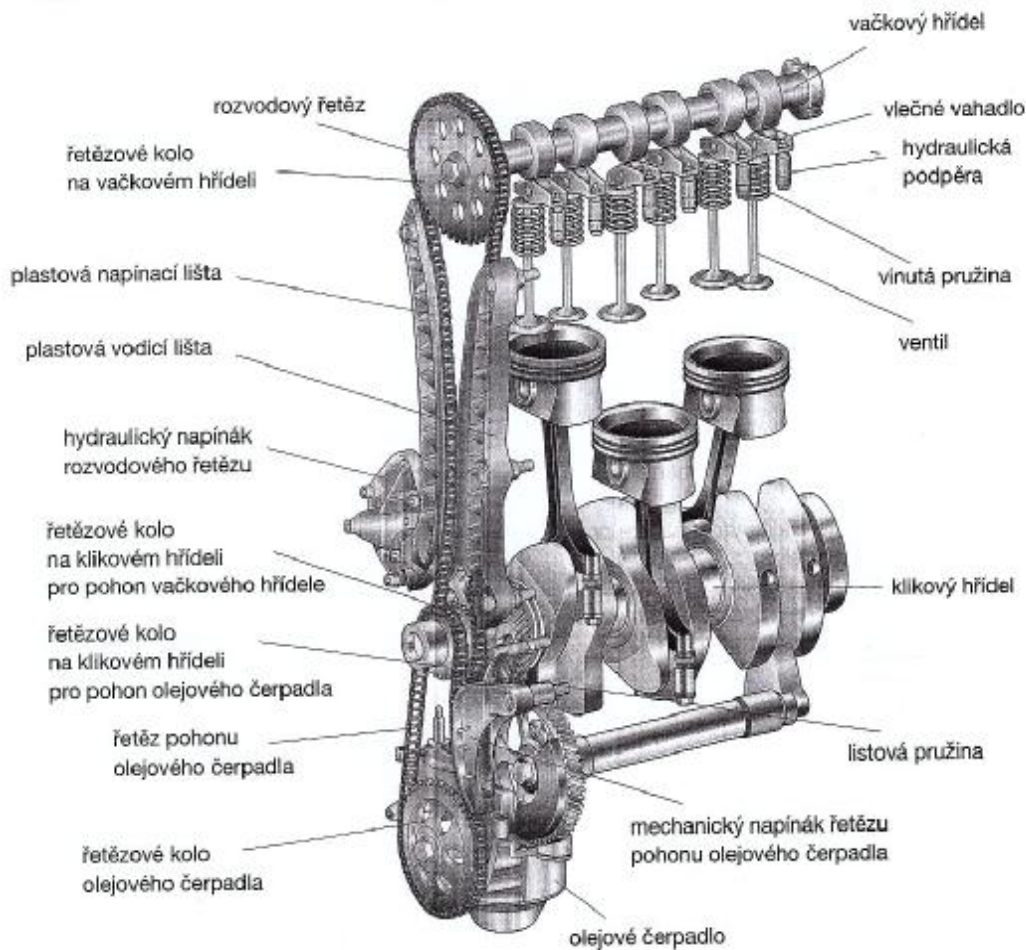
Písty - slitina hliníku, na povrchu pláště je 10μm kluzná vrstva, písty jsou osazeny třemi pístními kroužky

Pístní čep - je dutý, plovoucí v pístu i ojnici. Tlakový olej se k pístu dostává z klikového hřídele vývrtem v ojnici.

Hlavní kluzná ložiska - vyrobená z plechu s cínovou výstelkou ve třech rozměrových třídách

Ojniční hlavní ložiska - 3 rozměrové třídy, díra v ojniční hlavě se vyrábí v jednom tolerančním poli. Zajištění proti pootočení ojničních a kluzných hlavních ložisek je pomocí tření.

Vačkový hřídel - tzv. skládaná konstrukce (ocelová trubka, na kterou jsou navlečeny a přesně usazeny vačky), je poháněn rozvodovým jednořadým řetězem od klikového hřídele. Plastové lišty a hydraulický napínák rozvodového řetězu zajišťují správné vedení a napnutí. Vačkový hřídel je uložen v kluzných ložiskách hlavy motoru, ventily se ovládají pomocí vlečných vahadel s kladkou, hydraulická podpěra slouží k vymezení ventilové vůle. [2]



Obr. 2.2.: 2-ventilové provedení motoru Škoda 1,2l [2]

2.1.3 Třecí dvojice v motoru

V motoru Škoda 1,2l (obr. 2.2) je možno nalézt různé třecí dvojice. K nejvýznamnějším patří klikový hřídel s hlavními kluznými ložisky, na klikovém mechanismu jsou v kontaktu ojnice s klikovým hřídelem. Ojnice je dále spojena přes kluzné ložisko s pístním čepem a spolu tvoří třecí trojici píst, čep a ojnice. Další významnou třecí dvojicí je píst a vložka válce. V pístu jsou pístní kroužky, které slouží k lepšímu těsnění mezi pístem a vložkou. Mezi další třecí dvojice patří ventil s ventilovým vodítkem. Ventily se pohybují pomocí vačkového hřídele, který je poháněn pomocí rozvodu od klikového hřídele. Od klikového hřídele je pomocí řetězových kol poháněno také olejové čerpadlo.

Za díly motoru vhodné pro aplikaci vrstev můžeme považovat díly vytypované pro carbonitrooxidaci, které jsou uvedeny v příloze č. 1.

2.2 Povrchové úpravy a vrstvy

2.2.1 Vrstvy

Životnost a spolehlivost částí, strojů a zařízení jsou podstatnou měrou ovlivňovány stavem povrchu jednotlivých částí, neboť ten je ve styku s okolním prostředím (koroze, erozní a kavitační opotřebení) nebo dochází ke kontaktu povrchů součástí (adhezivní a abrazivní opotřebení, kontaktní únava).

Materiál, i když má nejrůznější vlastnosti, jako celek často nesplňuje požadavky na všech úrovních, proto se přistupuje k řízeným změnám stavu povrchu součástí.

Technologie povrchových úprav lze rozdělit do tří skupin:

- a) modifikace stavu povrchových vrstev : plastická deformace za studena, povrchové kalení, chemicko-tepelné zpracování, fyzikálně-chemické procesy (iontová implantace)
- b) vytváření povlaků na strojních dílech : nanášení chemicky i strukturně odlišných materiálů na podkladový materiál, klasické technologie - návary, nástřiky, galvanické a katalické povlaky a nové technologie - CVD a PVD
- c) kombinace předcházejících postupů (hybridní povlaky) : např. nitridace a následně PVD TiN, nebo IBAD - Ion Beam Assisted Deposition

Povrchové vrstvy snižující opotřebení a třecí odpory

Iontová implantace - dopad svazku vhodně zvolených iontů na základní materiál. Část iontů proniká hlouběji do povrchové vrstvy a je „zabudována“ do mřížky základního materiálu, přičemž urychlené ionty způsobují vznik mřížkových poruch (Frenkelovy poruchy, shluky vakancí a intersticií). Současně dochází k odprašování matrice a tím k očištění a aktivaci jejího povrchu. Iontovou implantací lze ovlivňovat vlastnosti povrchu od hloubky jednotek atomových rovin až po několik mikrometrů. [4]

Povlaky

Podle tloušťky dělíme povlaky na

- tenké (velikost nm až μm)

- tlusté (desetiny mm až mm)

Podle chemického a fázového složení dělíme povlaky na

- homogenní
- heterogenní

nebo

- jednovrstvé
- vícevrstvé

Kde homogenní povlaky jsou tvořeny látkou jednoho typu stejného nebo málo proměnlivého složení. Struktura heterogenních povlaků je tvořena dvěma nebo více fázemi různého složení a vlastností.

Vícevrstvé povlaky jsou tvořeny různými fázemi nebo proměnným složením jedné fáze uspořádanými ve vrstvách.

Podle účelu použití dělíme povlaky na:

- korozivzdorné
- odolné vůči opotřebení
- povlaky se specifickými vlastnostmi a účely použití (vysoká odrazivost, adsorbce světelného záření, definované elektrické, magnetické nebo jiné fyzikální vlastnosti, velký nebo malý koeficient tření) [3]

V současnosti jsou z hlediska typů tenkých vrstev jednofázové vrstvy méně používány, spojují se pozitivní vlastnosti jednotlivých vrstev. Řazení vrstev odpovídá jejich specifickým vlastnostem, jako základní se dává vrstva, která má dobrou přilnavost a jako poslední tvrdá vrstva odolná proti opotřebení.

Vytvářením povlaků různých vlastností i použití dává možnost lepšího využití strojních součástí, nářadí. O volbě vhodné metody rozhodují požadované vlastnosti, jejich spolehlivost zajištění, technické i ekonomické podmínky. [4]

Vrstvy snižující opotřebení

Mezi vrstvy snižující opotřebení patří TiN, TiAlN, TiCN, Al₂O₃, uhlíkové vrstvy. Tyto vrstvy se vhodně kombinují s „měkkými“ vrstvami, které mají nižší

tvrdost než otěruvzdorné vrstvy a vytvářejí kluzný povrch. [4]

Karbidové vrstvy vytvářené metodou vysokorychlostního žárového nástřiku WC-Co, WC-Co-Cr a NiCrBSi-WC jsou odolné proti opotřebení vlivem obraze. [15]

2.2.2 Opotřebení

Opotřebení je definováno jako nežádoucí změna povrchu součástí vznikající oddělováním částic mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými chemickým, elektrochemickým, elektrickým nebo jiným působením, které mohou ovlivňovat jak jejich průběh, tak i intenzitu v kladném i záporném smyslu.

Podle převládajících podmínek rozeznáváme různé typy opotřebení a to : adhesivní, abrasivní, únavové, kavitační, vibrační, erosivní.

Adhesivní - nejrozšířenější opotřebení, jehož příčinou jsou síly způsobující odtrhávání částic materiálu. K poruše vrstvy dojde v místech nesouvislé vrstvy mazání, kde dojde k mikroskopickému styku povrchů a v důsledku zvýšené teploty k místnímu natavení částic.

Abrasivní - opotřebení, které vzniká za situace, kdy mezi třoucí se povrchy vniknou cizí částice, které přilnou k jednomu povrchu a začnou dělat rýhy na druhém povrchu (nejnebezpečnější typ opotřebení kluzných součástí). Mezi abrasivní opotřebení patří i případy, kdy velká drsnost jednoho povrchu způsobí opotřebení druhého povrchu v dvojici.

Únavové - při cyklickém namáhání povrchů stykovým napětím vzniká únavové opotřebení, které začíná v podpovrchové, nebo povrchové vrstvě poruchou materiálu a vede až k oddělování částic od základního materiálu.

Kavitační - kavitací rozumíme vytváření a zánik dutin vyplněných parou a plyny uvnitř rychle se pohybující kapaliny za podmínky sníženého tlaku v kapalině až na kritickou hodnotu blízkou tlaku nasycených par. Když se tlak v okolí dutin opět zvýší nad tlak páry, začne proudit kapalina dovnitř dutiny a při tom dojde tlakovým rázům, které u povrchu materiálu způsobuje jeho rozrušení.

