



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

Bc. Radoslav Csintalan

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. David Svída, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Student: Bc. Radoslav Csintalan

Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství bez specializace

Studijní obor:

Vedoucí práce: Ing. David Svída, Ph.D.

Akademický rok: 2021/22

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:

SNÍŽOVÁNÍ TŘECÍCH ZTRÁT PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na provedení dostupných úprav pístních kroužků pro motor VW 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 9783-642-02951-6.

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.

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
děkan fakulty

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. ředitel ústavu

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, 2022. 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/138994>.

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 19. května 2022

.....

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	13
1 Piestne krúžky	14
1.1 Význam piestnych krúžkov	14
1.2 Funkcia piestnych krúžkov	15
1.3 Typy piestnych krúžkov	18
1.3.1 Tesniace piestne krúžky	18
1.3.2 Stieracie piestne krúžky	21
1.4 Materiál piestnych krúžkov	24
1.5 Tribológia piestnych krúžkov	25
1.5.1 Hydrodynamické mazanie	26
1.5.2 Zmiešané mazanie	28
1.5.3 Medzné mazanie	28
2 Opatrenie piestnych krúžkov	29
2.1 Adhézne opotrebenie	29
2.2 Abrazívne opotrebenie	29
2.3 Únavové opotrebenie	30
2.4 Vibračné opotrebenie	30
2.5 Erozívne opotrebenie	31
2.6 Kavitačné opotrebenie	31
3 Možnosti znižovania trecích strát piestnych krúžkov	32
3.1 LASEROVÉ TEXTUROVANIE POVRCHU	33
3.2 Zmenou geometrie piestneho krúžku	34
3.3 Nano aditíva v oleji	35
3.4 Použitím multifunkčných vrstiev	36
4 Vlastná práca	37
4.1 CIEĽ PRÁCE	37
4.2 Výroba tesniacich piestnych krúžkov	38
4.2.1 Geometria piestnych krúžkov	38
4.2.2 Voľba materiálu piestnych krúžkov	40
4.3 Proces výroby polotovarov piestnych krúžkov	41
4.4 Prípravné operácie pred povlakovaním	43
4.5 Voľba povlakov na zníženie trecích strát piestnych krúžkov	45
4.6 Povlakovanie PVD (Physical Vapor Deposition)	45
4.7 Proces povlakovania	46
4.7.1 Finálny povrchu piestnych krúžkov po povlakovaní	50
4.8 Návrh meraní na overenie vlastností povlakov	53
4.8.1 Vytvorenie vzoriek na testovanie povlakov	53
4.9 CALO TEST	54
4.10 BALL ON DISK TEST	56
4.10.1 Výsledky koeficientov trenia	57
4.11 MERANIE MIKRODRSNOSTI	59
.....	60



Záver	62
Použité informační zdroje	63
Seznam použitých zkratk a symbolů	Chyba! Záložka nie je definovaná.
Seznam příloh.....	Chyba! Záložka nie je definovaná.



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. 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-. Súčasný moderné spaľovacie motory sú schopné energiu z paliva premeniť na mechanickú prácu s účinnosťou maximálne 40%, kde mechanické straty spôsobené trením piestnej skupiny o povrch valca tvoria približne 50% celkových mechanických strát motora. 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 vákuu 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

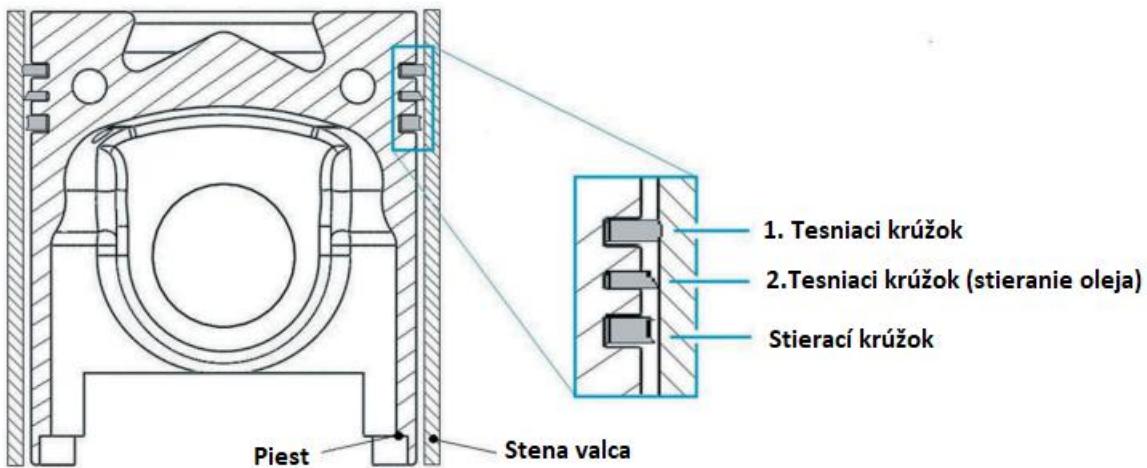


Obr. 1 Piestne krúžky [1]

1.1 VÝZNAM PIESTNYCH KRÚŽKOV

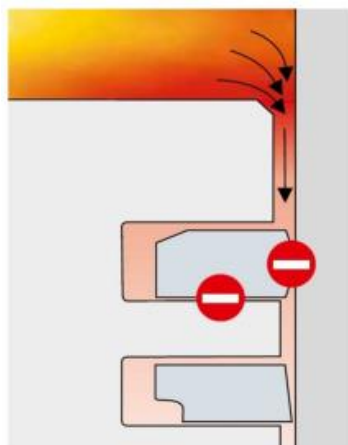
Piestne krúžky slúžia na utesnenie spaľovacieho priestoru od kľukovej skrine motora, aby nedošlo k vniknutiu oleja z kľukovej skrine do spaľovacieho priestoru. Ďalšou nemenej dôležitou funkciou je odvádzanie tepla z piesta na stenu valca, zabezpečiť dostatočnú olejovú vrstvu na stene valca, stabilizovať 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 [34]

1.2 FUNKCIA PIESTNYCH KRÚŽKOV



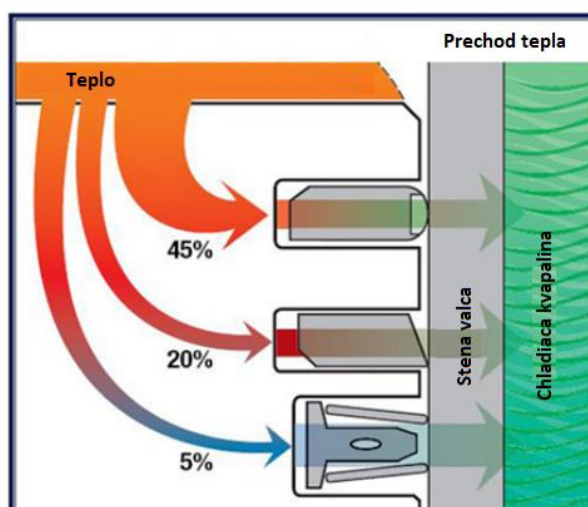
Obr. 3 Utesnenie spaľovacieho priestoru

UTESNENIE SPAĽOVACIEHO PRIESTORU

Hlavnou funkciou kompresných piestných 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]

ODVÁDZANIE TEPLA

Dôležitou funkciou piestných 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. Najväčšiu časť až 50% piestom prijatého tepla počas spaľovania odvádza prvý kompresný krúžok. V prípade ak by



Obr.3 Odvádzanie tepla piestnymi krúžkami

nebol zabezpečený plynulý odvod tepla z piesta došlo by k zapečeniu piestneho krúžku v drážke prípadne k roztaveniu piesta. [2,3,]

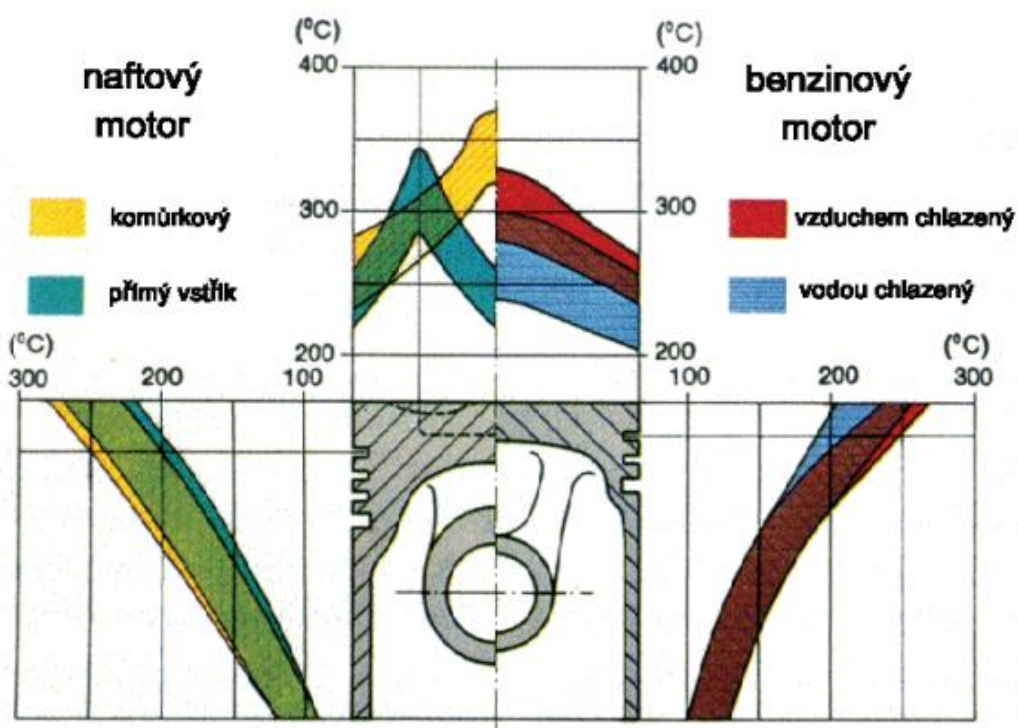


Obr. 4 Schéma stierania oleja

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]

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 °C, dnešné moderné syntetické oleje majú teplotný bod karbonizácie v rozmedzí 240 až 260 °C. Veľkosť tejto teploty pri plnom zaťažení motora je určovaná výškou horného mostíka piestu. Z tohto dôvodu u väčšiny vznetových motorov býva tento rozmer väčší ako u motorov zážihových. Pri teplote vyššej ako je teplota karbonizácie použitého motorového oleja dochádza k tvorbe častíc karbónu. Tieto karbónové častice postupne zanášajú drážku pre piestny krúžok čo vedie k zamedzeniu voľného pohybu krúžku v axiálnom aj radiálnom smere. 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 vôľou piestu vo valci motora.[2,4]

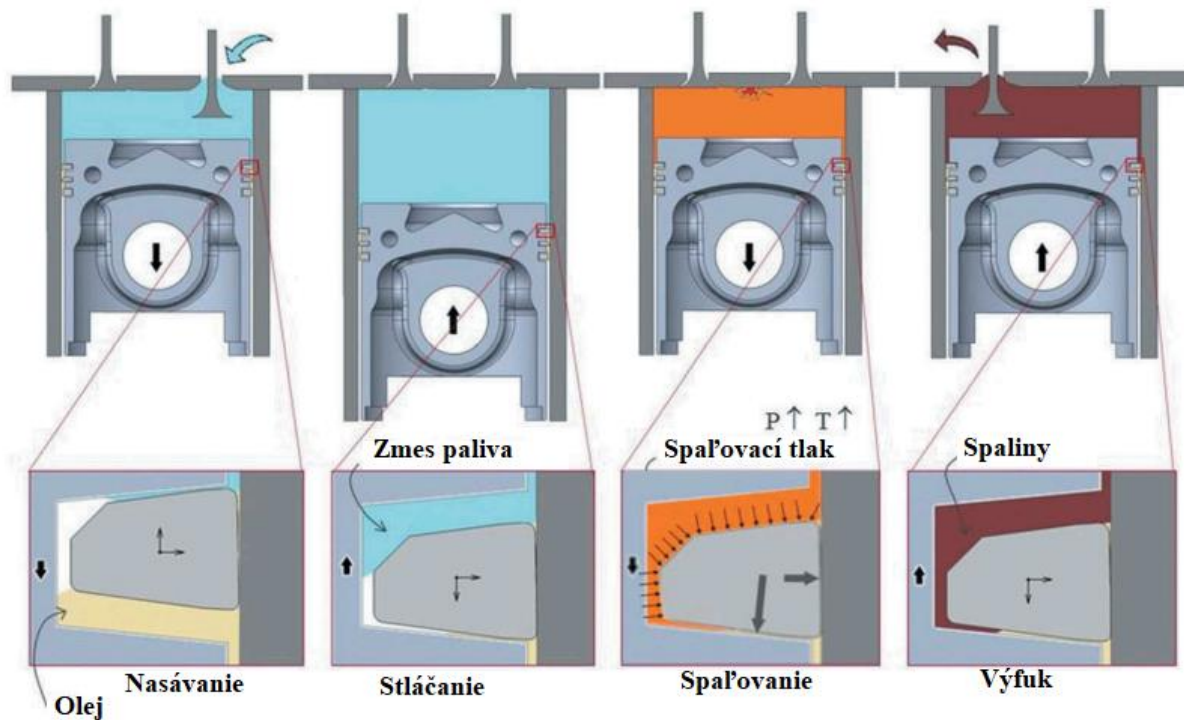


Obr. 5 Rauscher, J., Spalovací motory. VUT FSI Brno, 2005.

