

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Tenké vrstvy na pístní kroužky

Autor: **Bc. Michal KAREŠ**

Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ**

Akademický rok 2016/2017

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Kareš	<b>Jméno</b> Michal	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Prof. Dr. Ing. Kříž	<b>Jméno</b> Antonín	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Tenké vrstvy na pístní kroužky		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	72	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Předložená diplomová práce se zabývá popisem pístních kroužků a jejich vlastností, přičemž je zaměřena převážně na problematiku povrchových úprav, které se v souvislosti s pístními kroužky používají. Experimentální část práce se zabývá porovnáním vybraných vlastností u povrchových úprav na bázi chromu, které jsou v současné době běžně používané, s moderními PVD vrstvami typu CrN <sub>x</sub> .
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Pístní kroužek, chrom, tenká vrstva, PVD, CVD, CrN, zkoušky tenkých vrstev, Mercedes test, PIN-on-DISC

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Kareš	<b>Name</b> Michal	
<b>FIELD OF STUDY</b>	“Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Prof. Dr. Ing. Kříž	<b>Name</b> Antonín	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Thin films for piston rings		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	72	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis aims to define terms like piston rings and its characteristics, focusing mainly on surface adjustments used in connection with piston rings. The experimental part of the thesis deals with comparison of selected properties of chromium-based surface treatments currently in use with modern CrN <sub>x</sub> type PVD thin films.
<b>KEY WORDS</b>	Piston ring, chromium, thin film, PVD, CVD, CrN, thin film testing, Mercedes test, PIN-on-DISC,

## PODĚKOVÁNÍ

*V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, za námět práce, věnovaný čas a trpělivé vedení. Mé velké díky patří také Ing. Vojtěchu Průchovi, za veškerý věnovaný čas, přínosnou konzultaci a pomoc, bez které by tato práce nemohla vzniknout. A v neposlední řadě bych rád poděkoval i své rodině za podporu a všem dalším, kteří mi pomohli s vypracováním této práce.*

*Tato diplomová práce a provedené analýzy byly realizovány na základě řešení studentského projektu SGS – 2015-016 „Analýza povrchů konstrukčních celků a nástrojů metodou integrity povrchu a dopady na užité vlastnosti“.*

## Přehled použitých zkratek a symbolů

ASTM – Americká asociace pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials)

EGR – Exhaust gas recirculation, systém recirkulace spalin u spalovacích motorů

Z – Výřez zámku

$\lambda$  – Ojnicí parametr

COF – Koeficient tření (Coefficient of friction)

PVD – Fyzikální metody vytváření tenkých vrstev (angl.. Physical Vapour Deposition)

CVD - Chemické metody vytváření tenkých vrstev (angl.. Chemical Vapour Deposition)

DLC – Diamond like Carbon (diamantu podobný uhlík)

HV-PVD – High value PVD, kompozitní Cr a CrN vrstva firmy Mahle

HRC – Tvrdost dle Rockwella

HV – Tvrdost dle Vickerse

Ft – Tangenciální síla

Fd – Diametrální síla

$L_c$  – Kritické zatížení při zkoušce Scratch test [N]

EDX – Energy – dispersive x-ray spektroskopie, energiově disperzní rentgenová spektroskopie

Ra – Střední aritmetická úchylka drsnosti povrchu [ $\mu\text{m}$ ]

SEM – Řádkovací elektronová mikroskopie (Scanning electron mikroskopy)

CrN – Nitrid chromu

BCr – Buzuluk chromium, obchodní název Cr povlaku s  $\text{Al}_2\text{O}_3$  firmy Buzuluk a.s.

CKS – Obchodní název Cr povlaku s  $\text{Al}_2\text{O}_3$  firmy Goetze

GDC – Goetze Diamond Coating, obchodní název Cr povlaku s diamantem firmy Goetze

CBN – Kubický nitrid boru

ŘEM – Řádkovací elektronový mikroskop

## Obsah

1	Úvod.....	3
2	Pístní kroužky.....	5
2.1	Hlavní funkce pístních kroužků.....	5
2.2	Základní dělení pístních kroužků .....	5
2.3	Základní parametry pístního kroužku.....	6
2.4	Výřez zámku pístního kroužku.....	7
2.5	Kinematika pístních kroužků.....	8
2.6	Síly a tlaky působící na pístní kroužky.....	10
2.7	Tepelné zatížení pístních kroužků .....	13
2.8	Záběh pístních kroužků a utěsnění spalovací komory.....	14
2.9	Opotřebení pístních kroužků .....	15
3	Výroba pístních kroužků .....	15
3.1	Materiál pro výrobu pístních kroužků .....	16
4	Povrchové úpravy pístních kroužků .....	17
4.1.1	Ferroxování .....	17
4.1.2	Cínování .....	18
4.1.3	Fosfátování .....	18
4.1.4	Žárové nástřiky.....	18
4.1.5	Nitridace .....	18
4.1.6	PVD a CVD depozice .....	19
4.1.7	Tvrdé chromování .....	20
5	Vybrané metody testování povrchových úprav.....	29
5.1	Indentační zkouška – Mercedes test .....	29
5.2	Tribologická zkouška – Metoda PIN-on-DISC .....	29
6	Shrnutí teoretické části .....	30
Experimentální část.....		31
7	Vyhodnocení základního materiálu pístních kroužků.....	31
8	Vyhodnocení povrchových vrstev.....	33
8.1	Vyhodnocení prototypů tenkých vrstev oslovených výrobců .....	33
8.2	Stanovení tloušťky optimalizované vrstvy PVD na PK .....	37
9	Výroba zkušebních PK.....	38
10	Vyhodnocení adhezivně – kohezivních vlastností .....	40
11	Vyhodnocení tribologických vlastností.....	45
11.1	Vyhodnocení tribologických vlastností s přítomností oleje.....	50

11.2	Analýza tribologické stopy .....	54
12	Zařízení pro simulaci chodu pístních kroužků ve válci.....	57
12.1	Příprava sestavení pro test opotřebení .....	60
13	Diskuse výsledků.....	62
14	Závěr.....	66
15	Citovaná literatura .....	68
16	Seznam obrázků .....	70
17	Seznam tabulek .....	72



# 1 Úvod

Za posledních několik desetiletí se nároky na spalovací motory velmi změnilly. Nejen, že moderní motory musí vyhovět přísným emisním normám, musí také poskytovat dostatečný výkon, spolehlivost a dlouhou životnost. Aby bylo těmto nárokům vyhověno, prochází motory neustálým vývojem a především díky moderním materiálům a použití nových technologií při jejich výrobě jsou lehčí, výkonnější a ekologičtější, než kdy dříve.

Klíčovou komponentou všech pístových strojů, především spalovacích motorů, jsou pístní kroužky. Jejich kvalita a životnost nejen že přímo ovlivňuje kvalitu i životnost celého motoru, ale i jeho výkon a ekonomický a spolehlivý provoz. Proto není k podivu, že na pístní kroužky kladou konstruktéři motorů velmi vysoké nároky, které bohužel není možné vždy všechny splnit.

Spolehlivost pístního kroužku je přímo závislá na vlastnostech materiálu, ze kterého je vyroben, jeho povrchové úpravě a podmínkách, při kterých je provozován. V počátcích užívání pístních kroužků na přelomu 18. a 19. století byly používány jednoduché, soustružené kroužky z litiny, které byly na jednom místě vyříznuté. V roce 1855 byl v Anglii patentován pístní kroužek s konstantním přitlakem na stěnu válce po celém obvodu, jehož principy jsou dodnes používány. Zásadní přelom ve vývoji však nastal až v roce 1872 s vynálezem spalovacího motoru, který si žádal odpovídající úroveň pístních kroužků. Jejich výroba začala pomalu přecházet od stavitelů spalovacích motorů na speciální výrobní závody, které se zvyšující se produkcí zlepšovaly i výrobní postupy [1].

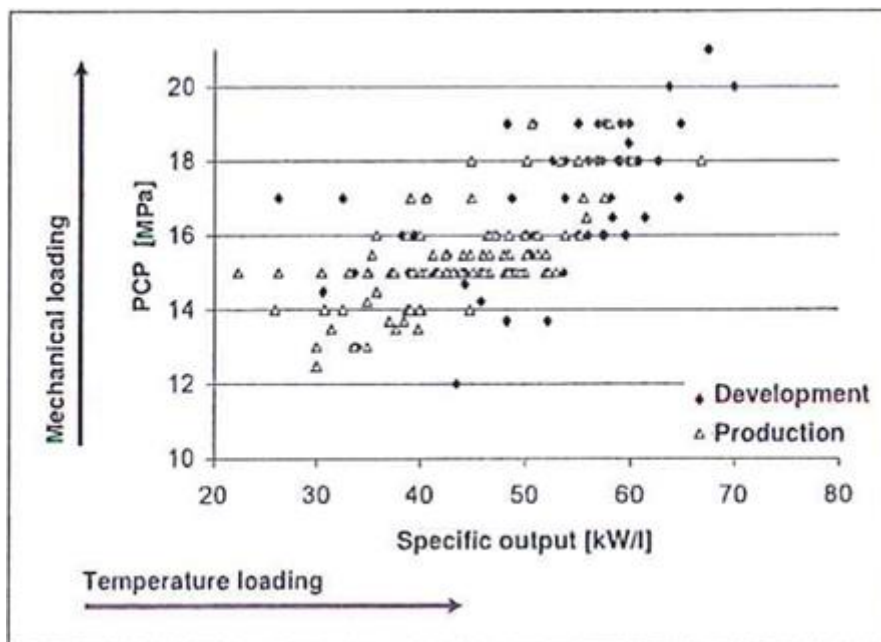
Pro zlepšení vlastností dobových motorů, hlavně v období druhé světové války, bylo zavedeno tvrdé chromování pístních kroužků. Poprvé byly takové kroužky použity u leteckých motorů. Povrchová úprava galvanicky naneseného chromu výrazně snížila tření a opotřebení v pístní soustavě a v hojně míře se jako úprava pracovní plochy těsnících i stíracích pístních kroužků používá dodnes [2].

Ovšem pro neustálé navyšování požadavků na spalovací motory, tvrdochromové povlaky přestávají svými vlastnostmi vyhovovat. Prvním vylepšením Cr povlaků je použití tzv. porézního chromování. Periodickým střídáním polarity při galvanickém chromování, dochází k rozvoji mikrotrhlin na povrchu nanesené povlaku. Tyto trhliny mohou působit jako zásobník oleje a zlepšit tak tribologické vlastnosti systému nebo ochránit motor například při chodu bez lokálního přísunu maziva [2].

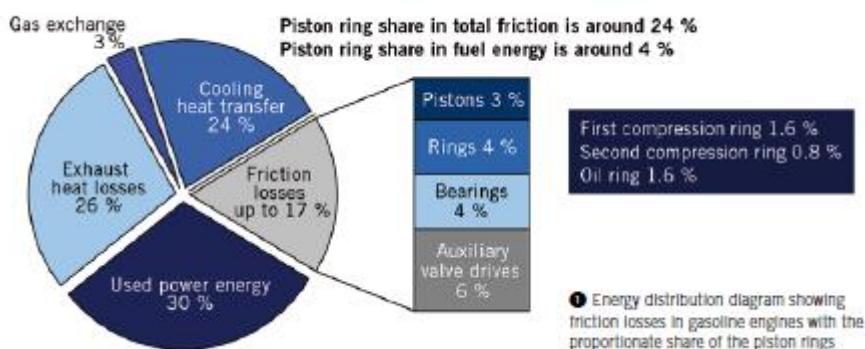
Další vylepšení přineslo použití kompozitních galvanických Cr povlaků. Vývoj těchto povlaků je v současné době jedním z nejdůležitějších směrů stávající galvaniky. Princip spočívá v přidání určitého plniva do chromovací lázně. Plnivem mohou být částičky  $Al_2O_3$ , čistého diamantu či CBN, které jsou uloženy v mikrotrhlinkách porézního chromového povlaku. Tyto částice o velikostech řádově jednotek mikrometrů velmi výrazně přispívají k otěruvzdornosti, teplotní odolnosti a tribologickým vlastnostem [2].

Jako povlaky pístních kroužků pro použití ve spalovacích motorech budoucnosti se uvažují tenké vrstvy deponované metodou PVD či CVD. Tyto extrémně tvrdé vrstvy v současnosti dosahují nejlepších výsledků v laboratorních testech, a to jak v míře opotřebení, teplotní stálosti či tribologických vlastnostech. Přesto že některé firmy již takto upravené pístní kroužky svým zákazníkům nabízejí, jejich použití je v masové produkci omezeno vysokou cenou. Proto se používají převážně v závodních aplikacích, vybraných produkčních motorech či letectví [2; 3; 4].

Jak je patrné z Obr. 1, tlaky plynů některých vysoce výkonných spalovacích motorů již přesáhly hodnotu 20 MPa. Vysoké tlaky jsou nutné v souvislosti se zvyšováním výkonu, účinnosti a zároveň snižováním emisivity motorů a ochranou životního prostředí. Tyto extrémně vysoké tlaky jsou velkou zátěží pro pístní kroužky. Urychlují jejich opotřebení a zároveň zvyšují tlak kroužků na stěnu válce, čímž razantně zvyšují tření v pístové soustavě, které je úměrné až 24 % celkových ztrát v motoru (Obr. 2) [4; 5].



Obr. 1- Velikost spalovacích tlaků v moderních dieselových motorech [5]



Obr. 2 – Ztráty způsobené třením v zážehovém motoru [4]

Ke snížení emisí oxidů dusíku vzniklých při spalování přidávají výrobci do motorů EGR ventily (Exhaust Gas Recirculation). Tyto ventily v určitých jízdních režimech recirkulují část výfukových plynů tím, že je přes výměník tepla odvádí zpět do spalovací komory, kde dochází k jejich opětovnému hoření. Vzhledem k tomu, že je v nasávaném vzduchu část objemu tvořena spaliny, je obsažen menší podíl kyslíku a hoření probíhá za nižších teplot. To snižuje vznik nebezpečných oxidů dusíku, které se tvoří až za vysokých teplot nad 1300 °C a/nebo při vyšší koncentraci kyslíku ve směsi. Recirkulace spalin má však určité nevýhody. Jednou z nich je, že vnáší velké množství sazí do spalovací komory, které zvyšují opotřebení systému vložka válce - pístní kroužek [3; 6].

## 2 Pístní kroužky

### 2.1 Hlavní funkce pístních kroužků

Pístní kroužky jsou velice namáhané součásti všech běžných spalovacích motorů. Při více než 100 zdvizích za sekundu jsou vystaveny extrémně vysokému tepelnému a mechanickému zatížení. I za těchto podmínek však musí plnit řadu úkonů, jež jsou pro chod motoru zásadní. Mezi tyto úkony například patří zajištění těsnění mezi pístem a stěnou válce u spalovacích motorů, distribuci a kontrole olejového filmu, odvod velké části tepla z pístu do chladnější stěny válce a stabilizaci pístu. Dále zabraňují průniku mazacího oleje do spalovací komory a často přímo určují životnost celé pístové skupiny [2; 7].

Pro zajištění správného chodu motoru je důležité správné množství mazacího oleje. To zajišťuje dolní, stírací pístní kroužek. Ten při pohybu pístu dolů stírá přivedený olej z vložky válce do olejové vany a společně se dvěma těsníci kroužky jej v tenké vrstvě rovnoměrně rozděluje po celé stěně. Pro lepší vytvoření olejového filmu, bývá pracovní strana těsnících kroužků na tento tvar zaoblena už výrobcem, pokud by zaoblená nebyla, zaoblení se postupně vytvoří při provozu motoru [2; 7].

Dle [1] je od pístních kroužků souhrnně požadováno:

- Krátká doba záběhu
- Co nejlepší utěsnění kompresního prostoru proti prostoru klikové skříně a naopak
- Odvedení části tepla z tělesa pístu do válce
- Schopnost regulovat spotřebu oleje
- Malé ztráty způsobené třením
- Vedení pístu ve válci
- Vysoká životnost i za špatných mazacích podmínek
- Co nejmenší hmotnost
- Nízká cena

### 2.2 Základní dělení pístních kroužků

Pístní kroužky se dělí na pístní kroužky stírací a pístní kroužky těsnící. Charakteristické tvary obou typů pístních kroužků jsou uvedeny na Obr. 3.

Hlavním úkolem pístních kroužků stíracích je regulace tloušťky mazací vrstvy mezi pístem a válcem. Důležité je, aby byla stěna válce dobře mazána a nedocházelo ke kovovému tření mezi kroužkem a válcem, a zároveň, aby byla spotřeba oleje v důsledku jeho spálení co nejmenší. Stírací kroužky jsou po obvodě děrovány, aby mohl setřený olej odcházet do drážky v kroužku, kde je shromažďován a odtud vyloučen skrz stěnu pístu do olejové vany. Dále zabraňují průniku oleje nad píst do spalovací komory, kde by jeho spalováním došlo ke zvýšení celkové výfukové emisivity automobilu. Běžně se užívá na jeden píst jeden stírací kroužek, který se zpravidla umísťuje do nejspodnější drážky v pístu. Ovšem kde je třeba je možné užít i více stíracích pístních kroužků najednou, běžně se užívá do tří kroužků na píst. Naopak existují i motory, kde tyto pístní kroužky nejsou vyžadovány vůbec, a to jsou především dvoudobé spalovací motory, kde je mazivo přimícháváno přímo do paliva [2; 7; 8; 9].

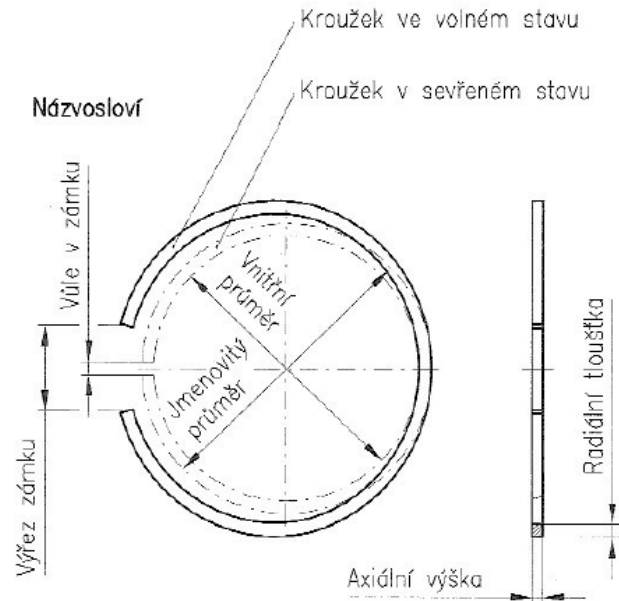
Pístní kroužky těsnící zabezpečují těsnost spalovacího prostoru z hlediska průniku spalin do klikové skříně motoru, čímž se rapidně prodlužuje interval výměny oleje a také se zvyšuje účinnost a výkon samotného motoru, neboť utěsněním spalovacího prostoru nedochází k úbytku tlaku, který působí na píst a dále se v podstatné míře podílejí na odvodu tepla z pístu do stěn válce. Všechny moderní těsnící pístní kroužky mají průměr cca o 10 % větší, než je průměr válce, do kterého jsou umístěny. Tím je zajištěn tlak od pístního kroužku na stěnu válce a dostatečné utěsnění spalovací komory. Boční dosedací plocha kroužku přenáší síly mezi kroužkem a stěnami drážky pístu, čímž zabezpečuje těsnost průniku spalin a oleje. Tato plocha bývá jemně broušená. Hlavní těsnící plocha zajišťuje v kontaktu se stěnou válce utěsnění spalovacího prostoru. Pro zlepšení kluzných vlastností a životnosti bývá hlavní pracovní plocha povrchově upravována. Počet těsnících kroužků se liší podle typu motoru, ovšem standardně jsou na každém pístu 2 - 4. Například vysokootáčkové čtyřtákní diesellové motory mívají tři těsnící pístní kroužky na píst [2; 7; 8; 10].

Pístní kroužky těsnící		Pístní kroužky stírací z jedné části		Pístní kroužky složené ze dvou částí		Pístní kroužky složené ze tří částí	
	Pravouhlej		S vyrezy		S vyrezy se sroubovym expanderem		Lamelovy s dist. expanderem typ VF
	Zkoseny		Se vyrezy střešovite skoseny		S vyrezy, střešovite zkos. se sroubovym expanderem		Lamelovy s dist. expanderem typ MINIFLEX
	S vnitřnim skosenim		S vyrezy skoseny		S vyrezy, zkoseny se sroubovym expanderem		Lamelovy s dist. expanderem typ SS50
	S vnitřnim osazenim				S vyrezy, profilove brouseny se sroubovym expanderem		
	Trapézovy				S vyrezy, profilove brouseny se sroubovym expanderem		
	Tvaru "L"						

Obr. 3 – Typy těsnících a stíracích pístních kroužků [11]

### 2.3 Základní parametry pístního kroužku

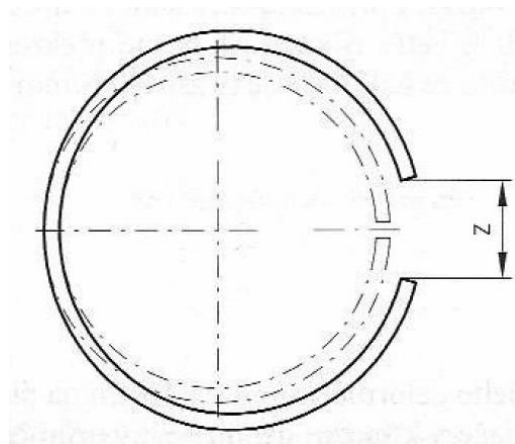
Na Obr. 4 je schematicky zobrazen pístní kroužek. Čím nižší je axiální výška pístního kroužku, tím lépe dochází k odvodu tepla z pístu do válce, ale zároveň dochází k větším třecím ztrátám. Ke snížení těchto ztrát lze výšku kroužku navýšit, ale tím naopak vzroste měrný tlak na stěnu válce. Obvykle mají těsnící pístní kroužky menší výšku než kroužky stírací [11].



Obr. 4 – Návosloví základních parametrů pístních kroužků [1]

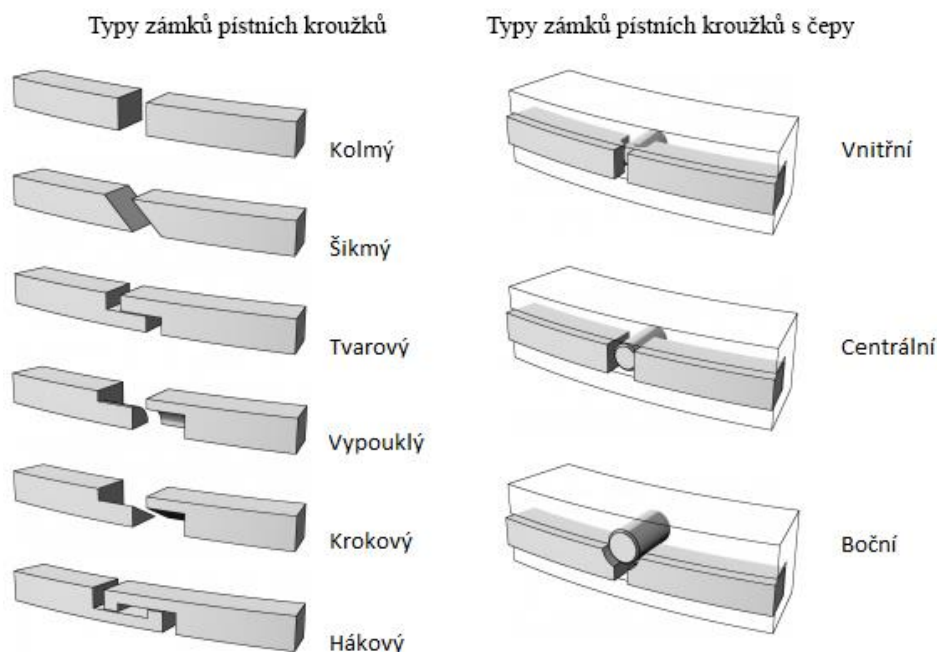
## 2.4 Výřez zámku pístního kroužku

Z hlediska konstrukce je důležité, aby byl pístní kroužek rozříznutý. Výřez v zámku pístního kroužku je zobrazen na Obr. 5. Jedná se o mezeru mezi konci nesevřeného kroužku, která má několik funkcí, ovšem tou hlavní funkcí zámku je umožnit jeho navlečení do drážky pístu a dilataci kroužku při jeho ohřátí. Vůle zámku musí být taková, aby nedošlo ani při maximální provozní teplotě k vymezení vůle zámku. Pokud není vůle dostatečně velká, je riziko, že dojde k lomu pístního kroužku. Čím větší je výřez, tím větší je tangenciální napětí pístního kroužku. Současně pro vytvoření zvolené tangenciální síly musí mít kroužek potřebný průřez s odpovídajícím momentem setrvačnosti a materiál s potřebným modulem pružnosti [2; 7; 12].



Obr. 5 – Výřez zámku pístního kroužku [1]

Existuje několik různých provedení zámků pístních kroužků. Nejběžnější a zároveň nejjednodušší je typ kolmý, který se používá ve většině čtyřdobých motorů. Typ šikmý a tvarový se běžně používá v kompresorech a hydraulických motorech, ale změna řezu zámků nepřináší žádné výhody v těsnění. Pro zlepšení těsnění se ovšem používají zámků typu krokového a vypouklého. Tyto typy zámků se ukázaly jako výhodné při použití v hydraulických aplikacích, ale ve spalovacích motorech jejich výhody nebyly prokázány. Hákový zámek poskytuje pouze výhodu při montáži a nemá žádný další efekt např. pro utěsnění spalovací komory [12]. Typy zámků jsou uvedeny na Obr. 6.



Obr. 6 – Různé typy zámků pístních kroužků [11]

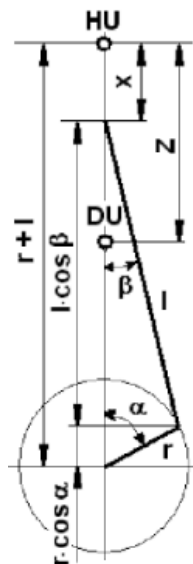
U motorů dvoudobých je ještě nutné zamezit pootočení pístního kroužku v pístu. Pokud by k pootočení došlo, hrozilo by, že se pístní kroužky dostanou volným koncem do kontaktu s hranou sacího kanálu a došlo by k jejich destrukci. K tomuto účelu slouží čep, který je pevně spojen s drážkou pístu, přičemž jeho uchycení k pístnímu kroužku se liší. Nejčastějším řešením je, pokud čep neprochází přes celou tloušťku pístního kroužku, ale je pouze v jeho výřezu. Dalším řešením může být klínový tvar ve spodní nebo horní části zámků kroužku, do kterého je čep zasazen [7; 11]. Konstruktivní řešení jsou zobrazena na Obr. 6.

## 2.5 Kinematika pístních kroužků

Primární pohyb pístních kroužků je totožný s přímočarým pohybem pístu. Jeden z hlavních požadavků na pístní kroužek, a to schopnost tvorby olejového filmu na povrchu válce, úzce souvisí s jejich dynamikou. Pro analýzu tření mezi pístem a válcem je nutné vhodně definovat závislost okamžité rychlosti pístu na úhlu natočení klikové hřídele uvnitř klikového mechanismu (Obr. 7). Dráha pístu je dána vztahem [7]:

$$s = r(1 - \cos\alpha + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \alpha),$$

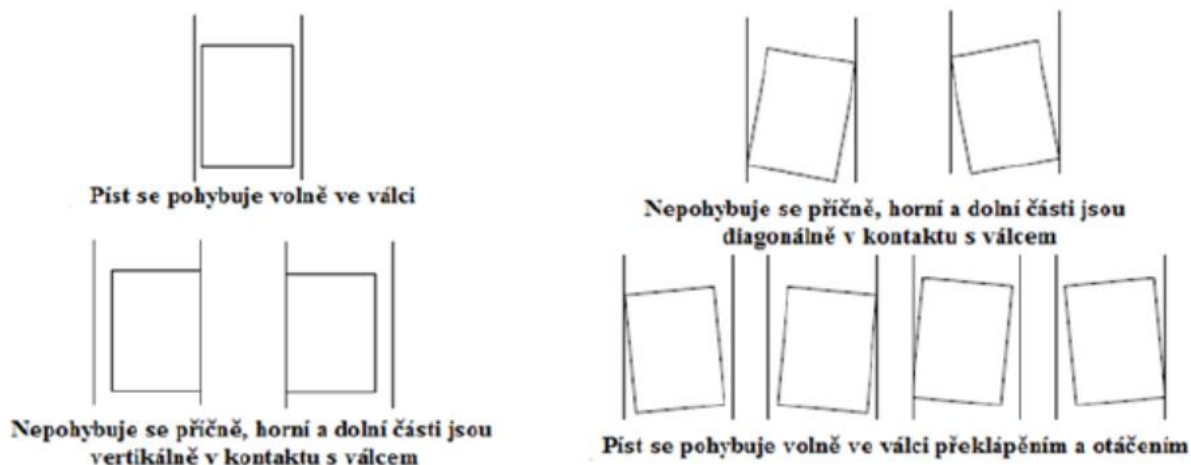
přičemž parametr  $\lambda = \frac{r}{l}$  udává ojnicní poměr.



Obr. 7 – Schéma klikového mechanismu [10]

Vyšší hodnota ojnicního poměru znamená kratší ojnici k danému zdvihu. To může mít výhodu v nižší zástavbě motoru, ovšem zvyšuje se tak šikmost pozice ojnice vůči pístu, a tím se zvyšují třecí síly. Moderní motory mají hodnotu  $\lambda$  mezi 0,2 – 0,35 [7].

Sekundární pohyb pístních kroužků je dán vzdáleností mezi pístem a pláštěm válce. Pokud je mezera mezi těmito plochami příliš velká, je umožněn boční pohyb a náklon pístu podle sil a momentů vzniklých od ojnice. Základní způsoby pohybu pístu jsou znázorněny na Obr. 8 [7].

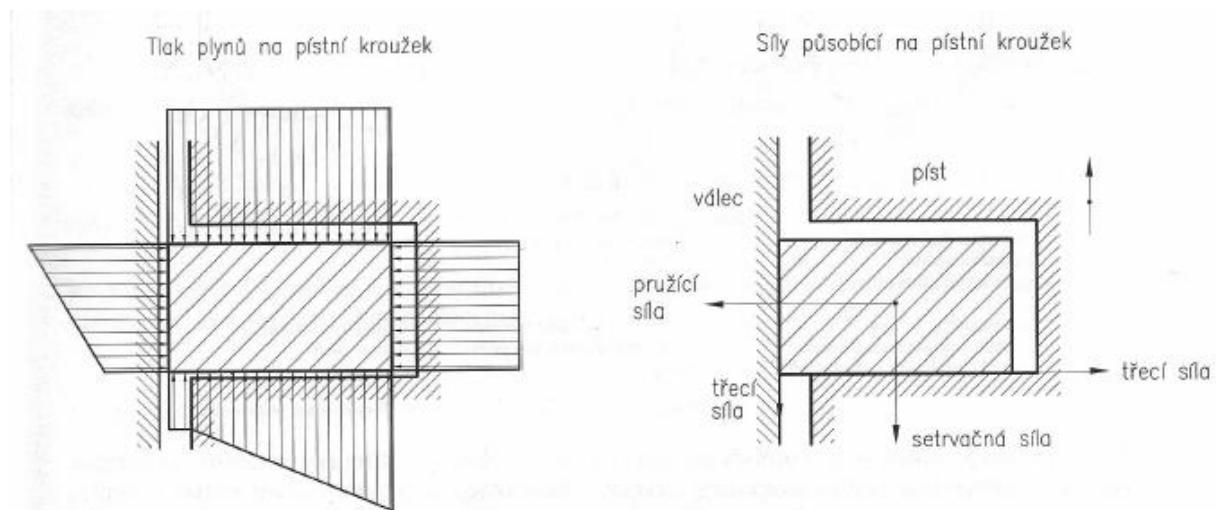


Obr. 8 – Způsoby pohybu pístu ve válci [8]

## 2.6 Síly a tlaky působící na pístní kroužky

Na pístní kroužky působí různé síly od tlaků plynů, setrvačné síly vyplývající z vratného pohybu pístu, třecích sil, zatížení od tlumení olejovým filmem a vlastní pružící síly pístních kroužků. Obr. 9 schematicky ukazuje síly působící na pístní kroužek. Zde se vychází z předpokladu, že kroužek přiléhá po celém obvodu na stěnu válce a spodní boční plochou na odpovídající plochy drážky v pístu. Z obrázku je patrné, že pístní kroužky dosáhnou účinného utěsnění spalovací komory tlakem plynů, které proniknou do vnitřního prostoru dna drážky [2].

