



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SNIŽOVÁNÍ TŘECÍCH ZTRÁT PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

REDUCING FRICTION LOSSES OF PISTON RINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radoslav Csintalan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Radoslav Csintalan**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. David Svída, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Snižování třecích ztrát pístních kroužků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na provedení dostupných úprav pístních kroužků pro motor WV 1.5 TSI s cílem snížit jejich třecí ztráty.

Cíle diplomové práce:

Rozbor konstrukce pístních kroužků a možností jejich úprav s cílem snížit jejich třecí ztráty. Navržení dostupných konstrukčních, nebo materiálových úprav. Navržení a provedení dostupných měření pro ověření navržených úprav.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, H. Advanced Engine Technology. 1st edition. Oxford (Great Britain): Arnold, 1995, reprint 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

MERKER, G. P., SCHWARZ, CH., TEICHMAN, R. Combustion Engines Development – Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation. Heidelberg: Springer, 2012. 642 s. ISBN 978-3-642-02951-6.

SHI, Y., GE, H.-W., REITZ, R. D. Computational Optimization of Internal Combustion Engines. London: Springer, 2011. 309 s. ISBN 978-0-85729-618-4.

MTZ Motorentechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer Wieweg | Springer Fachmedien Weisbaden GmbH, 1939- . ISSN 0024-8525.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá možnosťami zníženia trecích strát prvých tesniacich piestnych krúžkov motora koncernu VW 1.5 TSI, 110kW. V prvej časti práce je teoreticky rozobratá problematika piestnych krúžkov z hľadiska ich rozdelenia. Zníženie trecích strát je zabezpečené technológiou povlakovania PVD a PECVD. Druhá časť práce popisuje vytváranie povlakovaných piestnych krúžkov. Na vytvorených povlakoch sú uskutočnené merania ktoré sú v závere práce porovnané a vyhodnotené.

KLÍČOVÁ SLOVA

Piestne krúžky, trecie straty, povlakovanie, PVD, PECVD, DLC, koeficient trenia

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the possibilities of reducing the friction losses of the first sealing piston rings of the VW Group 1.5 TSI, 110kW engine. The first part of the thesis theoretically deals with the issue of piston rings in terms of their classification. Reduction of friction losses is ensured by PVD and PECVD coating technology. The second part of the thesis describes the production of coated piston rings. Measurements are performed on the created coatings, which are compared and evaluated in the conclusion at the end of the thesis.

KEYWORDS

Piston rings, friction losses, coating, PVD, PECVD, DLC, friction coefficient

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CSINTALAN, R. *Snižování třecích ztrát pístních kroužků*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce David Svída. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/145930>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídu PhD. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 9. května 2023

.....
Radoslav Csintalan

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu záverečnej práce Ing. Davidovi Svídovi PhD. za jeho odborné vedenie, cenné rady a usmernenie počas písania diplomovej práce a spoločnostiam STATON s.r.o., PISTON RINGS KOMAROV s.r.o. za poskytnutie služieb a zariadení.

OBSAH

Úvod	11
1 Piestne krúžky	12
1.1 Funkcia piestných krúžkov	12
1.1.1 Utesnenie spaľovacieho priestoru.....	13
1.1.2 Odvádzanie tepla	13
1.1.3 Stieranie a odvádzanie oleja	14
1.2 Namáhanie piestných krúžkov	16
1.2.1 Tepelné zaťaženie piestných krúžkov	16
1.2.2 Mechanické namáhanie piestných krúžkov	18
1.3 Materiál piestných krúžkov	24
2 Opatrenie piestných krúžkov	25
2.1 ADHÉZNE OPOTREBENIE	25
2.2 Abrazívne opotrebenie	25
2.3 Únavové opotrebenie	26
2.4 Erozívne opotrebenie	27
2.5 Kavitačné opotrebenie	27
2.6 Vibračné opotrebenie.....	28
3 Tribológia piestných krúžkov.....	29
3.1 Hydrodynamické mazanie	30
3.2 Zmiešané mazanie.....	32
3.3 Medzné mazanie	32
4 MOŽNOSTI ZNIŽOVANIA TRECÍCH STRÁT PIESTNYCH KRÚŽKOV	33
4.1 LASEROVÉ TEXTUROVANIE POVRCHU	34
4.2 Mikro texturovanie povrchu s povlakom DLC.....	35
4.3 Zmenou geometrie piestneho krúžku.....	38
4.4 Nano aditíva v oleji.....	38
4.5 Použitím multifunkčných vrstiev	42
5 Vlastná práca	43
5.1 Cieľ práce.....	43
5.2 Výroba tesniacich piestných krúžkov	44
5.2.1 Geometria piestných krúžkov	44
5.2.2 Voľba materiálu piestných krúžkov	46
5.3 Proces výroby polotovarov piestných krúžkov.....	47
5.4 Prípravné operácie pred povlakovaním	49
5.5 Voľba povlakov na zníženie trecích strát piestných krúžkov	51
5.6 Povlakovanie PVD (Physical Vapor Deposition).....	51
5.7 Proces povlakovania	52

5.8	Návrh meraní na overenie vlastností povlakov	59
5.9	Calo test.....	60
5.10	Ball on disk test	62
5.10.1	Výsledky koeficientov trenia	63
5.11	Meranie mikrotvrdosti	65
Záver	68
Použité informačné zdroje	69

ÚVOD

V dnešnej dobe globálneho otepľovania, kde podstatnú časť celkového znečistenia ovzdušia tvoria emisie produkované automobilovou dopravou, zohráva znižovanie emisií veľmi dôležitú úlohu. Výrobcovia automobilov so spaľovacím motorom sú nútení spĺňať čoraz prísnejšie emisné limity a pri prekročení limitov sú pokutovaní vo výraznej miere. Vzhľadom na trend zvyšovania nárokov znižovanie emisií je vysoký predpoklad zvyšovanie záujmu producentov automobilov o ďalší technologický vývoj v oblasti znižovania trecích strát piestnej skupiny technológiou povlakovania. Súčasné moderné spaľovacie motory sú schopné energiu z paliva premeniť na mechanickú prácu s účinnosťou maximálne 45%, kde mechanické straty spôsobené trením piestnej skupiny o povrch valca tvoria približne 50% celkových mechanických strát motora.[1] Z tohto dôvodu je potrebné sa zaoberať problematikou znižovania trecích strát piestového spaľovacieho motora. Práca sa zaoberá problematikou povlakovania v spolupráci s renomovanými spoločnosťami. Výrobu polotovarov a finálnu úpravu povrchu tesniacich piestnych krúžkov zabezpečila firma KOMA PISTON RINGS, ktorá na trhu s piestnymi krúžkami zastáva popredné miesto. Technológiu magnetronového naprašovania vo vákuu (PVD, PECVD) a meracie zariadenia zastrešila spoločnosť STATON s.r.o., ktorá má vo svojom obore viac ako dvadsať ročnú tradíciu. Teoretická časť práce sa zaoberá problematikou piestnych krúžkov z hľadiska delenia, podľa ich hlavnej funkcie, konštrukčného prevedenia. Záver teoretickej časti je venovaný tribologickým dejom, ktoré nastávajú pri spaľovacom procese. Spomenuté sú aj súčasné trendy v znižovaní trecích strát v tribologickom uzle medzi piestnymi krúžkami a stenou valca.

Praktická časť sa zaoberá technológiou magnetronového naprašovania za prítomnosti vákuua metódou PVD a PECVD. Tieto technológie umožňujú vytvoriť veľmi tenké odolné vrstvy na povrchu piestnych krúžkov, ktoré výrazne zlepšujú vlastnosti z hľadiska opotrebenia, tribológie. Použité povlaky sú otestované pomocou rôznych meraní. Tieto merania sú v závere porovnané a vyhodnotené z hľadiska dopadu na zníženie mechanických trecích strát oproti sériovým tesniacim piestnym krúžkom spaľovacieho motora, koncernu Volkswagen 1.5 TSI 110 kW. V závere sú navrhnuté ďalšie možné merania, ktoré by potvrdili prínos z hľadiska dlhodobej prevádzky.

1 PIESTNE KRÚŽKY

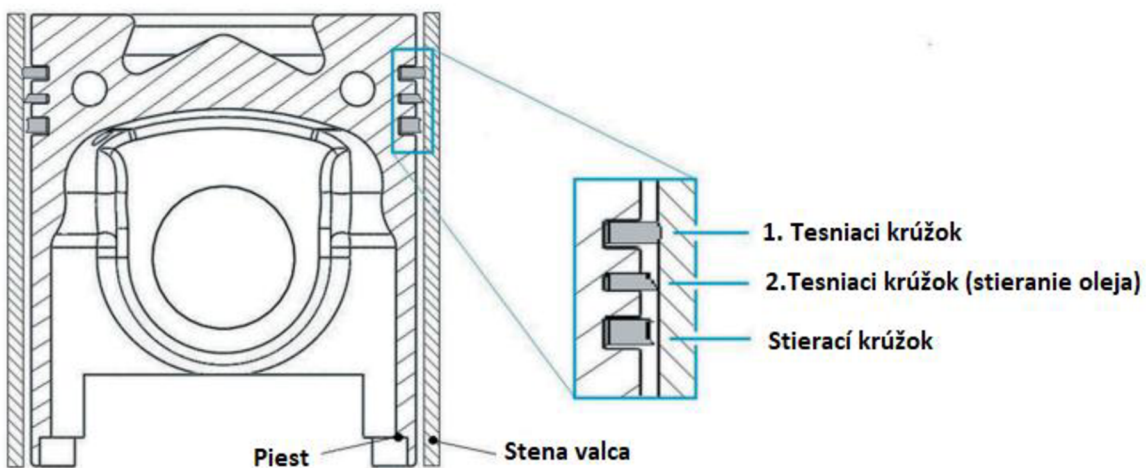


Obr. 1 Piestne krúžky [1]

1.1 FUNKCIA PIESTNYCH KRÚŽKOV

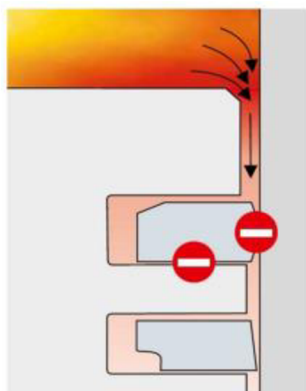
Piestne krúžky slúžia na utesnenie spaľovacieho priestoru od kľukovej skrine motora, aby nedošlo k vniknutiu oleja z kľukovej skrine do spaľovacieho priestoru. Ďalšou nemenej dôležitou funkciou je odvádzanie tepla z piesta na stenu valca, zabezpečiť dostatočnú olejovú vrstvu na stene valca, stabilizovať pohyb piestu vo valci. Základne typy piestny krúžkov [1]:

- Kompresné (tesniace) piestne krúžky
- Kompresné (tesniace) piestne krúžky s funkciou stierania oleja
- Stieracie piestne krúžky



Obr. 2 Piestna skupina [2]

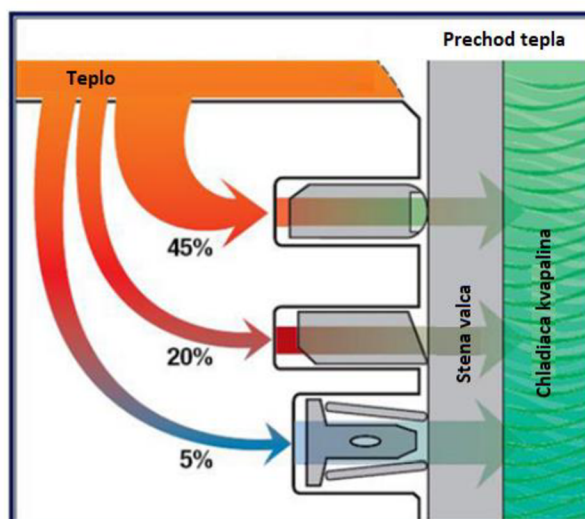
1.1.1 UTESNENIE SPAĽOVACIEHO PRIESTORU



Obr.3 Utesnenie spaľovacieho priestoru [1]

Hlavnou funkciou kompresných piestnych krúžkov, je zamedziť plynom prestup do kľukovej skrine priestorom medzi piestom a stenou valca. Toto utesnenie zabezpečujú spravidla dva kompresné piestne krúžky, ktoré spoločne vytvárajú bariéru pre plyny. Kompresné piestne krúžky konštrukčne nezabezpečujú dokonalé utesnenie spaľovacieho priestoru [1]

1.1.2 ODVÁDZANIE TEPLA



Obr.4 Utesnenie spaľovacieho priestoru [4]

Dôležitou funkciou piestnych krúžkov, je odvádzanie tepla v priebehu spaľovania z piesta na povrch valca. Odvedenie tepla zabezpečujú hlavne kompresné piestne krúžky, stieracie piestne krúžky sa na odvádzaní tepla zúčastňujú len minimálne.[8] Najväčšiu časť až 50% piestom prijatého tepla počas spaľovania odvádza prvý kompresný krúžok.[1] V prípade a by nebol zabezpečený plynulý odvod tepla z piesta došlo by k zapečeniu piestneho krúžku v drážke prípadne k roztaveniu piesta. [4]

1.1.3 STIERANIE A ODVÁDZANIE OLEJA

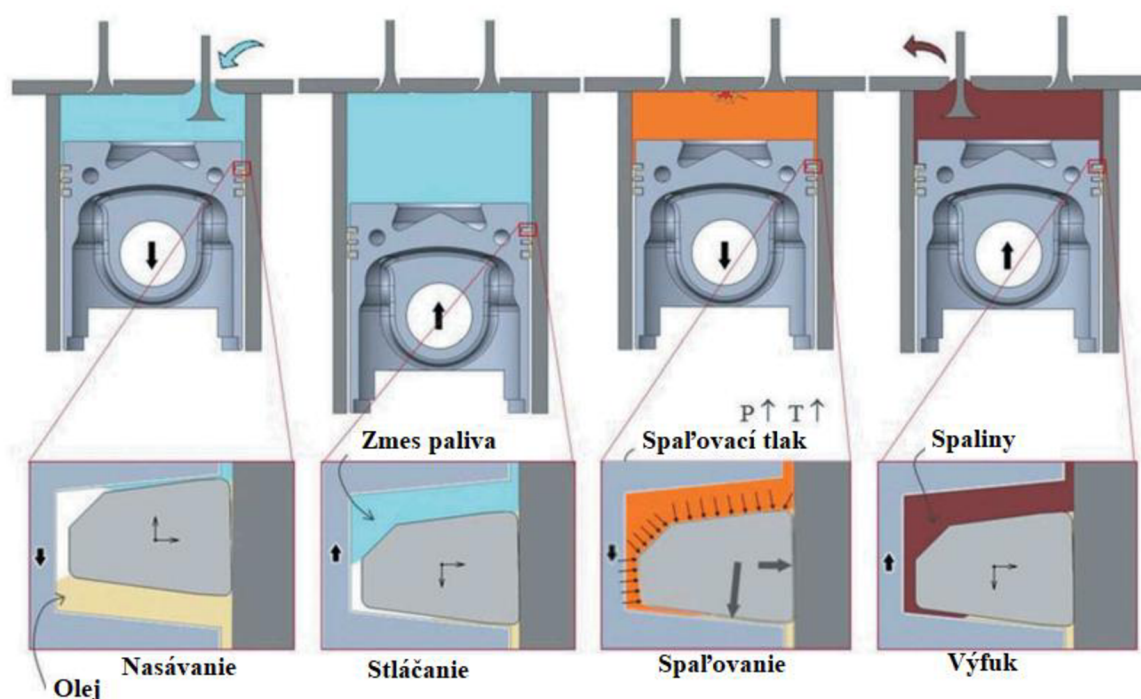
Zabezpečenie dostatočnej hrúbky olejového filmu na stene valca má za úlohu stierací piestny krúžok a z časti túto funkciu zabezpečuje aj druhý kompresný krúžok. Zotretý olej zo stien valca tečie späť do kľukovej skrine motora.[1]



Obr.5 Odvádzanie tepla piestnymi krúžkami [4]

Tesniace piestne krúžky

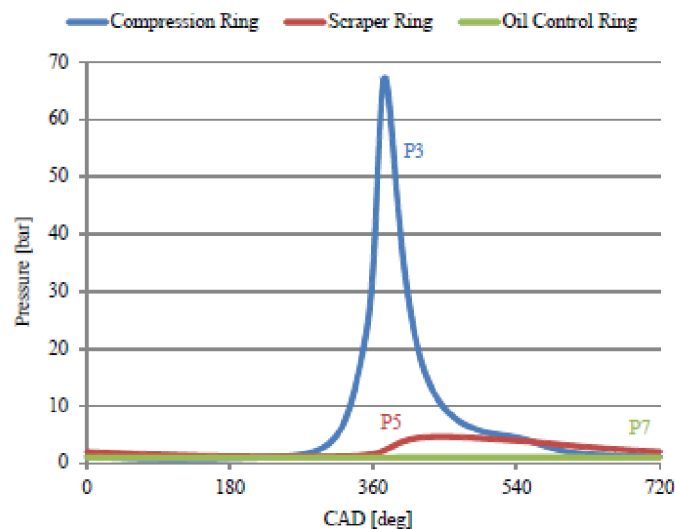
Už názov napovedá hlavnú funkciu tesniacich piestnych krúžkov. Hlavnou úlohou je utesnenie spaľovacieho priestoru a zabrániť úniku spalín zo spaľovacieho priestoru do kľukovej skrine motora. V prípade dobre utesneného spaľovacieho priestoru nedochádza k úbytku tlaku, ktorý pôsobí na piest a energia obsiahnutá v palive je najefektívnejšie využitá na mechanickú prácu. Tesniace piestne krúžky v moderných motoroch majú väčší rozmer ako je priemer valca v ktorom pracujú. Týmto je zabezpečený prítlak piestnych krúžkov na stenu valca, ktorý je potrebný na fungovanie motora.[2] Priemer valca je z pravidla o desať percent menší ako priemer piestneho krúžku. Prvý tesniaci piestny krúžok, ktorý sa nachádza najbližšie k vrchnej korune piestu vstupuje tlak zo spaľovacej komory do drážky pre piestny krúžok. Tu pôsobí na vnútornú stranu krúžku a vytvára dodatočný tlak v radiálnom smere.[3]



Obr. 6 Správanie tesniaceho piestneho krúžku počas spaľovania [2]

1.2 NAMÁHANIE PIESTNYCH KRÚŽKOV

Piestne krúžky sú vystavené mechanickému, tepelnému, korozívnemu a tribologickému namáhaniu. Piestne krúžky musia plniť svoju funkciu pri vysokých teplotách spaľovacích plynov a spaľovacích tlakoch. [7]



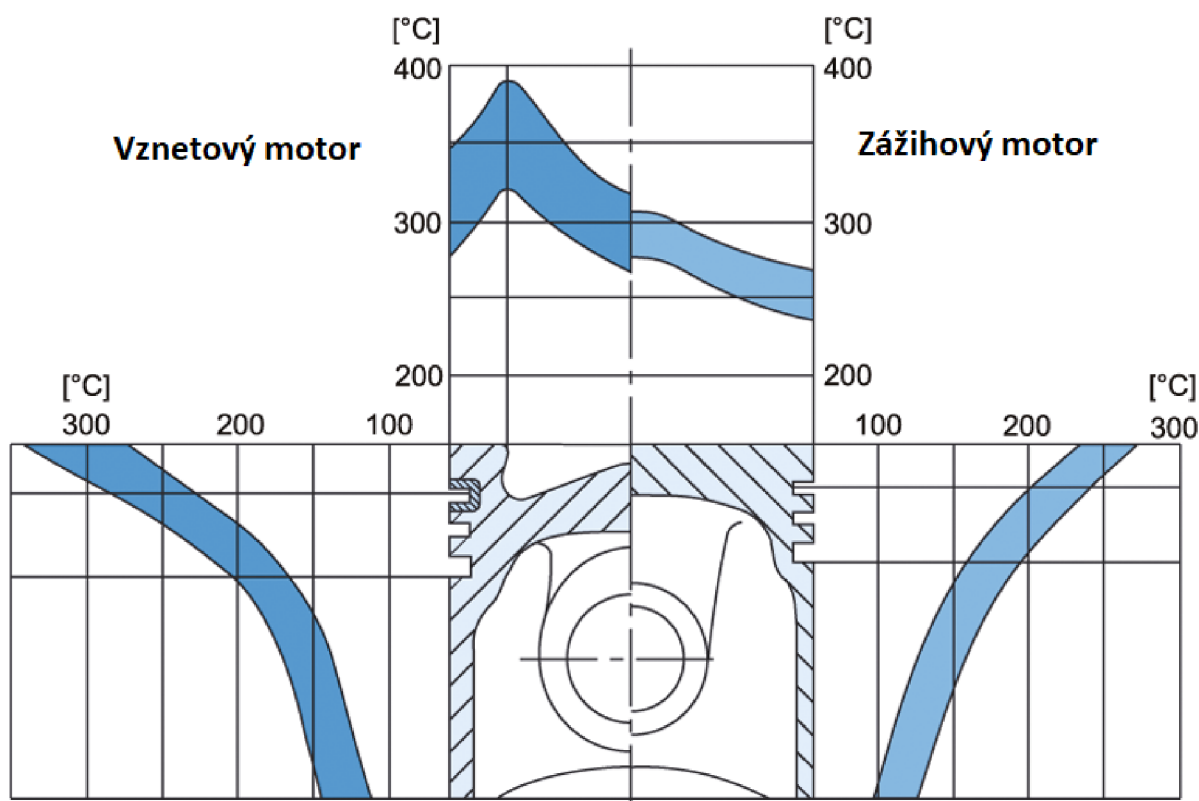
Obr.7 Priebch tlaku pôsobiaci na zadnú stenu piestnych krúžkov [5]