Vibrační - dochází k oddělování částic materiálu vlivem vzájemných oscilujících tangenciálních posunů malé amplitudy.

Erosivní - k oddělování částic materiálu dochází částicemi nesenými kapalným nebo plynným mediem, nebo přímo tímto mediem. [4]

2.2.3 Tření

Tření je jev, který vzniká při pohybu tělesa po tělese. Většinou se třením myslí tření mezi pevnými tělesy. Tření s kapalným nebo plynným prostředím se označuje jako odpor prostředí.

Tření rozlišujeme klidové, smykové a valivé. Klidové tření vzniká mezi tělesy vzájemně se nepohybujícími, smykové tření vzniká mezi vzájemně se posouvajícími tělesy a valivé při odvalování tělesa kruhového průřezu po podložce.

Měřítkem odporů proti pohybu je součinitel tření f , který je dán vztahem (2.1).

$$f = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.1)$$

kde je : F_t ...třecí síla [N]
 F_n ...normálová (přítlačná) síla [N]

Hodnoty součinitele smykového tření závisí na

- materiálu dvojice těles
- drsnosti těles
- látkách (mazivo) na povrchu těles

Součinitel smykového tření je obvykle menší, než součinitel klidového tření.

Tření nelze zcela odstranit, proto se hledají způsoby, jak je co nejvíce zmenšit. [6]

2.2.4 Technologie vytváření povlaků

Vytváření povlaků se dělí podle toho, v jaké formě se povlak nanáší:

- metody využívající atomů, iontů a molekul ve formě par
- metody nanášení ve formě tekutých nebo pevných částic
- užití kompaktních materiálů v pevném stavu (příprava organických povlaků)

Technologie vytváření povlaků se dělí do dvou etap. Do první etapy patří úprava povrchu před nanášením a druhá etapa zahrnuje samotné nanášení.

Příprava povrchu - odstranění látek, které by bránily adhezi povlaku se základním materiálem. Výběr způsobu přípravy materiálu záleží na následném nanášení, technických možnostech (rozměry a tvar těles), a také na nákladnosti operace.

Způsoby přípravy - mechanické: broušení, tryskání

- chemické: odmašťování, moření, oplachy v roztocích
- fyzikální: iontové odprašování [4]

Nanášení vrstvy - viz. tabulka 2.1

Tab. 2.1: Typy procesů [3]

procesy probíhající ve vakuu - reaktivní	PVD - Physical Vapour Deposition - iontové plátování - naprašování - napařování CVD - Chemical Vapour Deposition - disociace z plynů
Elektrolytické povlakování	- ve vodném roztoku - v bezvodném roztoku - v taveninách
Termické nástřiky	- plamenem - elektrickým obloukem - plazmou - detonací
Napařování	- plamenem - elektrickým obloukem - neodtavnou elektrodou - odtavnou elektrodou

Plátování	- adhezivním třením - válcováním - výbuchem
-----------	---

Stále častěji se uplatňují kombinace metod pro přípravu povlaků, např. nanesení povlaku a jeho přetavení.

Tato práce bude zaměřena na tenké uhlíkové vrstvy. K přípravě tenkých vrstev se využívají jak fyzikální (PVD), chemické (CVD), tak i fyzikálně chemické (PACVD) postupy.

2.2.4.1 Metoda CVD

Vytváření z látek, které jsou v podobě organických nebo anorganických sloučenin. Sloučeniny vznikají chemickou reakcí (syntézou) na povrchu ohřátého předmětu. Nevýhodou jsou poměrně vysoké teploty, které se pohybují kolem 700 - 1500 °C. Tím omezují výběr materiálu, aby při depozici nedošlo k tepelné degradaci základního materiálu součásti. Další nevýhodou je vyšší potřebný tlak.

Zvláštním případem metody CVD je postup, který využívá organokovové komplexy jako výchozí látky (MOCVD - Metal organic Chemical Vapour Deposition). [4] [5]

2.2.4.2 Metoda PACVD

Fyzikálně chemická metoda spočívá v tom, že chemické reakce probíhají v ionizovaném prostředí (plazma), tím se sníží nároky na vysokou teplotu. Procesy probíhají v plazmatu výboje hořícího v plynné fázi, nejčastěji směsi dvou plynů, které spolu reagují a vytvářejí na povrchu substrátu vrstvu požadovaného složení. [5]

2.2.4.3 Metoda PVD

Technologie PVD je odpařování nebo rozprašování pevného materiálu ve vakuu. Tyto metody se dají použít i na depozici vrstev na velmi tenké materiály. Díky nižší nanášecí teplotě nedochází k tepelné degradaci

základního materiálu. Nevýhodou této metody je především požadavek vysokého vakua ($10^{-3} \div 10^{-7}$ Pa) a omezená geometrie vzorku. Na rozdíl od nanášení z plynné fáze nemohou ionty z pevného materiálu bombardovat předmět ze všech stran. [4] [5]

2.3 Chemické vazby

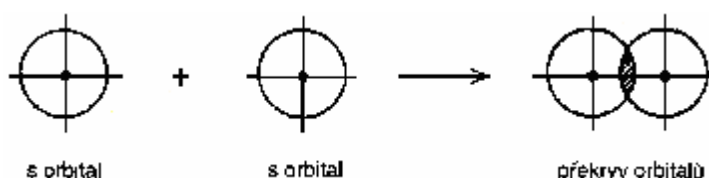
S výjimkou vzácných plynů jsou volné atomy schopny jen zřídka kdy samostatné existence (pouze za vysokých teplot). Za běžných podmínek se sdružují ve složitější stabilní útvary - molekuly. Příčinou soudržnosti jsou valenční síly (chemická vazba).

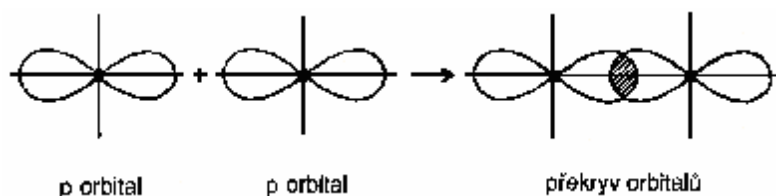
Předpokladem vzniku jedné či více vazeb mezi atomy je přiblížení, při kterém dojde k průniku elektronových obalů a snížení potenciální energie systému. Pokud při průniku nedojde ke snížení potenciální energie, vazba nevznikne.

Nejobecnější teorií chemické vazby je teorie molekulových orbitalů (MO - teorie). Základní představa spočívá na předpokladu, že při průniku atomových orbitalů dochází k jejich překryvu a přeměně na orbitály molekulové.

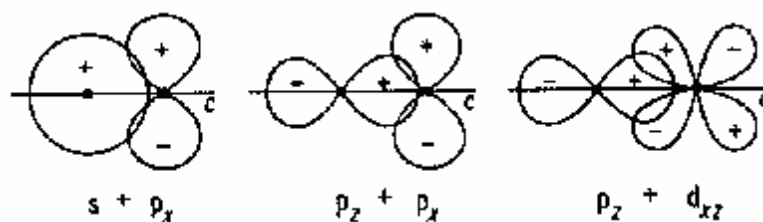
Pro vznik MO překryvem a lineární kombinací AO platí tato pravidla:

- 1) překryv dvojice AO je účinný, tj. vede ke vzniku vazby, jen tehdy, nemají-li původní AO příliš rozdílnou energii
- 2) počet vznikajících MO je vždy roven počtu AO, které se překryvu účastní
- 3) účinný překryv je podmíněn stejnou symetrií AO k ose vznikající vazby (obrázky 3.2 a 3.3)
- 4) energetický rozdíl dvojice vzniklých MO je závislý na integrálu překryvu S původních AO
- 5) Vzniku MO se účastní pouze AO vazebných elektronů, vnitřní AO se neúčastní [16]





Obr. 2.3: Účinné překryvy AO (stejná symetrie vůči ose vazby, vazba vzniká) [16]



Obr. 2.4: Neúčinné překryvy AO (nestejná symetrie vůči ose vazby, vazba nevzniká) [16]

Všechny typy chemické vazby lze odvodit ze stejných představ o MO orbitalech. Podle charakteru interakce elektronových obalů, rozdílu energií vstupujících AO a elektronegativity obou vázaných atomů rozlišujeme několik typů chemické vazby:

- kovalentní (nepolární, polární)
- iontová
- koordinačně - kovalentní
- kovová

2.3.1 Kovalentní vazba

2.3.1.1 Vazba typu s

Nejjednodušším typem kovalentní vazby je vazba typu σ (sigma). Tato vazba vzniká překrytím AO orientovaných ve směru spojnice jader. Ze dvou AO vznikají lineární kombinací dva MO různé energie:

MO - orbital s vyšší energií než mají původní AO = orbital protivazebný
označení σ^*

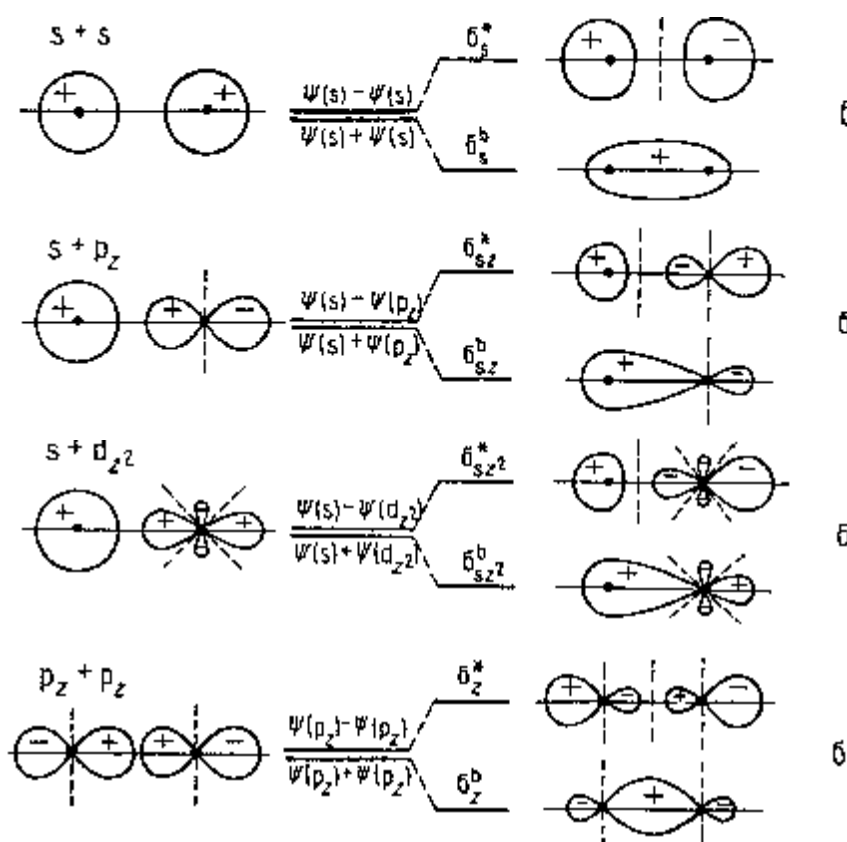
MO - orbital s nižší energií než mají původní AO = orbital vazebný,
označení σ^b

Mezi dvěma atomy může být pouze jedna σ vazba.