1.3 TYPY PIESTNYCH KRÚŽKOV

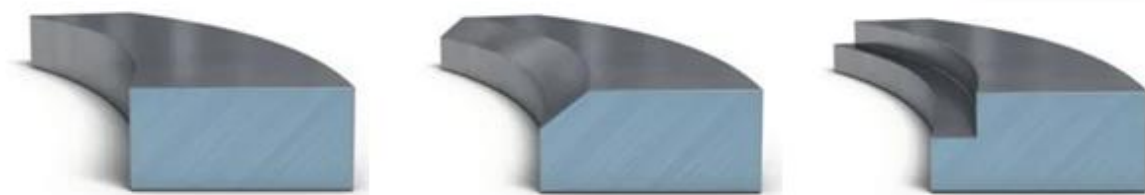
1.3.1 TESNIACE PIESTNE KRÚŽKY

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. 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.[2,3]



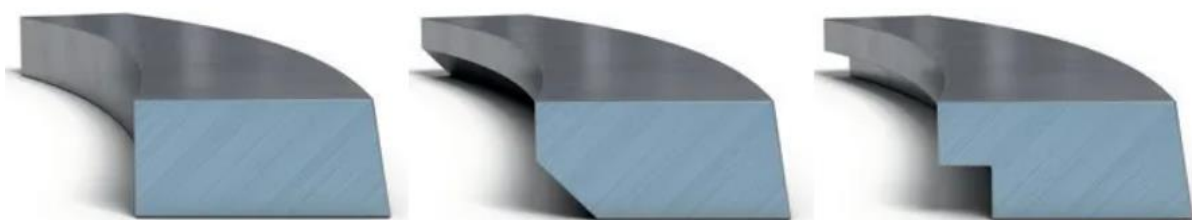
Obr. 6 Správanie tesniaceho piestneho krúžku počas spaľovania [34]

Základné typy tesniacich piestnych krúžkov:



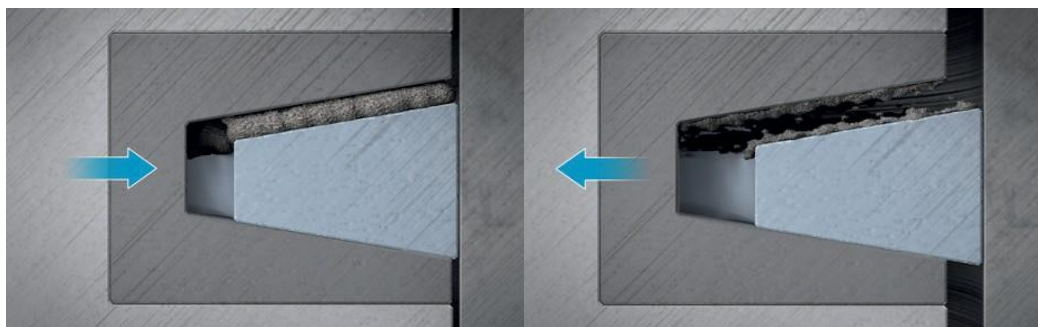
Obr. 7 Piestne krúžky s obdĺžnikovým prierezom [32]

Piestny krúžok s obdĺžnikovým alebo valcovým prierezom, sa používa hlavne ako prvý tesniaci krúžok. Veľké trenie v kontakte a nedostatočné mazacie podmienky, viedli k zaobleniu tesniacej plochy. Zaoblené tesniace piestne krúžky sa v súčasnej dobe používajú v zážihových a vznetrových spaľovacích motoroch. Jednoduchý valcový prierez piestneho krúžku sa v súčasnosti používa v agregátoch záhradnej mechanizácie a v dvojtaktných motoroch.[2,7]



Obr. 8 Piestne krúžky s kužeľovým prierezom [32]

Piestny krúžok s kužeľovým prierezom, nazývaný tiež ako minútový tesniaci krúžok sa najčastejšie používa ako druhý tesniaci krúžok, ojedinele tiež ako prvý tesniaci krúžok. Názov minútový vyplýva z hodnoty sklonu plochy ktorá je v kontakte so stenou valca. Táto hodnota je v rozmedzí tridsať až päťdesiat minút. Jeho hlavnou výhodou je že pri zábehu motora je v kontakte len malá plocha so stenou valca. Kvôli vysokému mernému tlaku sa tvar krúžku prispôbí tvaru valcu. V prípade pohybu minútového krúžku do hornej úvrate, zlepšuje tvar krúžku prenikanie oleja pod krúžok a zároveň pri pohybe do dolnej úvrate zabezpečuje piestny krúžok veľmi dobré stieracie vlastnosti. Z dôvodu možnej nesprávnej inštalácie je minútový piestny krúžok označený skratkou TOP, ktorá označuje vrchnú plochu krúžku. Nesprávna inštalácia by spôsobila prenikanie oleja do spaľovacej komory a tým nepriaznivo ovplyvnila emisie motora. [2,7]



Obr. 9 Trápézový piestny krúžok, drtenie karbónu [32]

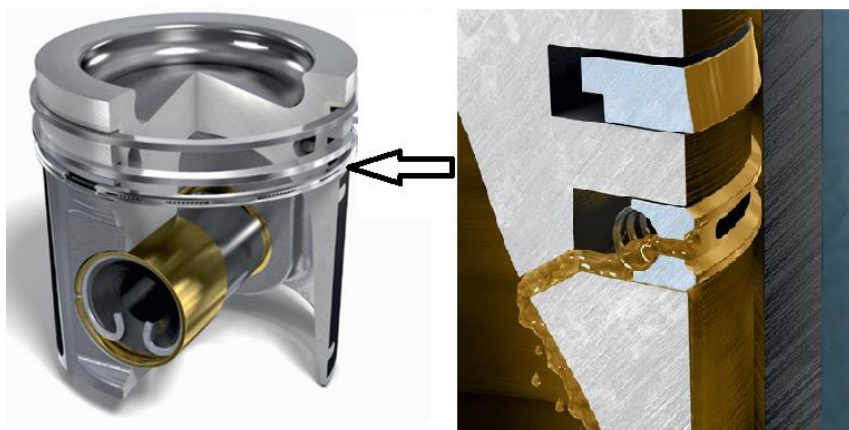
Trapézový piestny krúžok sa používa ako prvý tesniaci krúžok. Podľa geometrie ich rozdeľujeme na symetrické a nesymetrické. Hlavnou výhodou trapézového krúžku je schopnosť rozdrviť možné karbónové usadeniny na stene valca, prípadne v drážke pre piestny krúžok. Túto schopnosť zabezpečuje zmena pohybu piestu vo valci, vďaka čomu sa piestny krúžok zasúva a vysúva. Kontaktná plocha má zvyčajne sklon v rozmedzí 6 až 15 stupňov. Nevýhodou trapézového tesniaceho krúžku je nutnosť použiť nosič, ktorý je umiestnený v drážke piestu. Ak by sme nepoužili nosič piestneho krúžku, ktorý je na obrázku vyznačený tmavo, drážka piestu by bola nadmerne namáhaná a to by malo za následok poškodenie piestneho krúžku. Čo následne vedie k fatálnej deštrukcii motora. [2,7]

Piestny krúžok s jednostrannou lichobežníkovou tesniacou plochou sa využíva najmä pri vysokootáčkových motoroch. A to pretože svojou geometriou zabezpečuje vysokú odolnosť proti rozkmitaniu. Kontaktná plocha má sklon približne 7 stupňov. V dobe zábehu, tento tesniaci krúžok funguje podobne ako minúťový piestny krúžok. Ich hlavné využitie je tam, kde nie je potrebné použitie trapézového tesniaceho krúžku a obdĺžnikový tesniaci krúžok by už nebol dostatočný. [2,7]

Torzne piestne krúžky obsahujú značné vnútorné vybratie alebo skosenie. Pri pohybe v spaľovacom priestore im ich geometria umožňuje sa prehnúť do tvaru U. Pri zábehu motora je v kontakte len jedna hrana kontaktnej plochy piestneho krúžku. Vďaka tomu torzné piestne krúžky nadobúdajú výhody minúťových piestnych krúžkov. tesniace krúžky sa označujú označením skratkou TOP na vrchnej strane. Pretože ich opačná inštalácia by mala za následok horšie spaľovanie motora. Používa sa v prvej aj druhej drážke piestu. [2,7]

Tesniace piestne krúžky v tvare L sa najčastejšie využívajú v dvojtaktných motoroch, kde majú za úlohu otváranie a zatváranie prepúšťacieho a výfukového potrubia. Spaľovací tlak, ktorý pôsobí na hornú stranu piestu vytvára dodatočný radiálny tlak, vďaka ktorému viac utesňuje spaľovací priestor. Je taktiež využívaný pre vysokootáčkové motory a umožňuje dokonale tlmiť vibrácie. [2,7]

1.3.2 STIERACIE PIESTNE KRÚŽKY



Obr. 10 Schéma stierací piestny krúžok [32]

Funkcia stieracích piestných krúžkov je zabezpečiť rovnomerný olejový film na stene valca. Tenká vrstva olejového filmu minimalizuje trecie straty motora a zároveň prispieva k efektívnosti motora. Stierací piestny krúžok, stiera nadbytočný olej zo steny valca a následne je olej cez drážku v piestnom krúžku odvedený do kľukovej skrine motora. Väčšinou sa na piest umiestňuje jeden stierací piestny krúžok, avšak existujú prípady, kde je potrebné použiť viacej stieracích krúžkov. V prípade dvojtaktných motorov stierací piestny krúžok nie je potrebný, keďže palivo obsahuje mazací olej. Poznáme tri rôzne prevedenia stieracích piestných krúžkov. Hlavné rozdelenie je podľa počtu komponentov z ktorých pozostáva. [2,3,5,7]

JEDNODIELNE STIERACIE PIESTNE KRÚŽKY



Obr. 11 Jednodielne stieracie piestne krúžky [32]

Stierací piestny krúžok zložený z jednej časti, svojou geometriou pripomína tesniaci piestny krúžok. Tento typ stieracieho krúžku je na ústupe, pretože nie je schopný plniť dnešné náročné požiadavky spaľovacích motorov. Kontaktnú plochu so stenou valca tvoria len dva brity, ktorých tvar priečného prierezu môže byť odlišný. Brity sú v kontakte so stenou valca len veľmi malou plochou čo zapríčiňuje vysoký merný tlak. Z tohto dôvodu má tento typ stieracích piestných krúžkov vysoký stierací účinok. Prebytočné mazivo je zotreté a odteká cez otvor v piestnom krúžku späť do kľukovej skrine motora.[2,5]

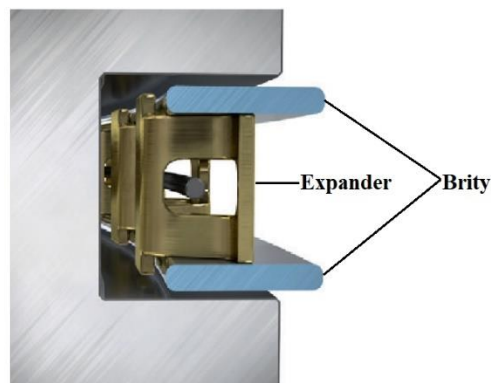
DVOJDIELNE STIERACIE PIESTNE KRÚŽKY



Obr. 12 Dvojdielne stieracie piestne krúžky [32]

Dvojdielne stieracie piestne krúžky pozostávajú z profilovaného piestneho krúžku a expanderu. Expander je špirálová pružina, ktorá spôsobuje svojím rozťahnutím radiálny tlak na brity stieracieho krúžku, čo má za následok zlepšenie stieracích vlastností krúžku. Expander je uložený v kruhovej, alebo do tvaru písmena „V“ drážke piestneho krúžku. Teflónový obal expanderu prispieva k znižovaniu trenia v trecom uzle expanderu a piestneho krúžku. Stieracie piestne krúžky ,odtokové otvory medzi britmi, zabezpečujú odvod prebytočného oleja zo stien valca. Odtokové otvory sa používajú s kruhovou alebo obdĺžnikovou geometriou. V súčasnosti sú využívané hlavne kruhové odtokové otvory kvôli vyššej pevnosti a odolnosti proti poškodeniu.[5,7,32]

TROJDIELNE STIERACIE PIESTNE KRÚŽKY

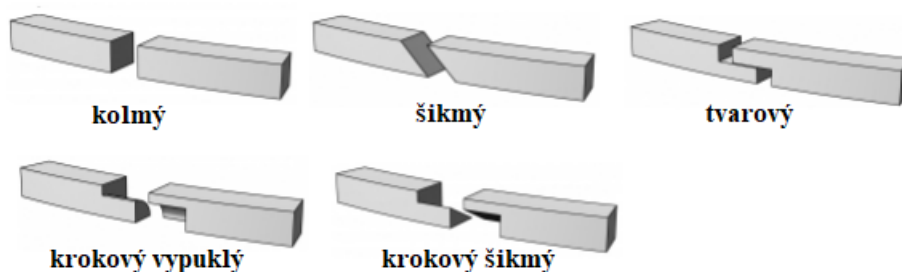


Obr. 13 Trojdielny stierací piestny keúžok [32]

Trojdielne stieracie krúžky obsahujú dva oceľové brity a expander (pružina), ktorý vytvára predpätie. Hlavnou prednosťou je ich minimálna priestorová náročnosť a nízka hmotnosť. V moderných zážihových motoroch sú najčastejšou voľbou konštruktérov dnešných osobných automobilov. V prípade trojdielnych stieracích krúžkov je nutné spomenúť ich hlavnú nevýhodu. Pri opotrebení kontaktného povrchu dochádza k poklesu merného tlaku čo má za následok nedostatočnú tesnosť. Následne dochádza k spaľovaniu oleja v spaľovacej komore

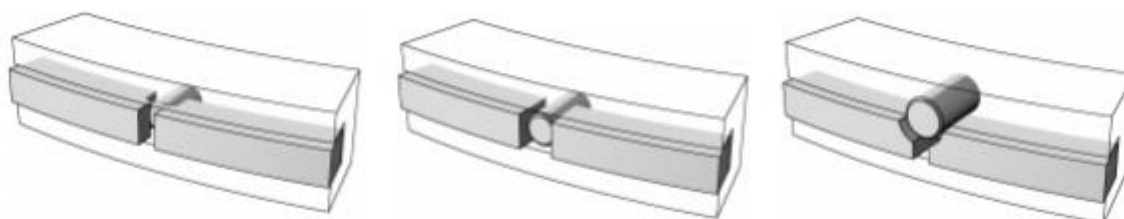
s nadmerným úbytkom oleja. Preto je nutné piestne krúžky dodatočne chrániť povrchovou úpravou napríklad technológiou povlakovania.[2,5]

ZÁMOK PIESTNYCH KRÚŽKOV



Obr. 14 Typy zámkov piestnych krúžkov [5,7]

Všetky typy piestnych krúžkov obsahujú konštrukčný prvok záмок. Zámkom sa rozumie kruhový výsek v obvode piestneho krúžku. Záмок je nevyhnutý pre montáž krúžku do drážky piestu. Keďže piestne krúžky pracujú v rôznych prevádzkových teplotách, záмок musí zabezpečiť aby aj pri najvyšších možných prevádzkových teplotách nedošlo k vymedzeniu vôľe v zámku vplyvom teplotnej rozťažnosti materiálu. Najviac používaný je kolmý záмок ktorý je konštrukčne najjednoduchší, existujú ďalšie typy zámkov napríklad krokový záмок má lepšie tesniace schopnosti. [5,7]



Obr. 15 Zámky dvojtaktných piestnych krúžkov [5]

V prípade dvojtaktných motorov je nerozdeľ od štvortaktných motorov zabrániť otáčanie piestnych krúžkov v drážke piestu. Otáčaniu piestneho krúžku je zamedzený pohyb z dôvodu, ak by krúžok svojou hranou zámku zašiel do rohu sacieho kanálu mohlo by to zapríčiniť poškodenie prípadne zalomenie piestneho krúžku. Konštrukčne je tento otáčavý pohyb zamedzený pomocou drážky v pieste s, ktorou je piestny krúžok spojený. Existujú rôzne typy zámkov proti otáčaniu, čap ktorý zabraňuje pohybu neprechádza celou šírkou krúžku, ďalším druhom je čap ktorý prechádza celým krúžkom. Posledným používaným typom je čap zasadený do drážky z vrchnej alebo spodnej strany, drážka v piestnom krúžku je v tvare polkruhu.[7]

1.4 MATERIÁL PIESTNYCH KRÚŽKOV

Materiál piestnych krúžkov musí zabezpečovať svojimi vlastnosťami odolnosť piestnych 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 piestnych krúžkov musí svojimi parametrami zabezpečiť tvrdosť piestneho krúžku vyššiu ako materiál steny valca. Najväčšou výhodou liatinových piestnych krúžkov je ich ekonomická výroba. Avšak svojimi vlastnosťami sa vyznačujú ich krehkosťou a straty pružnosti za vysokých teplôt. Piestne krúžky z ocelového materiálu majú vynikajúce vlastnosti z hľadiska pružnosti a pevnosti. [45]

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 materiály používajú sa drahé zariadenia na odstránenie týchto nedokonalostí, čo má výrazný vplyv na ich cenu. [45]

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 piestnych krúžkov sa ošetruje tvrdo-chromom, molybdénovým povlakom. V súčasnosti je trend využívať veľmi tenké povlaky zabezpečené technológiou PVD. Sú to povlaky na základe dusíka kde vzniká na pracovnej ploche tenká vrstva niekoľko metrov 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. [45]

1.5 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. Ďalšie vedľajšie efekty sú štruktúra povrchu ovplyvňujúca kontaktnú plochu piestneho krúžku, odchýlka geometrie valca od dokonalého valcového tvaru. Piestny krúžok je v priebehu pohybu zaťažený 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. [6, 7]

Stribeckova krivka

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

Sommerfeldovo číslo So :

$$So = \frac{\eta n}{P} \quad (1)$$

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

$$So = \frac{\eta u}{Ph} \quad (2)$$

Kde u reprezentuje okamžitú rýchlosť piestu a h hrúbku piestneho krúžku,

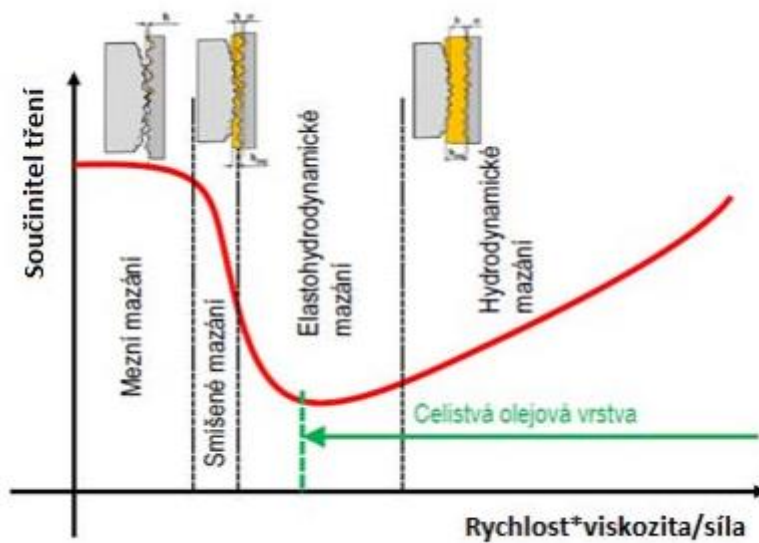
$$So = \frac{|F_N|}{\eta u h} \quad (3)$$

Kde F_N normálová zaťažujúca sila. Sommerfeldovo číslo je bezrozmerné číslo.

Pomer hrúbky λ :

$$\lambda = \frac{\text{hrúbka olejovej vrstvy}}{\text{drsnosť povrchu}} \quad (4)$$

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

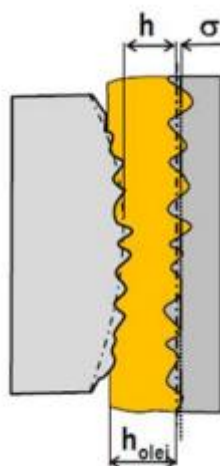


Obr. 16 Stribeckova krivka [9]

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

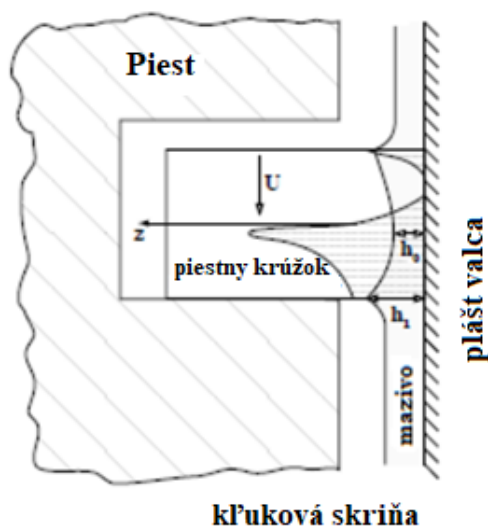
1.5.1 HYDRODYNAMICKÉ MAZANIE

Keď pán Tower v devätnástom storočí skúmal mazanie radiálnych klzných ložísk, objavil mechanizmus hydrodynamického mazania, ktorý ďalej rozvíjal pán Reynolds. Tento inovátor skúmal vzájomné prepojenie medzi veličinami: trenie, tlak, rýchlosť. 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. [9]



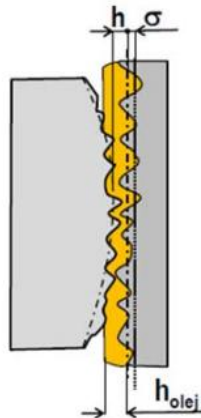
Obr. 17 Hydrodynamické mazanie [9]

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. 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. [9,11]



Obr. 18 Hydrodynamické mazanie piestneho krúžku [10]

1.5.2 ZMIEŠANÉ MAZANIE

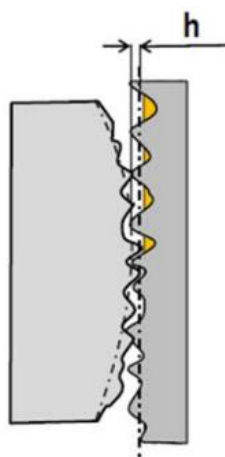


Obr. 19 Zmiešané mazanie [9]

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.

1.5.3 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.



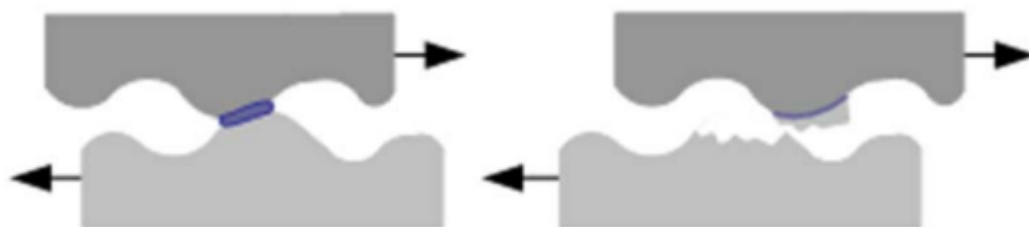
Obr. 20 Medzné mazanie [9]

2 OPOTREBENIE PIESTNYCH KRÚŽKOV

Piestne krúžky sú so stenou valca v neustálom trecom kontakte kde dochádza k opotrebeniu obidvoch 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

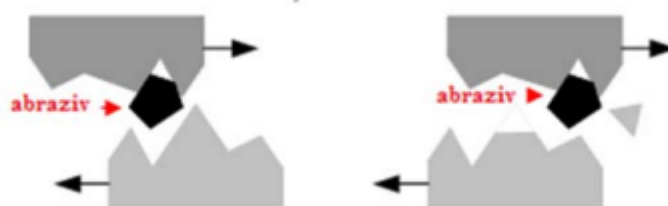
K adhéznej opotrebeniu dochádza v mieste styku nerovností funkčných povrchov pri vzájomnom pohybe. V oblasti styku povrchov dochádza k plastickej deformácii a k tvorbe mikrozvarov. Pri vzájomnom pohybe dochádza k porušeniu mikrozvarov, čo má za následok oddelenie materiálu z funkčného povrchu, kde je pevnosť nižšia. Extrémnym prípadom adhéznej opotrebenia je zadieranie. Typickým príkladom výskytu tohto opotrebenia sú klzné uloženia. [39]



Obr. 21 Adhézne opotrebenie [39]

2.2 ABRAZÍVNE OPOTREBENIE

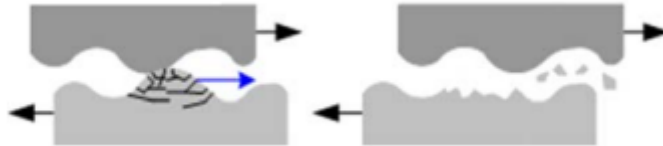
Abrazívne opotrebenie je charakterizované oddeľovaním častíc materiálu z funkčného povrchu ryhovacím účinkom tvrdého drsného povrchu druhého telesa alebo účinkom abrazívnych častíc. Typickým poškodením povrchu sú ryhy. Pri opotrebení čapov a klzných ložisiek vplyvom abrazívnych častíc, obsiahnutých ako 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. [40]



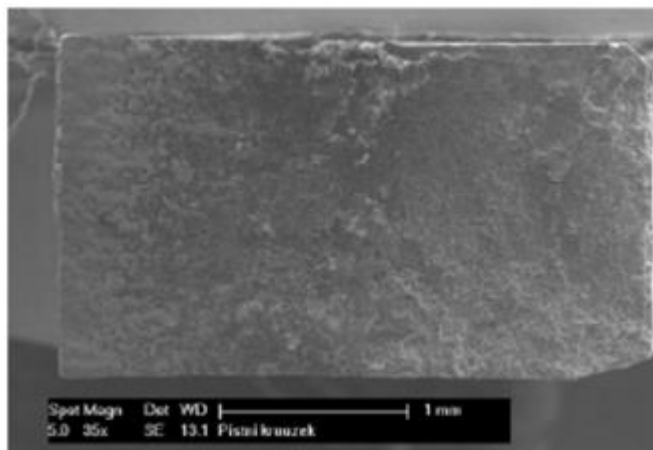
Obr. 22 Abrazívne opotrebenie [39]

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



Obr. 23 Únavové opotrebenie



styčných plôch a čo najmenšiemu výskytu inklúzií a iných materiálových chýb [10].

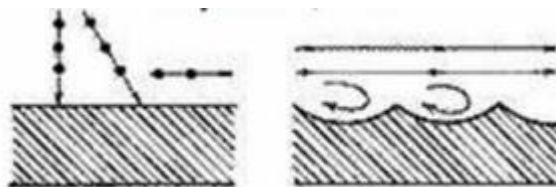
Obr. 24 Lomová plocha piestneho krúžku [41]

2.4 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. 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. [9]

2.5 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. [42]



Obr. 25 Erozívne opotrebenie [42]

2.6 KAVITAČNÉ OPOTREBENIE

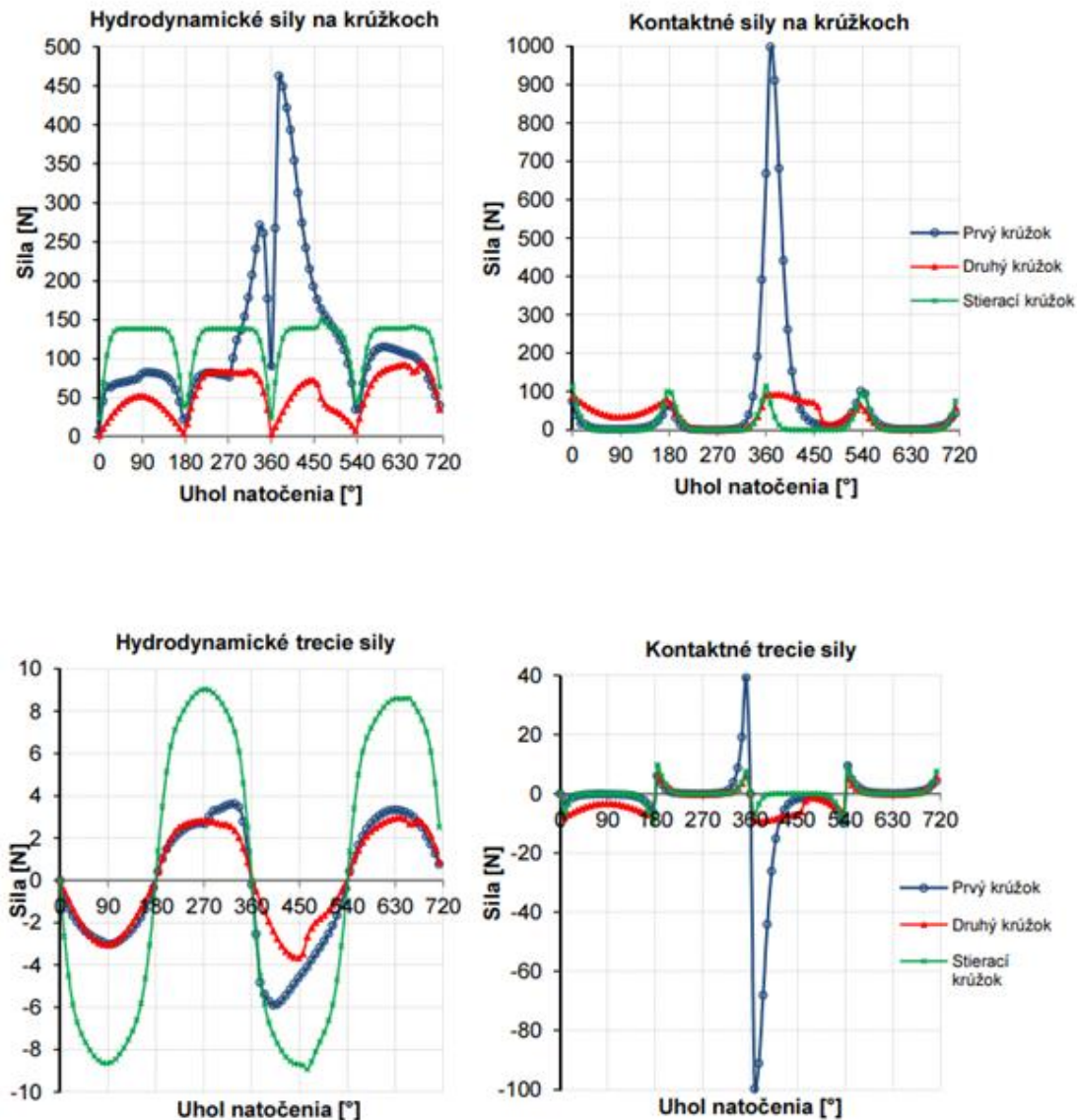
Kavitačné opotrebenie je charakterizované oddelovaním častíc a poškodzovaním povrchov časti strojov v oblasti zanikania kavitačných dutín v kvapaline. Kavitačné dutiny vznikajú pri náhlom poklese tlaku v kvapaline zmenou podmienok prúdenia. Pri zanikaní kavitačných dutín dochádza k vzniku hydrodynamických 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. [43]



Obr. 26 Kavitačné opotrebenie pláštu piestu [44]

3 MOŽNOSTI ZNIŽOVANIA TRECÍCH STRÁT PIESTNYCH KRÚŽKOV

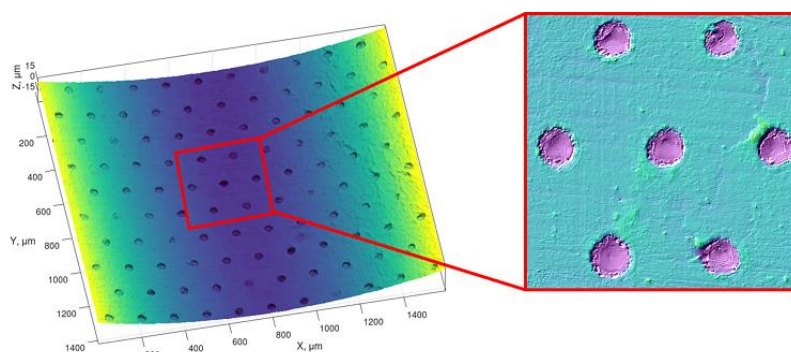
Ali a kol. [33] vo svojej práci poukazujú na zistenia že energia stratená v trení a opotrebení v kontakte piestnej skupiny a valca sa podieľa na celkových mechanických stratách hodnotou 40 až 50%.



Obr. 27 Hydrodynamické a kontaktné trecie sily v priebehu pracovného obehu pri 5000 min^{-1} [30]

Z priebehov grafov na obr.22 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 pritláča piestny krúžok k stene valca. Medzné mazanie nastáva vplyvom pokusu rýchlosti v hornej a dolnej úvrati pracovného obehu. [30]

3.1 LASEROVÉ TEXTUROVANIE POVRCHU



Obr. 28 Zväčšený texturovaný povrch [12]

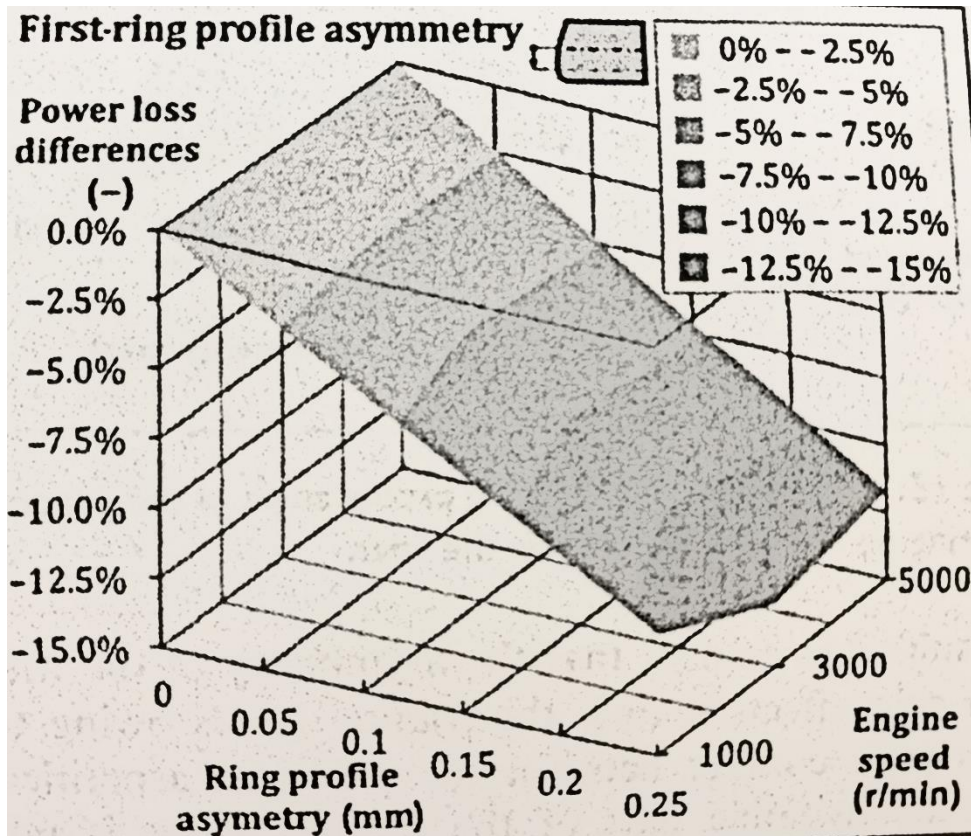
Technológia LST (Laser Surface Texturing) alebo laserové texturovanie povrchu vytvára na kontaktnej ploche piestneho krúžku textúru. Laser je z hľadiska výroby veľmi rýchly a presný a preto skraca čas na výrobu. Zároveň je pomerne ekologický. Laserové lúče sú schopné opracovávať aj veľmi tvrdé materiály ako napríklad keramika, kalená oceľ. [36] 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 častíc 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 lúču. 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 výrobcov automobilov udržať náklady na výrobu čo najmenšie a aj z tohto dôvodu sa technológia LST nepoužíva. [37]

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 textúrovaným povrchom dokázalo 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 μm . [36,37]

3.2 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. [30]

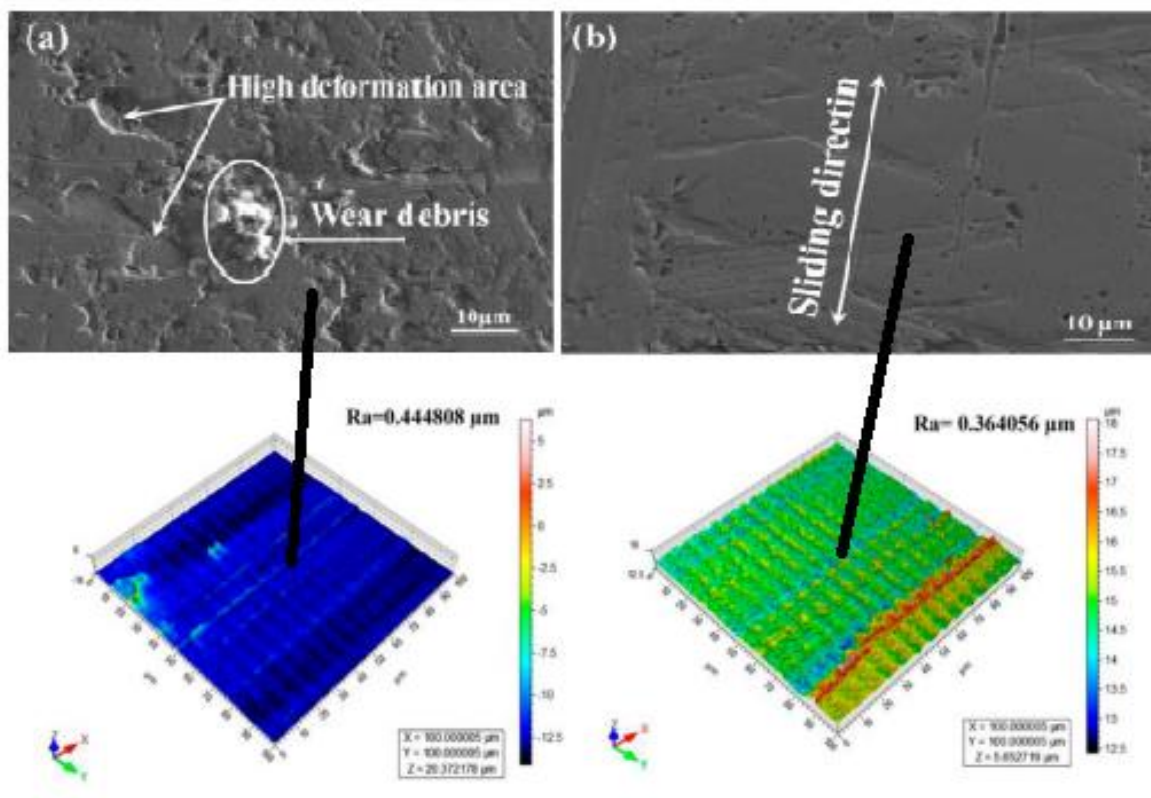


Obr. 29 Pokles trecích strát vplyvom zmeny geometrie prvého tesniaceho krúžku [30]

3.3 NANO ADITÍVA V OLEJI

V práci Ahmeda Elagouz a kol. [35] sa zaoberali trecím kontaktom medzi tesniacím piestným krúžkom a stenou válca. Práca sa zaoberá vplyvom nano častíc 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 znížilo koeficient trenia o 20 – 23 % a v prípade opotrebenia povrchov zlepšenie vlastností o 43 – 88%. Pridaním nanočastíc do oleja spôsobilo zvýšenie viskózneho indexu o 12% v porovnaní s referenčným olejom.[35]

Hlavným dôvodom zníženie opotrebenia je zlepšenie vzniku tribo filmu pomocou nanočastíc. V kontakte medzi piestným krúžkom a stenou valca vzniká efekt nano ložiska vďaka čomu je olejová vrstva schopná prenášať zaťaženie efektívnejšie a zabezpečiť oddelenie trecích plôch.[35]

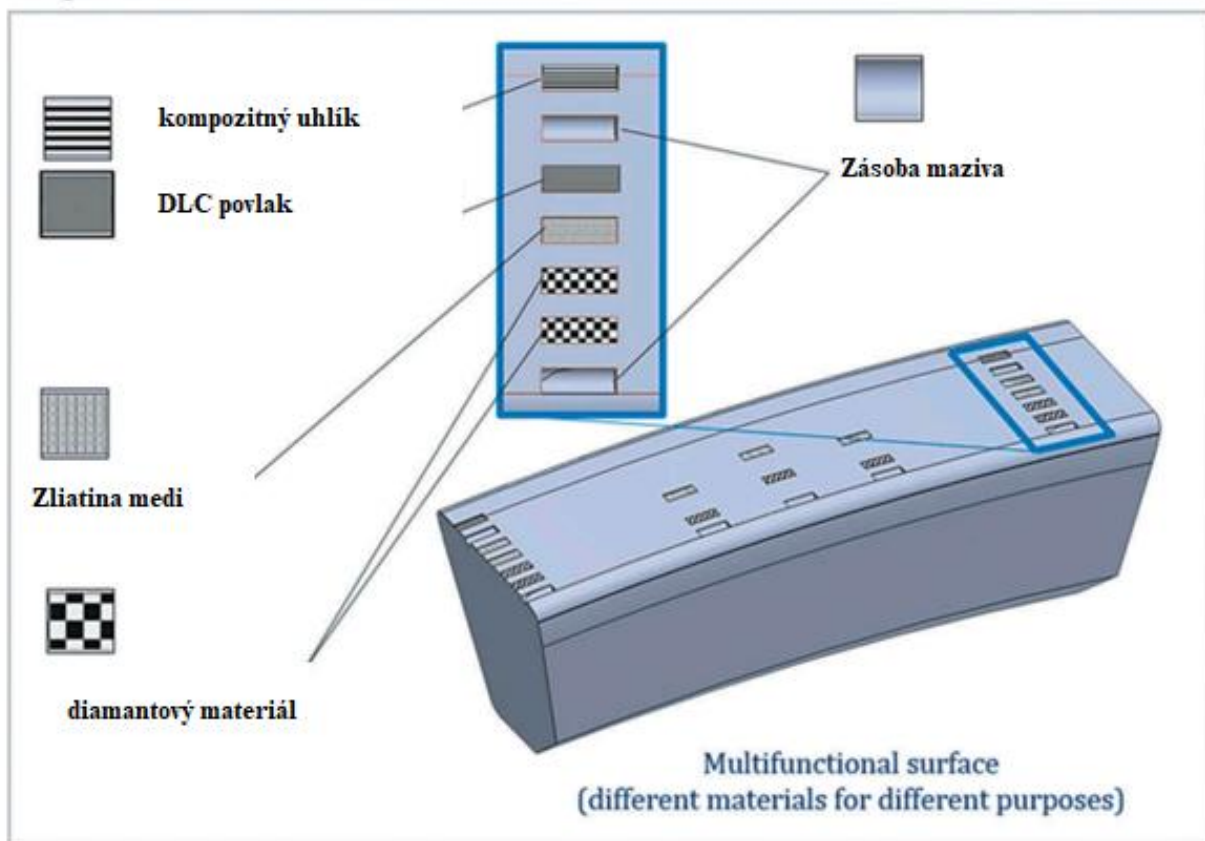


Obr. 30 Povrch v prípade použitia a) referenčného oleja b) nanočastíc ZnO [35]

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

3.4 POUŽITÍM MULTIFUNKČNÝCH VRSTIEV

Najmodernejší trend v znižovaní terčích 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.[34]



Obr. 31 Piestny krúžok s multifunkčnými vrstvami [34]

4 VLASTNÁ PRÁCA

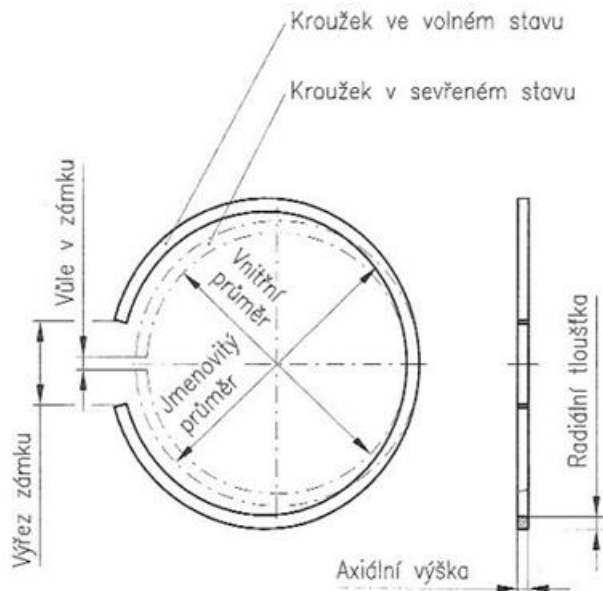
4.1 CIEĽ PRÁCE

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.

4.2 VÝROBA TESNIACICH PIESTNYCH KRÚŽKOV

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

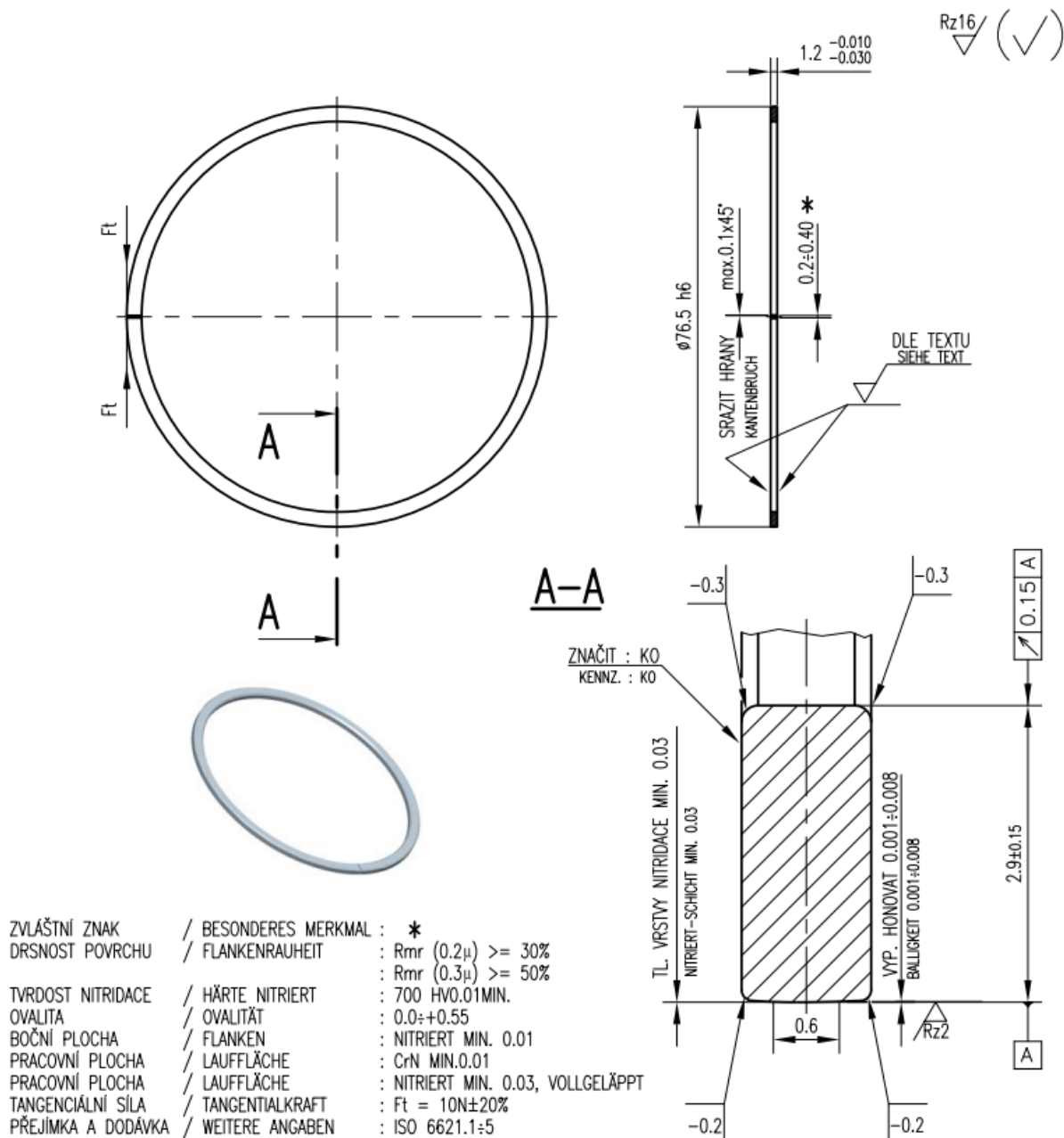
4.2.1 GEOMETRIA PIESTNYCH KRÚŽKOV



Obr. 32 Kontrolované rozmery 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. 33 Výrobný výkres piestneho krúžku

Tab. 1 Rozmery piestneho krúžku

Vnútorý priemer [mm]	Menovitý priemer [mm]	Axiálna výška [mm]	Radiálna výška [mm]	Vôľta zámku [mm]	Zrazenie hrán
70.7	76.5	1.2	2.9	0.2	0.1 x45°

4.2.2 VOĽBA MATERIÁLU PIESTNYCH KRÚŽKOV

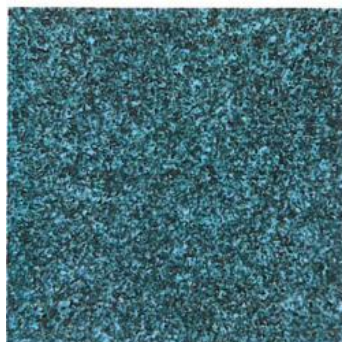
Na výrobu piestných krúžkov sme zvolili materiál vhodný na ďalšie chemicko-tepelné spracovanie a následne povlakovanie. Všetky testované piestne krúžky určené k následnému povlakovaniu sú z rovnakého základného materiálu. Zvolený materiál ktorý bol použitý pri výrobe piestných krúžkov je chrómová nehrdzavejúca ocel BS-13 určená k nitridovaniu povrchu. Nitridácia slúži ako nosný 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. 34 Štruktúra materiálu BS-13, lepané Nital, zväčšenie 500x

4.3 PROCES VÝROBY POLOTOVAROV PIESTNYCH KRÚŽKOV

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

- Natočenie drôtu obdĺžnikového prierezu
- Odelenie krúžku od zvitku, vzniká samostatný krúžok so zámkom
- Termofixácia v žihacej peci na trnoch
- Obrábanie na požadovaný rozmer
- Otriskanie
- 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. 35 Natočenie drátu piestneho krúžku

Obrábanie polotovaru piestneho krúžku

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



Obr. 36 Obrábanie piestnych krúžkov na požadovaný rozmer

4.4 PRÍPRAVNÉ OPERÁCIE PRED POVLA KOVANÍM

Príprava povrchu pred nitridovaním

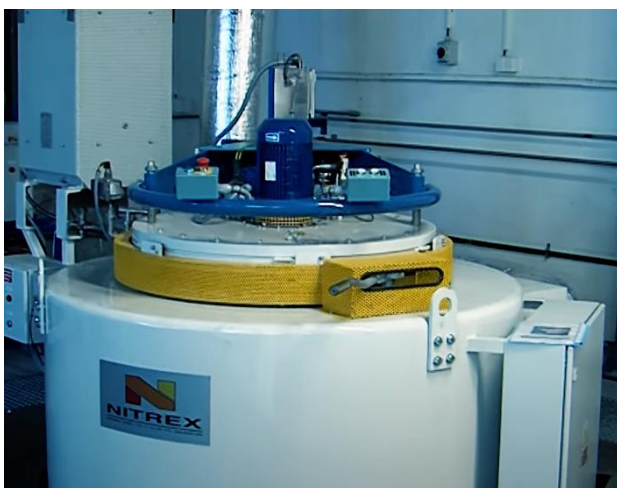
Prípravná operácie pred chemicko – tepelným spracovaním sa prevádza otryskaním povrchu piestnych krúžkov z dôvodu odstránenia oxidačnej vrstvy, ktorá vzniká za prítomnosti kyslíka na vzduchu. Otryskanie povrchu zabezpečí aj zdrsnenie povrchu tryskaného piestneho krúžku. Toto drsnenie povrchu je vyžadované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

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 nežiaduca vrstva ktorú je nevyhnutné pred ďalším povlakovaním odstrániť.



Obr. 37 Nitridačná pec NITREX

Odstránenie epsylón vrstvy

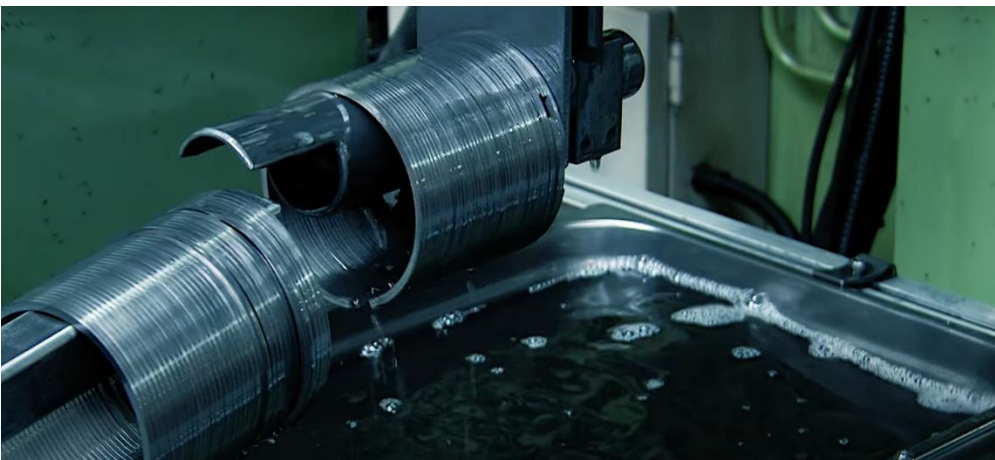
Epsylón vrstva je nežiadúca vrstva ktorá vzniká pri procese nitrídovania povrchu. Je to veľmi tenká vrstva v ktorej sa nachádza dusík vo veľkej koncentrácii. Z dôvodu vysokého obohatenia dusíkom je epsylon vrstva veľmi tvrdá a krehká. Čo spôsobuje nedostatočnú príľnavosť finálneho povlaku a jeho následné 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. 38 Pranie piestnych krúžkov s omývacími kameňmi

Príprava povrchu pred povlakovaním PVD, PECVD

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



Obr. 39 Čistenie piestnych krúžkov v ultrazvukovej pračke

4.5 VOĽBA POVĽAKOV 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 nitrídov **CrN**, **CrCN48** a na báze uhlíka povlak **DLC**.

Hlavnou prednosťou povlakov na báze nitrídov 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.

4.6 POVĽAKOVANIE PVD (PHYSICAL VAPOR DEPOSITION)

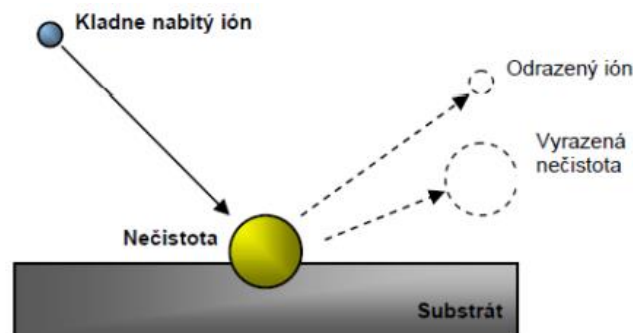
Proces povlakovania bol zabezpečený spoločnosťou STATON s.r.o.

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. Metóda PVD (physical vapor deposition) .

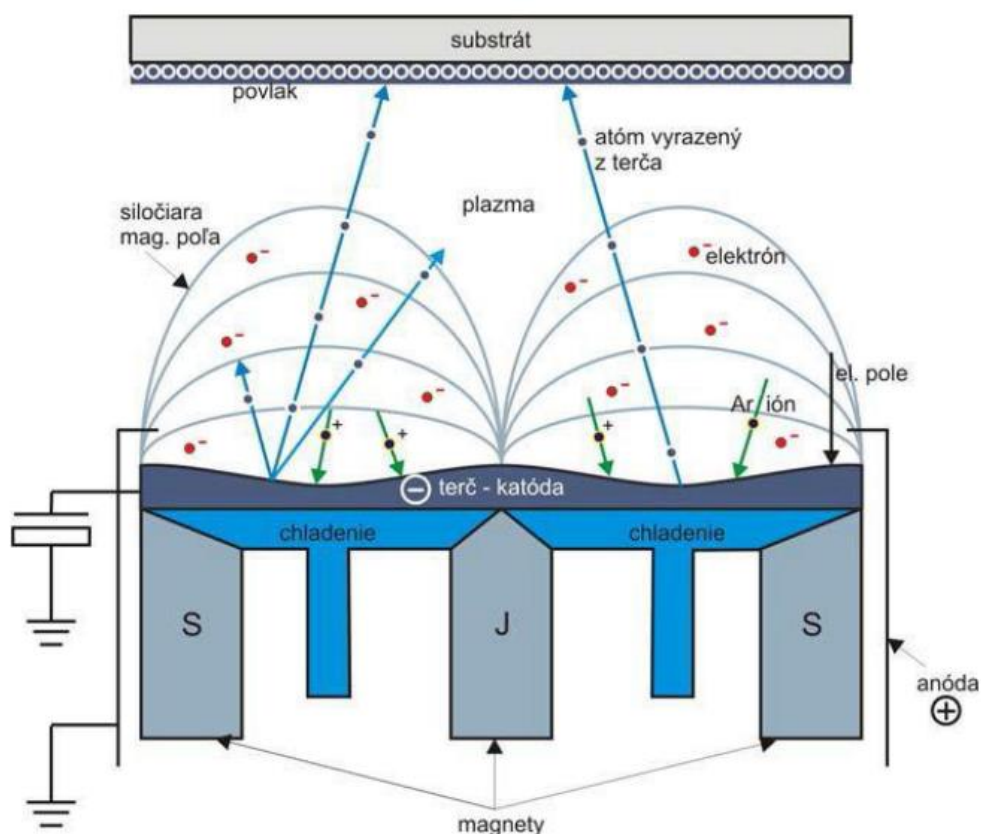
4.7 PROCES POVLAKOVANIA

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 povrch ktorý bude následne povlakovaný, čím vyrazia nečistoty z povrchu. 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.[22,23]



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 rozprášenia. 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. [24]



Obr. 41 Schéma magnetronové naprašovanie [25]

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. [26]

Zvyškové napätie v PVD povlakoch

PVD povlaky sú charakteristické zvyškovým napätím tlakového charakteru. S nárastom zvyškových tlakových napätí narastá aj tvrdosť povlaku. 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 [27, 28]:

- 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

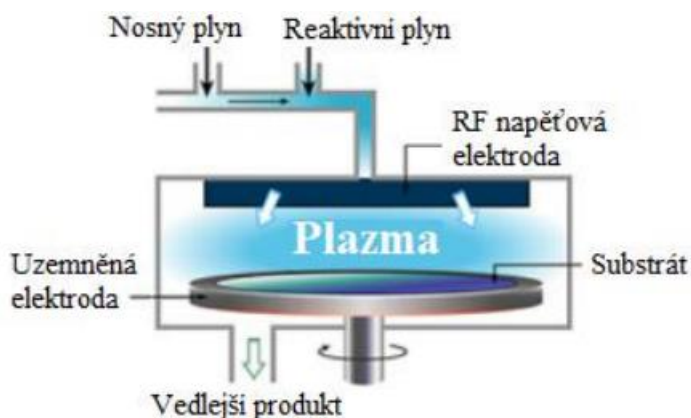
CrCN48 obsahuje rovnakú adhéznú vrstvu ako povlak CrN. Kde po nanosení adhéznej vrstvy je povrch následne povlakovaný uhlíkom, odparovanie uhlíku z terča zabezpečuje argón. Túto reakciu brzdí zmes plynov acetylénu a dusíku. Kde sa množstvo koncentrácie uhlíku v povlaku riadi pomerom inertného plynu acetylénu 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. Metóda CVD vyžaduje nižšie teploty procesu povlakovania. V prípade metódy CVD môže vysoká teplota spôsobiť poškodenie povlakovaného materiálu. [29]

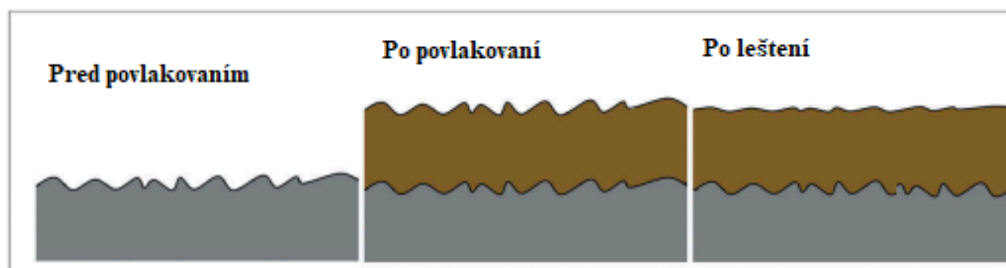


Obr. 42 Schéma povlakovania metódou PECVD [31]

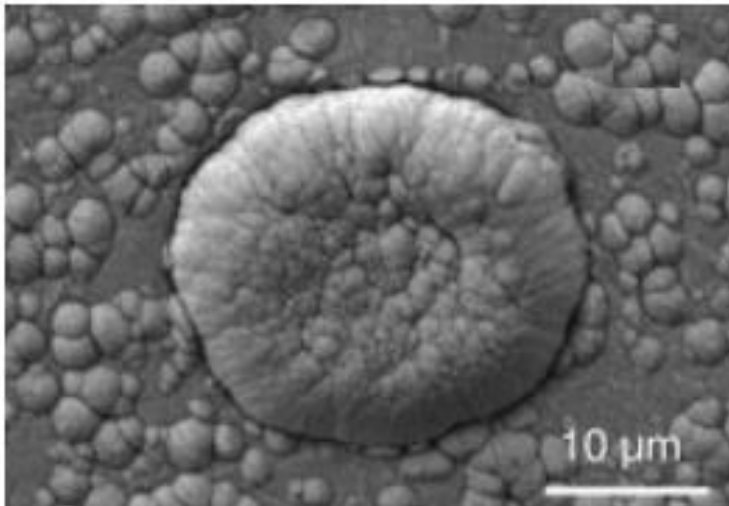
Finálna úprava po povlakovaní

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. 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.[21]

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.

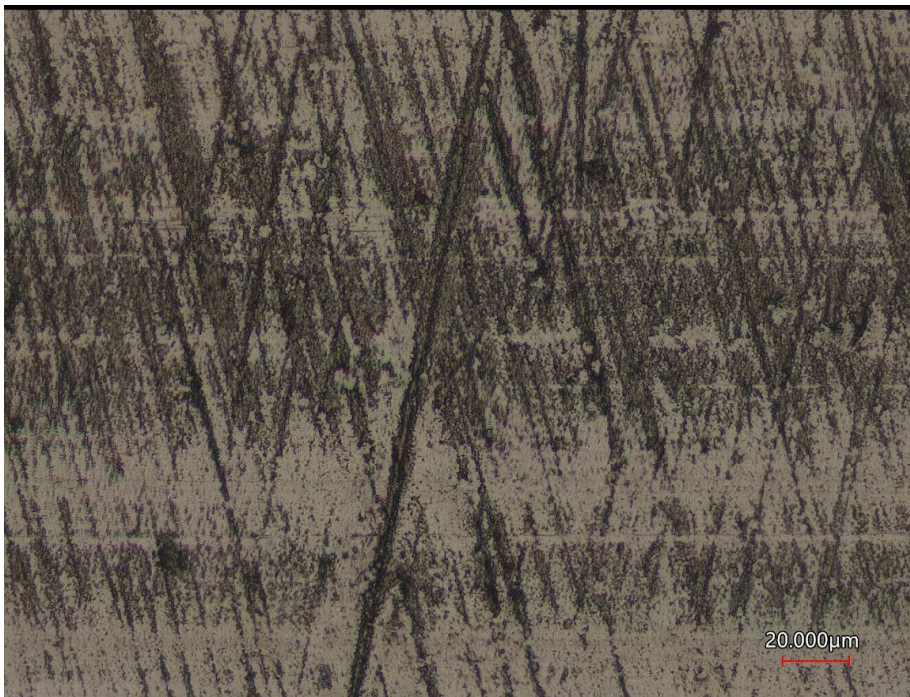


Obr. 43 Schéma drsnosti povrchov



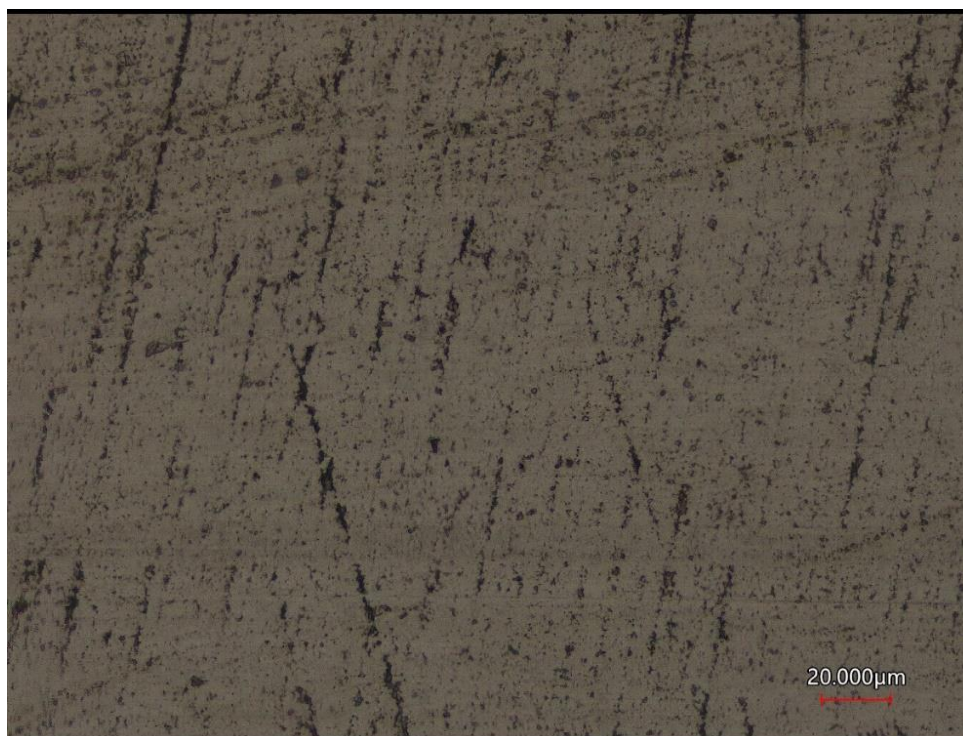
Obr. 44 Defekt na povrchu - Kvapka

4.7.1 FINÁLNY POVRCHU PIESTNYCH KRÚŽKOV PO POVLAKOVANÍ CRN



Obr. 45 Finálny povrch teniaceho piestneho krúžku s povlakom CrN

CrCN48



Obr. 46 *Finálny povrch teniaceho piestneho krúžku s povlakom CrCN48*

CrCN 47



Obr. 47 *Finálny povrch teniaceho piestneho krúžku s povlakom CrCN47*

DLC

Obr. 48 Finálny povrch teniaceho piestneho krúžku s povlakom DLC

Na obrázkoch 25 – 28 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 povlakov na povrchu ktoré vznikli kvôli nečistotám v priebehu povlakovacieho procesu.

4.8 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

4.8.1 VYTVORENIE VZORIEK NA TESTOVANIE POVLAKOV



Obr. 49 Použité vzorky, Zľava DLC, CrCN47, CrCN48, CrN

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

4.9 CALO TEST

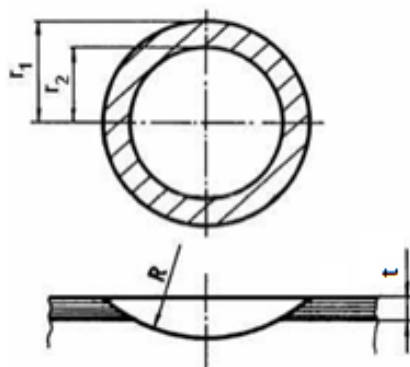


Obr. 50 Zariadenie CALOTEST CSM vľavo, Schéma calotestu vpravo

Zariadenie Calotest sme použili na overenie hrúbky povlaku. Meranie pozostáva z povlakovanej vzorky ktorú sme umiestnili pevne do čelustí. Po povrchu vzorky rotuje guľička 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:[20]

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

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



Obr. 51 Schéma vzniknutého výbrusu [20]

Výsledky Calo testu (hrúbky povlaku)

Tab.5 Výsledky calo testu

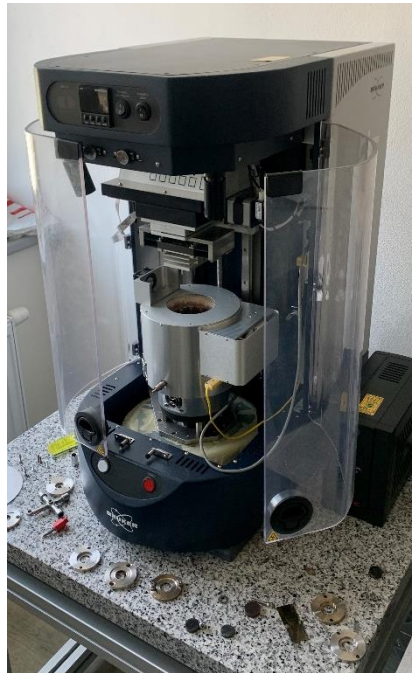
Povlak	Hrúbka povlaku [μm]
CrN	13
CrCN48	13
CrCN47	13
DLC	4

Zhodnotenie

Povlaky typu DLC majú zvyčajne hrúbku do 5 μm . Minimálna hrúbka povlaku je zapríčinená nízkou kohéznou 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 čo 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.

4.10 BALL ON DISK TEST



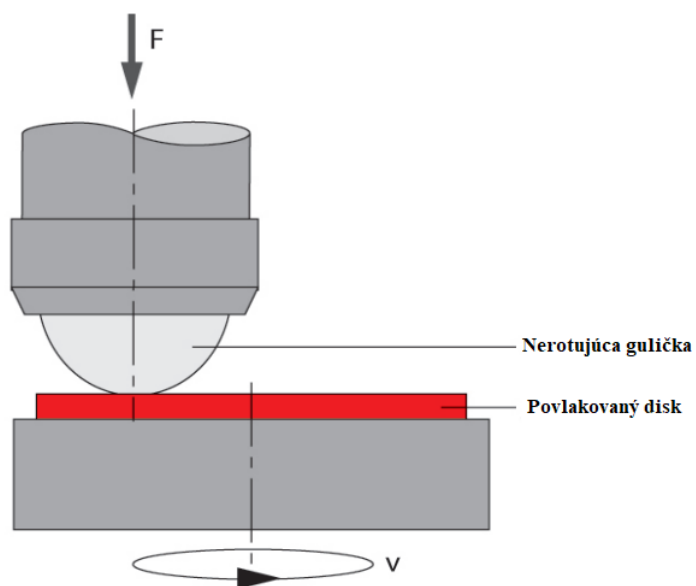
Obr. 52 Tribologické zariadenie Bruker UMT TriboLab

Ball on disk test sme uskutočnili na určenie koeficientu suchého trenia. Meranie sme uskutočnili na tribologickom zariadení Bruker UMT TriboLab. Meranie koeficientu trenia prebiehalo nasledovne:

- umiestnenia rotujúcej vzorky v našom prípade rotujúci disk ošetrený povlakom do rotujúcej hlavy prístroja
- Nastavenie hodnoty konštantného zaťaženia guličky 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

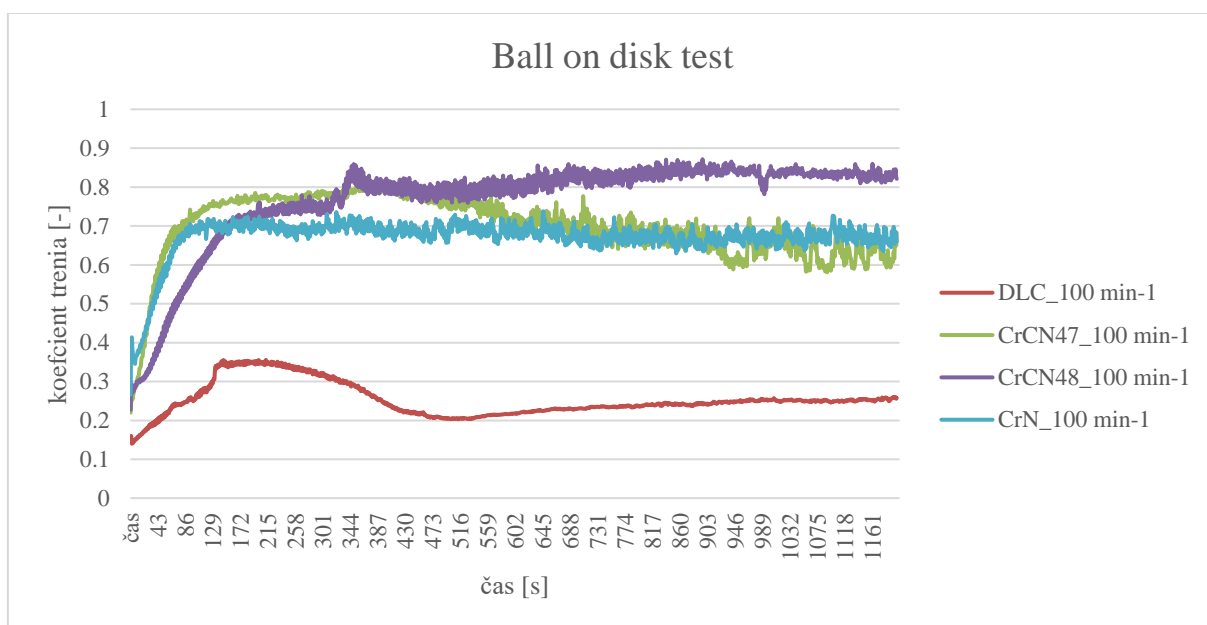
Nastavené hodnoty:

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

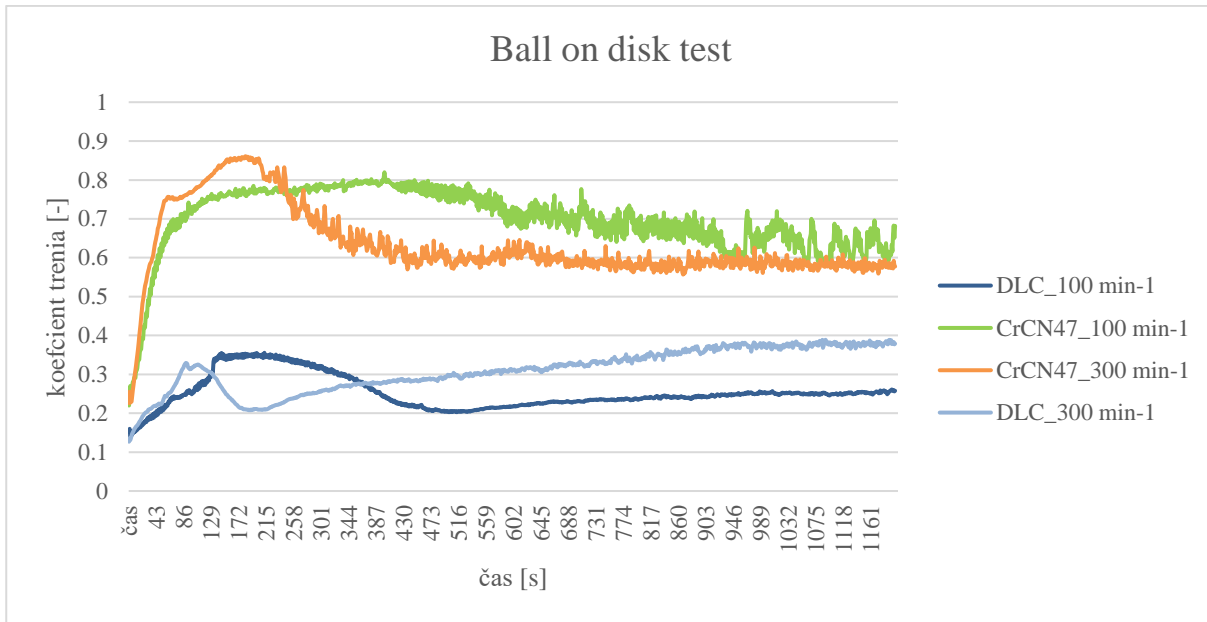


Obr. 53 Schéma ball on disk testu

4.10.1 VÝSLEDKY KOEFICIENTOV TRENIA



Obr. 54 Priebehy koeficientov trenia



Obr. 55 Priebehy koeficientov trenia DLC, CrCN47

Koeficient trenia bol meraný pri všetkých povlakoch za rovnakých podmienok.

Tab. 6 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 zjavné 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.

4.11 MERANIE MIKRODRSNOSTI



Obr. 56 Konfokálny 3D skenovací laserový mikroskop

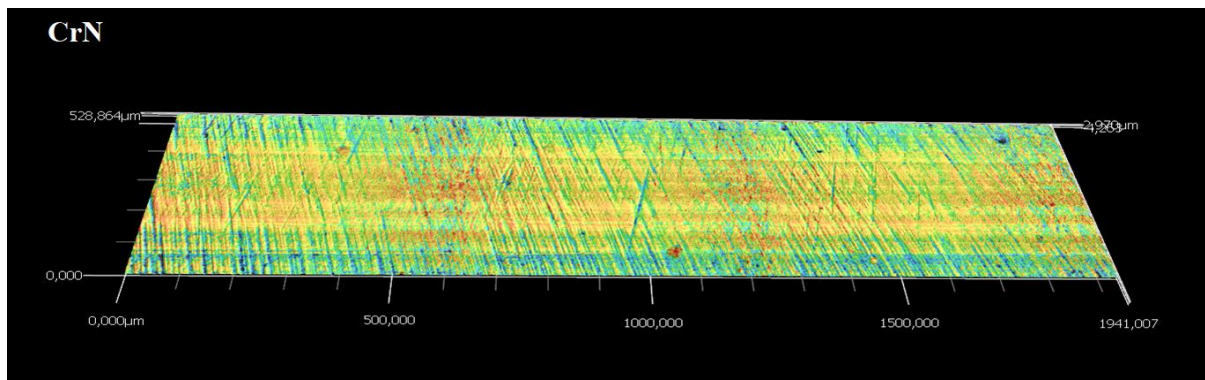
Na meranie som zvolil Konfokálny 3D skenovací laserový mikroskop. Vyznačuje sa presným a rýchlim laserovým skenovaním povrchu. Meranie mikrodrsností sme merali na Konfokálnom 3D skenovacom mikroskope priamo na kontaktnej ploche teniaceho piestneho krúžku.

Postup merania mikrodrsností:

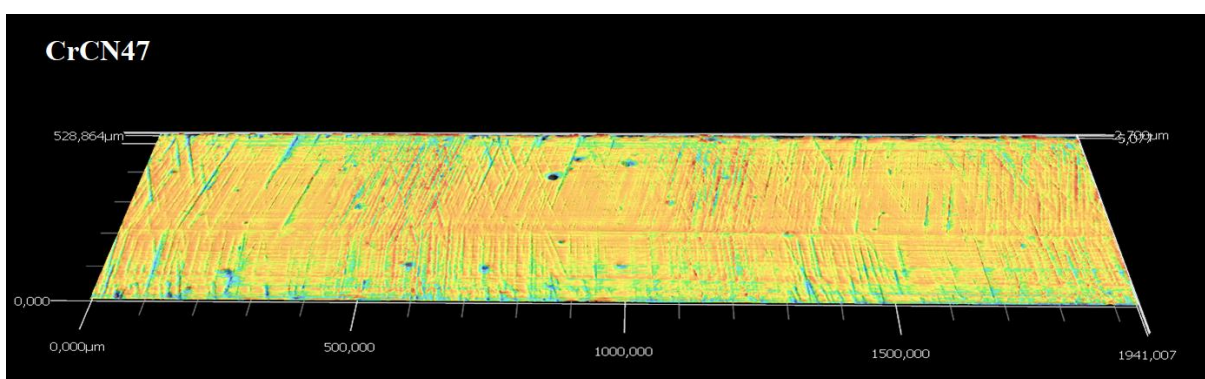
- Uchytenie piestneho krúžku na pracovný stôl mikroskopu
- Zaostrenie pozorovanej plochy
- Výber skenovanej plochy
- Skenovanie povrchu
- Vyhodnotenie mikrodrsností

Naskenovaný povrch piestnych krúžkov

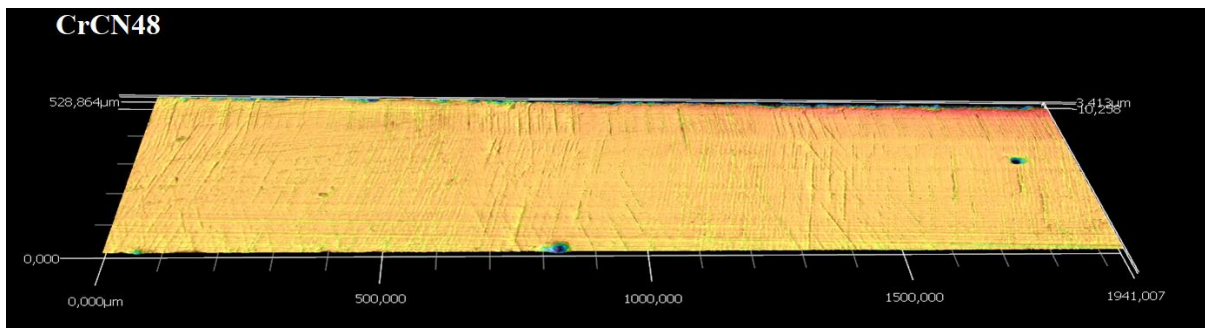
CrN



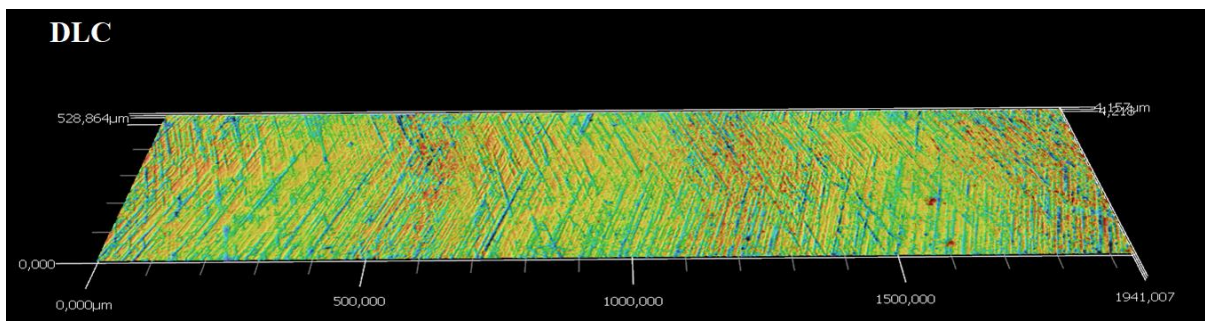
CrCN47



CrCN48



DLC



Obr. 57 Naskenované povrchy piestnych krúžkov

Výsledky merania mikrodrsností

Tab.7 Výsledky merania mikrodrsností

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

Zhodnotenie

Meraním mikrodrsností sme preukázali 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 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 bol zvolený 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. Drsnější 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 bol použitý na meranie koeficientu trenia, preukázal vynikajúce vlastnosti povlaku DLC, v porovnaní s ostatnými testovanými povlakmi. Meranie BALL ON DISK test, preukázalo o viac ako 50% nižší koeficient trenia 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.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MOTOR SERVICE TECHNICAL MARKET SUPPORT. Kolbenringe für Verbrennungsmotoren. 2. vyd. Heilbronn: MS Motor Service International GmbH, 2010, 80 s. ISBN 978-3-86522-491-0.
- [2] Rauscher, J., Spalovací motory. VUT FSI Brno, 2005.
- [3] ANDERSSON, Peter, Jaana TAMMINEN a Carl-Erik SANDSTRÖM. Piston ring tribology: A literature survey. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2002. ISBN 951-38-6107-4.
- [4] HRABÁK, V. a kol., Pístní kroužky, Konstrukce, výroba, provoz, Buzuluk Komárov, a.s., Charlie Hořovice, 2000
- [5] Federal Mogul, Piston Ring Handbook [online]. 2004, [cit. 2022-03-08]. Available at URL: .
- [6] 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
- [7] FEDERAL-MOGUL BURSCHEID GMBH. Piston Ring Handbook [online]. 2008 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <http://korihandbook.federalmogul.com/en/index.htm>
- [8] 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>
- [9] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Brno: VUT IUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [10] STACHOWIAK, G. a A. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, xxiv, 801 s. ISBN 07-506-7836- 4.
- [11] DETERS, L. Springer Handbook of Mechanical Engineering. Part B. [s.l.] : [s.n.], Tribology, 2009, s. 295-326. ISBN 978-3-540-491.
- [12] Arnaldo del Cerro D, Pelletier E, Karnakis D, Juste K and Cunha A. Towards industrial implementation of laser surface texturing as a tool for enhancing wear resistance and friction reduction on sliding surfaces. ILAS 2019: The 6th Industrial Laser Applications Symposium 20 to 21 March 2019, Crewe, UK.
- [13] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. Tribology International 42: 542–547 (2009).
- [14] Vlădescu, SC, Ciniero, A, Tufail, K, Gangopadhyay, A, & Reddyhoff, T. Optimization of pocket geometry for friction reduction in piston–liner contacts. Tribology Transactions, 61(3): 522-531 (2018).

- [15] Holmberg K, Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction* 5: 263-284 (2017).
- [16] EPARTRADE. "When Few Microns Can Change Everything" by Oerlikon Balzers In: Youtube [online]. 10. 12. 2021[cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=eUYUJHrfYDM>
- [17] Motorservice Group. How pistons work (3D animation) - Motorservice Group – In: Youtube [online]. 5. 9. 2016 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=IKLPvxSXAXw>
- [18] GGB. Improve Fretting Wear Resistance using Self-Lubricating Surfaces Webinar | GGB In: Youtube [online]. 22. 07. 2020[cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ch3OsF3PQhY>
- [19] 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 Osíčka PhD.
- [20] GRECZYNSKI, G. J., JENSEN, L., BOLZ, J., KOLKER, S., SCHIFFERS, BOBZIN, K., BAGCIVAN, N., IMMICH, P., BOLZ, S., CREMER, R., LEYENDECKER, T. Mechanical properties and oxidation behaviour of (Al,Cr)N and (Al,Cr,Si)N coatings for cutting tools deposited by HPPMS. *Thin Solid Films*. 517, 2008. s. 1251–1256.
- [21] Robert R. Aharonov, Manish Chhowalla, Suranjeeta Dhar, Raymond P. Fontana, Factors affecting growth defect formation in cathodic arc evaporated coatings, *Surface and Coatings Technology*, Volume 82, Issue 31996, Pages 334-343, ISSN 0257-8972, [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02773-4](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02773-4) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0257897295027734>)
- [22] JANČOVIČ, R. Trvanlivost' povlakovaných rezných nástrojov. Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Trnava 2010, 120 s.
- [23] PALDEY, S., DEEVI, S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 342, Issues 1–2, 2003, s. 58-79, ISSN 0921-5093. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00259-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00259-9).
- [24] 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>
- [25] TAKÁČ, L. Tvrdé nanoštrukturované vrstvy pripravené magnetronovým naprašovaním. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav materiálov, Vedúci práce: Ing. Marián Mikula PhD. –Bratislava; FMFI UK 2012.

- [26] CORNET, A. Physique et ingénierie des surfaces. Paris: EDP Sciences, 1998. ISBN 2-86883-352-7
- [27] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje [online]. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006, 192 s. Dostupné z http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.
- [28] GREĐIĆ, T., ZLATANOVIĆ, M. Plasma deposition of (Ti,Al)N coatings at various magnetron discharge power levels. *Surface and Coatings Technology*, Volume 48, Issue 1, 1991, s. 25-30, ISSN 0257-8972. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90125-G](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90125-G).
- [29] PLASMA-THERM. PECVD [online]. Poslední úpravy 2022-1-23 [cit. 2022-02-09]. Dostupný z: <http://www.plasmatherm.com/pecvd.html>.
- [30] 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.
- [31] DOW CORNING. Chemical Vapor Depositio: PECVD (Plasma Enhanced) [online]. ©2000-2015 [cit. 2022-01-09]. Dostupný z: http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicschem/etronics_newcvd_tutorial3.asp.
- [32] Теория ДВС. Теория ДВС: Поршневые кольца (обзор) In: Youtube [online]. 10. 12. 2015 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WvRxquSut6M&t=1254s>
- [33] Ali MKA, Xianjun H, Mai L, et al. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives. *Tribol Int.* 2016;103:540– 554.
- [34] Rita Ferreira a kol., Tribological solutions for engine piston ring surfaces: an overview on the materials and manufacturing. *MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES 2020, VOL. 35, NO. 5*, 498–520 <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1692352>
- [35] Ahmed Elagouz, Mohamed Kamal Ahmed Ali, Hou Xianjun, Mohamed A. A. Abdelkareem & Mohamed A. Hassan (2020) Frictional performance evaluation of sliding surfaces lubricated by zinc-oxide nano-additives, *Surface Engineering*, 36:2, 144-157, <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1620442>
- [36] Mound Laser & Photonics Center, Inc. MLPC. 4 [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://www.mlpc.com/>
- [37] Tribologie [online]. Liberec, 2000 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf

- [38] RYK, G., KLIGREMAN, Y., and ETSION, I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. *STLE Tribology*
- [39] KOPELIOVICH, Dmitri. Mechanisms of wear. In: *SubsTech* [online]. 7.4.2014 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php>
- [40] Droppa, P. - Marko M. - Pavlov, Š. – Štiavnický M. 2014. 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>
- [41] KŘIŽ, A. Analýza písních kroužků: Technická zpráva. ZČU, Plzeň,2012
- [42] Klimeš, P. 2003. Části a Mechanismy strojů II. Tribologie, ložiska, převody. Brno: Akadematické nakladatelství CERM. 70 s. ISBN 80-214-2422-2.
- [43] Bečka, J. 1997. Tribologie. Praha: Vydavatelství ČVUT. 212 s. ISBN 80-01-01621-8.
- [44] FAMFULÍK, Jan, Jana MÍKOVÁ a Radek KRZYŽANEK. Teorie údržby. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1509-1. Dostupné také z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/>
- [45] HRABÁK, Václav, Oldřich ŠPLÝCHAL, Miloš JEDLIČKA, Václav KASÍK, Antonín FRAIGTÁG, Stanislav ČÍŽEK a Václav PROCHÁZKA. Písní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz. 1. vyd. Komárov, 2012.
- [46] Hayden, T. – Ropes, Ch. – Rawdon, M.: The Performance of a Gasoline Friction Modifier Fuel Additive. SAE Technical Paper 2001-01-1961, ISSN 0148-7191, SAE International 2001.