Z priebehov tlakov na Obr.4 vyplýva, že prvý tesniaci piestny krúžok je najviac namáhaný od tlaku plynov. Napríklad teoretický kontaktný tlak používaný pri výpočte tangenciálnych síl pravouhlého tesniaceho piestneho krúžku vyrobeného z ocele je približne $0,19 \text{ Nmm}^{-2}$. [6]

1.2.1 TEPELNÉ ZAŤAŽENIE PIESTNYCH KRÚŽKOV

Hlavným faktorom pre správnu funkciu piestnej skupiny je maximálna teplota drážky pre prvý kompresný piestny krúžok. Teplota v drážke nesmie prekročiť teplotu karbonizácie motorového oleja. V prípade minerálnych olejov je teplota karbonizácie približne $220 \text{ }^\circ\text{C}$, dnešné moderné syntetické oleje majú teplotný bod karbonizácie v rozmedzí 240 až $260 \text{ }^\circ\text{C}$. [2] Veľkosť tejto teploty pri plnom zaťažení motora je určovaná výškou horného mostíka piestu. Z tohto dôvodu u väčšiny vznetrových motorov býva tento rozmer väčší ako u motorov zážihových. Pri teplote vyššej ako je teplota karbonizácie použitého motorového oleja dochádza k tvorbe častíc karbónu. [4] Tieto karbónové častice postupne zanášajú drážku pre piestny krúžok čo vedie k zamedzeniu voľného pohybu krúžku v axiálnom aj radiálnom smere. Karbónové častice sa správajú ako izolant a zamedzujú tepelnému transferu z piestu do stien valca. [7] Toto zamedzenie pohybu sa nazýva „zapečenie piestneho krúžku“. Takto

zablokovaný piestny krúžok nie je schopný plniť svoju tesniacu funkciu, netesnosťami prechádzajú horúce spaliny zo spaľovacieho priestoru, ktoré v mieste netesnosti zahrievajú piest a vplyvom tepelnej rozťažnosti piestu dochádza k zadieraniu piestu vo valci. Rozdielne tepelné rozťažnosti piestu a valca motora vplyvom rozdielnych materiálov a teplotných namáhání sú konštrukčne zohľadnené vďaka piestu vo valci motora.[4] Taktiež v týchto oblastiach je narušený mazací film na stene valca čo následne spôsobuje postupné zadieranie.[7]

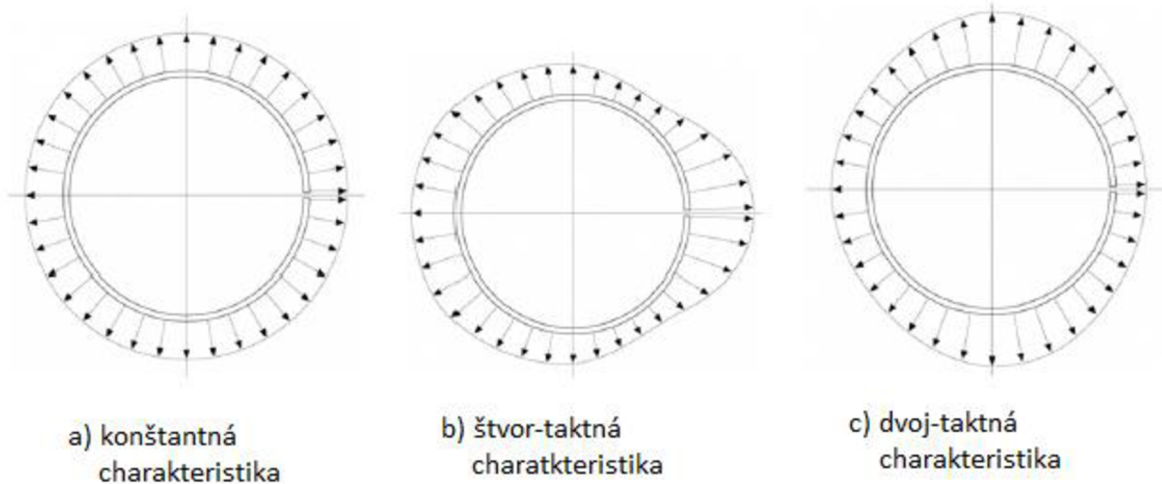


Obr. 8 Teploty piestov vznetový vs. zážihový [7]

1.2.2 MECHANICKÉ NAMÁHANIE PIESTNYCH KRÚŽKOV

Rozloženie radiálneho tlaku

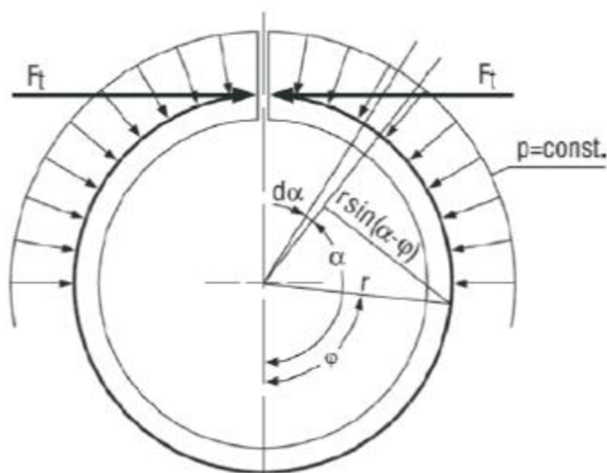
Nerovnomerné rozloženie tlaku na piestny krúžok v radiálnom smere je zapríčinené ovalitou piestneho krúžku. Pri štvortaktných motoroch sa používajú piestne krúžky s konštantnou charakteristikou rozloženia tlaku v radiálnom smere - piestne krúžky s pozitívnou ovalitou. Piestne krúžky s negatívnou ovalitou sa bežne používajú pri aplikáciách v dvojtaktných motoroch z dôvodu nižších kontaktných tlakov, ktoré dovoľujú piestnemu krúžku hladký prechod cez sací respektíve výfukový kanál. [4]



Obr.9 Rozloženie radiálneho tlaku [4]

Parametre piestneho krúžku

Piestny krúžok je vplyvom kontaktného tlaku – p , prtláčaný k stene valca. Meranie kontaktného tlaku je mimoriadne zložité, tým pádom sa v praxi počítame s tangenciálnou silou F_t . Tangenciálna sila je sila, ktorá pôsobí v tangenciálnom smere na konce piestneho krúžku pri jeho stláčaní aby bola dosiahnutá definovaná vôľ'a zámku.[8]



Obr.10 Pôsobenie síl na piestny krúžok [8]

Vyriešením vnútorných síl a momentov sa získajú nasledujúce rovnice:

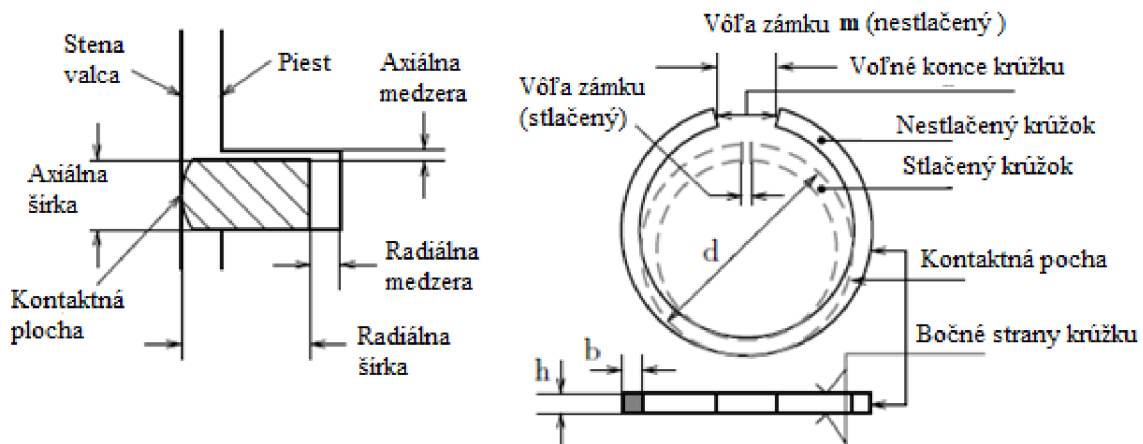
$$M = phr^2(1 + \cos\varphi) \quad (1)$$

$$M = F_t r(1 + \cos\varphi) \quad (2)$$

Kde M je ohybový moment a h axiálna šírka vid'- Obr.10 Porovnaním ohybového momentu od konštantného prtlaku a ohybového momentu od tangenciálnej sily vyplýva nasledujúci vzťah:

$$p = \frac{2F_t}{dh} \quad (3)$$

Kde d je nominálny priemer. Prítlak tesniaceho piestneho krúžku vzhľadom na ich predpätie sa hodnotami pohybuje v rozmedzí 0,12 až 0,25 Nmm⁻². Skutočný kontaktný tlak je mnohonásobne väčší v dôsledku tlaku plynu pôsobiaceho z vnútornej strany piestneho krúžku.[7]



Obr.11 Piestny krúžok terminológia [8]

Piestny krúžok je nainštalovaný do valca, ktorého kruhová geometria nie je dokonalá z dôvodu výrobných nepresností, vzniku deformácií vplyvom montáže, pracovného zaťaženia spôsobujúceho odchýlky od kruhového tvaru. Ak piestny krúžok nie je schopný tieto odchýlky vykompenzovať dochádza k lokálnemu nedostatku kontaktu, čiže netesnosti čo spôsobuje únik spalín do priestoru kľukovej skrine a spotrebu motorového oleja.[7]

Prispôsobivosť piestneho krúžku - k parameter

V priebehu pracovného cyklu sa tepelný tok mení, čo má za následok vysoké teplotné a tlakové gradienty v pieste a vo vložke valca.[1] Prítomnosť vysokých tlakov v spaľovacej komore a montážne namáhanie v bloku motora vedie k rôznym deformáciám vo valcoch. Piestne krúžky sa musia prispôbiť týmto deformáciám a zabezpečiť čo najmenší prechod spalín do priestoru kľukovej skrine a prechod oleja do spaľovacieho priestoru.[7]

Schopnosť piestneho krúžku kompenzovať deformáciu je možné nepriamo v zjednodušenej forme vyjadriť koeficientom k .

$$k = \frac{F_t(d-b)^2}{4EJ} \quad (4)$$

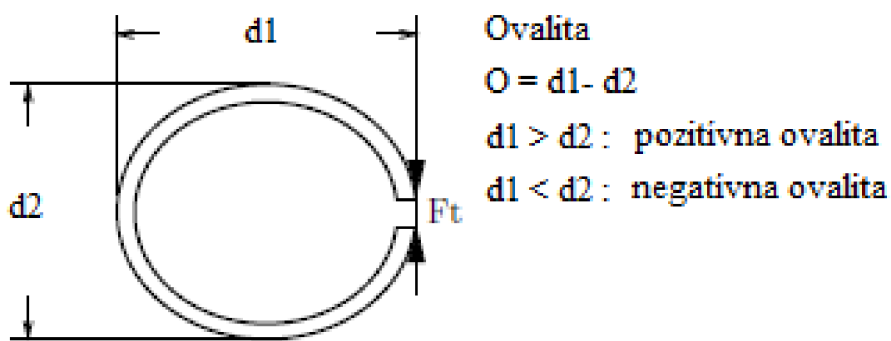
Kde E je modul pružnosti materiálu piestneho krúžku, J - moment zotrvačnosti prierezu piestneho krúžku. Parameter k je často vyjadrovaný ako funkcia zámkovej vôle piestneho krúžku v nenamontovanom stave, potom platí vzťah:

$$k = \frac{2}{3\pi} \frac{m}{d-b} \quad (5)$$

Čím väčšia je hodnota koeficientu k , tým lepšia je prispôsobivosť piestneho krúžku. Schopnosť piestneho krúžku dostať sa do kontaktu s povrchom valca. Bežné hodnoty pre tesniace piestne krúžky sa pohybujú v rozmedzí 0,02 až 0,04. V prípade stieracích piestných krúžkov sú hodnoty parametru k vyššie až do 1,00 v prípade dvojdielných stieracích krúžkov s expanderom.[8]

Ovalita piestných krúžkov

Parameter ovality piestneho krúžku predstavuje rozloženie prítlaku piestneho krúžku na stenu stenu valca. Piestny krúžok je kruhový oceľový pás, kde ovalita je rozdiel medzi rozmerom priemeru cez zámok piestneho krúžku a priemeru meraného o 90° od zámku vid'. Obr.9 Pozitívna ovalita indikuje vyšší tlak v oblasti zámkovej vôle a negatívna ovalita nižší tlak v tejto oblasti.[7]

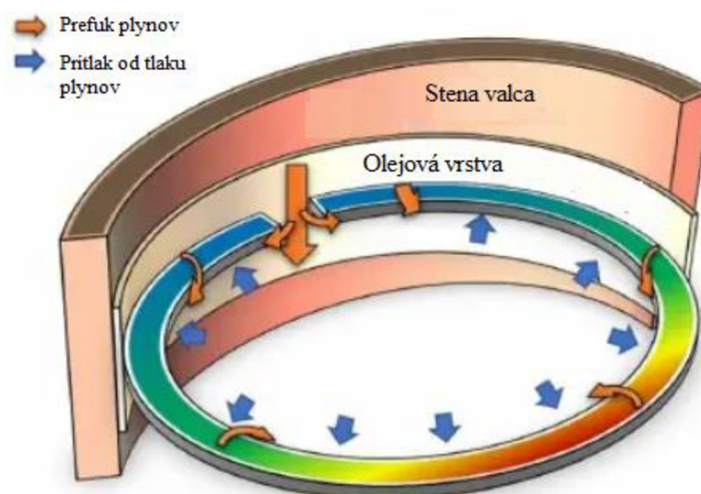


Obr.12 Ovalita piestneho krúžku [7]

Prefuk plynov

Prefuk plynov je negatívny jav, ktorý spôsobuje nedokonalé utesnenie spaľovacieho priestoru, tieto netesnosti umožnia plynom zo spaľovacieho priestoru do kľukovej skrine. Tieto plyny negatívne ovplyvňujú efektívnosť motora a kontaminujú motorový olej časticami zo spaľovacieho procesu.[8] Tento negatívny jav nie je možné úplne odstrániť len minimalizovať. Únik plynov je možný cez nasledujúce cesty:

- Zámok piestneho krúžku – z dôvodu medzery v piestnom krúžku nie je možné zamedziť únik plynov touto cestou
- Nedokonalý kontakt steny valca a plochy piestneho krúžku v prípade nedostatku olejovej vrstvy na stene valca (neštandardná situácia)
- Cez vnútornú stenu piestneho krúžku kvôli pohybu krúžku v drážke pre piestny krúžok

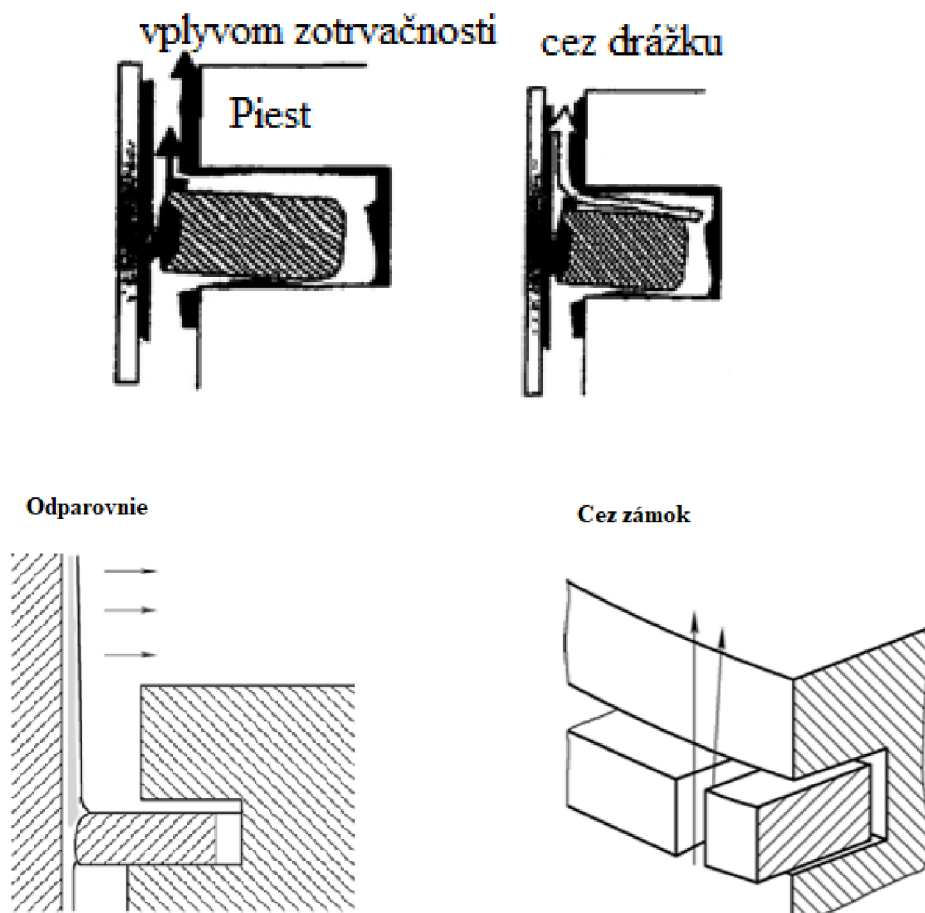


Obr.13 Schéma prefuk plynov [9]

Spotreba Oleja

Spotreba motorového oleja patrí z hľadiska emisií k závažným vplyvom na životné prostredie. Spotreba oleja zapríčinená nedokonalým utesnením spaľovacieho priestoru je spôsobená nasledujúcimi mechanizmami:[9]

- Motorový olej sa vyparuje z povrchu piestnych krúžkov a z povrchu valca do spaľovacieho priestoru
- Motorový olej je vyhadzovaný z piestneho krúžku kvôli zotrvačným silám
- Plyny prúdiace späť do spaľovacieho priestoru strhávajú olej z piestneho krúžku



Obr.14 Mechanizmy spotreby oleja [9]

1.3 MATERIÁL PIESTNYCH KRÚŽKOV

Materiál piestných krúžkov musí zabezpečovať svojimi vlastnosťami odolnosť piestných krúžkov z hľadiska:

- Pevnosti za zvýšenej teploty
- Požadované klzné vlastnosti
- Odolnosť voči cyklickému zaťažovaniu
- Tvrdosť povrchu
- Pružnosť
- Odolnosť proti vysokoteplotnej korózii
- Chemická odolnosť

Hlavnými materiálmi na výrobu piestných krúžkov sa používajú šedá a tvárna liatina a ocel. Materiál piestných krúžkov musí svojimi parametrami zabezpečiť tvrdosť piestneho krúžku vyššiu ako materiál steny valca. Najväčšou výhodou liatinových piestných krúžkov je ich ekonomická výroba. Avšak svojimi vlastnosťami sa vyznačujú ich krehkosťou a straty pružnosti za vysokých teplôt.[8] Piestne krúžky z ocelového materiálu majú vynikajúce vlastnosti z hľadiska pružnosti a pevnosti.

Tvárna liatina sa používa u preplňovaných dieslových motorov a vysokootáčkových benzínových motorov. Hlavným problémom liatinových piestných krúžkov je že pri výrobe vznikajú v štruktúre vady. Aby vady v štruktúre materiálu používali sa drahé zariadenia na odstránenie týchto nedokonalostí, čo má výrazný vplyv na ich cenu. [10]

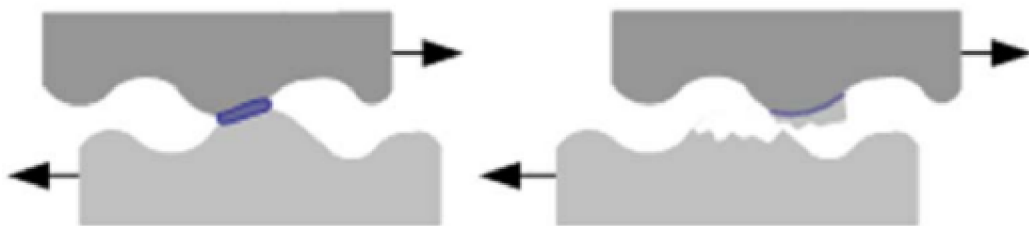
Ocelové piestne krúžky sa používajú v prípade kde hrozí riziko zlomenia piestneho krúžku. Tu patria motory závodné, letecké kde sa používa chrom- kremíková ocel nízko legovaná. Pracovná plocha piestných krúžkov sa ošetruje tvrdo-chromom, molybdénovým povlakom. V súčasnosti je trend využívať veľmi tenké povlaky zabezpečené technológiou PVD.[7] Sú to povlaky na základe dusíka kde vzniká na pracovnej ploche tenká vrstva niekoľko mikrometrov nitridu chrómu. Alebo na základe kyslíku kde vznikajú oxidy. Povlaky výrazne zlešujú vlastnosti z hľadiska opotrebenia a znižujú koeficient trenia. Moderné tenké povlaky však výrazne zvyšujú ceny výroby. [10]

2 OPOTREBENIE PIESTNYCH KRÚŽKOV

Piestne krúžky sú so stenou valca v neustálom trecom kontakte, kde dochádza k opotrebeniu kontaktných povrchov. Opotrebenie piestnych krúžkov sa prejavuje zmenami funkčných rozmerov, ktorá je spôsobená trením v trecom uzle. Nečistoty vyskytujúce sa v oleji alebo vzduchu negatívne prispievajú k nežiadúcemu opotrebeniu plôch. Existujú rôzne mechanizmy opotrebenia.