Vazebný MO má u této vazby maximální pravděpodobnost výskytu elektronů na spojnici obou jader. Protivazebný MO má složitější tvar a mezi jádry atomů tvořících vazbu má kolmo na spojnici středů atomů nodální plochu.

Tvary vzniklých MO podle typu výchozích AO jsou uvedeny na obrázku 3.4.

[16]



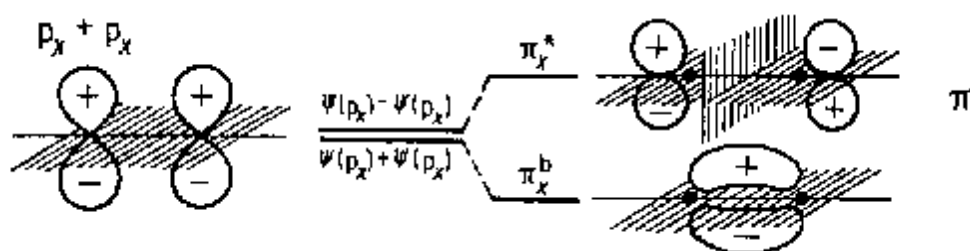
Obr. 2.5: Tvary MO typu σ v závislosti na výchozích typech AO [16]

2.3.1.2 Vazba typu p

Druhým typem kovalentní vazby je vazba typu π (pí). Tato vazba vzniká překrytím AO orientovaných osami mimo spojnici jader. U vazby typu π je maximální pravděpodobnost výskytu elektronů mimo spojnici obou jader tvořících vazbu, a to ve dvou oddělených lalocích nad a pod rovinou kolmou na osy AO a procházející středy atomů. Na spojnici středů atomů je

pravděpodobnost nulová. Na obrázku 3.6 je uveden příklad vzniku vazby π ze dvou AO typu p_x .

Ze dvou AO opět vznikají lineární kombinací dva MO různé energie:
MO - orbital s vyšší energií než mají původní AO = orbital protivazebný
označení π^*
MO - orbital s nižší energií než mají původní AO = orbital vazebný,
označení π^b



Obr. 2.6: Tvary MO typu p vzniklých lineární kombinací AO typu p_x [16]

Protože obdobnou orientaci vůči spojnici středů atomů mají i AO typu p_y (jsou pouze potočené o 90°), na rozdíl od vazby typu σ mohou být mezi dvěma atomy až dvě vazby typu π .

U těžších prvků a víceatomových molekul jsou poměry složitější, protože se v nich do vazeb zapojují i AO jiných symetrií než jen kulové AO typu s nebo AO typu p . [16]

2.3.2 Hybridizace

Řešení chemické vazby v některých molekulách je z teoretického hlediska velmi obtížné. U složitějších molekul pomáhá teorie hybridizace AO. Teorie hybridizace vysvětluje vznik energeticky rovnocenných vazeb z energeticky rozdílných orbitalů a umožňuje předpovědět prostorové uspořádání atomů v molekule. Hybridizace se týká pouze vazeb typu σ , vazby typu π nemají na proces hybridizace a výsledný tvar molekul vliv. Výchozí AO musí mít blízkou energii a vždy vzniká tolik hybridizovaných AO, kolik se účastní AO.

Často si pomáháme představou excitovaných atomů. Nejlépe lze teorii hybridizace pochopit z následujících příkladů. [16]

2.3.2.1 Hybridizace sp

Nejjednodušší případ hybridizace z AO ns a np_z , vzniká lineární molekula s dvojicí vazeb σ .

Hybridizace sp se vyskytuje v řadě důležitých sloučenin uhlíku s trojnou nebo dvěma dvojnými vazbami, jako například v acetylenu (etinu C_2H_2), oxidu uhličitém (CO_2) a kyanovodíku (HCN). [16]

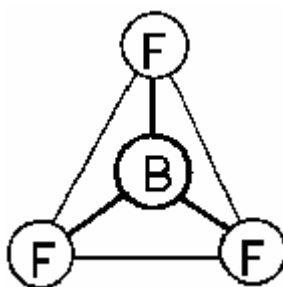


Obr. 2.7: Tvar molekuly chloridu beryllnatého $BeCl_2$ (příklad hybridizace sp) [16]

2.3.2.2 Hybridizace sp^2

Hybridizace typu sp^2 vzniká z AO ns , np_z a np_x a výsledkem je trigonální planární molekula s trojicí vazeb σ .

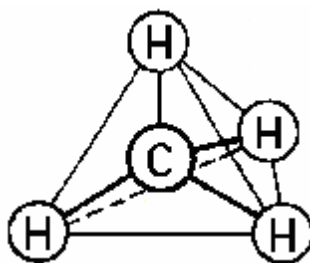
Hybridizace sp^2 se vyskytuje v řadě důležitých sloučenin uhlíku s jednou dvojnou vazbou, jako například etenu (etylenu C_2H_4). [16]



Obr. 2.8: Tvar molekuly fluoridu boritého BF_3 (příklad hybridizace sp^2) [16]

2.3.2.3 Hybridizace sp^3

Hybridizace typu sp^3 je nejdůležitější hybridizací, vzniká z AO ns , np_z , np_x a np_y a výsledkem je tetraedrická prostorová molekula (centrální atom v těžišti tetraedru, čtyři rovnocenné σ vazby směřující do jeho vrcholů).



Obr. 2.9: Tvar molekuly metanu CH₄ (příklad hybridizace sp³) [16]

Lineární kombinací AO vzniknou ekvivalentní HAO typu sp³ směřující do vrcholu tetraedru a úhel mezi vazbami je 109,5°.

Tato hybridizace se vyskytuje v diamantu, ve všech nasycených uhlovodících a dále například v křemičitanech nebo v některých sloučeninách přechodných kovů. [16]

2.4 Uhlík

Uhlík je chemický prvek, tvořící základní stavební kámen všech organických sloučenin a tím i všech živých organismů na této planetě.

Uhlík je typický nekovový prvek, je nerozpustný ve všech kapalinách a jeho teplota tání je 3 527 °C. Má 4 valenční elektrony.

Uhlík je obsažen v mnoha kovových sloučeninách. S kovovými prvky tvoří uhlík sloučeniny zvané karbidy. Nejznámější je karbid vápenatý CaC₂, který při reakci s vodou uvolňuje acetylen a byl dříve používán ke svícení v lampách, tzv. karbidkách. Poměrně známý je i karbid křemíku SiC neboli karborundum, který má krystalickou strukturu podobnou diamantu a vyznačuje se mimořádnou tvrdostí.

V elementárním stavu se uhlík jako minerál vyskytuje ve dvou základních alotropických modifikacích, a to diamant a grafit, a v druhé polovině 20. století byla objevena modifikace další - karbin. [6]

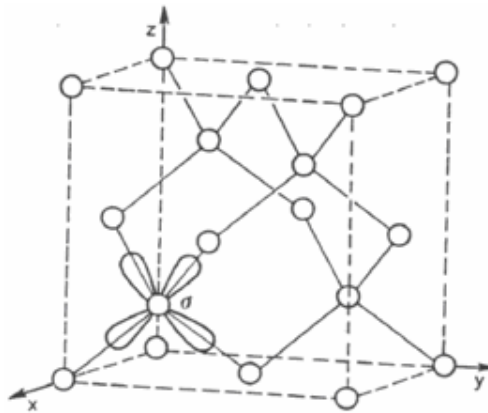
2.4.1 Diamant

Atomy diamantu je vázány všemi čtyřmi valenčními elektrony k elektronům okolních atomů kovalentní vazbou σ , u které došlo k hybridizaci

na σsp^3 , která je velmi pevná.

Diamant je nejtvrdším a velmi cenným přírodním nerostem, nevede elektrický proud, ale je dobrým vodičem tepla. Diamant krystalizuje v soustavě kubické plošně středěné (Obr 2.3), nebo hexagonální.

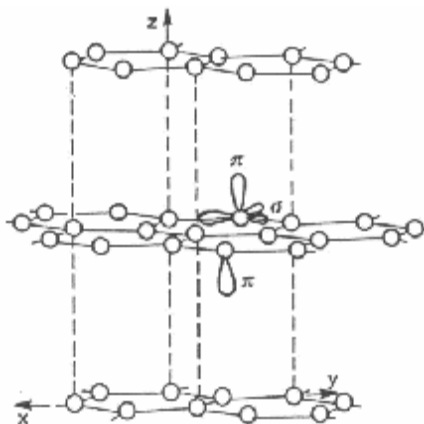
Váha diamantů se udává v karátech, největším doposud nalezeným diamantem byl Cullinan, který v surovém stavu při nálezu v JAR dosáhl váhy 3106 karátů. Protože ke vzniku diamantu je zapotřebí obrovských tlaků a vysokých teplot, jsou nalézány především tam, kde žhavé magma z velkých hloubek vystoupilo na povrch a ztuhlo. [6]



Obr. 2.10: Krystalická struktura kubického diamantu [7]

2.4.2 Grafit

Grafit neboli tuha patří mezi nejměkčí známé nerosty, má velmi silnou anizotropii vlastností danou dvojitým typem vazeb ve struktuře (Obr. 2.4). Vazba σ v rovině vrstvy je tvořena vždy třemi valenčními elektrony z každého atomu a je zhybridizována na σsp^2 . Tato vazba je velmi silná. Naopak mezi jednotlivými vrstvami je vazba typu π , která je tvořena pouze jedním valenčním elektronem, proto je slabá. Grafit má dobrou odolnost v tlaku, je tvrdý, štípatelný a málo otěruvzdorný. Těchto vlastností se využívá např. při výrobě tužek, kde mletá tuha tvoří základní složku tyčinky určené pro psaní a kreslení. [5] [6]



Obr. 2.11: Krystalická struktura grafitu [7]