U pístních kroužků osazených pružinou je kontaktní tlak dosažen i ve spojení s touto pružinou. Kontaktní tlak na straně pístní drážky je dosaženo pomocí axiální síly, která je způsobena tlakem plynů nad a pod kroužkem a setrvačnými a třecími silami. Vzhledem k tomu, že se tyto síly mění s cyklickým pohybem pístu, pohybuje se pístní kroužek od horní strany drážky ke spodní a naopak [2; 7].



Obr. 9 – Tlak plynů a síly působící na pístní kroužek [1]

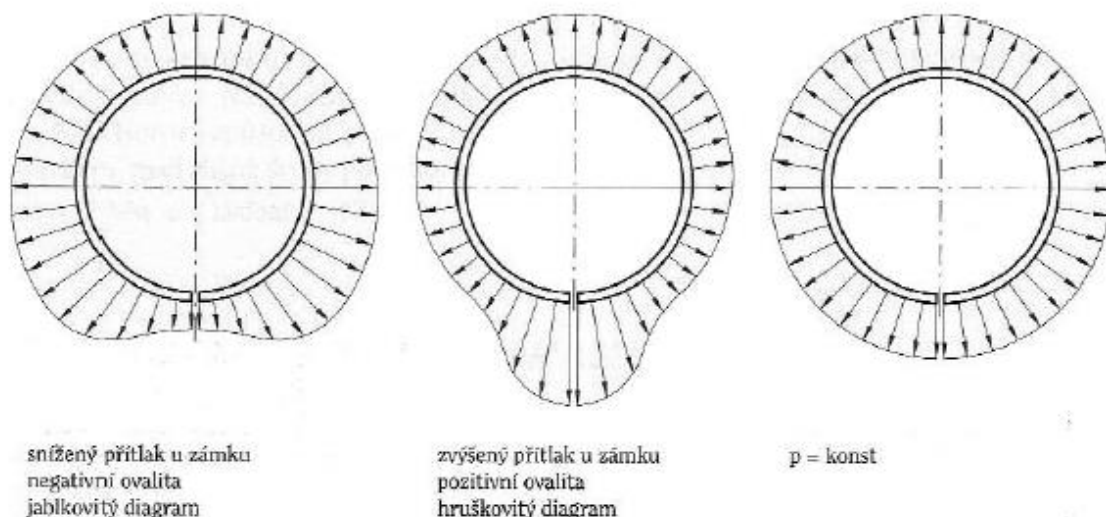
### Střední měrný tlak

Jedná se o průměrnou hodnotu tlaku pracovní plochy kroužku na stěnu válce příslušného průměru. Tento tlak je jen velmi malým zlomkem tlaku, který vyvozuje spaliny při pracovním zdvihu pístu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v normách ČSN 02 7010 – 20. Pro těsnící pístní kroužek jsou v rozmezí 0,12 – 0,25 MPa. Velikost středního měrného tlaku je závislá na rozměru pístního kroužku [1; 2; 7]

### Skutečný měrný tlak

Na Obr. 10 jsou zobrazeny základní typy průběhu měrného přitlaku. Po obvodu kroužku je skutečný měrný tlak různý. Zde se jedná o rozložení přitlaku, který je vyvolán tvarem kroužku v otevřeném stavu, nikoliv tlakem plynů. Ve schématu nalevo je rozložení radiálního tlaku, které je vhodné pro dvoudobé motory, pro svůj nízký tlak ve výřezu zámku a tím snadnější přechod přes přepouštěcí kanál. Prostřední provedení umožňuje vhodné rozložení tlaku pro čtyřdobé motory, protože zvyšuje stabilitu kroužku a brání tak chvění pístu. Napravo je zobrazeno rozložení tlaku na pístním kroužku, které je vhodné pro použití v motorech s velkým vrtáním válců [2; 1].

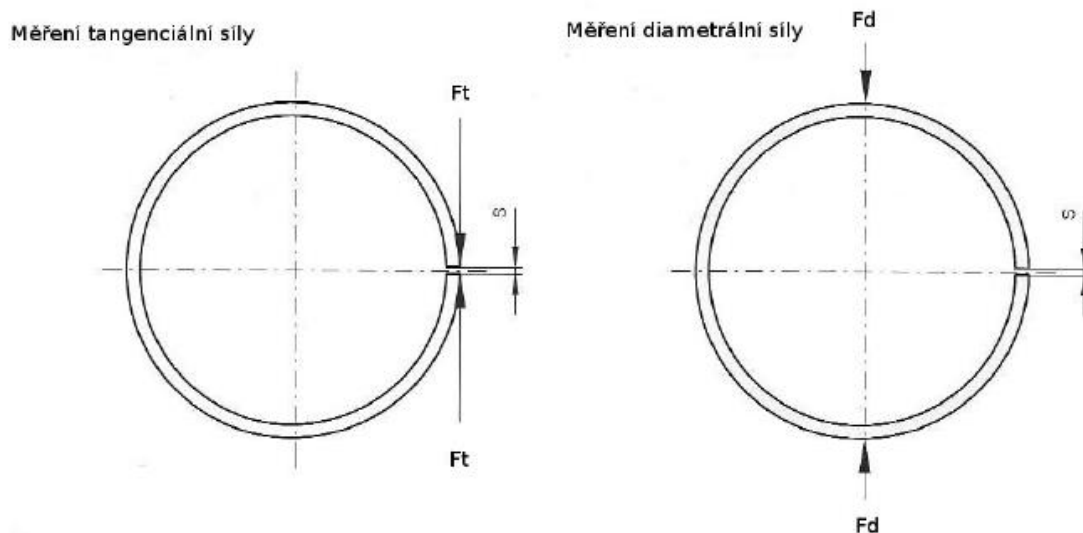




Obr. 10 – Průběh přitlaků kolem pístních kroužků [1]

### Tangenciální síla

Jedná se o sílu, která se zjistí na „váze“, což je měřidlo, kde se sevře kroužek uložený v tenké kovové pásce na předepsanou vůli v zámku. Stejně lze zjistit diametrální sílu, která se měří pouze pootočením o  $90^\circ$  (Obr. 11). Při měření se vždy upřednostňuje  $F_t$ , protože při zatížení  $F_d$  vzniká v průřezu vysoké zatížení v ohybu, které může vést až k trvalé deformaci pístního kroužku [2; 1].



Obr. 11 – Schéma měření tangenciální a diametrální síly na pístním kroužku [2]

Tangenciální síla je velmi důležitým faktorem při návrhu pístních kroužků. Vtah pro tangenciální a diametrální sílu je při modulu pružnosti  $E$  menším než 150 GPa (tedy pro kroužky ze šedé a tvárné litiny) dán rovnicí [1]:

$$P_{tg} = 0,49. P_d$$

Pokud je modul pružnosti  $E$  vyšší než 150 GPa, tedy pro kroužky z oceli, změní se konstanta v rovnici [1]:

$$P_{tg} = 0,46. P_d$$

Jednoduchou rovnicí lze zjistit matematický vztah mezi středním měrným tlakem a tangenciální silou u kroužku s pravoúhlým průřezem [1]:

$$P = \frac{2. P_{tg}}{D. h} [N. mm^{-2}]$$

### Napětí v ohybu

U pístních kroužků se dále posuzuje napětí v ohybu v provozním stavu a napětí v ohybu při navlékání na píst. V provozním stavu je kroužek sevřen na jmenovitý průměr, má kruhovitý tvar s malou vůlí v zámku kvůli tepelné dilataci. Nejvyšší hodnota napětí v ohybu při provozním stavu je dosažena v průřezu naproti zámku a je dána vztahem [1]:

$$\sigma_{max} = 0,424. z. E. \frac{t}{(D - t)^2} [N. mm^{-2}]$$

Při navlékání pístního kroužku na píst je nutné jej rozevřít minimálně tak, že jeho vnitřní průměr odpovídá průměru drážky v pístu. Navlékání kroužku se provádí pouze specializovanými nástroji, např. kuželový nástavec, který se nasadí přes hlavu pístu a kroužek se přes něj přetáhne. Dále mohou být použity například specializované kleště, které mohou být poloautomatické a dokáží nasadit celou sadu kroužků najednou. Nejvyšší dosažené napětí při navlékání pístního kroužku je v jeho průřezu, který leží 90° vedle pozice zámku. Rovnice má tedy tvar [1]:

$$\sigma_{max} = 0,64. \left( \frac{4E}{\left(\frac{D}{t} - 1\right)^2} \cdot \sigma_{bmax} \right) [N. mm^{-2}],$$

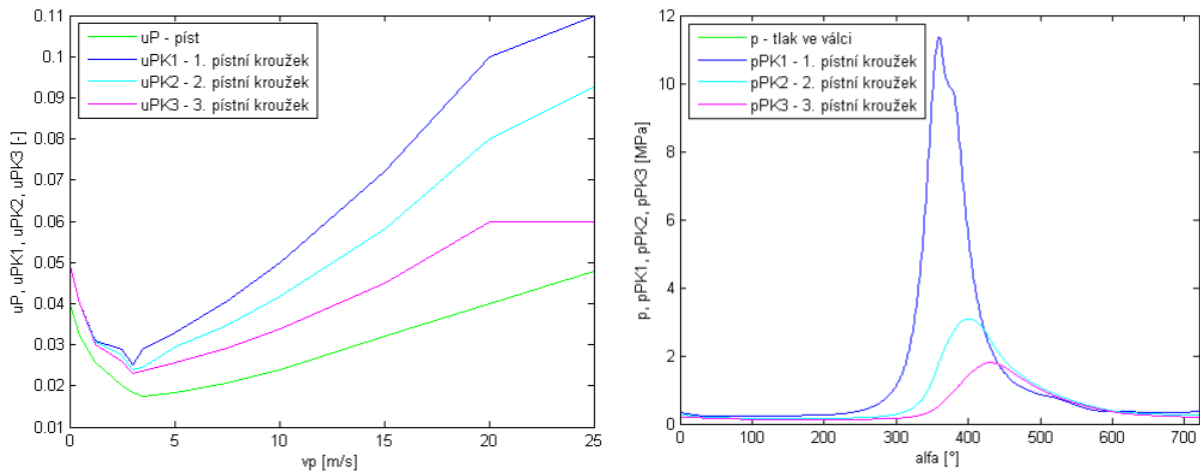
kde  $z$ , je mezera mezi konci zámku,  $D$  je nominální průměr,  $E$  je modul pružnosti a  $t$  je radiální tloušťka [1].

### Třecí síly mezi PK a pláštěm válce

Tyto síly tvoří téměř 25 % ze všech ztrát spalovacího motoru. Snížení třecích sil mezi válce a pístním kroužkem je žádoucí v důsledku klidnějšího chodu motoru, vyšší účinnosti motoru, nižší spotřeby paliva a snížení emisí. Třecí síly pístních kroužků jsou závislé na velikosti spalovacích tlaků a na normálové síle, která je kolmá na osu válce. Tlak vzniklý od detonace směsi ve spalovací komoře pronikne do drážky za pístní kroužek a zvýší tak jeho přitlačnou sílu k válci, čímž se mezi nimi zvýší tření. V práci [13] byl studován průběh tlaku ve válci zážehového motoru, kde byl při vysoké zátěži naměřen tlak téměř 60 barů. U přeplňovaných vznětových motorů mohou být tlaky ještě vyšší, jak bylo ukázáno v [14],

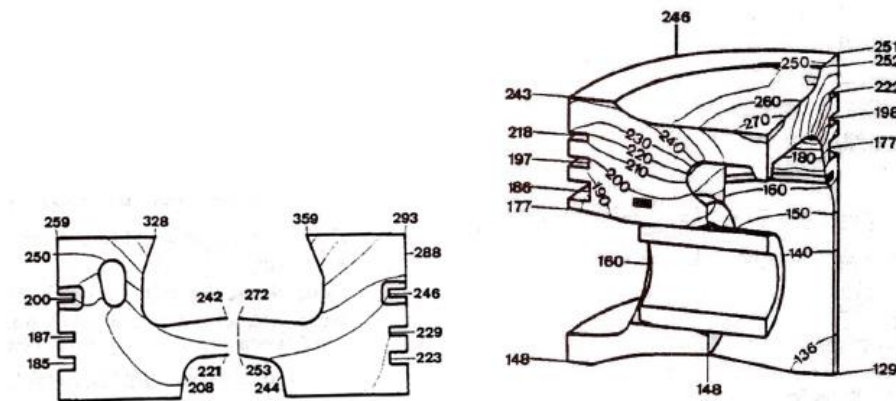
kde byl měřen tlak ve válci během pracovní cyklu pístu, přičemž nejvyšší naměřená hodnota tlaku se rovnala 95 barům [8].

Nejvyšší třecí síla působí na prvním kroužku, avšak ne v průběhu celého pracovního cyklu, jak je znázorněno na Obr. 12 vlevo. Na obrázku jsou také znázorněny průběhy třecích sil ostatních kroužků, které jsou ovšem v porovnání se silami na prvním kroužku nižší. V pravé části obrázku jsou znázorněny korespondující tlaky působící za jednotlivými pístními kroužky [7; 12].



Obr. 12 - Hodnoty součinitelů tření pro píst a pístní kroužky (nalevo) a hodnoty tlaku za jednotlivými písty (napravo) [12]

## 2.7 Tepelné zatížení pístních kroužků



Obr. 13 – Teplotní pole pístu použitého u vznětového (nalevo) a zážehového (napravo) motoru [2]

Obr. 13 zobrazuje rozložení teplot na povrchu i jádře pístu u zážehových i vznětových motorů. Z obrázku je zřejmé, že nejvíce tepelně namáhaným pístním kroužkem je kroužek první, tedy kroužek nejbližší ke spalovací komoře. U vznětových motorů se blíží teploty, kterým je první kroužek vystaven asi 250 °C u zážehových 220 °C [2].

Maximální teplota v drážce prvního pístního kroužku nesmí překročit teplotu karbonizace použitého oleje. Tato teplota se u běžných minerálních olejů pohybuje okolo 220 °C, u olejů syntetických jsou uváděny hodnoty do 260 °C. Pokud je tato teplota překročena, dojde ke vzniku karbonu, který následně omezí radiální a axiální pohyb kroužku, čímž dojde k zapečení kroužku na úrovni stěny můstku a ten přestává těsnit. Z důvodu netěsnosti dojde k průniku spalín kolem pístního kroužku a začnou zvyšovat teplotu pístu, tím dochází ke zvětšení jeho průměru a zadření motoru. Průnikem spalín do olejové vany také dochází k poklesu výkonu motoru a znečištění oleje sazemí a naopak průnikem oleje do spalovací komory dochází ke zvýšení emisivity a kouřivosti motoru [2; 7].

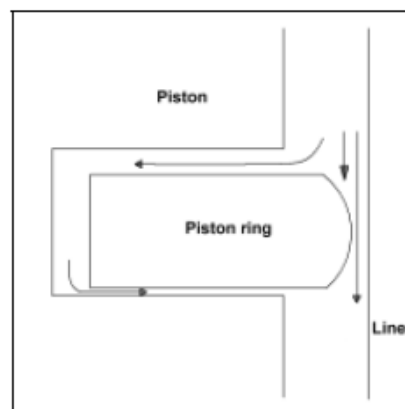
## 2.8 Záběh pístních kroužků a utěsnění spalovací komory

Jedním z hlavních úkolů pístních kroužků je utěsnění spalovací komory, aby nedocházelo k úniku spalín ze spalovací komory kolem pístu do olejové vany. Úniku spalín motoru nelze nikdy plně zabránit, ovšem je žádoucí tento jev co nejvíce potlačit, neboť by nebyla využita veškerá energie expandujících plynů, což značně ovlivňuje výkon motoru a jeho ekonomický chod. Navíc uniklé horké spaliny degradují mazací olej a narušují lubrikaci mezi pístním kroužkem a vložkou válce, protože unáší lubrikant z kontaktu kroužku s protikusem [8].

Plyny kolem pístu mohou unikat třemi cestami: (a) zámekem pístního kroužku, (b) kolem vnějšího průměru pístního kroužku při nedostatečné lubrikaci anebo (c) kolem vnitřního průměru pístního kroužku, pokud kroužek není v kontaktu s horní ani dolní stěnou drážky v pístu (Obr. 14) [8].

Vzhledem k tomu, že spojení pístního kroužku s vložkou válce probíhá za dynamických podmínek, je utěsnění spalovacího prostoru značně komplikované. Při vratném pohybu pístu, musí pístní kroužek kopírovat povrch nedokonale kruhovitěho válce a zajišťovat těsnost spojení po celou dobu expanzní fáze. Záběh pístních kroužků tedy znamená schopnost se přizpůsobit nedokonalostem vložky válce. Tyto nedokonalosti jsou běžně způsobeny teplotním a mechanickým zatížením, netěsnostmi hlavy válců a abrazií. Kroužek se tedy musí flexibilně a rychle adaptovat měnící se vložce válce. Toho se dá dosáhnout zvýšením tangenciální síly a/nebo snížením momentu hybnosti kroužku. Ovšem při zvýšení tangenciální síly se naopak zvyšuje tření kroužku s protikusem a snížení momentu hybnosti lze docílit zmenšením tloušťky kroužku, což může vést k jeho destrukci [8].

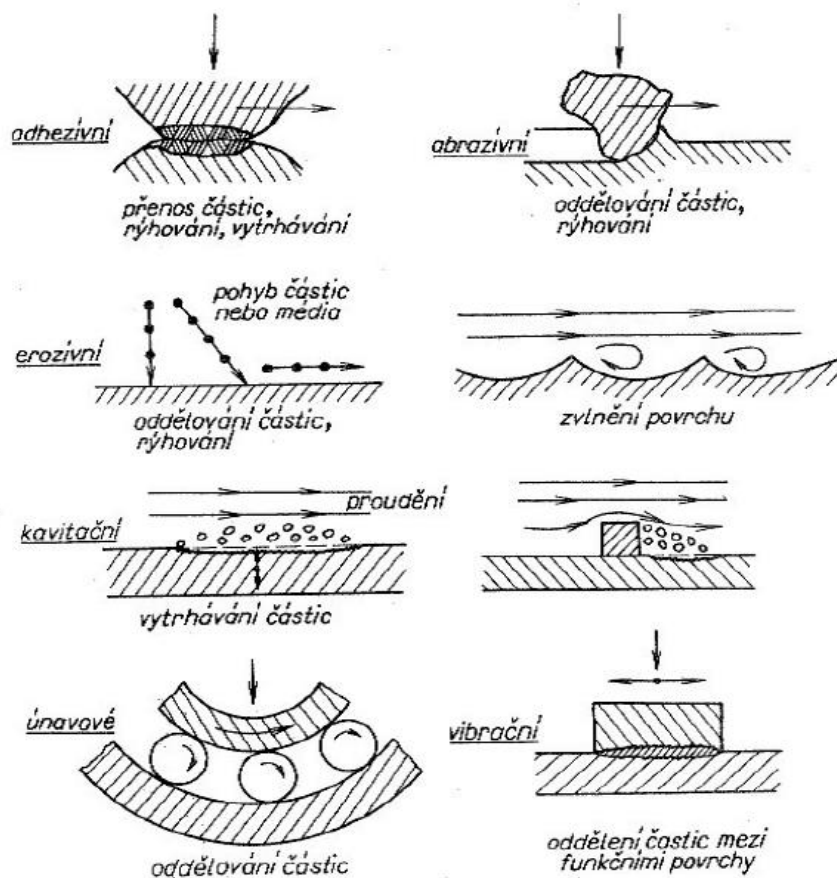
Vhodnou metodou pro umožnění dobrého záběhu kroužku ve válci se jeví také povlakování některými měkkými povlaky. Jedná se zejména o galvanické cínování, ferroxaci a manganaté fosfátování [2].



Obr. 14 - Průnik spalín kolem pístního kroužku drážkou v pístu [8]

## 2.9 Opotřebení pístních kroužků

Životnost a spolehlivost strojních dílů jsou ve značné míře ovlivněny procesy tření a opotřebení na funkčních površích. Opotřebením se označuje nežádoucí změna stavu povrchu nebo rozměru dílů, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, které jsou ve vzájemném pohyblivém kontaktu, nebo funkčního povrchu a média. Vzhledem ke své široce pojaté obecné definici lze opotřebení dělit do několika kategorií, které však nemají ostré ohraničení. Základní typy opotřebení jsou uvedeny na [15].



Obr. 15 – Schematické znázornění hlavních druhů opotřebení [2]

## 3 Výroba pístních kroužků

Výroba pístních kroužků se liší v použité technologii, přičemž častým způsobem je lití pístních kroužků, a to buď jednotlivých, nebo axiálně zdvojených. Další technologií může být výroba kroužku z pouzder a z trub. Rozhodnutí jakou technologii použít je dáno požadovanými parametry materiálu a ekonomickou bilancí [1].

Lití těsnících pístních kroužků patří mezi nejsložitější postupy ve slévárenské praxi. Je zde požadovaná homogenní struktura, pevnost, elastické vlastnosti, kvalitní povrch a přesné rozměry. Kroužky se lijí s co nejmenšími přídávky v rozevřeném stavu, přičemž kroužky o menší axiální výšce než 2 mm se lijí jako zdvojené odlitky, které se v dalším technologickém procesu axiálně rozřezávají. Odlévání se provádí do syrových forem, sestavených do sloupců – po odlití tedy vzniká typický „stromeček“, kde jsou jednotlivé

odlitky stejného rozměru pospojovány s kulem vtokové soustavy. Vzhledem k tomu, že z každého odlitku lze vyrobit jen jeden typ pístitního kroužku, je slévárna zatížena vysokými náklady na velký počet modelových desek. Po odlití se formy dopraví na střásací rošt, kde se odlitky vibracemi nebo úderem srazí do palety. Poté se tryskají nebo kroužky větších rozměrů omílají [1].

Následuje hrubé, střední a jemné broušení z důvodu odstranění otřepů na vnitřním i vnějším průměru odlitků a také broušení bočních ploch kroužků. Tato operace je prováděna na poloautomatech, které provádí obě operace při jednom založení. Po broušení následuje tvarové soustružení pístitních kroužků, které se pro tuto operaci nasadí na trn a osově sevrou do balení masivními podložkami. Opracovaný trn se následně založí do hrotů frézky, přičemž se vyřízne odpovídající část zámku. Obvykle se soustruží na dvě třísky, neboť při příliš velkém úběru vzniká nebezpečí osové deformace kroužku. Následuje tvarové soustružení, kde je s výhodou uplatněno tzv. dvojité soustružení. Jedná se o technologii, kde se soustruží vnitřní i vnější rádius dvěma, proti sobě působícími noži. Díky tomu je docíleno, že při sevření kroužku na kruhový tvar je dojde k daleko menší trvalé deformaci. Tím, že se radiální tloušťka kroužku přibližuje finálnímu rozměru a je v celém obvodu stejná, tím je docílen přesnější průběh rozdělení radiálního přítlaku kroužků na stěnu válce. Prostřednictvím různých doplňkových operací, soustružnických, frézařských či brusičských se také z výchozí formy těsnících kroužků vyrábí kroužky stírací. V poslední fázi se pístitní kroužky jemně přetáčejí na vnějším průměru. Zde je nutno kroužky sevřít do pouzder, navléknout na trn a pevně sevřít. Přetáčení se provádí na soustruhu vysokou řeznou. Nakonec se kalibruje zámek kroužku, to znamená, že konce zámků jsou odfrézovány nebo odbroušeny, čímž se docílí předepsané vůle v zámku [1].

### 3.1 Materiál pro výrobu pístitních kroužků

Pístitní kroužky se vyrábí z materiálů, které dokáží vyhovět extrémním nárokům na jejich životnost a provozuschopnost. Vhodně zvolený materiál musí i při vysokých tepelných, tlakových, tribologických a dalších typech namáhání dostát vysoké životnosti automobilu. Je zřejmé, že neexistuje materiál, který by dokázal všechny následující požadavky splnit, proto je vždy nutné zvolit vhodný kompromis, dle určeného provozu pístitního kroužku [2; 1].

Materiál musí mít dobrou odolnost proti zadírání a dobré kluzné vlastnosti v systému kroužek – vložka válce. Velmi důležité jsou i parametry pevnosti a elasticity, protože kroužek musí snést vysoké rázy, kterým je vystaven od tlaků za spalovacího prostoru a musí mít vysokou odolnost proti deformacím, ať už při obrábění, montáži nebo v sevřeném stavu. Na druhou stranu musí vydržet značné ohybové namáhání jak při stlačení v provozním stavu nebo při navlékání na píst [1; 7].

Neméně důležitá je protikorozní odolnost, a to zejména vůči palivu, oleji, spalinám a nasávanému vzduchu. Vlivem nepříznivých vlivů, a to ani při vysokých ani při nízkých teplotách nesmí kroužek vykázat změny struktury, ztrátu pnutí a snížení pevnosti. Vysoká teplotní vodivost je také jednou z podmínek na materiál z důvodu chlazení pístu [1].

Dalším kritériem je také ochrana motoru při běhu ve stavu nouze, jako je například dočasný chod bez lubrikace olejem, kdy nesmí dojít k poruše pístitního kroužku a tím zadření motoru – tzv. samomaznost [2; 7; 1].

Aby měl kroužek při vratném pohybu co nejmenší setrvačné síly, je žádoucí, co nejnižší specifická hmotnost. Dalším parametrem jsou ekonomická a technologická hlediska, jako například nízká cena materiálu a dobrá obrobiteľnosť [2].

Z tribologického pohledu bývá velmi často voleným materiálem pro pístitní kroužky jemnozrnná šedá litina. Pojmeme šedá litina se rozumí heterogenní slitina železa s uhlíkem,

přičemž hmotnostní podíl uhlíku se rovná přibližně 3%. Díky přítomnosti křemíku (cca. 2,5%) je uhlík vyloučen v elementární formě jako grafit. Tato grafitová fáze litiny slouží jako zásobník oleje, navíc může působit i jako suchý lubrikant, který dokáže dočasně nahradit mazací olej, pokud by došlo k zastavení jeho cirkulace. Výhodou šedé litiny je její cena, naopak nevýhodou může být zvýšená křehkost a ztráta pružnosti při vyšších teplotách. Dále u tohoto typu materiálu dochází k rychlejšímu opotřebení hlavní těsnicí plochy. Jako alternativa se nabízejí kroužky z temperované litiny se zrnitým grafitem, které mají vyšší pevnost a jsou méně náchylné k praskání [2; 1; 7].

Vzhledem k vysokým špičkovým tlakům moderních přeplňovaných motorů, jak vznětových, tak i zážehových, jsou kladeny nejvyšší nároky hlavně na první, těsnicí pístní kroužek. Tyto nároky jsou již za hranicemi možností šedých i temperovaných litin. V těchto podmínkách se uplatňuje tvárná litina s kuličkovým grafitem, která má v zušlechťeném stavu pevnost v ohybu, která přesahuje 1100 MPa. Její nevýhodou může být vysoká náchylnost na vznik lunek při lití, je tedy nutné drahé výrobní zařízení, které tento jev eliminuje. Další nevýhodou je také cena, ve které se odráží obtížné lití, opracování a nákladné tepelné zpracování, proto se pístní kroužky z tvárné litiny nasazují jen tam, kde je nelze zamezit lomům pístních kroužků jiným způsobem. V porovnání s šedou litinou má bohužel horší kluzné vlastnosti. Z tohoto důvodu se téměř výhradně používá ve spojení povrchovou úpravou [2; 1].

Ocel, jako materiál pro pístní kroužky není vhodná pro špatné kluzné vlastnosti. Avšak ve stavu nitridovaném či chromovaném nebo s PVD vrstvou se používá pro lamelové stírací kroužky nebo jako těsnicí kroužky. V obou případech se jedná o použití v moderních benzínových motorech závodních automobilů nebo v leteckých motorech. Používá se nízkolegovaná chromkřemíková ocel [2; 1].

Dlouhodobé výzkumné práce vedly k zavedení přesně definovaných materiálů pístních kroužků podle mechanických vlastností, které jsou uvedeny v normě ČSN ISO 621-3. „Pístní kroužky spalovacích motorů – Specifikace materiálu“. Ovšem tato norma byla bez náhrady zrušena.

## 4 Povrchové úpravy pístních kroužků

Vzhledem k nedostatečným tribologickým vlastnostem některých materiálů používaných pro výrobu pístních kroužků, je žádoucí provádět jejich povrchovou úpravu. Tyto úpravy snižují tření, zvyšují chemickou i korozní odolnost, mohou sloužit jako zásobník oleje, zvyšují otěruvzdornost a celkově zvyšují životnost výrobku [2].

### 4.1.1 Ferrosování

Ferrosací se povrch pístního kroužku do hloubky asi 0,0075 mm mění v namodralou vrstvu oxidu železa ( $Fe_3O_4$ ). Proces probíhá v uzavřené pecní komoře při teplotě asi 540 °C za přítomnosti vodní páry. Takto vysoká teplota tento proces vylučuje pro kroužky, které již byly tepelně zpracované. Ferrosování vrstva drží poměrně dobře na základním materiálu a sestává ze dvou, přibližně stejně širokých zón. Vnější zóna je měkká a při záběhu se tak snadno otírá. Setřené částice pak působí spolu s mazacím olejem jako brusná pasta a zkracují záběh pístních kroužků. Spodní, tvrdá vrstva, spojená se základním materiálem, zase zvyšuje jejich otěruvzdornost [1].

#### 4.1.2 Cínování

Cínování se provádí pro zlepšení záběhových vlastností pístních kroužků nebo pro zvýšení korozní odolnosti, neboť se tak dobře zakonzervují a mohou se skladovat i dlouhou dobu. Někdy se cínování provádí na již povlakované materiály, např. na tvrdě chromované. Cínování se provádí v galvanické lázni slabým proudem asi 2 x 3 min při teplotě cca 75 °C a tloušťka vrstvy se pohybuje mezi 0,004 – 0,008 mm. Proces se provádí nadvakrát, aby povlak nebyl houbovitý [1].

#### 4.1.3 Fosfátování

Při fosfátování pístních kroužků se zpravidla dává přednost fosfátu manganatému. Manganatým fosfátováním se na povrchu pístního kroužku vytvoří cca 0,002 mm silná vrstva fosfátu manganatého, která se užívá po smíchání s olejem při záběhu motoru jako zabrušovací pasta. Proces probíhá při teplotě 80 – 85 °C a vzniklá tloušťka vrstvy je do 0,005 mm. Po nafosfátování kroužků následuje včasný a důkladný oplach, aby na povrchu nevznikly nevzhledné šedé skvrny. Nakonec se kroužky ještě pasivují v olejové lázni, kde se vytěsní voda z porů. Krystaly fosfátů drží velice pevně na základním materiálu, ale během záběhu kroužku se setřou a působí tak jako lapovací pasta, čímž se záběh urychlí. Zbývající fosfátová vrstva je porézní a pojímá do sebe určité množství oleje. Slouží tak jako zásobník mazání v místech, kde by mohlo dojít k polosuchému tření. Fosfátováním se také zvyšuje korozivzdornost. Toho se využívá při skladování kroužků určených jako náhradní díly. Touto povrchovou úpravou je dosahováno lepších výsledků než u předešlých postupů, a proto je v praxi postupně nahrazuje [1].

#### 4.1.4 Žárové nástřiky

Nástřik molybdenu plamenem poskytuje výhody v nízkém koeficientu tření, vysoké tvrdosti a vysoké teplotě tavení. Molybden je často užívaný jako otěruvzdorný materiál při vysokých teplotách. Stejně jako tvrdochromové povlaky je částečně porézní a má schopnost do sebe nasáknout určité množství oleje, čímž slouží jako prevence proti zadření motoru při nedostatečné lubrikaci a také zlepšuje jeho záběh [2; 8]

Plazmové nástřiky Mo slitin a cermetů jsou z hlediska životnosti uspokojivé, ale cenově je stále chromový povlak příznivější. Tyto povlaky se používají hlavně na dieselové motory s hlubokým vrtáním. Povlak je tvořený z kovového prášku, který byl roztaven a vysokou rychlostí nastříkán na povrch kroužku. Žárově stříkané cermety navíc musí být honovány a lapovány nebo broušeny [2; 8].