2.1 ADHÉZNE OPOTREBENIE

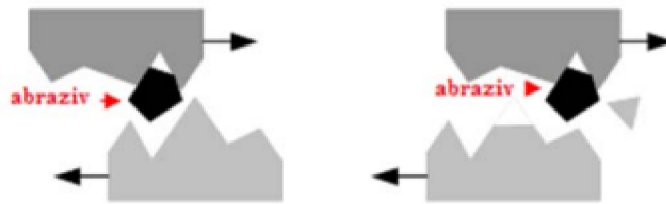
K adhéznej opotrebeniu dochádza v mieste styku nerovností funkčných povrchov pri vzájomnom pohybe. V oblasti styku povrchov dochádza k plastickej deformácii a k tvorbe mikrozvarov. Pri vzájomnom pohybe dochádza k porušeniu mikrozvarov, čo má za následok oddelenie materiálu z funkčného povrchu, kde je pevnosť nižšia. Extrémnym prípadom adhézneho opotrebenia je zadieranie. Typickým príkladom výskytu tohto opotrebenia sú klzné uloženia. [11]



Obr.15 Adhézne opotrebenie [11]

2.2 ABRAZÍVNE OPOTREBENIE

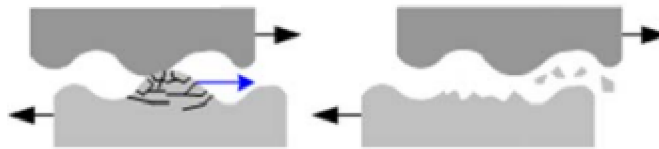
Abrazívne opotrebenie je charakterizované oddeľovaním častíc materiálu z funkčného povrchu ryhovacím účinkom tvrdého drsného povrchu druhého telesa alebo účinkom abrazívnych častíc. Typickým poškodením povrchu sú ryhy. Pri opotrebení čapov a klzných ložísk vplyvom abrazívnych častíc, obsiahnutých ako nečistoty v mazive, často dochádza k paradoxnému javu, že je podstatne viac opotrebený tvrdý čap oproti pomerne mäkkej výstelke ložiska. Tento jav spôsobujú tvrdé časti ložiskového kovu a svojimi vyčnievajúcimi výčnelkami ryhujú tvrdý čap. [12]



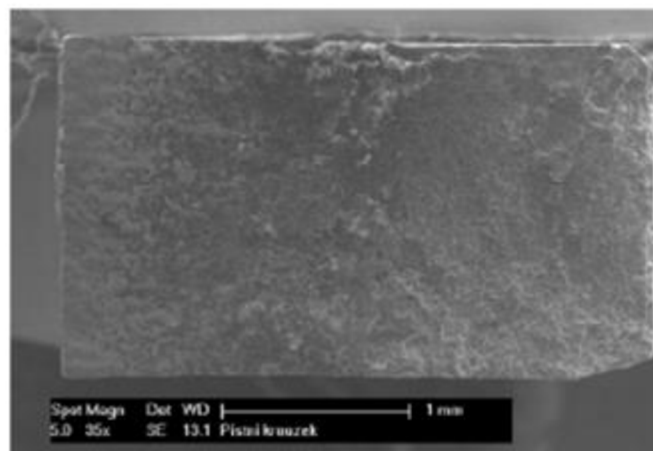
Obr.16 Abrazívne opotrebenie [11]

2.3 ÚNAVOVÉ OPOTREBENIE

Únavové opotrebenie materiálu je spôsobené cyklickým zaťažovaním pri trení. Ide o progresívne a lokalizované poškodenie konštrukcie, ktorá nastane, keď je materiál cyklicky zaťažovaný. Únavové trhliny začínajú na povrchu a šíria sa do podpovrchových oblastí. Podľa cyklických podmienok, môže dôjsť k podpovrchovej delaminácii a praskaniu. Trhliny sa môžu pripájať k sebe, čo vedie k separácii a delaminácii kusov materiálov. Únavovému opotrebeniu môžeme zabrániť vyššou tvrdosťou povrchových vrstiev, nízkou drsnosťou styčných plôch a čo najmenšiemu výskytu inklúzií a iných materiálových chýb [13].



Obr.17 Únavové opotrebenie [11]



Obr. 18 Lomová plocha piestneho krúžku [14]

2.4 EROZIVNÉ OPOTREBENIE

Erozívne opotrebenie poškodzuje funkčný povrch časticami ktoré sú unášané prúdom nejakého média (kvapalina, plyn). Intenzita erozívneho opotrebenia je v rozhodujúcej miere ovplyvňovaná rýchlosťou toku, druhom, veľkosťou a tvrdosťou častíc, ako aj uhlom dopadu častice na funkčný povrch. Erozívne opotrebenie vzniká v tekutinových mechanizmoch ako napríklad obežné kolesá čerpadiel, opotrebenie cyklónov, lopatky ventilátorov, potrubia a podobne. [15]



Obr.19 Erozívne opotrebenie [15]

2.5 KAVITAČNÉ OPOTREBENIE

Kavitačné opotrebenie je charakterizované oddelovaním častíc a poškodzovaním povrchov časti strojov v oblasti zanikania kavitačných dutín v kvapaline. Kavitačné dutiny vznikajú pri náhlom poklese tlaku v kvapaline zmenou podmienok prúdenia. Pri zanikaní kavitačných dutín dochádza k vzniku hydrodynamických rázov, čo spôsobuje namáhanie povrchov, ktoré sú nablízku. Okrem tlakových účinkov sa na rozrušenie povrchov súčiastok podieľajú aj ďalšie faktory, najmä chemické a elektrochemické. S kavitačným opotrebením sa stretávame pri súčiastkach vodných turbín, čerpadiel, ale i v klzných ložiskách, v hydraulických systémoch a pod. [16]



Obr.20 Kavitačné opotrebenie pláštu piestu [16]

2.6 VIBRAČNÉ OPOTREBENIE

Pri vibračnom opotrebení dochádza ku kontaktu styčných plôch vplyvom vzájomného tangenciálneho pohybu a pomerne malej amplitúde pri normálovom zaťažení. Počas opotrebovania dochádza k vytváraniu a porušovaniu mikrospojov v miestach kontaktu nerovností stykových plôch. V prvej fáze mechanizmu nastáva pri pôsobení normálových síl elastická a plastická deformácia povrchových vrstiev.[16] Z tohto dôvodu vznikajú krátery v povrchu a k premiestňovaniu častíc materiálu z jedného na druhý. Ovplyvnené je veľkým množstvom faktorov ako amplitúda, frekvencia pohybu, počet cyklov a vlastností materiálu. [18]

3 TRIBOLÓGIA PIESTNYCH KRÚŽKOV

Trenie je definované ako odpor voči relatívnemu pohybu dvoch telies, ktoré sú v kontakte svojím povrchom. Priamym kontaktom sa rozumie priamy styk dvoch pevných telies. Nepriamy kontakt nastáva v prípade mazania alebo kombináciou priameho a nepriameho kontaktu vzniká zmiešané trenie. Trecie sily závisia na mnohých premenných, materiálové vlastnosti, fyzikálne a chemické charakteristiky.[2] Ďalšie vedľajšie efekty sú štruktúra povrchu ovplyvňujúca kontaktnú plochu piestneho krúžku, odchýlka geometrie valca od dokonalého valcového tvaru. Piestny krúžok je v priebehu pohybu zaťažovaný dynamickými silami .Z tohto dôvodu sa kontaktná plocha so stenou valca mení a tým pádom aj lokálne kontaktné tlaky sa výrazne odchyľujú od špecifického kontaktného tlaku. Kontaktné trenie a zmiešané trenie sú priamo zodpovedné za mechanizmy opotrebenia a energetickými stratami. Teploty, ktoré vznikajú vplyvom trenia môžu dosiahnuť hodnoty, spôsobujúce fatálne materiálové poškodenia, ktoré vedú k zlyhaniu tribologického systému, čo spôsobuje zadieranie. [19]

Stribeckova krivka

Stribeckova krivka vyjadruje závislosť koeficientu trenia C a ďalších premenných, definujúcich tribologické podmienky.

Sommerfeldovo číslo So :

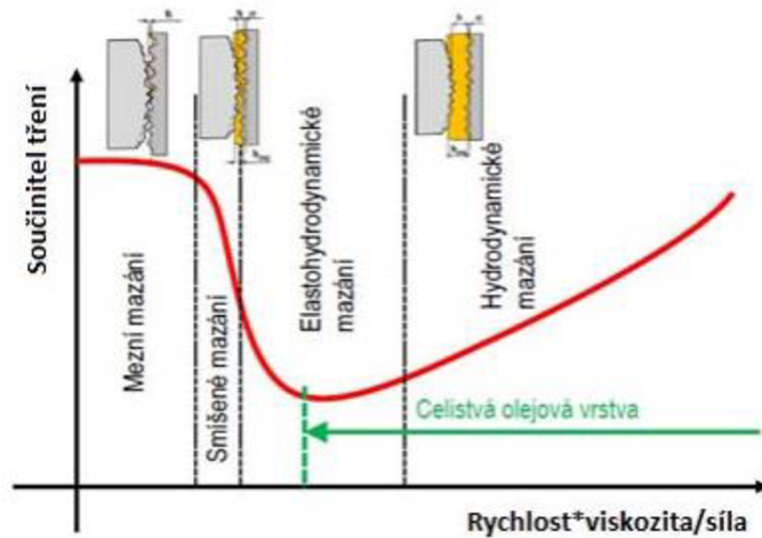
Kde η vyjadruje dynamickú viskozitu, n reprezentuje rýchlosť otáčania, P *nominálny tlak*.

$$So = \frac{\eta u}{Ph} \quad (6)$$

Kde η vyjadruje dynamickú viskozitu, u reprezentuje okamžitú rýchlosť piestu a h hrúbku piestneho krúžku, P *nominálny tlak*. Sommerfeldovo číslo je bezrozmerné číslo.

Pomer hrúbky λ :
$$\lambda = \frac{\text{hrúbka olejovej vrstvy}}{\text{drsnosť povrchu}} \quad (7)$$

Kde hrúbka olejovej vrstvy musí byť väčšia ako nerovnosti v povrchu aby mohlo vzniknúť hydrodynamické mazanie. Tým pádom úplné oddelenie kontaktných povrchov olejovou vrstvou.

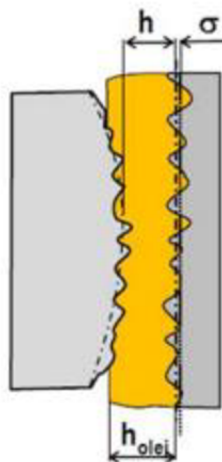


Obr.21 Stribeckova krivka [20]

Stribeckova krivka reprezentuje rôzne režimy mazania. Medzné mazanie, zmiešané, elastohydrodynamické a hydrodynamické.

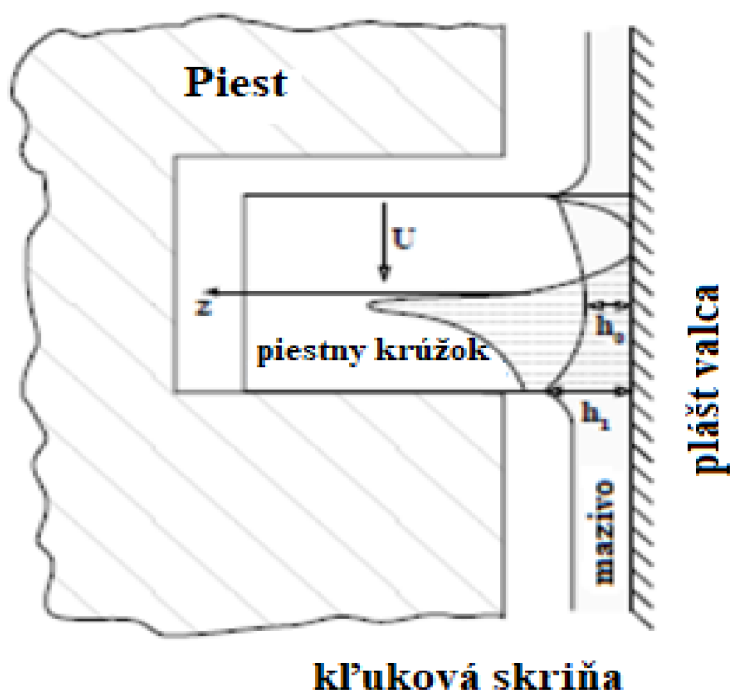
3.1 HYDRODYNAMICKÉ MAZANIE

Keď pán Tower v devätnástom storočí skúmal mazanie radiálnych kľzných ložísk, objavil mechanizmus hydrodynamického mazania, ktorý ďalej rozvíjal pán Reynolds. Tento inovátor skúmal vzájomné prepojenie medzi veličinami: trenie, tlak, rýchlosť.[2] Vďaka známym zákonom, zákonom zachovania hybnosti a zákonu zachovania rovnice kontinuity vytvoril diferenciálnu rovnicu kontinuity druhého radu. Zaoberá sa rozdelením tlaku oleja v mazacej štrbine v trecom uzle. Táto teória platí dodnes. [21]



Obr.22 Hydrodynamické mazanie [20]

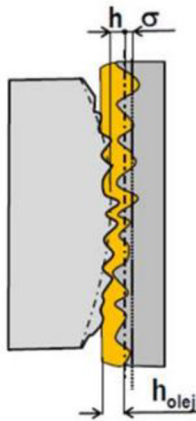
Hydrodynamické mazanie využíva mechanizmus kde pomerne hrubá olejová vrstva oddeľuje od seba kontaktné povrchy, z čoho vyplýva že trecie povrchy sú v kontakte len s mazivom. Hlavné faktory ovplyvňujúce hydrodynamické mazanie sú geometria povrchov, viskozita použitého oleja, rýchlosti a zaťaženia. Rýchlosť privádzania oleja priamo ovplyvňuje minimálnu hrúbku olejovej vrstvy (približne $1\mu\text{m}$). Protitlak zapríčiňuje dostatočne veľká rýchlosť kontaktných povrchov. Protitlak zabezpečuje mazivom prenášať zaťaženie. Drsnosť povrchu a veľkosť komponentu zohrávajú úlohu, akým spôsobom vznikne hydrodynamická vrstva.[21] Hydrodynamické mazanie nie je zabezpečené v prípade štartovania motora a pri jeho vypínaní. Prudká zmena rýchlosti a dynamické zaťaženie môžu takisto viesť k narušeniu celistvého hydrodynamického filmu. Veličina ktorá popisuje spôsob mazania vyjadruje pomer hrúbky mazacej vrstvy k redukovanej drsnosti kontaktných povrchov. V prípade hydrodynamického mazania tento parameter λ zo strany 24 nadobúda hodnoty v rozmedzí 5 až 100. [22]



Obr. 23 Hydrodynamické mazanie piestneho krúžku [13]

3.2 ZMIEŠANÉ MAZANIE

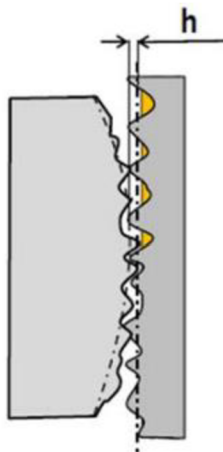
Pokles tlaku vplyvom zníženia rýchlosti alebo nadmerným zvýšením zaťaženia, spôsobí zníženie tlaku v mazacej vrstve čo má za následok zníženie hrúbky olejového filmu. Olejová vrstva nie je schopná prenášať zaťaženie tým pádom dochádza ku kontaktu nerovnosti v tribologickom uzle. Zmiešané mazanie prenáša sily čiastočne hydrodynamickým tlakom a čiastočne kontaktným tlakom. Hrúbka mazacieho filmu v prípade zmiešaného mazania sa pohybuje v rozmedzí od 0,01 do 1 μm . Parameter mazania nadobúda hodnoty 1 až 5. [22]



Obr.24 Zmiešané mazanie [20]

3.3 MEDZNÉ MAZANIE

Vplyv hydrodynamického mazania je zanedbateľný, prenos zaťaženia mazivom je minimálny. Pri prechode do režimu medzného mazania dochádza ku kontaktu povrchových nerovností kvôli nesplneniu podmienok pre hydrodynamické mazanie. Hlavné faktory ovplyvňujúce vznik medzného mazania sú geometrické vlastnosti povrchov, dynamické a tepelné podmienky. Mazacia vrstva je tvorená povrchovo aktívnymi látkami a chemickými reakciami maziva.[19]



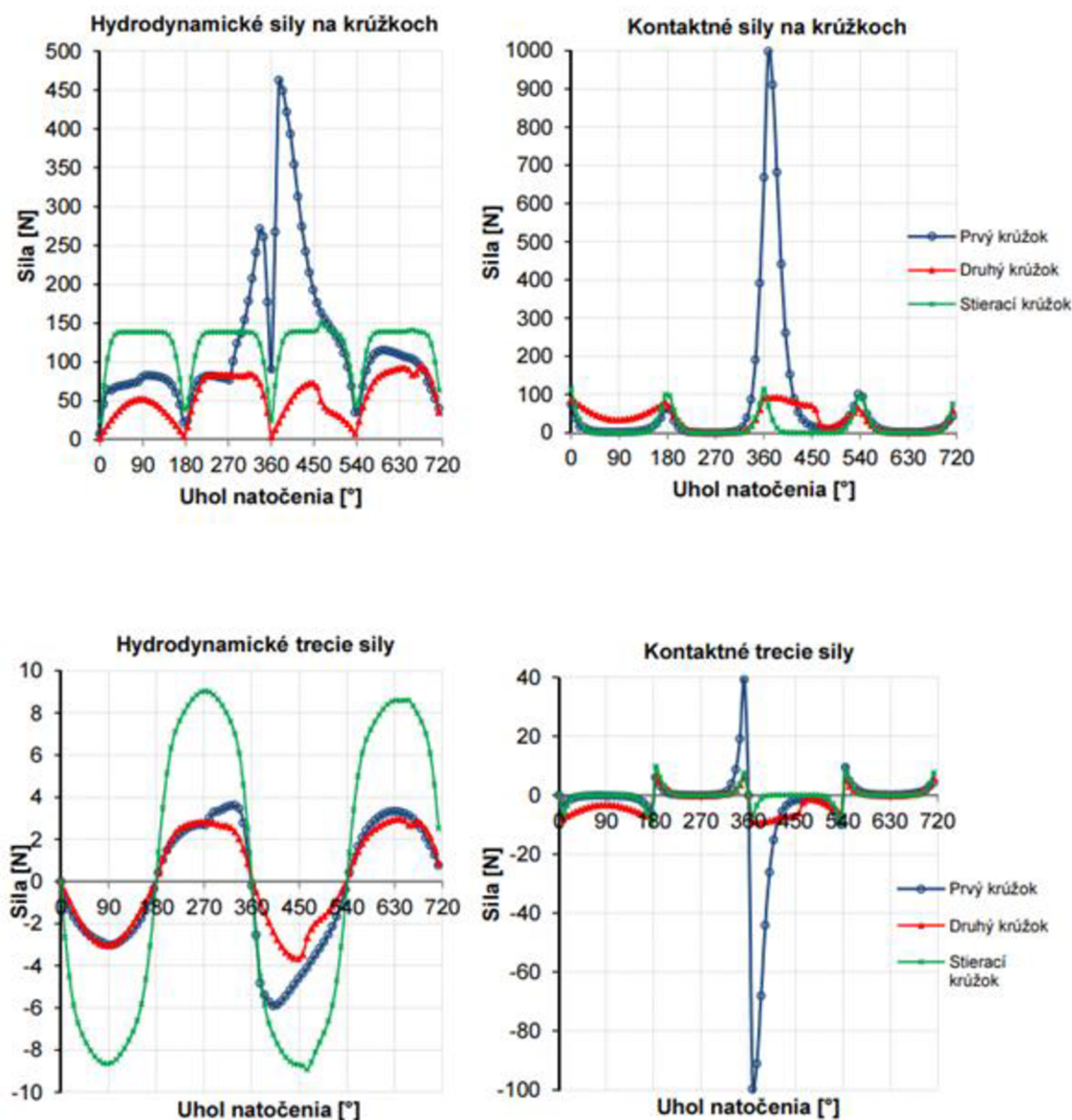
Obr.25 Medzné mazanie [20]

4 MOŽNOSTI ZNIŽOVANIA TRECÍCH STRÁT PIESTNYCH KRÚŽKOV

Možnosti znižovania trecích strát piestnych krúžkov môžeme rozdeliť z hľadiska tribologického uzla do troch skupín:

- Na strane povrchu piestneho krúžku
- Na strane povrchu valca
- Na strane mazacieho média

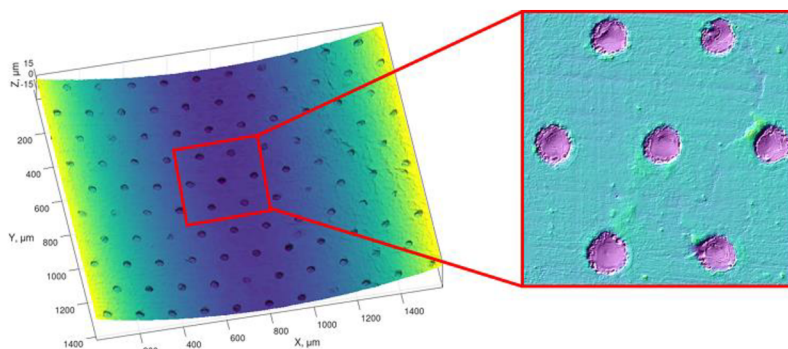
Ali a kol. [23] vo svojej práci poukazujú na zistenia že energia stratená v trení a opotrebení v kontakte piestnej skupiny a valca sa podieľa na celkových mechanických stratách hodnotou 40 až 50%.