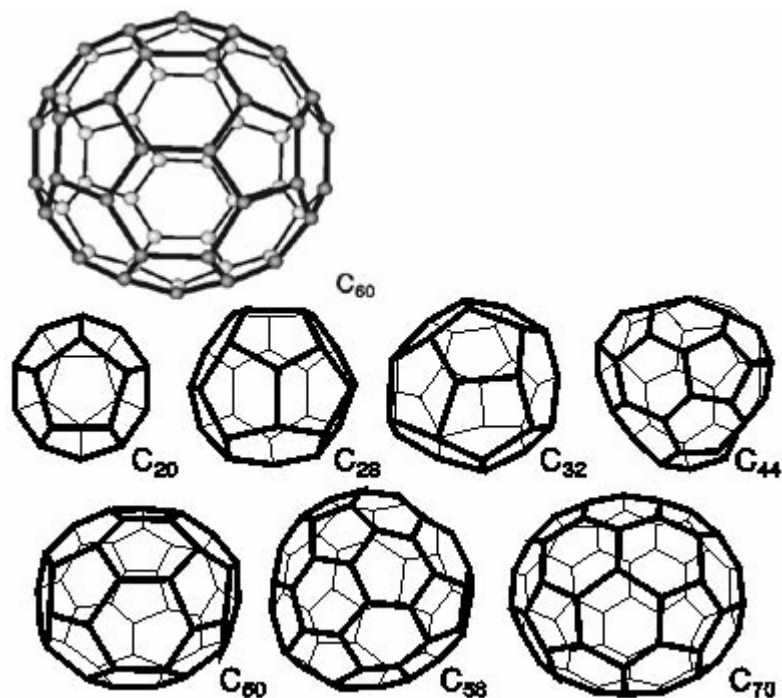
Fullereny

Zvláštním druhem molekul grafitu jsou fullereny (Obr. 2.5). Fullereny jsou nově objevené sférické molekuly. Prostorově jsou tyto molekuly uspořádány do kulovitého tvaru a jsou mimořádně odolné vůči vnějším fyzikální vlivům. Zatím nejstabilnější známý fullerén je molekula, obsahující 60 uhlíkových atomů. Existují ale i molekuly tohoto typu s jiným počtem atomů. Je možno připravit i molekuly sloučenin uhlíku, např. typu $C_{60}M^{p+}$, kde M je atom kovového prvku. Fullereny se uměle připravují pyrolýzou organických sloučenin laserem. Za objev a studium vlastností fullerenů byla v roce 1996 udělena Nobelova cena Robertu F. Curlovi a Richardu E. Smalleymu a Haroldu W. Krotoovi. [5]

Uhlíkové nanotrubičky

Dalším druhem uspořádání molekul grafitu jsou uměle vyrobené trubičky. Trubičky jsou složeny z atomů uhlíku o tloušťce pouhých několika nanometrů. Perspektiva jejich využití se nabízí např. při výrobě velmi pevných a zároveň lehkých kompozitních materiálů a tkanin, v elektronice při výrobě mimořádně malých tranzistorů, jako ideálního materiálu pro uchování čistého vodíku pro palivové články a mnohé další. [6]

Vedle těchto typů grafitu existuje mnoho dalších obměn.



Obr. 2.12: Struktura nejznámějších fullerenu [6]

2.4.3 Karbiny

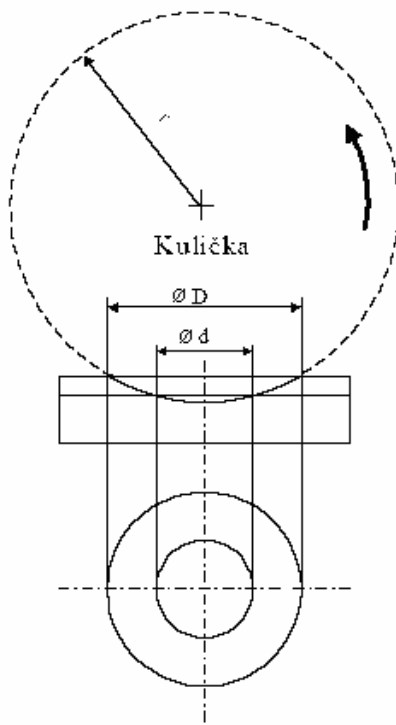
Karbiny jsou nejméně prozkoumanou modifikací uhlíku. Vznikají přeměnou grafitu za působení vysokých teplot a tlaků. Atomy uhlíku v karbinez se spojují do dlouhé rovné řady pomocí dvou valenčních elektronů silnou vazbou σ . Zbylé dva elektrony vytvářejí vazby π s okolními atomy v prostoru, tyto vazby už ale nejsou tak pevné. [12]

2.5 Měření charakteristik povlaků

2.5.1 Určení tloušťky povlaků

METODA KALOTEST

Metoda kalotest (Obr. 2.6) je nejpoužívanější metodou pro měření tenkých vrstev. Do povrchu vzorku se vybrousí až do základního materiálu tvar kulového vrchlíku (kalota) a poté se vypočte ze známých hodnot tloušťka. Známe průměr koule a změříme kružnice mezikružší.



Obr. 2.13: Kalotest

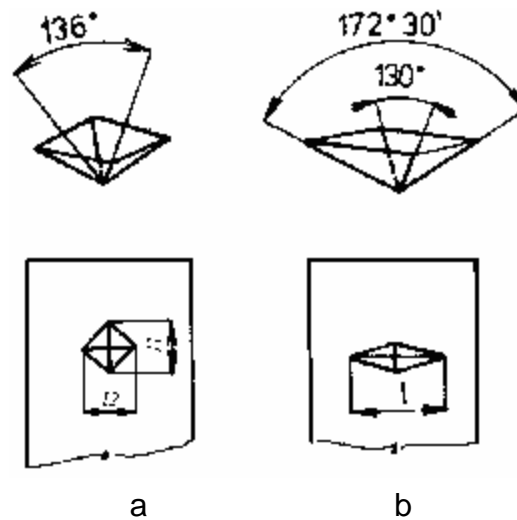
Měření vyžaduje kvalitní povrch substrátu. Pokud drsnost dosahuje vyšších hodnot, přesnost měření se snižuje nebo je úplně znemožněno.

MAGNETICKÁ METODA

Lze ji provádět jen u nemagnetických povlaků na feromagnetickém materiálu. Tloušťka se určí z magnetického odporu, který je dán mezerou v magnetickém obvodu (nemagnetická vrstva) .

2.5.2 Měření mikrotvrdosti tenkých vrstev

Mikrotvrdost tenkých vrstev se obvykle měří mikrotvrdoměrem s Vickersovým indentorem. Volba vhodného zatížení diamantového hrotu závisí především na tloušťce vrstvy a tvrdosti substrátu. [5]



Obr. 2.14: Tvary vnikacích těles a zjišťované rozměry vtisků při měření tvrdosti. Metody :
a) Vickersova; b) Knoopova [11]

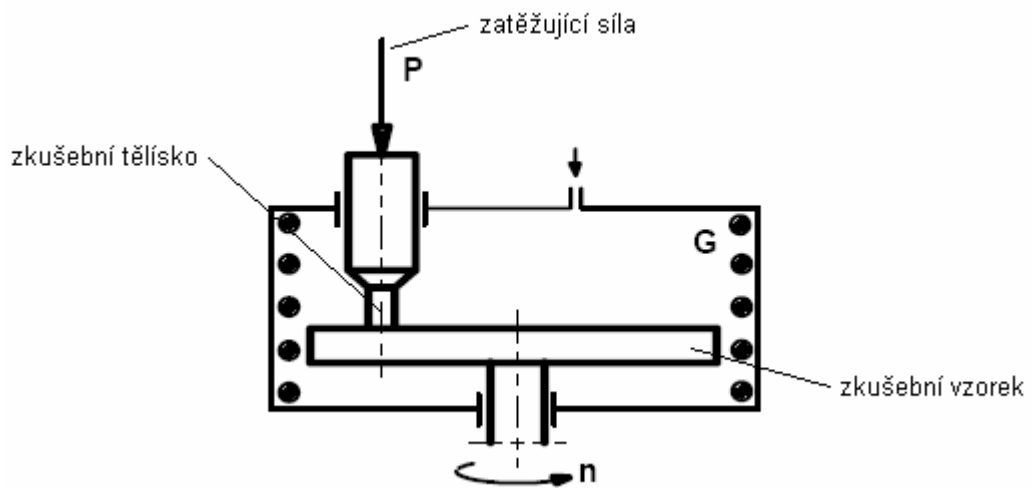
2.5.3 Měření tribologických vlastností

Nejrozšířenější metodou pro testování tribologických vlastností je metoda Pin-on-Disk (Obr 2.8). Zjišťování tribologických vlastností touto metodou je vhodné pro všechny typy materiálů. V poslední době je tato zkouška hojně využívána zejména pro testování vlastností různých druhů vrstev.

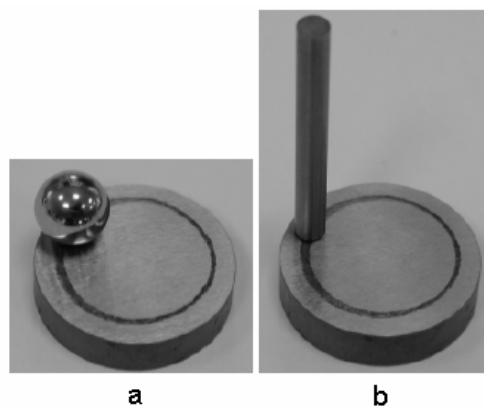
Pomocí této zkoušky je možné zjistit tření mezi dvěma libovolně zvolenými materiály. Po každé zkoušce je za pomoci ŘEM vyhodnocena odolnost proti opotřebení zkoušeného materiálu.

Měření spočívá ve vlačování pevně uchyceného zkušebního tělíska („PIN“) ve tvaru kuličky nebo válečku (Obr 2.9) ze zvoleného materiálu předem definovanou silou do rotujícího disku (zkušebního vzorku). Nejdůležitější částí zařízení je elastické rameno ve kterém je uchycen přípravek do kterého se vkládá „PIN“ tělísko. Nezbytnou součástí je i snímač třecí síly. Koeficient tření mezi tělískem a diskem je určován během testu měřením odchylky elastického ramene.

Při měření se může na vzorek nalít mazací směs, aby se co nejvíce zkouška přiblížila realitě. U lepších přístrojů lze provádět zkoušky i za zvýšených teplot.



Obr. 2.15: Princip metody Pin-on-Disk [12]



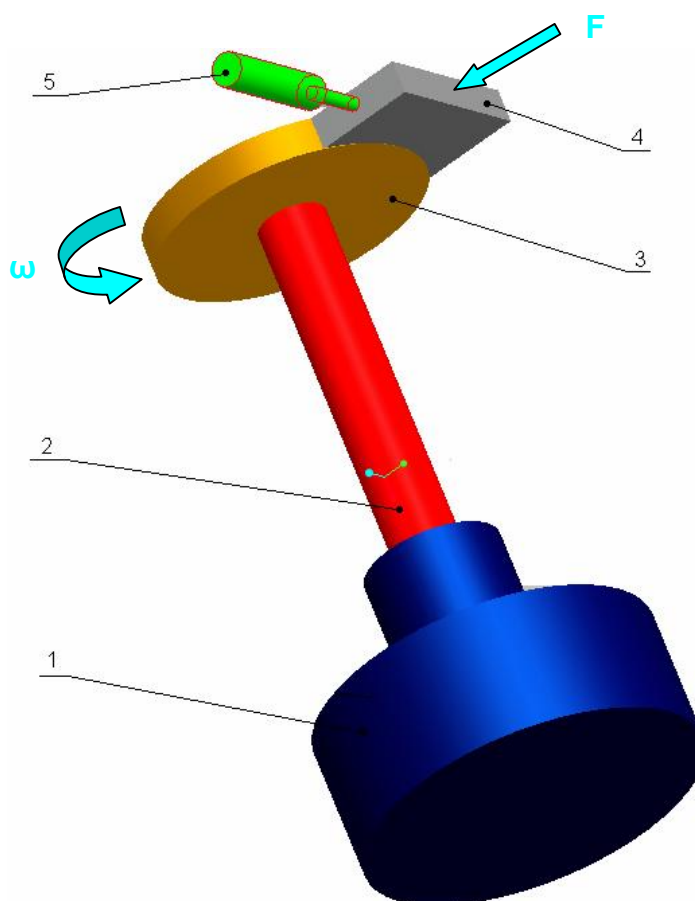
Obr. 2.16: Tvary tělísek [12] :
a) kulička; b) váleček

3 Experimentální část

3.1 Návrh principu zkušebního zařízení na vyhodnocování vlastností třecích dvojic

Přístroj na Obr. 3.1 je ideový návrh zařízení , které by mohlo být dostupné pro vlastní experimenty.