#### 4.1.5 Nitridace

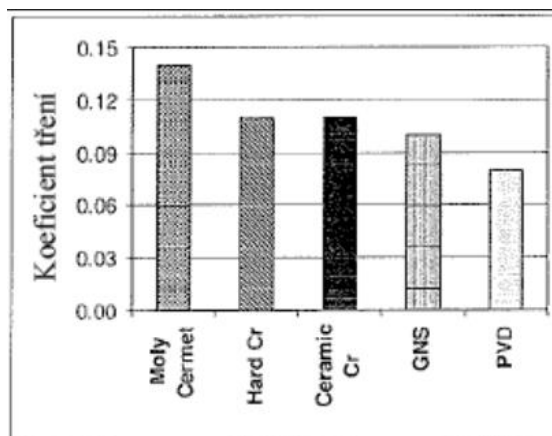
Povrchové nitridování je proces sycení povrchu dusíkem, při kterém vznikají v podpovrchové vrstvě materiálu disperzní nitridy slitinových prvků s vysokou afinitou k dusíku. Takto vytvořená vrstva si poté zachovává velkou tvrdost a odolnost proti otěru. Během nitridace je materiál vystaven teplotám okolo 510 °C v atmosféře obsahující dusík. Nízkouhlíkové oceli jsou legovány asi 1% Al, který při reakci s dusíkem tvoří velmi tvrdý nitrid dusíku AlN. Plynová nitridace pístních kroužků se používá zejména pro aplikace v moderních benzínových motorech, případně v kombinaci s PVD vrstvou pro dieselové motory. Nitridované povrchy prodlužují životnost pístních kroužků snížením opotřebení



při jejich provozu, avšak nedosahují takových kvalit jako tvrdochromové povlaky, proto se používají u méně výkonných motorů, kde jsou dražší povlaky ekonomicky nevýhodné [8].

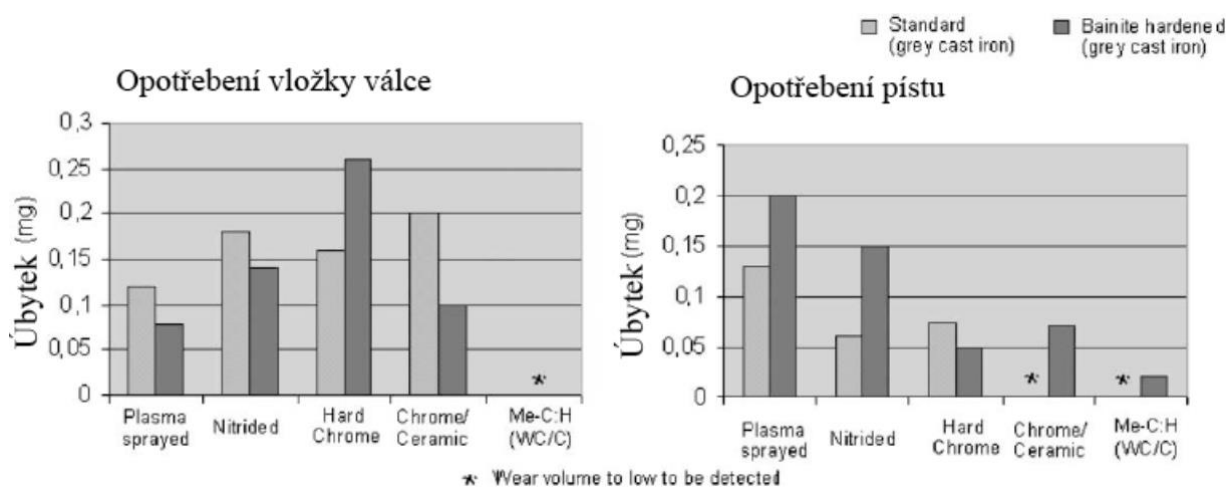
#### 4.1.6 PVD a CVD depozice

Pod tlakem na automobilový průmysl vedoucí k vyšším výkonům a vyšší spolehlivosti za současného snižování emisí, lubrikantů a spotřeby paliva se během posledních dvou desetiletí PVD a CVD tenké vrstvy začínají v čím dál větším měřítku uplatňovat. Tyto vrstvy rapidně snižují tření a opotřebení součástí jeho vlivem a tím celkovou životnost součástí.



Obr. 16 – Porovnání koeficientu tření pro vybrané povrchové úpravy pístních kroužků [3]

Tenké vrstvy Me-C:H (DLC vrstva dopovaná určitým kovem) či a-C:H (DLC hydrogenovaná vodíkem) s nízkým koeficientem tření, nízkou náchylností k adheznímu opotřebení nebo tribochemickým reakcím spolu s dalšími unikátními vlastnostmi v současnosti převyšují všechna dostupná řešení pro jejich použití s pístními kroužky. Dobrých výsledků je dosaženo také v oblasti opotřebení ostatních částí pístní skupiny, které bylo v případě použití pístního kroužku v kombinaci s DLC minimální (Obr. 17).



Obr. 17 – Laboratorní test PIN-on-DISC, jako simulace opotřebení pístu a vložky válce pístním kroužkem s aplikovanou Me-C:H vrstvou [3]

Tvrdość těchto vrstev je v širokém pásmu, od 500 – 2500 HV, je tedy možné produkovat extrémně tvrdé ořezávací zóny přímo na substrátu a měkké zóny směrem k vložce válce, čímž se zrychlí záběh kroužků. Změnou depozičních parametrů je možné ovlivnit poměr  $sp^2$  (grafit) a  $sp^3$  (diamant) vazeb a obsah vodíku v tenké vrstvě. Tyto parametry mají zásadní vliv na tribologické vlastnosti vrstvy. Dalším, poněkud dražším řešením může být použití multivrstevných systémů, kde by opět tvrdá vrstva bránila opotřebení a měkká vrstva na povrchu by urychlovala záběh [8; 3].

V práci [4] je udána taková tenká vrstva nazývaná Carbo-glide vyvinutá společností Federal-mogul, která je složena z tří vrstev. Spodní, velmi tenké chromové vrstvy jako adhezni podklad. Na této základní vrstvě je mezivrstva DLC dopovaná wolframem a hydrogenovaná vodíkem. Tato struktura sestává ze sloupcových útvarů kolmých k povrchu. Vrchní vrstvou je amorfní DLC se specifickým poměrem  $sp^2$  a  $sp^3$  vazeb. Celková tloušťka vrstvy je pod 10  $\mu\text{m}$ , nemění tedy nijak zvlášť celkovou geometrii pístního kroužku. Tvrdość této vrstvy dosahuje hodnot 3100 HV 0,02 a koeficient tření je méně než 0,02.

Dalším typem PVD vrstev používaných ve spojitosti s pístními kroužky je tzv. HV-PVD (High Value PVD), který je možné deponovat na běžně používané kroužky z tvárné litiny, čímž znatelně sníží tření a opotřebení v pístním systému a zvýší jeho životnost. Tato vrstva sestává z chromové mezivrstvy a CrN PVD vrstvy. V práci [5] byla tato vrstva porovnávána ve vysokootáčkovém vznětovém motoru na dynamometru s moderní kompozitní vrstvou Cr s diamantovým plnivem. Po 500 hodinovém cyklu vykazovaly pístní kroužky s nanesenou tenkou vrstvou HV-PVD poloviční opotřebení oproti běžně používaným chromdiamantovým povlakům. Při druhém testu ve vysokozátěžovém 12l dieselovém motoru bylo opotřebení čtvrtinové [5].

Ačkoliv mají PVD a CVD vrstvy velmi vhodné vlastnosti pro použití na pístní kroužky, jejich cena je stále velmi vysoká a proto se ještě donedávna používali pouze pro speciální závodní aplikace nebo ve vybraných produkčních motorech. V současné době je možné se již setkat s nasazením některých PVD vrstev v praxi, např. TiN, CrN nebo  $\text{Cr}_2\text{N}$  [2; 8].

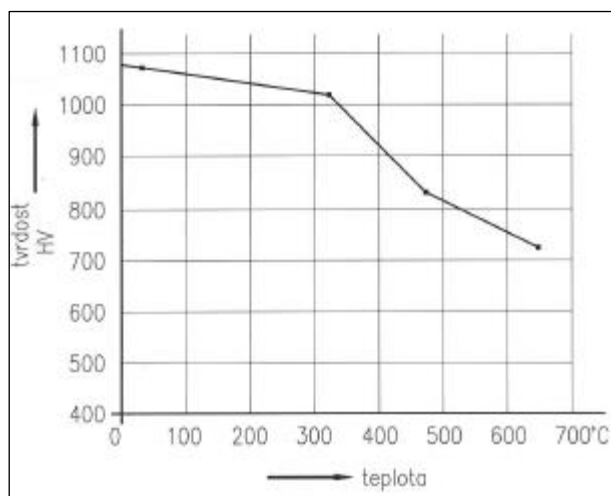
#### 4.1.7 Tvrde chromování

Mezi technologiemi úprav povrchů pístních kroužků se i v konkurenci moderních PVD a CVD tenkých vrstev či žárových nástřiků stále nejčastěji vyskytují povlaky z galvanicky naneseného tvrdochromu. Používají se jak pro benzínové, tak i pro naftové motory všech kategorií. Proto se následující kapitoly budou podrobněji zabývat problematikou této technologie.

Ačkoliv je galvanické chromování objev starší více než 150 let, funkční chromování je jako způsob snižování tření součástí používáno během posledních asi 70 let. Způsob tvrdochromování byl pro letecké motory vyvinut během druhé světové války, přičemž již povlaky několika setin milimetru podstatnou měrou zlepšili poměry při opotřebení pístních kroužků. Požadavky na tvrdochromové vrstvy jsou značné.

Tyto vrstvy by měli mít rovnoměrnou tloušťku podél celého obvodu, dále rovnoměrnou tvrdość mezi 950 a 1100 HV, což je podstatně tvrdší než ty nejtvrdoší strukturální části vložky válce, případně nečistot nasávaných se vzduchem. Adheze vrstvy k základnímu materiálu musí být větší než pevnost vlastní chromové vrstvy. Při působení mechanického namáhání nesmí částičky chromu vypadávat ze vzniklých trhlinek, aby nepůsobili v pístové soustavě rýhy. Přídržnost chromové vrstvy nesmí být podkopána korozí. Vysoká teplota tavení chromu 1920 °C leží o 650 °C výše než teplota tavení litiny vložek válců. Tím se snižuje nebezpečí zadření těchto součástí. Ovšem jako každý galvanicky nanesený povlak, i tato při působení vyšších teplot ztrácí svoji tvrdość. Z Obr. 18 je patrný průběh poklesu

tvrdosti tohoto povlak se stoupající teplotou. Vzhledem k tomu, že při více jak 500 °C se tvrdost rapidně snižuje, je problematické písní kroužky například opravovat termofixací nebo je ferroxovat kvůli zabíhavosti [1].



Obr. 18 – Pokles tvrdosti chromové vrstvy v závislosti na zvyšující se teplotě [1]

Při galvanickém nanášení chromu působením Cr hydridů tvoří kubický chrom, který má menší objem oproti hexagonální struktuře Cr hydridu. S vyšší tloušťkou vrstvy roste i napětí vyvolané objemovým rozdílem těchto vrstev, které v některých místech překročí pevnost v tahu. Vrstva tak musí toto napětí uvolnit vytvořením nového povrchu, čímž vzniká síť mikrotrhlin. Tyto trhliny jsou výhodné, protože umožňují nasát mazací olej a tak působit jako rezervoár lubrikantu, např. při krátkodobém nedostatku oleje [2].

Pro chromování se hodí lépe ocel než litina. Mezi druhy litiny se chovají při chromování lépe ty, které jsou chudší na grafit. Tvárná litina s velkými zrny grafitu se chromuje obtížněji, než jemnozrnná perlitická litina [1].

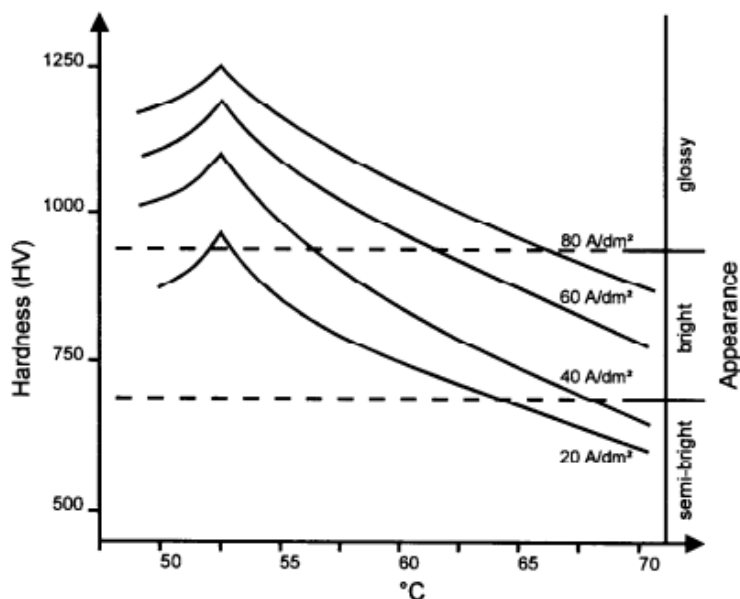
Při tvrdém chromování jsou vytvářeny tvrdé a otěruvzdorné povlaky chromu o tloušťce několika mikrometrů a po několik set mikrometrů. Vylučování je relativně pomalé a povlakování písních kroužků probíhá běžně 3 – 9 hodin v závislosti na průměru písního kroužku a chromovacím proudem, který se obvykle volí 45 – 55 A.dm<sup>-2</sup> a chromovací teplotě. Vliv teploty a velikosti proudu je zřejmý z Tab. 1 [2; 1].

Vel.proudu A/dm <sup>2</sup>	Tloušťka vrstvy za 1 hod. při teplotě				
	25 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C
31	54,4	31,6	25,9	24,3	23,8
46,6	84,8	83,2	42,5	40,3	38,2
62	108,8	76,8	61,0	58,5	54,4

Tab. 1 – Závislost výtěžnosti chromování na chromovací teplotě a proudu [1]

Tabulka platí obecně pro chromování, ovšem v dnešní době se ve všech moderních výrobnách používají chromovací elektrolyty s urychlujícími katalyzátory. Ty napomáhají k podstatnému snížení časů potřebných pro nachromování požadované vrstvy. Z tabulky je zřejmé, že nejvyšší nárůst vykazuje vrstva chromovaná při nižší teplotě a vysokému chromovacímu proudu. To ovšem platí za cenu snížené kvality vrstvy, tj. hrubší struktury a větší drsnosti povrchu [2; 1].

Parametry při chromování také přímo ovlivňují tvrdost a vzhled povlaku, jak je znázorněno na Obr. 19 [16].



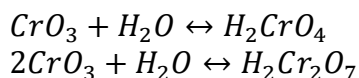
Obr. 19 – Tvrdost a vzhled chromové vrstvy v závislosti na teplotě povlakování [16]

Protože je schopnost chromového povlaku udržet olejový film značně omezená, mohou vznikat potíže při záběhu, proto se začal užívat tzv. porézni chrom. Jedná se o tvrdochromový povlak, kde cyklickou polaritou chromovacího proudu dochází ke zvětšení sítě mikrotrhlinek v chromu, a to v celém rozsahu vrstvy. Tyto mikrotrhlinky slouží jako zásobník oleje a tím zlepšují záběh pístních kroužků nebo při nedostatku mazacího oleje [2].

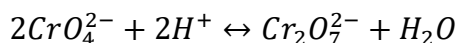
### Princip depozice chromu

Princip depozice chromu stále není jednoznačně popsán. Oxid chromový se ve vodě rozpouští na kyselinu chromovou. Chromové anionty nezůstávají v roztoku v této jednoduché formě a částečně přecházejí v polychromany. Z těchto roztoků se nedaří elektrochemicky přímo vyredukovat kovový chrom a k jeho vyloučení dochází až po přidání určitých katalyzátorů. Volba těchto katalyzátorů se ukázala být klíčová k dosažení vysoké kvality a výhodné ekonomiky v technologii funkčního chromování [17].

Dle [2] depozice chromu probíhá v několika krocích na principu postupné redukce.  $\text{CrO}_3$  je používán jako zdroj kovového chromu ve většině komerčních chromovacích lázní. Ve vodě se rozpouští na kyselinu chromovou a dichromovou:

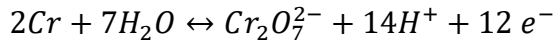


ve vodném roztoku vznikne rovnováha:



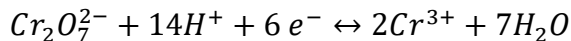
Z důvodu vysokého obsahu chromanu v lázni je rovnováha posunuta doprava. V roztoku jsou tedy obsaženy hlavně dichromany.

Celková rovnice depozice

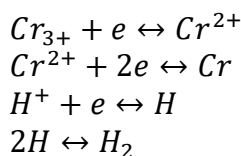


ukazuje, že pro vyloučení dvou atomů chromu je nutná reakce 27 reaktantů. I pokud nebudou brány na zřetel elektrony, stále zbývá jeden dichromanový ion a čtrnáct vodíků, které by se měli srazit zároveň. Taková srážka je téměř nemožná a celková reakce tedy má velmi malou pravděpodobnost k uskutečnění. Tzn., že musí proběhnout několik parciálních reakcí, při kterých reaguje méně reaktantů.

Během elektrolýzy se v chromovacím elektrolytu objevují ionty trojmocného chromu. Z toho lze usuzovat, že zde probíhá parciální reakce. Na začátku elektrolýzy, než se vytvoří film na katodě, je šestimocný chrom redukován pouze na chrom trojmocný:



Vedle následujících reakcí vzniká velké množství vodíku:



Dle práce [16] je chrom vylučován z roztoku šestimocného chromu a různých katalyzátorů. Typické složení „sírové“ lázně sestává z 200 – 300 g/l oxidu chromového, přičemž optimální koncentrace je 250 g/l, neboť při této koncentraci je nejvyšší katodový výtěžek. Dále je obsaženo 2,5 g/l kyseliny sírové a 2 g/l katalyzátoru. Katalyzátory jsou velmi důležitou složkou chromovacích lázní. Správnou volbou jejich koncentrace se výrazně ovlivní chod a ekonomika lázně. Redukční mechanismus je v tomto případě sestaven ze čtyř po sobě jdoucích kroků:

- 1)  $Cr^{6+} + 3e \leftrightarrow Cr^{3+}$
- 2)  $2CrO_3 + 6H^+ + 6e \leftrightarrow Cr_2O_3 + 3H_2O$
- 3)  $Cr_2O_3 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow 2CrO + H_2O$
- 4)  $CrO + 2H^+ + 2e \leftrightarrow Cr + H_2O$

Depozice a její průběh mohou být ovlivněny řadou použitých katalyzátorů, chromovacího proudu a teplotou.

### Úprava základního materiálu před chromováním

Aby byla zajištěna co nejvyšší adheze povlaku k základnímu materiálu, je nezbytně nutné opracovat jeho povrch. To lze zajistit cestou mechanickou, chemickou nebo jejich kombinací. V prvním kroku je však vždy nutné mechanické zarovnání povrchu a jeho chemické očištění. Broušení, leštění, kartáčování, omílání, tryskání, opalování plamenem a další jsou nejpoužívanější a zároveň nejdostupnější technologie používané při úpravě povrchů.

Před samotnou depozicí chromu se pístní kroužky nasadí na trn vložený do pouzdra příslušného průměru, přičemž zámky jsou zarovnány do jedné přímky. Mezera mezi konci zámků se zaplní rychleschnoucím lakem. Po zaschnutí laku se trn očistí kartáčem a prochází vodním tryskačem, kde jsou při průchodu otryskávány vodním proudem s jemným brusivem [1].



*Obr. 20 – Chromovací trn s pístními kroužky (Buzuluk a.s.) [2]*

Otryskaný trn se opláchne ve studené vodě, nasadí se distanční a izolační podložky, našroubuje se závěs a zavěsí se na katodovou tyč dopravníku. Ten celou soupravu zaveze nad chromovací vanu a spustí do kontaktních lůžek. V prvním kroku depozice se provádí tzv. anodické zdrsňování, při kterém se obrátí polarita a tím dochází k rozpuštění železa v povrchové vrstvě kroužků, čímž se docílí kovového lesku. Tento proces trvá po dobu 10 - 30 sekund při proudové hustotě mezi 20 – 30 A/dm<sup>2</sup>. Po anodickém zdrsnění se najede proudový náraz po dobu asi 3 min proudem 70 – 90 A/dm<sup>2</sup>. Poté se dále chromuje normálním chromovacím proudem [2; 1]

Po skončení chromování následuje studený oplach a rozebrání distančních a izolačních podložek. Trny se poté zakládají do pece, kde dochází k odvodňování při teplotě 180 – 220 °C po dobu cca 2 hodin. Pokud by tak nebylo učiněno, kroužky by vlivem vodíku, který byl nabrán při chromování, byly křehké a trpěly by lámavostí chromové vrstvy. Po rozebrání se trny dávají k dalšímu mechanickému opracování – konečnému lapovacímu broušení bočních ploch a broušení či honování pracovní nachromované plochy a konečné kalibraci zámků [1].



*Obr. 21 – Chromovací vana ve firmě Buzuluk a.s. [2]*

### **Chromovací katalyzátory**

Využívání katalyzátorů v chromovacích lázních má značný přínos pro chod, proudovou účinnost, rychlost a výtěžnost chromovacích lázní. Z těchto důvodů jsou katalyzátory nezbytnou součástí všech moderních chromovacích lázní [2].

Bylo zjištěno, že primárním katalyzátorem jsou sírany, které se do lázní přidávají ve formě kyseliny sírové, ovšem jednoduché fluoridy i některé komplexní soli obsahující například fluoroboritanový nebo fluorokřemičitanový aniont mají účinný katalytický efekt. Nevýhodou těchto látek je zvýšení agresivity lázně vůči základnímu materiálu a jeho následnému rozpouštění. Tím dochází k znečišťování lázně, což vede k nutnosti použít vyššího svorkového napětí, které zapříčiní vyšší spotřebu energie [17].

Moderním trendem jsou organické sekundární katalyzátory, především akryl sulfonované kyseliny a jejich deriváty v kombinaci s primárním katalytickým účinkem síranů. Tato technologie byla vyvinuta firmou M T Chemicals na konci 70. let minulého století. Tyto látky výrazně zvyšují katodický proudový výtěžek díky možnosti navýšení teploty až na 80 °C a navýšením katodové proudové hustoty až na 100 A.dm<sup>-2</sup> [17].

Při chromování se 10 – 30 % z dodaného proudu spotřebuje na redukci šestimocného chromu na kovový. Dalších asi 30 % proudu jde na redukci šestimocného na trojmocný, který se již na kovový neredukuje a zůstává obsažen v elektrolytu nebo je zpětně na anodách, a to s 30% účinností, opět oxidován na šestivalentní. Postupným zvyšováním obsahu třívalentního chromu v lázni spolu s dalšími balastními kovy např. nečistotami Fe (hlavně pokud je v lázni současně prováděno i anodické zdrsňování před chromováním) a některými těžkými kovy, se lázeň znečišťuje. Nárůstem těchto nečistot dochází ke snížení proudového výtěžku, snížení vodivosti lázně a zvýšení svorkového napětí, což vede k nárůstu spotřeby elektrické energie. Za kritickou se považuje koncentrace balastů v rozmezí 17 – 20 g/l [2; 17].

Zbytek proudu je zužitkován na vývoj vodíku. Jeho obsah v lázni je příčinou vzniku velmi kyselého aerosolu, který zvyšuje nároky na odsávací zařízení. Proto se do lázní přidávají tenzidy, které snižují povrchové napětí elektrolytu a tvoří na jeho povrchu pěnu, která snižuje úlet aerosolu do ovzduší [2; 17].

## Nebezpečí chromovacích lázní

Podniky disponující chromovacími lázněmi musí vyhovět velmi vysokým nárokům z hlediska ochrany životního prostředí, ochrany zdraví zaměstnanců a bezpečné likvidace odpadu a odpadních vod.

Toxicita chromu je závislá na jeho mocenství, přičemž nejvíce toxický je chrom šestimocný  $\text{Cr}^{6+}$ , který je obsažen v oxidu chromovém používaném pro galvanické chromování. Sloučeniny  $\text{Cr}^{6+}$  jsou karcinogenní a při dlouhodobém vystavení jeho účinku dochází k podráždění nosní sliznice, které může vést až k proděravění nosní přepážky (více na Obr. 22). Jako trojmocný chrom  $\text{Cr}^{3+}$  je nebezpečný pouze z hlediska místního podráždění, které se projeví jako alergické podráždění. Z tohoto důvodu je žádoucí vylučovat povlaky z elektrolytu, který obsahuje výhradně  $\text{Cr}^{3+}$  ionty. Bohužel pro funkční chromování zatím není k dispozici technologie dostatečně stabilní, aby mohla být průmyslově nasazena [2; 18].

Jelikož je práce při chromování riziková, je nutné zajistit dostatečné odsávání vzniklých par a použití patřičných ochranných pomůcek – odolného oděvu, rukavic, ochranných brýlí, případně respirátoru. Bohužel ne vždy jsou tato nařízení pracovníky dodržována a ti se tak vystavují vážnému ohrožení na zdraví [2].

### 1. IDENTIFIKACE LÁTKY / SMĚSI A SPOLEČNOSTI / PODNIKU

#### 1.1 Identifikátor výrobku

<b>Název:</b>	<b>Oxid chromový</b>
<b>Indexové číslo:</b>	024-001-00-0
<b>Číslo CAS:</b>	1333-82-0
<b>Číslo ES (EINECS):</b>	215-607-8
<b>Další názvy látky:</b>	Chromic anhydride Chromium trioxide, Monochromium trioxide
<b>Molární hmotnost:</b>	99,99
<b>Molekulový vzorec:</b>	$\text{CrO}_3$

#### 2.2 Prvky označení

Výstražný symbol(y) nebezpečnosti:



nebezpečí

Signální slovo:

Indexové číslo: 024-002-00-6

Standardní věty o nebezpečnosti:

- H271 Může způsobit požár nebo výbuch; silný oxidant.
- H350 Může vyvolat rakovinu.
- H340 Může vyvolat genetické poškození.
- H361f Podezření na poškození reprodukční schopnosti.
- H330 Při vdechování může způsobit smrt.
- H301 Toxický při požití.
- H311 Toxický při styku s kůží.
- H372 Způsobuje poškození orgánů při prodloužené nebo opakované expozici.
- H314 Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí.
- H334 Při vdechování může vyvolat příznaky alergie nebo astmatu nebo dýchací potíže.
- H317 Může vyvolat alergickou kožní reakci.
- H410 Vysoce toxický pro vodní organismy, s dlouhodobými účinky.

Pokyny pro bezpečné zacházení:

- P210 Chraňte před teplem/ jiskrami/ otevřeným plamenem/ horkými povrchy. – Zákaz kouření.
- P273 Zabraňte uvolnění do životního prostředí.
- P281 Používejte požadované osobní ochranné prostředky.
- P405 Skladujte uzamčené.
- P308+P313 PŘI expozici nebo podezření na ni: Vyhledejte lékařskou pomoc/ošetření.

Doplňující informace na štítku: Pouze pro profesionální uživatele.

#### 2.3 Další nebezpečnost

U látky nelze vyloučit závažné pozdní účinky. Látka má senzibilizační účinek.

Obr. 22 – Značení oxidu chromového, hrozící nebezpečí a pokyny pro bezpečné zacházení [18]



## Kompozitní galvanické povlaky

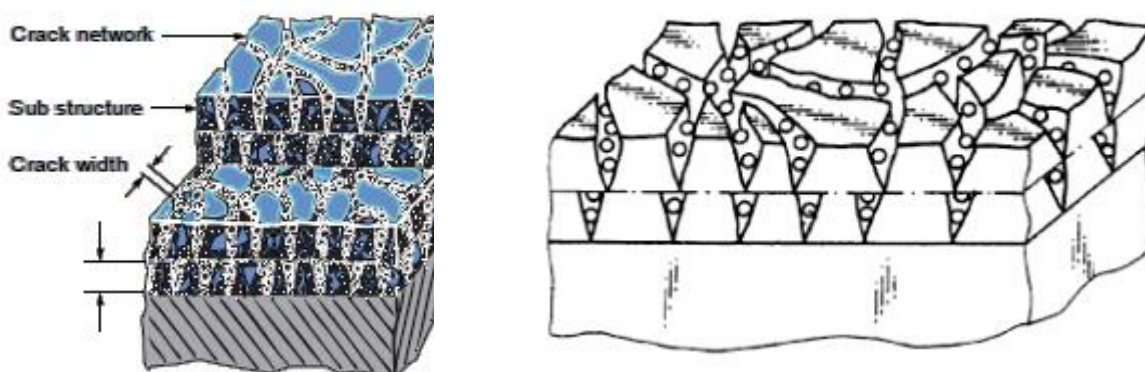
S ohledem na environmentální regulace a požadavky spotřebitelů se neustále zvyšují vstříkovací tlaky paliva, rostou výkony a celkové požadavky na spalovací motory. S tím rostou i požadavky na komponenty, z kterých je moderní motor zkonstruován. Zejména na pístní kroužky, které často rozhodují o životnosti pístní soustavy a tedy i spolehlivého chodu motoru, jsou kladeny požadavky, jež standardní tvrdochromové povlaky nejsou schopny plnit. Proto byly zkoumány další možnosti, jak efektivně a ekonomicky tyto vrstvy vylepšit.

S úpravou podmínek při depozici chromu nebo přimícháním určitého plniva se výrazně mění vlastnosti povlakované vrstvy. Jako plnivo se často používají částice různých oxidů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,...), sloučenin d-prvků ( $\text{TiN}$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrC}$ ,...), solí ( $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$ ,...) nebo kovových či nekovových prášků ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Si}$ ,...) o velikosti 3-5  $\mu\text{m}$ . Princip vylučování kompozitních elektrochemických povlaků je takový, že částičky různých druhů materiálů a velikostí jsou rozptýleny jako suspenze v elektrolytu a během depozičního procesu jsou zabudovány do struktury vyloučeného povlaku [2]. Některé typy takových povlaků jsou v následujících kapitolách uvedeny.

### Kompozitní chromový povlak s $\text{Al}_2\text{O}_3$ plnivem

Dnes již běžně používaný povlak označovaný jako CKS-36 je chromkeramický kompozitní tvrdochromový povlak pro pístní kroužky vyvinutý firmou Goetze (dnes součást koncernu Federal Mogul) pro vrchní pístní kroužek pro benzínové vysokootáčkové diesellové motory s hlubokým vrtáním. Jako plnivo se zde vyskytují částičky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o velikosti 2 – 5  $\mu\text{m}$ , které jsou rozptýleny v elektrolytu. Při cyklických změnách polarizace vzniká v procesu nanášení chromového povlaku v povrchové vrstvě síť mikrotrhlin, do kterých se při anodické fázi procesu, kdy jsou mikrotrhlinky otevřené, ukládá určitý podíl těchto rozptýlených částic. Při opakovaném procesu se tvoří tyto vrstvy na sobě, přičemž se v každé nové vrstvě tvoří další síť mikrotrhlin, do nichž se ukládají další korundové částice (Obr. 23) [2; 19].

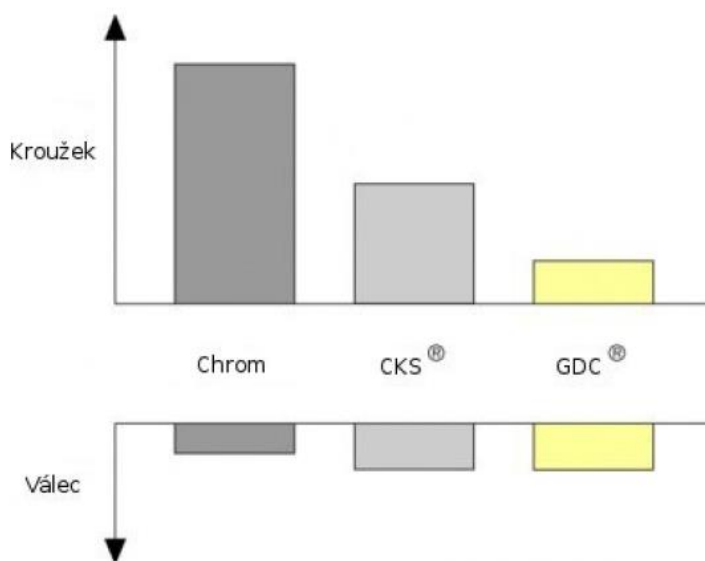
Užití  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jako plniva je dáno jeho vysoká odolnost vůči adhezivnímu opotřebení (pístního kroužku i vložky válce), vhodné kluzné vlastnosti a velmi vysoká tvrdost 900 – 1200 HV 0,1. Přítomnost  $\text{Al}_2\text{O}_3$  podstatně zvyšuje odolnost povlaku proti opotřebení a termickou odolnost [2; 11].



