



Technologie pístních kroužků spalovacích motorů

Bakalářská práce

Studijní program:

Autor práce:

Vedoucí práce:

B0715A270008 Strojírenství

Jan Jakub Truhlář

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Technologie pístních kroužků spalovacích motorů

Jméno a příjmení: **Jan Jakub Truhlář**
Osobní číslo: S20000319
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s funkcí pístních kroužků spalovacích motorů.
2. Prostudujte materiál a výrobu pístních kroužků spalovacích motorů.
3. Podle možností na KSP, FS TUL proveďte metalografické hodnocení pístních kroužků.
4. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] HRABÁK, V. a kol. Pístní kroužky, konstrukce, výroba. Buzuluk Komárov, a.s. *Reprografické studium, s.r.o Charlie* Hořovice 2000.
- [2] BEROUN, S., PÁV, K. Vybrané statě z vozidlových spalovacích motorů. Skripta FS TU v Liberci, 2013.
- [3] NOVÁ, I. a I. NOVÁKOVÁ. Technologie I., [Skripta v elektronické podobě], FS,TU v Liberci 2019.
- [4] Články v odborných časopisech.
- [5] Technické materiály výrobců pístních kroužků (např. firmy Buzuluk Komárov).

Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 23. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

14. května 2022

Jan Jakub Truhlář

Abstrakt

Bakalářská práce řeší technologii výroby pístních kroužků spalovacích motorů. Práce je rozdělena na dvě základní části, část teoretickou a experimentální. Teoretická část práce je zaměřena na účel, druhy, konstrukci, materiály pístních kroužků, na charakteristiku jejich významných užitečných vlastností: odpovídající pevnost, dobré antikorozi vlastnosti, tepelnou stálost, dobré fyzikální vlastnosti a vyhovující výrobu a jejich další zpracování. V experimentální části byla provedena materiálová analýza tří pístních kroužků (kroužek z litiny s lupínkovým grafitem, kroužek z oceli a kroužek z litiny s kuličkovým grafitem s následným zušlechťováním). Byla sledována struktura pomocí světelné mikroskopie a byla hodnocena jejich tvrdost dle metody podle Vickerse.

Klíčová slova: pístní kroužek, technologie, materiál pístních kroužků, struktura, tvrdost.

Abstract

The bachelor thesis deals with the technology of production of piston rings of internal combustion engines. The work is divided into two basic parts, theoretical and experimental. The theoretical part of the work is focused on the purpose, types, construction, materials of piston rings, on the characteristics of their important useful properties: adequate strength, good anti-corrosion properties, thermal stability, good physical properties and suitable production and further processing. In the experimental part, a material analysis of three piston rings was performed (from cast iron with flake-like graphite, from steel and cast iron with spheroidal graphite with subsequent tempering). The structure was monitored by light microscopy and their hardness was evaluated according to the Vickers method.

Key words: piston ring, technology, piston ring material, structure, hardness.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval především vedoucí mé bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za velkou ochotu, vstřícnost, odborné vedení, cenné rady a trpělivost. Také bych rád poděkoval mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

1. ÚVOD.....	9
2. TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	10
2.1 Pístní kroužky spalovacích motorů.....	10
2.2 Funkce pístních kroužků spalovacích motorů	19
2.3 Materiály používané pro výrobu a nároky na užité vlastnosti	22
2.3.1 Nároky na užité vlastnosti pístních kroužků.....	22
2.3.2 Materiály používané na výrobu pístních kroužků.....	24
2.4 Povrchové úpravy pístních kroužků	32
2.5 Výroba pístních kroužků spalovacích motorů	33
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	35
3.1 Výroba polotovarů pístních kroužků	35
3.1.1 Charakteristika pískové formovací směsi pro výrobu etážových forem.....	36
3.1.2 Výroba bentonitových forem	37
3.1.3 Příprava taveniny	37
3.1.4 Výroba ocelových pístních kroužků	40
3.1.5 Dokončovací operace při výrobě pístních kroužků	41
3.2 Hodnocení struktury a tvrdosti pístních kroužků.....	41
3.2.1 Příprava vzorků pro metalografické pozorování	43
3.2.2 Pístní kroužek č. 1.....	44
3.2.3 Pístní kroužek č. 2.....	47
3.2.4 Pístní kroužek č. 3.....	50
3.2.5 Měření tvrdosti pístních kroužků.....	52
3.3 Shrnutí výsledků	56
3.3.1 Hodnocení mikrostruktury	56
3.3.2 Hodnocení tvrdosti.....	56
4. DISKUSE A SHRUTÍ VÝSLEDKŮ.....	58

5. ZÁVĚR	59
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61

1. ÚVOD

V současné době je věnována velká pozornost výrobním technologiím a zpracovaným materiálům, které mají uplatnění v automobilovém průmyslu. K těmto materiálům se řadí např. grafitické litiny, které mimo jiné, mají uplatnění např. při výrobě pístních kroužků. Pístní kroužky vyrobené z litiny s lupínkovým grafitem ošetřené povrchovou vrstvou chromu vykazují až o 200 % vyšší tvrdost než pístní kroužky neošetřené. V současné době je snaha vyrábět i pístní kroužky z vhodných ocelí.

Globální snížení emisí spalovacích motorů a tím i spotřeby paliva úzce souvisí se třením dílů spalovacích motorů, včetně soustavy pístní kroužek – válec. Spotřebu paliva lze snížit snížením tření mezi sestavou pístního kroužku a vložkou válce, což představuje téměř 20% ztrát motoru. Tření v sestavě kroužku – válec je způsobeno hlavně horním (kompresním) kroužkem. Při použití kuželového kroužku s negativním zkroucením v drážkách prvního, druhého a třetího pístního kroužku se značně snižuje tření pístní kroužek - válec, což snižuje spotřebu paliva a přispívá ke snížení emisí ze spalovacích motorů.

Není zcela známé, kdy byl poprvé použit samopružící pístní kroužek. James Watt použil v roce 1777 u svých parních strojů k utěsnění pístů kožené manžety, koudel nebo konopná lana, jak uvádí MUNDORF [22]. Angličan GRIEGER popisuje již v roce 1838 ve trojdílném příručním slovníku způsob výroby samopružících těsnících kroužků. Velmi jednoduchý tvar kovového těsnění, které se skládalo z litinového kroužku v jednom místě vyříznutém, který byl vnější válcovou plochou přitlačován na stěnu válce. V roce 1855 přihlásil Angličan Ramsbotton patent na výrobu těsnících kroužků s konstantním přtlakem na stěnu válce po celém obvodu. Rozvoj ve vývoji pístních kroužků nastal v roce 1872, kdy Otto a Langer vynalezli spalovací motor, který vyžadoval také odpovídající konstrukci pístních kroužků. V roce 1897 Robertson vyvinul mechanicky tvářené ocelové pístní kroužky, které také používal Diesel u svých prvních motorů. Tyto kroužky vykazovaly velmi dobrou tvarovou stálost i při vysokých provozních teplotách. Dále byly známé pístní kroužky od firmy Mahle, GmbH (Stuttgart, Německo), která je dnes jedním z 20 největších dodavatelů dílů spalovacích motorů. V České republice se již od poloviny 20. století výrobou pístních kroužků spalovacích motorů zabývá firma Buzuluk – Koma, a.s. Komárov [1]. Také výrobou a vyhodnocením kvality pístních kroužků se zabývá tato bakalářská práce, která je zaměřená na téma: „Technologie pístních kroužků spalovacích motorů“.

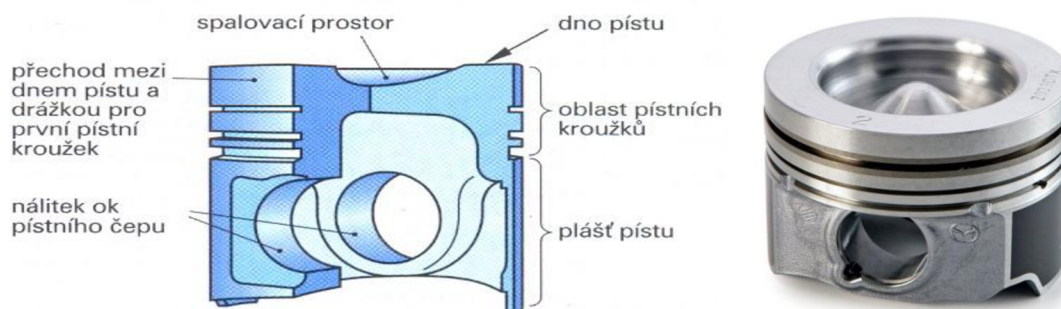
2. TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

2.1 Pístní kroužky spalovacích motorů

Co jsou pístní kroužky spalovacích motorů, kde se nacházejí a k čemu slouží? V případě pístních kroužků se jedná o sice miniaturní součástku spalovacího motoru, avšak svou funkcí pro motor a jízdu vozidla zcela nepostradatelnou. Pístní kroužky spalovacích motorů představují konkrétní část motorového pístu, jejíž úkol spočívá především v utěsnění spalovacích prostor, a zároveň má motorový píst oddělit od spodní části motoru, kde se pak nachází další nepostradatelné součásti motoru, konkrétně kliková hřídel a olejová náplň. Samotný píst se musí volně pohybovat ve vložce válce a nemůže být tedy na příliš těsně přilehlý. Současně je také píst stranově namáhán, především kvůli samotné konstrukci převodu pohybu pístu na klikovou hřídel pomocí ojnice [2].

Těsnost a zároveň volnost uložení pístu představuje pro jeho funkci zcela zásadní záležitost, a při opravách či výměnách této součástky je nezbytné, aby byl píst uložen ve zcela správné poloze. Pokud by píst pístními kroužky nedisponoval, zapálená směs paliva by jej obtékala (a to až do klikové skříně), a současně by olejová náplň ze skříně stříkala i do spalovacího prostoru. Při absenci pístních kroužků by nebyl zaručen správný chod motoru a ten by tak dlouho nefungoval. Pístní kroužky tvoří dynamické utěsnění pístu při jeho pohybu válcem. Pístní kroužky musí být schopné pojmout rozdíly v úhlu naklonění pístu během jeho pohybu mezi úvratěmi, a dále také musí zvládnout vyrovnat se se změnami rozměrů způsobené širokým rozsahem provozní teploty spalovacího motoru [1].

V současné době jsou na osobní automobily kladeny neustále větší nároky, s čímž se navyšují i požadované výkony spalovacích motorů, a tím se samozřejmě zvyšují i nároky na konstrukci celé pístní skupiny, v rámci které mají své nepostradatelné místo i v této bakalářské práci probírané pístní kroužky spalovacího motoru. Pístní kroužky pro v současné době využívané spalovací motory musí hladce a bez problémů pracovat, a především správně plnit funkce, pro které jsou určeny, a to ve velmi náročných podmínkách, mezi které můžeme jmenovitě zařadit například vysoké teploty při provozu samotného motoru, a přitom splňovat požadavky, které jsou na ně kladeny a vyžadovány pro správný chod samotného motoru. Během provozu spalovacích motorů může dojít k nejrůznějším technickým poruchám, které mohou být způsobeny právě poškozenými či netěsnícími pístními kroužky [2].



Obr. 2.1 Schéma a popis pístu spalovacího motoru s označením oblasti pro uložení pístních kroužků (vlevo), píst spalovacího motoru (vpravo) [3]

Jak můžeme vidět na výše uvedeném obrázku, dno pístu spolu s pístními kroužky a olejovým mazacím filmem spalovací prostor automobilu pohyblivě utěšňuje, což je prvořadý úkol celé pístní soustavy. Tvar dna pístu musí přispívat k vytváření nejlepších možných podmínek pro tvorbu, následné zapálení (popřípadě vznícení u vznětových motorů) a potřebné klidné hoření směsi paliva s přítomným vzduchem. Dno pístu má za úkol odvádět co nejméně tepla ze spalovacího motoru, a zároveň nesmí bránit potřebnému pohybu pístních ventilů. Píst se pohybuje ve válci přímovratným pohybem, při tomto pohybu se spoluúčastní na střídavém měnění objemu celého spalovacího prostoru. Píst navíc pohlcuje, a následně i přenáší vznikající tlaky, a to konkrétně prostřednictvím pístního čepu na ojnici a klikového hřídele [3].

Další součást pístní skupiny, plášť pístu, má za úkol zachycovat všechny vznikající boční a klopné tlaky. Dále má plášť pístu umožňovat přesné a přímovratné vedení pístu ve válci. Spolu s přítomnými pístními kroužky má za úkol odvádět většinu nevyužitého vznikajícího tepla, kterým je následně ohříváno dno pístu, na chlazenou stěnu válce. U dvoudobých spalovacích motorů píst svým pláštěm také obvykle řídí výměnu obsahu válce [3].

Pístní kroužky spalovacího motoru představují jakési kruhové pružné prvky s vysoce expanzivními silami. Hlavní funkci pístních kroužků představuje především poskytování utěsnění plynů ve spalovacím prostoru motoru, následné odvádění tepla z pístu do stěn válce, a také řízení konkrétní výšky mazací olejové vrstvy mezi pláštěm pístu a stěnou válce. Pístní kroužky se pak rozdělují na kroužky těsnicí a stírací [4].

Čemu jsou pístní kroužky ve spalovacím motoru konkrétně vystavovány? Při provozu spalovacího motoru jsou pístní kroužky neustále namáhány například setrvačnými silami, silami od tlaku vznikajících plynů a následným a neustálým třením o stěnu válce

spalovacího motoru. Tato směs vznikajících sil pak působí na kroužek, který je ve stejné době ohřátý na poměrně vysokou teplotu. Z toho důvodu je více než nutné zajistit odpovídající a potřebnou funkčnost a životnost pístního kroužku [4].

Co tedy konkrétně od pístního kroužku vyžadujeme a jaké mají být jeho konkrétní vlastnosti, takové, aby mohl plnit svou funkci? [1]:

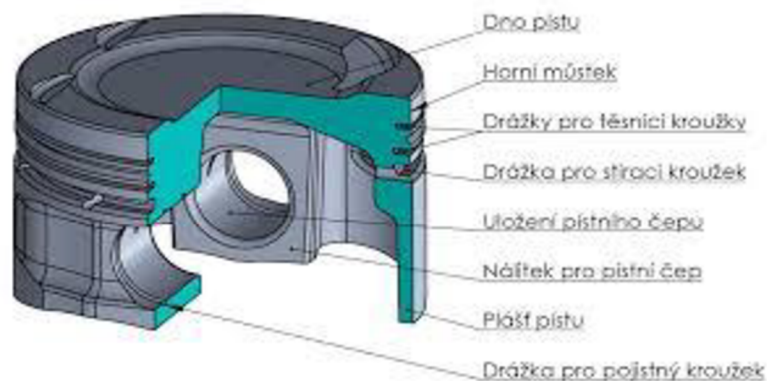
- vyžadujeme odvedení určité části vznikajícího tepla z celkové pístní soustavy,
- vyžadujeme schopnost regulovat spotřebu přítomného motorového oleje,
- vyžadujeme krátkou dobu záběhu, aby mohl svou funkci plnit téměř okamžitě,
- vyžadujeme co nejlepší utěsnění celého spalovacího prostoru od prostor klikové skříně,
- vyžadujeme pouze malé ztráty, které jsou způsobené vznikajícím třením,
- vyžadujeme vysokou životnost pístního kroužku, a to i za nevhodných mazacích podmínek,
- vyžadujeme co nejmenší možnou hmotnost,
- vyžadujeme co nejmenší možnou cenu za soustavu pístních kroužků.

Jak jsme si již zmínili v rámci předchozích odstavců, pístní kroužky dělíme podle jejich prvořadých funkcí. Píst spalovacího motoru musí obsahovat hned několik pístních kroužků, přičemž všechny přítomné pístní kroužky nedisponují stejnými vlastnostmi a také od nich vyžadujeme vždy jinou funkci a službu. V rámci pístních kroužků rozlišujeme dvě základní skupiny, a to těsnicí a stírací pístní kroužky.

Těsnicí pístní kroužky spolu s olejovým mazacím filmem utěsňují spalovací prostor okolo pístu od prostoru klikové skříně. Hlavní úkol **stíracích pístních kroužků** spočívá především, jak již jejich název napovídá, ve stírání přebytečného motorového oleje směrem dovnitř pístu, odkud motorový olej může stékat do klikové skříně. Kromě svých hlavních funkcí, tedy konkrétně těsnění a stírání motorového oleje, pístní kroužky spalovacího motoru odvádějí vznikající teplo z pístu na chlazenou stěnu. Ke správnému utěsňování velmi přispívá přítomnost slabého olejového filmu [5].

I když bychom si to sebevíc přáli, nikdy nelze dosáhnout absolutní těsnosti, a to z důvodu potřeby či dokonce nutnosti jeho rozříznutí, a ponechání určité a nízké hodnotové stykové vůle neboli vůli v „záмку“. Ponechání jisté netěsnosti je potřebné především z důvodu tepelné roztažnosti materiálu a možnosti jistého pružení pístních

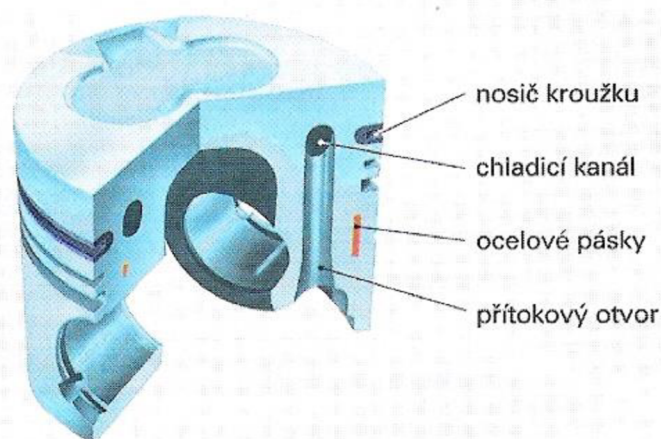
kroužků, a také přizpůsobení se funkční ploše válce. Ve volném stavu je průměr pístních kroužků větší zhruba o 0,1 až 0,15 průměru válce (>10–15 %) [5].



Obr. 2.2 Umístění pístních kroužků na pístu [7]

Budeme-li si pístní kroužky kupovat, představuje nejčastější možnost koupit je již v konkrétní sadě, která se obvykle skládá z dvou až pěti pístních kroužků. Tyto pístní kroužky již odpovídají typu a značce vozidla, do kterého je budeme instalovat. V sadě je vždy přítomen alespoň jeden těsnicí kroužek. Přesný počet pístních kroužků, přítomných na samotném pístu, pak závisí na přesném typu motoru, ale ve většině případů se jedná o dva až čtyři těsnicí pístní kroužky a žádný až tři stírací kroužky [1].

Kupříkladu, vysokorychlostní čtyřdobé dieselové motory vyžadují přítomnost dvou nebo tří těsnicích pístních kroužků a jednoho stíracího. I moderní, v současné době vznikající motory, využívají vesměs stejnou technologii, a to přítomnost tří pístních kroužků na konkrétním pístu, přičemž dva pístní kroužky patří do skupiny těsnicích a třetí kroužek do skupiny stíracích pístních kroužků [1].



Obr. 2.3 Umístění pístních kroužků na pístu [3]



Obr. 2.4 Sada pístních kroužků značky Kolbenschmidt [24]


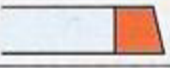



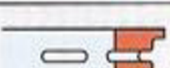
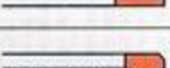
První neboli vrchní pístní kroužek představuje tzv. „kompresní“ pístní kroužek, jehož primární úkol spočívá v dokonalém těsnění samotného spalovacího prostoru. Těsnicí pístní kroužek těsně objímá motorový píst v jeho první drážce, čímž dokáže ideálně těsnit vznikající plyny rozpínající se nad samotným pístem. Těsnicí pístní kroužek je konstruovaný takovým způsobem, aby byl schopen ideálně využívat tlaku vznikajících přítomných plynů [6].

Zvyšující se tlak vznikající ve spalovacím prostoru tak tlačí první pístní kroužek směrem dolů v drážce pístu, přičemž jej současně rozevívá. Touto skutečností je pak těsnicí pístní kroužek schopen dokonaleji utěšňovat píst ve vložce válce [6].

Kompresní pístní kroužky, přítomné, v současné době ve vyráběných spalovacích motorech, jsou vyráběny za použití nejmodernějších dostupných technologií, a to z důvodu dosažení nejvyšší možné teplotní a ořezové odolnosti. Kompresní pístní kroužky jsou nejčastěji vyráběny z ušlechtilé oceli, a dále povrchově upravovány plazmově deponovaným molybdenem, nebo tvrdým chromováním. Plazma-molybden poskytuje relativně měkkou a porézní povrchovou úpravu pístních kroužků se současně vynikajícími mazacími schopnostmi. Molybdenové kompresní pístní kroužky jsou schopné výborně držet přítomný tenký olejový film, zatímco tvrdochromovaný povrch představuje vysoce neporézní a velmi tvrdou povrchovou úpravu pístních kroužků spalovacích motorů [6].

Podle tvaru plochy těsnicího pístního kroužku pak rozlišujeme jeho mnoho různých druhů. Jmenovitě můžeme uvést těsnicí kroužek s válcovou těsnicí plochou neboli pravoúhlý těsnicí kroužek, pístní kroužek s kuželovou těsnicí plochou neboli minutový těsnicí kroužek, lichoběžníkový pístní kroužek neboli trapézový těsnicí kroužek,

lichoběžníkový pístní kroužek jednostranný, torzní kroužky, těsnicí kroužky ve tvaru „L“ nebo těsnicí pístní kroužky s nosem nebo také prostírací [7].

tvar pístního kroužku		zkratka	předpisy pro montáž	účel tvaru
průřez	označení			
	pravoúhlý kroužek (těsnicí kroužek)	R	možná v obou směrech	jednoduchá výroba
	těsnicí kroužek s kuželovým profilem (minutový)	M	strana kroužku označená "top" ve směru - dno pístu	zrychlení záběhu (většinou v první drážce)
	lichoběžníkový těsnicí kroužek (jednostranný)	Tr	kónická strana kroužku ve směru - dno pístu	zabránění uváznutí v drážce
	L-kroužek	LR	velký vnitřní \varnothing kroužku ve směru dna pístu, popř. horní hrana kroužku = hrana dna pístu	zesílený přítlak způsobený výfukovými plyny
	těsnicí kroužek s nosem (polostírací)	N	vysoustružený roh ve směru konec pláště	navíc stírání oleje
	stírací kroužek s olejovou štěrbinou (normální)	O	možná v obou směrech	stírání oleje a propouštění dovnitř pístu
	stírací kroužek s pružinou (expander)	SF	možná v obou směrech	vyšší přítlak, lepší stírání

Obr. 2.5 Typy těsnicích pístních kroužků podle tvaru své plochy [3]

Druhý pístní kroužek je pak navržen tak, aby pomáhal doplnit kompresní funkci prvního těsnicího kroužku spalovacího motoru, přičemž je však současně schopen stírat zbytky motorového oleje ze samotného povrchu válce. Přítomnost jakéhokoli množství motorového oleje ve spalovacím prostoru představuje vysoce nežádoucí jev. Pokud se motorový olej přeci jen dostane do spalovacího prostoru, po spálení onoho motorového oleje se ve výfukových zplodinách objeví zvýšené množství uhlovodíků, čímž dojde k tomu, že motor začne okamžitě spotřebovávat vyšší množství olejové náplně [6].

V pořadí třetí pístní kroužek spalovacího motoru nazýváme stíracím pístním kroužkem a jeho primární úkol na pístu spočívá v kontrolování množství olejové náplně přítomné pod pístem a v dokonalé izolaci spalovacího prostoru od olejové vany. Hlavní funkce stíracího pístního kroužku zůstává ale především, jak již jeho název napovídá, ve stírání motorového oleje ze stěny válce, k čemuž je samozřejmě velice sofistikovaně navržen. Většina stíracích kroužků je složená z více dílů. Vicedílný stírací kroužek se pak skládá z vrchní a spodní stírací lišty, načež je rozpínán expanzním kroužkem tvořeným ocelovou pružinou. Expanzní kroužek musí udržet svou dokonalou pružnost po velice dlouhou dobu a zároveň musí být schopen také odolávat korozi. Z těchto důvodů a

vysokých nároků na něj kladených představuje expanzní kroužek součástku velmi náročnou na design a výrobu [6].

Stírací pístní kroužky jsou samozřejmě vystavovány extrémně vysokému tepelnému a mechanickému opotřebování, z toho důvodu velmi záleží na správné vrstvě přítomného mazacího oleje na stěně válce. Stírací pístní kroužky spolu se dvěma přítomnými těsníci pístními kroužky rovnoměrně rozdělují přítomnou tenkou olejovou vrstvu po celé stěně válce. Stírací pístní kroužky jsou rozdělovány na základě jejich konstrukce do třech základních skupin, kterými jsou [7]:

- litinové pístní kroužky vytvářející přítlak na stěnu válce vlivem vlastní pružnosti,
- litinové nebo ocelové pístní kroužky se zvýšeným přítlakem pomocí pružiny,
- skládané pístní kroužky.

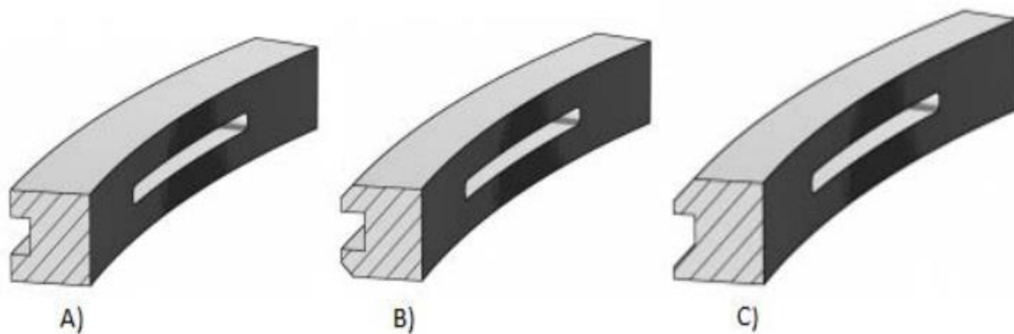
Jak již bylo několikrát zmíněno, stírací pístní kroužky slouží především ke stírání potencionálních nečistot, především motorového oleje z povrchu samotného pístu. Samotné těsnění, médium i válec jsou tak do velké míry chráněny před svým potencionálním poškozením. Stírací pístní kroužky jsou určeny pro montáž do uzavřené drážky. Jejich konstrukce zaručuje pevné usazení kroužku ve správné a požadované poloze [8].

Primární úkol **stíracích pístních kroužků** spočívá tedy především ve stírání přebytečného motorového oleje, a to směrem dovnitř pístu, odkud následně motorový olej stéká do klikové skříně. Mimo těchto hlavních funkcí, tedy těsnění a stírání oleje, pístní kroužky odvádějí i teplo z pístu na chlazenou stěnu. K dobrému utěsnění velmi přispívá i přítomnost úzké vrstvy olejového filmu. Je však nutné podotknout, že nikdy není možné dosáhnout absolutní těsnosti pístních kroužků, a to především z důvodu potencionální potřeby, nebo nutnosti rozříznutí pístních kroužků, a ponechání určité stykové vůle neboli vůle v „zámku“. Ponechání jisté stykové vůle na pístních kroužcích je nutné především z důvodu jejich tepelné roztažnosti, a zanechání možnosti jistého pružení pístních kroužků a přizpůsobení se funkční ploše válce. Ve volném stavu je průměr kroužků větší o 0,1 až 0,15 průměru válce (>10–15 %) [1].

Stírací pístní kroužky s výřezy jsou především charakteristické tím, že u nich dochází ke kontaktu dvou břitů s různými profily se stěnou válce. Tento typ stíracího pístního kroužku disponuje díky vysokému měrnému tlaku silným stíracím účinkem mezi břity a stěnou válce. Setřený motorový olej je následně odveden do drážky v pístu

středními výřezy v kroužku a vratnými otvory vnitřkem pístu do klikové skříně motoru. Tento typ stíracích pístních kroužků je v současné době u rychloběžných motorů nejčastěji pokrýván dodatečnou vrstvou tvrdochromu [7].

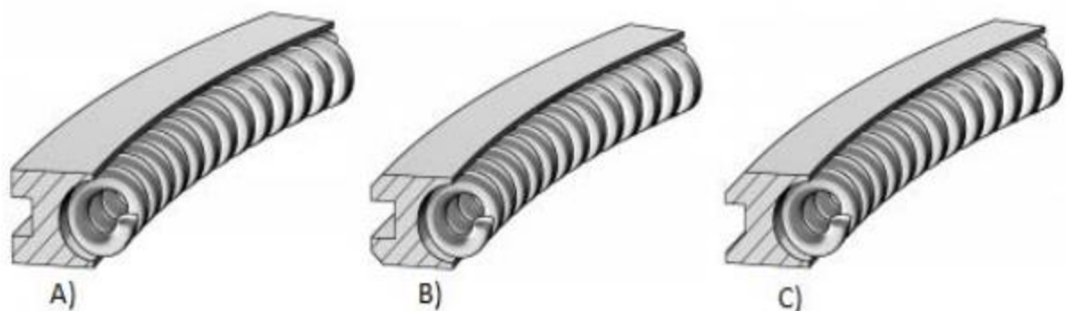
Tvrdé chromování neboli tvrdochrom představuje elektrochemický proces používaný k nanesení tenké vrstvy chromu na konkrétní podkladový materiál. Tvrdé neboli funkční chromování se používá především v aplikacích, u kterých je nutná a vyžadovaná vysoká tvrdost a ořezuvzdornost, nebo je nutné prodloužení životnosti konkrétních opotřebovaných dílů. Jednu z výhod tvrdého chromování představuje i možnost nanášet silné vrstvy, a z toho důvodu se tato metoda často používá na renovaci opotřebovaných částí a součástek [9].



Obr. 2.6 Stírací pístní kroužek A) s výřezem, B) s výřezem střechovitě zkoseným, C) s výřezy zkosenými [18]

Stírací pístní kroužek s výřezy a expanderem je složen z profilového pístního kroužku a spirálové pružiny. Při montování stíracího pístního kroužku na píst právě tato pružina způsobuje jisté napětí, které zvyšuje tlak z pístního kroužku na stěnu válce, a tím zlepšuje stírací vlastnosti celého stíracího pístního kroužku. Do spirály zakroucená pružina pístního kroužku bývá z důvodu snížení třecích ztrát mezi pístem a pístním kroužkem nejčastěji uložena v odolném teflonovém obalu [7].

Těsnicí materiál v podobě teflonu se používá především na kluzké plochy a kolejnice, a to ve všech odvětvích průmyslu. Mezi žádané vlastnosti teflonu patří především výborné překrytí či utěsnění elektrických a elektronických součástek. Teflon tak představuje suchý, čistý, oddělovací prostředek, současně brání vysychání potažených izolačních ploch a prodlužující životnost konkrétní součástky až na 300 % [10].



Obr. 2.7 Stírací pístní kroužek A) s výřezem a expanderem, B) se střechovitě zkoseným výřezem a expanderem, C) s výřezem zkoseným a expandérem [18]

Stírací pístní kroužek skládaný, jak již jeho název napovídá, se skládá hned z několika různorodých komponent. Konkrétně se tento typ stíracího pístního kroužku skládá ze dvou ocelových lamel a rozpínací pružiny. Ocelové lamely jsou zejména pro snížení svého potenciálního opotřebení pokryty opět vrstvou tvrdochromu. Tento typ stíracího pístního kroužku je velmi nízký a velmi lehký. V současné době se používají především u zážehových motorů osobních automobilů [7].

Tento typ stíracího pístního kroužku disponuje současně i konkrétní velkou nevýhodou, a to konkrétně faktem, že při opotřebování onoho pístního kroužku dochází k rychlejšímu poklesu přítomného měrného tlaku, čímž dochází ke spalování motorového oleje ve spalovací komoře, což má za důsledek razantní úbytek přítomného množství motorového oleje [7].



Obr. 2.8 Stírací pístní kroužek skládaný [18]

2.2 Funkce pístních kroužků spalovacích motorů

Abychom se dobrali přesné funkce pístních kroužků spalovacích motorů, zaměříme se nejdříve na celý mechanismus, ve kterém se právě píst a následně i pístní kroužky, nacházejí. V rámci této kapitoly se hierarchicky zaměříme nejdříve na klikový mechanismus, poté na pístní mechanismus, čímž se dobereme až funkce námi zkoumaných pístních kroužků.

Klikový mechanismus spalovacího motoru představuje nezbytnou a nutnou sestavu každého pístového spalovacího motoru. Klikový mechanismus slouží především pro přeměnu vznikajícího přímočarého vratného pohybu celé pístní skupiny na otáčivý pohyb klikového hřídele. Působením přítomného tlaku vznikajících plynů ze spalování paliva ve válci na píst pak získáváme konkrétní točivý moment na klikovém hřídeli. Na základě provedeného konstrukčního uspořádání celého klikového mechanismu pak rozlišujeme následující skupiny klikových mechanismů [11]:

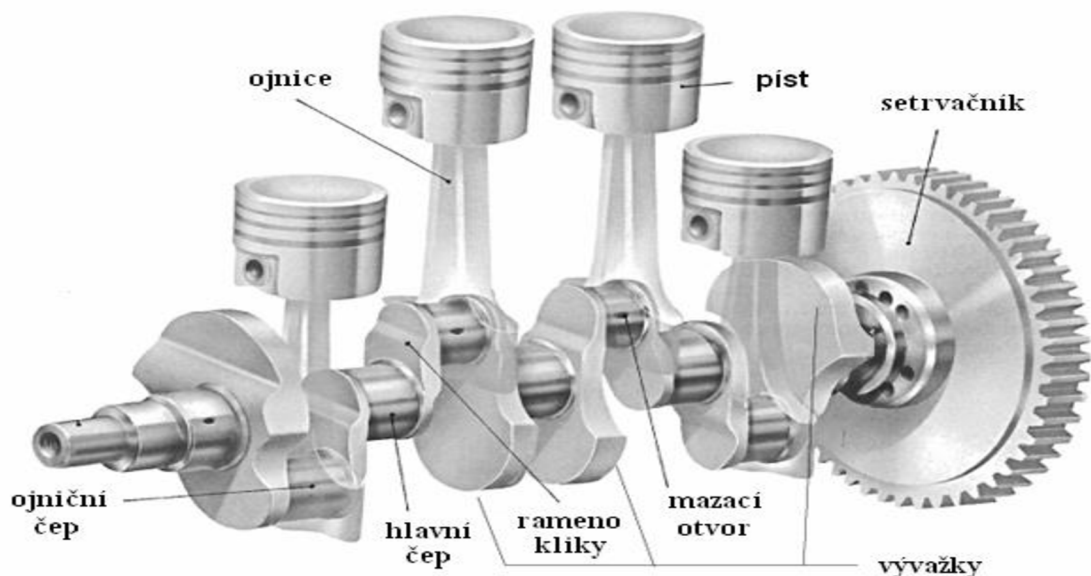
- centrické,
- excentrické,
- s vedlejší ojnicí.

Právě první zmíněný, centrický neboli osový klikový mechanismus, patří u současných automobilů k nejčastěji využívaným konstrukčním uspořádáním, konkrétně pak u spalovacích motorů. V případě centrického klikového mechanismu, jak již jeho název napovídá, je osa válce a kliky totožná. Na rozdíl od toho, excentrický neboli vyosený klikový mechanismus je charakteristický právě tím, že osa válce je posunuta vůči ose klikového hřídele. Nejkratší možnou vzdálenost mezi osami těchto dvou částí pak představuje tzv. excentricita neboli česky vyosenost. Excentricita může nabývat jak hodnot kladných, tak i záporných. Jaké hodnoty bude excentricita dosahovat závisí pouze na tom, na kterou stranu je orientována vzhledem k ose klikového hřídele a směru jeho otáčení [11].

S využitím druhé možnosti, tedy vyoseného konstrukčního provedení klikového mechanismu, může být ve vhodné míře zajištěno rovnoměrnější zatížení pláště pístu a stěny válce. Dále může být díky excentrickému provedení klikového mechanismu docíleno snížení třecích ztrát, čímž dochází k zvýšení výkonu celého spalovacího motoru, dále může být docíleno snížení spotřeby paliva a následných emisí spalovacího motoru. Poslední

možnost, klikový mechanismus s vedlejší ojnicí, je typický tím, že sestává z jedné ojnice mateřské a další ojnice vedlejší. Klikový mechanismus s vedlejší ojnicí je v současné době používán především u velkých drážních a lodních motorů, a to z hlavního důvodu, pro zmenšení jejich již tak vysoké hmotnosti a délky [11].

Z jakých konkrétních komponent je pak klikový mechanismus všech konstrukčních zařízení složen? Jednotlivé součástky klikového mechanismu představuje již zmíněný klikový hřídel, setrvačnick, řemenice, ojnice a touto bakalářskou prací zkoumaná pístní skupina [1]. Právě o funkci pístní skupiny v klikovém mechanismu spalovacího motoru si povíme v následujících odstavcích. Funkce pístu, pístní skupiny i pístních kroužků byla již zhruba nastíněna v rámci předchozích kapitol, nicméně se na tuto problematiku zaměříme ještě detailněji v rámci nadcházející kapitoly.



Obr. 2.9 *Klikový mechanismus spalovacího motoru [23]*

Pístní skupina klikového mechanismu spalovacích motorů vykonává neustálý posuvný pohyb ve válci, čímž přenáší sílu vytvořenou od vznikajícího tlaku spalovacích plynů dále na ojnici. Pístní skupina tak představuje jakéhosi převaděče vznikajícího tlaku, a to směrem od spalovacího prostoru na dále napojenou ojnici. Pístní skupina klikového mechanismu se pak konkrétně skládá z pístu, pístních kroužků, pístního čepu a pojistných kroužků. Píst představuje tepelně a mechanicky značně zatěžovanou součást klikového ústrojí. Píst a potažmo celá pístní skupina bývá vystavena opravdu vysokým teplotám

spalovacích látek, silám od tlaku vznikajících plynů ve spalovacím prostoru, a navíc i setrvačným silám rázového proměnného charakteru [12].

V čem konkrétně se liší písty spalovacích a zážehových motorů? Písty čtyřdobých vznětových motorů se liší od pístů zážehových motorů zejména svojí větší celkovou výškou, zesílenou tloušťkou stěn, a zároveň i větším průměrem pístního čepu. Hlavní části všech pístů pak tvoří dno pístu s vytvořeným spalovacím prostorem, plášť pístu, horní můstek, drážky pro pístní kroužky s nosičem v první drážce a nálitky pro pístní čep s drážkami pro jeho zajištění. Pro výrobu pístů se nejčastěji používají pevné a tvrdé hliníkové slitiny, které se následně povrchově upravují elektrochemickým nanesením dalších prvků, které výrazně zlepšují vlastnosti celého pístu, zejména pak jeho odolnost či opotřebení. Důležitý prvek úspěšného fungování pístu představuje chlazení této velmi namáhané součástky. Chlazení pístu se konkrétně provádí ostřikem maziva na vnitřní plochu z trysky nebo rozvodem maziva skrze vytvořený chladicí kanálek [12].

Hlavní funkci pístu v klikovém mechanismu spalovacího motoru představuje, jak již jsme si výše zmínili, roztáčení klikového hřídele přes ojnice, a dnem pístu zachytávání vznikajícího expanzní tlaku spálených plynů ve spalovací komoře. Písty svou polohou také oddělují ve všech pracovních cyklech motoru spalovací prostor od prostoru klikového hřídele. Aby mohl píst bez problému plnit všechny své funkce, musí především ve válci dobře těsnit a být dobře usazen [13].

V případě pístních kroužků se jedná o sice miniaturní součástku spalovacího motoru, avšak svou funkcí pro motor a jízdu zcela nepostradatelnou. Pístní kroužky spalovacích motorů představují konkrétní část motorového pístu, jejichž úkol spočívá především v utěsnění spalovacích prostor, a zároveň má motorový píst oddělit od spodní části motoru, kde se pak nachází další nepostradatelné součásti motoru, konkrétně kliková hřídel a olejová náplň. Samotný píst se musí volně pohybovat ve vložce válce a nemůže být tedy na příliš těsně přilehlý. Současně je také píst stranově namáhan, především kvůli samotné konstrukci převodu pohybu pístu na klikovou hřídel pomocí ojnice [1].

Pístní kroužky spalovacího motoru představují jakési kruhové pružné prvky s vysoce expanzivními silami. Hlavní funkci pístních kroužků představuje především poskytování utěsnění plynů ve spalovacím prostoru motoru, následné odvádění tepla z pístu do stěn válce, a také řízení konkrétní výšky mazací olejové vrstvy mezi pláštěm pístu a stěnou válce. Pístní kroužky se pak především rozdělují na kroužky těsnicí a stírací [4].

2.3 Materiály používané pro výrobu a nároky na užité vlastnosti

2.3.1 Nároky na užité vlastnosti pístních kroužků

Z informací, které se o pístních kroužcích uvádějí, vyplývá, že písty a celá pístová soustava všeobecně patří k vysoce namáhaným částem spalovacích motorů. Na písty působí neustále obrovské náporů tlaků, které vznikají spalováním pohonných hmot ve spalovací komoře, současně s neustálým vystavením tlakových náporů jsou písty vystaveny i velmi vysokým teplotám. Zejména jedna část pístu je vystavována vysokým teplotám a vysokému tlakovému náporu, konkrétně se jedná o dno pístu, na které působí expanzní tlak plynů vznikající po zapálení pohonné směsi. Budeme-li konkrétnější, pak písty musejí snášet teplotu mnohdy až 2200 stupňů, a zároveň expanzní tlaky o síle přes 8 MPa v případě vznětových motorů [1].

Hlavní předpokladem je, že písty ve válci musejí především dobře těsnit, v opačném případě, když píst nebude ideálně usazen a namontován, mohlo by dojít až k úplné ztrátě komprese na daném válci, a tím následně i k poklesu výkonu celého spalovacího motoru. Na druhou stranu ale nesmějí být písty ve válci usazeny příliš „natěsno“. Těsným přilehnutím pístu ke spalovacímu motoru by pak mohlo hrozit jejich zadření, případně i prasknutí, a to převažující vinou tepelné roztažnosti, která dosahuje poněkud vyšších hodnot než roztažnost litinových válcových jednotek [1].

I přes velkolepý a očekávaný příchod ocelových pístů na automobilový trh se v současné době u celé řady spalovacích motorů setkáváme s původními hliníkovými písty. V případě hliníkových pístů je však název poněkud zavádějící, jelikož se v jejich případě samozřejmě nejedná pouze o čistě hliníkové součástky. Pravdou je, že tento lehký kov, vznikající z bauxitu, je v těchto pístech sice převládajícím materiálem, kromě něj ale v hliníkových pístech najdeme také příměsi mědi, niklu, křemíku a hořčíku. Jedná se o takzvané legovací přídatné prvky, jejichž prvořadým úkolem je výrazně vylepšovat vlastnosti čistého hliníku, aby tak výsledný materiál vyhověl náročným požadavkům, které jsou na motorové písty kladeny odborníky [14].

V současné době dochází, jak jsme si již výše zmínili, k trendu, při kterém je právě hliníková směs pomalu nahrazována tvrdou ocelí. V případě pístů spalovacích motorů se tento těžký materiál na úkor lehkého hliníku prosazuje stále častěji. Svoji premiéru si ocelové písty odbyly na vznětových motorech těžkých užitkových automobilů. Z těchto

mohutných a těžkých motorů se však ocel postupně stala součástí i lehkých motorů osobních automobilů [14].

Je logické, že na materiál používaný u pístních kroužků spalovacích motorů je taktéž kladen velký důraz a vysoké nároky. Materiál používaný na výrobu pístních kroužků musí splňovat přesně dané požadavky stanovené v provozních podmínkách. Kromě toho by měl být materiál především vysoce odolný proti poškození, a to i při podmínkách stavu nouze. U pístních kroužků je vyžadována jejich extrémní pružnost a vysoká odolnost proti korozi materiálu pístního kroužku. Dále musí mít materiál dobré kluzné vlastnosti mezi materiálem stěny válce, a to i při nedostatečném mazání, a také malé opotřebení povrchu materiálu. Materiál musí být také lehce vyrobitelný a obrobitelný [12].

Materiál pro výrobu pístních kroužků musí dále disponovat vysokou odolností proti zadírání a disponovat dobrými kluznými vlastnostmi, především v systému kroužek – vložka válce. Velmi důležité jsou u pístních kroužků i parametry pevnosti a elasticity, protože pístní kroužek musí snést nápor neustálých vysokých nárazů, kterým je pístní kroužek vystavován od tlaků vznikajících ve spalovacím prostoru. Dále musí pístní kroužek disponovat i vysokou odolností proti potencionálním deformacím, ke kterým může dojít ať už při obrábění, montáži nebo v jeho sevřeném stavu. Na druhou stranu musí pístní kroužek spalovacího motoru vydržet i značné ohybové namáhání, a to jak při stlačení v provozním stavu, tak i při navlékání na píst [1].

Neméně důležitá je i protikorozní odolnost konkrétního použitého materiálu, a to zejména vůči vlivu paliva, oleje, spalin a nasávaného vzduchu. Vlivem všemožných nepříznivých vlivů, a to ani při vysokých ani při nízkých teplotách, nesmí kroužek vykazat změny své struktury, ztrátu pnutí nebo snížení své pevnosti. Vysoká teplotní vodivost je také jednou z podmínek, která je kladena na materiál pístního kroužku, a to z důvodu chlazení pístu. Dalším kritériem při výběru materiálu pístního kroužku je také ochrana motoru při běhu ve stavu nouze, jako je například dočasný chod bez lubrikace motorovým olejem, kdy nesmí dojít k poruše pístního kroužku a tím k potencionálnímu zadření motoru, tzv. samomaznost. Všechny tyto požadavky splňují především **kroužky litinové a ocelové** [1].

2.3.2 Materiály používané na výrobu pístních kroužků

Z důvodu, že je pístní kroužek důležitým konstrukčním prvkem pro zdárný chod spalovacího motoru, by v této souvislosti měl mít materiál pístních kroužků tyto vlastnosti: *Dobrou odolnost proti opotřebení*, při namáhání je hlavní těsnicí plocha pístního kroužku vystavena vysoké teplotě a skluzu kroužku po ploše válce. Proto by měl materiál vytvořit zrcadlově hladkou plochu a udržet si dobré kluzné vlastnosti s malým koeficientem tření. Současně by měl být materiál pístního kroužku necitlivý vůči tlakům. Tyto vlastnosti musí splňovat i boční plochy pístního kroužku.

Malý sklon k zadírání s proti materiálem válce, v důsledku vzniku karbonu nebo výskytu cizích částic v okolí pístních kroužků a vlivem vysoké teploty může být ohrožen skluz kroužků po stěně válce.

Zajištění dobré pevnosti, bez trvalé deformace musí pístní kroužek vydržet poměrně vysoké namáhání v ohybu, jak při stlačení, tak i v provozním stavu.

Dobré antikorozi vlastnosti, musí odolávat vlivům proti možné korozi, které mohou způsobovat spaliny, kyselost oleje i nasávaný vzduch.

Tepelnou stálost, kroužek nesmí měnit strukturu, pevnost ani příliš měnit své rozměry vlivem jeho zahřívání.

Dobré fyzikální vlastnosti, dobrou tepelnou vodivost, aby teplo bylo rychle odváděno z pístu do válce. Dále malou hustotu, aby při vratném pohybu vykazoval co nejmenší setrvačné síly.

Jednoduchou výrobu s nízkými finančními náklady, pokud se předpokládá výroba odléváním, pak musí mít materiál pístního kroužku dobrou slévateľnost, obrobiteľnost, popř. možnost aplikace povrchových úprav.

V současné době pro výrobu pístních kroužků spalovacích motorů se používá jemnozrnná litina s lupínkovým grafitem, litina s kuličkovým grafitem, ocel a spékané materiály.

V současné době je na světě mnoho výrobců pístních kroužků, u nás jsou známí výrobci: KOMA Buzuluk Komárov, firma GOETZE. Dále jsou to výrobci Kolbenschmidt, Federal Mogul, Glyco, Nüral Mahle, Nippon Piston Ring.

Na základě dlouhodobého výzkumu bylo zavedeno přesné definování materiálu pístních kroužků podle mechanických vlastností. U nás je nejnovější norma ČSN ISO 6621-3 „Pístní kroužky spalovacích motorů“. Specifikace materiálů podle této normy je uvedena v tabulce 2-1 a v tabulce 2-2.

Tabulka 2-1 Přehled materiálů pro výrobu pístních kroužků s uvedením hodnot potřebných mechanických vlastností (výběr z ČSN ISO 6621-3)

Třída	Mechanické vlastnosti [MPa]		Materiál a jeho charakteristika			
	Modul pružnosti	Minimální pevnost v ohybu	Druh materiálu	Minimální tvrdost	Další údaje	Podtřída
10	90 000	300	LLG	93 HBR	bez TZ	11
20	115 000	450	LLG	23 HRC	TZ	21
30	145 000	550	LK	25 HRC	TZ perlitická	31
40	160 000	600	TL	95 HRB	TZ perlitická	41
50	160 000	1 100	LKG	23 HRC	TZ martenzitická	51
60	200 000	neudáno	Ocel	38 HRC	CrMoV legovaná	61

Poznámka: Hodnoty jsou uvedeny jako průměr ze tří měření na jednom pístním kroužku. LLG (GJL) – litina s lupínkovým grafitem; LK – litina karbidická; LKG (GJS) – litina s kuličkový grafitem; TL – temperovaná litina; TZ – tepelné zpracování.

Tabulka 2-2 Přehled materiálů pro výrobu pístních kroužků s uvedením hodnot potřebných mechanických vlastností (ČSN ISO 6621-3)

Třída	Mechanické vlastnosti [MPa]		Materiál a jeho charakteristika			
	Modul pružnosti	Minimální pevnost v ohybu	Druh materiálu	Minimální tvrdost	Další údaje	Podtřída
10	90 000	300	LLG	93 HBR	bez TZ	11
	100 000	350	LKG	95 HRB	bez TZ	12
20	115 000	450	LLG	23 HRC	TZ	21
	115 000	450	LLG	28 HRC	TZ	22
	115 000	450	LLG	40 HRC	TZ	23
	115 000	500	LLG	32 HRC	TZ	24
	130 000	650	LLG	37HRC	TZ	25
30	145 000	550	LK	25 HRC	TZ perlitická	31
		500	LK	30 HRC	TZ martenzitická	32
40	160 000	600	TL	95 HRB	TZ perlitická	41
	160 000		TL	22 HRC	TZ martenzitická	42
	160 000		TL	30 HRC	TZ martenzitická	43
	160 000	1 000	TL	27 HRC	TZ karbidická	44
50	160 000	1 100	LKG	23 HRC	TZ martenzitická	51
		1 300			TZ martenzitická	52
				28 HRC	TZ martenzitická	53
				95 HRB	perlitická struktura	54
		97 HRB		55		
60	200 000	neudáno	ocel	38 HRC	CrMoV legovaná	61
	200 000	neudáno	ocel	40 HRC	CrSi legovaná	62
	200 000	neudáno	ocel	48 HRC	CrSi legovaná	63

Poznámka: Hodnoty jsou uvedeny jako průměr ze tří měření na jednom pístním kroužku. LLG (GJL) – litina s lupínkovým grafitem; LK – litina karbidická; LKG (GJS) – litina s kuličkovým grafitem; TL – temperovaná litina; TZ – tepelné zpracování.

Náš výrobce, KOMA – Buzuluk Komárov vyrábí pístní kroužky ve 4 podnikových normách, viz tabulka 2-3.

Tabulka 2-3 Přehled typů litin pro výrobu KOMA Buzuluk Komárov [1]

Označení materiálu	Norma KOMA	Struktura litiny		Mechanické vlastnosti		
		Grafit	Matrice	Tvrdość HRB/HBC	Pevnosť v ohybu R _{mOH} [MPa]	Youngův modul pružnosti E [MPa]
B – 0	42 0060	lamelární, místy až s různicovitým uspořádáním	perlit až s jemnými karbidickými vyloučeninami	95 až 107 (205 až 220)	≥ 350	85 000 až 115 000
B - 1	42 0061	lamelární, někdy až s mírným různicovitým uspořádáním	perlitická	93 až 103 (195 až 220)	≥ 300	75 000 až 105 000
B – 5 (legovaná s TZ)	42 0065	jemný lamelární grafit, místy až s různicovitým uspořádáním	martenzito-bainitická struktura	108 až 114 (300 až 380) (32 až 40 HRC)	≥ 500	100 000 až 130 000
B – 6 (LKG s TZ)	42 0066	zrnitý s minimálním množstvím nedokonale zrnitého až červíkovitého	jehlicovitá bainitická struktura	106 až 112 (280 až 360) (28 až 38 HRC)	≥ 1300	150 000

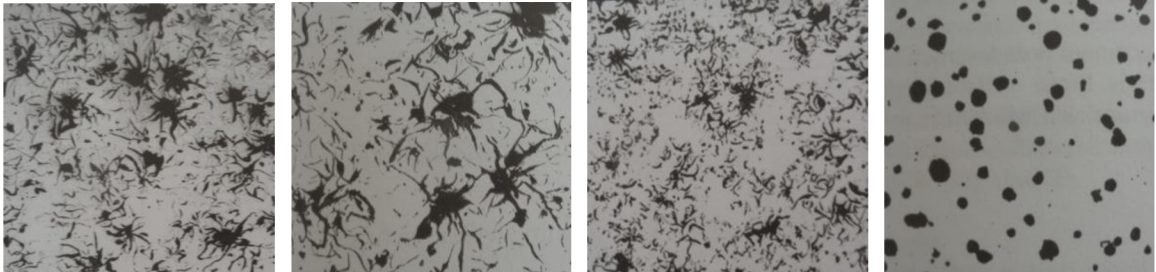
Poznámka: LLG (GJL) – litina s lupínkovým grafitem; LK – litina karbidická; LKG (GJS) – litina s kuličkovým grafitem; TL – temperovaná litina; TZ – tepelné zpracování.

V tabulce 2-4 je uvedeno chemické složení litin používaných pro výrobu pístních kroužků firmou KOMA Buzuluk Komárov, dnes Pisten Rings Komárov, dle tabulky.

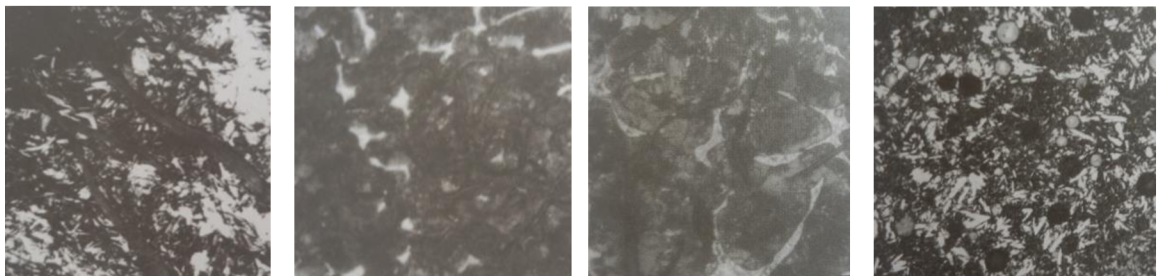
Tabulka 2-4 Chemické složení litin používaných pro výrobu pístních kroužků firmou KOMA Buzuluk Komárov [1]

<i>Chemické složení litin pro výrobu pístních kroužků ve firmě KOMA Buzuluk Komárov</i>				
Prvky	Hmotnostní % prvků v litině			
	Materiál B-0	Materiál B-1	Materiál B-5	Materiál B-6
Uhlík	3,4 až 4,0	3,4 až 3,9	3,3 až 3,8	3,2 až 4,0
Křemík	2,4 až 3,5	2,0 až 2,8	2,5 až 4,0	2,0 až 3,5
Mangan	0,5 až 0,8	0,5 až 0,9	0,5 až 0,8	0,30 až 0,60
Fosfor	0,4 až 0,6	0,4 až 0,6	≤ 0,35	≤ 0,30
Síra	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,05
Chróm	≤ 0,30	≤ 0,30	0,40 až 0,60	≤ 0,20
Níkl	≤ 0,30	≤ 0,30	0,50 až 0,80	-
Měď	≤ 0,30	≤ 0,30	0,80 až 1,20	-
Molybden	-	-	0,80 až 1,20	-
Vanad	-	-	0,10 až 0,30	-
Níkl + chróm	-	-	-	2,0
Ostatní	max. 0,2	max. 0,2	max. 0,2	max. 0,2

Na obr. 2.10 jsou uvedeny struktury grafitu pístních kroužků vyráběných firmou KOMA Buzuluk Komárov, dle tabulky 2-3 (v pořadí materiál B-0, materiál B-1, materiál B-5 a materiál B-6). Na obr. 2.11 je charakter základní kovové hmoty (matrice litiny) pro jednotlivé typy litin dle tabulky 2-3.



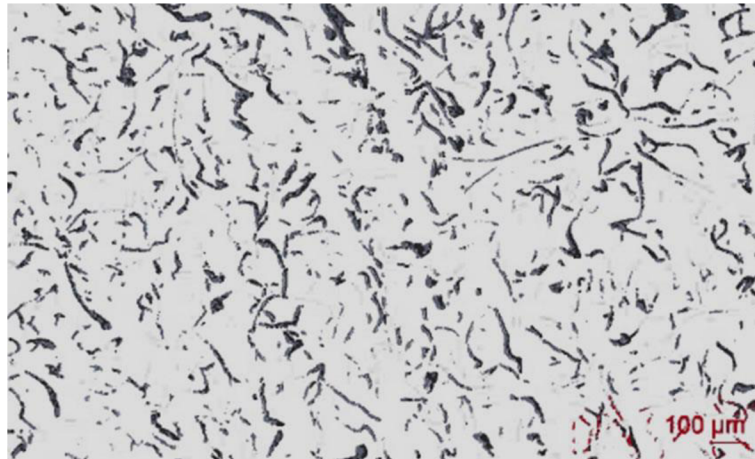
Obr. 2.10 *Struktura grafitu jednotlivých typů pístních kroužků vyráběných firmou KOMA Buzuluk Komárov, dle tabulky 2-3 (v pořadí materiál B-0, materiál B-1, materiál B-5 a materiál B-6), 100násobné zvětšení, [1]*



Obr. 2.11 *Struktura jednotlivých typů litin pístních kroužků vyráběných firmou KOMA Buzuluk Komárov, dle tabulky 4 (v pořadí materiál B-0, materiál B-1, materiál B-5 a materiál B-6), 500násobné zvětšení [1]*

Šedá litina nebo též litina s lupínkovým grafitem představuje slitinu železa s uhlíkem s obsahem uhlíku přesahujícím 2,14 %, obvykle bývá obsah uhlíku v železe v hodnotě kolem 3,5 %. Tento materiál obsahuje vysoký podíl křemíku, a to přibližně 2,5 %, malé množství síry, manganu a fosforu. Uhlík v této směsi vyloučen ve formě lamelárního grafitu v kovové matici. Použití šedé litiny v pístních kroužcích je výhodné zejména díky velmi dobrým vlastnostem grafitu, který se v ní nachází. Grafit se vyznačuje velmi dobrým mazáním za sucha, a je proto velmi vhodným materiálem pro starty anebo jiné chvíle, kdy je motor nedostatečně mazán. Grafit navíc funguje jako jakýsi zásobník

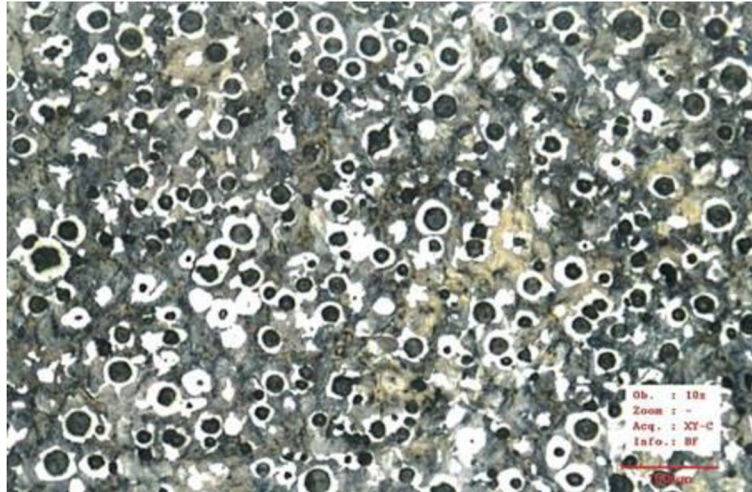
oleje, neboť se na něm olej usazuje, a i proto má šedá litina lepší mazací vlastnosti než jiné materiály. Lamelární tvar grafitu zajišťuje šedé litině dobrou tepelnou vodivost, která je u pístních kroužků vyžadována, zároveň však snižuje tažnost a pevnost v tahu a ohybu, ty však mají stále vysokou hodnotu [1].



Obr. 2.12 *Struktura šedé litiny pod mikroskopem*

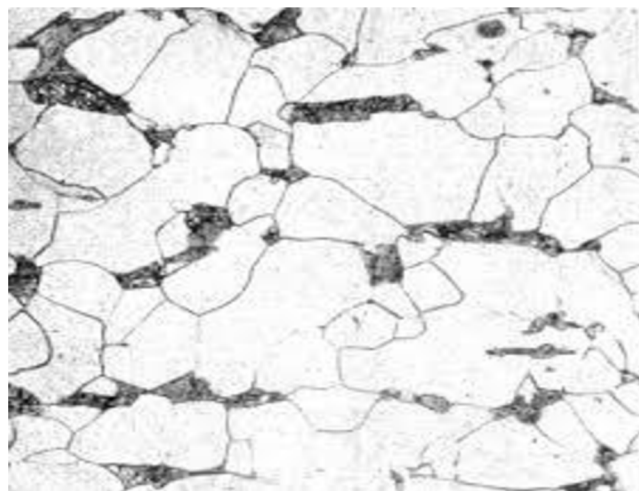
Tvárná litina neboli litina s kuličkovým grafitem představuje, stejně jako litina šedá, slitinu železa, uhlíku a dalších přídatných prvků. Oproti šedé litině disponuje tvárná litina vyšším obsahem uhlíku a křemíku, čímž jsou dány i její odlišné mechanické vlastnosti. Většinu mechanických vlastností má tvárná litina oproti šedé litině lepších, a pro spotřebitele výhodnějších (především pružnost a pevnost v ohybu) [17].

Nevýhody tvárné litiny jako materiálu na výrobu pístních kroužků spalovacích motorů spočívají především ve špatné schopnosti tlumit potencionální rázy, dále v malé dynamické houževnatosti tohoto materiálu, ve špatných kluzných vlastnostech samotného materiálu. Z toho důvodu je nezbytné tento materiál dále povrchově upravit. Hlavní nevýhodu tvárné litiny však představuje vysoká pořizovací cena pístních kroužků vyrobených z tohoto druhu materiálu. Tvárná litina je vhodná především pro konstrukci nejvyšších a nejvíce namáhaných těsnících pístních kroužků [17].



Obr. 2.13 *Struktura tvárné litiny pod mikroskopem*

Na výrobu pístních kroužků z **oceli** se nejvíce používá legovaná chrom-křemíková ocel, která je velmi podobná materiálu, ze kterého se vyrábějí pružiny. Velmi vysoká pružnost tohoto materiálu zaručuje chromovým ocelím vysokou únavovou pevnost a poskytuje záruku, že ocelový pístní kroužek bude v motoru dlouho fungovat, aniž by došlo k jeho zlomení či prasknutí. Nevýhoda tohoto materiálu spočívá především ve špatných kluzných vlastnostech oceli, a z toho důvodu musí být všechny pístní kroužky vyrobené z oceli dále povrchově upraveny. Chrom-křemíková ocel se používá především pro výrobu lamelových stíracích pístních kroužků, a dále na speciální aplikace kroužků těsnících. V praxi se jedná především o letecké motory, vojenská vozidla a motory závodních vozů [18].



Obr. 2.14 *Struktura chrom-křemíkové oceli pod mikroskopem*

2.4 Povrchové úpravy pístních kroužků

Jak jsme si již několikrát zmínili, na pístní kroužky spalovacích motorů jsou především v dnešní náročné době kladeny vysoké nároky, a pístní kroužky z toho důvodu musejí současně v jednom okamžiku splnit hned několik technických požadavků a parametrů. Pakliže tyto nároky nebudou splňovány, pístní kroužky nemohou plnit své početné funkce. Největší nároky jsou kladeny na první těsnicí kroužek, který považujeme za nejdůležitější pístní kroužek, s nejnáročnějším postavením, při kterém jsou na tento kroužek neustále vyvíjeny vysoké tlaky, teploty či nárazy [15].

Jak již bylo řečeno v předcházející kapitole, pístní kroužky jsou vyráběny z odolných materiálů, přesto však musejí být nadále povrchově upravovány. Povrchová úprava pak pístnímu kroužku přináší mnohá vylepšení jeho dosavadních vlastností. Povlaky na pístních kroužcích jsou široce používány u materiálů, které mají špatné kluzné vlastnosti. Povrchové úpravy podstatně zvyšují životnost, snižují tření a zvyšují otěruvzdornost pístních kroužků [15].

Tvrdé chromování představuje elektrochemický proces, používaný k nanesení vrstvy chromu na podkladový materiál. Tvrdé neboli funkční chromování se používá v aplikacích, u kterých se vyžaduje především vysoká tvrdost, otěruvzdornost nebo prodloužení životnosti opotřebovaných dílů. Jednou z výhod tvrdého chromování je i možnost nanášet na podklad jeho silné vrstvy, a z toho důvodu se tato metoda často používá na renovaci opotřebovaných součástek [9].

Další možnou povrchovou úpravou pístního kroužku představuje **cínování**, které se provádí zejména pro zlepšení záběhových vlastností pístního kroužku. Na povrchu pístního kroužku spalovacího motoru se cínováním vytvoří velmi měkký cínový povlak, který zamezuje jeho potencionálnímu zadírání. V případě, že dojde k místním záděrům, tenká cínová vrstva se nataví, v důsledku velmi nízké teploty tavení cínu, a roztavující se cín se tak dostává do role mazacího prostředku. Proto je tato povrchová úprava vhodná pro aplikaci na pístní kroužky do motorů, u kterých vyžadujeme velice krátkou dobu záběhu. Další výhodnou vlastností cínování je vysoká odolnost proti korozi [1].

Fosfátování patří mezi chemické povrchové úpravy podkladů, při které se na povrchu pístního kroužku vytvářejí krystalky fosforečnanů. Mezi vlastnosti fosfátovaného povrchu patří především jeho vysoká odolnost proti korozi, a jeho dobré záběhové schopnosti. Navíc mají takto upravené pístní kroužky i dobrou tvrdost v porovnání s

výchozím materiálem. Vzhledem k nekovovému charakteru této vrstvy navíc nehrozí jeho potencionální zadření [1].

2.5 Výroba pístních kroužků spalovacích motorů

Ačkoliv pístní kroužky spalovacího motoru představují na první pohled miniaturní a zanedbatelnou součástku spalovacího motoru, o jejichž existenci mnoho lidí nemá ani ponětí, závisí na nich spousta vlastností motoru, včetně dlouhodobé trvanlivosti nebo spotřeby oleje. Proces výroby pístních kroužků začíná prvním krokem v podobě odlévání vybraného materiálu do pískových forem. Do těchto forem se odlije jakási vzorová předloha budoucích pístních kroužků. Na první pohled by se mohlo zdát, že se jedná o již hotový pístní kroužek spalovacího motoru, ale ve skutečnosti se jedná teprve o polotovar, se kterým se nadále pracuje v mnoha dalších krocích. U složitých pístních kroužků je ke vzniku zapotřebí až různých a přesně definovaných šedesát kroků [16].

Výroba pístních kroužků se liší podle použité technologie, přičemž častý způsob představuje právě lití pístních kroužků spalovacího motoru, a to buď jednotlivých, nebo axiálně zdvojených. Další technologii může představovat výroba pístního kroužku z pouzder a z trub. Rozhodnutí, jakou konkrétní technologii na výrobu kroužků použít, je dáno především požadovanými parametry materiálu a ekonomickým rozpočtem. Lití těsnících pístních kroužků spalovacího motoru patří mezi nejsložitější postupy ve slévárenské praxi. U pístních kroužků je požadovaná především jejich homogenní struktura, pevnost, elastické vlastnosti, kvalitní povrch a přesné rozměry. Kroužky se lijí s co nejmenšími přídavky v rozevřeném stavu, přičemž kroužky o menší axiální výšce než 2 mm se lijí jako zdvojené odlitky, které se v dalším technologickém procesu axiálně rozřezávají [1].

Po nalití vybraného materiálu do pískových forem následuje hrubé, střední a jemné broušení polotovaru, a to z důvodu odstranění možných otřepů na vnitřním i vnějším průměru odlitků, a také broušení bočních ploch pístních kroužků. Tato operace je prováděna na poloautomatech, které provádí obě operace při jednom založení. Po broušení následuje tvarové soustružení pístních kroužků, které se pro tuto operaci nasadí na trn a osově sevrou do paketu masivními podložkami [1].

Opracovaný trn se následně založí do hrotů frézky, přičemž se vyřízne odpovídající část zámku. Následuje tvarové soustružení, kde je s výhodou uplatněno tzv. dvojitě soustružení. Jedná se o technologii, kde se soustruží vnitřní i vnější rádius dvěma, proti

sobě působícími noži. Díky tomu je docíleno, že při sevření kroužku na kruhový tvar dojde k daleko menší trvalé deformaci. Tím, že se radiální tloušťka kroužku přibližuje finálnímu rozměru a je v celém obvodu stejná, je docílen přesnější průběh rozdělení radiálního přítlaku kroužků na stěnu válce [1].

Prostřednictvím různých doplňkových operací, soustružnických, frézařských či brusičských, se z výchozí formy těsnících kroužků mohou vyrábět i kroužky stírací. V poslední fázi výrobního procesu se pístní kroužky jemně přetácejí na vnějším průměru, kdy je nutno kroužky sevřít pevně do pouzder, navléknout na trn a pevně sevřít. Přetáčení se provádí na soustruhu, a nakonec se přesně a jemně kalibruje zámek kroužku, což znamená, že konce zámků jsou odfrézovány nebo odbroušeny, čímž se docílí předepsané vůle v zámku [1].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Experimenty prováděné v této bakalářské práci byly zaměřeny na sledování struktury a tvrdosti vybraných pístních kroužků spalovacích motorů. K tomuto účelu byly použity dva druhy pístních kroužků, pístní kroužky litinové a pístní kroužky ocelové.

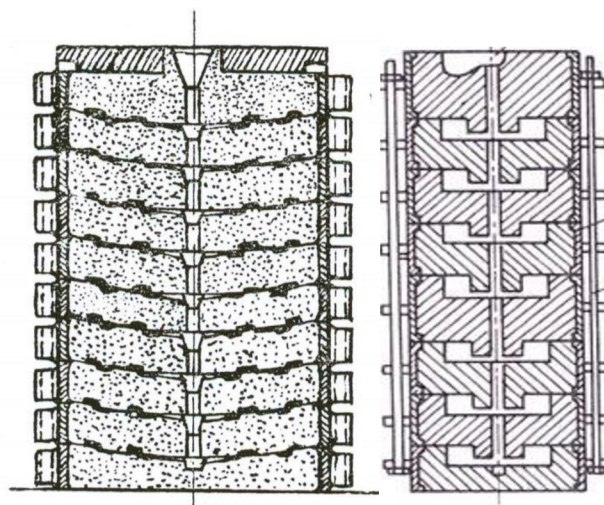
3.1 Výroba polotovarů pístních kroužků

Litinové polotovary pro výrobu pístních kroužků se vyrábějí gravitačním litím do pískových forem. Tyto polotovary jsou uvedeny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Pohled na polotovary litinových pístních kroužků, [20]

Pro odlévání jsou pískové formy složeny nad sebou, tzv. etážového vzhledu, viz obr. 3.2. Na obr. 3.3 vpravo, je formovací stroj pro výrobu forem. V popředí obrázku jsou formovací rámy naskládány nad sebou. V pozadí jsou formy naskládány do etáže.

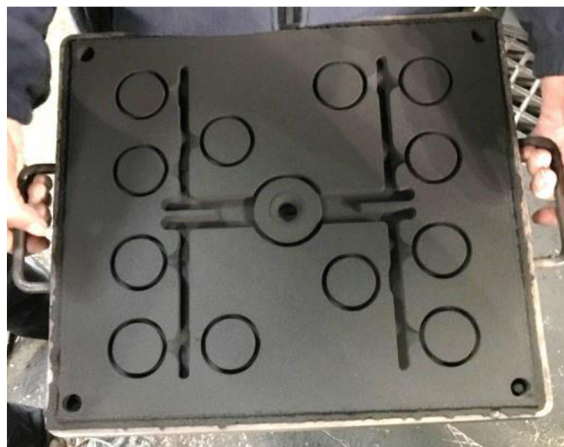


Obr. 3.3 Schéma řezu forem pro etážové lití



Obr. 3.3 Pohled na formovací stroj pro výrobu forem, vpravo, v popředí jsou formovací rámy naskládáné nad sebou, v pozadí jsou formy naskládáné do etáže

Jednu etáž naskládaných forem nad sebou tvoří cca 12 forem. Na obr. 3.4 je pohled do otevřené formy pro etážové lití pístních kroužků.



Obr. 3.4 Pohled do otevřené formy pro etážové lití pístních kroužků

3.1.1 Charakteristika pískové formovací směsi pro výrobu etážových forem

Výroba etážových forem se provádí strojním formováním. K tomuto účelu se používá tzv. jednotná bentonitová formovací směs, která se skládá z těchto základních složek: ostřiva, jílového pojiva, vody a přísady, kterou tvoří kamenouhelná moučka. U těchto směsí voda slouží jako plastifikátor a dává směsi vhodné vlastnosti pro její formování (formovatelnost, tekutost, atd.). Kamenouhelná moučka je přísadou ve formovací směsi, která zlepšuje vlastnosti směsi, resp. slévárenské formy proti penetraci taveniny litiny mezi zrna formovací směsi.

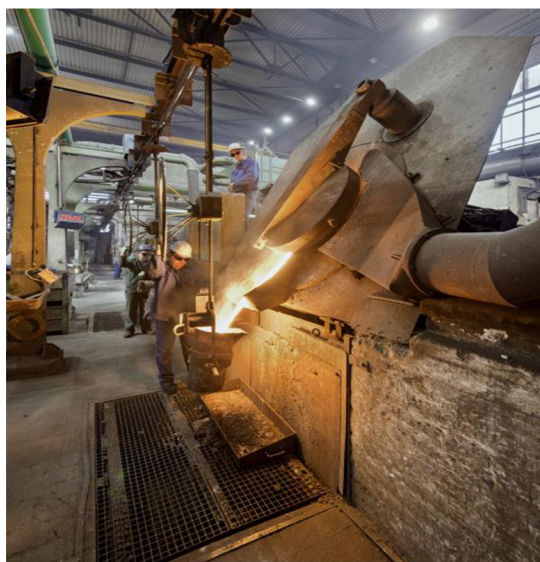
Protože odlitky ve tvaru pístních kroužků jsou velmi tenké a poměrně i malé, proto pro výrobu pískových formovacích směsí bylo použito křemenné ostřívo s velikostí středního zrna $d_{50} = 0,19$ mm a pojivo Ecosil, které je jedno z velmi kvalitních na bázi montmorillonitických jílu. Ostřívo formovací směsi je křemenné. Dříve se používalo velmi jemné ostřívo s velikostí částic $d_{50} = 0,15$ [mm]. V rámci přípravy směsi bylo provedeno oživování 1/3 formovací směsi. K její přípravě byl použit vířivý mísič EIRICH, který působí jako homogenizátor formovací směsi. Výskytem vad odlitků se v poslední době přechází na ostřívo větších částic $d_{50} = 0,19$ mm. Požadované vlastnosti pro formování musí dotvořit správně seřízený formovací stroj. Na seřízení potřebného formovacího tlaku stroje bylo dbáno, z důvodu, aby se nevyskytovaly zadrobeniny v odlitcích.

3.1.2 Výroba bentonitových forem

Pro zajištění výroby kvalitních odlitků pístních kroužků bylo dbáno na to, aby písková forma vykazovala teplotu 30 °C (ovlivňuje tepelnou akumulaci formy). To zpomaluje tuhnutí odlitku za vzniku požadované struktury pístních kroužků. Bentonitové formy jsou vyráběny strojním formováním pomocí modelové desky. Používají se formovací stroje GOETZE 5266. Tvrdost formy je měřena tvrdoměrem HF 02. Formovací stroje mohou pracovat v oblasti lisování, resp. formování „vyššími měrnými tlaky“. Lisovací tlak při výrobě forem byl $0,4$ až $0,6$ MPa.

3.1.3 Příprava taveniny

Tavenina byla vyrobena v elektrické indukční kelímkové středofrekvenční peci s obsahem 2 t. Vysušená a čistá kovová vsázka (slévárenské surové železo, vratný materiál, litinový odpad uhlíkaté látky, feroslitiny, ocelový odpad) byla nasypána do pece. Tavení bylo prováděno s příklopem pece. Tavení probíhalo při poměrně vysoké teplotě nad 1420 °C, aby byla odstraněna „dědičnost“ litiny s možností delšího odstátí taveniny před odléváním. Očkování taveniny bylo provedeno při teplotě taveniny 1420 °C. K tomuto účelu bylo použito očkovadlo Superseed, které bylo před nasypáním do taveniny vysušeno, aby nebylo zdrojem vodíku přivedeného do taveniny. Dosažení vyšší teploty taveniny litiny tavené v indukční kelímkové peci je snadné. Na obr. 3.6 je ukázka indukční středofrekvenční pece a vylévání taveniny litiny pro výrobu pístních kroužků do lící pánve.



Obr. 3.6 *Indukční středofrekvenční pec, vylévání taveniny litiny pro výrobu pístních kroužků do lici pánve*

Avšak obecně platí, že je nutné odlévat za co nejnižší vyhovující teploty. Vysoká teplota taveniny při lití zpomaluje tuhnutí a napomáhá vzniku ředin a staženin. V případě výroby pístních kroužků je problematika složitá v tom, že při tak nepatrné tloušťce odlitku by tyto odlitky za normálních okolností ztuhly bíle (tj. za vzniku tvrdé, špatně obrobitelné ledeburitické struktury). Charakter struktury po ztuhnutí odlitků pístních kroužků je pečlivě kontrolován. Proces tavení, resp. přípravy taveniny, je v podstatě řízen počítačem, který vyhodnocuje výsledky rozborů chemického složení vyráběné litiny kvantometrem. Zpětně jsou předávány pokyny k operativní úpravě taveniny přímo k pecím. Na slévárnu navazuje metalografická, chemická, mechanická a písková laboratoř. Jednotlivé tavby jsou v celém výrobním procesu odděleny a pro každou tavbu jsou vedeny záznamy o jakosti vyráběných odlitků z příslušné tavby.

Na obr. 3.7 a obr. 3.8 je odlévání taveniny litiny do etážových forem. Na obr. 3.9 je pohled do metalurgického oddělení, tj. do tavriny. Součástí tavriny jsou elektrické indukční pece, kde se taví jednotlivé suroviny pro přípravu taveniny litiny pro výrobu pístních kroužků. Na obr. 3.10 je pohled na odlévání etážových forem při výrobě litinových pístních kroužků a současně i ukázka odlitého stromečku pístních kroužků z etážových forem. Na obr. 3.11 je ukázka polotovaru odlitku pístního kroužku a čistého odlitku pístního kroužku.



Obr. 3.7 *Formy pro etážové liti a odlévání do forem pro etážové liti*



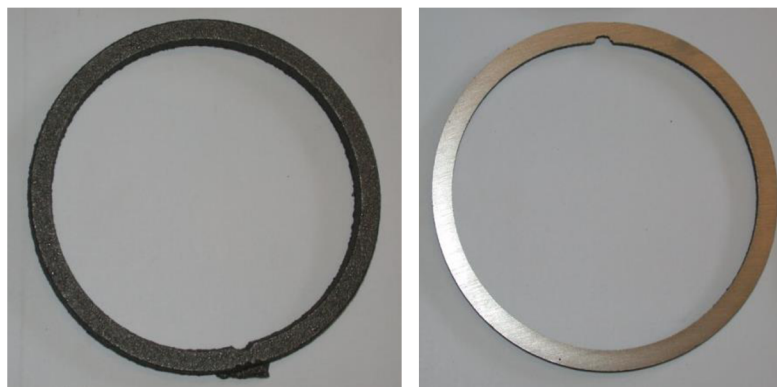
Obr. 3.8 *Odlévání etážových forem při odlévání litinových polotovarů pistních kroužků*



Obr. 3.9 *Pohled do tavírny na elektrické indukční pece*



Obr. 3.10 Pohled na odlévání etážových forem při výrobě litinových pístních kroužků (vlevo) a ukázka odlitého stromečku pístních kroužků z etážových forem (vpravo)



Obr. 3.11 Ukázka polotovaru odlitku pístního kroužku (vlevo) a čistého odlitku pístního kroužku (vpravo)

3.1.4 Výroba ocelových pístních kroužků

Ocelové pístní kroužky se vyrábí z legované chrom-křemíkové oceli, jejíž vlastnosti a struktura je velmi podobná oceli, ze které se vyrábí pružiny. Tyto oceli se vykazují velmi vysokým modulem pružnosti. Proto je u pístních kroužků z chromových ocelí zaručena vysoká únavová pevnost. To poskytuje záruku, že ocelový pístní kroužek bude v motoru dlouho fungovat, aniž by došlo k jeho porušení. Nevýhodou ocelových pístních kroužků jsou poměrně nevyhovující kluzné vlastnosti ocelí, proto tyto kroužky musí být povrchově upraveny. Pístní kroužky vyrobené z chrom-křemíkové oceli se používají pro výrobu lamelových stíracích pístních kroužků anebo pro speciální aplikace

kroužků těsnicích. Jde především o letecké motory, vojenská vozidla a motory závodních vozů. Tyto kroužky se vyrábí třískovým obráběním v podstatě z trubky vyrobené z chrom – křemíkové oceli.

3.1.5 Dokončovací operace při výrobě pístních kroužků

Polotovary pístních kroužků se dále zpracovávají hrubým, středním a jemným broušením. Postupně se brousí vnitřní i vnější průměry a také jejich boční plochy. Tyto operace se provádí na poloautomatických bruskách, které provádí obě operace při jednom založení. Po broušení následuje tvarové soustružení pístních kroužků, které se pro tuto operaci nasadí na trn a osově sevrou do paketu masivními podložkami. Opracovaný trn se následně založí do hrotů frézky a vyřízne se odpovídající část zámku. U většiny případů se soustruží na dvě třísky, jelikož při velkém úběru vzniká nebezpečí osově deformace pístního kroužku. Poté následuje tvarové soustružení, kde se uplatňuje tzv. dvojité soustružení. Jedná se o technologii, kde se soustruží vnitřní i vnější rádius dvěma, proti sobě působícími noži. Díky této technologii je docíleno, že při sevření pístního kroužku dojde k daleko menší trvalé deformaci. Radiální tloušťka kroužku je v celém obvodu stejná, tím je docíleno přesnějšího průběhu rozdělení radiálního přitlaku kroužků na stěnu válce. Pomocí doplňkových operací, jako jsou soustružení, frézování a broušení, se také z výchozí formy těsnicích kroužků vyrábí kroužky stírací. Ve finální fázi se mohou pístní kroužky jemně přetáčet na vnějším průměru. Je tedy nutno kroužky navléknout na trn a pevně sevřit. Přetáčení se provádí na soustruhu s vysokou řeznou rychlostí. Poté jsou konce zámků odfrézovány nebo odbroušeny, čímž se docílí předepsané vůle v zámku. Této operaci se říká kalibrace.

3.2 Hodnocení struktury a tvrdosti pístních kroužků

Pro hodnocení struktury a tvrdosti byly použity tři pístní kroužky, které jsou uvedeny na obr. 3.12. Rozměry pístních kroužků jsou uvedeny v tabulce 3-1. V tabulce 3-2 je uvedeno chemické složení pístních kroužků.

Tabulka 3-1 Charakteristika analyzovaných kroužků

Číslo pístního kroužku	Rozměr pístního kroužku Průměr/výška/šířka	Materiál pístního kroužku
1	Ø 58,0 x 2,3 x 2,2	litina s lupínkovým grafitem
2	Ø 76,2 x 1,8 x 2,9	ocel
3	Ø 91,2 x 2,4 x 3,6	litina s kuličkovým grafitem



Obr. 3.12 Pístní kroužky, které byly použity při řešení této bakalářské práce (zleva kroužek č.1, kroužek č.2, kroužek č.3)

Chemické složení litinových pístních kroužku bylo sledováno na analyzátoru LECO, chemické složení ocelových pístních kroužků na analyzátoru Spectromax.

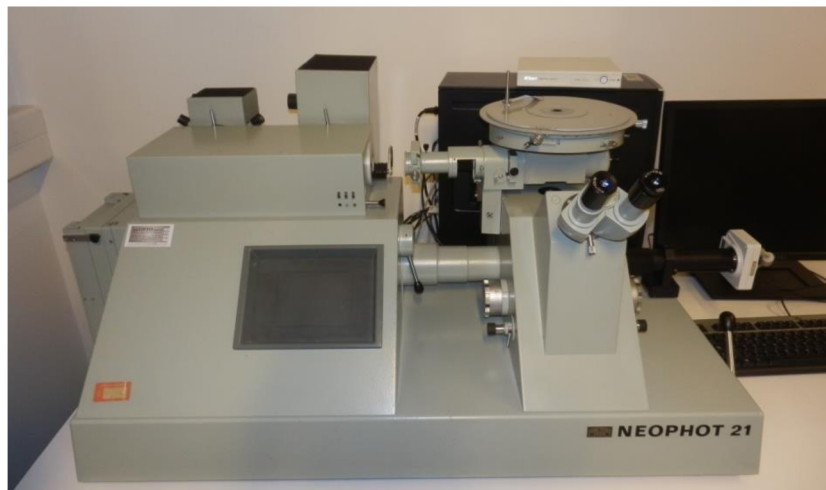
Tabulka 3-2 Chemické složení kroužků

Označení kroužku	Chemické složení prvků [hmot. %]								Fe
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	
1	3,40	2,40	0,70	0,40	0,10	0,25	0,22	0,26	Zbytek
2	0,71	0,86	0,31	0,03	0,04	16,50	0,08	0,25	Zbytek
3	3,80	2,70	0,60	0,19	0,04	0,20	1,51	0,19	Zbytek

Poznámka: U kroužku č. 2 se nachází ještě 0,04 % V; 0,23 % Mo. Ocelový pístní kroužek je vyroben z korozi odolné, martenzitické a magnetické oceli s velmi vysokým obsahem chromu cca 15 %.

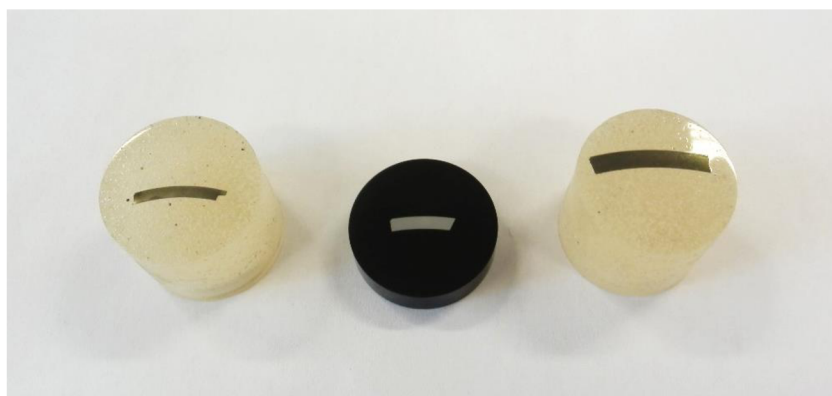
3.2.1 Příprava vzorků pro metalografické pozorování

Metalografická příprava vzorků pístních kroužků a pozorování jejich struktury bylo prováděno v metalografické laboratoři na Katedře strojírenské technologie. K tomuto účelu byl použit světelný mikroskop NEOPHOT 21 (výrobce Carl Zeiss Jena – SRN), viz obr. 3.13, k tomuto mikroskopu je připojena kamera. Obraz z kamery je hodnocen pomocí software NIS Elementas AR a následně je znázorněn na displeji počítače.



Obr. 3.13 Světelný mikroskop s kamerou a softwarem NIS Elementas AR

Metalografické vzorky jednotlivých typů pístních kroužků, které byly použity pro metalografické pozorování jsou uvedeny na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Pohled na metalografické vzorky pístních kroužků (zleva kroužek č.1, kroužek č.2, kroužek č.3)

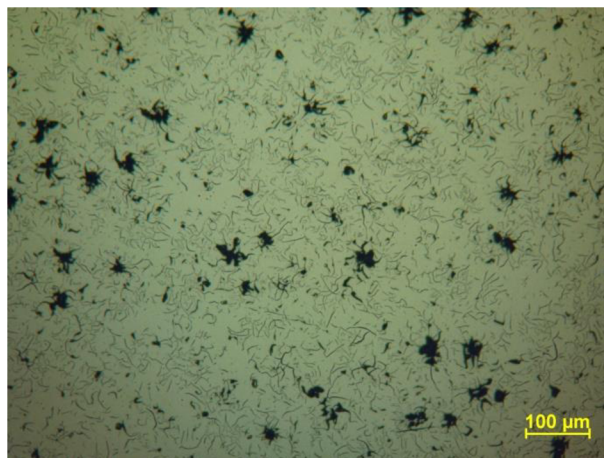
Vzorky uvedené na obr. 3.14 byly připraveny pro metalografické pozorování klasickým způsobem. Všechny tři byly zality do dentakrylové pryskyřice, dále byly

broušeny na metalografických brusných papírech o zrnitosti 200, 400, 600 a 800, 1000 a 1200, dále byly leštěny na plstěném kotouči za použití diamantové suspenze. Při broušení se z dentakrylové pryskyřice uvolnil vzorek ocelového pístního kroužku. Proto pro jeho přípravu byla použita speciální pryskyřice (černá barva) a její zpracování probíhá pod metalografickým (tepelným lisem). Pro leptání struktury metalografických vzorků byl použit Nital (3% kyselina dusičná a 97 % ethanol). Doba leptání byla 10 s. Následně byly vzorky omyty v destilované vodě a sušeny.

Na obr. 3.15 až 3.24 a 3.28 až 3.32 jsou uvedeny metalografické struktury pozorovaných vzorků pístních kroužků.

3.2.2 Pístní kroužek č. 1

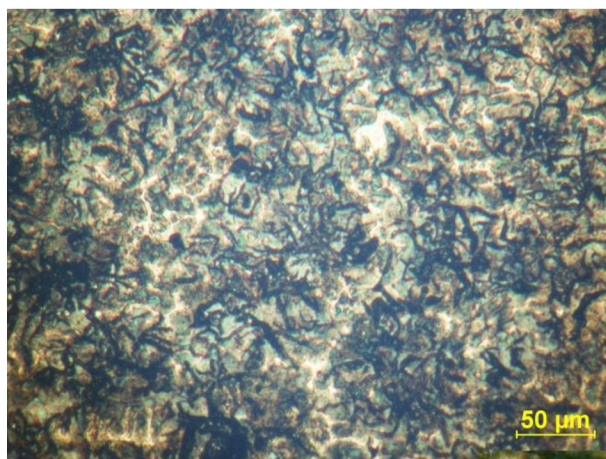
Na obr. 3.15 je uvedena struktura pístního kroužku č. 1, v naleptaném stavu. Na obr. 3.16 až 3.19 jsou metalografické struktury pístního kroužku č. 1 v naleptaném stavu při 100, 250, 500 a 1000násobném zvětšení.



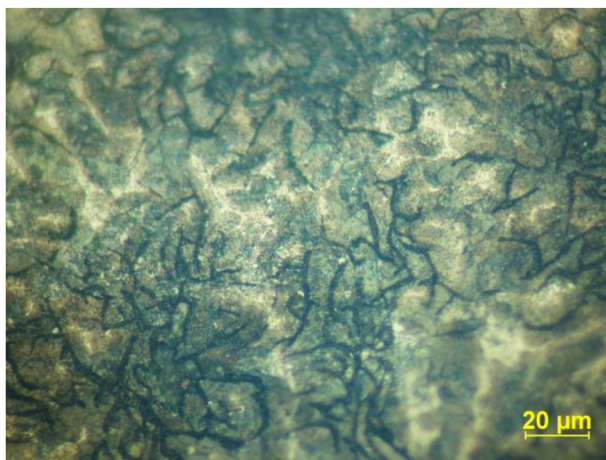
Obr. 3.15 Mikrostruktura pístního kroužku z litiny s lupínkovým grafitem – neleptáno, zvětšení 100násobné (8x12,5), kroužek č. 1



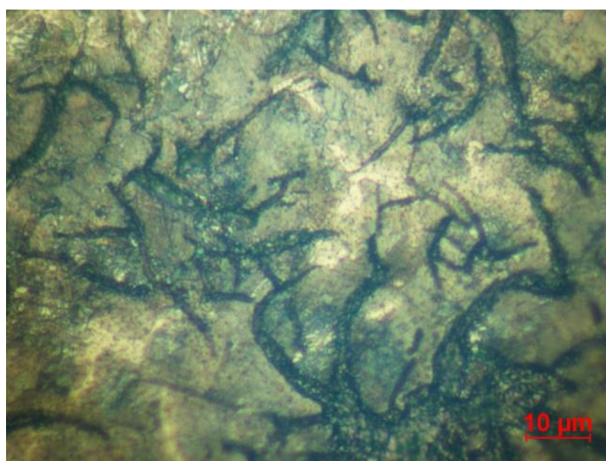
Obr. 3.16 Mikrostruktura pístního kroužku z litiny s lupinkovým grafitem – Nital, zvětšení 100násobné (8x12,5), kroužek č. 1



Obr. 3.17 Mikrostruktura pístního kroužku z litiny s lupinkovým grafitem – Nital, zvětšení 250násobné (20x12,5), kroužek č. 1



Obr. 3.18 Mikrostruktura pístního kroužku z litiny s lupinkovým grafitem – Nital, zvětšení 500násobné (10x50), kroužek č. 1



Obr. 3.19 Mikrostruktura pístního kroužku z litiny s lupínkovým grafitem – Nital, zvětšení 1000násobné (20x50), kroužek č. 1

Z obr. 3.15 je zřejmé, že pístní kroužek č. 1 je vyroben z litiny s lupínkovým grafitem, kde jsou výrazné i vyloučeniny pavoučkového grafitu, který v některých oblastech vykazuje pravidelnější strukturu pavoučků, v některých oblastech vzorku je tato struktura méně výrazná. Hodnocení struktury pístního kroužku č. 1, který je z grafitické litiny, bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 945-1.

Hodnocení grafitu bylo provedeno při 100násobném zvětšení. Byl hodnocen tvar, velikost a rozložení grafitu. Jak je z výše uvedeného vyplývá, grafit je lupínkový s výraznými vyloučeninami pavoučkovitého grafitu. Rozložení lupínkového grafitu je poměrně rovnoměrné s označením A, vyloučeniny pavoučkového grafitu vykazují spíše rozložení smíšené, s označením C. Velikost lupínků grafitu je nad 30 do 60 μm , s označením 6. Základní kovová hmota této litiny je perlitická s drobnými vyloučeninami fosfidové eutektika – tzv. steadit, které je ternární jehlicovité, označení F3. Rozložení fosfidové eutektika je v souvislém síťoví, s označením Fr 3. Velikost síťoví fosfidového eutektika je Fd 400 (velikost nad 250 μm do 500 μm). Velikost plochy útvarů fosfidového eutektika je malá, nedosahuje hodnoty 2000 μm^2 , s označením Fv méně než 2000.

3.2.3 Pístní kroužek č. 2

Ocelový pístní kroužek je vyroben z korozi odolné, martenzitické a magnetické oceli s velmi vysokým obsahem chromu cca 15 %, viz tabulka 3-2. Tato ocel má označení podle normy ČSN 17 115, EN 1.4112 (X90CrMoV18). Dle normy ocel vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení, velmi dobrou obrobiteľnosť, lešiteľnosť a dodáva se v zušlechťeném stavu, tvrdost je 280 až 325 HB (HV 295 až 343).

Na obr. 3.20 je uvedena struktura pístního kroužku č. 2, v nenaleptaném stavu. Z tohoto netradičního obrázku je zřejmé, že materiál pístního kroužku nevykazuje žádné výrazné vnitřní vady. Na obr. 3.21 až 3.24 jsou metalografické struktury pístního kroužku č. 2 v naleptaném stavu při 100, 250, 500 a 1000násobném zvětšení. Jako leptadlo byl použit Nital.



Obr. 3.20 Mikrostruktura pístního kroužku, ocel – neleptáno, zvětšení 100násobné (8x12,5), kroužek č. 2



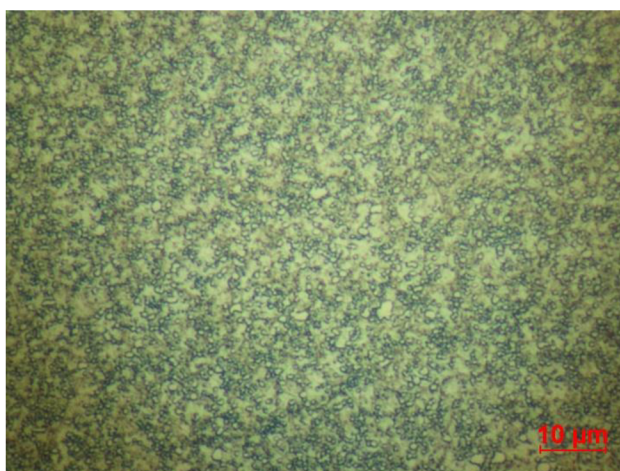
Obr. 3.21 Mikrostruktura pístního kroužku, ocel – Nital, zvětšení 100násobné (8x12,5), kroužek č. 2



Obr. 3.22 Mikrostruktura pístního kroužku, ocel – Nital, zvětšení 250násobné (20x12.5), kroužek č. 2



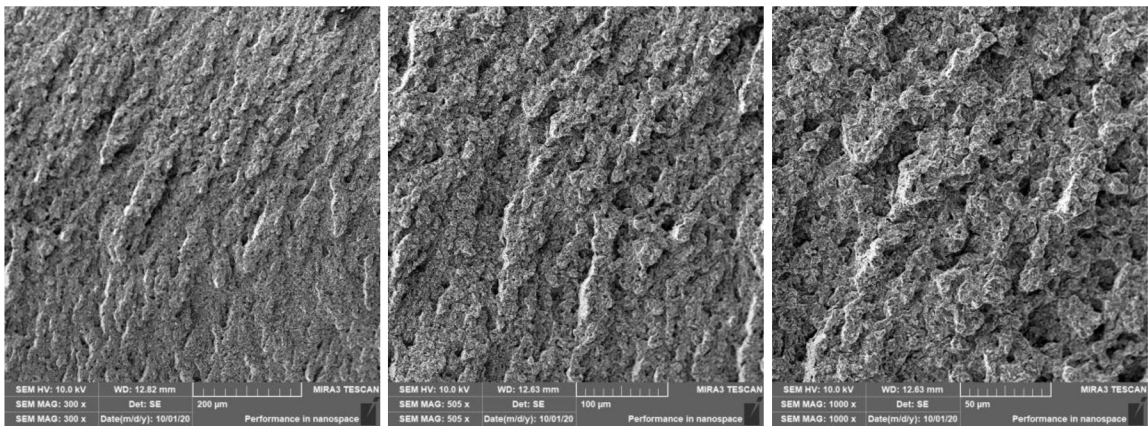
Obr. 3.23 Mikrostruktura pístního kroužku, ocel – Nital, zvětšení 500násobné (10x50), kroužek č. 2



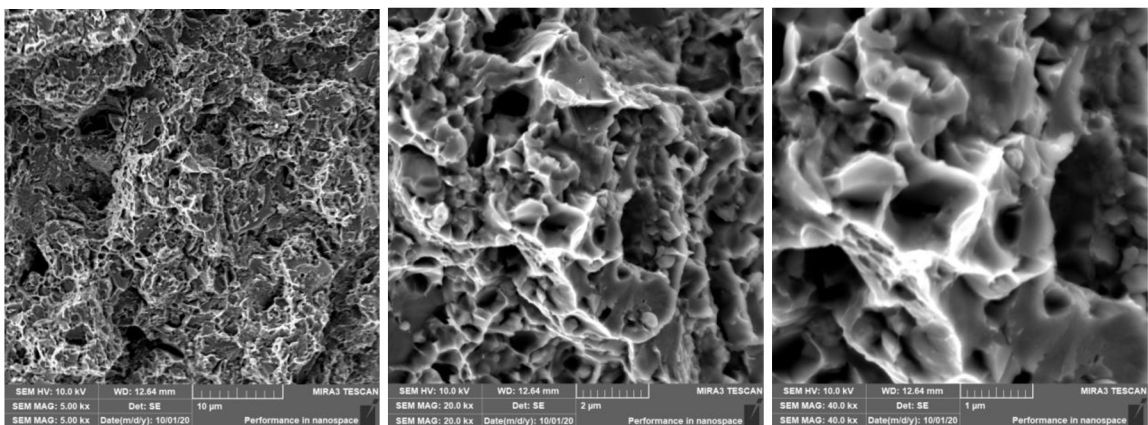
Obr. 3.24 Mikrostruktura pístního kroužku, ocel – Nital, zvětšení 1000násobné (20x50), kroužek č. 2

Z obrázků je zřejmé, že struktura pístního kroužku je v zušlechtném stavu, v kovové matici jsou rozptýleny karbidy chromu. Karbidy jsou úplně sferoidizované a stejnoměrně rozložené. Také přítomnost karbidů odpovídá naměřené tvrdosti HV30 kolem hodnoty 576, a když se to orientačně převede na HRC, tak vychází 54.

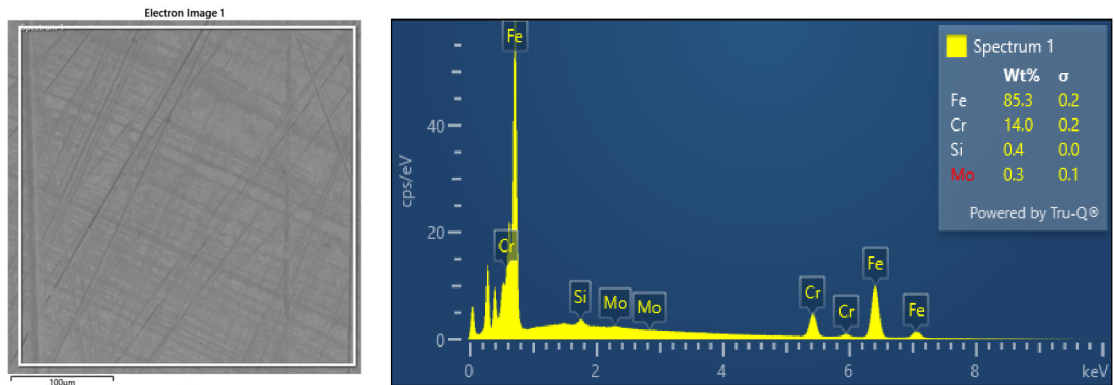
Materiál ocelového pístního kroužku byl sledován na skenovacím elektronovém mikroskopu Vega 3 Tescan SEM HV 10,0 kV). Na obr. 3.25 a 3.26 je povrch sledovaného ocelového kroužku, při různém zvětšení (200 μm , 100 μm , 50 μm , 10 μm , 2 μm a 1 μm). Dále byla provedena EDX analýza, kde bylo sledováno lokální chemické složení ocelového kroužku, která je uvedena na obr. 3.27.



Obr.3.25 Povrch sledovaných pístních kroužků z oceli Cr-Si $\varnothing 75 \times 1 \text{ mm}$



Obr. 3.26 Povrch sledovaných pístních kroužků z oceli Cr-Si $\varnothing 75 \times 1 \text{ mm}$

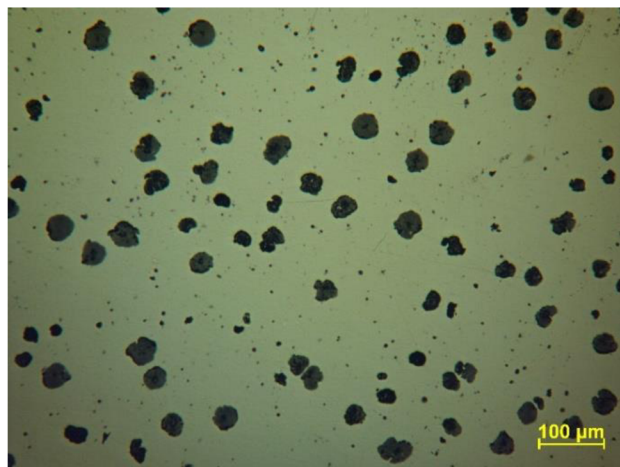


Obr. 3.27 EDX analýza pístních kroužků z oceli Cr-Si Ø75 x 1 mm

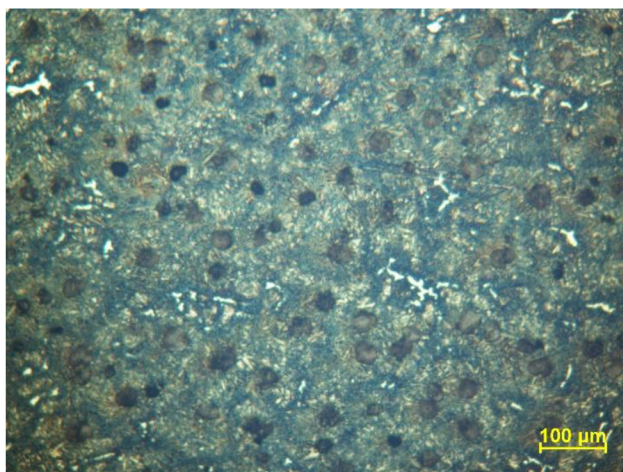
Z této analýzy je patrné, které chemické prvky se v daném lokálním místě oceli nacházejí 85,3 hmot. % Fe; 14,0 hmot. % Cr; 0,4 hmot. % Si a 0,3 hmot. % Mo.

3.2.4 Pístní kroužek č. 3

Pístní kroužek č. 3 je vyroben z litiny s kuličkovým grafitem, která je následně tepelně zpracovaná. Na obr. 3.28 je uvedena struktura pístního kroužku č. 3 v nenaleptaném stavu. Na obr. 3.29 až 3.32 jsou metalografické struktury pístního kroužku č. 3 v naleptaném stavu při 100, 250, 500 a 1000násobném zvětšení.



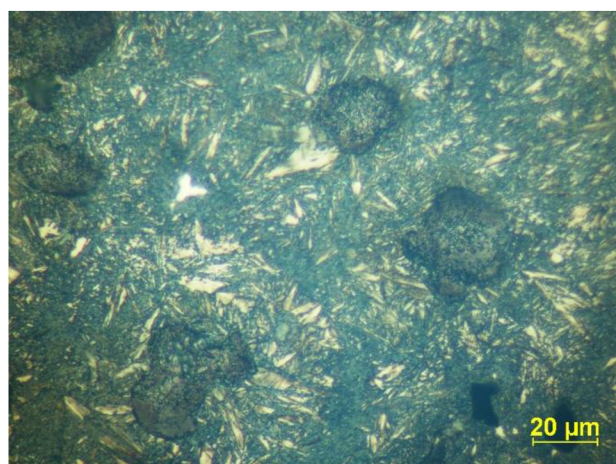
Obr. 3.28 Mikrostruktura pístního kroužku, litina s kuličkovým grafitem – neleptáno, zvětšení 100násobné, kroužek č. 3



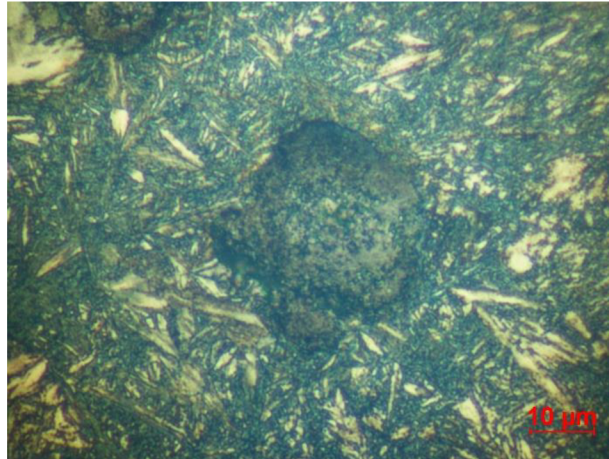
Obr. 3.29 Mikrostruktura pístního kroužku, litina s kuličkovým grafitem – Nital, zvětšení 100násobné (8x12,5), kroužek č.3



Obr. 3.30 Mikrostruktura pístního kroužku, litina s kuličkovým grafitem – Nital, zvětšení 250násobné (20x12.5), kroužek č. 3



Obr. 3.31 Mikrostruktura pístního kroužku, litina s kuličkovým grafitem – Nital, zvětšení 500násobné (10x50), kroužek č. 3



Obr. 3.32 Mikrostruktura pístního kroužku, litina s kuličkovým grafitem – Nital, zvětšení 1000násobné (20x50), kroužek č. 3

Z obr. 3.28 je zřejmé, že pístní kroužek č. 3 je vyroben z litiny s kuličkovým grafitem, který je pravidelně zrnitý. Hodnocení struktury pístního kroužku č.3, bylo provedeno také dle normy ČSN EN ISO 945-1.

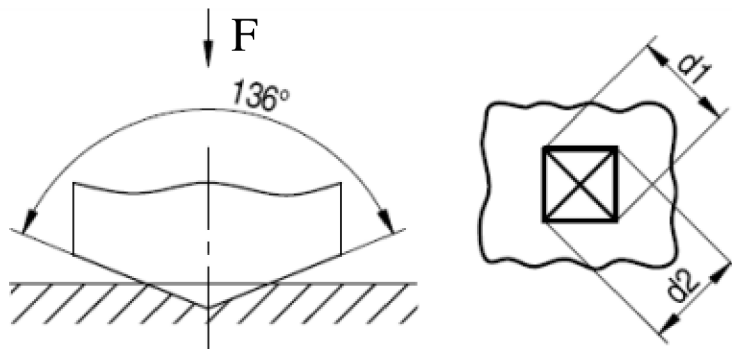
Hodnocení grafitu bylo provedeno při 100násobném zvětšení. Byl hodnocen jeho tvar, velikost a rozložení. Jak je zřejmé z obr. 3.28, grafit je pravidelně zrnitý, s označením VI. Jeho rozložení je rovnoměrné, s označením A. Velikost zrnitého grafitu je od 30 do 60 μm , s označením 6. Základní kovová hmota této litiny je perlitická s drobnými vyloučeninami karbidů. Označení C 25 (eutektický cementit o obsahu 15 až 40 %). Velikost útvarů cementitu je Cv 6000 (velikost plochy útvarů cementitu je nad 2000 do 10 000 μm^2).

Struktura kroužku č. 3 vedle zrnitého grafitu obsahuje matrici, kde je tepelné zpracování bainitické. Toto speciální tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem se provádí za účelem zvýšení otěruvzdornosti těchto kroužků.

3.2.5 Měření tvrdosti pístních kroužků

Pro měření tvrdosti odlitků pístních kroužků z litiny a jednoho kroužku z oceli bylo použito měření podle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1 (ČSN 42 0374), [19]. Indentorem je diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136 °, který se vtlačuje do materiálu silou F, po dobu cca od 10 do 180 s. Na získaném vtisku se měří délka obou úhlopříček, viz obr. 3.30. Zatěžovací síla se používá od 10 do 1000 N. Pro nejčastěji používané zatížení 300 N se volí doba 10 až 15 s. Označení této tvrdosti je HV. Při této

zkoušce tvrdosti bylo použito, dle zvyku HV30, tj. zatížení silou 30 kp ($30 \cdot 9,81 = 294,3$ N, což je přibližně 300 N).



Obr. 3.30 Schéma principu měření tvrdosti podle Vickerse (norma), [19]

Tvrdotost podle Vickerse je bezrozměrné číslo, lze ho stanovit ze vztahu:

$$HV = \frac{F}{S} = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (1)$$

kde značí: F - zátěžná síla [N]; d – průměrná hodnota velikosti úhlopříček [mm];

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (2)$$

Na obr. 3.31 je uveden pohled na hlavici s vlačovaným indentorem tvaru čtyřbokého jehlanu. Naměřené hodnoty tvrdosti v místech pístitních kroužků jsou uvedeny v tabulce 3-3.



Obr. 3.31 Pohled na vlačovaný indentor do pístitního kroužku při měření tvrdosti podle Vickerse

Tabulka 3-3 Naměřené hodnoty tvrdosti pístitních kroužků podle Vickerse

<i>Hodnoty tvrdosti podle Vickerse HV30</i>								
Vzorek	Místo měření					Aritmetický průměr \bar{x} [HV30]	Směrodatná odchylka s [HV30]	Variační koeficient v [1]
	1	2	3	4	5			
1	288	282	286	278	283	283,4	3,44	$12,2 \cdot 10^{-3}$
2	572	579	576	577	577	576,2	2,32	$4,0 \cdot 10^{-3}$
3	337	343	340	342	343	341,0	2,28	$6,7 \cdot 10^{-3}$

V tabulce 3-3 jsou uvedeny hodnoty aritmetického průměru, směrodatné odchylky a variačního koeficientu. Tyto statistické veličiny byly vypočítány na základě těchto vztahů.

Aritmetický (výběrový) průměr \bar{x} – jak je obecně známo, je průměrná hodnota z hodnot příslušného statistického souboru:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$$

kde značí: x_i - je i -tý prvek statistického souboru, n – počet prvků příslušného statistického souboru.

Rozptyl s^2 a výběrová směrodatná odchylka s

Rozptyl s^2 (též střední kvadratická odchylka, střední kvadratická fluktuace, variace nebo také disperze), charakterizuje variabilitu rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, která vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty. **Směrodatná odchylka s** je charakteristikou proměnlivosti (variability) statistického souboru. Známe-li střední hodnotu jinak neznámého rozdělení naměřených dat, výběrová směrodatná odchylka se počítá jako kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od střední hodnoty.

V častějším případě, kdy střední hodnota rozdělení není známa a je odhadnuta aritmetickým průměrem, se používá vzorec:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Variační koeficient v – je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, stanovuje se ze vzorce:

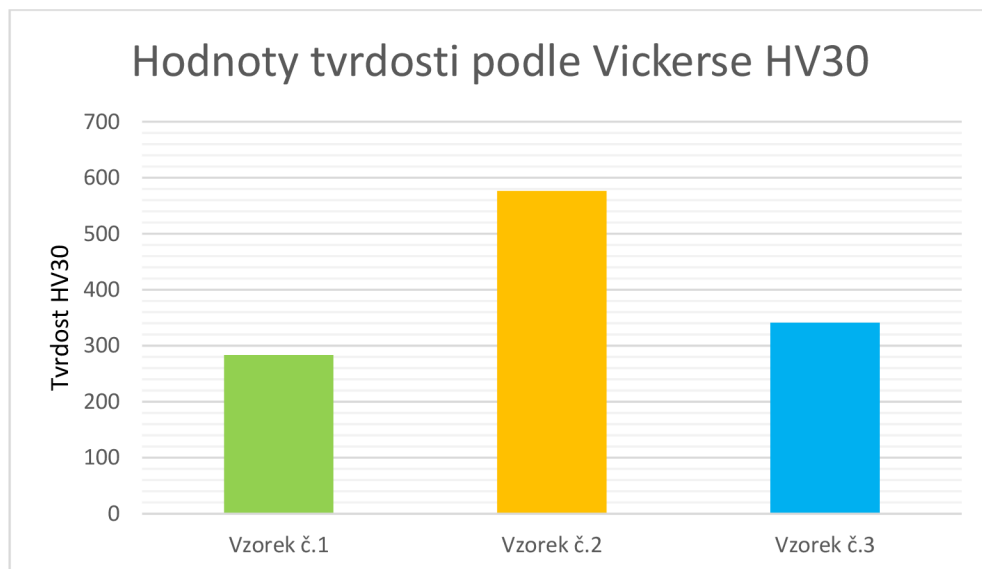
$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (5)$$

kde značí: s – směrodatnou odchylku, v tomto případě směrodatnou odchylku tvrdosti HV30, \bar{x} – průměrnou hodnotu, v tomto případě hodnotu tvrdosti HV30 z daného souboru měření.

Meridián – je prostřední hodnota statistického souboru, který je podle velikosti příslušných hodnot. Prostřední prvek se stanovuje dle vzorce:

$$\tilde{x} = \frac{n+1}{2}, \quad (6)$$

kde značí: \tilde{x} - pořadové číslo středního prvku, n – počet prvků příslušného statistického souboru.



Obr. 3.32 Grafické zobrazení hodnot tvrdosti pístních kroužků (č. 1, 2 a 3), zkouška tvrdosti podle Vickerse

3.3 Shrnutí výsledků

Jak je z výše uvedených skutečností zřejmé, byly sledovány tři typy pístních kroužků, na kterých byla hodnocena mikrostruktura a tvrdost.

3.3.1 Hodnocení mikrostruktury

Pístní kroužek č. 1 - je vyroben z litiny s lupínkovým grafitem, který má pavoučkovitý tvar, v některých oblastech s pravidelnější strukturou. Rozložení lupínkového grafitu je poměrně rovnoměrné s označením A, vyloučeniny pavoučkového grafitu vykazují spíše rozložení smíšené, s označením C. Velikost lupínků grafitu je nad 30 do 60 μm . Základní kovová hmota této litiny je perlitická s drobnými vyloučeninami fosfidové eutektika – tzv. steadit, Velikost síťoví fosfidového eutektika je Fd 400 (velikost nad 250 μm do 500 μm). Velikost plochy útvarů fosfidového eutektika je malá nedosahuje hodnotu 2000 μm^2 , s označením Fv méně než 2000.

Pístní kroužek č. 2 – je vyroben z korozi odolné, martenzitické a magnetické oceli s velmi vysokým obsahem chromu cca 15 %, viz tabulka 3-2. Tato ocel má označení podle normy ČSN 17 115, EN 1.4112 (X90CrMoV18). Dle normy ocel vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení, velmi dobrou obrobitelnost, leštitelnost a dodává se v zušlechtěném stavu, tvrdost je 280 až 325 HB (HV 295 až 343).

Pístní kroužek č. 3 – je vyroben z litiny s kuličkovým grafitem, která je následně zušlechtěna. Tvar grafitu je pravidelně zrnitý, s označením VI. Jeho rozložení je rovnoměrné, s označením A. Velikost zrnitého grafitu je nad 30 do 60 μm , s označením 6. Základní kovová hmota této litiny je feriticko karbidická s vyloučeninami karbidů. Označení C 25 (eutektický cementit o obsahu 15 až 40 %). Velikost útvarů cementitu je Cv 6000 (velikost plochy útvarů cementitu je nad 2000 do 10 000 μm^2). Toto tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem pístních kroužků se provádí za účelem zvýšení jejich otěruvzdornosti.

3.3.2 Hodnocení tvrdosti

Měření tvrdosti na pístních kroužcích bylo provedeno dle ČSN EN ISO 6507-1 (420374), kovové materiály, zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda, platnost od 1.9.2018, [19].

Pístní kroužek č. 1, je vyroben z litiny s lupínkovým grafitem. Aritmetický průměr tvrdosti HV30 je 283,4; směrodatná odchylka HV30 je 3,44 a variační koeficient je $12,2 \cdot 10^{-3}$. Naměřená tvrdost odpovídá výrobním požadavkům [1].

Pístní kroužek č. 2, je vyroben z oceli EN 1.4112 (X90CrMoV18, ČSN 17 115). Aritmetický průměr tvrdosti HV30 je 576,2; směrodatná odchylka HV30 je 2,32 a variační koeficient je $4,0 \cdot 10^{-3}$.

Pístní kroužek č. 3, aritmetický průměr tvrdosti HV30 je 341,0; směrodatná odchylka HV30 je 2,28 a variační koeficient je $6,7 \cdot 10^{-3}$. Naměřená tvrdost odpovídá výrobním požadavkům [1].

4. DISKUSE A SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky předložené bakalářské práce přináší dílčí informace o struktuře a tvrdosti tří typů pístních kroužků, které byly vyrobeny z litiny s lupínkovým grafitem, oceli 1.4112 (X90CrMoV18, ČSN 17 115) a z litiny s kuličkovým grafitem.

Pro komplexní řešení, byla bakalářská práce rozdělena na dvě základní části, část teoretickou a experimentální. Teoretická část práce je zaměřena na účel, druhy, konstrukci, materiály pístních kroužků. Dále na charakteristiku jejich významných užitných vlastností: odpovídající pevnost, dobré antikorozi vlastnosti (odolnost proti možné korozi, které mohou způsobovat spaliny, kyselost oleje i nasávaný vzduch), tepelnou stálost (pístní kroužek nesmí měnit strukturu, pevnost ani příliš měnit své rozměry vlivem jeho zahřívání). Také dobré fyzikální vlastnosti (odpovídající tepelná vodivost, aby teplo bylo rychle odváděno z pístu do válce; malou hustotu, aby při vratném pohybu vykazoval co nejmenší setrvačné síly). Současně je nutná ekonomicky vyhovující výroba (s nízkými finančními náklady), nejen při jejich výrobě, ale i dalším zpracování (dobrá slévatelnost, obrobitelnost, popř. možnost aplikace povrchových úprav). V experimentální části byla provedena materiálová analýza tří pístních kroužků (z litiny s lupínkovým grafitem, z oceli a litiny s kuličkovým grafitem s následným zušlechťováním). Dále byla měřena jejich tvrdost metodou podle Vickerse.

Na základě řešení této bakalářské práce vyplynuly tyto skutečnosti.

1) Pístní kroužky jsou velmi důležité konstrukční prvky spalovacích motorů, které mimo těsnicí funkce pístu spalovacího motoru mají ještě funkci předávat tepelnou energii z pracovního prostoru spalovacího motoru přes píst do jeho válce. S tím úzce souvisí i materiál pístního kroužku.

2) Dále pístní kroužek musí při své funkci vykazovat malý napěťový stav při jeho ohřevu. V tomto případě se jeví litina (s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem) příznivější než ocel. Jak je obecně známo, tento napěťový stav je ovlivňován součinitelem teplotní roztažnosti, Youngovým modulem pružnosti a rozdílem teplot. Právě nižší hodnota Youngova modulu litin ($1,3 \cdot 10^5$ MPa až $1,7 \cdot 10^5$ MPa) je velmi výhodná právě z hlediska příznivějších napěťových stavů.

5. ZÁVĚR

Bakalářská práce je řešena na téma: Technologie pístních kroužků spalovacích motorů se zaměřením na sledování struktury a tvrdosti vybraných pístních kroužků ze tří různých materiálů. Na základě řešení hlavní – experimentální části bakalářské práce, je možno formulovat tyto dílčí závěry:

- 1) Výroba pístních kroužků z litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem se provádí gravitačním litím do bentonitových forem, které jsou uzpůsobeny nad sebou do tzv. etáží. Pro výrobu se používá formovací bentonitová směs, která je formována do ráků na formovacích strojích s příslušným tvarem modelové desky.
- 2) Současně je důležitá metalurgická příprava taveniny, teplota tavení je cca 1400 °C, pro její přípravu se používají elektrické indukční středofrekvenční pece s frekvencí cca 500 Hz. Tyto pece zaručují dobré chemické složení odlévané taveniny. Současně je důležité věnovat pozornost očkování taveniny (při výrobě litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem) a modifikaci při výrobě litiny s kuličkovým grafitem. Současně je velmi důležité, aby očkovadlo a modifikační činidlo bylo dostatečně vysušeno. Nevysušené očkovadlo a nevysušený modifikátor vede k vnesení vodíku do taveniny. Tavenina s obsahem vodíku může způsobit drobné bubliny v pístních kroužcích, což způsobuje jejich znehodnocení.
- 3) Výroba ocelových kroužků se provádí nejčastěji upichováním materiálu z polotovaru tvaru dlouhé trubky.
- 4) Hodnocením mikrostruktury, pomocí světelné mikroskopie, sledovaných pístních kroužků bylo zjištěno, že je *pístní kroužek č. 1* vyroben z litiny s lupínkovým grafitem, který má pavoučkovitý tvar, v některých oblastech s pravidelnější strukturou a rozložení lupínkového grafitu je poměrně rovnoměrné. *Pístní kroužek č. 2* je vyroben z korozi odolné, martenzitické a magnetické oceli s velmi vysokým obsahem chromu cca 15 %. Dle normy ocel vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení, velmi dobrou obrobitelnost, leštitelnost a dodává se v zušlechtěném stavu, tvrdost je 280 až 325 HB (HV 295 až 343). *Pístní kroužek č. 3* je vyroben z litiny s kuličkovým grafitem, která je následně zušlechtěna. Tvar grafitu je pravidelně zrnitý a jeho rozložení je rovnoměrné. Velikost zrnitého grafitu je od 30 do 60 μm. Toto tepelné zpracování litiny s kuličkovým grafitem pístních kroužků se provádí za účelem zvýšení jejich ořezuvzdornosti.

5) Hodnocením tvrdosti, dle metody Vickerse HV30, dle ČSN EN ISO 6507-1 (420374). Byl použit diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° , zátěžná síla 30 kp (tj. 300 N), doba působení síly byla 15 s.

Pístní kroužek č. 1, je vyroben z litiny s lupínkovým grafitem. Při působení zátěžné síly na kroužek byla stanovena hodnota aritmetického průměru tvrdosti HV30 283,4; hodnota směrodatné odchylky HV30 3,44 a hodnota variačního koeficientu $12,2 \cdot 10^{-3}$.

Pístní kroužek č. 2, je vyroben z oceli EN 1.4112 (X90CrMoV18, ČSN 17 115). Při působení zátěžné síly na kroužek byla stanovena hodnota aritmetického průměru tvrdosti HV30 576,2; hodnota směrodatné odchylky 2,32 a hodnota variačního koeficientu $4,0 \cdot 10^{-3}$.

Pístní kroužek č. 3, je vyroben z litiny s kuličkovým grafitem. Při působení zátěžné síly na kroužek byla stanovena hodnota aritmetického průměru tvrdosti HV30 341,0; hodnota směrodatné odchylky HV30 2,28 a hodnota variačního koeficientu $6,7 \cdot 10^{-3}$. Naměřené tvrdosti odpovídají výrobním požadavkům.

6) Pro pokračování řešení této problematiky bakalářské práce je potřeba provést měření na více vzorcích, aby výsledky mohly být statisticky zhodnoceny s přesnějším vypovídajícím výsledkem.

7) Z důvodu, že je práce zaměřena spíše na základní výzkum, nebylo provedeno ekonomické hodnocení přínosu řešení práce.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HRABÁK, V. Pistní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz. Buzuluk Komárov, a.s., Charlie Hořovice, 2000.
- [2] ANDERSSON, P, TAMMINEN J, SANDSTRÖM CE. Piston ring tribology: A literature survey. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2002. ISBN 951–38–6107–4.
- [3] GSCHEIDLE, R. 2001. Příručka pro automechanika. SOBOTÁLES, Praha, 629 str., ISBN: 80-85920-76-X.
- [4] PLUHAŘ, J, KORITA, J. Strojírenské materiály. Druhé, přepracované vydání, Praha, SNTL, Nakladatelství technické literatury, 1977.
- [5] MALÉŘ, J, VÁVRA, V, ZAJÍC, J. 1962. Opravářství a organizace oprav. SZN, 267 str.
- [6] KŘÍŽ, A. Analýza pístních kroužků: Technická zpráva. ZČU, Plzeň, 2012
- [7] RAUSCHER, J. Spalovací motory. Studijní opory VUT v Brně, 2005.
- [8] Technické materiály firmy Elotechnik.cz. Stírací pístní kroužky [online] 2019 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z WWW: <<https://www.elotechnik.cz/stiraci-krouzky/>>.
- [9] Technické materiály firmy Bomex.cz. Metoda tvrdého chromování [online] 2020 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z WWW: <<https://www.bomex.cz/technologie/tvrde-chromovani>>.
- [10] Články: Tersil.cz. Teflon [online] 2014 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z WWW: <<https://www.tersil.cz/rs/teflon/>>.
- [11] KOVAŘÍK, L., V. FERENCEY, R. SKALSKÝ a L. ČÁSTEK. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. Praha: Naše vojsko, 1992, 492 s.
- [12] VLK, František. Vozidlové spalovací motory. Brno, 2003. ISBN 80-238–8756-4.
- [13] Články: Auto.cz. Písty spalovacího motoru: Co přesně v motoru dělají? A co všechno musejí vydržet? [online] 2016 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z WWW: <<https://www.auto.cz/pisty-spalovaciho-motoru-co-presne-v-motoru-delaji-a-co-vsechno-musi-vydrzet-101101>>
- [14] Články: Cruservis.cz. Ocelové písty v motoru začínají nahrazovat hliníkové písty [online] 2018 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z WWW: <<https://www.cruservis.cz/clanky.php?id=174>>.
- [15] CHOCHOLATÝ, Ondřej. Vlastnosti, zkoušení a vývoj kompozitních Cr povlaků pro pístní kroužky. Plzeň, 2012. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

- Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž. Dostupné také z WWW: <<https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/5842>>.
- [16] Články: Lidovky.cz. Pistní kroužky jsou složitá věc [online] 2017 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z WWW: <https://www.lidovky.cz/byznys/auto/pistni-krouzky-jsou-slozita-vec-favorit-pomohl-zachovat-fascinujici-tovarnu.A170908_223516_In-auto_pave>.
- [17] OTÁHAL, Vlastislav. TECHNICKO – EKONOMICKÉ PORADENSTVÍ. Tvárná litina – litina s kuličkovým grafitem [online]. 2. rozšířené. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z WWW: <http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/TVL-II_vytah.pdf>.
- [18] FEDERAL-MOGUL BURSCHIED GMBH. Piston Ring Handbook [online]. 2008 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://korihandbook.federalmogul.com/en/index.htm>>.
- [19] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda, platnost od 1.9.2018.
- [20] Podkladové a propagační materiály firmy Piston Rings, dříve KOMA Buzuluk Komárov
- [21] BEROUN, S., PÁV, K. Vybrané statě z vozidlových spalovacích motorů. Skripta FS TU v Liberci, 2013.
- [22] MUNDORF, H. Technisches über Kolbenringe. Mahle, 1939 (in Germany).
- [23] ALCIATORE, David. Colorado state university [online]. 2007 [cit. 2021-05-18]. Dynamics of Machines. Dostupné z WWW: <<http://www.engr.colostate.edu/~dga/mech324/figures/F14-03.jpg>>.
- [24] KMOTOR. Kmotorshop.com [online]. 2001 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.kmotorshop.com/cs>