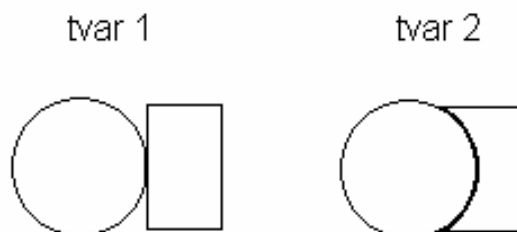
Uhlíková vrstva se nanese na kotouč, jehož povrch je upraven. Kotouč je připevněn (nalisován, mechanicky upnut) k hřídeli, která je poháněna elektromotorem. Na kotouč je přitlačován třecí segment, přitlačná síla je řešena pomocí tlačné pružiny nebo hydrauliky.



Obr. 3.1: Blokové schéma zkušebního zařízení na vyhodnocování třecích vlastností
1) elektromotor; 2) hřídel; 3) vzorek s vrstvou; 4) třecí segment; 5) snímač třecí síly

Tvarem třecího segmentu byl zvolen tvar 2 (Obr. 3.2), a to kvůli větší styčné ploše mezi třecím segmentem a kotoučem s nanesenou vrstvou. Větší styčná plocha se více přibližuje reálnému styku třecích ploch.

Materiál, ze kterého se třecí segment vyrábí, může být libovolný, podle charakteru testované třecí dvojice.



Obr. 3.2: Tvary styčných ploch třecího segmentu

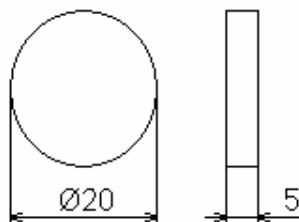
Tribologické vlastnosti jsou vyhodnocovány pomocí součinitele tření, který se vypočítá podle vzorce (2.1). Normálová síla je dána přitlakem na segment. Třecí síla je dána silou snažící se vyosít přitlačovaný segment.

3.2 Vyhodnocení diamantových nanovrstev

Vyhodnocení diamantových nanovrstev bylo provedeno na souboru vzorků vyrobených z materiálu ČSN 41 5260. Rozměry vzorků jsou na obrázku Obr. 3.3. Chemické složení materiálu je uvedeno v tabulce 3.1. Vzorky byly broušeny na magnetické brusce na drsnost Ra 0,8.

Tab. 3.1: Chemické složení oceli ČSN 41 5260 [10]

Chemický prvek	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	V
Obsah prvku [%]	0,47-0,55	0,9-1,2	0,7-1	≤0,3	≤0,035	≤0,035	0,15-0,4	0,1-0,7



Obr. 3.3: Rozměry zkoušených vzorků

Nanesení vrstvy a změření tribologických vlastností bylo provedeno na univerzitě Politechnica Łódzka v Polsku. Na této univerzitě mi byl poskytnut profesionální tribometr, na kterém byla provedena měření. Proto se nemusel sestavit a použít navrhovaný přístroj na měření třecí síly (Obr. 3.1). Přístroje pro aplikaci vrstev byly sestaveny na univerzitě.

3.2.1 Metody nanášení diamantových nanovrstev

Metody vytvoření diamantové vrstvy na připravené vzorky byly v laboratořích univerzity předvedeny tři. Byly to dvě metody PACVD, metoda RF (radiofrequency) a metoda MW/RF (microwave/RF). Třetí metoda byla kombinace PVD a CVD metody. K vyhodnocování vlastností uhlíkových vrstev se použily metody RF a MW/RF. Metodu PVD + CVD nebylo možné provést z důvodu provozní indispozice zařízení.

Při nanášení mohou vznikat různé vrstvy, záleží na podmínkách nanášení.

Anizotropní vlastnosti uhlíku způsobené vazbami σ (sp^1 , sp^2 , sp^3) a πp mohou vést ke vzniku různých uhlíkových vrstev s odlišnými chemickými, mechanickými a tribologickými vlastnostmi. Uhlíkové vrstvy se liší i svojí barvou, která může být od žluté, přes červenou až po modrou (Obr 3.4).

Mezi strukturou grafitu (sp^2) a strukturou diamantu (sp^3) existuje směs různých fází uhlíku v závislosti na poměru $sp^3/sp^2/sp^1$. Nikdy nevznikne vrstva čistě jen z sp^3 nebo sp^2 , vždy to bude kombinace, důležité ale je, která struktura převažuje.

DLC (Diamond Like Carbon) - Diamantu podobný uhlík, převaha této vrstvy je do cca 400W RF při procesu nanášení.

složení vazeb : 30 % σ sp^3 + 60 % σ sp^2 a π p + zbytek tvořen σ sp^1 a π p.

NCD (Nano Crystalline Diamond) - Nanokrystalický diamant, převaha této vrstvy je kolem 600W RF při procesu nanášení.

složení vazeb : 90 % σ sp^3 + zbytek tvořen σ sp^2 . [9]



Obr. 3.4: Příklady zbarvení uhlíkových vrstev

3.2.1.1 Metoda RF

Zařízení pro povlakování metodou RF (Obr 3.5) je složeno z generátoru RF, plynových lahví, povlakovací komory, vývěvy a řídicích panelů.

Vzorek se nejprve očistí a odmastí v ultrazvukové čističce pomocí metanolu. Poté se osuší proudem vzduchu a vloží na elektrodu, na kterou se spustí poklop komory. Nejprve se musí odsát vzduch a vytvořit tak vakuum, tato operace trvá kolem 45min. Následně se provádí další, důkladnější, čištění argonem (15-20min), které se provádí při zvýšené teplotě (Obr 3.6). Při tomto čištění už je v komoře puštěna RF a po ukončení čištění se vpustí nosič uhlíku (Obr 3.7) - metan, doba nanášení je asi 30min. Po ukončení nanášecího procesu se stroj vypne a komora zavzdušní, zvon vyjede a vzorek se může vyndat. Vzorek je po ukončení procesu velmi horký.

Při čištění byly nastaveny tyto hodnoty: $V_b = 700V$, V_b je závislé na velikosti RF, proto se hodnota RF nezjišťovala. Při nanášení byly hodnoty

totožné s hodnotami při čištění, objem vpuštěného metanu byl 10% (= $20\text{cm}^3/\text{min}$).

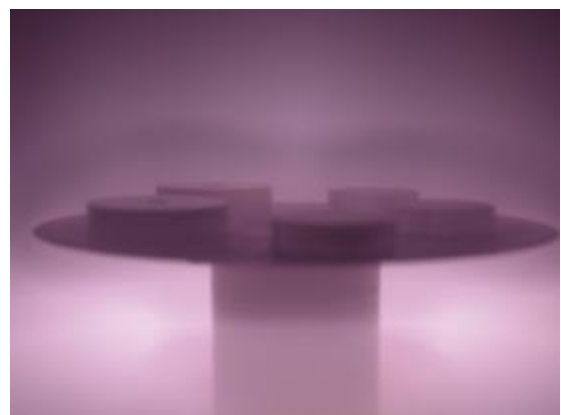
Monitorování teploty v komoře během procesu je stále předmětem bádání výzkumného týmu a proto nemohla být zjištěna.



Obr. 3.5: Povlakovací zařízení pro metodu RW [9]



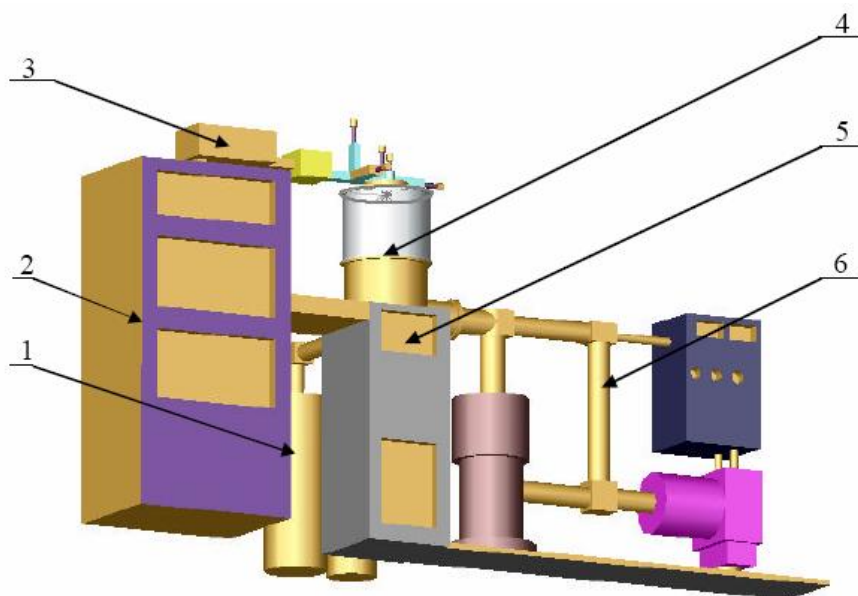
Obr. 3.6: Vzorky v komoře v plazmě



Obr. 3.7: Vzorky v plazmě s metanem

3.2.1.2 Metoda MW/RF

Povlakovací zařízení pro metodu MW/RF (Obr. 3.9) se skládá z generátorů MW a RF, plynových lahví, povlakovací komory, vývěvy a řídicích panelů (Obr. 3.8).



Obr. 3.8: Blokové schéma zařízení pro vytváření vrstev MW/RF [14]

- 1) soustava dávkování plynů; 2) řídicí soustava; 3) soustava napájení energie MW;
4) vakuová komora; 5) soustava napájení energie RF; 6) soustava vytváření vakua

Nejdříve se připraví vzorky v ultrazvukové čističce za pomoci matenolu, a vloží se do komory. Po spuštění zvonu se odčerpá vzduch, při dosažení vakua (20min) se povrch vzorku dočistí důkladně (30min). Při tom se vzorek také prohřeje a vyrovnají se teploty v celém jeho průřezu. Zapne se generátor MW a nastaví určitá hodnota, která je po celou dobu procesu (čištění + nanášení) stejná. Také se zapne generátor RF, nastaví požadovaná hodnota pro čištění. Po dokončení čištění se změní hodnota RF a pustí do komory metan. Po 5-10 minutách nanášení se vypne přívod metanu, RF, MW a zavzdušní se komora.