Obr.26 Hydrodynamické a kontaktné trecie sily v priebehu pracovného obehu pri 5000 min⁻¹ [24]

Z priebehov grafov na obr.26 je možné určiť mazací režim ku každému piestnemu krúžku. Z priebehov vyplýva že prvý tesniaci piestny krúžok pracuje v režime zmiešaného a medzného mazania čo spôsobuje najväčšie kontaktné trecie sily ktoré sú priamo úmerné trecím stratám. Prvý tesniaci piestny krúžok má najväčšie trecie sily v oblasti hornej úvrati kde spaľovací tlak prtláča piestny krúžok k stene valca. Medzné mazanie nastáva vplyvom pokesu rýchlosti v hornej a dolnej úvrati pracovného obehu. [24]

4.1 LASEROVÉ TEXTUROVANIE POVRCHU



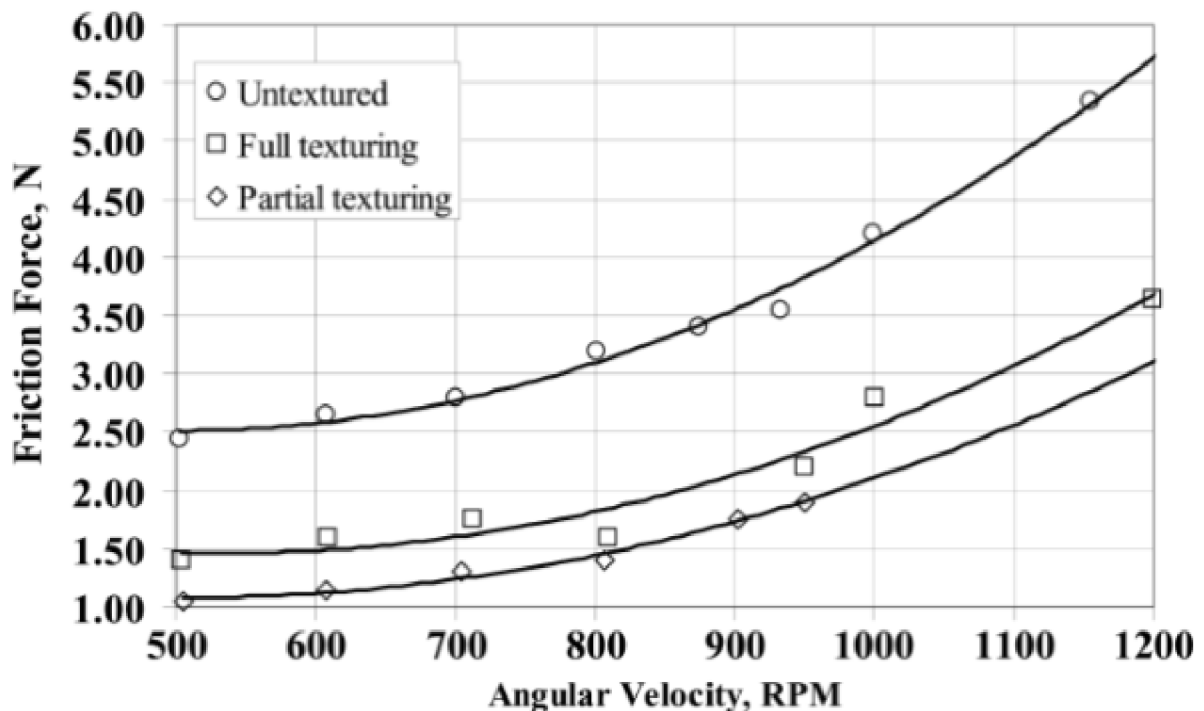
Obr.27 Laserové texturovanie povrchu [25]

Technológia LST (Laser Surface Texturing) alebo laserové texturovanie povrchu vytvára na kontaktnej ploche piestneho krúžku textúry. Laser je z hľadiska výroby veľmi rýchly a presný a preto skraca čas na výrobu. Zároveň je pomerne ekologický. Laserové lúče sú schopné opracovávať aj veľmi tvrdé materiály ako napríklad keramika, kalená oceľ. [25] LST na kontaktnej ploche vytvára sieť mikro jamiek. Mikro jamky ovplyvňujú viacero faktorov. Môžu slúžiť ako zásoba oleja v prípade keď nastane medzné alebo zmiešané mazanie. Ďalej plnia funkciu mikro hydrodynamického ložiska alebo môžu slúžiť na zachytenie mikroskopických častí vzniknutých pri opotrebení kontaktných plôch.

Pracovný postup laserového textúrovania povrchu je nasledovný. Laserový lúč natavuje povrch textúrovaného povrchu a roztavený materiál sa prichytáva na okrajoch vytvorenej jamky kde postupne tuhne. Hĺbka kráterov sa reguluje pomocou nastavenia energie laserového lúča. Nevýhodou tejto technológie je časovo náročné finálne jemné leštenie textúrovaného povrchu, vysoké náklady a možnosť odlupovania okrajov jamiek. Vysoké náklady na výrobu sa nestretajú s myšlienkou výrobcu automobilov udržať náklady na výrobu čo najmenšie a aj z tohto dôvodu sa technológia LST nepoužíva. [26]

Optimálne rozmery laserom vytvoreného povrchu sa musia vyhodnocovať. Medzi hlavné faktory hodnotenia patrí hĺbka vytvorenej jamky, pomer obsahu plôch textúrovaných a menovitých, hustota textúr. Je potvrdené, že vytvorený povrch technológiou LST má výrazný vplyv na hydrodynamické parametre kontaktných povrchov. Meranie v ktorom sa porovnávali piestne krúžky s konvenčným povrchom a piestne krúžky s texturovaným povrchom preukázalo zníženie trenia v tribologickom uzle piestneho krúžku so stenou valca

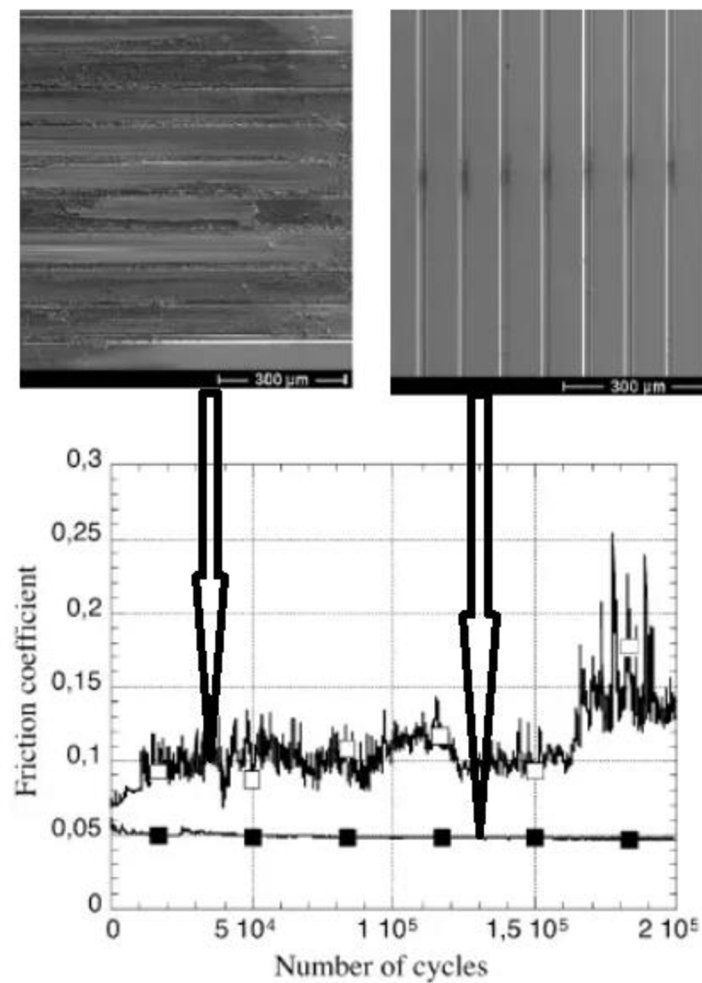
o 30%. V súčasnosti poznáme dve metódy LST a to metóda ktorá pokrýva celú kontaktnú plochu piestneho krúžku. Ďalším druhom LST je metóda kde je povrch textúrovaný len čiastočne. Drsnosť povrchu textúrovanej plochy sa pohybuje približne okolo $0,8 \mu\text{m}$. [26]



Obr.28 Priebeh trecej sily pri použití LST [26]

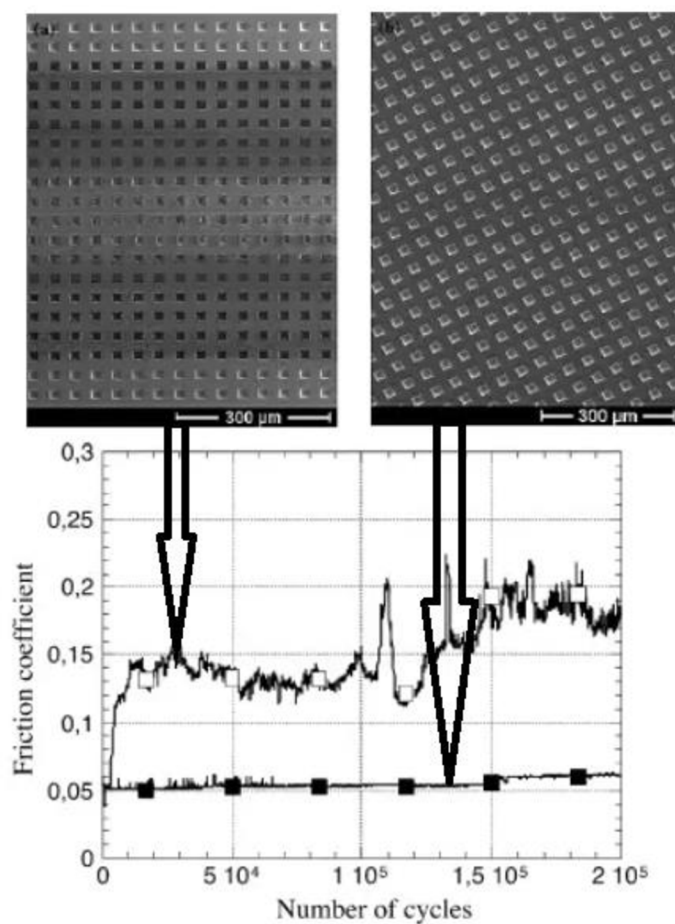
4.2 MIKRO TEXTUROVANIE POVRCHU S POVLAKOM DLC

Texturovanie povrchu pozostáva z povlaku typu DLC, ktorý obsahuje mikro jamky v pravidelnom usporiadaní a geometrií textúry. V prípade medzného mazania, merania podľa práce [27] svojimi výsledkami texturované povrchy preukázali oveľa lepšie trecie vlastnosti, odolnosť voči opotrebeniu v porovnaní s povrchom bez textúry. Práca sa zaoberá porovnaniami rôznych geometrií textúr povrchu. Úspešné textúry sa prejavili tie, ktoré mali najmenšie testované drážka alebo štvorce a orientáciu kolmú na smer posúvania. Neštrukturovaný povrch a povrchy s drážkami pozdĺž smeru posúvania neboli schopné poskytnúť dostatočnú vrstvu maziva v tribologickom uzle. V týchto prípadoch teda došlo ku kontaktu nerovností medzi vzorkou a povrchom čo viedlo k poškodeniu povrchov, prípadne k delaminácií povlaku DLC. [27]



Obr.29 Výsledky koeficientu trenia rozmer texturovaných drážok 20 μm [27]

Vplyv orientácie textúr povrchu má výrazný dopad na vznik hydrodynamického mazania tým pádom aj koeficient trenia vid'. obr.29. Pribeh koeficientu trenia ukazuje výrazný rozdiel v hodnotách pre drážky v smere pohybu a drážky kolmé na smer pohybu. Na obr.29 hore vľavo môžeme pozorovať výraznú delumináciu DLC povlaku spôsobenú nedostatočnou mazacou vrstvou v tribologickom kontakte.[27]

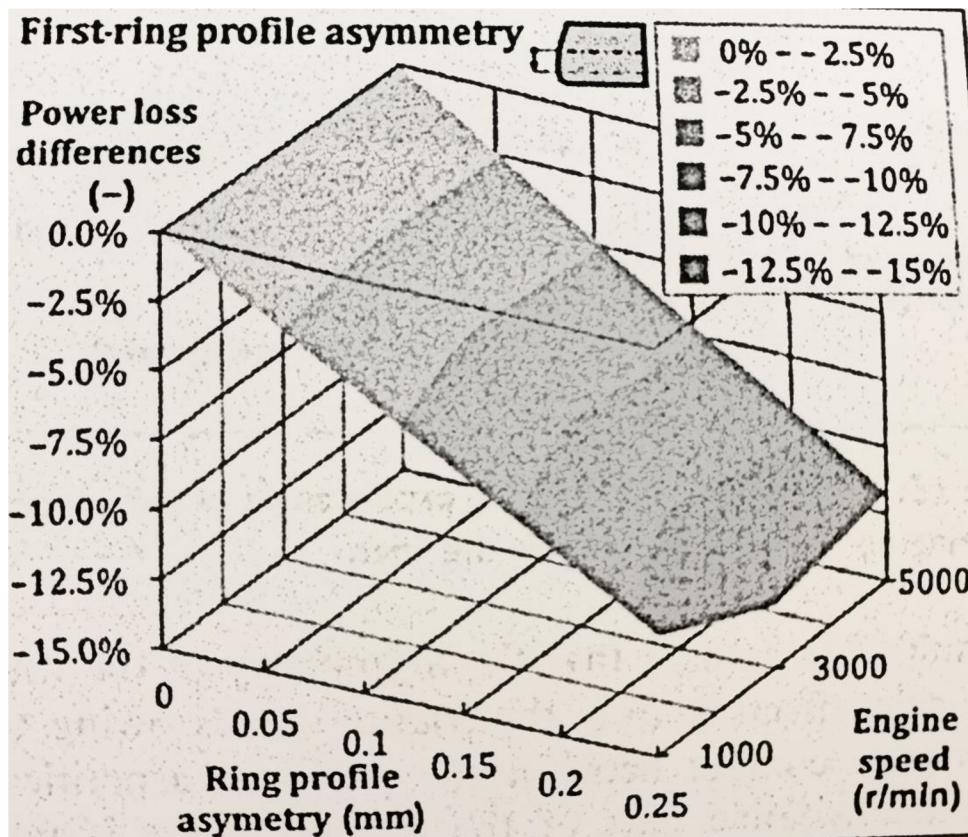


Obr.30 Výsledky koeficientu trenia - rozmer texturovaných štvorcov 20 μm [27]

Výsledky merania koeficientu trenia vid'. Obr.30 dokazujú výrazne lepšie podmienky pre vznik hydrodynamického mazania v prípade texturovaného povrchu, kde mikro štvorce (20 μm) sú natočené o 30° na smer pohybu.[27]

4.3 ZMENOU GEOMETRIE PIESTNEHO KRÚŽKU

Trecie straty prvého tesniaceho krúžku sú priamo úmerné vysokému spaľovaciemu tlaku blízko hornej úvrati piestu. Modifikáciou geometrie prierezu prvého tesniaceho piestneho krúžku zo symetrickej geometrie na asymetrickú. Vďaka tejto zmene geometrie je možno pozorovať pokles trecích až o 15% v porovnaní so symetrickým piestnym krúžkom. K poklesu trecích strát došlo kvôli zmenšeniu kontaktnej plochy medzi stenou valca a piestnym krúžkom. [24]

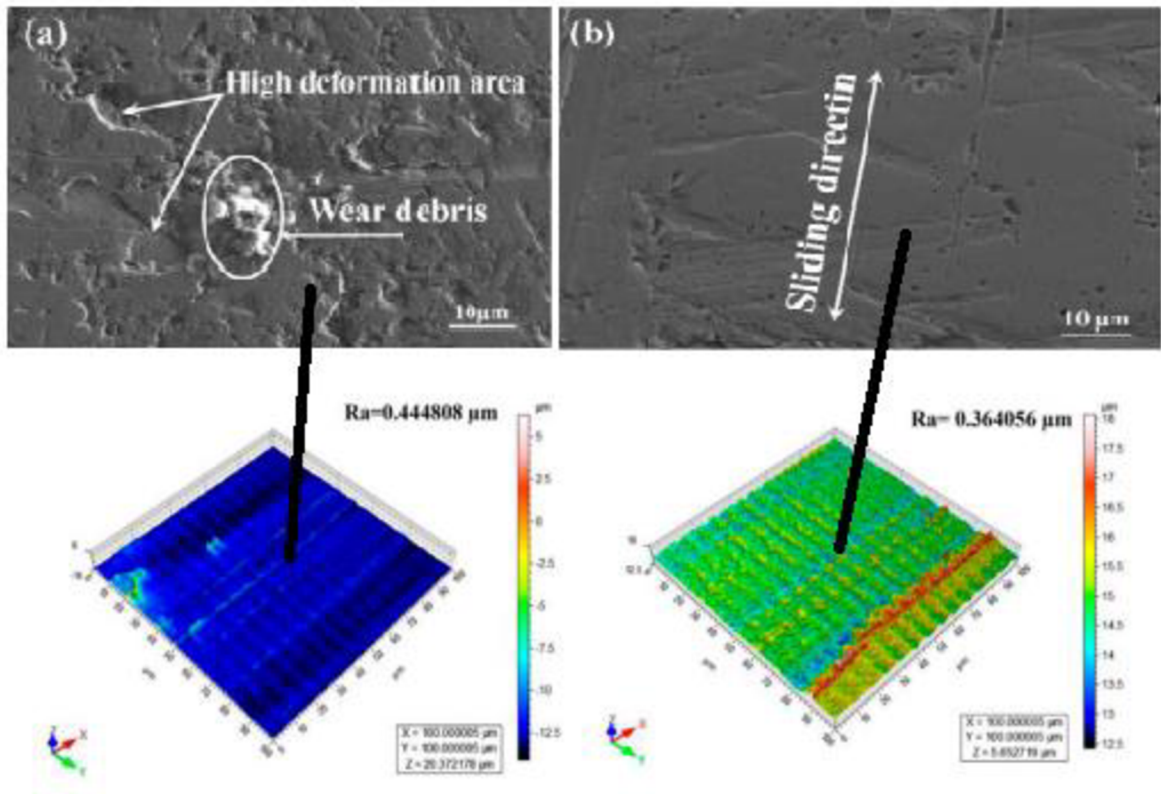


Obr.31 Pokles trecích strát vplyvom zmeny geometrie prvého tesniaceho krúžku [24]

4.4 NANO ADITÍVA V OLEJI

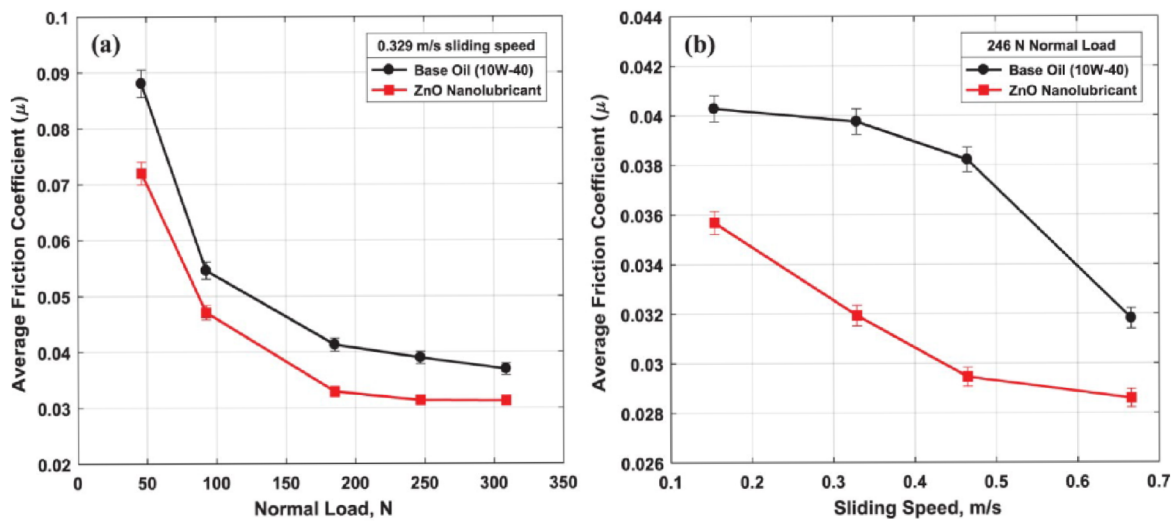
V práci Ahmeda Elagouz a kol. [28] sa zaoberali trecím kontaktom medzi tesniacim piestnym krúžkom a stenou valca. Práca sa zaoberá vplyvom nanočastíc **ZnO** pridaných do motorového oleja na zníženie trecích strát a zníženie opotrebenia povrchov. Porovnávané parametre boli za prítomnosti štandardného oleja 10w – 40 a oleja rovnakého oleja po pridaní nanočastíc ZnO. Merania ukázali, že v prípade oleja s nanočasticami sa znížil koeficient trenia o 20 – 23 % a v prípade opotrebenia povrchov nastalo zlepšenie vlastností o 43 – 88%. Pridaním nanočastíc do oleja spôsobilo zvýšenie viskózneho indexu o 12% v porovnaní s referenčným olejom.