Obr. 23 – Porézní tvrdochromový povlak s částicemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v povrchových trhlinách [19; 21]

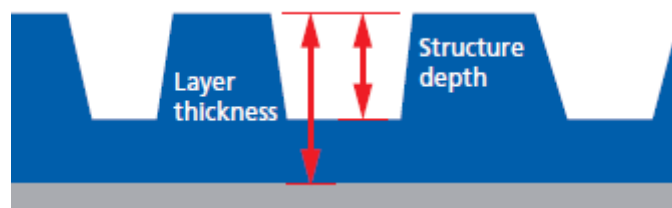
## Kompozitní chromový povlak s diamantem

Tato technologie je ve své podstatě stejná jako kompozitní povlak s korundovým plnivem, zde je ovšem korund nahrazen vysoce čistým diamantem. To dává povlaku výhodu ve vyšší otěruvzdornosti a vyšší teplotní meze, při které dochází k příděrám. V extrémních podmínkách, kde je vysoký tlak a teplota, se diamant mění v grafit, čímž napomáhá mazání. V porovnání s CKS jsou částice plniva asi desetinové (0,25 – 0,5  $\mu\text{m}$ ). Obr. 24 ukazuje porovnání otěruvzdornosti zmíněných typů chromových úprav mezi sebou. Během testů bylo zjištěno, že v šestiválcovém 12 l motoru je opotřebení pístních kroužků s touto úpravou čtyřikrát menší při srovnání s konvenčním chromem a dvakrát v porovnání s keramikou [2; 20].



Obr. 24 – Srovnání opotřebení pístních kroužků s nanesenou vrstvou chromu, CKS a GDC [11]

Další výzkum a testování vrstev CKS a GDC vedl ke strukturovaným formám těchto povlaků nazývaných SCKS a SGDC. Tyto povrchové úpravy mají charakteristickou strukturu s výstupky o výšce do 50  $\mu\text{m}$ , ve kterých je možno uchovávat lubrikant (Obr. 25). Toto řešení snižuje tření mezi systémem pístní kroužek – vložka válce a snižuje i spotřebu oleje [21].

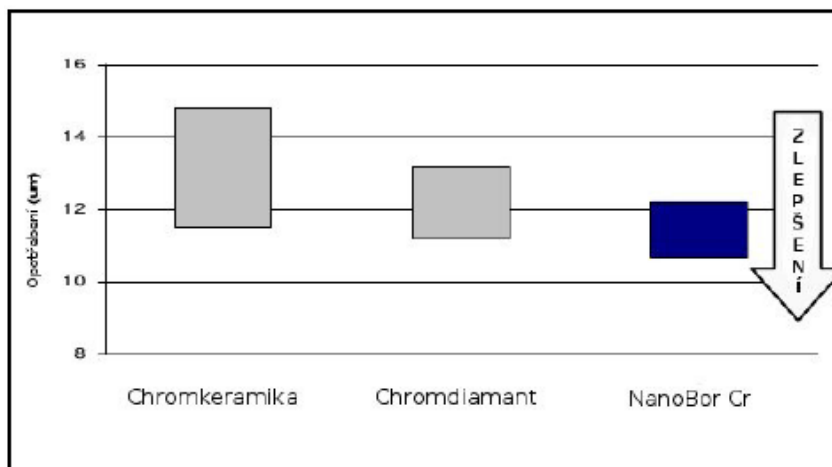


Obr. 25 – Výstupky na povlaku SCKS (SGDC) [21]

## Chromový povlak s kubickým nitridem bóru

Tento povlak byl vyvinut firmou Mahle pro středně a vysoko zatěžované diesellové motory. Jedná se opět o tvrdochromový kompozitní povlak, podobný CKS a GDC, ovšem s tím, že zde je jako plnivo použit ultra jemný CBN, který je uložen v mikropórech chromové matrice díky upravenému elektrochemickému procesu. Komerční název této povrchové

úpravy je „NanoBor Chromium“. Na Obr. 26 je patrné snížení opotřebení při použití této úpravy v porovnání s CKS a GDC [20].



Obr. 26 – Porovnání NanoBor Cr povlaku s vybranými kompozitními tvrdochromovými povlaky [2]

## 5 Vybrané metody testování povrchových úprav

### 5.1 Indentační zkouška – Mercedes test

Indentační (vnikací) zkoušky jsou jedny ze základních zkoušek adhezivně – kohezivních vlastností různých povlaků. Jedná se o velmi rozšířené metody, neboť jsou svým provedením velmi jednoduché a rychlé. Navíc výsledky těchto testů dávají dobrý obraz o kvalitě spojení mezi tenkou vrstvou a substrátem [22].

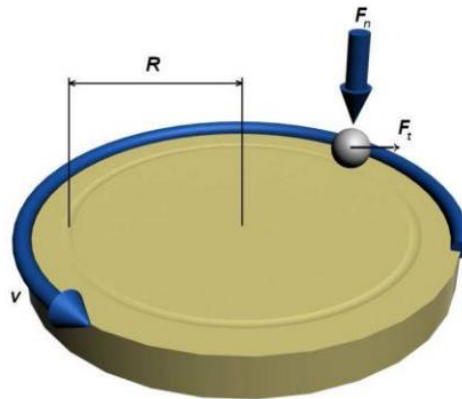
Jedná se o metody vycházející ze zjištění napětí potřebného pro překonání vazeb mezi tenkou vrstvou a substrátem. Tato napětí jsou způsobena statickým vtlačováním indentoru Rockwellova typu, podobně jako při měření tvrdosti. Napětí vyvolá na rozhraní tenká vrstva-substrát vznik trhlinek, které se šíří k povrchu. Sledování rozměrů trhlin, vyvolaných na rozhraní působením indentoru, je měřítkem adheze vrstev a povlaků k substrátu odpor proti šíření trhlin [23].

### 5.2 Tribologická zkouška – Metoda PIN-on-DISC

Tato analýza slouží k posouzení vrstev a povlaků zejména z hlediska adhezivního a abrazivního chování. Metoda spočívá ve vtlačování stacionárně uloženého tělíška (pinu) v podobě kuličky nebo hrotu do rotujícího vzorku s předem definovaným zatížením a danými otáčkami vzorku. Rameno, na němž je uchyceno zkušební tělíško musí mít definovaný poloměr, a to dostatečně velký, aby hodnoty opotřebení nebyly ovlivněny teplem, které se nestačí uvolnit do okolí [2; 22]

Zařízení, na němž se test provádí, se nazývá tribometr. Ten je zkonstruován tak, aby zkouška nemohla být ovlivněna podmínkami okolního prostředí. Proto je pod ochranným krytem sledována jak teplota, tak i vlhkost vzduchu, které by mohly negativně ovlivnit výsledky testu. Součástí tribometru může být i pec, která umožňuje zkoumat tribologická chování zvoleného materiálu za vysokých teplot [2; 22]

Jako výsledek testu se bere průběh koeficientu tření, zaznamenaný během testu měřením odchylky ramene. Jako další hodnotu, kterou je možné při testu sledovat, je míra opotřebení zkušebního tělíka a charakter a velikost stopy vytvořené tělískem na vzorku [22].



Obr. 27 – Schéma metody PIN-on-DISK

## 6 Shrnutí teoretické části

Jak bylo zmíněno v úvodu práce, pístní kroužky prodělaly od svého vzniku před více než 200 lety obdivuhodný vývoj. Ačkoliv se jedná o rozměrově malé součásti, jejich přítomnost ve spalovacích motorech hraje klíčovou roli v jejich výkonu, živostnosti, efektivitě, ekonomičnosti a ekologičnosti provozu.

Vývoj spalovacích motorů stále ještě neskončil, a proto budou požadavky kladené na pístní kroužky neustále narůstat. Již dnes tyto požadavky často překračují možnosti konvenčně používaných materiálů, a to i v kombinaci s různými povrchovými úpravami. Z tohoto důvodu je k nim upřená značná pozornost vědeckých týmů po celém světě, což posouvá technologie zpracování materiálu a jeho úpravu vpřed.

V teoretické části práce je řešena problematika pístních kroužků ve spalovacích motorech. Jsou popsány typy pístních kroužků, principy jejich funkce, způsobu namáhání, výroby a povrchových úprav, přičemž největší pozornost byla věnována galvanickému chromování a kompozitním povlakům na bázi chromu, jež jsou v praxi nejpoužívanější. Jelikož se práce zabývá galvanicky nanášenými tvrdochromovými povlaky byla věnována pozornost také bezpečnostním zdravotním rizikům spojeným s tímto procesem.

V práci jsou uvedeny také materiály, ze kterých jsou pístní kroužky vyráběny spolu s méně konvenčními úpravami povrchů používaných pro pístní kroužky jako PVD a CVD a žárové nástřiky.

Následující část práce zabývá vyhodnocením vlastností tradičních, galvanicky nanesených chromových vrstev spolu s moderními PVD vrstvami typu  $\text{CrN}_x$ . Práce je zaměřena hlavně na tribologické a adhezivně - kohezivní vlastnosti těchto vrstev a jejich porovnání mezi sebou. Předmětem práce je také určit vhodnou metodiku testování těchto povlaků přímo na pístních kroužcích.

V neposlední řadě bylo vyrobeno zařízení, které má sloužit jako simulátor opotřebení pístních kroužků ve vložce válce. V tomto testu má být porovnáno opotřebení jednotlivých povlaků po běhu ve válci při vysoké rychlosti pohybu.

## Experimentální část

Jako povrchové úpravy pístních kroužků pro použití v nejmodernějších spalovacích motorech se začínají prosazovat tenké vrstvy deponované metodou PVD či PACVD. Tyto extrémně tvrdé vrstvy v současnosti dosahují nejlepších výsledků v laboratorních testech, a to jak v míře opotřebení, teplotní stálosti i v tribologických vlastnostech. Přesto, že některé firmy již takto upravené pístní kroužky svým zákazníkům nabízejí, jejich použití je v masové produkci omezeno jejich vysokou cenou, která je několikanásobně vyšší.

Tato práce se zabývá vyhodnocením vlastností současných, galvanicky nanesených chromových povlaků spolu s moderními PVD vrstvami, které by je měli nahradit. Jako povlaky na bázi chromu byly zvoleny: čistý chrom (v práci značený jako Cr), porézní chrom (PCr) a chrom s částicemi  $Al_2O_3$  (BCr). Dalším materiálem k testování byla nitridovaná litina B6 (NT) a dva povlaky PVD (PVD 1 a PVD 2). Práce je zaměřena hlavně na tribologické a adhezivně - kohezivní vlastnosti těchto vrstev a jejich porovnání mezi sebou. Předmětem práce je také určit vhodnou metodiku testování těchto povrchových úprav, a to přímo na pístních kroužcích.

Pro posouzení vlastností jednotlivých povrchových úprav, byly vybrány metody, které se pro testování PVD vrstev v praxi běžně používají i metody, které jsou definovány v rámci práce. Pro hodnocení adhezivně - kohezivních vlastností byl použit Mercedes test. Pro mercedes test bylo dále určeno vhodné zatížení, kterým je možné testovat povrchové úpravy přímo na pracovní ploše pístních kroužků, aniž by došlo k jejich deformaci.

Pro vyhodnocení tribologických vlastností byly vyrobeny speciální matice s galvanicky nanesenými chromovými povlaky. Na těchto rovinných vzorcích byl následně proveden test PIN-on-DISC a pro porovnání s vrstvami na radiálních plochách také Mercedes test.

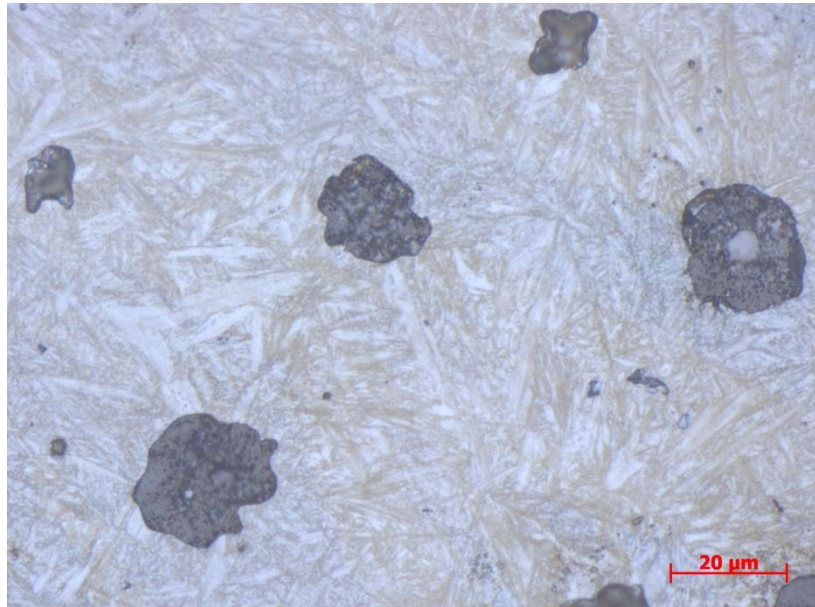
Dále bylo v rámci práce navrženo a sestrojeno zařízení, které má simulovat pohyb pístního kroužku uvnitř vložky válce. Z tohoto testu je možné přibližně určit, jaký vliv na opotřebení mají tenké PVD vrstvy oproti povlakům na bázi chromu a také jak se při užití různých povlaků opotřebí vložka válce.

## 7 Vyhodnocení základního materiálu pístních kroužků

Jako základní materiál pístních kroužků byla zvolena zušlechťená tvárná litina B6 dle ISO 6621-3, která je vhodná pro pístní kroužky s vysokou pevností v ohybu. Složení a mechanické hodnoty materiálu udává Tab. 2.

Chemické složení v %		Mechanické hodnoty	
C	3.0 - 4.0	Tvrdost	
Si	2.4 - 3.8	PK těsnící	290 - 370 HB (30 - 40 HRC)
Mn	0.3 - 0.6	PK stírací	250 - 290 HB (25 -30 HRC)
P	≤0.3		
S	≤0.05	Pevnost v ohybu	≥1300 N/mm <sup>2</sup>
Cr	≤0.2	Modul pružnosti	≥150 000 N/mm <sup>2</sup>
Ni + Cu	≤2.0		
Jiné leg. prvky	≤0.2		

Tab. 2 – Chemické složení a mechanické hodnoty litiny B6 [24]

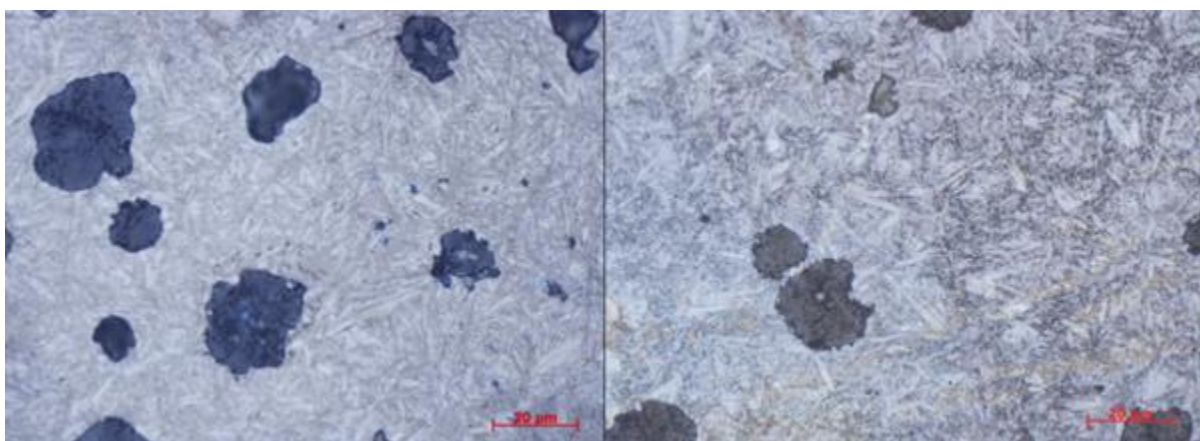


*Obr. 28 – Struktura litiny B6 před depozicí tenké vrstvy*

Pro kontrolu dodaného základního materiálu bylo provedeno metalografické pozorování mikrostruktury. Vzhledem k tomu, že popouštění litiny probíhalo při teplotě 520 °C, a depozice vrstev při teplotách okolo 420 °C bylo riziko, že dojde při depozici tenké vrstvy k místnímu výkyvu teploty či chybě v procesu a následné změně struktury.

Na Obr. 28 lze pozorovat strukturu podobnou bainitu, zvanou ausferrit. Sestává z jehlicovitého feritu, ve kterém se nachází útvary uhlíkem stabilizovaného austenitu. Tato struktura se na mikrosnímčích podobá bainitu, ale jelikož neobsahuje karbidy, nejedná se v pravém slova smyslu o bainit [25].

Na Obr. 29 jsou struktury dvou kroužků, jež byly nitridovány a deponovány tenkou vrstvou PVD. Jak je patrné při porovnání obrázků, k ovlivnění základního materiálu, během depozice tenké vrstvy k ovlivnění struktury základního materiálu nedošlo a mikrostruktura odpovídá normě.



*Obr. 29 – Struktura litiny B6 po depozici tenké vrstvy PVD 1 (vlevo) a PVD 2 (vpravo)*

## 8 Vyhodnocení povrchových vrstev

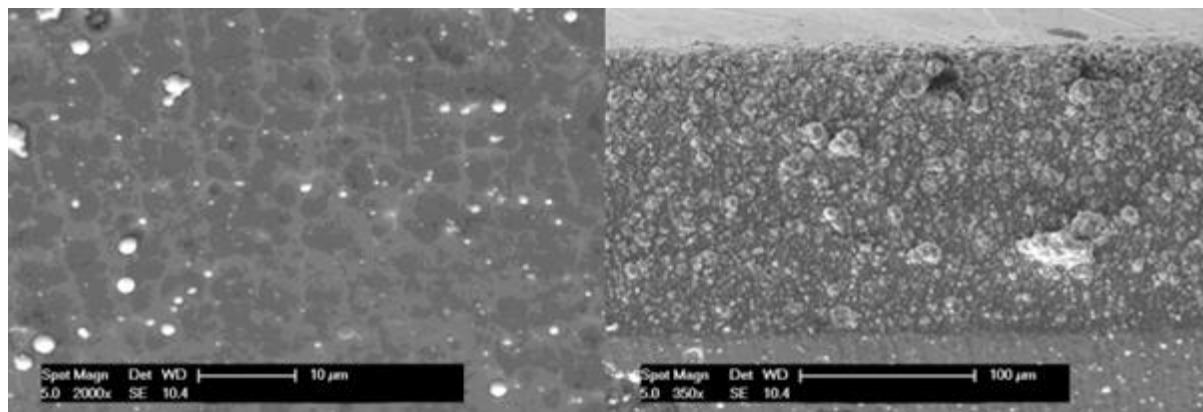
### 8.1 Vyhodnocení prototypů tenkých vrstev oslovených výrobci

V úvodu diplomové práce dodali tři výrobci povrchových vrstev své prototypy tenkých vrstev pro pístní kroužky. Požadavek pro výrobce byl nadeponovat pístní kroužky z oceli i litiny tenkou vrstvou typu  $\text{CrN}_x$ , a to o neobvyklé tloušťce 20 – 25  $\mu\text{m}$ . Neobvyklé proto, že se tloušťka standardně používaných tenkých vrstev pohybuje od 1 do zhruba 6  $\mu\text{m}$ , protože je limitována několika faktory. Většina vrstev má velmi velké zbytkové napětí na úrovni -1 až -4 GPa. To poskytuje pro adhezi mnohdy větší mechanickou zátěž, než je zátěž generovaná při jejich nasazení v aplikaci. Další velké omezení je ekonomické, protože rychlost růstu v komerčních zařízeních nepřekračuje 1 – 2  $\mu\text{m}$  za hodinu. Požadavek na tloušťku přesahující 20  $\mu\text{m}$  znamená nutnost tyto problémy vyřešit [26].

Z dodaných pístních kroužků byl poté odebrán vzorek, který byl naříznut a následně rozlomen v tekutém dusíku při teplotě -196 °C. Při rozlomení byl brán ohled na to, aby bylo ve vrstvě iniciováno tahové napětí. Pokud by tak nebylo učiněno, došlo by ke koheznímu poškození vrstvy. Vzorky byly odebrány tak aby splňovali svou velikostí podmínky pro vložení do komory řádkovacího elektronového mikroskopu Philips 30XL ESEM. V mikroskopu byly vzorky zároveň podrobeny analýze EDX pro určení chemického složení ve vrstvě.

#### Výrobce 1

Povrch tenké vrstvy  $\text{CrN}_x$  na pracovní ploše ocelového pístního kroužku dodaného prvním výrobcem obsahoval zřetelně viditelné makročástice. V důsledku jejich vytrhávání má povrch vrstvy jamkový reliéf. V některých jamkách zůstaly makročástice zakotveny jak je viditelné na Obr. 30.

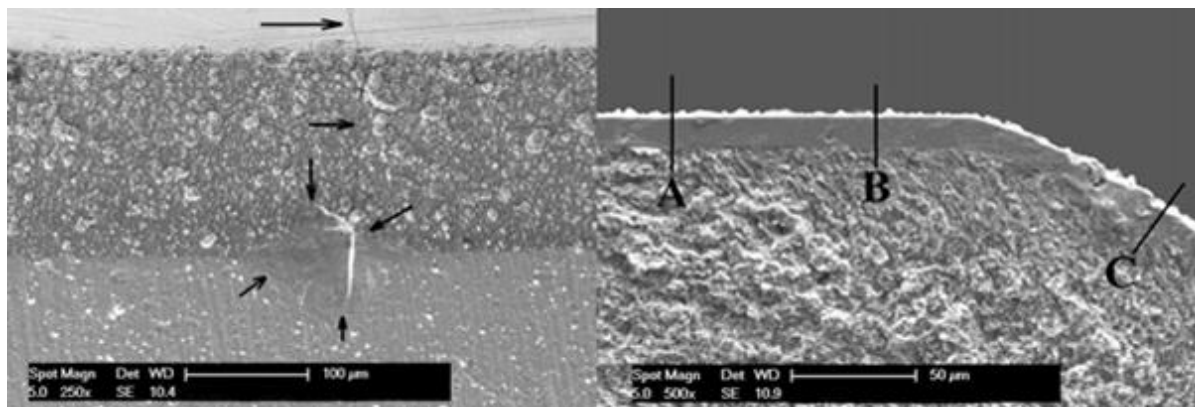


*Obr. 30 – Ocelový kroužek výrobce 1: vlevo detail povrchu s ukotvenými makročásticemi; vpravo lom tenké vrstvy na pracovní ploše pístního kroužku [27]*

Na Obr. 31 je zachycena kohezní trhlinka v okraji pracovní plochy pístního kroužku. Trhlinky podobné této byly objeveny na více místech po obvodu kroužku a jsou příznakem zvýšeného zbytkového napětí ve vrstvě. To se uvolňuje v podobě sledovaných trhlin jdoucích k povrchu či rozhraní. Na obrázku Obr. 31 vpravo je také zachycena lomová plocha, jejíž vzhled je hladký, bez sloupcovité struktury. Hladký vzhled narušují pouze kohezní trhlinky a makročástice. Tato struktura odpovídá T-zóně krystalitů dle Thorntonova modelu [27].

EDX analýza ukázala při povrchu 22,4 % dusíku, ve střední oblasti 17,4 % N a v blízkosti rozhraní 15,1 % N. To ukazuje na relativně stejné chemické složení v celé tloušťce tenké vrstvy. Tloušťka vrstvy v místě A – B je 13,5 – 13,9  $\mu\text{m}$  a v místě C je 10 – 11  $\mu\text{m}$  [27].

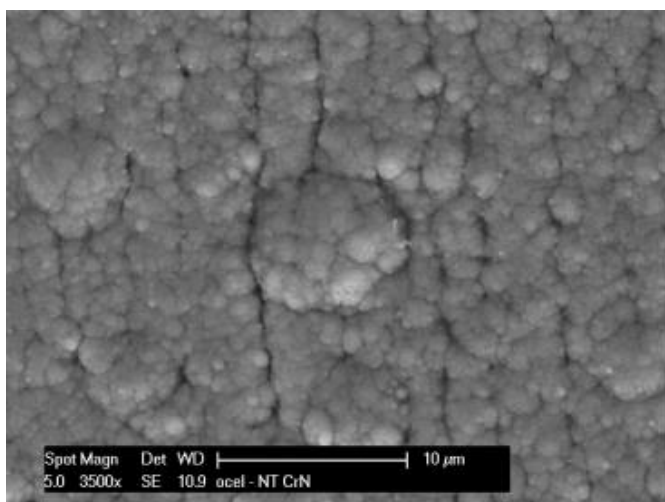
Tenká vrstva aplikovaná na litinové kroužky vykazovala podobné vlastnosti jako vrstva aplikovaná na kroužky ocelové. Velké množství malých i poměrně velkých makročásteček spolu se zbytkovým pnutím iniciovaly značné kohezní poruchy v celé zkoumané ploše kroužku. Koncentrace dusíku ve vrstvě byla naopak rozdílná od předchozího případu. Při povrchu bylo stanoveno 22,1 % N a na rozhraní 4 % N. To svědčí o rozdílné stechiometrii napříč tenkou vrstvou.



Obr. 31 – Ocelový kroužek výrobce 1: vlevo je zřetelná kohezní trhlinka na okraji pracovní plochy; vpravo je lomová plocha kroužku [27]

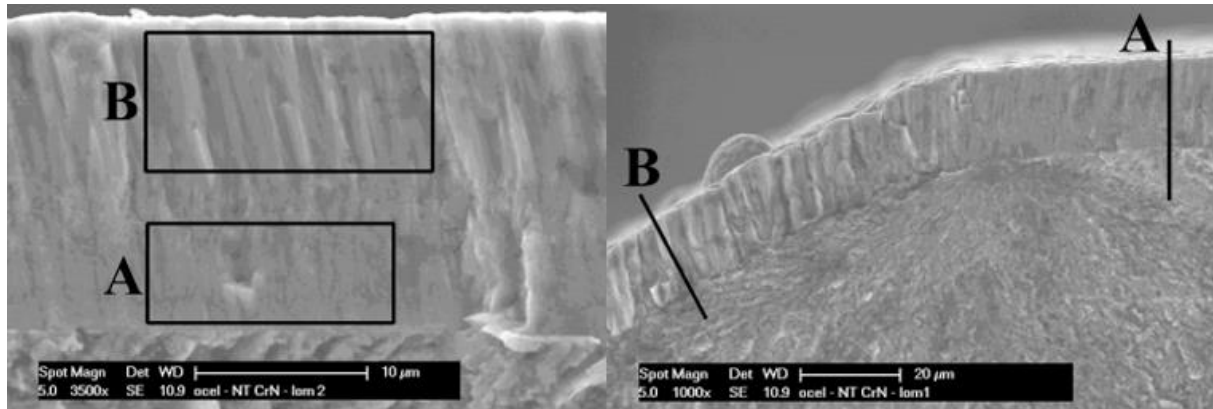
## Výrobce 2

Na povrchu vrstvy u pístního kroužku z oceli byly zjištěny rozsáhlé trhliny, které jsou však v případě pístních kroužků žádané, neboť se do nich ukládá olej a trhliny tak působí jako olejový zásobník. Tyto trhliny jsou pravděpodobně důsledkem více sloupcovité struktury, pozorované na šikmé ploše (Obr. 32). Tenká vrstva  $\text{CrN}_x$  vykazovala konstantní tloušťku na pracovní ploše 20  $\mu\text{m}$  a na šikmé ploše směrem k axiální ploše měla vrstva 18  $\mu\text{m}$ . V této oblasti bylo také pozorováno kohezivní poškození vrstvy, což svědčí o vyšším zbytkovém napětí ve vrstvě. Vrstva dále vykazovala dvě odlišné oblasti, které se lišily nejen obsahem dusíku, ale i morfologií lomové plochy (Obr. 33). Chemické složení v oblasti A na Obr. 33 odpovídá 13,5 % N a 86,5 % Cr, v oblasti B – 6,6 % N a 93,4 % Cr. Tloušťka v místě A je 20,3  $\mu\text{m}$  a v místě B 17 – 18  $\mu\text{m}$  [27].



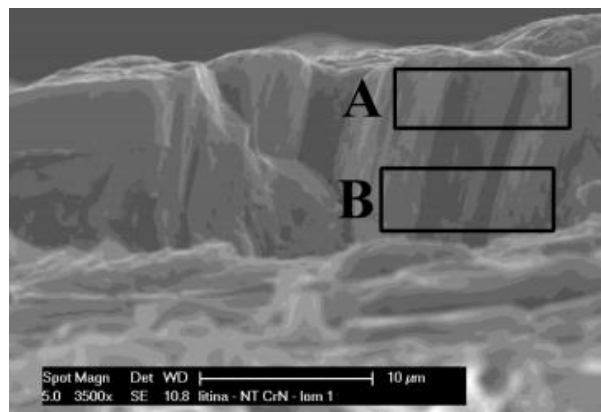
Obr. 32 – Trhliny na pracovní ploše tenké vrstvy [27]





*Obr. 33 - Výrobce 2: vlevo zachycena lomová plocha tenké vrstvy s patrným rozdílem v morfologii lomu; vpravo: Lomová plocha pístního kroužku [27]*

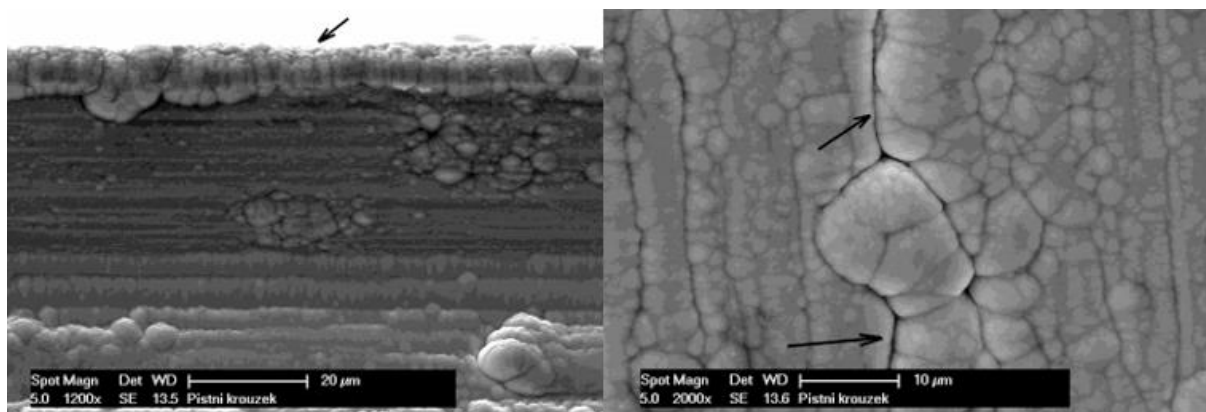
Tloušťka tenké vrstvy na litinovém kroužku se na pracovní ploše pohybovala okolo 19 µm a na šikmé ploše 10 – 13 µm. Vrstva také vykazovala značné množství makročástic a rozsáhlých kohezních poškození až 1,6 µm širokých. Analýzou chemického složení jednotlivých částí vrstvy bylo zjištěno, že je složená pouze z chromu (oblasti označené na Obr. 34). Z hlediska stechiometrie vrstvy bylo zjištěno při povrchu 5,5 % N a v blízkosti rozhraní 12,3 % N. [27].



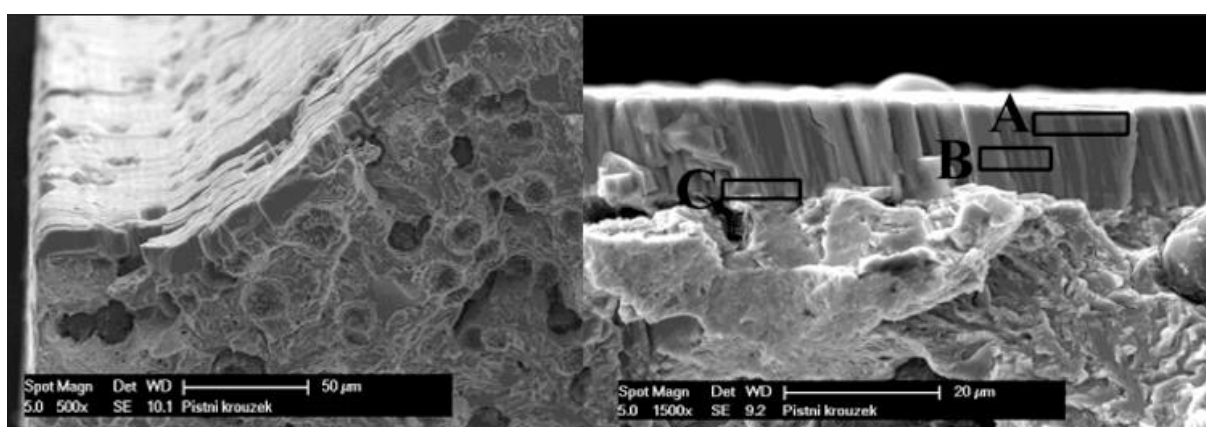
*Obr. 34 – V obou vyznačených oblastech byl EDX analýzou zjištěn pouze chrom [27]*

### **Výrobce 3**

Na pracovní ploše pístního kroužku dodaného tímto výrobcem byla zaznamenána vrstva, která vytváří nerovnoměrný povrch. Bylo zde také pozorovatelné velké množství makročástic a trhlinek o velikosti kolem 150 nm (Obr. 35). Tloušťka vrstvy na pracovní ploše byla stanovena na 15 µm, ojediněle 19,2 µm. Na šikmé ploše bylo potom naměřeno pouze 10 µm. Chemickou analýzou bylo zjištěno v místě A – 32,8 % N; 67,2 % Cr, v místě B – 21,7 % N; 78,3 % Cr a v místě C – 17,5 % N; 82,5 % Cr (Obr. 36) [27].



Obr. 35 – Vlevo: Nerovný povrch pracovní plochy pístního kroužku.  
Vpravo: Mikrothlinky ve vrstvě [27]



Obr. 36 – Litinový kroužek výrobce 3: vlevo: Lom při okraji pístního kroužku  
s tloušťkou vrstvy pouze 10 µm.  
Vpravo: EDX analýza v uvedených oblastech [27]

Z analýzy tenkých vrstev  $\text{CrN}_x$  od jednotlivých výrobců vyplývá, že tvorba kompaktní tenké vrstvy o neobyklé tloušťce přesahující 20 µm představuje značné technologické problémy. Jak bylo řečeno, existuje řada faktorů jako je třeba vysoké zbytkové napětí a rychlost růstu, které limitují tloušťku standardně používaných povrchových úprav. Kombinace těchto faktorů omezuje tloušťku běžně používaných PVD tenkých vrstev v průmyslu na přibližnou hodnotu od 1 do 6 µm [26]. Aby mohli být silné PVD vrstvy komerčně použitelné v kombinaci s pístními kroužky je nutné uspokojivě vyřešit zmiňované problémy.

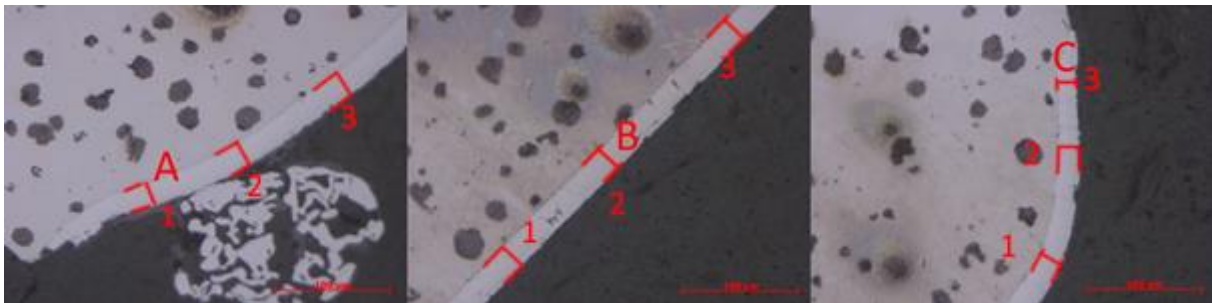
Při srovnání prototypů tenkých vrstev z testovací fáze, vykazovala tenká vrstva dodaná výrobcem 2 největší tloušťku, která byla relativně konstantní po celém obvodu pístního kroužku. Dále, jako jediná vrstva, obsahovala minimální množství makročásteček. Problémem této vrstvy byla odlišná stechiometrie v průběhu tloušťky vrstvy. Na ocelovém i litinovém kroužku činil rozdíl obsahu dusíku při povrchu a v blízkosti rozhraní kolem 7%. U této vrstvy byly navíc zjištěny rozsáhlé trhliny v povrchu, které jsou ovšem v případě pístních kroužků velmi žádané. Z těchto důvodů se bude práce dále zabývat pouze tenkou vrstvou aplikovanou tímto výrobcem.

## 8.2 Stanovení tloušťky optimalizované vrstvy PVD na PK

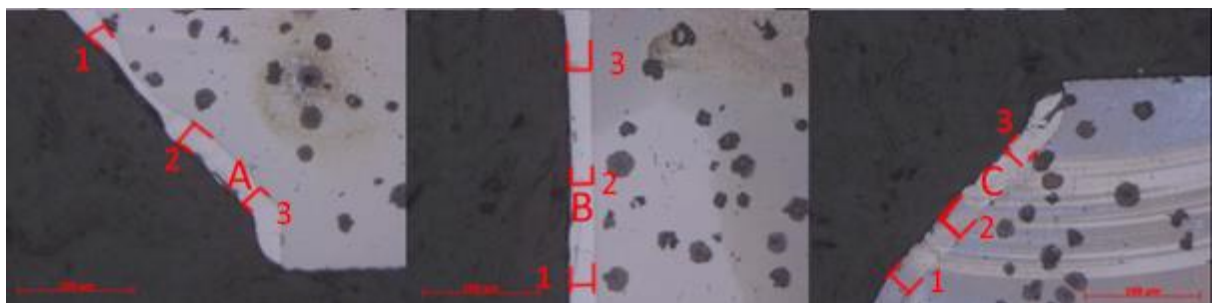
Během dalšího vývoje dokázal výrobce č. 2 optimalizovat růst a stechiometrii vrstvy a také vyrábět tenké vrstvy o požadované tloušťce větší než 20  $\mu\text{m}$ . Tyto povlaky byly aplikovány na pístní kroužky a označeny jako PVD 1 a PVD 2.

Vrstva označovaná jako PVD 1 je vyvinuta pro těsnící kroužky aplikované ve čtyřtaktých motorech. Druhá vrstva PVD 2 je aplikována ve dvoudobých motorech. Obě vrstvy se vzájemně liší v jejich tvrdosti, přičemž vrstva PVD 1 má předepsanou tvrdost do 2100 HV a vrstva PVD 2 má předepsáno 2500 HV.

Pístní kroužky s těmito vrstvami byly rozlomeny, vybroušeny, vyleštěny a naleptány za použití Nitalu 3%. Vlastní měření tloušťky tenké vrstvy bylo provedeno na světelném mikroskopu Zeiss observer.Z1m. Měření probíhalo vždy při zvětšení 200x na třech místech vždy třikrát – na šikmé ploše pístního kroužku směřující k axiální ploše a na středě pracovní plochy kroužku, jak je znázorněno na Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 37 – Měření tloušťky tenké vrstvy PVD 1; **A** –  $19,6 \pm 0,9 \mu\text{m}$ ,  
**B** –  $23,6 \pm 3,2 \mu\text{m}$ , **C** –  $17,5 \pm 1,1 \mu\text{m}$

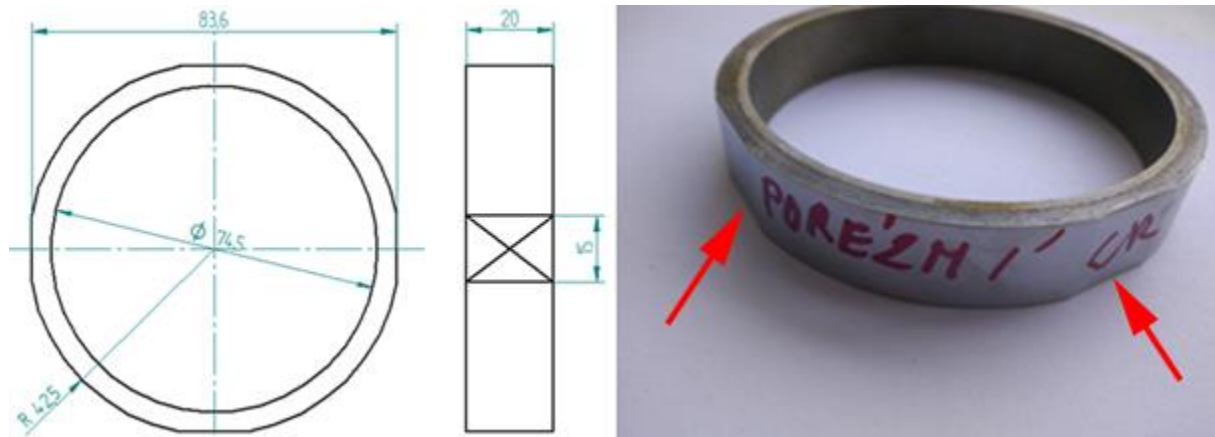


Obr. 38 - Měření tloušťky tenké vrstvy PVD 2; **A** –  $20,9 \pm 1,0 \mu\text{m}$ ,  
**B** –  $18,3 \pm 2,7 \mu\text{m}$ , **C** –  $22,5 \pm 1,7 \mu\text{m}$

Při pohledu na průběh tloušťky vrstev na snímcích 37 a 38 je patrné, že vrstva PVD 1 vykazuje relativně konstantní tloušťku po celém průřezu, přičemž na pracovní ploše kroužku je několik milimetrů silnější než na šikmé ploše. Vrstva PVD 2 je na pracovní ploše naopak nejtenčí a směrem k náběhu k axiální straně se její tloušťka zvyšuje.

## 9 Výroba zkušebních PK

Standardně používané metody testování adhezivně-kohezivních a tribologických vlastností požadují pro uspokojivé výsledky rovnou plochu o dostatečné velikosti, což pístní kroužky neposkytují. Z tohoto důvodu bylo vyrobenou firmou Buzuluk a.s. několik pístních kroužků atypických rozměrů se čtyřmi vybroušenými plochami na obvodu, jak je zobrazeno na Obr. 39. Tyto kroužky jsou v práci nazývány jako matice. Rovinné plochy byly posléze z kroužků vyříznuty a vnitřní rádius byl zbroušen tak, aby byly plochy rovnoběžné.



Obr. 39 - Návrh matice a její fotografie. Šipky zobrazují vybroušené plochy po obvodu

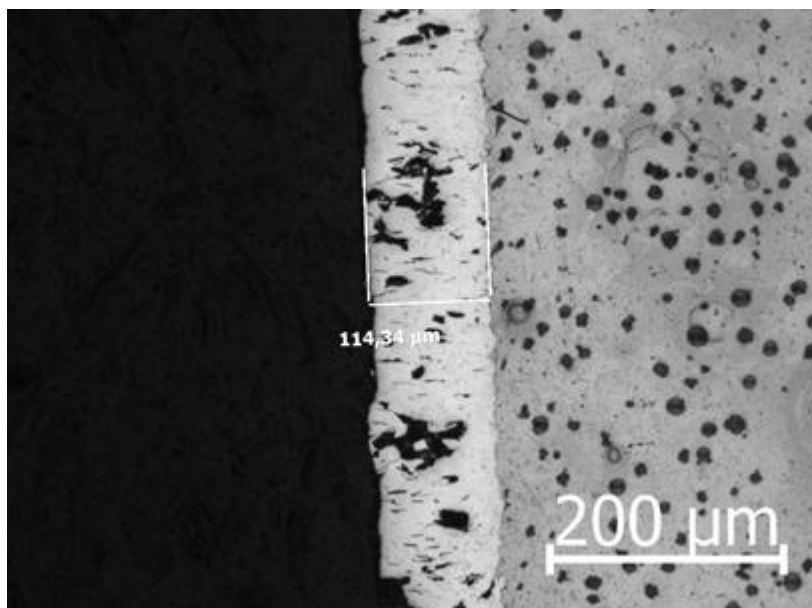
Matice byly zhotoveny touto cestou proto, aby vrstvy na nich nanesené co možná nejvěrněji kopírovaly reálné vlastnosti deponovaných vrstev na pístních kroužcích.

Povlaky nanesené na těchto maticích sestávají z galvanicky naneseného chromu, porézního chromu a kompozitního chromkeramického povlaku BCr. Tyto povlaky jsou blíže popsány v kapitole 4.1.7. Dále byl pro srovnání zhotoven jeden pístní kroužek, který byl nitridován. V neposlední řadě měli být stejné kroužky nadeponovány tenkou vrstvou typu  $\text{CrN}_x$  výrobcem č. 2. Bohužel, z důvodu ochrany informací o tenké vrstvě a výrobcu, matice s nadeponovanou vrstvou  $\text{CrN}_x$  dodány nebyly. Jako referenční vzorek vrstev PVD 1 a PVD 2 posloužily kontrolní plaketky, které se vkládají do depozičního zařízení za účelem kontroly jakosti. Jako základní materiál pro všechny matice posloužila zušlechťená tvárná litina B6. Ocelové matice vyrobeny nebyly, protože ocelové pístní kroužky se vyrábí z dováženého polotovaru ve tvaru pružiny, ze které se posléze jednotlivé pístní kroužky vyřezávají. Litinové kroužky si firma Buzuluk a.s. vyrábí sama, a tak bylo možné tyto na zakázku vyrobené matice zhotovit pouze z litiny.

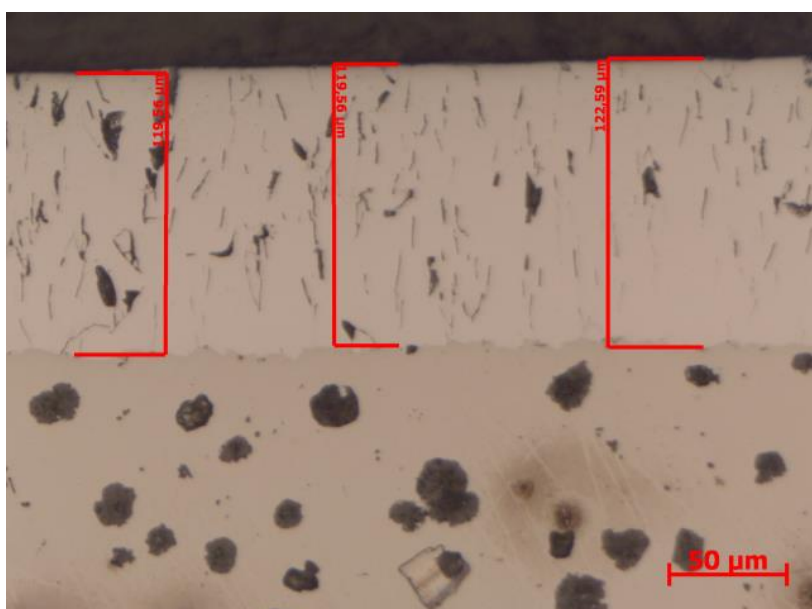
Na kroužcích bylo kontrolně provedeno měření tloušťky tenké vrstvy, aby se ověřilo, zda depozice povlaku nebyla ovlivněna velikostí a tvarem matice. Obr. 40 zachycuje příklad měření tloušťky povlaku BCr, které probíhalo na metalografickém mikroskopu a Obr. 41 zachycuje měření povlaku Cr na pístním kroužku. Měřeno bylo vždy na pěti místech na rovinné ploše kroužku. Naměřené hodnoty byly zapsány do Tab. 3. V tabulce jsou také pro porovnání uvedeny tloušťky povlaků naměřené přímo na pístních kroužcích, jejichž tloušťka se v zásadě shoduje s tloušťkou povlaku na matici.

	Matice	Pístní kroužek
	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]
Chrom s $\text{Al}_2\text{O}_3$ (BCr)	$104 \pm 3$	$106 \pm 1$
Crom (Cr)	$118 \pm 2$	$121 \pm 1$
Porézní Chrom (PCr)	$126 \pm 3$	$117 \pm 1$

Tab. 3 - Naměřené hodnoty tloušťky tenkých vrstev na zkušebních maticích a na pístních kroužcích



Obr. 40 - Příklad měření tloušťky Cr povlaku na matici



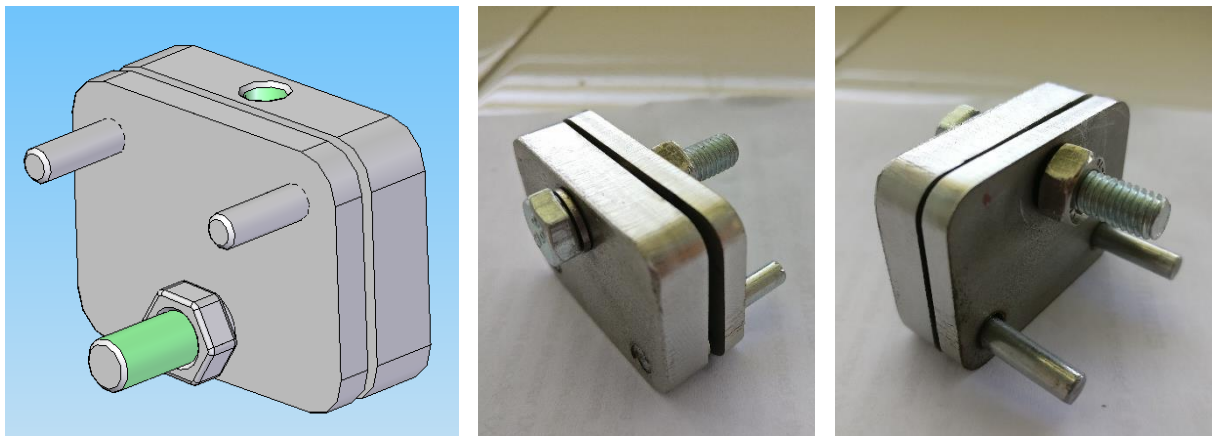
Obr. 41 - Příklad měření tloušťky Cr povlaku na pístním kroužku

## 10 Vyhodnocení adhezivně – kohezivních vlastností

Pro zjištění adhezivně - kohezivních vlastností  $\text{CrN}_x$  vrstev byl proveden „Mercedes test“. Na vzorcích byly Rockwellovým indentorem pod zatížením 1500 N vytvořeny vtisky, které byly následně vyhodnoceny za pomoci mikroskopu.

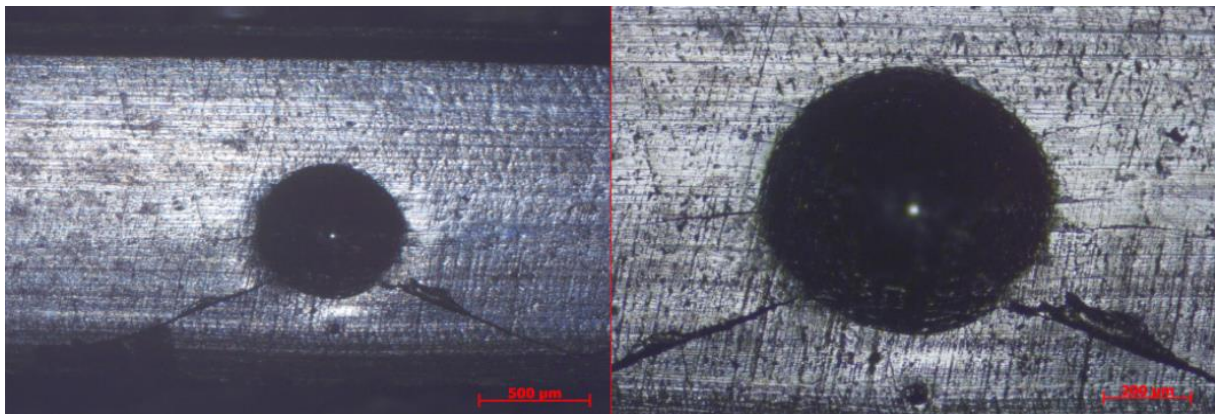
Aby bylo možné na pístních kroužcích provést Mercedes test, bylo nutné sestavit speciální přípravek pro držení kroužku při testu, který musí zajistit pevné držení segmentu kroužku i při velkém zatížení. Vyrobený přípravek je zobrazen na Obr. 42.

Dále je nutné, aby kroužek splňoval geometrickou podmínku pro provedení testu, ve které je vyžadováno alespoň 1,4 mm. Podmínka byla experimentálně určena tak, aby nebyl výsledek testu ovlivněn rozměry kroužku. Bylo zjištěno, že pokud je axiální výška pod touto hodnotou, je velice obtížné umístit vtisk do středu pracovní plochy kroužku.



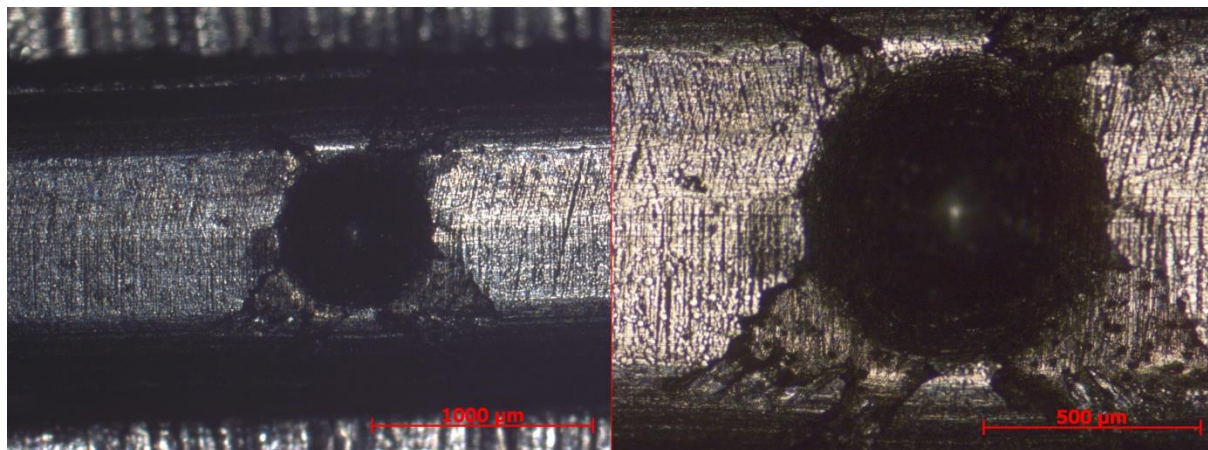
*Obr. 42 – Přípravek pro držení segmentu pístního kroužku při zkoušce Mercedes test*

Na Obr. 43 je zachycen vtisk ve vrstvě PVD 1 na kroužku o axiální výšce 1,4 mm. Vrstva vykazuje výborné adhezivní vlastnosti vzhledem k tomu, že nedošlo po celém obvodu k jejímu odloupení, a to ani v přítomnosti velkých kohezivních prasklin jdoucích od vtisku ke stěně kroužku. Tyto praskliny ovšem s velkou pravděpodobností neznamenají sníženou kvalitu vrstvy, ale nejspíše vznikly v důsledku mírného „vyvalení“ stěny kroužku, které vneslo tahové napětí do vrstvy.



*Obr. 43 - Vtisky ve vrstvě PVD 1 při zatížení 150 kg*

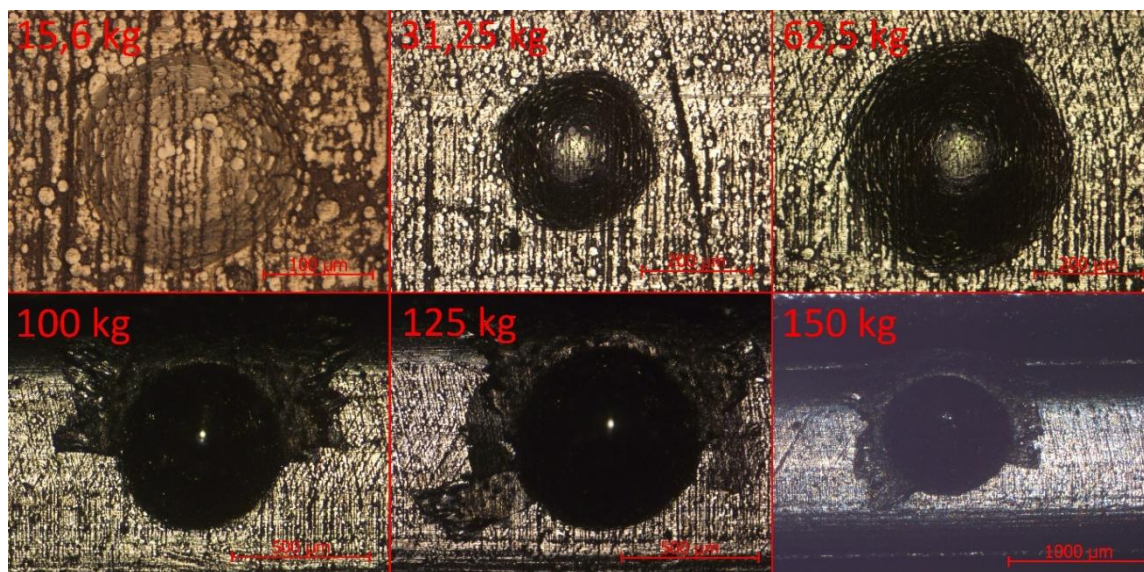
Obr. 44 zachycuje vtisk ve vrstvě PVD 2. V tomto případě došlo k rozsáhlému adhezivnímu poškození vrstvy, ovšem opět nejspíše v důsledku kohezních prasklin, které iniciovaly odloupení vrstvy, neboť odloupení kopíruje tvar kohezních prasklin pozorovaných na předchozím vzorku. Vzhledem k tomu, že není znám přesný mechanismus vzniku poruch, je tak obtížné stanovit, zda jde o poruchu vrstvy, či důsledek příliš tenké stěny kroužku. Z tohoto důvodu bylo nutné stanovit jiné zatížení pro testování povlaků přímo na pístních kroužcích.



Obr. 44 – Vtisky ve vrstvě PVD 2 při zatížení 150 kg

Jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly a zároveň je patrné z předchozích snímků, Mercedes test, který se běžně užívá při hodnocení adhezivně kohezivních vlastností tenkých vrstev, není při běžném zatížení 150 kg relevantní metoda zkoušky adheze tenké vrstvy pro pístní kroužky, protože průměr vtisku po indentoru může dosahovat i více než 500  $\mu\text{m}$ , dochází tak u tenkých kroužků k „vyvalení“ radiální plochy, což má negativní dopad na deponovanou tenkou a vede k znehodnocení výsledků. Vzhledem k tomu, že pístní kroužky se dodávají v několika axiálních výškách, je nutné tento vliv vyloučit.

Možným řešením je snížení zatížení indentoru při testu. Hledalo se tedy maximální zatížení, při kterém by nedocházelo k deformaci pístního kroužku, ale aby došlo k dostatečnému zatížení rozhraní vrstva – substrát a následného odhalení vrstvy s nevyhovujícími vlastnostmi.

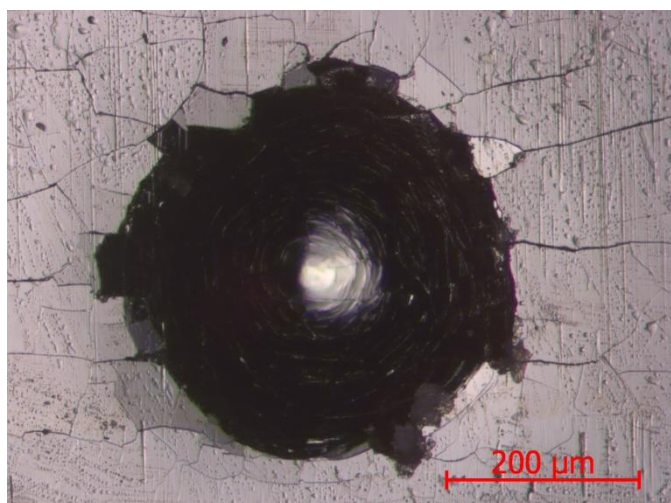


Obr. 45 – Vtisky v tenké vrstvě po Rockwellově indentoru při různých zatíženích

Obr. 45 zachycuje vtisky na referenčním písním kroužku o axiální výšce 1,4 mm s nanesenou tenkou vrstvou PVD 2. Uvedené hodnoty zatížení pokrývají celou škálu, kterou nabízí Rockwellův tvrdoměr na katedře materiálů a metalurgie ZČU v Plzni.

Zatížení 15,6 kg se ukázalo jako příliš malé na to, aby došlo k zatížení rozhraní tenká vrstva - substrát. Při zatíženích 100 a 125 kg opět dochází k rozsáhlému adheznímu odloupenutí vrstvy směrem k axiální ploše kroužku, jako tomu je při běžném zatížení 150 kg. Tato poškození jsou zjevně zapříčiněna zmiňovaným „vyvalením“ axiální stěny kroužku, jež je obzvláště patrné na obrázku zachyceném vpravo dole při zatížení 150 kg. Je tedy zřejmé, že jako vhodné zatížení se jeví 31,25 nebo 62,5 kg. Jako vhodnější pak bylo zvoleno zatížení vyšší, a to z důvodu většího rozrušení vrstvy a tak patrnějších výsledků.

Dále, aby bylo potvrzeno, že zvolené zatížení je dostatečně velké na to, aby došlo k odhalení tenké vrstvy s nevyhovujícími adhezivně-kohezivními vlastnostmi, byl proveden vtisk při zatížení 62,5 kg do tenké vrstvy s již prokázanými nevyhovujícími vlastnostmi. Jak je z Obr. 46 patrné, toto zatížení je dostačující na to, aby rozrušilo tenkou vrstvu v okolí vtisku. Rozrušení tohoto typu bylo označeno číslem 3, jakožto nevyhovující. Číslem 1 je poté ohodnocena vyhovující vrstva a číslo 2 je na pomezí těchto hodnocení.



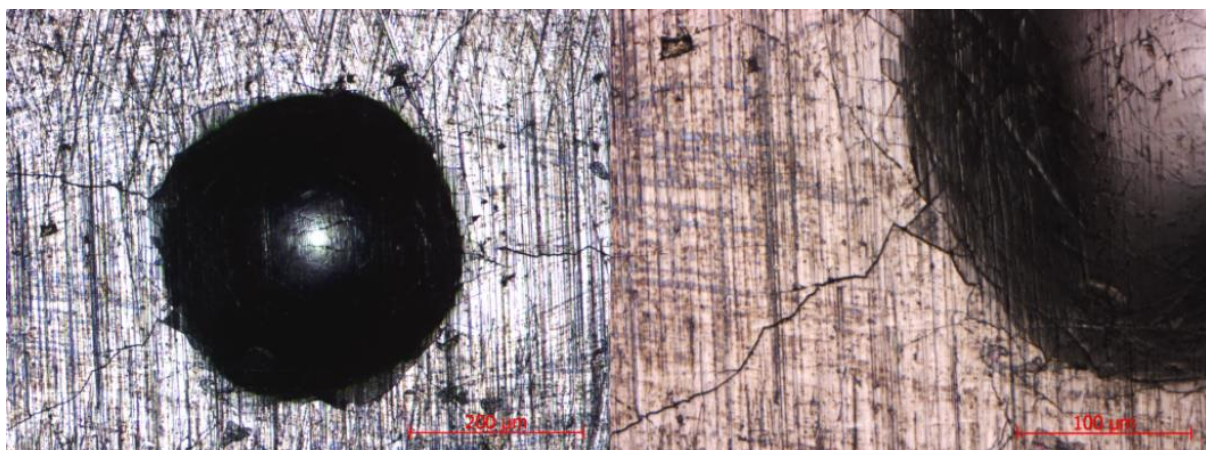
*Obr. 46 – Vtisk po Rockwellově indentoru při zatížení 62,5 kg do tenké vrstvy s nevyhovujícími adhezivně-kohezivními vlastnostmi*

Následně byly tedy provedeny vždy dva vtisky při zatížení 62,5 kg do písních kroužků s povlaky BCr, Cr, PCr a tenkou vrstvou PVD 1 a PVD 2. Jednotlivé vtisky zachycují Obr. 48 - Obr. 51. Pro každý vtisk bylo přiřazeno hodnocení adheze a koheze a výsledek testu shrnuje Tab. 4.

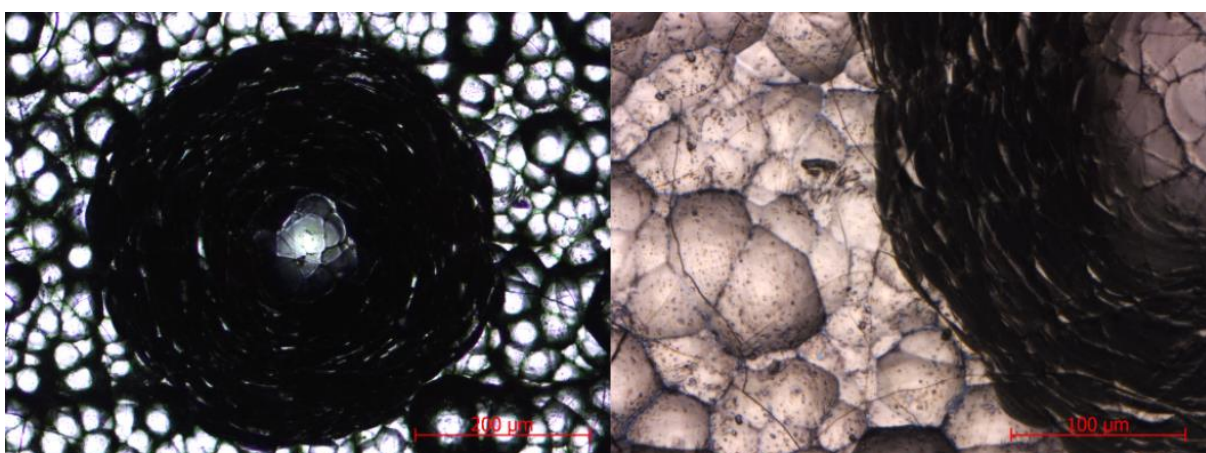
Povlak	Hodnocení
Chrom s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (BCr)	2
Chrom (Cr)	1
Porézní chrom (PCr)	1
PVD 1	1
PVD 2	1

*Tab. 4 – Vyhodnocení vrstev po vtisku Rockwellova indentoru při zatížení 62,5 kg*

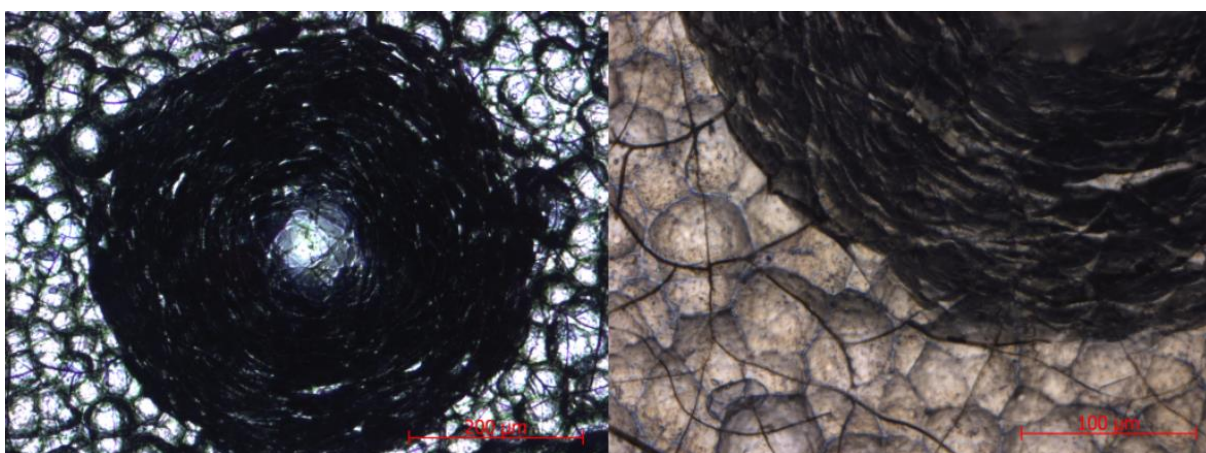




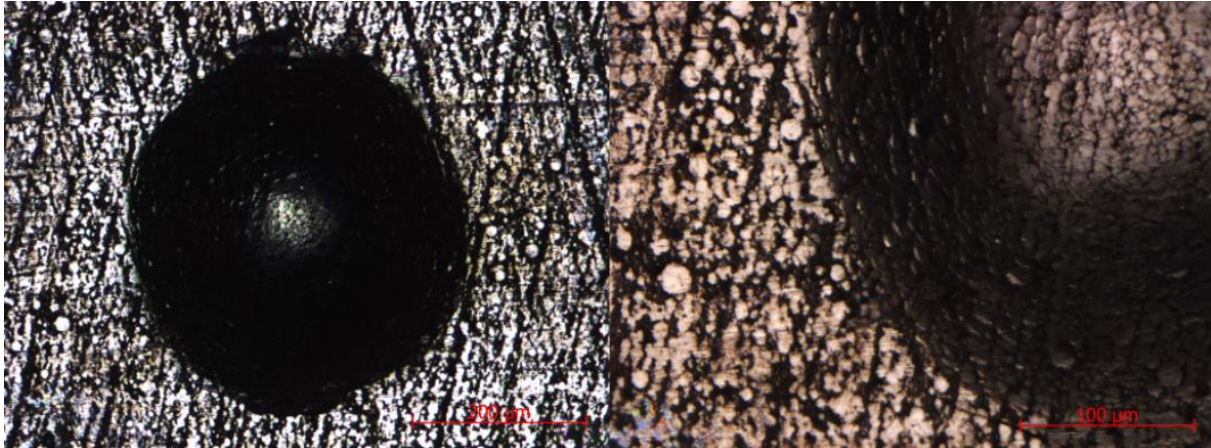
*Obr. 47 - Vtisk ve vrstvě BCr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 2*



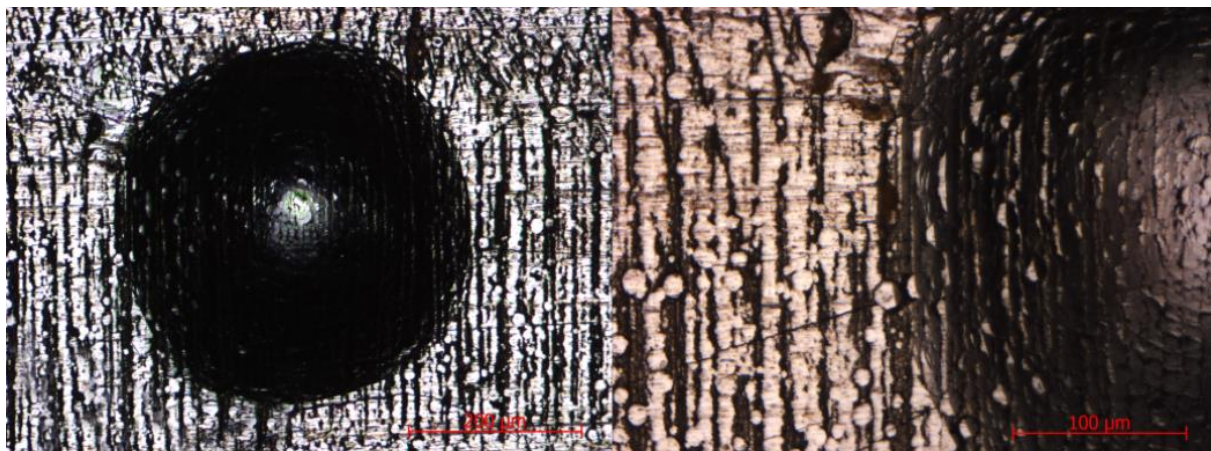
*Obr. 48 – Vtisk ve vrstvě Cr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1*



*Obr. 49 - Vtisk ve vrstvě PCr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1*



*Obr. 50 - Vtisk ve vrstvě PVD 1 při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1*



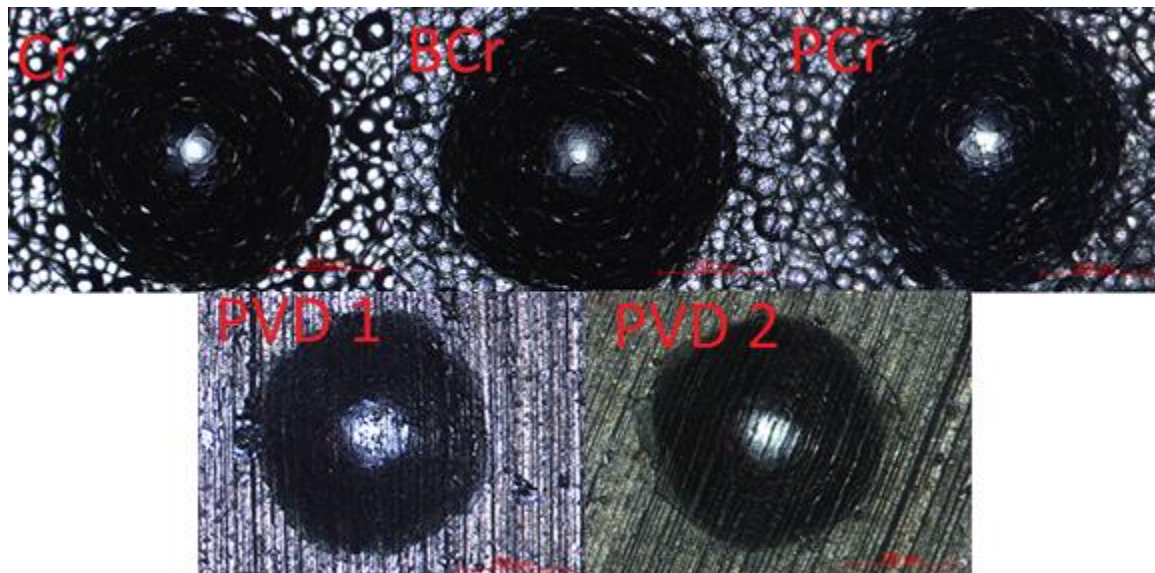
*Obr. 51 - Vtisk ve vrstvě PVD 2 při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1*

Ze snímků i z hodnocení vrstev vyplývá, že všechny povrchové úpravy použité na pístních kroužcích mají vyhovující adhezivně – kohezivní vlastnosti. Pouze povlak BCr vykazuje mírné kohezivní porušení v okolí vtisku, které je patrně způsobeno vyšším vneseným napětím do povlaku částicemi  $Al_2O_3$ . Také lze pozorovat malou kohezivní trhlinu jdoucí od vtisku na Obr. 51 ve vrstvě PVD 2. Ačkoliv není poškození velké, svědčí to o přítomnosti zbytkového pnutí ve vrstvě.

Aby bylo ověřeno, že rádius pracovní plochy pístního kroužku zásadně neovlivňuje výsledky naměřené v adhezivně kohezivních vlastnostech povlakovaných vrstev, byly provedeny také vtisky do odebraných vzorků z matic s rovnou plochou (jejich popisem se zabývá předchozí kapitola). Tak by bylo stanoveno, že lze porovnávat výsledky naměřené na pracovní ploše pístního kroužku s rovinnými plochami matice. Vtisky byly opět provedeny pod zatížením 62,5 kg pomocí Rockwellova indentoru na několika místech a jsou zobrazeny na Obr. 52.

Z tohoto snímku je patrné, že vrstvy na bázi chromu mají i v tomto případě velmi dobré adhezivní vlastnosti. Z hlediska kohezivních vlastností je složité odlišit kohezivní praskliny iniciované vtiskem od prasklin vyvolaných cyklickou změnou polarity chromovacího proudu, které se účelně ve vrstvě tvoří pro zvýšené mazací schopnosti. Vrstvy PVD 1 a 2 mají opět dobré adhezivní vlastnosti, ovšem kolem vtisku se objevila kohezivní porušení, ale pouze v malém rozsahu.

Vzhledem ke stejnému charakteru vtisků na pístních kroužcích i na rovinných plochách odebraných z matic lze předpokládat, že jsou výsledky jednotlivých testů vzájemně komparativní. Dá se však předpokládat odlišné rozložení zbytkového napětí v nanesených vrstvách na rovinných plochách od vrstev nanesených na rádius pístního kroužku. Příkladem mohou být kohezní praskliny pozorované v povlaku BCr na pístním kroužku, které nebyly zaznamenány u žádného vtisku na rovinné ploše.



*Obr. 52 - Vtisky ve vrstvě na zkušební matici a plaketkách po Rockwellově indentoru při zatížení 62,5 kg*

## 11 Vyhodnocení tribologických vlastností

Tribologické vlastnosti jsou jednou z hlavních požadovaných vlastností povrchových úprav pístních kroužků. K vyhodnocení těchto vlastností byla použita metoda „PIN-on-DISC“, která je všeobecně rozšířená a u povlaků, jež se využívají ke zvýšení odolnosti proti kontaktnímu opotřebení, má tato analýza velký význam. Zařízení, na kterém byl test proveden, bylo sestrojeno a je dostupné na KMM ZČU v Plzni (Obr. 53).



*Obr. 53 – Tribometr a detail uchycení vzorků při testu*

Během experimentu byl pevně uchycený „PIN“ ve tvaru kuličky vtlačován do konstantně se otáčejícího vzorku, předem nadefinovanou silou. Kulička je na rameni excentricky posunuta vůči středu vzorku tak, aby se otáčela na předem daném průměru stopy. Pro každý povlak byly vytvořeny celkem čtyři stopy.

Jako protikus byla použita kulička z  $Al_2O_3$ , přičemž vždy po 12 000 cyklech byla kulička pootočena a spolu s testovanou plochou byla ořena acetonem. Vzorky a jejich příprava pro tuto metodu jsou popsány v kapitole 9. V Tab. 5 jsou uvedeny parametry testu.

<b>Materiál "PIN" tělíska</b>	$Al_2O_3$
<b>Poloměr stopy</b>	2,5 mm
<b>Rychlost rotace</b>	308 min <sup>-1</sup>
<b>Zatížení</b>	10 N
<b>Počet cyklů</b>	36 000

Tab. 5 - Parametry testu „PIN-on-DISC“

Parametry uvedené v tabulce 4 jsou převzaty z literatury [2] jako ověřené pro povlaky na bázi chromu. Rozdílný je ovšem počet cyklů, který byl navýšen z 30 000 na 36 000. Toto navýšení má důvod ve vysoké odolnosti vrstev PVD 1 a PVD 2. Tyto vrstvy totiž i po 30 000 cyklech stále nevykazovaly dostatečné opotřebení, které se ve větší míře projeвило až po dosažení 36 000 cyklů.

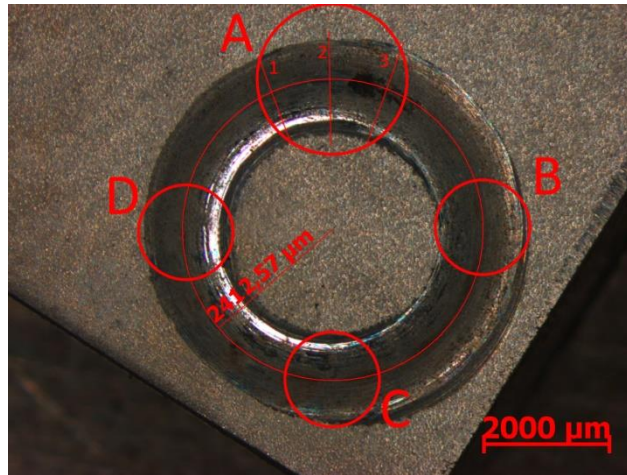
Jako kritérium určující vlastnosti povlaku byl zvolen koeficient opotřebení  $W$  vypočítaný z úběru materiálu, který dává norma ASTM G99-95a (2000). Předpokladem této metody je, že nedochází k významnému opotřebení pin tělíska, ale pouze k opotřebení disku. Z tohoto důvodu byla PIN kulička vždy po 12 000 cyklech pootočena a bylo tak zabráněno jejímu přílišnému opotřebení. Metoda je založena na výpočtu úběru materiálu  $V$  daného v kubických milimetrech pomocí geometrických podobností dle vzorce [28]:

$$V = \frac{\pi * \text{poloměr dráhy [mm]} * \text{šířka stopy}^3 [\text{mm}^3]}{6 * \text{poloměr PIN tělíska [mm]}} [\text{mm}^3]$$

Výstupem je pak vyjádření koeficientu opotřebení, které je dáno vztahem [29]:

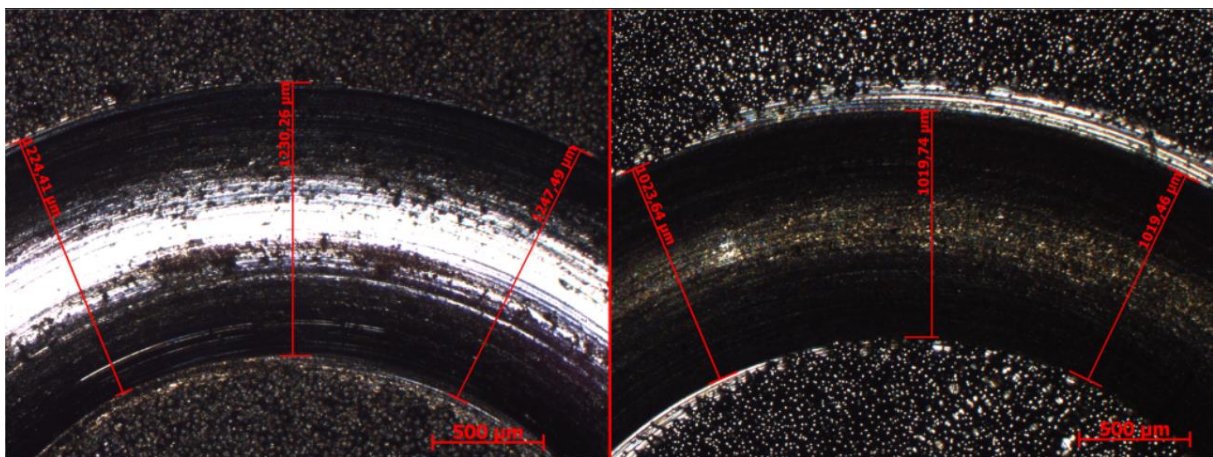
$$W = \frac{V [\text{mm}^3]}{\text{délka dráhy [m]} * \text{zatížení [N]}} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{m} \cdot \text{N}} \right]$$

Pro výpočet opotřebení byl jako první změřen přesný poloměr stop pomocí stereoskopické lupy a počítačového programu AxioVision rel. 4.8. Příklad měření je na Obr. 54.



Obr. 54 – Příklad měření poloměru tribologické stopy ve vrstvě BCr (místa A, B, C a D) a zobrazení míst pro měření šířky stopy (místa 1, 2 a 3)

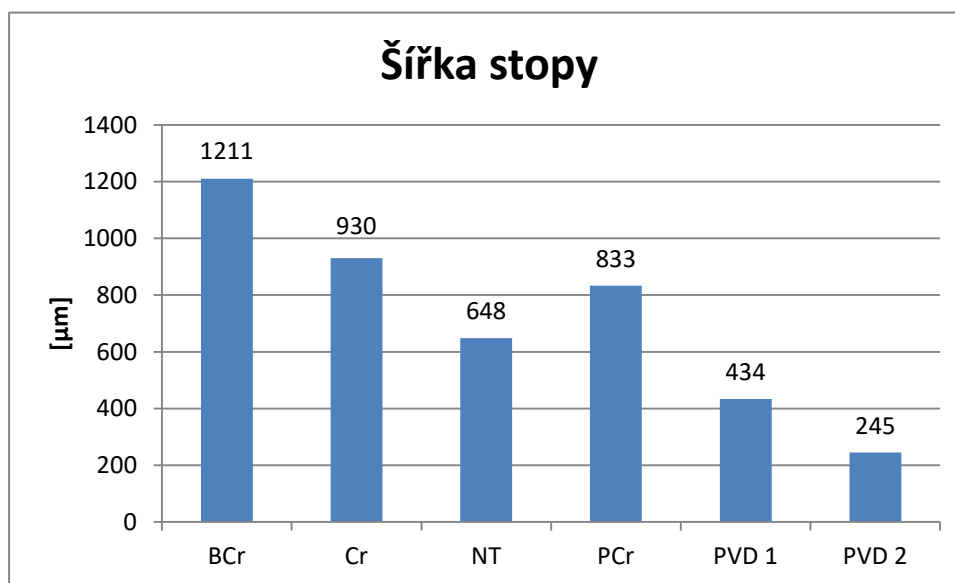
Dále byla změřena šířka stop za pomoci světelného optického mikroskopu. Stopa byla měřena ve čtyřech na sobě kolmých místech A, B, C a D jak je znázorněno na Obr. 54, přičemž v každé pozici bylo měřeno na třech místech (příklad měření na Obr. 55). Z každého místa A až D na obvodu stopy byl poté spočítán aritmetický průměr a z výsledků čtyř hodnot byl opět spočítán průměr, který dává výslednou šířku stopy. Výsledky měření šířky stop jsou uvedeny v Tab. 6 a graficky Obr. 56.



Obr. 55 – Příklad měření šířky stopy v pozici A na povlaku BCr (vlevo) a Cr (vpravo)

Materiál	Stopa č.	Průměrná šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]	Materiál	Stopa č.	Průměrná šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]
Chrom s $\text{Al}_2\text{O}_3$ (BCr)	1	1297 $\pm$ 62	Porézní chrom (Cr)	1	893 $\pm$ 121
	2	1263 $\pm$ 54		2	791 $\pm$ 99
	3	1171 $\pm$ 71		3	816 $\pm$ 36
	4	1111 $\pm$ 26		4	833 $\pm$ 72
	$\emptyset$	<b>1211 <math>\pm</math> 73</b>		$\emptyset$	<b>833 <math>\pm</math> 37</b>
Chrom (Cr)	1	830 $\pm$ 28	PVD 1	1	444 $\pm$ 110
	2	1017 $\pm$ 13		2	445 $\pm$ 118
	3	1070 $\pm$ 69		3	395 $\pm$ 113
	4	803 $\pm$ 17		4	453 $\pm$ 117
	$\emptyset$	<b>930 <math>\pm</math> 116</b>		$\emptyset$	<b>434 <math>\pm</math> 23</b>
Nitridovaná litina (NT)	1	625 $\pm$ 16	PVD 2	1	281 $\pm$ 65
	2	648 $\pm$ 33		2	269 $\pm$ 12
	3	663 $\pm$ 15		3	228 $\pm$ 14
	4	655 $\pm$ 9		4	201 $\pm$ 7
	$\emptyset$	<b>648 <math>\pm</math> 14</b>		$\emptyset$	<b>245 <math>\pm</math> 32</b>

Tab. 6 – Naměřené šířky stop pro testované povrchové úpravy

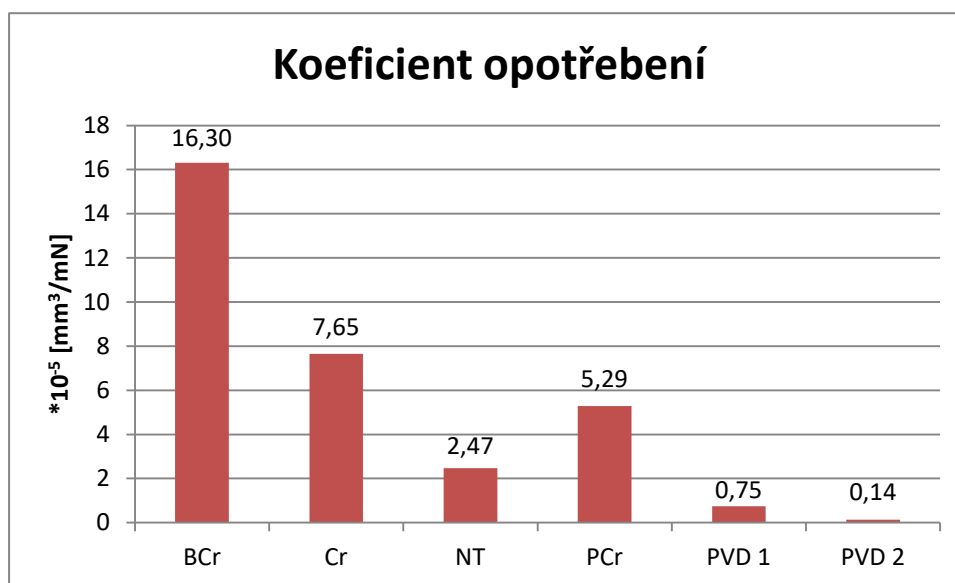


Obr. 56 – Grafické zobrazení průměrné šířky stopy jednotlivých povrchových úprav

Pomocí naměřených hodnot lze vypočítat úběr materiálu a hodnotu opotřebení  $W$ , dle vzorce uvedeného v úvodu kapitoly. Vypočítané hodnoty jsou zapsány v Tab. 7 a graficky zobrazeny na Obr. 57.

Materiál	Úběr [mm <sup>3</sup> ]	Koeficient opotřebení *10 <sup>-5</sup> [mm <sup>3</sup> /mN]
Chrom s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (BCr)	0,920 ± 0,164	16,30 ± 2,91
Chrom (Cr)	0,433 ± 0,156	7,65 ± 2,76
Nitridovaná litina (NT)	0,140 ± 0,009	2,47 ± 0,16
Porézní chrom (PCr)	0,300 ± 0,041	5,29 ± 0,73
PVD 1	0,043 ± 0,006	0,75 ± 0,11
PVD 2	0,007 ± 0,002	0,14 ± 0,05

Tab. 7 – Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení



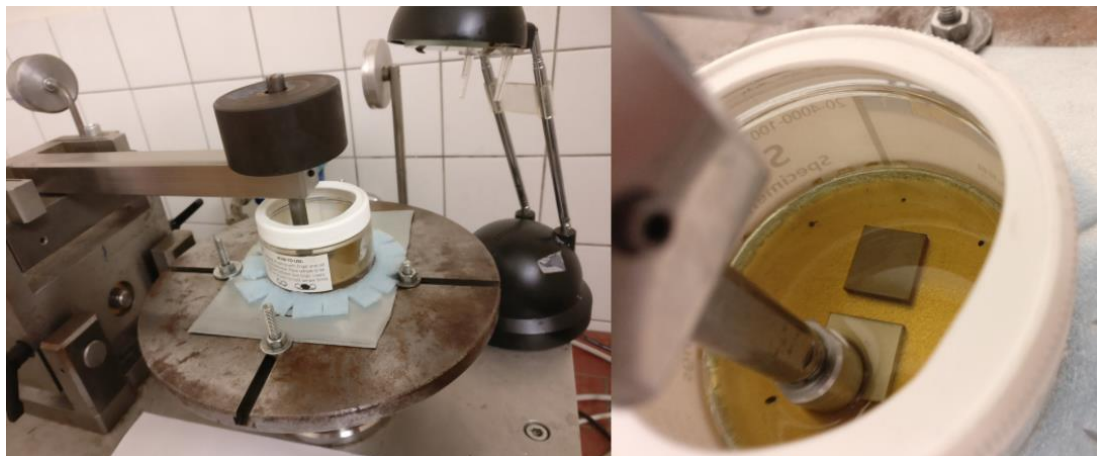
Obr. 57 – Grafické znázornění opotřebení jednotlivých povrchových úprav

Z grafů je patrné, že největší šířku stopy, úběr materiálu a tedy i opotřebení vykazuje vzorek, jenž byl opatřen galvanicky naneseným chromem s keramickými částicemi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tento povlak vykazoval také zhoršené kohezivní vlastnosti při zkoušce Mercedes test na pístním kroužku, ovšem při stejné zkoušce na ploše z matice tento problém zaznamenan nebyl. Celkově povlaky na bázi chromu v tribologickém testu dopadly jako nejhorší. Lepší otěruvzdorné vlastnosti vykazovala nitridovaná litina a podle očekávání jsou na tom lépe vrstvy typu PVD, přičemž vrstva PVD 2 s nižší tvrdostí odolávala nejlépe.

Nízké opotřebení nitridované litiny je způsobeno přítomností bílé vrstvy na povrchu, která příznivě ovlivňuje koeficient tření a má značnou odolnost proti opotřebení. Příznivě působí také přítomnost grafitu, který působí jako suchý lubrikant a významně tak přispívá k lepšímu výsledku. Naopak vrstvy na bázi chromu mají záměrně vytvořené mikrotrhlínky, které mají působit jako zásobník oleje při běhu ve spalovacím motoru a tak přispívat k nižšímu opotřebení. Tyto vrstvy jsou tedy navrženy konkrétně pro práci v oleji a při tribologickém testu za sucha mají značnou nevýhodu oproti litině. Z tohoto důvodu byl proveden test PIN-on-DISC ještě jednou, ovšem tentokrát s přítomností motorového oleje.

## 11.1 Vyhodnocení tribologických vlastností s přítomností oleje

Parametry testu zůstaly zachovány stejné jako v předchozí kapitole. Jediným rozdílem je počet cyklů, který byl z důvodu časové náročnosti tohoto testu, snížen na 12 000 a počet stop byl snížen na dvě. Jako lubrikant byl použit motorový olej, který byl během testu po každých cca 4 000 cyklech v dávce přiveden no kontaktu PIN tělíška se vzorkem. Obr. 58 zachycuje upnutí vzorků v olejové vaničce.



Obr. 58 – Tribologický test PIN-on-DISK s olejem

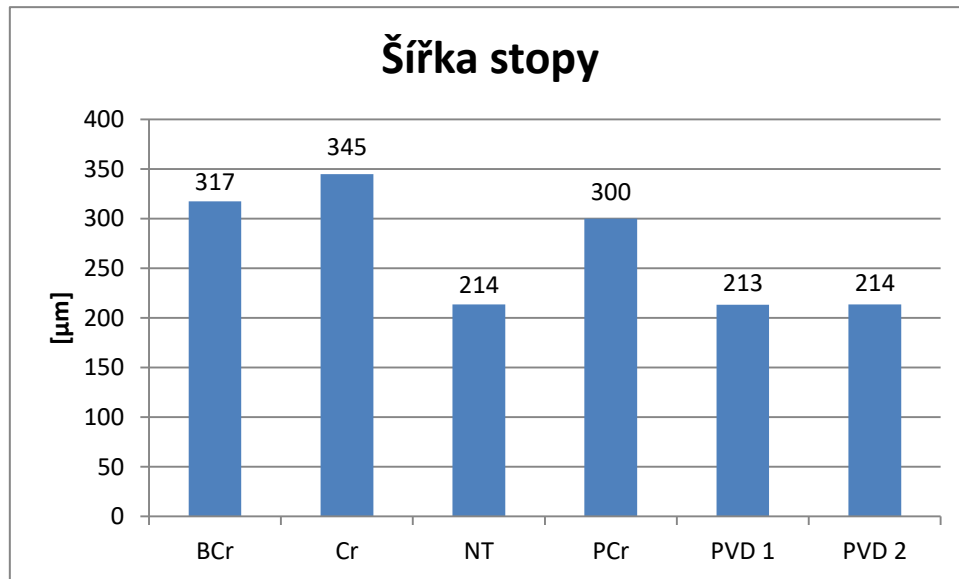
Měření stop probíhalo opět stejným způsobem, jaký je popsán v předchozí kapitole. Rozdílné parametry testu a z nich plynoucí kratší dráha kuličky a rozdílná šířka stop výsledek testu nijak neovlivní, protože vzorce pro úběr a následně i koeficient opotřebení počítají pomocí geometrických podobností.

Po dokončení testu byly opět změřeny šířky jednotlivých stop, jejichž hodnoty jsou číselně uvedeny v tabulce a graficky na obrázku.

Materiál	Stopa č.	Průměrná šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]	Materiál	Stopa č.	Průměrná šířka stopy [ $\mu\text{m}$ ]
Chrom s $\text{Al}_2\text{O}_3$ (BCr)	1	267 $\pm$ 20	Porézní chrom (PCr)	1	301 $\pm$ 40
	2	367 $\pm$ 25		2	299 $\pm$ 21
	$\emptyset$	<b>317 <math>\pm</math> 50</b>		$\emptyset$	<b>300 <math>\pm</math> 1</b>
Chrom (Cr)	1	289 $\pm$ 25	PVD 1	1	212 $\pm$ 10
	2	401 $\pm$ 48		2	214 $\pm$ 17
	$\emptyset$	<b>345 <math>\pm</math> 56</b>		$\emptyset$	<b>213 <math>\pm</math> 1</b>
Nitridovaná litina (NT)	1	219 $\pm$ 16	PVD 2	1	220 $\pm$ 9
	2	209 $\pm$ 15		2	207 $\pm$ 11
	$\emptyset$	<b>214 <math>\pm</math> 5</b>		$\emptyset$	<b>214 <math>\pm</math> 6</b>

Tab. 8 - Naměřené šířky stop pro testované povrchové úpravy po testu v oleji





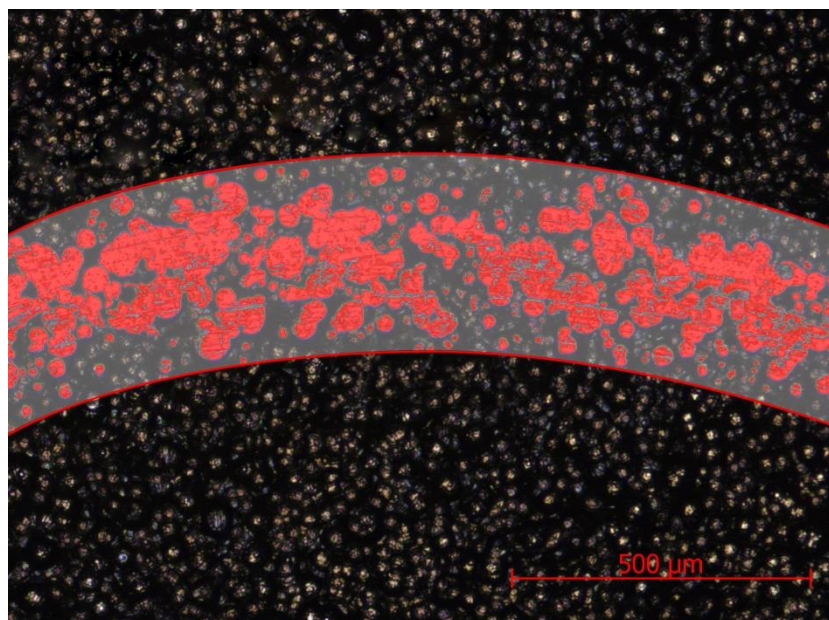
Obr. 59 - Grafické zobrazení průměrné šířky stopy jednotlivých povrchových úprav po testu v oleji

Z šířky stop byly také spočítány hodnoty úběru materiálu. V tomto případě však není opotřebení povlaku ani po 12 000 cyklech dostatečně velké na to, aby mohl být použit vzorec z předchozí kapitoly. Je to způsobeno tím, že na povrchu vzorku, jsou vzhledem k povaze struktury galvanického chromu, značné nerovnosti. Kulička se tak povlaku dotýkala pouze bodově, a to právě na vrcholcích těchto nerovností (viz Obr. 60). K úbytku materiálu tak došlo pouze na těchto vystouplých znech a není tedy možné vypočítat opotřebení jako v případě předchozího testu.



Obr. 60 – Opotřebení povlaku PCr po testu PIN-on-DISC v oleji

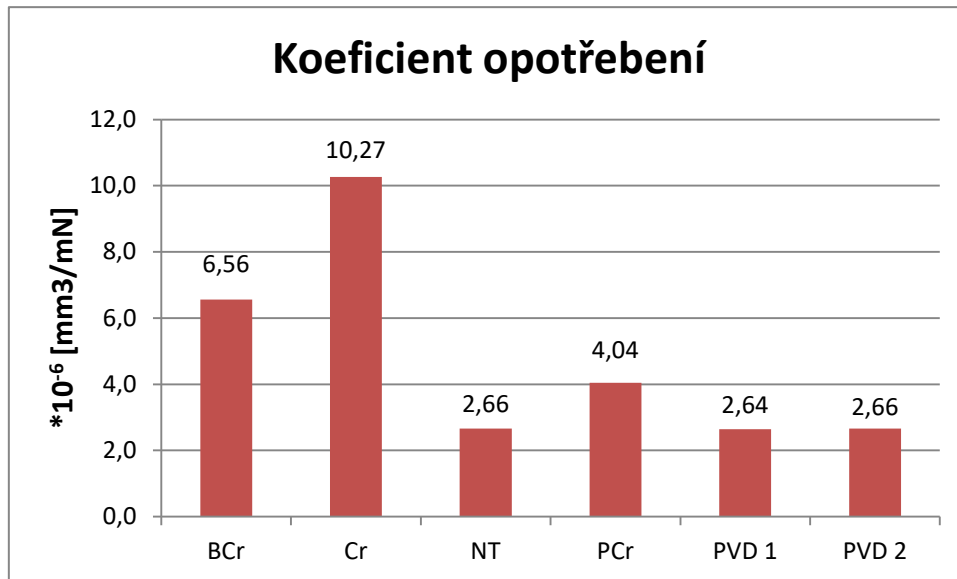
Aby mohl být úběr materiálu spočítán, byl původní vzorec rozšířen o koeficient opotřebené plochy. Pro stanovení tohoto koeficientu, byla vymezena celková plocha stopy, kde za pomoci segmentace obrazu prahováním, byla procentuálně určena plocha opotřebených zrn chromu k ploše zrn neopotřebených. Poměr těchto ploch dává hodnotu koeficientu, kterým byla následně vynásobena hodnota úběru  $V$ . Příklad určení koeficientu opotřebené plochy dává Obr. 61. Vypočítané hodnoty úběru a koeficientu opotřebení jsou uvedeny v Tab. 9. Grafickou představu koeficientu opotřebení znázorňuje Obr. 62.



Obr. 61 – Stanovení koeficientu opotřebené plochy

Materiál	Koeficient opotřebené plochy	Úběr * $10^{-3}$ [mm <sup>3</sup> ]	Koeficient opotřebení * $10^{-6}$ [mm <sup>3</sup> /mN]
Chrom s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (BCr)	0,70	11,66 ± 7,40	6,56 ± 2,91
Chrom (Cr)	0,85	18,22 ± 9,79	10,27 ± 4,69
Nitridovaná litina (NT)	1,00	4,76 ± 0,34	2,66 ± 0,19
Porézní chrom (PCr)	0,55	7,25 ± 0,11	4,04 ± 0,03
PVD 1	1,00	4,63 ± 0,07	2,64 ± 0,04
PVD 2	1,00	4,71 ± 0,44	2,66 ± 0,25

Tab. 9 - Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení po testu v oleji



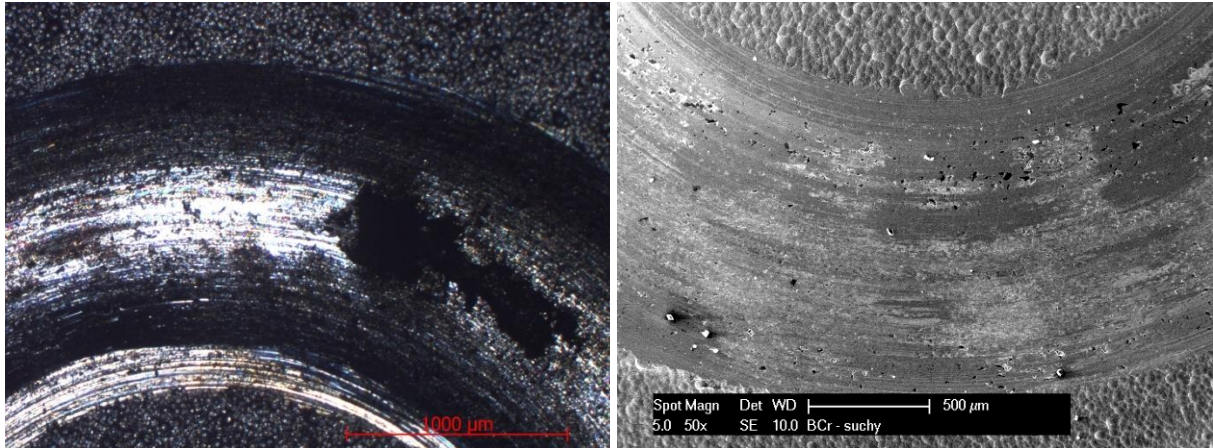
*Obr. 62 - Grafické znázornění opotřebení jednotlivých povrchových úprav v oleji*

Srovnáním koeficientů opotřebení po zkoušce PIN-on-DISC v oleji a za sucha je z testu zřejmé, že nitridovaná litina má velice dobré tribologické vlastnosti. Po testu v oleji vykazuje srovnatelné opotřebení s PVD vrstvami a několikanásobně menší oproti povlakům na bázi chromu, tedy stejně jako tomu bylo při testu za sucha.

Pořadí se při porovnání koeficientů opotřebení u jednotlivých vrstev mezi sebou u testu v oleji nezměnilo. Pouze jediná povrchová úprava, která má v oleji zlepšený výsledek v porovnání s výsledky z tribologického testu za sucha, je povlak BCr.

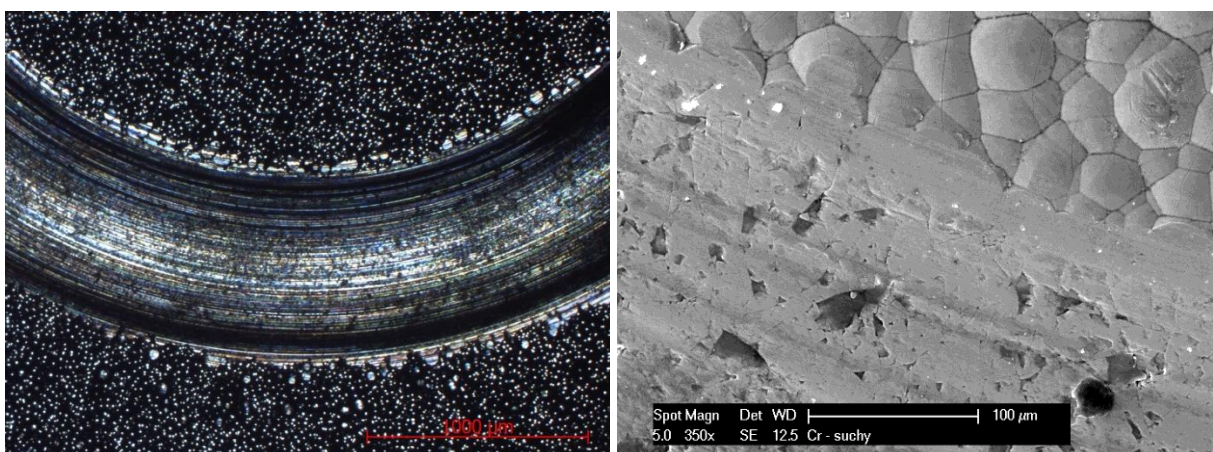
## 11.2 Analýza tribologické stopy

Analýza tribologických stop provedených za sucha byla provedena na optickém mikroskopu Zeiss observer.Z1m a řádkovacím elektronovém mikroskopu Philips 30XL ESEM. Z celkem čtyř stop pro každý vzorek, je na Obr. 63 až Obr. 68 zobrazena vždy ukázka té části stopy, která je pro danou povrchovou úpravu typická.



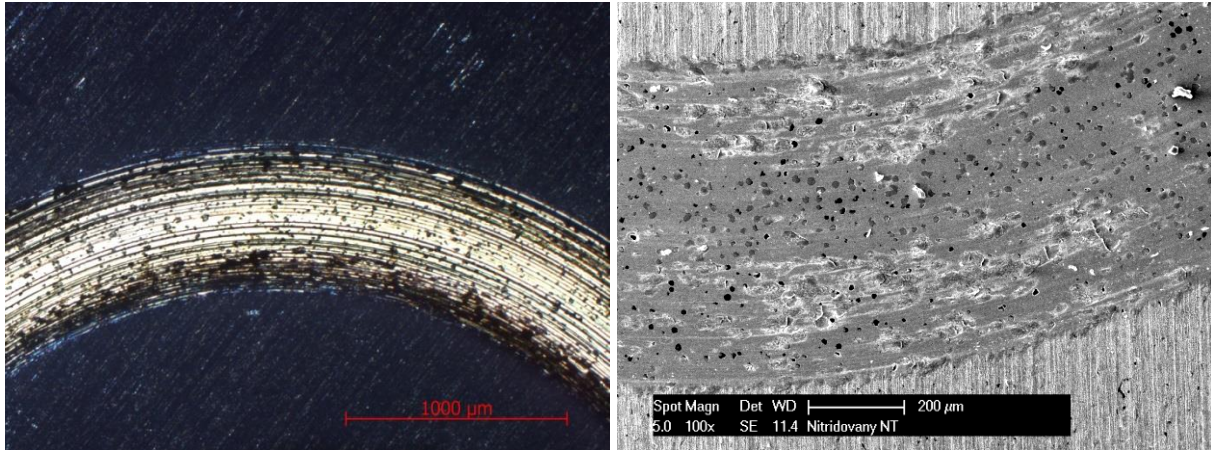
*Obr. 63 – Tribologická stopa - BCr*

Obr. 63 vlevo zobrazuje místo na povlaku BCr, kde došlo k odhalení substrátu na dně tribologické stopy. Tento jev byl pozorován na všech stopách provedených na tomto povlaku a je patrně způsoben kohezním utržením materiálu. Toto vytrhávání je způsobené charakterem povlaku, který obsahuje mikrotrhliny vytvořené během galvanického procesu. V některých částech stopy byly patrné stopy abrazivního otěru způsobené těmito částicemi. Svou roli v abrazivním opotřebení materiálu hráli jistě i částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které jsou do povlaku BCr přidány a přispěly tak k intenzivnějšímu úběru materiálu a tedy i vyššímu koeficientu opotřebení. Na Obr. 63 vpravo jsou patrné adhezně zachycené částice, což mohou být zbytky kuličky. Tyto částice jsou ve stopě rozprostřeny spíše sporadicky



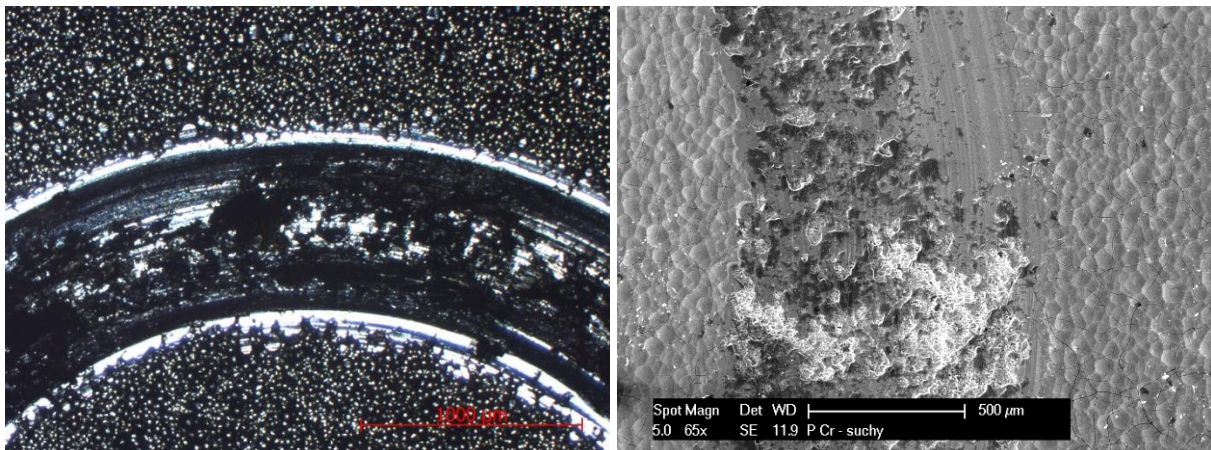
*Obr. 64 – Tribologická stopa - Cr*

Cr povlak zobrazený na Obr. 64 vlevo, vykazoval na všech stopách stopy výrazné abrazivní opotřebení. Kolem stopy byly patrné kohezní odštěpy povlaku. Na témže snímku vpravo je zachycený detail ulpělých částic, patrně se jedná o materiál kuličky. Na snímku jsou též patrná kohezní vytržení materiálu z povlaku a zahlazení mikrotrhlin.



*Obr. 65 – Tribologická stopa - NT*

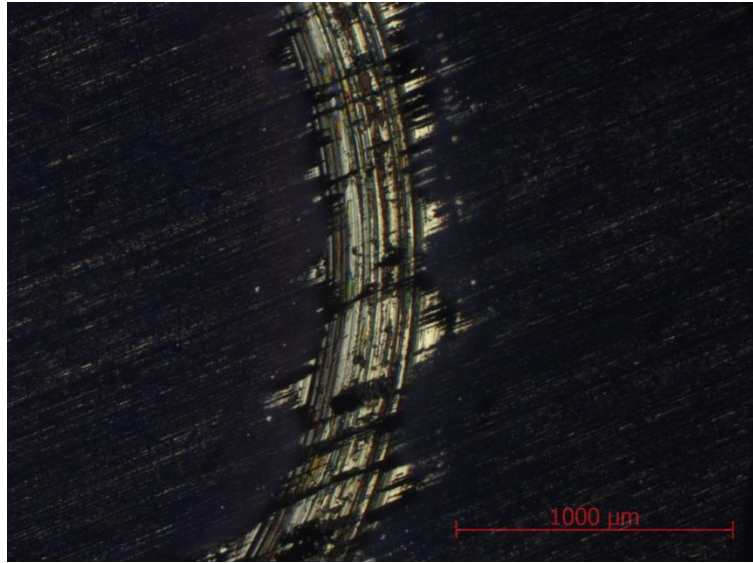
Porušení ve stopě na nitridované litině B6 zachycené na Obr. 65 vykazuje převážně abrazivní charakter opotřebení. Na povrchu materiálu je tzv. bílá vrstva, která je velmi odolná vůči opotřebení. Přítomnost této vrstvy má navíc za následek snížení koeficientu tření mezi PIN tělískem a povrchem, což se také projevilo na celkovém opotřebení. Na dně stopy jsou patrné grafitické globule, které přispěly svými mazacími schopnostmi k malému úběru materiálu. Tyto globule jsou viditelné i na snímku z ŘEM vpravo. Na snímku je dále patrný adhezně ulpělý materiál kuličky, který se vyskytoval v celé délce stopy.



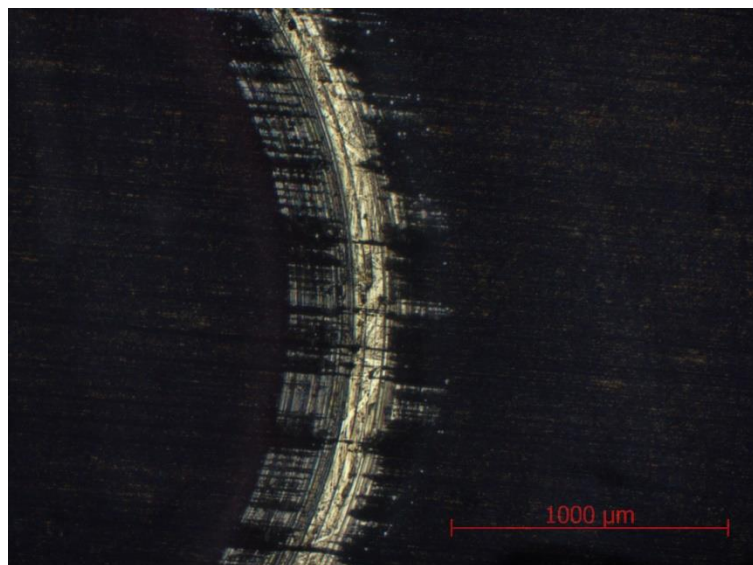
*Obr. 66 – Tribologická stopa - PCr*

U tribologické stopy na vzorku s naneseným PCr zobrazené na Obr. 66, lze pozorovat adhezně ulpělé zbytky korundové kuličky. Na snímku z řádkovacího elektronového mikroskopu, jsou patrné známky adhezivního otěru a také kohezně vytržené části materiálu povlaku. Příčinou může být porézní struktura povlaku, přítomnost mikrotrhlin a zpevnění materiálu po plastické deformaci. Opotřebení PIN tělíska bylo po testu také prokazatelně větší, než po testu ostatních povlaků. Vzhledem k adhezivnímu ulpívání materiálu kuličky, byla zapříčiněna vyšší míra abrazivního poškození. Tento povlak i přes rozsáhlé poškození

tribologické stopy, vykázal v předchozí kapitole z dostupných chromových povlaků nejmenšího koeficientu opotřebení.



*Obr. 67 – Tribologická stopa – PVD 1*



*Obr. 68 – Tribologická stopa – PVD 2*

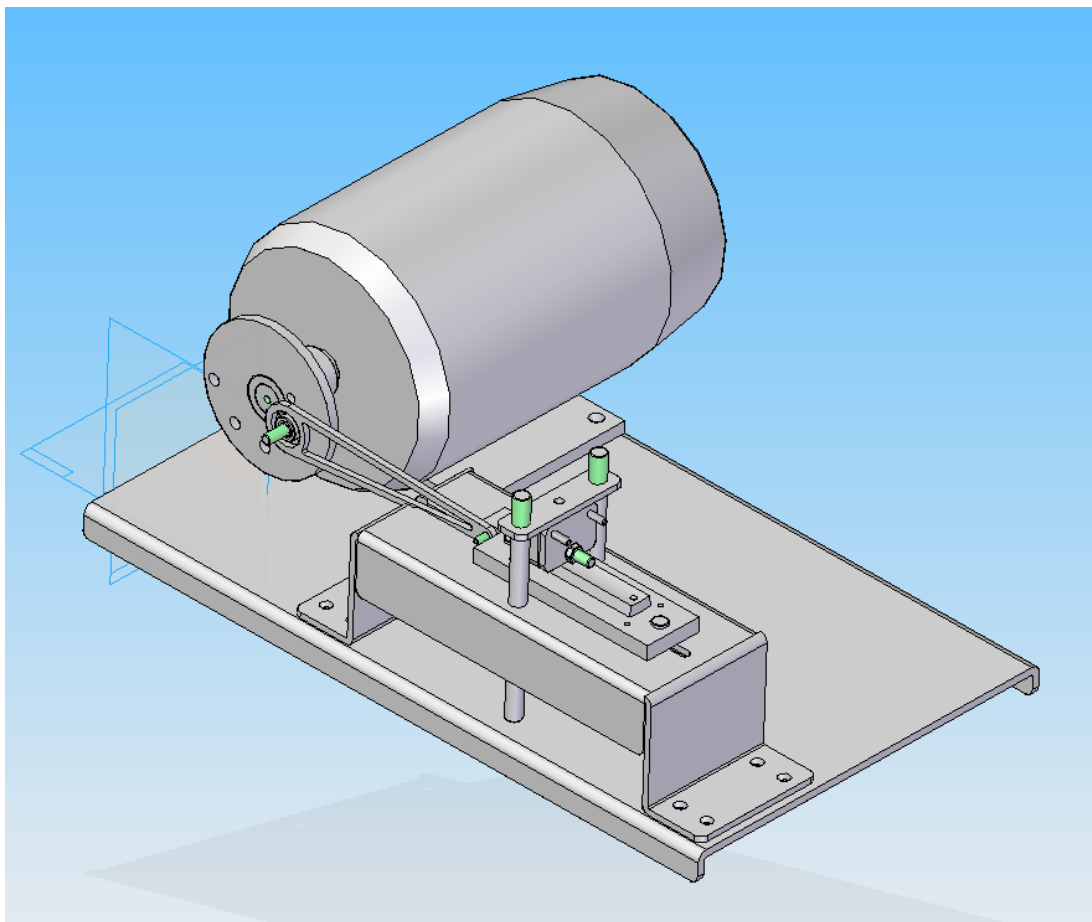
Obě PVD tenké vrstvy zachycené na Obr. 67 a Obr. 68 vykazují podobný charakter abrazivního opotřebení na dně stopy. Jelikož byla tenká vrstva po depozici broušena, je okraj stopy adhezně porušen ve směru stopy brusného nástroje. To také patrně hrálo roli při vzniku abrazivního opotřebení, jelikož se částičky vrstvy mohli dostat do kontaktu materiálu s kuličkou.

## 12 Zařízení pro simulaci chodu pístních kroužků ve válci

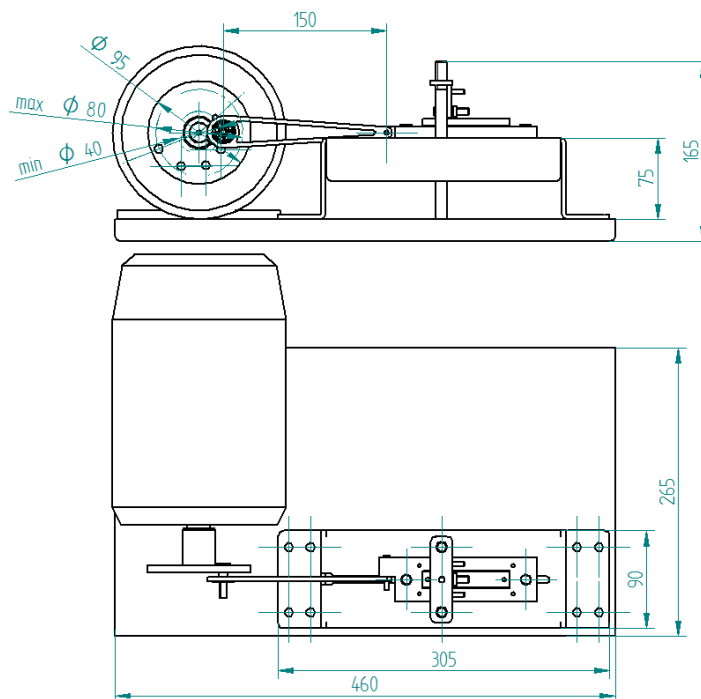
Nejlépeším způsobem ověření kvality povrchových úprav pístních kroužku je jejich nasazení v reálných aplikacích a jejich následným vyhodnocením. Testování na motorové brzdě se tak jeví jako ideální způsob zkoušky povlaků deponovaných na pístních kroužcích. Ovšem provoz tohoto zařízení je velice nákladný a navíc samo zařízení je málo dostupné.

Z těchto důvodů bylo v rámci diplomové práce navrženo a sestrojeno zařízení, které má za úkol při nízkých nákladech simulovat podmínky běhu pístního kroužku ve válci. 3D návrh zařízení byl vytvořen v programu Solid Edge V20 (3D model zobrazen na Obr. 69). Na dalším Obr. 70 je uveden výkres s jeho rozměry.

Stroj sestává z jednoduchého klikového mechanismu, kde je vyříznutá část vložky válce přilepena na unášeči (v detailu na Obr. 76) spojeného s ojnící mechanismu. Proti vložce působí segment pístního kroužku, který je upnut do speciálního držáku, který zároveň sloužil jako držák kroužků při Mercedes testu (kap 10). Segment pístního kroužku v držáku je zachycen na obrázku Obr. 71. Zatížení je generováno závažím přes podložku uchycenou na tyčích po stranách přístroje. Mazání je zajištěno motorovým olejem, který je do styku pístu s vložkou přiváděn z baňky s ventilem zavěšené nad strojem (Obr. 72). Sestavený stroj je pak zachycen na Obr. 73. Z technických důvodů bohužel nebylo možné pístní kroužky ve stroji otestovat a v práci tak nejsou výsledky bench testu uvedeny.



Obr. 69 – 3D model zařízení pro simulaci běhu pístu ve válci



*Obr. 70 – Rozměry zařízení pro simulaci běhu pístu ve válci*



*Obr. 71 – Segment pístního kroužku uchycený v čelisti*





*Obr. 72 – Baňka s ventilem pro olej*

Pro pohon zařízení byl vybrán elektromotor Siemens 1LE1001-0DA22. Parametry motoru udává Tab. 10.

Výkon	750 W
Otáčky	2805 min <sup>-1</sup>
Napětí	230/400 V, 50 Hz
Krytí	IP55
Vyvážení motoru	Stupeň vibrací A
Hmotnost	9 kg

*Tab. 10 – Parametry použitého elektromotoru*



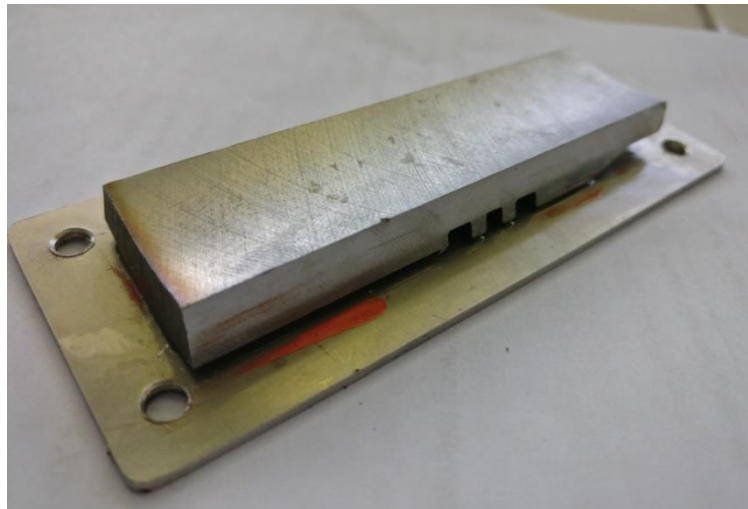
*Obr. 73 – Sestavený stroj pro testování opotřebení*

## 12.1 Příprava sestavení pro test opotřebení

Jako protikus k pístnímu kroužku ve stroji pro test opotřebení byla použita litinová vložka válce s vnitřním průměrem 85 mm (Obr. 74). Vložka byla v polovině axiální délky rozříznuta, tak aby se dala umístit do zařízení. Oddělená polovina vložky byla následně rozřezána po obvodu na několik segmentů, dostatečně velkých na to, aby byla využita co největší plocha styku mezi vložkou a pístním kroužkem. Segmenty vložky byly poté přilepeny na plechovou podložku, jak je zobrazeno na Obr. 75. Tato podložka byla následně pomocí šroubů pevně přichycena k unášечи. Celé sestavení je zobrazeno na Obr. 76.



*Obr. 74 – Vložka válce*



*Obr. 75 – Segment vložky válce přilepený k podložce*



*Obr. 76 – Uchycení segmentu pístního kroužku  
s protikusem na podložce*

## 13 Diskuse výsledků

V praktické části diplomové práce byly vyhodnocovány vlastnosti standardně používaných povlaků na pístní kroužky z galvanicky naneseného tvrdochromu a jeho derivátů. Proti těmto povlakům byly poté postaveny tenké vrstvy typu  $\text{CrN}_x$  deponované metodou PVD, a to ve dvou různých provedeních.

Práce je zaměřena především na adhezivně – kohezivní vlastnosti těchto povrchových úprav a jejich tribologické vlastnosti. Pro stanovení adhezivně – kohezivních vlastností byla zvolena metoda Mercedes test, jež je v praxi značně rozšířená. Ovšem při standardním provedení tato metoda spočívá ve vtlačování Rockwellova indentoru pod zatížením 150 kg (přibližně 1500 N). To se ukázalo být příliš velké pro aplikaci přímo na pístních kroužcích, které se pod tímto zatížením deformovaly „vyvalením“ radiální plochy.

Bylo tedy experimentálně určeno maximální zatížení, při kterém se ani kroužky s minimální axiální výškou nedeformovaly, a tímto zatížením byly následně otestovány všechny zbývající pístní kroužky. Posléze bylo zjištěno, že pouze povlak BCr, tedy vrstva porézního chromu s částicemi korundu, vykazuje mírné kohezivní porušení vrstvy v okolí vtisku. Ostatní povlaky mají jak adhezivní, tak i kohezivní vlastnosti velmi dobré (viz Tab. 11).

Povlak	Hodnocení
Chrom s $\text{Al}_2\text{O}_3$ (BCr)	2
Chrom (Cr)	1
Porézní chrom (Cr)	1
PVD 1	1
PVD 2	1

Tab. 11 – Vyhodnocení adhezivně – kohezivních vlastností při Mercedes testu

Pro další testování bylo vyrobeno firmou Buzuluk a.s. několik pístních kroužků atypických rozměrů se čtyřmi vybroušenými plochami na obvodu. Tento způsob výroby byl zvolen z toho důvodu, aby se podmínky výroby povlaků pro testování co nevíce přiblížilo reálným podmínkám při výrově povlaků pro pístní kroužky. Tyto plošky byly poté vyříznuty na metalografické pile a byl na nich proveden Mercedes test při zatížení 62,5 kg, aby byly ověřeny kvality použitých vrstev. Jelikož se vrstvy na bázi chromu ukázaly být vyhovující, byl na nich proveden test PIN-on-DISC.

Tento test potvrdil horší kvality povlaku BCr za suchého tření. Ten nakonec vykazoval výrazně nejvyšší opotřebení. O něco lépe na tom byly ostatní povlaky na bázi chromu, přičemž menšího opotřebení dosáhla povrchová úprava s porézním chromem. To je patrně způsobeno kombinací relativně měkkého substrátu a velmi tvrdé vrstvy s rozdílným modulem pružnosti. V případě povlaku BCr také svou roli jistě hráli i částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které jsou do povlaku BCr přidány a přispěly tak k intenzivnějšímu úběru materiálu a tedy i vyššímu koeficientu opotřebení. Naopak velmi dobrou odolnost proti opotřebení ukázala nitridovaná litina B6 s méně než polovičním opotřebením oproti chromovým povlakům. Navíc opotřebení PIN tělísky bylo minimální oproti jeho opotřebením s použitím chromových povlaků. Tento jev má několik příčin. Na povrchu materiálu se vyskytovala tzv. bílá vrstva, která je velmi odolná vůči opotřebení. Přítomnost této vrstvy má za následek snížení koeficientu tření mezi PIN tělískem a povrchem. Dále hodnotu koeficientu opotřebení ovlivnila přítomnost grafitu

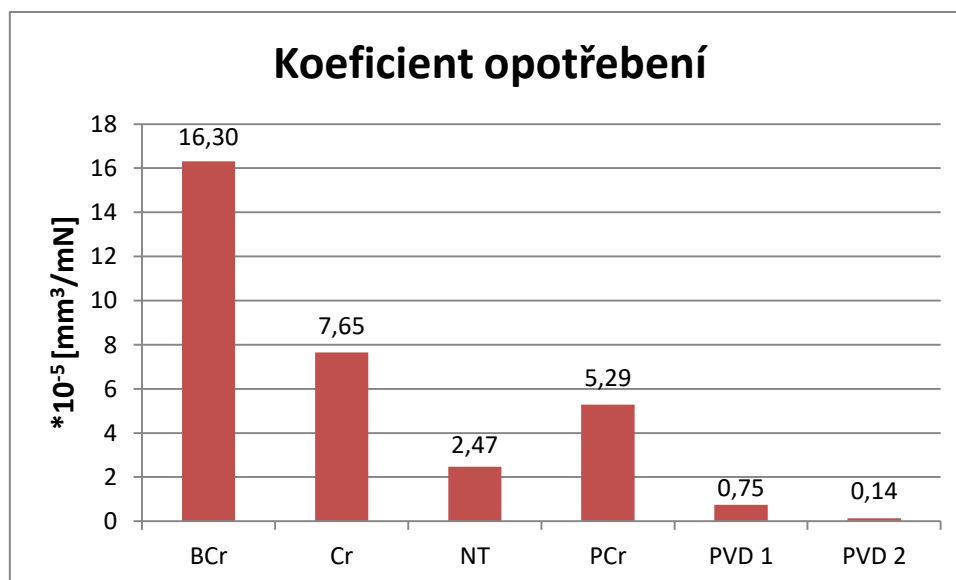
v litině, který působí jako suchý lubrikant a přispívá tak ke snížení tření mezi PIN tělískem a protikusem a tedy i ke snížení celkového koeficientu opotřebení. V případě vrstev na bázi chromu nedošlo k takovému úběru materiálu, aby byl odhalen litinový substrát a tak nebyl zmenšen ani koeficient tření, což vedlo k nadměrnému opotřebení.

Podle očekávání, nejlepších výsledků dosáhly tenké vrstvy typu CrN<sub>x</sub>, kde menší opotřebení bylo pozorováno u méně tvrdé vrstvy PVD 2. Tato vrstva vykazuje více než 100 x menší hodnoty koeficientu opotřebení *W*, než nejhorší testovaná vrstva BCr. Souhrnné výsledky udává Tab. 12 a Obr. 77.

Naměřené výsledky tribologického testu jsou v rozporu s literaturou [2], kde byl proveden obdobný test, ovšem z výsledků této práce vyplývá, že povlak BCr vykazuje s použitím korundové kuličky nejmenšího úběru materiálu. Následuje povlak PCr a s nejhorším výsledkem povlak Cr. Práce [2] však chromové povlaky nesrovnává s nitridovanou litinou ani PVD vrstvami, chybí tedy informace pro jejich srovnání.

Materiál	Úběr [mm <sup>3</sup> ]	Koeficient opotřebení *10 <sup>-5</sup> [mm <sup>3</sup> /mN]
Chrom s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (BCr)	0,920 ± 0,164	16,30 ± 2,91
Chrom (Cr)	0,433 ± 0,156	7,65 ± 2,76
Nitridovaná litina (NT)	0,140 ± 0,009	2,47 ± 0,16
Porézní chrom (PCr)	0,300 ± 0,041	5,29 ± 0,73
PVD 1	0,043 ± 0,006	0,75 ± 0,11
PVD 2	0,007 ± 0,002	0,14 ± 0,05

Tab. 12 - Hodnoty úběru materiálu z disku a opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC



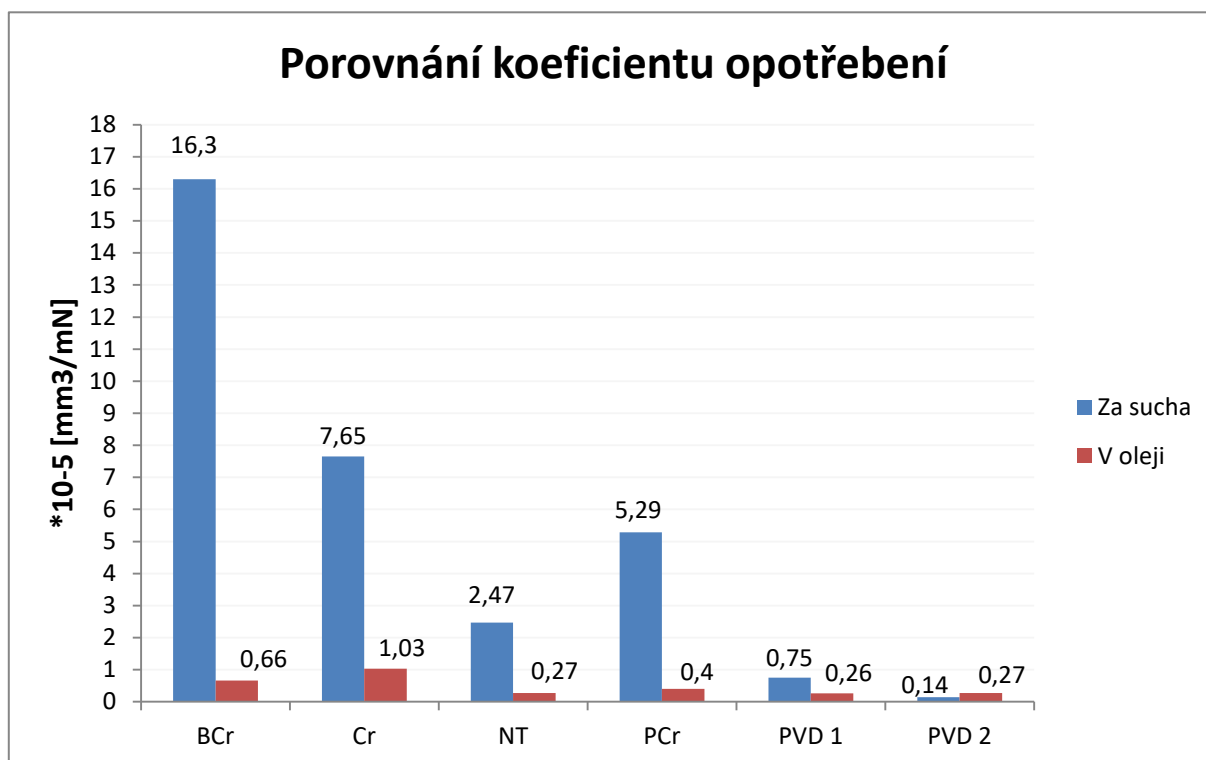
Obr. 77 – Grafické zobrazení hodnot opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC

Vzhledem k tomu, že u povlaků na bázi chromu bylo naměřeno zvýšené opotřebení při tribologickém testu za sucha, byl navíc proveden test PIN-on-DISC s motorovým olejem. Po skončení testu byly opět změřeny šířky jednotlivých stop a spočítány hodnoty úběru materiálu a také koeficient opotřebení. Tab. 13 dává hodnoty úběru *V* a koeficientu opotřebení

W, který je graficky zobrazen v porovnání s výsledky tribologického testu za sucha na Obr. 78.

Materiál	Koeficient opotřebené plochy	Úběr * 10 <sup>-3</sup> [mm <sup>3</sup> ]	Koeficient opotřebení * 10 <sup>-6</sup> [mm <sup>3</sup> /mN]
Chrom s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (BCr)	0,70	11,66 ± 7,40	6,56 ± 2,91
Chrom (Cr)	0,85	18,22 ± 9,79	10,27 ± 4,69
Nitridovaná litina (NT)	1,00	4,76 ± 0,34	2,66 ± 0,19
Porézní chrom (PCr)	0,55	7,25 ± 0,11	4,04 ± 0,03
PVD 1	1,00	4,63 ± 0,07	2,64 ± 0,04
PVD 2	1,00	4,71 ± 0,44	2,66 ± 0,25

Tab. 13 - Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení po testu v oleji



Obr. 78 - Grafické zobrazení hodnot opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC za sucha a v oleji

Výsledek tribologického testování v oleji je v rozporu s předchozí úvahou, že povlaky na bázi chromu a především povlaky chromu, které byly připraveny metodou cyklické změny polaroty proudu při chromování, mají při běhu v motorovém oleji lepší vlastnosti než nitridovaná litina B6. Jak je ze srovnání na Obr. 78 patrné, nitridovaná litina vykazuje lepších výsledků než povlaky na bázi chromu, a to jak při testu v oleji, tak i za sucha. Lze tak soudit, že kromě výše uvedených důvodů, může mít vliv na získané hodnoty výběr korundové kuličky jako PIN tělíška. Třecí dvojice nitridovaná litina s Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je patrně z hlediska tribologického opotřebení výhodnější oproti dvojici Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s chromem. Bylo by tak vhodné

zopakování testu za použití rozdílných materiálů PIN tělísek. PVD tenké vrstvy opět dle očekávání vykazovaly nejnižší hodnotu opotřebení.

Vyhodnocení tribologických stop ukázalo, že hlavním mechanismem opotřebení bylo opotřebení abrazivní. Ve stopě také docházelo k ulpívání materiálu kuličky a především u vrstev porézniých, bylo pozorováno kohezní vylamování povlaku na dně a při okraji stop. Na povrchu nitridované litiny se vyskytovala bílá vrstva, která je velmi odolná vůči opotřebení. Přítomnost této vrstvy má navíc za následek snížení koeficientu tření mezi PIN tělískem a povrchem, což se také projevilo na celkovém opotřebení.

V rámci diplomové práce navrhnu a sestrojím zařízení pro testování pístních kroužků přímo v litinové vložce válce. Stroj dokáže s vysokou frekvencí pohybovat segmentem vložky válce a tak simulovat podmínky při styku pístního kroužku ve válci spalovacího motoru. Poté by se dalo porovnat opotřebení jednotlivých povlaků přímo v podmínkách simulujících běh ve spalovacích motorech a stejně tak porovnat, jaký vliv má povlak kroužku na válce v bloku motoru.

## 14 Závěr

V rámci diplomové práce byla řešena problematika povrchových úprav pístních kroužků. Hlavním cílem bylo porovnání adhezivně – kohezivních a tribologických vlastností tvrdochromových povlaků s moderními PVD vrstvami typu  $\text{CrN}_x$ . V rámci práce bylo také navrženo a sestrojeno zařízení pro porovnávací testování povrchových úprav pístních kroužků. Zařízení má za úkol určit míru opotřebení při běhu pístního kroužku ve vložce válce v přítomnosti maziva.

Nejprve byla provedena literární rešerše, kde byla věnována část práce pracovnímu prostředí a způsobu namáhání pístních kroužků. Největší pozornost však byla věnována povrchovým úpravám, které se v souvislosti s pístními kroužky v průmyslu používají. Byly probrány především galvanicky nanášené povlaky na bázi chromu a tenké vrstvy aplikované PVD a PACVD metodou depozice.

Jelikož se práce zabývá testováním povrchových úprav pístních kroužků, byly ve stručnosti uvedeny použité metody testování, které jsou v práci použity.

Experimentální část diplomové práce se zabývala porovnáním vybraných vlastností povrchových úprav pístních kroužků. Pro porovnání byly zvoleny v současnosti nejvíce používané povlaky na bázi chromu, a to v několika variantách: povlak z tvrdého chromu, porézního chromu a chromkeramický povlak BCr, který obsahuje částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Povlak z porézního chromu a povlak BCr byly připraveny metodou cyklické změny polarity chromovacího proudu. Dále byla pro srovnání vybrána litina B6 dle ISO 6621-3, a to ve stavu nitridovaném. Tyto povrchové úpravy byly srovnány se dvěma typy moderní PVD tenké vrstvy typu  $\text{CrN}_x$ , vyvinuté speciálně pro pístní kroužky.

V testu adhezivně – kohezivních vlastností zkouškou Mercedes test bylo nejprve nutné určit vhodné zatížení pro testování povlaků a tenkých vrstev na pístních kroužcích. Experimentálně bylo určeno zatížení 62,5 kg (přibližně 613 N), které se pro použití s pístními kroužky jeví jako optimální. Po provedení a vyhodnocení vtisků, bylo prokázáno, že chromové povlaky i PVD tenké vrstvy mají vyhovující adhezivně – kohezivní vlastnosti, neboť v okolí vtisku nebylo pozorováno žádné výrazné poškození.

Dále bylo provedeno srovnání tribologických vlastností vybraných povlaků a tenkých vrstev. Jako zkouška těchto vlastností byla zvolena metoda PIN-on-DISC. Zhodnocení zkoušky bylo provedeno dle americké normy ASTM G99-95a (2000).

Z výsledků zkoušky vyplývá, že z testovaných povrchových úprav mají nejlepší otěruvzdornost PVD vrstvy. Překvapením je výsledek nitridované litiny, která ukázala násobně nižší hodnotu koeficientu opotřebení, než povlaky na bázi chromu. Tento jev je způsoben přítomností otěruvzdorné bílé vrstvy na povrchu a také globulárního grafitu v litině, který působí jako suchý lubrikant a přispívá tak ke snížení tření mezi PIN tělískem a protikusem a tedy i ke snížení celkového koeficientu opotřebení. Naproti tomu, povlaky na bázi chromu jsou navrženy konkrétně pro práci v oleji a při tribologickém testu za sucha mají značnou nevýhodu oproti litině. Z tohoto důvodu byl proveden test PIN-on-DISC ještě jednou, a to v přítomnosti motorového oleje.

Výsledky zkoušky PIN-on-DISC s olejem však zopakovaly výsledky tohoto testu za sucha. Opět nejlepších výsledků dosáhly tenké vrstvy  $\text{CrN}_x$ , ovšem v tomto případě měli přibližně stejné opotřebení jako nitridovaná litina. Chromové povlaky měli i zde výsledky horší a pouze povlak BCr ukázal v oleji lepší výsledek, než v předchozím testu.

Vyhodnocení tribologických stop ukázalo, že hlavním mechanismem opotřebení bylo opotřebení abrazivní. Docházelo také, hlavně u vrstev porézních s mikrotrhlinkami, ke koheznímu vylamování povlaku a vylamování povlaku při okraji stop. Dále bylo zjištěno ulpívání materiálu kuličky ve stopě a výskyt otěruvzdorné bílé vrstvy na povrchu nitridované litiny.



V rámci práce bylo také navrženo a sestrojeno zařízení pro bench test, které má za úkol při nízkých nákladech simulovat podmínky běhu písního kroužku ve válci. Pohon stroje byl zajištěn výkonným elektromotorem. Testy provedené na stroji by měly porovnávací hodnotu, kde by výsledkem byl úbytek povlaku nebo tenké vrstvy po skončení testu. Jako protikus k písnímu kroužku ve stroji pro test opotřebení by byla použita litinová vložka válce, nařezaná na segmenty. Sestavené zařízení a z něj získané výsledky, budou uvedeny v připravovaném příspěvku na mezinárodní konferenci, nicméně v rámci diplomové práce nebylo možné z technických důvodů písní kroužky ve stroji otestovat, a tak zde nejsou výsledky bench testu uvedeny.

## 15 Citovaná literatura

- [1] Hrabák, V. a kol. *Pístní kroužky, konstrukce, výroba, provoz*. Hořovice : Charlie Hořovice, 2000.
- [2] Chocholatý, Ondřej. *Vlastnosti, zkoušení a vývoj kompozitních Cr povlaků pro pístní kroužky*. Plzeň : ZČU v Plzni, 2012. Dizertační práce.
- [3] Gåhlin, Rickard, Larsson, Mats a Hedenqvist, Per. *ME-C:H coatings in motor vehicles*. Balzers Sandvik Coating AB. Stockholm, Sweden : Elsevier Science B.V., 2001. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00565-8.
- [4] Kennedy, Marcus, Hoppe, steffen a Esser, Johannes. *Piston ring coating reduces gasoline engine friction*. Burscheid : Federal-Mogul, 2012.
- [5] Ferrarese, Andre, Banfield, Robert Richard a Tomanik, Eduardo. *High value PVD top ring for high speed diesel engines*. MAHLE Brazil Tech Center. místo neznámé : SAE International, 2008. 2008-01-1793.
- [6] Skripta VŠCHT. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [Online] 2015. <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/ovzdusi/viden.htm>.
- [7] Rauscher, Jaroslav. *Vozidlové motory*. Fakulta strojního inženýrství, ústav automobilního a dopravního inženýrství. Brno : VUT v Brně, 2005. Studijní opory.
- [8] Jaana Tamminen, Carl-Erik Sandström. *Piston ring tribology; literature survey*. Espoo, Kivenlahti : Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2002. ISBN 9513861074.
- [9] GOETZE. brožura GOETZE. *Praktický průvodce - Pístní kroužky*. Buzuluk : autor neznámý, 2005.
- [10] Jan Hromádko, Jiří Hromádko, Vladimír Hönic, Petr Miler. *Spalovací motory*. Praha : Grada Publishing, a.s., 2011. 978-80-247-3475-0.
- [11] Corporation, Federal-Mogul Burscheid GmbH and Federal Mogul. *Piston Ring Handbook. Federal Mogul*. [Online] 2016. <http://korihandbook.federalmogul.com/>.
- [12] Honc, Robert. *Obecné řešení ztrát klikového mechanismu*. Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Brno : VUT v Brně, 2012. Diplomová práce.
- [13] Blažek, Josef. *Měření a analýza spalovacích tlaků*. Liberec : Katedra vozidel a motorů, TUL, 2012. Prezentace.
- [14] Olt, Jüri, a další, a další. *Cylinder Pressure Characteristics of Turbocharged and Naturally Aspirated Diesel Engines*. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). [Online] 2014. [http://ac.els-cdn.com/S1877705815004051/1-s2.0-S1877705815004051-main.pdf?\\_tid=90932dd2-b633-11e6-935c-0000aacb35d&acdnat=1480424506\\_582910185f5d441a258a13f5120e9029](http://ac.els-cdn.com/S1877705815004051/1-s2.0-S1877705815004051-main.pdf?_tid=90932dd2-b633-11e6-935c-0000aacb35d&acdnat=1480424506_582910185f5d441a258a13f5120e9029). doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.378.
- [15] Kasl, Josef. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. ZČU v Plzni. Plzeň : autor neznámý, 2015. Přednášky k předmětu FMM.
- [16] Lausmann, G.A. *Electrolytically deposited hardchrome, Surface and Coatings Technology*. Stuttgart, Germany : Elsevier Science S.A., 1996. doi:10.1016/S0257-8972(96)02973-8.
- [17] *Funkční chromování*. Obr, Ladislav. 4, místo neznámé : MM publishing, 2008, MM Průmyslové spektrum. Kód článku: 080425.
- [18] *BEZPEČNOSTNÍ LIST - Oxid chromový*. Praha : Penta s.r.o., 2010. Dostupný na: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/Oxid%20chromovy.pdf>.

- [19] Harayama, Akira a Toshiaki, Imai. *Composite chromium plating film and sliding member covered thereof*. US6054225A Japonsko, 25. 8 2000.
- [20] Soares, Edmo, a další, a další. *NanoBor - Reinforced Chromium Top Ring Coating for Diesel Engines Application*. Tech center, Mahle. místo neznámé : SAE Technical Paper 2009-36-0179, 2009. doi:10.4271/2009-36-0179.
- [21] Federal mogul. *Reklamní materiály*. 2016.
- [22] Sosnová, M. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně - kohezivního a tribologického chování*. ZČU v Plzni. Plzeň : autor neznámý, 2006.
- [23] Kříž, Antonín. *Komplexní vlastnosti řezných nástrojů s tenkými vrstvami nitridů kovů*. ZČU v Plzni. Plzeň : autor neznámý, 2005. Habilitační práce.
- [24] Buzuluk a.s. *Materiálová specifikace tvárná litina - zušlechťená. Podniková norma*. Komárov : autor neznámý, 2009.
- [25] Otáhal, Vratislav. *Jakostní litiny - litina s lupínkovým grafitem*. Technicko - ekonomické poradenství. Brno : autor neznámý, 1956.
- [26] Zindulka, Ondřej a Sochora, Vjačeslav. *PVD povlak CRNx - Když tloušťka není na závadu*. *MM průmyslové spektrum*. Výroba / Povrchové úpravy, 7. 9 2016, 9, str. 138.
- [27] Kříž, Antonín. *Analýza povrchové úpravy pístních kroužků*. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie, ZČU v Plzni. Plzeň : autor neznámý, 2015. Technická zpráva.
- [28] (2000), ASTM G99-95a. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. místo neznámé : ASTM, 2000.
- [29] Hájek, Jiří. *Laboratorní a praktické testy na systémech s tenkými vrstvami v aplikaci na řezné nástroje*. ZČU v Plzni. Plzeň : autor neznámý, 2007. Disertační práce.

## 16 Seznam obrázků

Obr. 1- Velikost spalovacích tlaků v moderních dieselových motorech [5].....	4
Obr. 2 – Ztráty způsobené třením v zážehovém motoru [4] .....	4
Obr. 3 – Typy těsnících a stíracích pístních kroužků [11] .....	6
Obr. 4 – Názvosloví základních parametrů pístních kroužků [1].....	7
Obr. 5 – Výřez zámku pístního kroužku [1] .....	7
Obr. 6 – Různé typy zámků pístních kroužků [11].....	8
Obr. 7 – Schéma klikového mechanismu [10].....	9
Obr. 8 – Způsoby pohybu pístu ve válci [8] .....	9
Obr. 9 – Tlak plynů a síly působící na pístní kroužek [1] .....	10
Obr. 10 – Průběh přitlaků kolem pístních kroužků [1] .....	11
Obr. 11 – Schéma měření tangenciální a diametrální síly na pístním kroužku [2] .....	11
Obr. 12 - Hodnoty součinitelů tření pro píst a pístní kroužky (nalevo) a hodnoty tlaku za jednotlivými písty (napravo) [12] .....	13
Obr. 13 – Teplotní pole pístu použitého u vznětového (nalevo) a zážehového (napravo) motoru [2] .....	13
Obr. 14 - Průnik spalin kolem pístního kroužku drážkou v pístu [8] .....	14
Obr. 15 – Schematické znázornění hlavních druhů opotřebení [2] .....	15
Obr. 16 – Porovnání koeficientu tření pro vybrané povrchové úpravy pístních kroužků [3] ..	19
Obr. 17 – Laboratorní test PIN-on-DISC, jako simulace opotřebení pístu a vložky válce pístním kroužkem s aplikovanou Me-C:H vrstvou [3] .....	19
Obr. 18 – Pokles tvrdosti chromové vrstvy v závislosti na zvyšující se teplotě [1].....	21
Obr. 19 – Tvrdost a vzhled chromové vrstvy v závislosti na teplotě povlakování [16].....	22
Obr. 20 – Chromovací trn s pístními kroužky (Buzuluk a.s.) [2] .....	24
Obr. 21 – Chromovací vana ve firmě Buzuluk a.s. [2] .....	25
Obr. 22 – Značení oxidu chromového, hrozící nebezpečí a pokyny pro bezpečné zacházení [18] .....	26
Obr. 23 – Porézní tvrdochromový povlak s částicemi $Al_2O_3$ v povrchových trhlinách [19; 21] .....	27
Obr. 24 – Srovnání opotřebení pístních kroužků s nanesenou vrstvou chromu, CKS a GDC [11] .....	28
Obr. 25 – Výstupky na povlaku SCKS (SGDC) [21] .....	28
Obr. 26 – Porovnání NanoBor Cr povlaku s vybranými kompozitními tvrdochromovými povlaky [2] .....	29
Obr. 27 – Schéma metody PIN-on-DISK .....	30
Obr. 28 – Struktura litiny B6 před depozicí tenké vrstvy .....	32
Obr. 29 – Struktura litiny B6 po depozici tenké vrstvy PVD 1 (vlevo) a PVD 2 (vpravo) .....	32
Obr. 30 – Ocelový kroužek výrobce 1: vlevo detail povrchu s ukotvenými makročásticemi; vpravo lom tenké vrstvy na pracovní ploše pístního kroužku [27] .....	33
Obr. 31 – Ocelový kroužek výrobce 1: vlevo je zřetelná kohezní trhлина na okraji pracovní plochy; vpravo je lomová plocha kroužku [27] .....	34
Obr. 32 – Trhliny na pracovní ploše tenké vrstvy [27] .....	34
Obr. 33 - Výrobce 2: vlevo zachycena lomová plocha tenké vrstvy s patrným rozdílem v morfologii lomu; vpravo: Lomová plocha pístního kroužku [27] .....	35
Obr. 34 – V obou vyznačených oblastech byl EDX analýzou zjištěn pouze chrom [27].....	35

Obr. 35 – Vlevo: Nerovný povrch pracovní plochy pístního kroužku. Vpravo: Mikrothlinky ve vrstvě [27].....	36
Obr. 36 – Litinový kroužek výrobce 3: vlevo: Lom při okraji pístního kroužku s tloušťkou vrstvy pouze 10 $\mu\text{m}$ . Vpravo: EDX analýza v uvedených oblastech [27].....	36
Obr. 37 – Měření tloušťky tenké vrstvy PVD 1; <b>A</b> – 19,6 $\pm$ 0,9 $\mu\text{m}$ , <b>B</b> – 23,6 $\pm$ 3,2 $\mu\text{m}$ , <b>C</b> – 17,5 $\pm$ 1,1 $\mu\text{m}$ .....	37
Obr. 38 - Měření tloušťky tenké vrstvy PVD 2; <b>A</b> – 20,9 $\pm$ 1,0 $\mu\text{m}$ , <b>B</b> – 18,3 $\pm$ 2,7 $\mu\text{m}$ , <b>C</b> – 22,5 $\pm$ 1,7 $\mu\text{m}$ .....	37
Obr. 39 - Nákres matice a její fotografie. Šipky zobrazují vybroušené plochy po obvodu .....	38
Obr. 40 - Příklad měření tloušťky Cr povlaku na matici .....	39
Obr. 41 - Příklad měření tloušťky Cr povlaku na pístním kroužku .....	39
Obr. 42 – Přípravek pro držení segmentu pístního kroužku při zkoušce Mercedes test .....	40
Obr. 43 - Vtisky ve vrstvě PVD 1 při zatížení 150 kg.....	40
Obr. 44 – Vtisky ve vrstvě PVD 2 při zatížení 150 kg.....	41
Obr. 45 – Vtisky v tenké vrstvě po Rockwellově indentoru při různých zatíženích .....	41
Obr. 46 – Vtisk po Rockwellově indentoru při zatížení 62,5 kg do tenké vrstvy s nevyhovujícími adhezivně-kohezivními vlastnostmi .....	42
Obr. 47 - Vtisk ve vrstvě BCr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 2 .....	43
Obr. 48 – Vtisk ve vrstvě Cr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1.....	43
Obr. 49 - Vtisk ve vrstvě PCr při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1 .....	43
Obr. 50 - Vtisk ve vrstvě PVD 1 při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1 .....	44
Obr. 51 - Vtisk ve vrstvě PVD 2 při zatížení 62,5 kg. Hodnocení 1 .....	44
Obr. 52 - Vtisky ve vrstvě na zkušební matici a plaketkách po Rockwellově indentoru při zatížení 62,5 kg.....	45
Obr. 53 – Tribometr a detail uchycení vzorků při testu .....	45
Obr. 54 – Příklad měření poloměru tribologické stopy ve vrstvě BCr (místa A, B, C a D) a zobrazení míst pro měření šířky stopy (místa 1,2 a 3) .....	47
Obr. 55 – Příklad měření šířky stopy v pozici A na povlaku BCr (vlevo) a Cr (vpravo) .....	47
Obr. 56 – Grafické zobrazení průměrné šířky stopy jednotlivých povrchových úprav.....	48
Obr. 57 – Grafické znázornění opotřebení jednotlivých povrchových úprav .....	49
Obr. 58 – Tribologický test PIN-on-DISK s olejem .....	50
Obr. 59 - Grafické zobrazení průměrné šířky stopy jednotlivých povrchových úprav po testu v oleji .....	51
Obr. 60 – Opotřebení povlaku PCr po testu PIN-on-DISC v oleji.....	51
Obr. 61 – Stanovení koeficientu opotřebené plochy .....	52
Obr. 62 - Grafické znázornění opotřebení jednotlivých povrchových úprav v oleji .....	53
Obr. 63 – Tribologická stopa - BCr.....	54
Obr. 64 – Tribologická stopa - Cr.....	54
Obr. 65 – Tribologická stopa - NT.....	55
Obr. 66 – Tribologická stopa - PCr.....	55
Obr. 67 – Tribologická stopa – PVD 1.....	56
Obr. 68 – Tribologická stopa – PVD 2.....	56
Obr. 69 – 3D model zařízení pro simulaci běhu pístu ve válci .....	57
Obr. 70 – Rozměry zařízení pro simulaci běhu pístu ve válci.....	58
Obr. 71 – Segment pístního kroužku uchycený v čelisti.....	58
Obr. 72 – Baňka s ventilem pro olej .....	59
Obr. 73 – Sestavený stroj pro testování opotřebení.....	60

Obr. 74 – Vložka válce .....	60
Obr. 75 – Segment vložky válce přilepený k podložce .....	60
Obr. 76 – Uchycení segmentu písního kroužku s protikusem na podložce .....	61
Obr. 77 – Grafické zobrazení hodnot opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC .....	63
Obr. 78 - Grafické zobrazení hodnot opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC za sucha a v oleji .	64

## 17 Seznam tabulek

Tab. 1 – Závislost výtěžnosti chromování na chromovací teplotě a proudu [1] .....	21
Tab. 2 – Chemické složení a mechanické hodnoty litiny B6 [24] .....	31
Tab. 3 - Naměřené hodnoty tloušťky tenkých vrstev na zkušebních maticích a na písních kroužcích .....	39
Tab. 4 – Vyhodnocení vrstev po vtisku Rockwellova indentoru při zatížení 62,5 kg .....	42
Tab. 5 - Parametry testu „PIN-on-DISC“ .....	46
Tab. 6 – Naměřené šířky stop pro testované povrchové úpravy .....	48
Tab. 7 – Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení .....	49
Tab. 8 - Naměřené šířky stop pro testované povrchové úpravy po testu v oleji .....	50
Tab. 9 - Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení po testu v oleji .....	52
Tab. 10 – Parametry použitého elektromotoru .....	59
Tab. 11 – Vyhodnocení adhezivně – kohezivních vlastností při Mercedes testu .....	62
Tab. 12 - Hodnoty úběru materiálu z disku a opotřebení při zkoušce PIN-on-DISC .....	63
Tab. 13 - Vypočítané hodnoty úběru materiálu z disku a koeficientu opotřebení po testu v oleji .....	64