Při čištění jsou nastaveny tyto hodnoty: MW = 300W, RF = 250W, $V_b = 700V$. Při nanášení jsou hodnoty následující: MW = 300W, RF = 400W, $V_b = 500V$, objem vpuštěného metanu je 30% (= 60cm³/min).

Výkon RF bylo regulováno pomocí V_b , monitorování teploty je opět ještě předmětem bádání, proto nemohla být zjištěna.



Obr. 3.9: Povlakovací zařízení pro metodu MV/RF [9]

3.2.1.3 Metoda PVD + CVD

Tato metoda spočívá v tom, že nejprve se pomocí metody PVD nanese na povrch vzorku vrstva titanu, která má lepší přilnavost k povrchu. Poté je za pomoci metody CVD nanášen uhlík. Nosič uhlíku v podobě metanu je do komory vpouštěn postupně, vpouštěné množství má vzrůstající tendenci. Tímto způsobem se docílí nízkého gradientu přechodu mezi vrstvou titanu a uhlíku, není to vrstva titanu na vrstvě uhlíku.

Povlakovací zařízení pro metodu PVD + CVD je na Obr. 3.10.



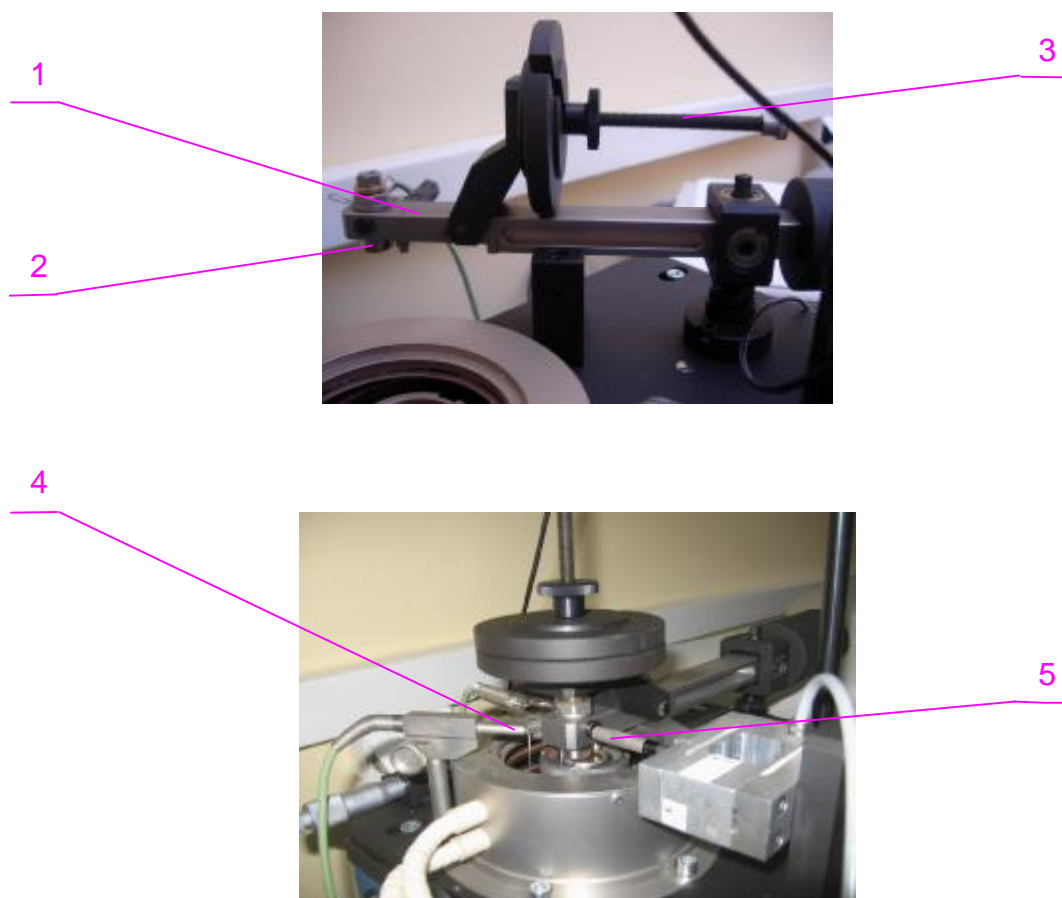
Obr. 3.10: Powlakovací zařízení pro kombinaci metod PVD + CVD

Všechny uváděné hodnoty (čas, množství, RF, MW, V_b) se musí experimentálně stanovit, dokud se nevytvoří dobrá vrstva s požadovanými vlastnostmi.

3.2.2 Měření tribologických vlastností

Třecí vlastnosti a opotřebenění vrstev byly vyhodnocovány metodou Pin-on-Disk na přístroji TESTER T11 (Obr 3.11) od firmy ITE. Více o tomto přístroji v příloze č.1.

Zkušební tělísko při prováděné zkoušce byla kulička z materiálu PN H84041, této polské normě odpovídá dle lexikonu technických materiálů česká norma ČSN 41 4100. Chemické složení tohoto materiálu je uvedeno v tab. 3.2.



Obr. 3.11, 3.12: Příklad na měření tribologických vlastností

- 1) Elastické rameno; 2) Přípravek na vložení PIN tělíska; 3) Místo pro vkládání závaží;
4) Čidlo na měření teploty v okolí vzorku; 5) Snímač třecí síly

Tab. 3.2: Chemické složení oceli 41 4100 [10]

Chemický prvek	C	Cr	Mn	P	S	Si
Obsah prvku [%]	0,95-1,05	1,25-1,5	0,35-0,6	≤0,035	≤0,038	0,17-0,37

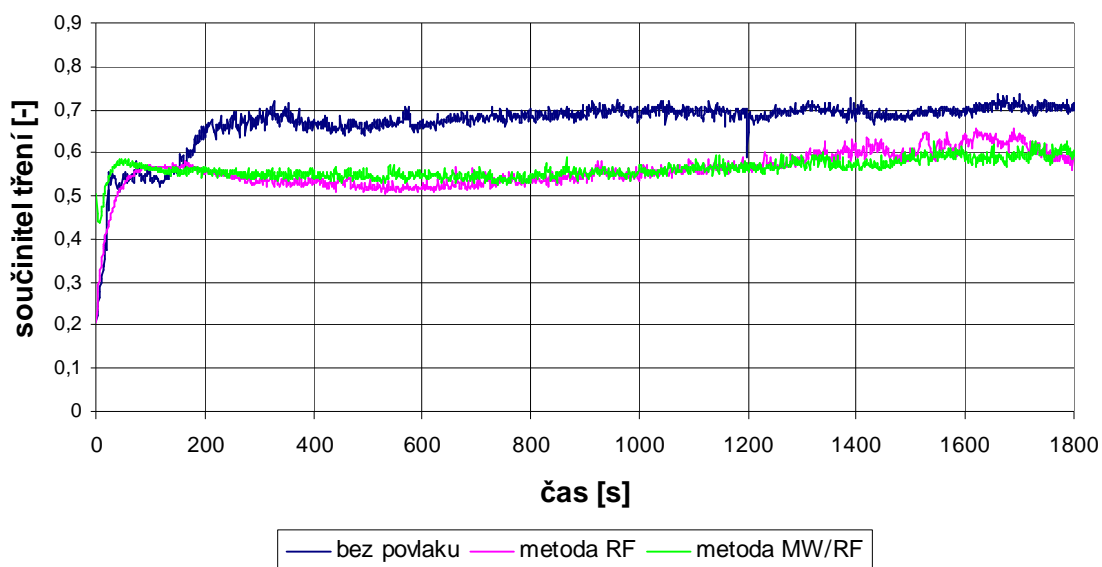
Měření probíhalo za pokojové teploty, nebyla použita žádná látka snižující tření. Přítlačná (normálová) síla byla nastavena na 5N. Kontakt zkušebního tělíska se zkoušeným vzorkem je na poloměru 7mm vzorku. Rychlost rotace byla nastavena na 136 otáček za minutu.

3.2.3 Výsledky měření

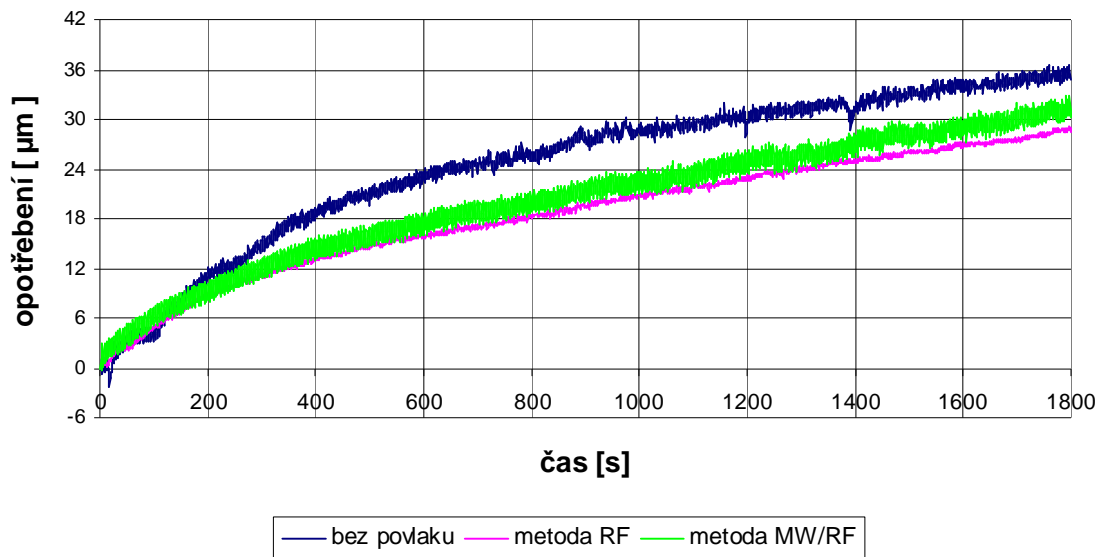
Na přístroji TESTER T11 byly vyhodnocovány tyto veličiny :

- Třecí síla
- opotřebení
- teplota v okolí vzorku

Naměřené hodnoty pro obě metody nanášení jsou sestaveny do grafů a uvedeny v příloze č.2. Hodnoty byly vyhodnoceny i pro vzorek bez vrstvy. Pro srovnání jsou výsledky jednotlivých metod zaneseny do jedněch grafů (Obr. 3.13, 3.14).