Hlavným dôvodom zníženia opotrebenia je zlepšenie vzniku tribologického filmu pomocou nanočastíc. V kontakte medzi piestnym krúžkom a stenou valca vzniká efekt nano ložiska vďaka čomu je olejová vrstva schopná prenášať zaťaženie efektívnejšie a zabezpečiť oddelenie trecích plôch.[28]

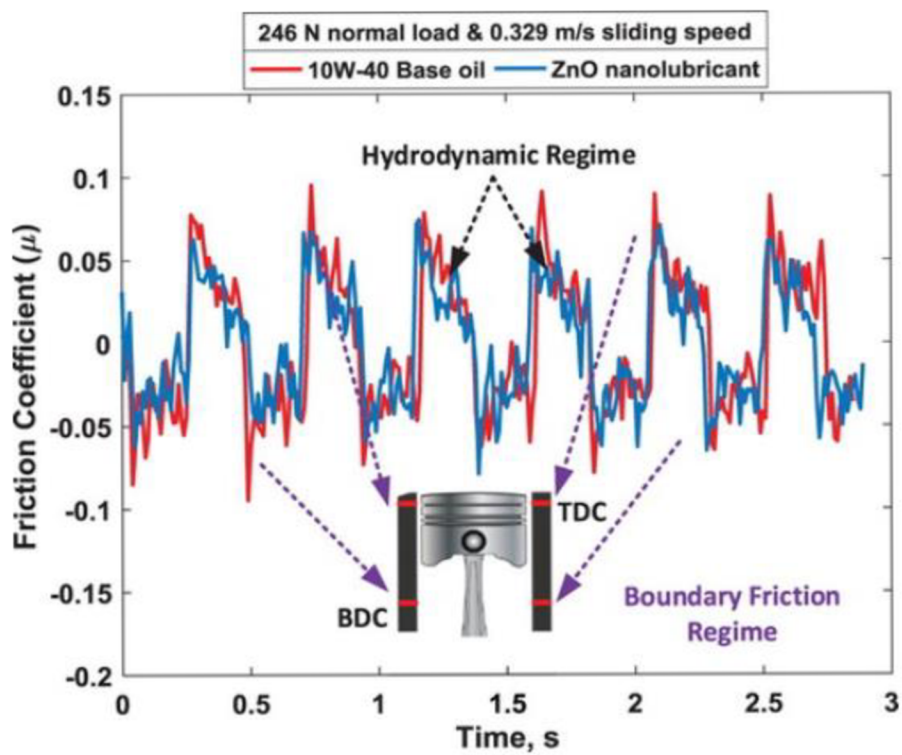


Obr.32 Povrch v prípade použitia a) referenčného oleja b) nanočastíc ZnO [28]

Z hodnôt drsností je zrejmé, že použitím nanočastíc dochádza k menšiemu opotrebeniu povrchov a zlepšeniu koeficientu trenia medzi piestnym krúžkom a stenou valca.



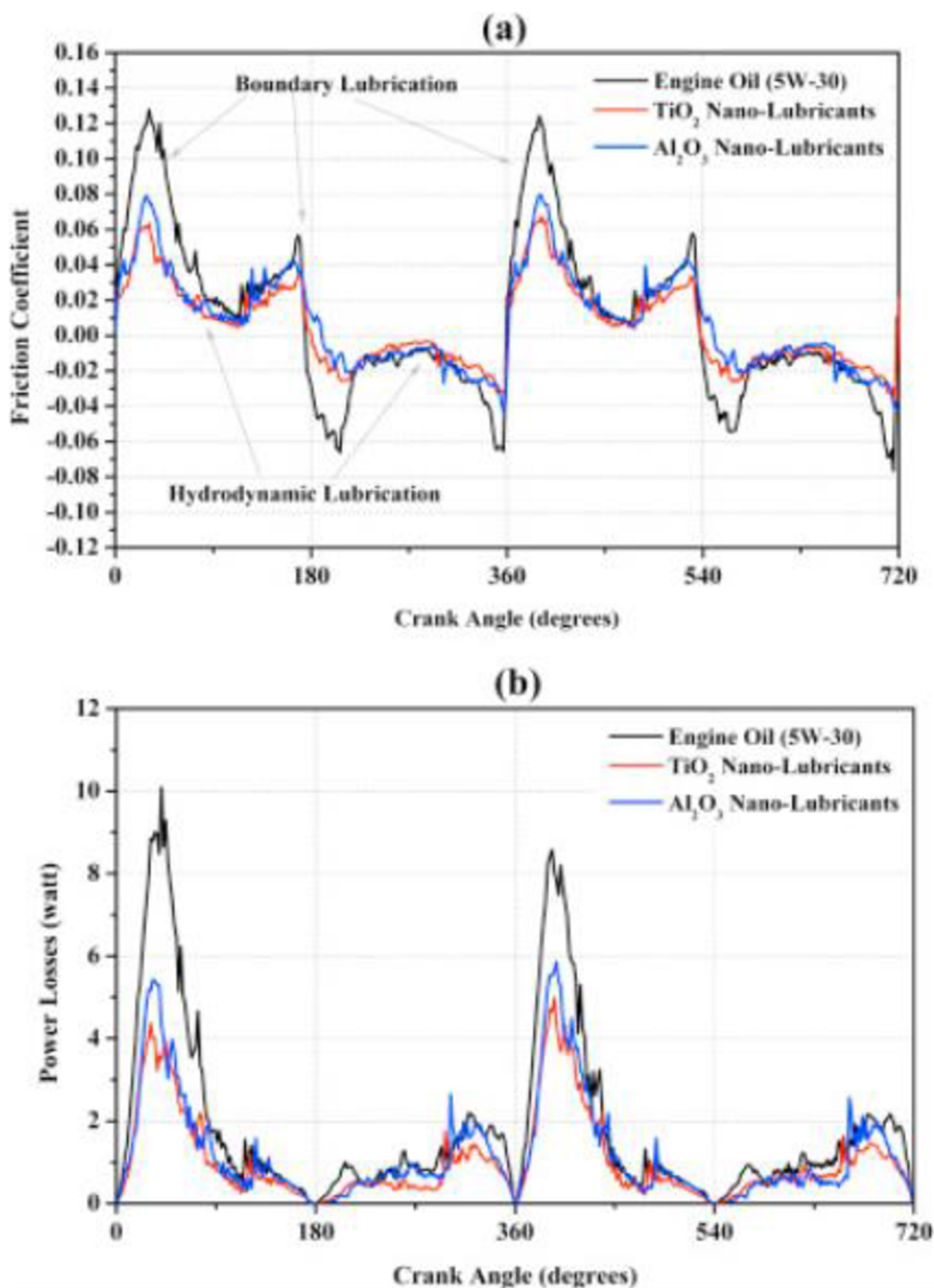
Obr.33 Priebehy: a) COF a normálového zaťaženia b) COF a klznej rýchlosti [28]



Obr.34 Koeficient trenia piestnych krúžkov v kontakte so stenou valca v závislosti na čase [28]

Nano aditiva na báze TiO_2 a Al_2O_3

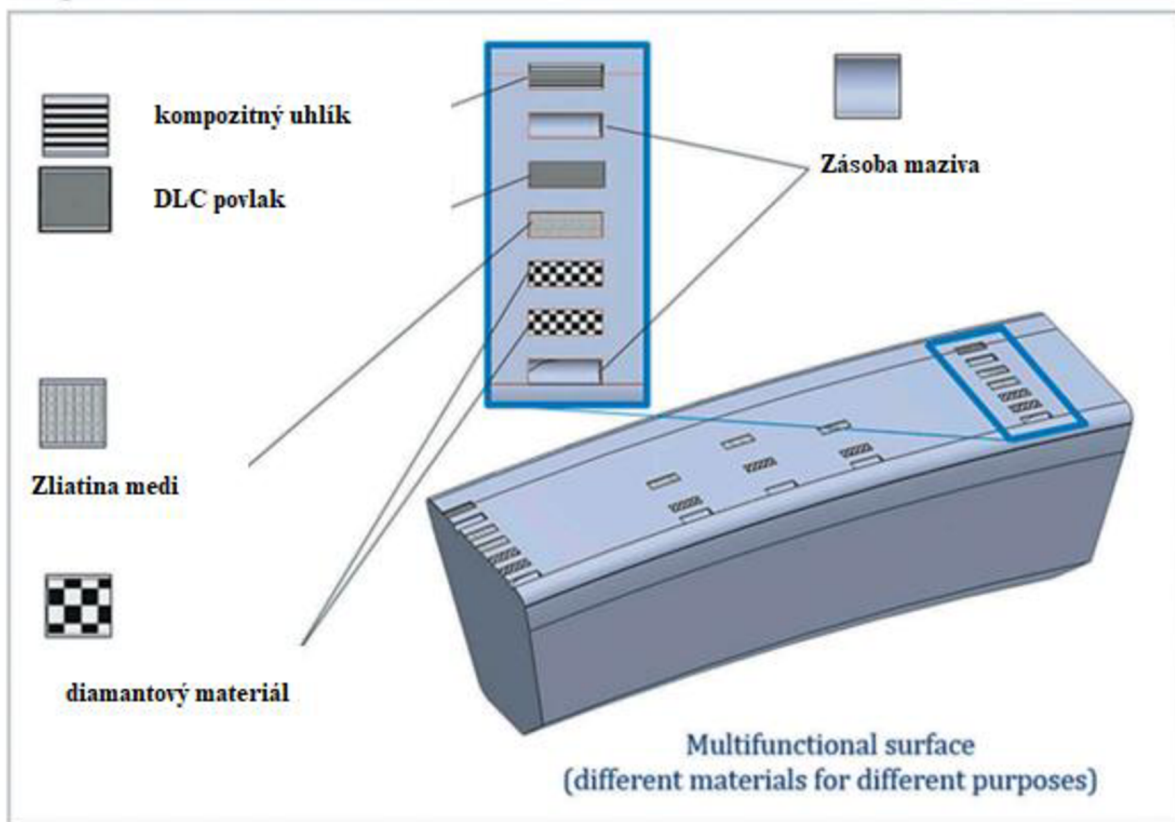
Práca [29] sa zaoberá pridaním nano častíc TiO_2 a Al_2O_3 do motorového oleja. Tieto nano častice majú veľkosť 8-12 nm. Namerané tribologické vlastnosti dakazujú výrazné zlepšenie tribologických vlastností a to zníženie koeficientu trenia, trecích strát, opotrebenia. Práca poukazuje na to, ako môžu nano aditiva priaznivo ovplyvniť spotrebu paliva v spaľovacích motoroch. Nano aditiva majú zásadný vplyv na zníženie drsnosti povrchu piestneho krúžku o 40-50%. V prípade povrchu valca nastalo zníženie drsnosti povrchu o 8-14%. Trecie straty boli zredukované až o 45-50% použitím týchto nano aditív.



Obr.35 a) Priebeh koeficientu trenia b) Priebeh trecích strát [29]

4.5 POUŽITÍM MULTIFUNKČNÝCH VRSTIEV

Najmodernejší trend v znižovaní tercích strát tesniacich piestnych krúžkov je použitie takzvaných multifukčných povrchov na kontaktnej ploche. Každá vrstva povrchu má svoju hlavnú funkciu. Napríklad vrstva na základe zliatiny medi ktorá slúži na odvod tepla do steny valca. Ďalšia vrstva vytvorená texturovaním povrchu k zabezpečeniu funkcie mikro hydrodynamického ložiska prípadne zachytenie nečistôt ktoré by v kontakte medzi piestnym krúžkom a stenou valca mohli spôsobiť poškodenie povrchu. Vrstva povlaku DLC ktorá zabezpečuje nízky koeficient trenia v kombinácii s ďalšou vrstvou kompozitného uhlíku.[2]



Obr.36 Piestny krúžok s multifunkčnými vrstvami [2]

5 VLASTNÁ PRÁCA

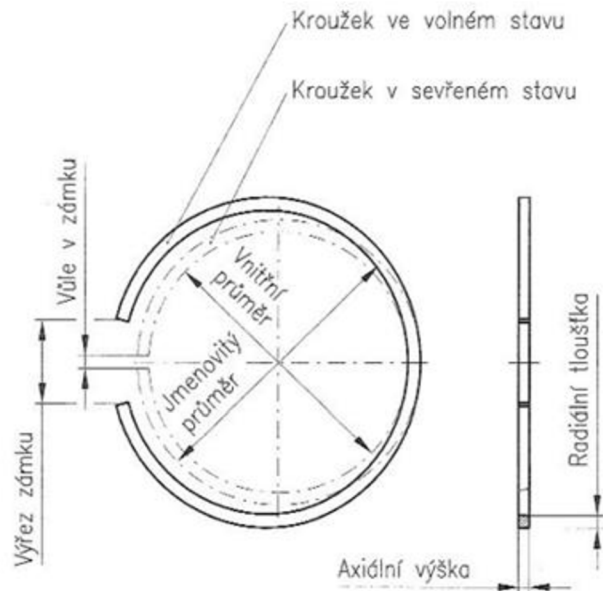
5.1 CIEĽ PRÁCE

Cieľom práce je navrhnúť dostupné riešenie úprav tesniacich piestnych krúžkov zážihového motora 1.5 TSI, 110 kW. V tomto prípade sa práca zaoberá povrchovými úpravami prvého tesniaceho piestneho krúžku. Povrchové úpravy prevedené technológiami povlakovania PVD a PECDV. Výsledkom je porovnanie trecích vlastností prvého tesniaceho piestneho krúžku so sériovým povlakom používaným v súčasnosti s ďalšími navrhnutými povlakmi.

5.2 VÝROBA TESNIACICH PIESTNYCH KRÚŽKOV

Výrobu piestnych krúžkov pre povlakovanie a finálne úpravy zabezpečila spoločnosť KOMA PISTON RINGS.

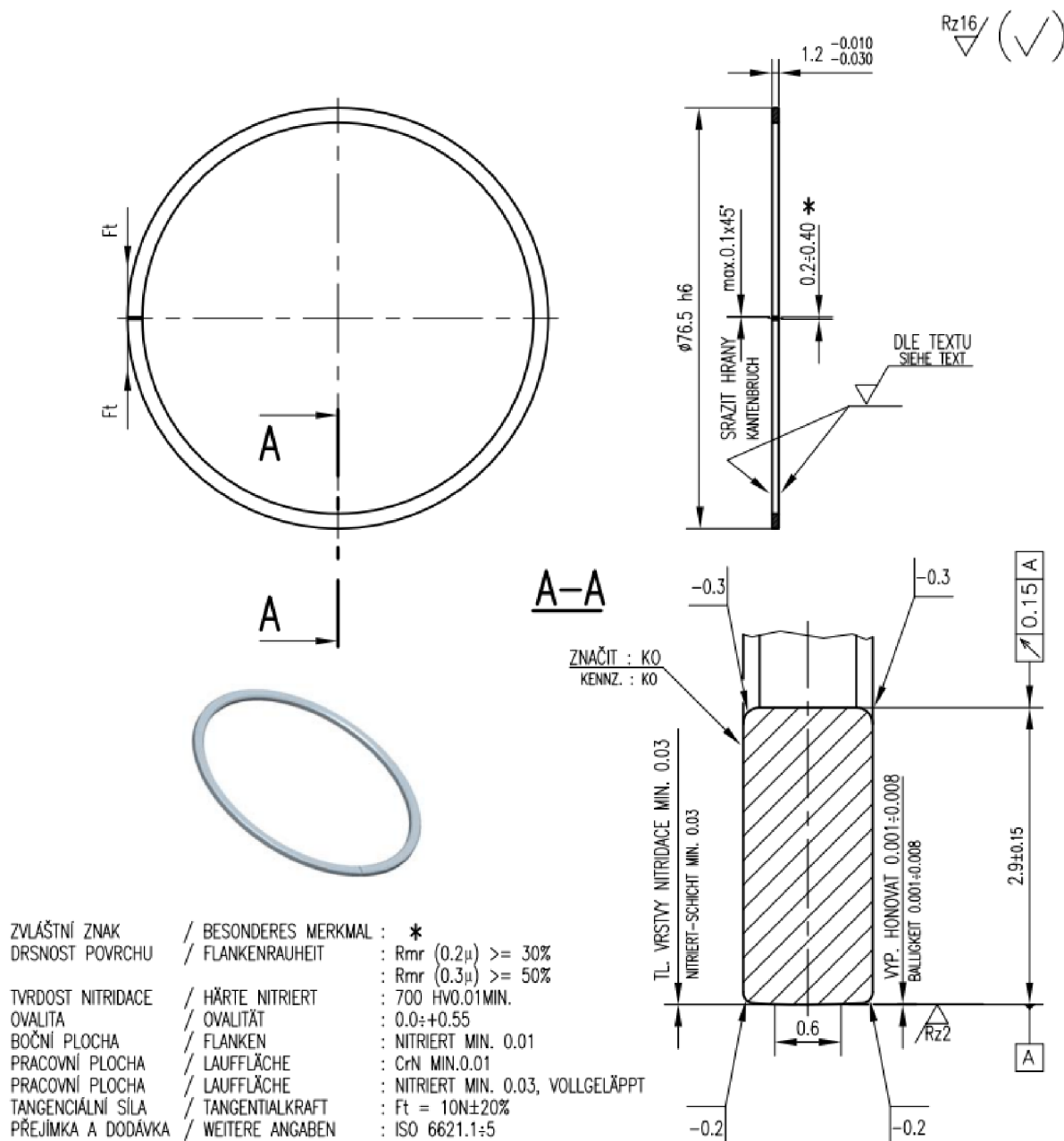
5.2.1 GEOMETRIA PIESTNYCH KRÚŽKOV



Obr.37 Kontrolované rozměry piestneho krúžku

Pri výrobe piestnych krúžkov je dôležité dodržať presné geometrické parametre preto je nutné ešte pred výrobou polotovarov určiť všetky tepelno-chemické spracovania a metódy povlakovania. Pretože vzniknuté povlaky vytvárajú na povrchu polotovaru tenké vrstvy ktoré ovplyvňujú geometriu piestneho krúžku.

Výrobný výkres piestneho krúžku



Obr. 38 Výrobný výkres piestneho krúžku [30]

Tab. 1 Rozmery piestneho krúžku

Vnútorý priemer [mm]	Menovitý priemer [mm]	Axiálna výška [mm]	Radiálna výška [mm]	Vôľ'a zámku [mm]	Zrazenie hrán
70.7	76.5	1.2	2.9	0.2	$0.1 \times 45^\circ$

5.2.2 VOĽBA MATERIÁLU PIESTNYCH KRÚŽKOV

Na výrobu piestnych krúžkov bol zvolený materiál vhodný na ďalšie chemicko-tepelné spracovanie a následne povlakovanie. Všetky testované piestne krúžky určené k následnému povlakovaniu sú z rovnakého základného materiálu. Zvolený materiál, ktorý bol použitý pri výrobe piestnych krúžkov je chrómová nehrdzavejúca ocel BS-13 určená k nitridovaniu povrchu. Nitridácia slúži ako nosná vrstva pre následný povlak.

Tab.2 Materiálové vlastnosti materiálu BS-13

Chemický prvok	[%]	Chemický prvok	[%]
C	0.5 – 0.75	Mn	Max. 1.0
Cr	11 - 15	V	Max. 0.1
Si	Max. 1.0	P	Max. 0.030
Mo	Max. 0.6	S	Max. 0.030

Tab. 3 Mechanické vlastnosti materiálu BS-13

Tvrdosť	360 – 500 HV
Modul pružnosti	210 000 N/mm ²
Hustota	7.7 g/cm ³



Obr.39 Štruktúra materiálu BS-13, leptané Nital, zväčšenie 500x

5.3 PROCES VÝROBY POLOTOVAROV PIESTNYCH KRÚŽKOV

Proces výroby polotovarov na povlakovanie uskutočnila spoločnosť PISTON RINGS KOMAROV s.r.o..

- Natočenie drôtu obdĺžnikového prierezu
- Oddelenie krúžku od zvitku, vzniká samostatný krúžok so zámkom
- Termofixácia v žihacej peci na trňoch
- Obrábanie na požadovaný rozmer
- Otryskanie
- Nitridácia povrchu
- Pranie omývacími kameňmi
- Čistenie povrchu v ultrazvukovej práčke, sušenie
- Povlakovanie
- Záverečná povrchová úprava, jemné leštenie
- Finálna kontrola geometrie piestneho krúžku

Natočenie drôtu

Natočením drôtu vzniká požadovaný priemer piestneho krúžku.



Obr.40 Natočenie drôtu piestneho krúžku

Obrábanie polotovaru piestneho krúžku

Vzniknutý polotovár je následne obrábaný na požadovaný rozmer, vystrihnutím zámku a následným brúsením pracovných plôch. Po tejto operácii nasleduje termofixácia v žihacej peci, piestne krúžky sú nasunuté na trne. Táto operácia zabezpečí odstránenie pnutia v materiáli a jeho geometrickú stálosť. V tomto momente je výroba polotovaru piestneho krúžku z hľadiska obrábania ukončená. Nasledujú chemicko-tepelné operácie a povlakovanie.



Obr.41 Obrábanie piestnych krúžkov na požadovaný rozmer

5.4 PRÍPRAVNÉ OPERÁCIE PRED POVLAKOVANÍM

Príprava povrchu pred nitridovaním

Prípravná operácia pred chemicko – tepelným spracovaním sa prevádza otryskaním povrchu piestnych krúžkov z dôvodu odstránenia oxidačnej vrstvy, ktorá vzniká za prítomnosti kyslíka na vzduchu. Otryskanie povrchu zabezpečí aj zdrsnenie povrchu tryskaného piestneho krúžku. Toto zdrsnenie povrchu je vyžadované kvôli lepším adhéznym vlastnostiam pri nanosení nitridačnej vrstvy.

Počas samotnej nitridácií v nitridačnom zariadení, vo vákuu prebieha ešte chemické čistenie povrchu za prítomnosti tetrachlóretylénu. Táto chemická reakcia rozpustí možné pozostatky oxidov a nečistôt. Zároveň naleptá povrch komponentu, aby sa mohol povrch čo možno najviac nasýtiť dusíkom.

Nitridovanie povrchu

Nitridovanie povrchu je prvá tepelná úprava povrchu tesniaceho piestneho krúžku, patrí k termochemickým metódam. V prípade povlakovaných piestnych krúžkov technológiou PVD prípadne PECVD, kde finálne povlaky dosahujú hrúbku len jednotky prípadne desiatky mikrometrov, nitridačná vrstva plní funkciu pevného podkladu. Povlak bez podkladu nitridačnej vrstvy by nebol schopný plniť svoju funkciu. Keďže, finálny povlak je veľmi tvrdý a podkladový materiál v porovnaní s finálnym povlakom by bol násobne mäkkší, dochádzalo by v povlaku k pnutiu, vplyvom ktorého by popraskal.

Taktiež nitridačná vrstva zabezpečuje záložnú funkciu, v prípade ak by došlo k zlyhaniu vlastností finálnej vrstvy povlaku, ktorá je v trecom kontakte. Nitridačná vrstva vďaka svojej väčšej drsnosti ďalej zabezpečuje lepšie adhézne podmienky pre finálny povlak, tým zabezpečí komplexne lepšiu odolnosť povlaku. Môžu nastať podmienky vysokého tepelného zaťaženia, kedy sa povlak začne odlupovať a nie je schopný plniť svoju funkciu. Na nitridovanom povrchu vzniká nežiadúca vrstva, ktorú je nevyhnutné pred ďalším povlakovaním odstrániť.



Obr.42 Nitridačná pec

Odstránenie epsylón vrstvy

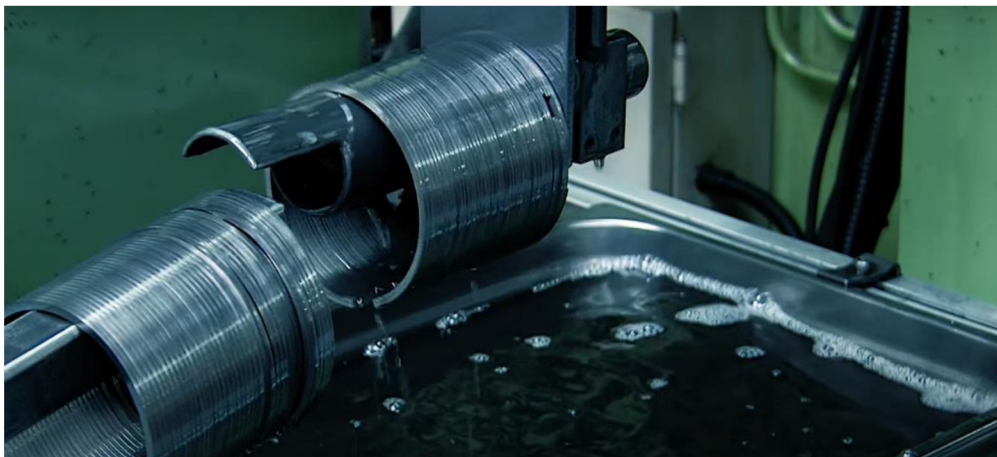
Epsylón vrstva je nežiadúca vrstva ktorá vzniká pri procese nitrídovania povrchu. Je to veľmi tenká vrstva v ktorej sa nachádza dusík vo veľkej koncentrácii. Z dôvodu vysokého obohatenia dusíkom je epsylón vrstva veľmi tvrdá a krehká. Čo spôsobuje nedostatočnú príľnavosť finálneho povlaku a jeho následné popraskanie a odlupovanie z nitrídovaného povrchu. Pred následným povlakovaním PVD alebo PECVD je nutné túto vrstvu odstrániť. Odstránenie je zabezpečené pomocou prania piestnych krúžkov v rotujúcom bubne a omývacími kameňmi po dobu 30 minút.



Obr.43 Pranie piestnych krúžkov s omývacími kameňmi

Príprava povrchu pred povlakovaním PVD, PECVD

Prípravné operácie pred povlakovaním sú pre technológie povlakovania PVD, PECVD zhodné. Pozostávajú z prania komponentov v ultrazvukovej čističke a ich následné osušenie. Tieto čistiace operácie sa uskutočňujú mimo povlakovacieho zariadenia. Tieto operácie som previedol v priestoroch spoločnosti STATON s.r.o..



Obr.44 Čistenie piestnych krúžkov v ultrazvukovej práčke

5.5 VOLBA POVLAKOV NA ZNÍŽENIE TRECÍCH STRÁT PIESTNYCH KRÚŽKOV

Keďže v prípade kontaktu tesniacich piestnych krúžkov so stenou valca dochádza k medznému mazaniu čo znamená, že mikroskopické nerovnosti tesniaceho piestneho krúžku sú v neustálom kontakte s nerovnosťami steny valca sú tesniace piestne krúžky v najväčšej miere namáhané oterom a vysokou teplotou. Preto povlaky musia spĺňať nasledujúce vlastnosti:

- Nízky koeficient trenia
- Dostatočnú tvrdosť
- Odolnosť voči vysokým teplotám
- Chemická odolnosť

Navrhol som použiť dva typy povlakov povlaky na báze nitridov **CrN**, **CrCN48** a na báze uhlíka povlak **DLC**.

Hlavnou prednosťou povlakov na báze nitridov je ich vysoká teplotná odolnosť ktorá je v prípade tesniacich piestnych krúžkov nevyhnutná. Tento typ povlakov je schopný zabezpečiť svoje vlastnosti až do 800 °C. Referenčný povlak s ktorým dané povlaky porovnávam je CrCN47, používaný v sériovej výrobe je CrCN47.

Povlak na báze uhlíka je povlak typu DLC (diamond like carbon). Ich najväčšou výhodou je tvrdosť vytvorenej vrstvy a nízky koeficient trenia ktorý v prípade tesniacich piestnych krúžkov najväčšou mierou ovplyvňuje trecie straty spôsobené piestnou skupinou. Avšak svoje vlastnosti je tento povlak schopný zabezpečovať do teploty 350 °C.

DLC povlaky sú známe svojimi výbornými tribologickými vlastnosťami, hlavne vysokou odolnosťou proti opotrebeniu a nízkym koeficientom trenia v prípade nedostatočného mazania.[33] Prvé DLC povlaky v automobilovom primysle sa začali používať na začiatku milénia, avšak niektoré neboli vhodné pri použití molybdénu, ako aditíva v motorovom oleji, ktorý zabezpečuje zlepšenie trecích vlastností [31]. V súčasnosti sa DLC povlak (deponovaný bez použitia vodíka) používa na povlakovanie častí ventilového rozvodu motora, ložísk, časti vstrekovacieho systému, časti piestnej skupiny. [32] Deponovanie povlaku bez použitia vodíka vytvára vrstvu na báze tetrahedral amorfného uhlíka. Tvoria ho veľké frakcie uhlíka viazaného diamantom, ktoré predstavujú vynikajúce tribologické vlastnosti, vysokú tvrdosť, nízky koeficient trenia, vysokú chemickú a tepelnú odolnosť. Tieto povlaky sú vhodné pre použitie do podmienok kde pracujú piestne krúžky.[34]

5.6 POVLAKOVANIE PVD (PHYSICAL VAPOR DEPOSITION)

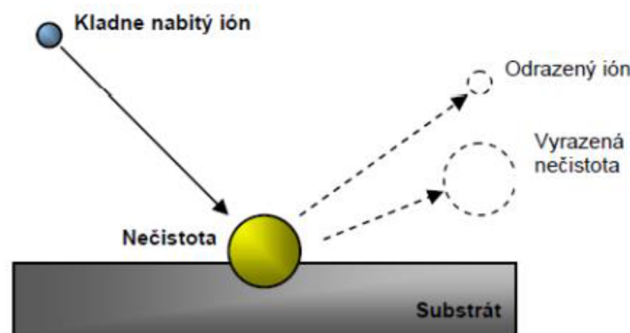
Proces povlakovania bol zabezpečený spoločnosťou STATON s.r.o..

Pri povlakovaní piestnych krúžkov bola použitá technológia katódového magnetronového naprašovania. Všetky povlaky PVD sú vytvárané vo vákuu. Pri vytváraní povlakov sme použili technológiu magnetronového naprašovania vo vákuu.

5.7 PROCES POVLAKOVANIA

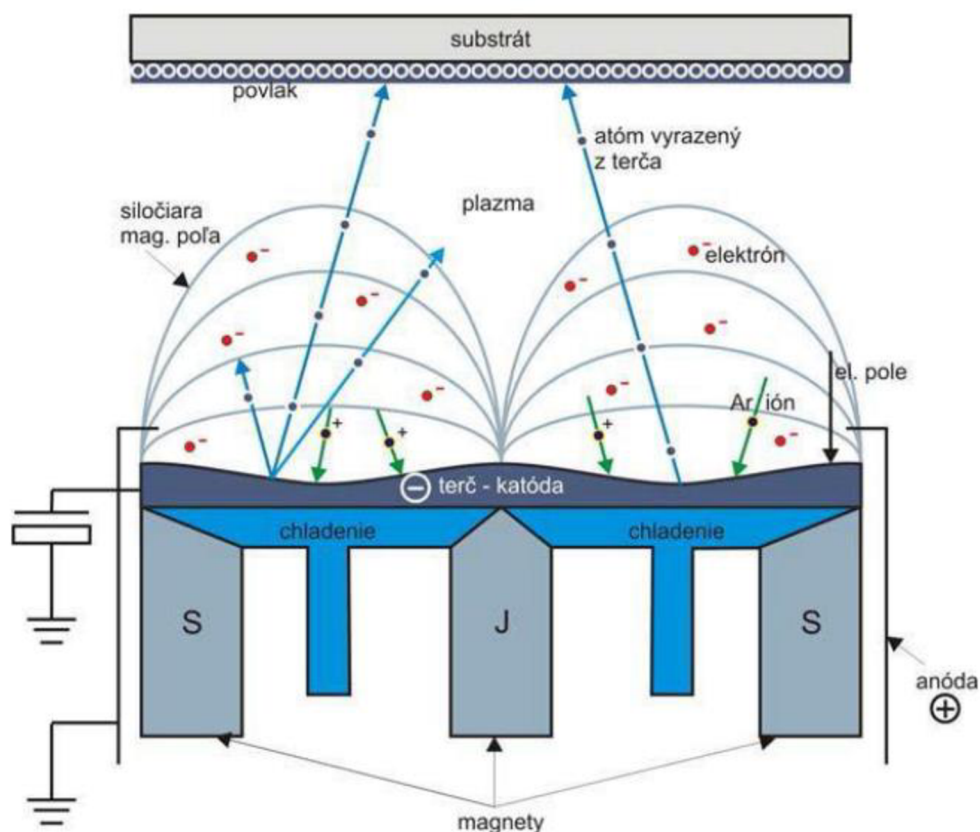
Iónové čistenie

Pred samotným nanášaním povlaku je v komore povlakovacieho zariadenia vykonaná čistiaca operácia za pomoci iónov. Aj napriek dôkladnému čisteniu pred povlakovaním v ultrazvukovej pračke sa vplyvom manipulácie a vystaveniu komponentov vzduchu usadzujú na povrch nečistoty. Kladne nabité ióny bombardujú povrchy, ktorý bude následne povlakovaný, čím vyrazia nečistoty z povrchu.[35] Bombardovanie povrchu zahrieva povrch komponentu a vzniká zvýšenie drsnosti povrchu na atómarnej úrovni vplyvom vytrhávania atómov z povrchu. Tento efekt zabezpečuje lepšiu priľnavosť povlaku. Bombardujúce ióny pri kontakte s povrchom odovzdajú svoju kinetickú energiu, ktorú nadobudli vďaka vysokému prepätiu na povrchu (až 2400V). Zahrievanie bombardovaného povrchu ovplyvňuje premena kinetickej energie na teplo.[36]



Obr.45 Iónové čistenie

Reaktívny plyn je potrebný na vznik požadovaných zlúčenín ktoré tvoria výsledný povlak na povrchu komponentu. Používa sa dusík na vytvorenie výsledného povlaku na báze nitridov. V prípade použitia kyslíku ako reaktívneho plynu sú výsledným produktom tejto reakcie oxidy. S reaktívnym plynom zreagujú častice z terča. Terč sa vyskytuje v pevnom skupenstve jeho materiál vytvára povlak na povrchu komponentu. Aby prebehla reakcia s reaktívnym plynom je potrebné materiál terču uviesť do plynného skupenstva pomocou rozprášenía. Medzi terčom ktorý má záporný potenciál nazývaný katóda a anódou s kladným potenciálom vzniká elektrické pole. Inertný plyn argón len zabezpečuje odparovanie terča, z ďalšími látkami nereaguje. Elektrické pole vytvorené v komore medzi terčom (katódou) a anódou vytvára plazmový výboj. Plazmový výboj obsahuje ióny ktoré sú vplyvom elektrického poľa urýchľované k terču kde nárazom do povrchu terča vyrazia atómy zo štruktúry materiálu. Nárazom udelia časticiam terča kinetickú energiu a následne sa častice postupne ukladajú na povrch substrátu kde tvoria povlak. Pre vzniknutie niektorých zlúčenín je do komory aplikovaný reaktívny plyn v ktorom častice zreagujú a vytvoria požadovanú zlúčeninu. Potrebná energia na vyrazenie atómu zo štruktúry povlakovaného materiálu sa pohybuje v rozmedzí od 5 do eV. [37]



Obr.46 Magnetronové naprašovanie [38]

Tieňový efekt

V prípade PVD metódy povlakovania sa vyskytuje nežiadúci tieňový efekt. Zapríčiňuje nerovnomernú hrúbku povlaku pri komponentoch, ktoré svojou polohou nie sú kolmo orientované do prúdu častíc. Vo výnimočných prípadoch sa môže vyskytnúť miesto, na ktorom hrúbka povlaku nebude rásť vôbec. Riešením je neustále otáčanie povlakovaných komponentov, výsledkom je rovnomerné nanášanie povlaku po celej ploche. Hlavnou nevýhodou je že spôsobuje pórovitosť povrchu a nepostačujúce adhézne vlastnosti. [39]

Zvyškové napätie v PVD povlakoch

PVD povlaky sú charakteristické zvyškovým napätím tlakového charakteru. S nárastom zvyškových tlakových napätí narastá aj tvrdosť povlaku. [38] Výhodou je, že zvyškové napätie spomaľuje šírenie trhlin v povlakovanej vrstve, zároveň však príliš vysoké napätie spôsobuje zhoršenie adhézných vlastností povlaku. Celkové napätie povlakovanej vrstvy pozostáva z :[39]

- Vonkajšie napätie - vplyvom externého zaťaženia
- Zvyškové vnútorné napätie – vplyvom povlaku
- Termálne indukované napätie – vplyvom tepelného zaťaženia

Vytvárané povlaky CrN, CrCN48

Tieto povlaky sme vytvorili metódou PVD. Pri vytváraní nosného povlaku je nutná adhézna vrstva v tomto prípade bola vytvorená adhézna vrstva na báze chrómu. Chrómová adhézna vrstva je vytváraná po iónovom čistení, kde sa z terčov naprašuje chróm na povrch piestnych krúžkov za prítomnosti dusíka. Tento proces ďalej pokračuje za prítomnosti vyššej koncentrácie dusíka a vzniká povlak CrN – Chróm nitrid. Povlaky majú výslednú strieborno-sivú farbu

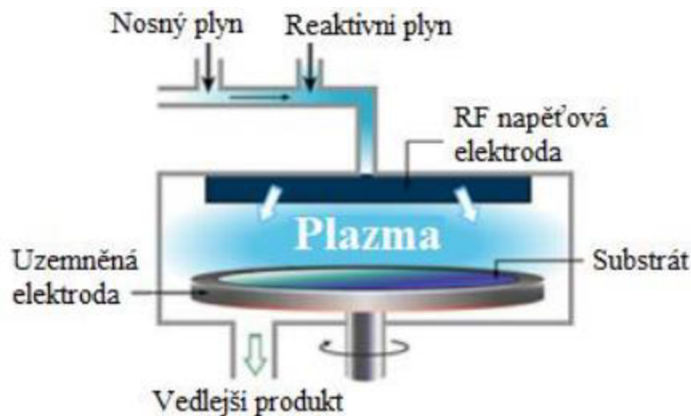
CrCN48 obsahuje rovnakú adhéznú vrstvu ako povlak CrN. Kde po nanosení adhéznej vrstvy je povrch následne povlakovaný uhlíkom, odparovanie uhlíku z terča zabezpečuje argón. Túto reakciu brzdí zmes plynov acetylénu a dusíku. Kde sa množstvo koncentrácie uhlíku v povlaku riadi pomerom inertného plynu acetylénu a dusíku. V prípade CrCN48 je tento pomer 0.2. Vyššia koncentrácia uhlíka zabezpečuje vyššiu tvrdosť povlaku a zároveň väčšiu krehkosť. Povlaky majú výslednú strieborno-sivú farbu, povlak CrCN48 kvôli obsahu uhlíka je jeho sfarbenie tmavšie ako pri povlaku CrN.

Vytváraný povlak DLC

Povlaky typu Diamond Like Carbon patria v súčasnosti k najtvrdším povlakom. Je nevyhnutné použiť adhéznú podkladovú vrstvu. Použitá je rovnaká podkladová vrstva ako v prípade povlakov na báze nitridov. Použitý reakčný plyn je dusík ktorý je zodpovedný za chemickú reakciu. Vzniknutá zlúčenina je nanosená na povrch piestnych krúžkov. Tento povlak je vytvorený technológiou PECVD vysvetlenú nižšie.

Povlakovanie PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)

Pri povlakovaní metódou PECVD sa vytvárajú tenké povlaky. Teplota povlakovania je nižšia ako u metódy CVD. Nanosenie povlaku je dosiahnuté pomocou prítomnosti reakčných plynov medzi paralelnými elektródami – RF napäťová elektróda a uzemnená elektróda. Reakcia medzi elektródami rozrušuje reaktívny plyn do plazmového výboja. Táto reakcia zabezpečí chemickú reakciu a povlak je nanosený na povlakovaný komponent. Povlakovaný komponent je pripojený k uzemnenej elektróde, ktorá má teplotu 250 až 350 °C v závislosti na vlastnostiach povlaku.[29] Metóda CVD vyžaduje nižšie teploty procesu povlakovania. V prípade metódy CVD môže vysoká teplota spôsobiť poškodenie povlakovaného materiálu.

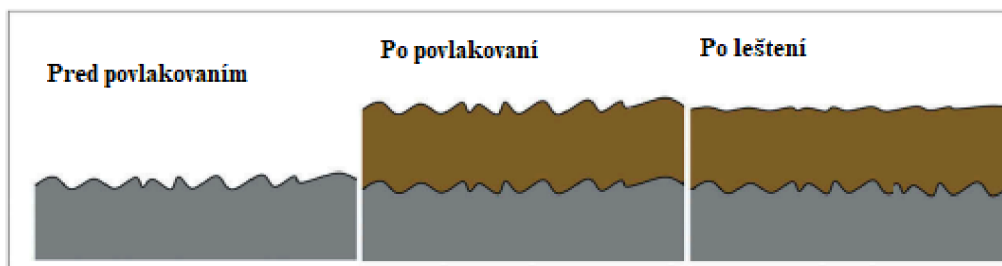


Obr.47 Schéma povlakovania metódou PECVD [40]

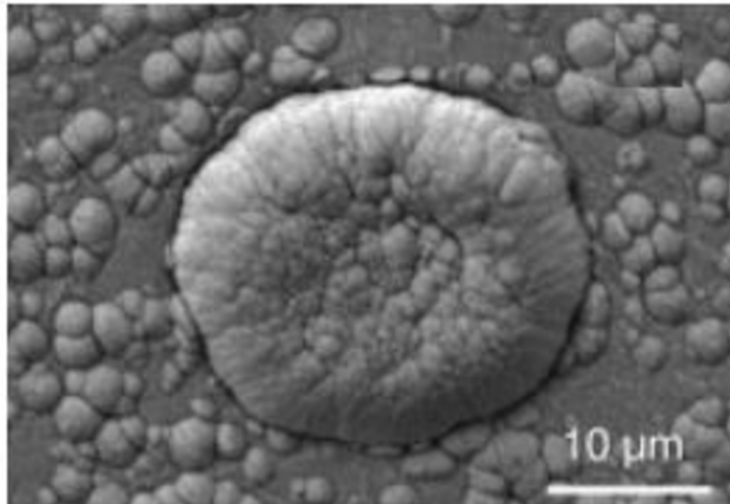
Finálna úprava po povlakovaní

Počas procesu povlakovania vznikajú na povrchu piestnych krúžkov mikroskopické častice v podobe kvapôčiek. Nežiaduce častice v povrchu povlaku vznikajú vplyvom nečistôt. Je potrebné si uvedomiť že povlakovanie v dokonale čistom prostredí je prakticky nemožné. Kontaminácia nečistotami v komore je ovplyvnená širokým spektrom faktorov. Avšak je extrémne dôležité tieto nepriaznivé faktory eliminovať v čo najväčšej možnej miere. Najdôležitejším a zároveň najjednoduchším odstrániteľným faktorom je dôkladné očistenie zvyškov z povlakovacej komory po predchádzajúcom povlakovaní.[29] Nečistoty môžu obsahovať aj povlakovacie materiály v podobe rôznych prímiesí. Prevencia proti vzniku kvapôčok je možná použitím nižšieho výkonu pri vzniku výboja. Požitím nižšieho výkonu znížime riziko iskrenia na povrchu povlakovaného komponentu a tým pádom aj jeho prehrievaniu. Ďalším možným opatrením je použitie štítu v podobe mriežky. Mriežka je umiestnená pred povlakovaný komponent na ktorú sa zachytávajú nežiaduce častice niekedy sa tento mechanizmus nazýva aj ako filtrovanie.[41]

Odstránenie nežiaducich kvapôčok je zabezpečené jemným leštením povlakovaného povrchu piestnych krúžkov. Krúžky sú nasadené na prípravok v tvare valcovej tyče, následne je tyč s krúžkami upnutá do linky v ktorej leštiaci kotúč doleští tieto povrchové nedostatky. Leštiaci kotúč pozostáva z gumeného základového materiálu ktorý obsahuje abrazívne častice na báze korundu. V prípade nedoleštenia týchto defektov z povrchu kontaktných plôch, by nastalo počas prvých cyklov prevádzky postupné vytrhávanie kvapôčok z povlakovaného povrchu čo by ďalej viedlo k odlupovaniu povlaku a jeho deštrukcií.



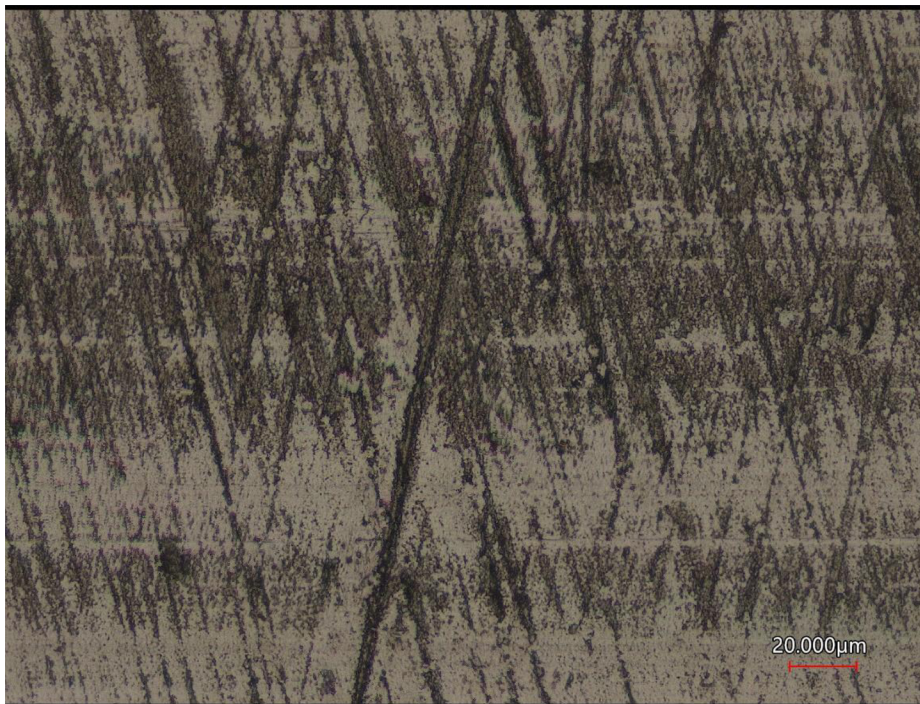
Obr.48 Schéma drstnosti povrchov



Obr.49 Defekt na povrchu - Kvapka

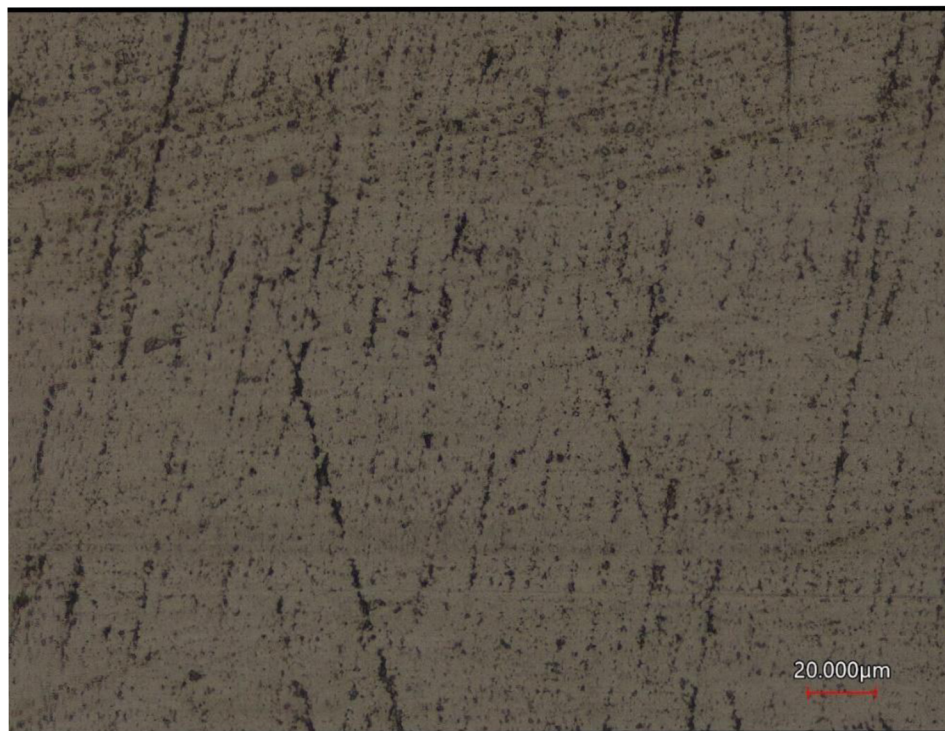
Finálny povrch piestnych krúžkov po povlakovaní

CrN



Obr.50 Finálny povrch tesniaceho piestneho krúžku s povlakom CrN

CrCN48



Obr.51 Finálny povrch tesniaceho piestneho krúžku s povlakom CrCN48

CrCN 47



Obr.52 Finálny povrch tesniaceho piestneho krúžku s povlakom CrCN47

DLC



Obr.53 Finálny povrch tesniaceho piestneho krúžku s povlakom DLC

Na obrázkoch 50,51,52,53 môžeme pozorovať 50x zväčšený povrch piestnych krúžkov po finálnom leštení. Na štruktúrach povrchov sú viditeľné ryhy po leštení. Je viditeľné, že povlak CrCN48 má najjemnejší povrch. Na CrCN 48 a DLC povrchoch môžeme pozorovať mierne nedostatky na povrchu, ktoré vznikli kvôli nečistotám v priebehu povlakovacieho procesu.

5.8 NÁVRH MERANÍ NA OVERENIE VLASTNOSTÍ POVLAKOV

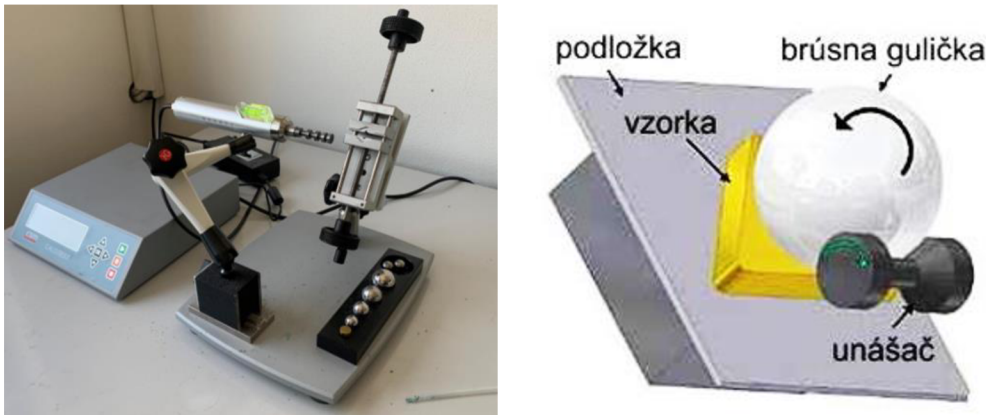
- Calo test na zistenie hrúbky povlaku
- Ball on disk test – zistenie koeficientu trenia
- Meranie mikrodrstností – zistenie výslednej povrchovej štruktúry



Obr.54 Použité vzorky, Zľava DLC, CrCN47, CrCN48, CrN

Vzorky určené k overeniu vlastností povlakov som vytvoril zo základného materiálu BS- 13 rovnakého ako na výrobu tesniacich piestnych krúžkov. Na testovacích vzorkách boli prevedené rovnaké operácie ako na piestnych krúžkoch.

5.9 CALO TEST

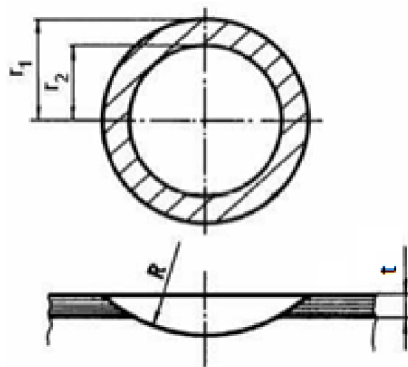


Obr.55 Zariadenie CALOTEST CSM vľavo, Schéma calotestu vpravo

Zariadenie Calotest sme použili na overenie hrúbky povlaku. Meranie pozostáva z povlakovanej vzorky ktorú sme umiestnili pevne do čelustí. Po povrchu vzorky rotuje gulička z ložiskovej ocele na sme naniesli brúsnu diamantovú pastu vďaka ktorej je zabezpečený odber povlakovaného materiálu. Následne sme vzniknutý kráter pozorovaný pod mikroskopom vyhodnotili, kde vidno dva rôzne priemery kvôli vzniknutému rozhraniu dvoch rôznych materiálov, povlaku a základného materiálu. Hrúbku povlaku vypočítame podľa nasledujúceho vzťahu:[21]

$$t = \sqrt{(R^2 - r_2^2)} - \sqrt{(R^2 - r_1^2)} \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Kde: R – polomer guličky [μm], r_1 - vonkajší polomer medzikružia [μm], r_2 - vnútorný polomer medzikružia [μm]



Obr.56 Schéma vzniknutého výbrusu [201]

Výsledky Calo testu (hrúbky povlaku)*Tab.4 Výsledky calo testu*

Povlak	Hrúbka povlaku [μm]
CrN	13
CrCN48	13
CrCN47	13
DLC	4

Zhodnotenie

Povlaky typu DLC majú zvyčajne hrúbku do 5 μm . Minimálna hrúbka povlaku je zapríčinená nízkou kohéznuou energiou, vysokou tvrdosťou povlakov typu DLC. Vysoká tvrdosť povlaku je úzko spätá s jeho krehkosťou z tohto dôvodu sa povlaky DLC deponujú v minimálnych hrúbkach. V prípade hrubších vrstiev je riziko odlupovania povlaku z povrchu súčiastky.

Hodnoty hrúbky povlakov sú dostatočné z hľadiska dlhodobej prevádzky tesniacich piestnych krúžkov. Hrúbka povlaku je v prípade tesniacich piestnych krúžkov dôležitá. Tesniaci piestny krúžok pracuje v neustálom kontakte so stenou valca čo pri zábehu motora znamená vzájomné obrúsenie povrchov. Tento mechanizmus spôsobuje úbytok hrúbky povlaku. Taktiež je dôležité zabezpečiť vopred stanovenú hrúbku povlaku, keďže pri výrobe sú rozmery piestneho krúžku zmenšené o hodnotu povlakovanej vrstvy. V prípade nedodržania hrúbky povlaku by došlo k nadmernému alebo nedostatočnému predpätiu piestneho krúžku v namontovanom stave a taktiež k nedodržaniu zámkovej vôle.

5.10 BALL ON DISK TEST

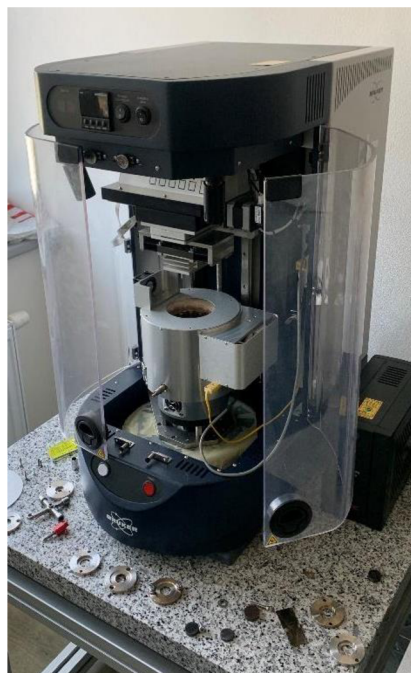
Ball on disk test som previedol bez prítomnosti maziva, keďže DLC povlak má najväčší význam v oblasti hornej úvrati a dolnej úvrati, kde je rýchlosť pohybu piestneho krúžku voči stene valca najmenšia resp. nulová tým pádom nedochádza k hydrodynamickému mazaniu, sú využívané vlastnosti povlaku ako nízky koeficient trenia a vysoká tvrdosť povlaku.[42]

Meranie som uskutočnil na tribologickom zariadení Bruker UMT TriboLab na určenie koeficientu suchého trenia. Meranie koeficientu trenia prebiehalo nasledovne:

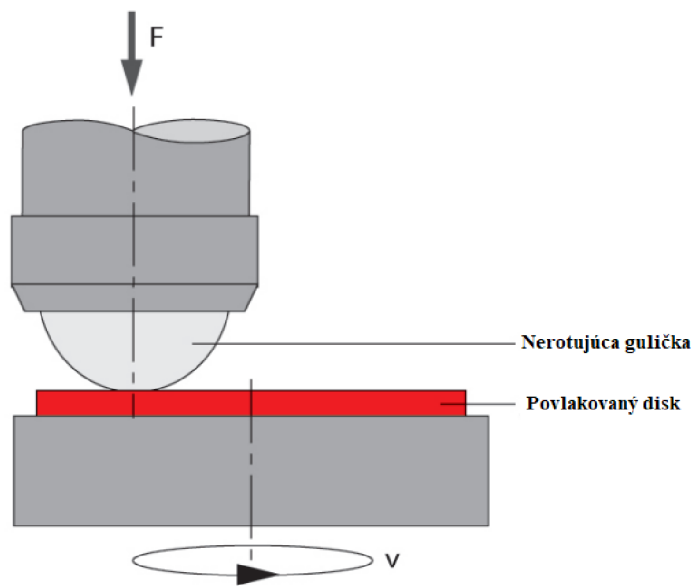
- umiestnenie rotujúcej vzorky, v našom prípade rotujúci disk ošetrovaný povlakom do rotujúcej hlavy prístroja
- Nastavenie hodnoty konštantného zaťaženia guľičky, ktorá vytvára tlak na povrchu rotujúceho disku
- Nastavenie otáčok
- Sila, ktorá vzniká proti pohybu vplyvom trenia je zaznamenaná pomocou snímačov každú sekundu
- Výsledkom je tabuľka hodnôt koeficientov trenia v každej sekunde merania

Nastavené hodnoty:

- zaťaženie guľičky 5 N
- otáčky 100 min^{-1} , 300 min^{-1}
- čas merania 1200 s

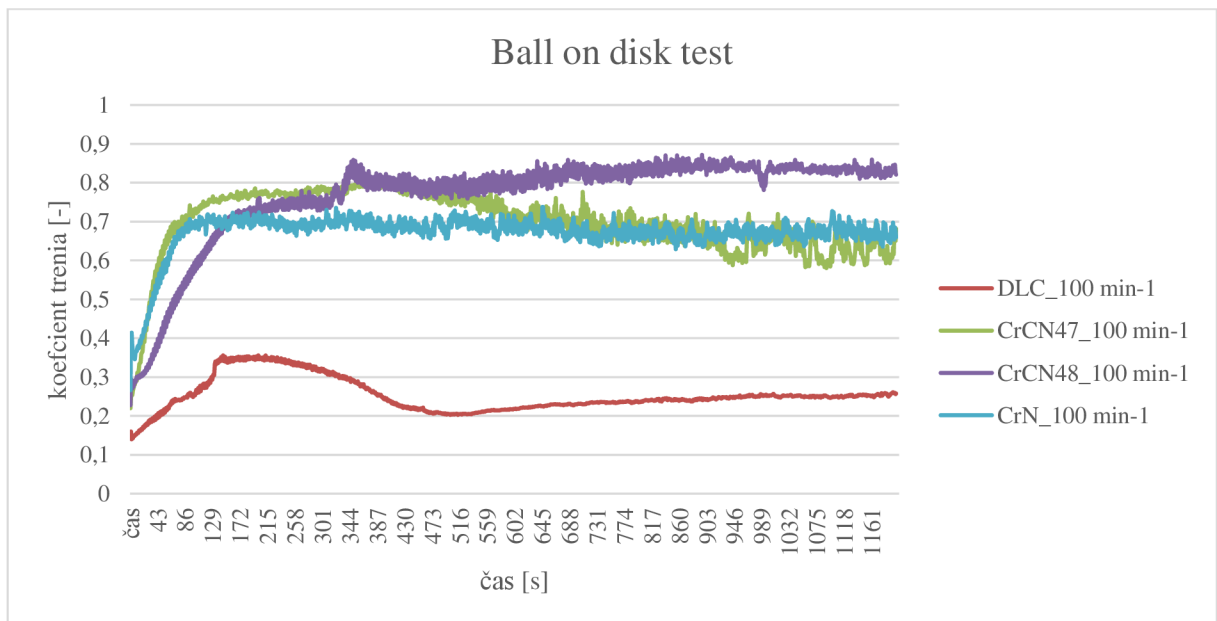


Obr. 57 Tribologické zariadenie Bruker UMT TriboLab

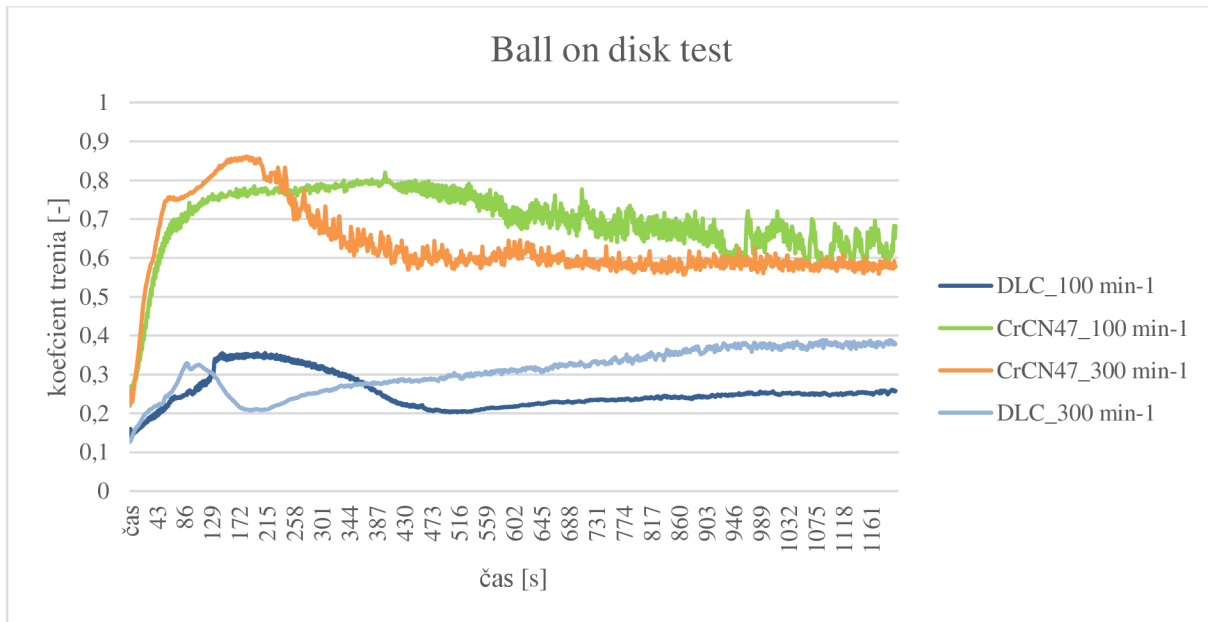


Obr.58 Schéma Ball on disk testu [39]

5.10.1 VÝSLEDKY KOEFICIENTOV TRENIA



Obr. 59 Priebehy koeficientov trenia



Obr. 60 Priebehy koeficientov trenia DLC, CrCN47

Koeficient trenia bol meraný pri všetkých povlakoch za rovnakých podmienok.

Tab. 5 Výsledky koeficientov trenia

Povlak	Otáčky [ot/min]	Teplota [°C]	Koeficient trenia[-]	
CrN	100	20	0.6726	
CrCN47	100, 300	20	0.6992	0.6317
CrCN48	100	20	0.7663	
DLC	100, 300	20	0.2528	0.3098

Zhodnotenie

Z nameraných hodnôt koeficientov trenia je zrejmé, že povlak DLC v porovnaní s povlakmi na báze nitridov má výrazne nižší koeficient trenia. V porovnaní s povlakom sériovým CrCN 47 je pokles koeficientu trenia o viac ako 50%. V prípade znižovania trecích strát tesniacich piestnych krúžkov je toto zistenie dôležité, keďže prvý tesniaci piestny krúžok sa na trecích stratách piestnych krúžkov podieľa najväčšou mierou.

Na priebehoch koeficientov trenia je možné pozorovať, na začiatku merania postupné zvyšovanie hodnôt koeficientov trenia a následný pokles a ustálenie hodnôt. Tento mechanizmus sa nazýva zábehové trenie, kedy sa mikroskopické vrcholčky povrchov postupne obrúsia.

5.11 MERANIE MIKROTVRDOSTI



Obr.61 Konfokálny 3D skenovací laserový mikroskop

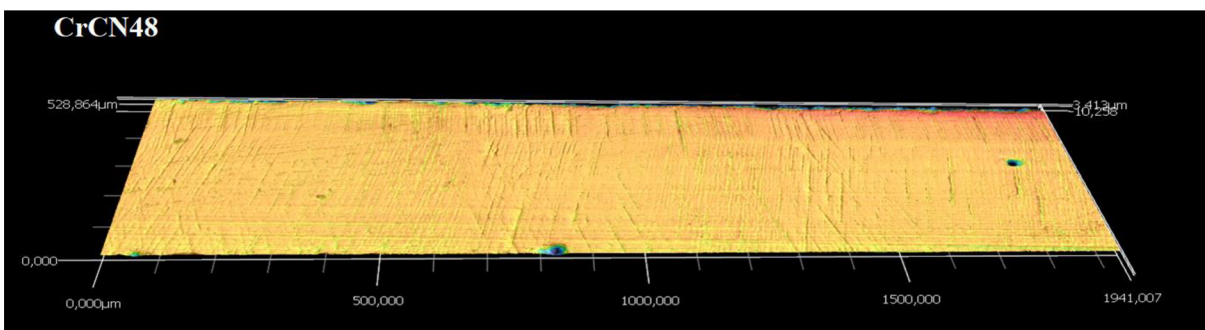
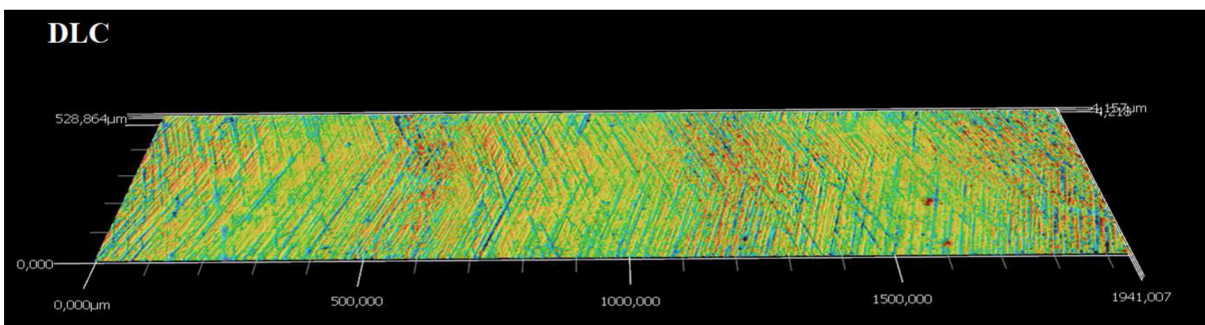
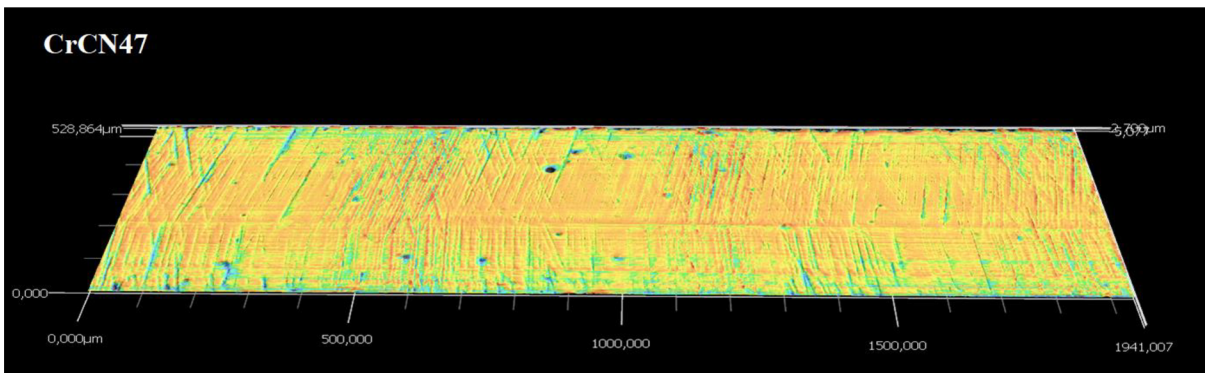
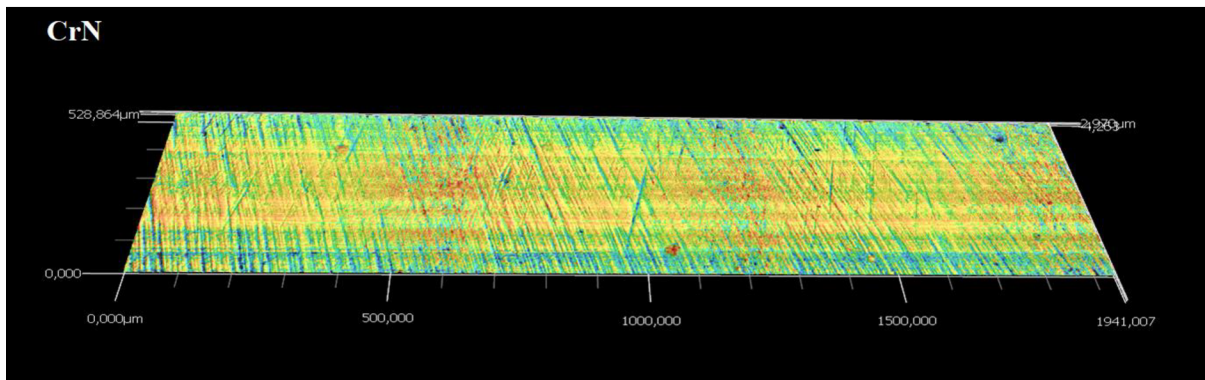
Na meranie som zvolil Konfokálny 3D skenovací laserový mikroskop. Vyznačuje sa presným a rýchlim laserovým skenovaním povrchu. Meranie mikrodrsností som meral na Konfokálnom 3D skenovacom mikroskope priamo na kontaktnej ploche teniaceho piestneho krúžku.

Postup merania mikrodrsností:

- Uchytenie piestneho krúžku na pracovný stôl mikroskopu
- Zaostrenie pozorovanej plochy
- Výber skenovanej plochy
- Skenovanie povrchu
- Vyhodnotenie mikrodrsností

Naskenovaný povrch piestnych krúžkov

CrN



Obr.62 Naskenované povrchy piestnych krúžkov

Výsledky merania mikrodrsností

Tab.6 Výsledky merania mikrodrsností

Povlak	Hodnota mikrodrsnosti [μm]
CrN	0.294
CrCN47	0.193
CrCN48	0.274
DLC	0.322

Zhodnotenie

Meraním mikrodrsností je preukázané, že sériový povlak CrCN47 má najnižšiu hodnotu mikrodrsnosti povrchu v porovnaní s ostatnými povlakmi. Ostatné povlaky majú hodnoty povrchových mikrodrsností mierne odlišné v jednotkách stotín. V porovnaní povlaku sériového s povlakom DLC je hodnota mikrodrsnosti DLC povlaku o 40% väčšia. Zvýšená mikrodrsnosť povrchu spôsobuje lepšie zachytávanie oleja v priestore medzi mikronerovnosťami piestneho krúžku a s tým spojené lepšie mazacie schopnosti piestneho krúžku so stenou valca. Tento priestor naplnený olejom má funkciu mikro hydrodynamického ložiska. Ďalšia funkcia tohto mikro priestoru je zachytenie mikroskopických častíc vzniknutých pri opotrebení, ktoré sa nachádzajú v oleji, tým pádom sa nečistota nedostane do priameho kontaktu so stenou valca, kde by spôsobila opotrebenie.

ZÁVER

V práci som sa zaoberal problematikou znižovania trecích strát prvých tesniacich piestnych krúžkov pomocou technológie povlakovania, motora koncernu Volkswagen 1.5 TSI, 110kW. Výrobu polotovarov a finálne leštenie zabezpečila spoločnosť PISTON RINGS KOMAROV s.r.o.. Začiatok práce sa zaoberá teoretickými podkladmi ohľadom piestnych krúžkov, z hľadiska ich rozdelenia, opotrebenia, režimov v ktorých pracujú. Ďalšia kapitola sa venuje možnostiam znižovania trecích strát tesniacich piestnych krúžkov. V hlavnej časti práce je popísaný postup výroby piestnych krúžkov a ich povlakovanie. Podrobne je v práci rozobratá problematika povlakovania a prípravných postupov, pred povlakovaním piestnych krúžkov. Pri povlakovaní piestnych krúžkov boli použité metódy PVD a PECVD. Povlakovanie piestnych krúžkov a merania boli uskutočnené v spolupráci so spoločnosťou STATON s.r.o.. Tesniace piestne krúžky boli povlakované rôznymi povlakmi a to CrN, CrCN48, DLC. Povlaky boli určené k zlepšeniu trecích vlastností piestnych krúžkov a porovnané s povlakom sériovým CrCN47 ktorý bol referenčný. Boli navrhnuté a uskutočnené merania na porovnanie vlastností povlakov navrhnutých na zlepšenie vlastností z hľadiska trecích vlastností. Na overenie hrúbky povlaku som zvolil CALO test, ktorého výsledky potvrdili predpokladané hrúbky povlakov. Meranie mikrodrsností povrchov ukázalo, že povlak DLC má v porovnaní s povlakom CrCN47 o 40% väčšiu drsnosť povrchu. Drsnejší povrch tesniaceho piestneho krúžku môže mať za následok zlepšenie trecích vlastností, vplyvom lepšieho zachytávania oleja. Kde mikro priestor medzi nerovnosťami funguje ako mikro nádrž maziva. Vďaka väčšej vrstve maziva v trecom uzle, medzi piestnym krúžkom a stenou valca sú mikronerovnosti kontaktných plôch v menšom kontakte. Mikro priestor môže zároveň zachytávať mikroskopické častice vzniknuté vplyvom opotrebenia, ktoré by v kontakte so stenou valca spôsobili opotrebenie. BALL ON DISK test, ktorý som použil na meranie koeficientu trenia bez prítomnosti maziva, preukázal vynikajúce vlastnosti povlaku DLC, v porovnaní s ostatnými testovanými povlakmi. Meranie BALL ON DISK test, preukázalo o viac ako 50% nižší koeficient trenia bez prítomnosti maziva v porovnaní s povlakom CrCN47. Podľa Haydena znížením trecích strát o 5,7% dosiahneme zníženie spotreby paliva o 1%. Hayden uvádza fakt, že trecie straty piestnych krúžkov a stien piestu, tvorí približne 50% celkových trecích strát. Na základe zníženia koeficientu trenia v tak výraznej miere, môžeme očakávať zníženie trecích strát v porovnaní so sériovým piestnym krúžkom s povlakom CrCN47. Z dôvodu nedostatočného simulovania prevádzkových podmienok pri uskutočnených meraniach, navrhujem otestovanie tesniacich piestnych krúžkov s povlakom DLC a CrCN47 v dlhodobom teste so spaľovaním. Tento test by preukázal, akou mierou sú schopné povlakované piestne krúžky s povlakom DLC ovplyvniť trecie straty motora 1.5 TSI, 110kw. V súčasnosti komunikujem s pánom Ing. Petrom Janasom z Škoda Auto - vývoj motorov, ohľadom možností testovania piestnych krúžkov.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] ALLMAIER, H., D.E. SANDER a F.M. REICH. Simulating Friction Power Losses in Automotive Journal Bearings. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2013, 68, 49-55 [cit. 2023-04-17]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.12.146
- [2] STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. 516 s. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [2] FERREIRA, Rita, Jorge MARTINS, Óscar CARVALHO, Luis SOBRAL, Sandra CARVALHO a Filipe SILVA. Tribological solutions for engine piston ring surfaces: an overview on the materials and manufacturing. *Materials and manufacturing processes* [online]. Taylor & Francis, 2020, 35(5), 498-520 [cit. 2022-05-02]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2019.1692352
- [3] NMCA, The Ring of Fire [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z URL: <<http://www.nmcadigital.com/2012/03/29/the-ring-of-fire/>>.
- [4] FEDERAL MOGUL, Piston Ring Handbook [online]. 2004, [cit. 2022-03-08]. Available at URL: <<http://korihandbook.federalmogul.com/en/index.htm>>.
- [5] DLUGOŠ, Jozef. Výpočtové modelování dynamiky pístního kroužku. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014, 104 stran.
- [6] DOWSON, D., Piston assemblies; background and lubrication analysis. In: Taylor, C.M. (ed.). *Engine Tribology*. Elsevier, Tribology series, 26, pp. 213–240, 1193. [ISBN 0-444-89755-0]
- [7] MAHLE GmbH (Ed.), *Pistons and engine testing*, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012, [cit. 2023-03-28]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: DOI 10.1007/978-3-8348-8662-0
- [8] MAHLE GmbH, *Cylinder components, ATZ/MTZ-Fachbuch*, (2018), [cit. 2023-03-28]. Dostupné z <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10034-6>
- [9] TURNBULL, R., N. DOLATABADI, R. RAHMANI a H. RAHNEJAT. An assessment of gas power leakage and frictional losses from the top compression ring of internal combustion engines. *Tribology international* [online]. Kidlington: Elsevier, 2020, 142, 105991 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.105991
- [10] MOHD hazem, *POWERTRAIN COMPONENTS DESIGN Engine*, Politecnico di Torino, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2019
- [11] TRIBOLOGIE . Liberec, 2000 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
- [12] RYK, G., Y. KLIGERMAN a I. ETSION. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. *Tribology transactions* [online].

- PARK RIDGE: Taylor & Francis Group, 2002, 45(4), 444-449 [cit. 2022-01-27]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000208982572
- [13] HONC, R. Obecné řešení ztrát klikového mechanismu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/7625>
- [14] KOPELIOVICH, Dmitri. Mechanisms of wear.2014 In: SubsTech [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php>
- [15] DROPPA, P. - Marko M. - Pavlov, Š. – Štiavnický M. Vlastnosti a tribodiagnostika mazív v prevádzke motorových vozidiel. Trenčín: ULZ OS SROV. BULL-12-6. Bulletin č.6/2014.[cit. 2022-05-03] Dostupné na: <http://ak.aos.sk/e-zdroje/odborne-posudky/176-odborne-posudky-motorovych-olejov.html>
- [16] KŘIŽ, A. Analýza pístních kroužků: Technická zpráva. ZČU, Plzeň,2012
- [17] KLIMEŠ, Pavel. Části a mechanismy strojů. II, Tribologie, ložiska, převody. Brno: CERM, 2003, 70 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-214-2422-2.
- [18] FEDERAL-MOGUL BURSCHEID GMBH. Piston Ring Handbook. 2008 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <http://korihandbook.federalmogul.com/en/index.htm>
- [19] MOHANNAD Abdullah Hakeem, Intricate Dynamics and hydrodynamic frictional losses of the piston-ring assembly in internal combustion engines. PH.D. dissertation, Wayne State University Detroit, Michigan, 2011
- [20] NOVOTNÝ, Pavel, Prof. Multifyzikální simulace v automobilovém průmyslu, Prednáška č.6 - Modelování hydrodynamického mazání, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství (2021)
- [21] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] DETERS, L. Springer Handbook of Mechanical Engineering. Part B., Tribology, 2009, s. 295-326. ISBN 978-3-540-491.
- [23] ALI, Mohamed Kamal Ahmed, Hou XIANJUN, Liqiang MAI, Cai QINGPING, Richard Fiiifi TURKSON a Chen BICHENG. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives. Tribology international [online]. OXFORD: Elsevier, 2016, 103, 540-554 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.08.011
- [24] NOVOTNY, P., V. PISTEK, L. DRAPAL, D. SVIDA a T. DEVERA. Efficient approach for solution of the mechanical losses of the piston ring pack. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 18. 10. 2013, roč. 227, č. 10, s. 1377-1388.

- [25] RYK, G., Y. KLIGERMAN a I. ETSION. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. *Tribology transactions* [online]. PARK RIDGE: Taylor & Francis Group, 2002, 45(4), 444-449 [cit. 2022-01-27]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000208982572
- [26] RYK, G., Y. KLIGERMAN, I. ETSION a A. SHINKARENKO. Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction. *Tribology transactions* [online]. Colchester: Taylor & Francis Group, 2005, 48(4), 583-588 [cit. 2023-03-28]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/05698190500313544
- [27] PETTERSSON, Ulrika a S. JACOBSON. Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding. *Tribology letters* [online]. NEW YORK: Kluwer Academic/Plenum Publ, 2004, 17(3), 553-559 [cit. 2023-05-05]. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1023/B:TRIL.0000044504.76164.4e
- [28] ELAGOZ, Ahmed, Mohamed Kamal Ahmed ALI, Hou XIANJUN, Mohamed A. A. ABDELKAREEM a Mohamed A. HASSAN. Frictional performance evaluation of sliding surfaces lubricated by zinc-oxide nano-additives. *Surface engineering* [online]. Taylor & Francis, 2020, 36(2), 144-157 [cit. 2023-05-27]. ISSN 0267-0844. Dostupné z: doi:10.1080/02670844.2019.1620442
- [29] ALI, Mohamed Kamal Ahmed, Hou XIANJUN, Liqiang MAI, Cai QINGPING, Richard Fifi TURKSON a Chen BICHENG. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives. *Tribology international* [online]. OXFORD: Elsevier, 2016, 103, 540-554 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0301-679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.08.011
- [30] KOMA PISTON RINGS s.r.o., Odelenie výskumu a vývoja, 2022
- [31] KOSARIEH, S., A. MORINA, E. LAINÉ, J. FLEMMING a A. NEVILLE. The effect of MoDTC-type friction modifier on the wear performance of a hydrogenated DLC coating. *Wear* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2013, 302(1-2), 890-898 [cit. 2023-04-29]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2012.12.052
- [32] KOSARIEH, Shahriar, Ardian MORINA, Jonathan FLEMMING, Emmanuel LAINÉ a Anne NEVILLE. Wear Mechanisms of Hydrogenated DLC in Oils Containing MoDTC. *Tribology letters* [online]. New York: Springer US, 2016, 64(1), 1-17 [cit. 2023-04-20]. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-016-0737-0
- [33] ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. *Materials science & engineering. R, Reports: a review journal* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2002, 37(4), 129-281 [cit. 2023-02-26]. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-796X(02)00005-0
- [34] KENNEDY, Marcus, Steffen HOPPE a Johannes ESSER. Weniger Reibleistung Durch Neue Kolbenringbeschichtung. *MTZ. Motortechnische Zeitschrift* [online]. 2014, 75(4), 48-51 [cit. 2023-05-05]. ISSN 0024-8525. Dostupné z: doi:10.1007/s35146-014-0316-6

- [35] GRECZYNSKI, G., J. LU, J. JENSEN, et al. A review of metal-ion-flux-controlled growth of metastable TiAlN by HIPIMS/DCMS co-sputtering. *Surface & coatings technology* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2014, 257, 15-25 [cit. 2023-05-29]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2014.01.055
- [36] AHARONOV, Robert R., Manish CHHOWALLA, Suranjeeta DHAR a Raymond P. FONTANA. Factors affecting growth defect formation in cathodic arc evaporated coatings. *Surface & coatings technology* [online]. LAUSANNE 1: Elsevier B.V, 1996, 82(3), 334-343 [cit. 2023-01-29]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/0257-8972(95)02773-4
- [37] JANČOVIČ, R. Trvanlivost' povlakovaných rezných nástrojov. Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Trnava 2010, 120 s.
- [38] PALDEY, S. a S.C. DEEVI. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. LAUSANNE: Elsevier, 2003, 342(1-2), 58-79 [cit. 2023-05-29]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-5093(02)00259-9
- [39] MATTOX, Donald. Handbook of physical vapor deposition (pvd) processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control. [online]. 1998 [vid. 2022-03-14]. ISBN 0-8155-1422-0. Dostupné z: <http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/ebooks/full/fn121.pdf>
- [40] PLASMA-THERM. PECVD [online]. Poslední úpravy 2022-1-23 [cit. 2022-02-09]. Dostupný z: <http://www.plasmatherm.com/pecvd.html>.
- [41] DOLEŽALOVÁ, P. Vlastnosti povlaků rezných nástrojů ze slinutého karbidu. Diplomové práce, Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 52 s. příloh 3. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička PhD.
- [42] GÖTZE, Andreas a Dirk JAITNER. Combined experimental and simulative approach for friction loss optimization of DLC coated piston rings. *Automotive and Engine Technology (Online)* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2022, 7(3-4), 283-293 [cit. 2023-04-07]. ISSN 2365-5127. Dostupné z: doi:10.1007/s41104-022-00115-7
- [43] EPARTRADE. "The Advantages of Modern Piston Rings" by MAHLE Motorsport In: Youtube [online]. 10. 04. 2021 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=WGi_gkonsC4
- [44] EPARTRADE "Piston Failure Analysis" by Mahle Motorsport In: Youtube [online]. 09. 03. 2022 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=35nlgHGEEfs>