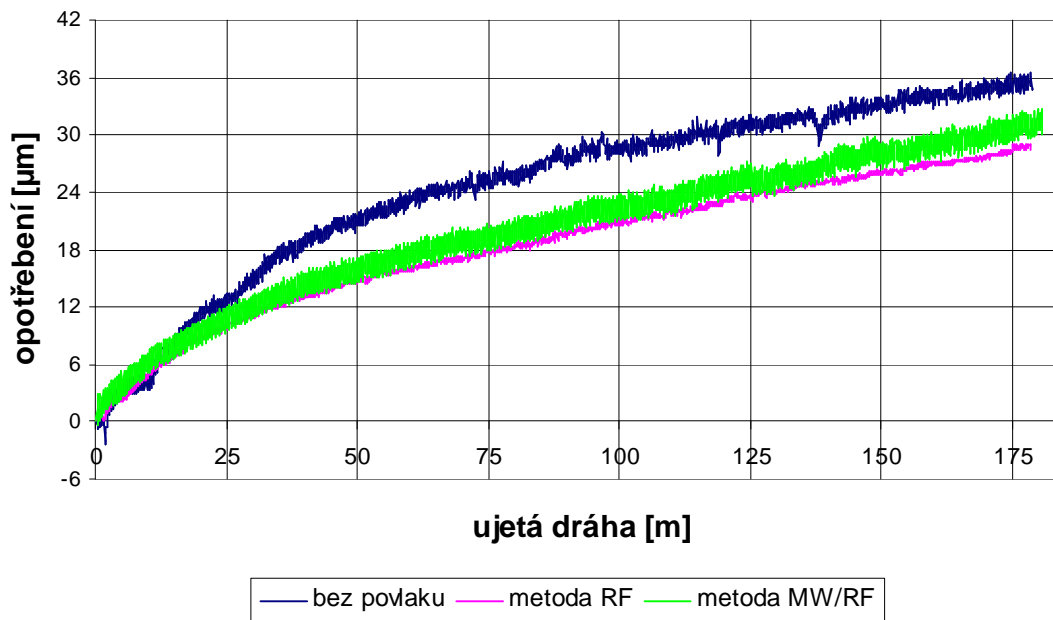


Obr. 3.13: Graf závislosti součinitele tření na čase



Obr. 3.14: Graf závislosti opotřebení vrstvy na čase

Pro lepší představivost opotřebení je sestaven graf závislosti opotřebení na ujetí určité dráhy (Obr. 3.15).



Obr. 3.15: Graf závislosti opotřebení vrstvy na ujeté dráze

4. Závěr

Bakalářská práce měla za úkol posoudit vliv uhlíkových vrstev na třecí vlastnosti. Jelikož TU v Liberci dosud nedisponuje potřebným vývojovým zařízením pro aplikaci uhlíkových vrstev, bylo mi umožněno provést tuto práci na univerzitě Politechnica Łódzka v Polsku. Na této univerzitě byly k dispozici plazmové nanášecí komory s řídicí technikou a měřící zařízení tribometr TESTER T11, na kterém byla provedena měření tribologických vlastností.

Tato bakalářská práce byla zadána s cílem ověřit v prvním přiblížení možnosti využití uhlíkových vrstev v automobilovém průmyslu, resp. v motoru Škoda 1,2l. Díky vynikajícím třecím vlastnostem těchto vrstev by bylo možné v motorech a převodovkách automobilů snížit pasivní odpory a tedy i spotřebu a zároveň zvýšit životnost kluzného spoje. Jedna z hlavních možností aplikace uhlíkových vrstev do budoucna, po důkladném výzkumu s úspěšnými výsledky, je u rotačních dílů, kde by mohlo dojít k odstranění jehlových ložisek včetně objímek.

Bakalářská práce studovala aplikaci uhlíkových vrstev na zkušebních vzorcích. Vzorky byly z materiálu ČSN 41 5260. Vrstvy byly aplikovány pomocí metody PACVD, a to způsoby RF a MW/RF. Vzorky s uhlíkovými povlaky se poté vyhodnocovaly na tribometru TESTER T11. Snímali se 3 veličiny, a to třecí síla, opotřebení a teplota v okolí měřeného vzorku. Zkušební tělísko mělo tvar kuličky a bylo z materiálu ČSN 41 4100. Jednotlivé testy trvaly 30 minut a probíhaly za teploty okolí. Při měření nebyla použita žádná mazací ani chladicí směs. Naměřené výsledky byly sestaveny do grafů a byly porovnány se vzorkem bez vrstvy.

Výsledky měření potvrdily jak snížení opotřebení, tak i snížení pasivních odporů. Je nutno vzít v úvahu, že měření byla porovnávací, probíhala pouze 30min. a materiál neměl totožné chemické složení, jako materiál součástí motoru navrhovaný k aplikaci uhlíkové vrstvy.

Pro další postup řešení navrhuji použít delší časy pro vyhodnocení pasivních odporů a životnosti třecí dvojice a zvýšit teplotu v okolí vzorku na provozní teplotu v motorech. Také doporučuji použít materiál s přesným

chemickým složením, totožný s materiály součástí motoru, navrhovaných k aplikaci uhlíkovou vrstvou.

Dalším krokem řešení by mohla být aplikace uhlíkových vrstev přímo na určené součásti nejprve na zkušební stolici za podmínek téměř se shodujícími s reálným použitím. Při příznivých výsledcích předchozích zkoušek navrhuji použít součásti s uhlíkovými vrstvami do skutečného motoru a vyzkoušet vrstvy přímo při předepsaných režimech při zkušebních jízdách automobilů.

5. Použitá literatura

- [1] <http://www.bencar.cz>, duben 2006
- [2] SYRŮČEK, P.: Pasivní odpory motoru ŠKODA AUTO 1,2. [Diplomová práce], Liberec : TUL, 2004
- [3] PTÁČEK, L. a kol : Nauka o materiálu 1, CERM s.r.o., 2003
- [4] SEDLÁČEK, V.: Povrchy a povlaky kovů, Praha : ČVUT, 1992
- [5] TŮMOVÁ, Š.: Optimalizace povrchových úprav sklářských forem z hlediska životnosti. [Diplomová práce], Liberec : TUL, 2004
- [6] <http://cs.wikipedia.org>, březen 2006
- [7] MITURA, S.: Nanocrystalline Diamond for Medicine, Institute of Materials Science and Engineering, Lodz, Poland
- [8] <http://www.ateam.zcu.cz>, květen 2006
- [9] TŮMOVÁ, Š.: Experimentální stanovení tribologických vlastností kariérních vrstev pro kontaktní dvojice metodou pin-on-disc, in press
- [10] FÜRbacher, I. MACEK, K. STEIDL, J., a kolektiv autorů : Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty, Praha : Verlag Dashöfer, 2001.
- [11] <http://www.kmt.vslib.cz>, květen 2006
- [12] TŮMOVÁ, Š.: ústní předání, květen 2006
- [13] propagační materiály firmy ITE, květen, 2006
- [14] KACZOROWSKI, W.: Warstwy węglowe wytwarzane w plazme. [Doktorská práce], Łódz : Politechnica Łódzka, Polsko, 2005
- [15] <http://www.wirpo.cz>, květen 2006
- [16] <http://www.fp.vslib.cz/kch/exnar>, květen 2006

6. Seznam příloh

příloha č. 1: Vytypované díly motoru pro aplikaci vrstev

příloha č. 2: Propagační materiály firmy Ite pro přístroj TESTER T11

příloha č. 3: Výstupní listy z přístroje TESTER T11

DÍLY MOTORU EA111.03D/E VYTYPOVANÉ JAKO VHODNÉ PRO CARBONITROOXIDACI

- 1) Ventily 2V - 03D 109 601 B - sací
03O 109 611 D - výfukový

4V - 036 109 601 S - sací
036 109 611 K - výfukový
- 2) Vačkové hřídele 2V - 03D109 101 P
4V - 03E 109 101 T
- 03E 109 101 AA
- 3) Pístní kroužky - 3. skládaný kroužek firmy Buzuluk - lamely + expander
- 4) Klikový hřídel - 03D 105 101 D - litina, série
- 5) Axiál vyvažovacího hřídele - 03D 105 265 C
- 6) Pístek napínáku řetězu ČZ - At 63 548-S
- At 63 555-S
- 7) Pístek olejového čerpadla MOTORPAL - 03D 115 411 B
- 8) Kola + hřídel olejového čerpadla MOTORPAL - 03D 115 165 A - kolo vnější
- 03D 115 123 A - kolo vnitřní
- 03D 115 118 A - hřídel
- 9) Řetězová kola 2V - 03D 109 571 B - vačkový hřídel

4V - 03D 109 571 B - vačkový hřídel
- 03E 115 021 D - olejové čerpadlo
- 10) Kola pohonu vyvažovacího hřídele - 03D 103 305 B - na klik. hřídeli
- 03D 103 306 B - na vyvaž. hřídeli
- 11) Hřídel vyvažovací - 03D 103 303 C

T-11 HIGH TEMPERATURE PIN-ON-DISK TESTING MACHINE

FOR EVALUATION OF LUBRICANTS
AND ENGINEERING MATERIALS



INSTITUTE FOR TRIBOTECHNOLOGY
NATIONAL RESEARCH INSTITUTE RADOM

ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, POLAND, fax: +48 48 3644765
e-mail: trib-dep@itee.radom.pl

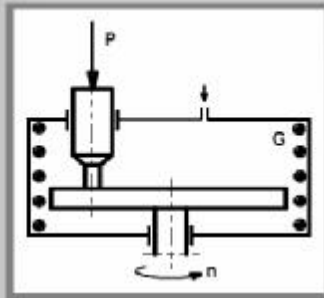


CHARACTERISTIC OF T-11 TESTING MACHINE

T-11 High Temperature Testing Machine (with pin-on-disk or ball-on-disk friction couple) is intended for determining tribological properties of lubricants and engineering materials used for sliding joints.

T-11 Machine makes it possible to determine the wear resistance and friction coefficient for a pair of materials, depending on sliding velocity, applied load, presence and kind of a lubricant, temperature in the test chamber, kind of a gas in the test chamber and other factors. One can investigate the phenomenon of e.g. tribopolymerization and boundary lubrication.

Experiments can be carried out in accordance with the **ASTM G 99** and **DIN 50324** standards.



The tribosystem consists of the stationary pin (ball) pressed at the required load P against the disk rotating at the defined speed n . The friction couple is inserted in the insulated test chamber equipped with the heater G , which enables to raise the temperature and keep it constant. It is possible to control the atmosphere by introducing a gas into the test chamber.

T-11 Testing Machine consists of:

- T-11 tester equipped with a set of measuring transducers,
- controller,
- digital measuring amplifier,
- PC and special control-measurement software.

During the tests the following quantities are measured:

- friction force,
- displacement (linear wear),
- test pin/ball temperature,
- number of disk revolutions (sliding distance).

The measured values are displayed on the monitor screen and saved on the computer disk. After test completion one can print a report presenting curves of changes in the particular quantities versus time.

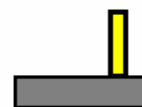
TECHNICAL SPECIFICATIONS

- type of movement	sliding,
- contact geometry	conformal: pin-on-disk, or non-conformal: ball-on-disk,
- nominal pin diameter	3 mm,
- nominal ball diameter	10 mm,
- max. disk diameter	25 mm,
- max. sliding velocity	1 m/s,
- max. normal load	5 kgf,
- max. track radius	10 mm,
- max. test chamber temp.	300°C,
- T-11 tester dimensions	300 x 750 x 450 mm,
- T-11 tester weight	50 kg,
- power supply	220 V / 50 Hz (optionally 110 V / 60 Hz),
- max. power consumption	1.6 kW.



INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI
INSTITUTE FOR TEROTECHNOLOGY POLAND

T-11
 HIGH TEMPERATURE
 PIN-ON-DISK
 TESTING MACHINE



REPORT

FILE NAME C:\T-11_V2\Results\15260\15260.bin

DATE (TIME) 2006-05-12 (10:49:43)

TEST CONDITIONS

Load [N]: 5,0 Rotational speed [rpm]: 136,0

Wear track radius [mm]: 7,0 Number of revolutions: 4062

Chamber temperature [°C]: 18,0

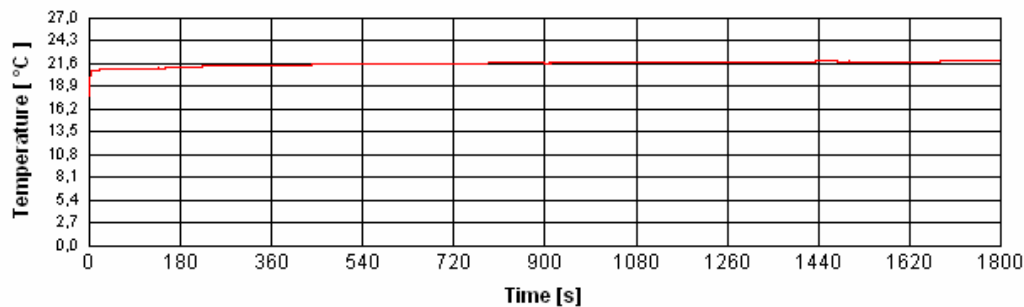
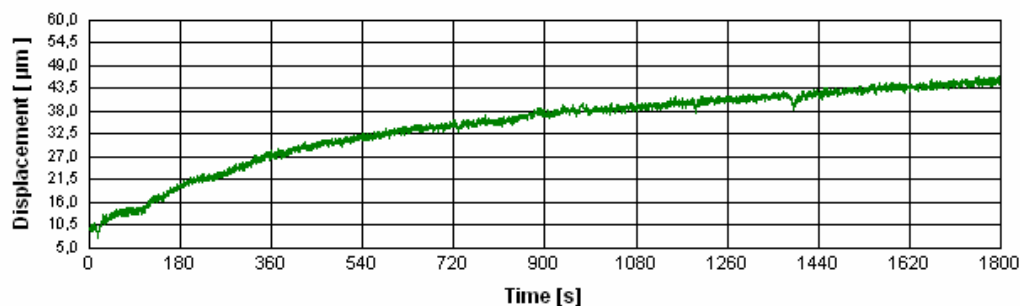
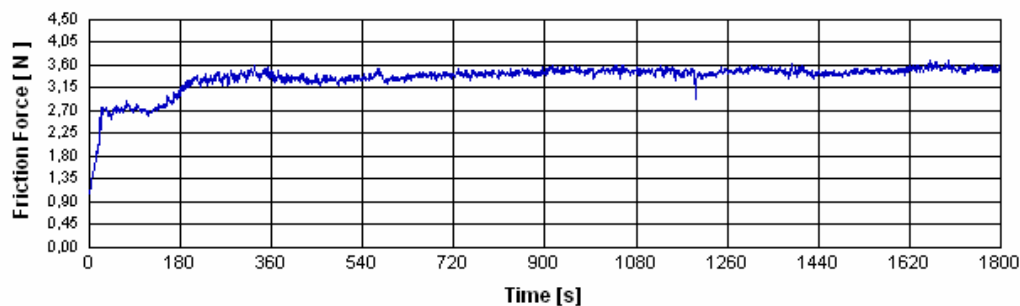
MATERIALS

Pin/ball: kulka £H15

Disk: stal

Lubricant: Without lubricant

RESULTS



NOTES

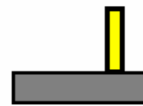
15260

Operator:



INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI
INSTITUTE FOR TRIBOLOGY POLAND

T-11
 HIGH TEMPERATURE
 PIN-ON-DISK
 TESTING MACHINE



REPORT

FILE NAME C:\T-11_V2\Results\15260\15260RF.ASC.bin
DATE (TIME) 2006-05-19 (11:03:12)

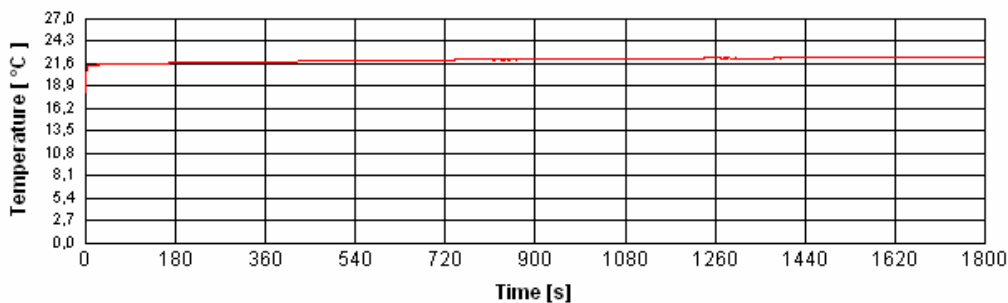
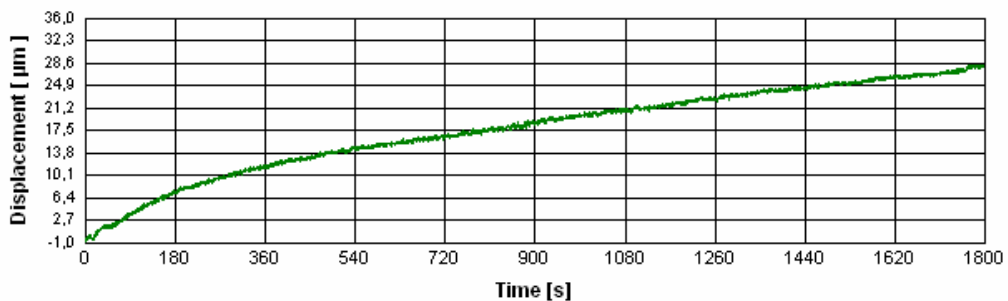
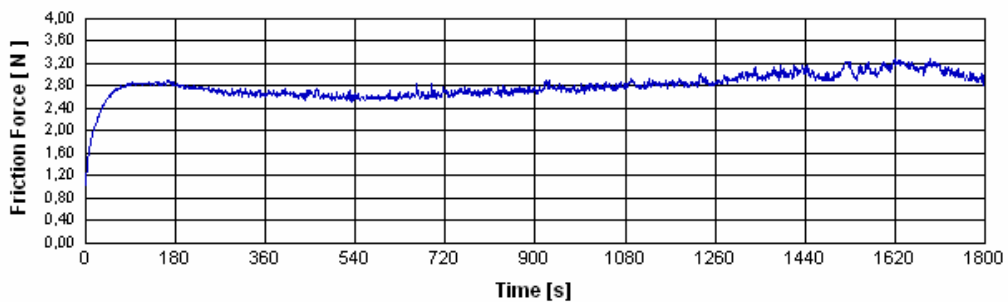
TEST CONDITIONS

Load [N]:	5,0	Rotational speed [rpm]:	136,0
Wear track radius [mm]:	7,0	Number of revolutions:	4056
		Chamber temperature [°C]:	20,0

MATERIALS

Pin/ball: kulka £H15
 Disk: stal+RF
 Lubricant: Without lubricant

RESULTS



NOTES

15260+RF

Operator:



INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI
INSTITUTE FOR TRIBOLOGY POLAND

T-11
 HIGH TEMPERATURE
 PIN-ON-DISK
 TESTING MACHINE



REPORT

FILE NAME C:\T-11_V2\Results\15260\15260MW.ASC.bin

DATE (TIME) 2006-05-19 (11:54:58)

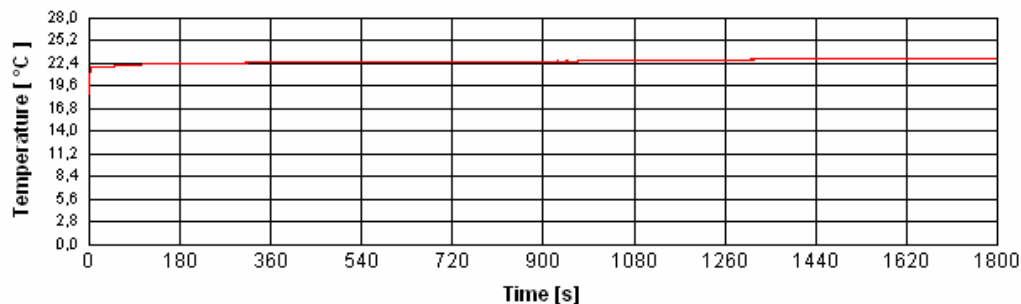
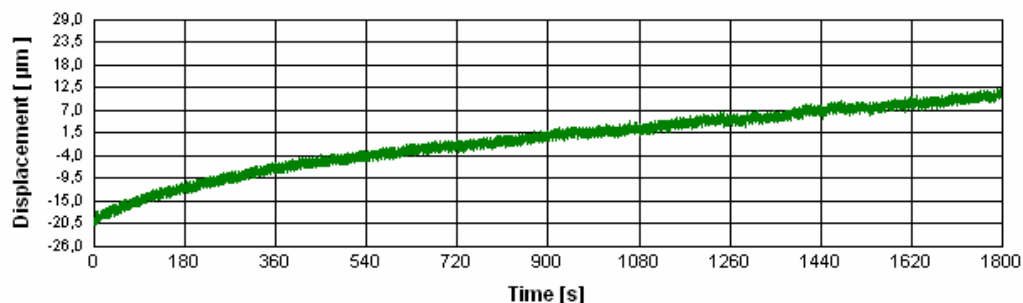
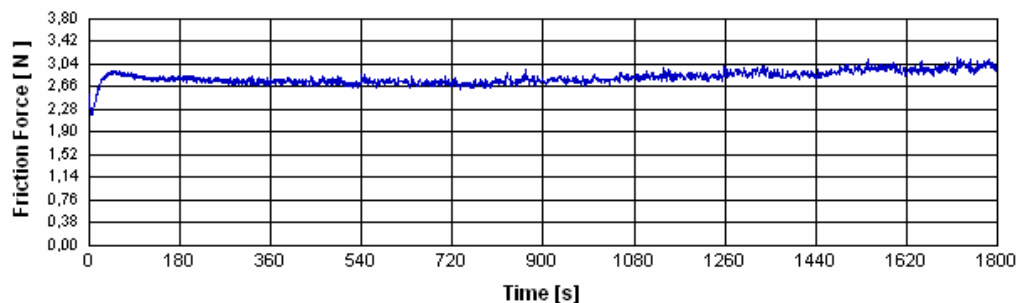
TEST CONDITIONS

Load [N]:	5,0	Rotational speed [rpm]:	136,0
Wear track radius [mm]:	7,0	Number of revolutions:	4107
		Chamber temperature [°C]:	20,0

MATERIALS

Pin/ball:	kulka £H15
Disk:	stal+MW
Lubricant:	Without lubricant

RESULTS



NOTES

15260+MW

Operator:

Prohlášení k využívání výsledků DP:

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 26. května 2006

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 26.5.2006

Signature: