



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍSTY VZNĚTOVÝCH MOTORŮ OSOBNÍCH VOZIDEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Jašek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Beran

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Petr Jašek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Martin Beran**
Akademický rok: 2016/17

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

Písty vznětových motorů osobních vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavním úkolem práce je vypracovat ucelený přehled vystihující problematiku konstrukce pístů vznětových motorů. Porovnat výhody a nevýhody ocelových pístů a pístů z hliníkové slitiny. Provést dostupný kontrolní výpočet zadaného pístu vznětového motoru.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat přehled vystihující problematiku pístu a pístní skupiny vznětových motorů.
Porovnat konstrukční řešení pístu pro vznětové motory z materiálu ocel/hliníková slitina a uvést jejich hlavní výhody a nevýhody.
Provést dostupný kontrolní výpočet zadaného pístu vznětového motoru.
Závěrečné zhodnocení.

Seznam literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

KÖHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren. Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2002. ISBN 3-528-23108-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá pístní skupinou vznětových motorů. Hlavně je zaměřena na písty vznětových motorů. Dále je proveden návrhový výpočet pístu pro vznětový motor a následné vyhodnocení výpočtů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pístní skupina, píst, pístní kroužky, pístní čep, vznětový motor

ABSTRACT

This thesis deals with a piston group of diesel engines. It mainly focuses on diesel engines. Then a design calculation of the piston for the diesel engine is carried out and the subsequent evaluation of the calculations.

KEYWORDS

Piston group, piston, piston rings, piston pin, diesel engine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAŠEK, P. *Písty vznětových motorů*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2017, 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Beran.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Petr Jašek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce za pomoc, cenné připomínky, a především za ochotu při psaní této práce. Dále děkuji své rodině, přátelům a všem těm, kteří mě podporovali během celého studia.

OBSAH

Úvod	11
1 Pístní skupina vznětového motoru.....	12
2 Píst	13
2.1 Konstrukce pístu vznětového motoru	14
2.2 Spalovací prostory vznětových motorů	16
2.3 Tepelné namáhání	17
2.4 Chlazení pístu	18
2.5 Materiály pístů vznětových motorů	19
2.5.1 Hliníkové slitiny	21
2.5.2 Ocel.....	22
2.5.3 Porovnání hliníkových slitin s ocelí a ostatními materiály	22
2.6 Povrchová úprava pístu.....	24
3 Pístní kroužky	25
3.1 Zámky pístních kroužků	26
3.2 Těsnící pístní kroužky	26
3.3 Stírací pístní kroužky	27
3.4 Materiály pístních kroužků	28
3.5 Povrchové úpravy pístních kroužků	28
4 Pístní čep	29
5 Základní návrhový výpočet pístu	31
5.1 Základní parametry motoru 1.6 TDI.....	31
5.2 Výpočet základních rozměrů motoru.....	32
5.2.1 Zdvihový objem jednoho válce	32
5.2.2 Střední efektivní tlak	32
5.2.3 Objemový výkon	32
5.2.4 Zdvihový poměr	33
5.2.5 Střední pístová rychlost.....	33
5.3 Návrh hlavních rozměrů pístu.....	33
5.3.1 Výška pístu H_p	34
5.3.2 Kompresní výška pístu H_k	34
5.3.3 Výška pláště pístu H_{pl}	35
5.3.4 Výška prvního můstku pístu H_{m1}	35
5.3.5 Výška druhého můstku pístu H_{m2}	36
5.3.6 Vzdálenost čel nálitků pro pístní čep H_o	36
5.3.7 Tloušťka dna pístu δ	37

5.3.8	Průměr pístního čepu D_{ϵ}	37
5.3.9	Vzdálenost pojistných kroužků pro pístní čep H_{ϵ}	37
5.4	Drážky pro pístní kroužky	38
5.4.1	První pístní kroužek a radiální vůle prvního pístního kroužku	38
5.4.2	Druhý pístní kroužek a radiální vůle druhého pístního kroužku	40
5.4.3	Třetí pístní kroužek a radiální vůle třetího pístního kroužku	41
5.4.4	Axiální vůle pístních kroužků.....	42
5.5	Tloušťka stěny pláště pístu	43
5.6	Pojištění axiální polohy pístního čepu	43
5.6.1	Pojišťovací kroužek.....	43
5.6.2	Drážka pro pojišťovací kroužek	43
5.7	Boční křivka pístu	44
6	Základní rozměry klikového mechanismu a silový rozbor	45
6.1	Hlavní rozměry klikového mechanismu	45
6.1.1	Výpočet poloměru klikové hřídele	46
6.1.2	Výpočet délky ojnice:	46
6.2	Silový rozbor klikového mechanismu	46
6.2.1	Maximální síla od tlaků plynů	47
6.2.2	Maximální setrvačná síla	47
6.2.3	Celková maximální síla	47
6.2.4	Maximální normálová síla	48
7	Pevnostní výpočet pístu	49
7.1	Výpočet dna pístu	49
7.1.1	Maximální ohybový moment	50
7.1.2	Moment odporu v ohybu	50
7.1.3	Maximální ohybové napětí	50
7.1.4	Maximální ohybové napětí na vetknutou desku	50
7.2	Nejslabší místo pláště pístu.....	50
7.2.1	Tlakové namáhání.....	51
7.2.2	Tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu	51
7.3	Měrný tlak na plášť pístu	51
7.4	Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem	52
7.4.1	Ohybové napětí ve vetknutém můstku	53
7.4.2	Smykové napětí	53
7.4.3	Výsledné redukované napětí.....	54
8	Shrnutí výpočtu a porovnání pístů.....	55

8.1 Porovnání pístu navrženého s pístem od koncernu VW	55
Závěr	57
Použité informační zdroje	58
Seznam příloh	62



ÚVOD

Automobilový průmysl hraje v dnešní době velkou roli. Automobil nacházíme v podstatě na každém rohu. I když se dnes k pohonu automobilů začíná využívat různých pohonných jednotek, tak stále nejdůležitější pohonnou jednotkou zůstávají spalovací motory. Mají za sebou velmi dlouhou a rozmanitou historii, kde postupem času byly zdokonalované, aby přinášely nové možnosti. Tyto motory máme buď zážehové (benzínové) nebo vznětové (naftové).

Vznětový motor byl vynalezen Rudolfem Dieselem a roku 1892 byl na tento motor vydán patent. Než byl vyřešen problém se vstřikováním paliva, tak motor byl používán pro pohon generátorů nebo v lodní dopravě. Poté se motor objevil v nákladních automobilech a v zemědělské dopravě. První osobní automobil se vznětovou jednotkou byl představen v Berlíně roku 1936. Hlavním aspektem tohoto automobilu bylo, že spotřeboval až o třetinu méně paliva na stejný výkon než tentýž automobil se zážehovou jednotkou. To je taky jeden z důvodů, proč má dnes vznětový motor většinový podíl na evropském a indickém trhu. Hlavní nevýhodou této pohonné jednotky je produkování škodlivých látek obsažených ve výfukových plynech. Rok od roku jsou emisní normy, které musí tyto motory splňovat přísnější. Plnění těchto norem je dosahováno snižováním objemu válců, přeplňováním, snahou snížit hmotnosti jednotlivých částí motoru, jako je pístní skupina a ojniční skupina. A v neposlední řadě zlepšit efektivitu spalování paliva.

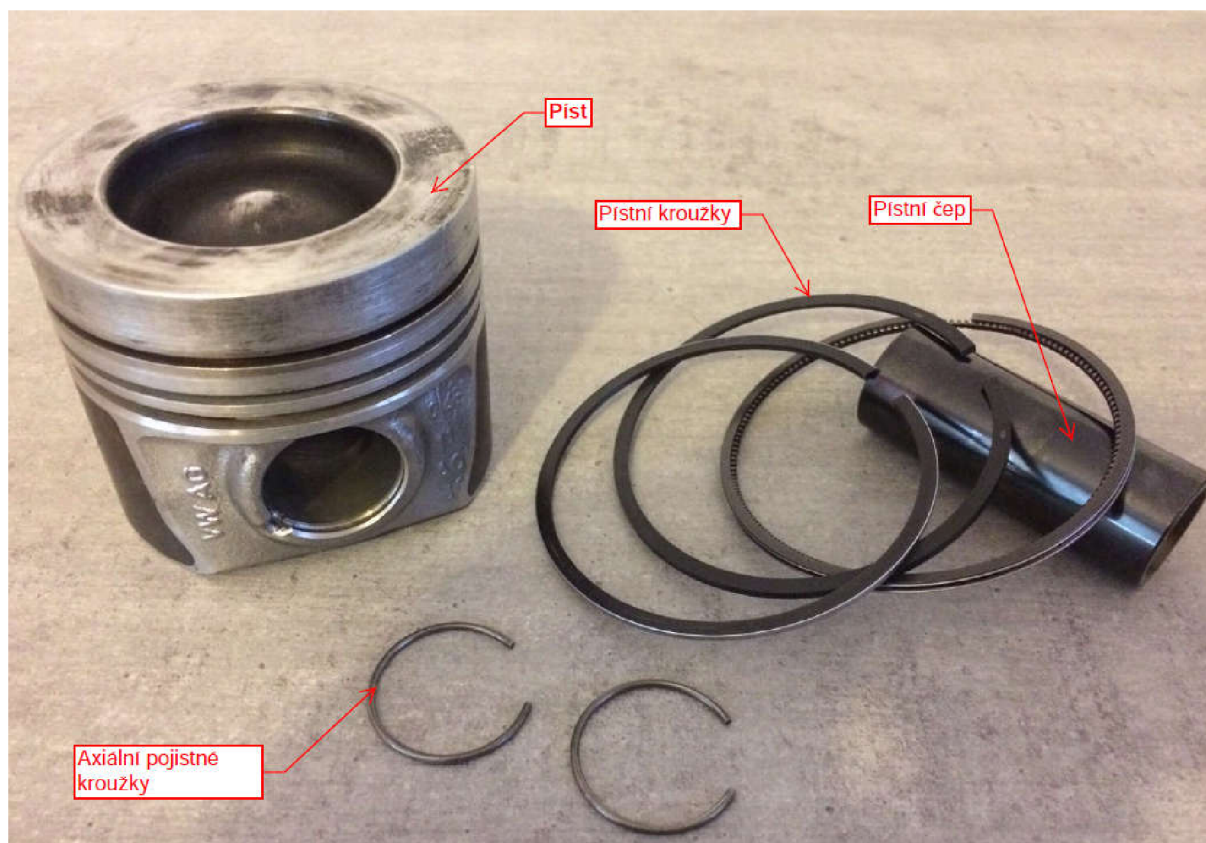
První část práce je zaměřena na pístní skupinu vznětového motoru. Kde jsou rozebrány jednotlivé části od konstrukce až po povrchovou úpravu. Tyto teoretické informace jsou potřebným základem pro základní návrhový výpočet pístu. A k následnému vyhodnocení.

1 PÍSTNÍ SKUPINA VZNĚTOVÉHO MOTORU

Pístní skupina jako taková je skupina několika součástí. Některé součásti jsou více významné a některé zase méně. Tyto součásti spolu tvoří celek, který je nedílnou součástí motoru, nejen motoru vznětového. Dalo by se teoreticky říci, že hlavní součástí pístní skupiny, a vlastně i celého motoru je píst, který právě vykonává přenos síly mezi mechanickým zařízením a tekutým či plynným médiem.[9]

Když chceme navrhovat píst, tak většina si představí pouze samotný návrh pístu. To je ale chybná představa. Do pístní skupiny patří píst, který musí být osazen pístními kroužky, stíracími a těsníci. Dále pístní čep a axiální pojistky v některých případech i kluzné ložisko, které je využito pro vedení pístního čepu. Celá pístní skupina je vždy navrhovaná a konstruovaná pro specifický typ motoru. Na pístní skupinu musí být vždy kladeny následující požadavky:[9]

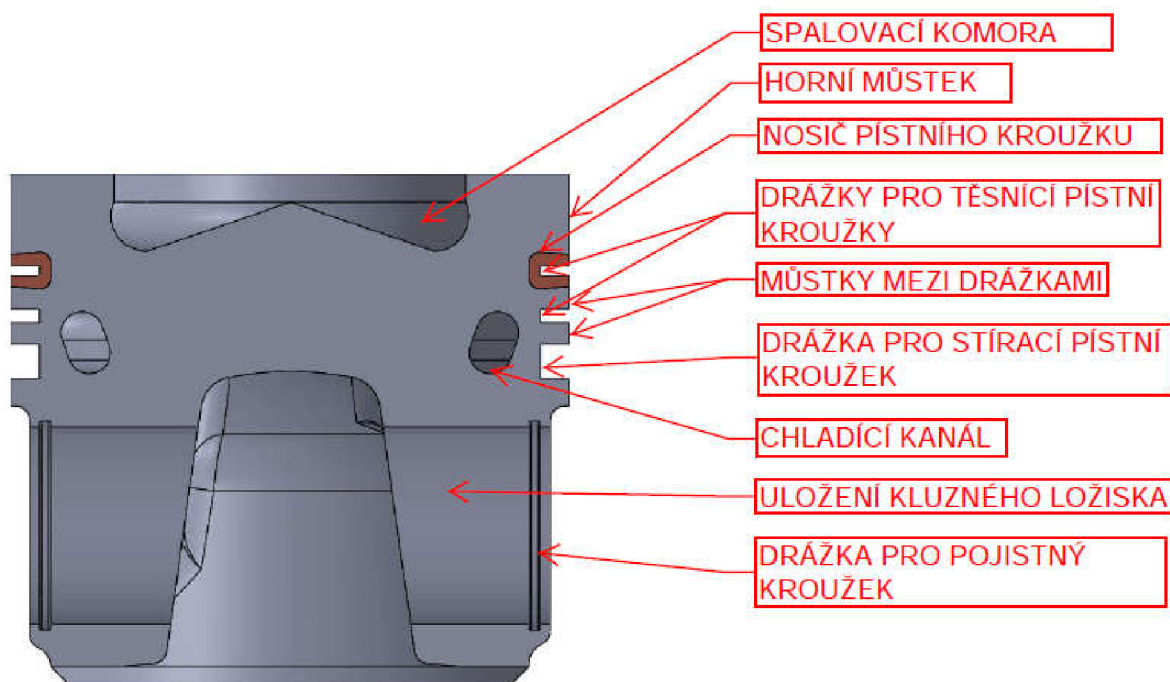
- musíme zabezpečit odvod tepla ze dna pístu do stěn válce
- utěsnění spalovacího prostoru, aby došlo k omezení úniku spalin do klikové skříně
- utěsnění spalovacího prostoru proti pronikání oleje z klikové skříně
- zabezpečení přenášení síly od tlaku, který je vyvolaný plyny na ojnici
- přenos normálové složky síly na stěnu válce



Obr. 1 Pístní skupina vznětového motoru [vlastní]

2 PÍST

Píst je jednou z nejdůležitějších a nejvíce namáhaných součástí spalovacích motorů, je to pohyblivá součást, která přenáší sílu mezi mechanickým zařízením a tekutým či plynným médiem. Při práci motoru je píst zatěžován mechanicky, vystavován vysokým teplotám od spalín ve spalovacím prostoru motoru a prudkým nárůstem tlakům plynů. Nejvíce tepelně je namáháno dno pístu, horní můstek pak přechodové hrany mezi dnem pístu a horním můstkem. Tyto zatěžující účinky způsobují únavové namáhání materiálu, ze kterého je píst vyroben, proto je nutné volit vhodné technologie a materiály pro výrobu pístů. Materiál pístu musí mít vhodné vlastnosti, dostatečnou pevnost i při vysokých teplotách, malou váhu a dobrou tepelnou vodivost. Píst je v podstatě pohyblivé uzavření válce, které má za úkol těsnit, aby ztráty vzniklé propouštěním a způsobené třením byly co nejmenší. Dále je nutné, aby část tepla uvolněného z paliva byla předána pístem do chlazených stěn a jimi do chladicího média. Tento odvod tepla do stěn válce je především zprostředkováván pístními kroužky, můstkami, a především pláštěm pístu. Tepelné zatížení pístu velice ovlivňuje jeho rozměry. Píst by měl mít co nejmenší vůli ve válci, z toho důvodu není tvar pístu za studena válcový ale mírně oválný. Až po zahřátí do určené teploty nabere píst požadovaný tvar. Píst se také v průběhu jeho činnosti musí vyrovnávat se změnou teploty, což způsobuje, že se mění vůle pístu ve válci. Tento problém se řeší vyrovnávacími vložkami, které mají minimální teplotní roztažnost. V dnešní době jsou na písty kladeny požadavky, aby byl píst co nejlehčí a odolával výborně změnám teplot. Těchto aspektů jde docílit několika řešeními. Navrhováním nových designových typů pístů, nebo vývojem nových slitin. [4]



Obr. 2 Píst vznětového motoru [vlastní]

2.1 KONSTRUKCE PÍSTU VZNĚTOVÉHO MOTORU

Píst vznětového motoru oproti pístu zážehového motoru má větší kompresní a celkovou výšku. Také se liší větší tloušťkou stěn a větším průměrem pístu. Spalovací prostor je umístěn do dna pístu, z toho důvodu je tu větší tepelný tok. Vzhledem k větším teplotám a tlakům, které na píst působí musí být kladeny větší nároky na chlazení. [10]

Z důvodu tepelného namáhání, které je u těchto pístů větší, než u pístů zážehových motorů je nutné volit větší výšku horního můstku, aby se dodržela maximální teplota 220 °C na prvním horním pístním kroužku. Jemné drážkování horního můstku usnadňuje přizpůsobení pístu průměru válce. V současné době se u vznětových přeplňovaných motorů používá nosič pístního kroužku. Nosič je vyroben z vysoce legované austenitické šedé litiny s obsahem 20 % Ni+Cu+Cr obchodní název je Nirezist. Vlastností tohoto materiálu je vysoká odolnost proti opotřebení. Počet pístních kroužků je stejný jako u zážehového motoru, většinou se volí tři pístní kroužky. První kroužek od dna pístu je kroužek těsnící a pak následují dva kroužky stírací. Vzhledem k většímu mechanickému a tepelnému zatížení pístu a prvního pístního kroužku je většinou první pístní kroužek trapézový. Výhodou je, že při překlápění pístu i radiálnímu pohybu vůči kroužku dochází při zasouvání kroužku do klínové drážky k axiálnímu posuvu kroužku v drážce. To vede k drcení vzniklého karbonu.[3],[11]

Pístní čep je uložen v nálitcích. Které jsou přizpůsobeny většímu namáhání. A aby byla celková pevnost pístu větší, je píst vybaven vyztužovacími žebry. Vyvažování pístu je prováděno pomocí nálitků, které se frézují k dosažení správného vyvážení.[11]

Spalování u vznětových motorů probíhá samovznícením zápalné směsi ve stlačeném vzduchu. Toto vše se děje ve spalovací prostoru, který je uložen ve dně pístu. V dnešní době jsou většinou spalovací prostory jen ve dně pístu, ale v dřívějších dobách se používali takzvané oddělené spalovací prostory. Kde cca 40–60 % spalovacího prostoru bylo ve dně pístu a zbytek v hlavě. Díky silovému působení, které je zapříčiněno vysokou teplotou na dno pístu mohou vznikat na okrajích pístu malé únavové trhliny. Tyto trhliny mají tendenci se při dalším namáhání šířit až může dojít k prasknutí pístu. Z tohoto důvodu je dno pístu eloxováno tvrdou vrstvou, která má zamezit tvorbě trhlínek.[9], [11]

Při samotné konstrukci pístu musíme dodržovat požadavky, které jsou na píst kladeny. Několik základních požadavků bylo již zmíněno.

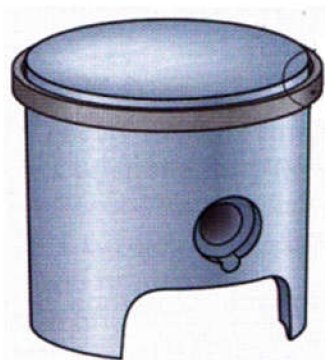
Požadavky:

1. Veškeré síly působící na píst musí být přeneseny čepem a ojnicí na klikový hřídel. Abychom tohoto docílili, tak píst musí být dostatečně pevný ve svém dně, v kroužkové části, čepních nálitcích, plášti a v příslušných nálitcích. [9]
2. Teplo, které vzniká ve spalovacím prostoru musí být patřičně odvedeno do stěn válců a do klikové skříně. Píst musí být tepelně vodivý a správně profilovaný, aby se teplo nehromadilo, ale bylo rychle odváděno kroužky a pláštěm.[9]
3. Klikový mechanismus by měl být co nejméně zatěžovaný. Toho lze docílit tím, že píst bude lehký.[9]

4. Píst by měl mít tichý chod, neklepat, nezadírat se a nemít sklon k zadírání i za zatížených podmínek. Materiál pístu musí odolávat únavě a opotřebení. Proto musí být jeho tepelná roztažnost co nejmenší a podle roztažnosti a tepelných poměrů stanovena vůle a tvar pláště. Z toho důvodu volíme takový materiál, který je schopný odolávat korozi, má dobré kluzné vlastnosti, dostatečně houževnatý, pevný a tvrdý za tepla, s dobrou tepelnou vodivostí.[9]
5. Aby byla zaručena minimální spotřeba pohonných hmot i mazacích látek. Musí být správně řešeno umístění, počet i druh pístních kroužků.[9]
6. Na závěr je nutné, aby byl píst vyměnitelný a také levný. To lze zaručit vhodnou volbou materiálu za použití hospodárných výrobních postupů a nejvyšší mechanizace podle vyráběného množství.[9]

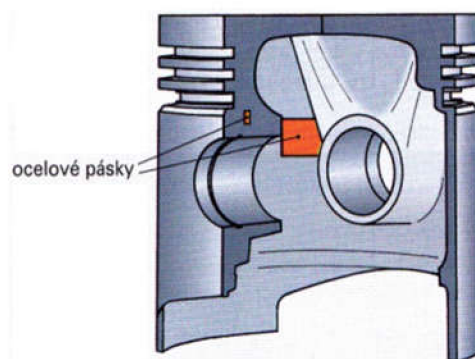
Základní druhy konstrukce pístů.

- a) Písty jednoduté, tyto písty jsou lité nebo kované s plným pláštěm. Jsou vyrobeny z jednoho materiálu. Používají se jak pro vznětové motory, tak i pro zážehové motory.[1]



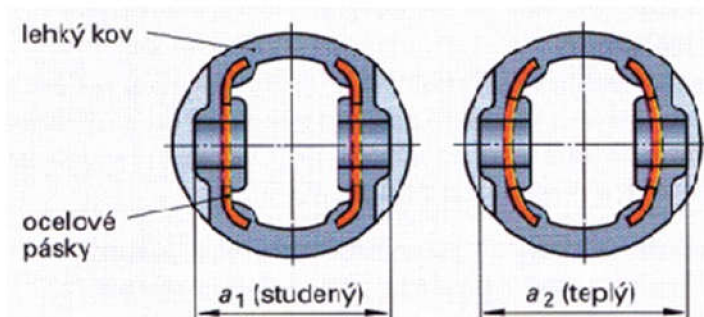
Obr. 3 Píst jednodutý [1]

- b) Písty termoregulační jsou opatřeny ocelovou vložkou, která je zalita do lehkého kovu. Tato vložka má za úkol bránit tepelné roztažnosti.[1]



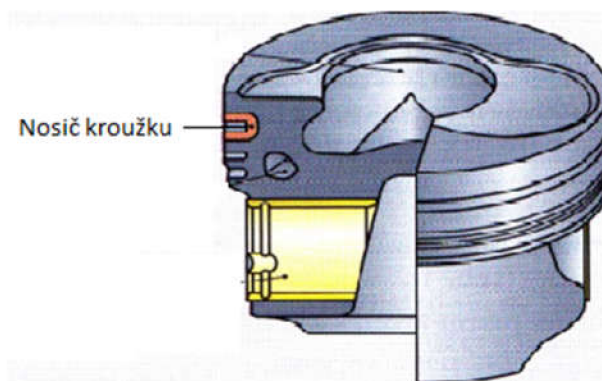
Obr. 4 Píst termoregulační [1]

- c) Bimetalové písty, u těchto pístů se umísťuje ocelový pásek do oblasti nálitků pístního čepu, který usměrňuje roztažnost ve směru osy pístního čepu.[1]



Obr. 5 Píst bimetalový [1]

- d) Píst s nosičem kroužku, nosič kroužku snižuje opotřebení drážky kvůli vysokému tepelnému a tlakovému zatížení.[1]



Obr. 6 Píst s nosičem kroužku [1]

2.2 SPALOVACÍ PROSTORY VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Jak už bylo uvedeno výše, tak spalovací prostory vznětových motorů jsou umístěny ve dně pístu tzv. nedělený spalovací prostor, kde palivo je přímo vstříknuto do spalovacího prostoru (přímé vstřikování paliva). Může se použít i dělený spalovací prostor, kde část je umístěna v komůrce v hlavě válce a druhá část právě ve dně pístu. Palivo je vstřikováno mimo spalovací prostor (nepřímé vstřikování paliva).[6], [2]

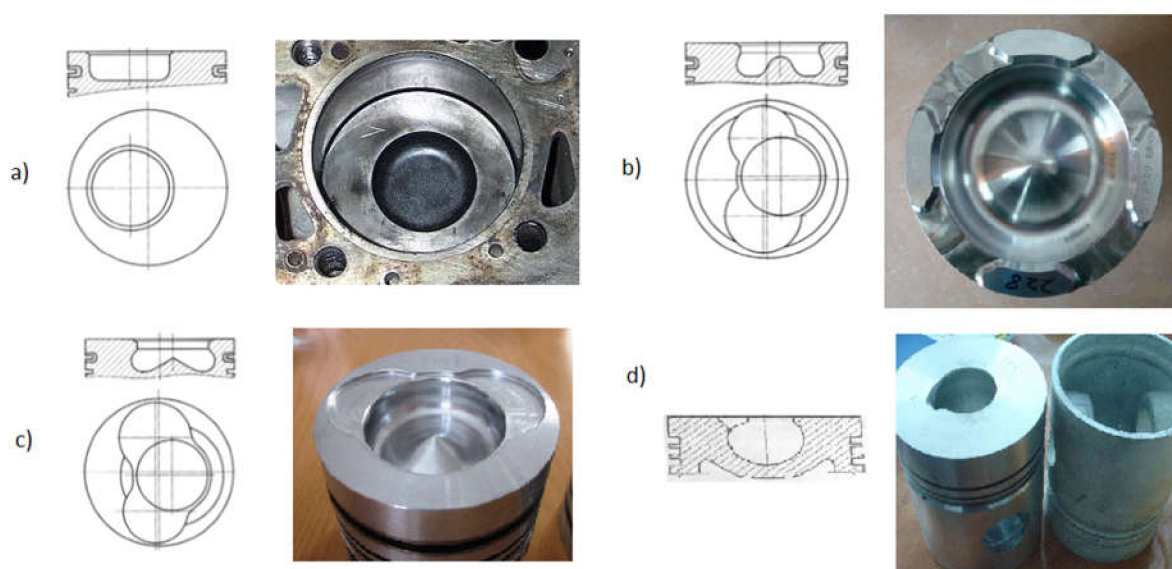
Však tvar spalovací komory pro vznětové motory s přímým vstřikem paliva se velice liší od jednotlivých výrobců. V podstatě nelze říct který spalovací prostor je nejvhodnější. Každý spalovací prostor je nejlépe uzpůsoben danému motoru. Tudíž výhodnost tvarového řešení spalovacího prostoru je možné pouze posoudit na konkrétním typu motoru.[6], [2]

Miskový spalovací prostor je jednoduchý, má malý měrný povrch a tím i malý přestup tepla do pístu a válce. Nízké tepelné starty usnadňují spouštění studeného motoru. Nevýhodou je malé rozvíření vzduchu. Motor musí pracovat s přebytkem vzduchu.[6]

Spalovací prostor Hasselmann se převážně používá u přeplňovaných motorů kvůli snadnému vyplachování. Jinak jeho vlastnosti jsou velice podobné miskovému tvaru.[6]

Toroidní spalovací prostor má srcovitý tvar se zúženým ústím, jehož průměr bývá polovina pístu. Má poměrně dobré rozvíření vzduchu. Tento prostor způsobuje zvýšené tepelné namáhání, proto je vhodný pro použití v motorech menších rozměrů, nebo je nutné použít přímé chlazení olejem.[6]

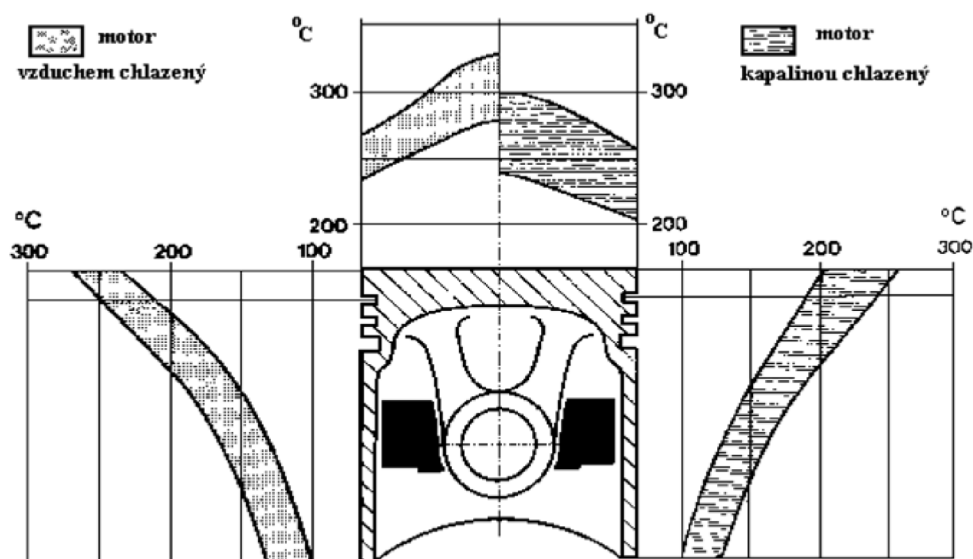
Kulovitý spalovací prostor, jak už název napovídá, tvar tohoto prostoru je kuloví. Umožňuje silné rozvíření vzduchu, palivo vstřikováno tangenciálně z malé vzdálenosti. Tento prostor se dnes již zcela nepoužívá, z důvodu velké kouřivosti u studeného motoru a vysokých emisí.[6]



Obr. 7 Typy spalovacích prostorů pro přímé vstřikování paliva
a) Miskový spalovací prostor, b) spalovací prostor Hasselmann, c) Toroidní spalovací prostor, d) Kulovitý spalovací prostor [6], [2], [15]

2.3 TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ

Samotný píst je vystavován přímému kontaktu se spalinami. Však nejvíce tepelně namáháno je dno pístu, přechodové hrany mezi dnem pístu a horním můstkem a horní můstek. Dno pístu je vystavováno intenzivnímu cyklickému ohřevu, kdy teplota dosahuje během hoření 1800 až 2600°C. Před otevřením výfukového otvoru a následným odchodem spalin dosahuje teplota přibližně 600 až 700°C. Dno pístu u vznětových motorů je vystavováno teplotě až 320°C. Tato teplota by neměla být překročena, protože při této teplotě výrazně klesá pevnost hliníkových slitin u odlévaných i kovaných pístů. Použitím pístu skládaného jsme schopni maximální teplotu zvýšit. Skládaný píst má plášť z hliníkové slitiny, která je spojena s ocelovou korunou.[6], [2]



Obr. 8 Rozložení teplot na dně a plášti pístu[6]

Podstatnou část tepelného zatěžování tvoří teplo vznikající třením pístu a pístních kroužků o stěny válce. Třecí ztráty pístní skupiny motorů představují 45 až 65 % celkových třecích ztrát.[6], [2]

Maximální teplota, které je vystavována drážka pro první pístní kroužek nesmí překročit teplotu karbonizace oleje. Teplota karbonizace minerálního leje má hodnotu přibližně 220 °C a u oleje syntetického 240 °C až 260°C.[6], [2]

Vzhledem působení rozdílných teplot na píst je zřejmé, že u pístu dochází ke změně tvaru. Větší vůle ve válci bude u studeného motoru než u motoru, který je zahřátý na provozní teplotu. Na dno pístu a oblast pístních kroužků působí větší teploty, a proto se tyto části roztahují více než ostatní. Se vzrůstající vzdáleností ode dna klesá roztažnost kromě nálitků v oblasti pístního čepu, z důvodu většího množství materiálu. Z požadavku kruhovitosti pístu zahřátého na provozní teplotu plyne, že píst musí být podle rozdílné roztažnosti jednotlivých částí pístu za studena nastavován. Musí být vytvořena určitá boční křivka a ovalita.[6], [2]

2.4 CHLAZENÍ PÍSTU

Je nutné zajistit optimální chlazení pístu vznětových motorů, protože jak už bylo několikrát výše zmíněné písty vznětových motorů jsou vytavovány vysokému namáhání. Chlazení je řešeno převážně dvěma způsoby, vytvořením chladicího kanálu v hlavě pístu, nebo nástřikem vnitřních částí pístu. Jako chladicí médium se používá olej.[6]

Chlazení pístu chladicím kanálem používá se u přeplňovaných motorů, kde jsou písty mnohem více namáhány, a proto je nutné kvalitní chlazení. Tryska umístěná v klikové skříni vstříkne olej do otvoru a píst pohybem nahoru a dolů dopravuje olej do chladicího kanálu.[2]

Chlazení nástřikem vnitřních částí, tento způsob je také realizován tryskou, která je umístěna v klikové skříni, nebo je olej rozstříkáván z ojnicího ložiska.[2]

Tab. 1 Odvod tepla z pístu v závislosti na jeho chlazení[6]

	nechlazený píst	nástřík dna pístu	chladičí kanál
chladičí olej		45 %	68 %
kroužky	62 %	41 %	18 %
vzduch a olej v klikové skříní	24 %	8 %	8 %
plášť pístu	14 %	6 %	6 %

2.5 MATERIÁLY PÍSTŮ VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Správná volba materiálu u pístu je velice důležitá. Při návrhu a výrobě pístu je volba materiálu základ. Neboť ze zvoleného materiálu vychází podstatná část vlastností pístu. Proto vhodný materiál pro výrobu pístu by měl mít tyto vlastnosti:[9]

- a) Vysokou pevnost
- b) Dobrou houževnatost a odolnost proti únavě
- c) Dostatečnou tvrdost
- d) Výbornou tepelnou vodivost
- e) Malou tepelnou roztažnost a rozměrovou stálost
- f) Nízkou měrnou váhu
- g) Dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru
- h) Odolnost proti korozi
- i) Dobrou slévateľnost nebo kovateľnost
- j) Dobrou obrobiteľnost a nízkou cenu

V některých případech nejsou některé tyto podmínky zcela dodrženy. Je to z důvodu toho, že každý motor je specifický stroj, který nepracuje vždy ve stejných podmínkách. Proto se mezi jednotlivými podmínkami dělají kompromisy. [9]

- a) Pevnost

Pevnost materiálu klesá se stoupající teplotou, a to u každého materiálu jinak. Důležitá je dostatečná pevnost pístu při jeho provozní teplotě.[9]

- b) Houževnatost a odolnost proti únavě

Tyto vlastnosti si můžeme demonstrovat na jednoduchém příkladu. Budeme-li požadovat, aby píst vydržel 100 000 km, to je přibližně 2500 pracovních hodin. Při otáčkách 2000 ot/min je píst ve všech svých částech střídavě namáhán asi 150 000 000 krát. Vezmeme-li v úvahu prodloužení šedé litiny při 20 °C je asi 0.1 % tak se tato hodnota prakticky nemění ani při teplotě 300°C. Hliníkové pístové slitiny vykazují při teplotě 20 °C prodloužení asi 0.3 až 0.8 %, prodloužení se stoupající teplotou roste, takže při teplotě 300 °C dosahuje hodnoty 0.6 až 6 %. U kovaných lehkých slitin je tento rozdíl ještě větší. Při teplotě 20 °C je prodloužení 3 až 7 %, které při teplotě 300 °C vzroste až na 8 až 14 %. Toto je hlavní důvod praskání litinových pístů ve dně a v jiných částech.[9]

c) Tvrdost

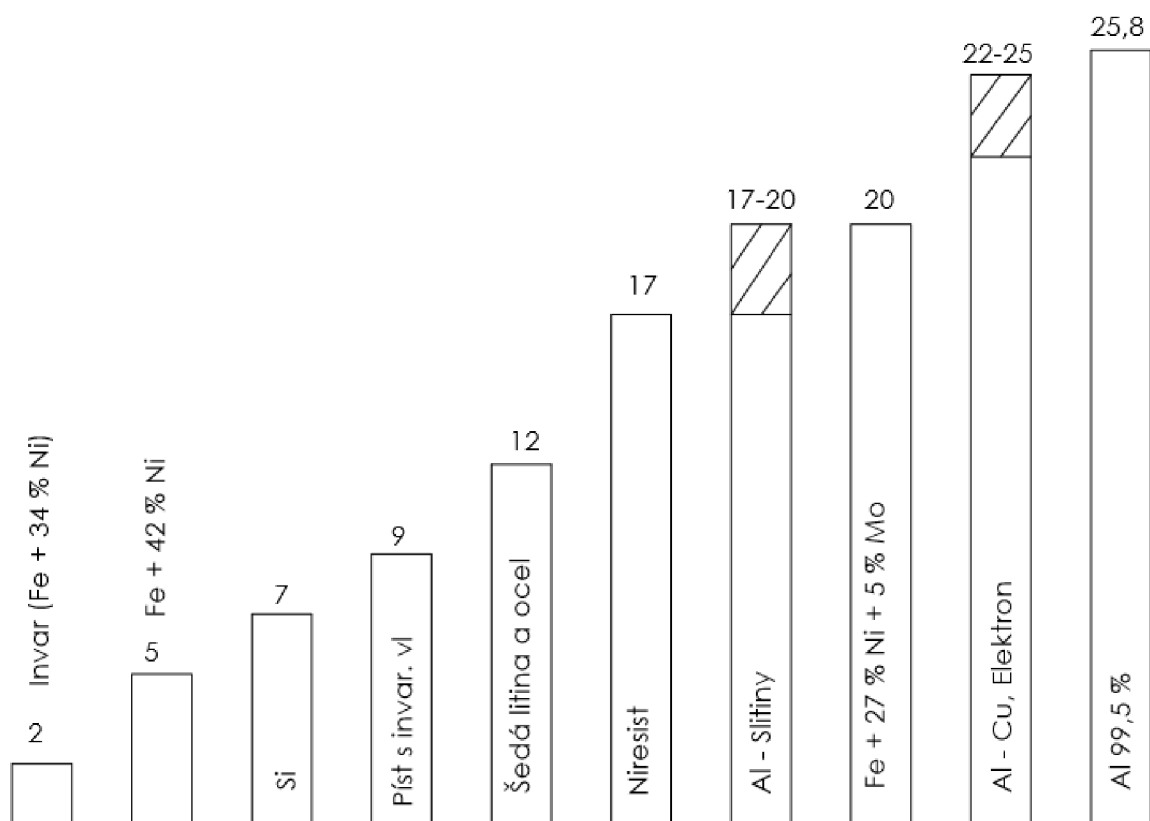
Tvrdost pístu je velice důležitý faktor, protože materiál pístu musí být za provozní teploty dostatečně tvrdý hlavně v kroužkové části. Ale také v místě uložení čepu, i když tady teploty dosahují podstatě nižších hodnot.[9]

d) Tepelná vodivost

Maximální teploty ve spalovacím prostoru jsou velmi vysoké, pohybují se někde kolem bodu tání platiny. Teploty výfukových plynů se pohybují ještě nad bodem tání hliníku. Hliník má dobrou tepelnou vodivost, ale jeho pracovní teplota je nižší než u pístu litinového. Na dně litinového pístu jsou místa s velmi vysokou teplotou, při které i dobrý motorový olej tvoří karbon a usazeniny karbonu jsou nebezpečné pro životnost motoru.[9]

e) Tepelná roztažnost a rozměrová stálost

Tepelná roztažnost má vysoký vliv na velikost vůli pístu ve válci. Velice malou tepelnou roztažnost má invarová ocel ($2 \cdot 10^{-6}$). Šedá litina má roztažnost asi poloviční než běžné pístové slitiny. Píst litinový je nejvýhodnější, protože se svou roztažností ($12 \cdot 10^{-6}$) velice přibližuje ideálnímu požadavku ($9 \cdot 10^{-6}$). Rozměrové stálosti jsme schopni dosáhnout tepelným zpracováním.[9]



Obr. 9 Tepelná roztažnost různého pístového materiálu[9]

f) Měrná váha

Pevnost hliníkových slitin při pracovních teplotách je přibližně dvakrát menší než pevnost šedé litiny. Ale to nemění nic na tom, že stejně pevný píst z hliníkových slitin je podstatně lehčí než píst litinový. Však nejlehčí by byl píst z hořčikové slitiny.[9]

g) Kluzné vlastnosti

Slitina hliníku s křemíkem má velice dobré kluzné vlastnosti. Šedá litina na tom také není nijak špatně. To je způsobeno tím, že v její struktuře se nacházejí grafitová zrníčka, která mají samomazací účinek a napomáhají k udržování olejového filmu.[9]

h) Odolnost proti korozi

Odolnost proti korozi se převážně řeší různými povrchovými úpravami. Proto není nutné, aby materiál, který byl použit k výrobě pístu byl zcela odolný. Však může dojít k pár nepříznivým situacím, které mohou mít za následek korodování pístu. Například když vnikne do válců voda přes poškozené těsnění. Tyto situace nastávají zřídka a je to řešeno povrchovými úpravami.[9]

i) Slévateľnost a kovateľnost

Pístových slitin vzniklo velmi mnoho, z nichž některé mají dobrou slévateľnost. Jiné slitiny jsou vhodné pro kování. Tyto vlastnosti se týkají spíše výroby než funkce pístu, a proto jsou podstatné pro výrobce.[9]

j) Obrobitelnost a cena

Obrobitelnost materiálu, a zmíněná kritéria v předešlém odstavci mají vliv hlavně na cenu. Důležitá jsou převážně pro výrobce. Slévateľnost, kovateľnost, nebo obrobitelnost se v konečné fázi promítne do ceny pístu. Která je podstatná pro spotřebitele.[9]

2.5.1 HLINÍKOVÉ SLITINY

Pro písty je složení hliníkových slitin velmi různorodé. Hliník legujeme jinými, převážně kovovými prvky pro zlepšení jeho nedostatků. K legování obvykle používáme měď, křemík, hořčik, železo, nikl, mangan, titan, cer, molybden a bor. Další vlastnosti se pak zlepšují tepelným zpracováním. Nejrozšířenější jsou dvě základní skupiny. Slitiny hliníku a mědi (Al-Cu) a slitiny hliníku s křemíkem (Al-Si). [9], [11], [4]

Slitiny Al-Cu se vyznačují dobrou odolností proti opotřebení a vysokou tepelnou vodivostí. Jen mědi bez dalších legujících prvků můžeme zvýšit tvrdost hliníku na 130 H_B. Tvrdost za tepla i pevnost je velice uspokojivá, zejména když se tepelně zušlechťují žiháním, kalením a umělým stárnutím. Mají také vysokou tepelnou roztažnost, takže jsou méně vhodné pro písty s pláštěm bez řezů. [9], [11], [4]

Slitiny Al-Si se podstatně liší od slitiny Al-Cu. Křemík ve slitině nemá takový vliv na tvrdost jako měď, ale zlepšuje kluzné vlastnosti a slévateľnost. Zmenšuje tepelnou roztažnost $\alpha = (17 \text{ až } 21) \cdot 10^{-6} \text{ K}$, což umožňuje zmenšit vůle pístu ve válci za studena. Pro vznětové motory se používají příměsi křemíku v rozmezí 13 % až 18 %. Slitiny s obsahem Si nad 13 % vytvářejí primární krystaly uložené v základní eutektické hmotě, která tvoří nosnou kostru. Proto tyto slitiny mají značnou odolnost proti opotřebení a nižší měrnou hmotnost. [9], [11], [4]

Další slitinou jsou například hořčíkové slitiny. Tyto slitiny pro svoji malou tvrdost a odolnost proti opotřebení se používají jen zřídka. Hliníkové slitiny s velkým obsahem hořčíku jsou těžko slévateľné a mají špatnou tepelnou vodivost, ačkoli tepelná vodivost samostatného hořčíku je velmi dobrá. [9], [11], [4]

Železo se ve většině pístových slitin vyskytuje jen jako nečistota. Ve slitině hliníku s mědí snižuje schopnost vytvrzování a zabraňuje vytvrzování stárnutím při normální teplotě. Ve slitině hliníku s křemíkem způsobuje velmi hrubou krystalizaci a podporuje tvoření stažením. Ale téměř ve všech slitinách zlepšuje slévateľnost. Naopak mangan jako dodatečná přísada kompenzuje nepříznivý vliv železa. Nikl zvětšuje hlavně pevnost slitiny při vysokých teplotách. Kromě železa a křemíku, které vždy hutní hliník, tak se ve slitinách vyskytuje řada jiných kovů jako nečistoty. Množství těchto nečistot má vliv na cenu hutního hliníku a přípustné množství nečistot je plně stanoveno normami. [9], [11], [4]

2.5.2 OCEL

Ocel je v podstatě slitina železa s uhlíkem a několika dalšími prvky, kde obsah uhlíku je do 2,14 %. Je poměrně levná a patří mezi nejpoužívanější materiály. Podle tepelného a mechanického zpracování lze dosáhnout několika různých vlastností ocelí. Ocel se rozděluje do třech základních skupin.[9]

Nelegované oceli – vlastnosti jsou určeny především množstvím uhlíku[9]

Nízko legované oceli – vlastnosti jsou velice podobné ocelím nelegovaným, ale tyto oceli jsou vhodnější pro tepelné zpracování. Obsah legujících prvků nepřesahuje hodnotu 5 %.[9]

Vysoce legované oceli – vhodnou kombinací legujících prvků je možné dosáhnout potřebných mechanických a fyzikálních vlastností. Obsah legujících prvků přesahuje 5 %.[9]

2.5.3 POROVNÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN S OCELÍ A OSTATNÍMI MATERIÁLY

Litina se převážně používá tam, kde jsou prvotně kladeny nároky na vysokou odolnost proti opotřebení a tepelnou stálost. Požadavky na hmotnost a nižší teploty dna jsou druhořadé. Písty vyrobeny z litiny se nejčastěji používají u dvoudobých vznětových motorů. Je to zapříčiněno tím, že zvětšená hmotnost pístu u těchto motorů snižuje výsledné síly působící na části klikového ústrojí na konci kompresního zdvihu, a hlavně na začátku pracovního zdvihu, protože smysl působení síly tlaku plynů na píst a síly setrvačné je opačný. [9], [11], [4]

Čistý hliník má znamenitou tepelnou vodivost a nízkou měrnou váhu, ale malou pevnost a tvrdost, špatné kluzné vlastnosti a špatnou slévateľnost k výrobě pístu se nehodí. Velmi vhodným materiálem jsou slitiny hliníku. [9], [11], [4]

Písty z hliníkových slitin se převážně používají u čtyřdobých vznětových motorů ale i u zážehových motorů. Hliníkové slitiny jsou málo odolné proti vysokým teplotám, tudíž se moc nehodí pro motory extrémně tepelně namáhané. U těchto pístu jsou nižší setrvačné síly, protože hliníkové slitiny mají malou měrnou hmotnost. Nižší setrvačné síly a snížené tření pístu umožňuje zvýšení otáček motoru. Při dosahování teplot na 350 °C se mechanické vlastnosti hliníkových slitin velice zhoršují. Ve srovnání s litinovými písty mají také menší odolnost proti opotřebení, sklon k zadírání a jsou drahé. Však nejrozšířenější a nejzákladnější materiály jsou litina a různé slitiny hliníku. Více jsou používány písty z hliníkových slitin než písty litinové. [9], [11], [4]

Ocelové písty umožňují dosáhnout kultivovanějšího chodu motoru, nižší hlučnosti a díky lepší termodynamické účinnosti nižší spotřebě. Díky nižší tepelné vodivosti u oceli, lze dosáhnout ve spalovací komoře větší teploty hoření. To má vliv na nižší spotřebu a nižší emise CO₂, protože je spalování rovnoměrnější a trvá kratší dobu. Výhodou je také nízká roztažnost ocelového pístu, je pouze čtvrtinová proti pístu z hliníkové slitiny. Ocel je velice pevná, ale je zhruba třikrát těžší než hliník. Díky použití vysokopevnostní oceli je možné konstruovat menší písty, a to právě kompenzuje vyšší hmotnost. Nevýhodou je vyšší výrobní cena a větší náchylnost ke korozi, nutné je tak větší mazání pístu. [9], [11], [4]



Obr. 10 Vlevo píst ocelový a vpravo píst z hliníkové slitiny [vlastní]

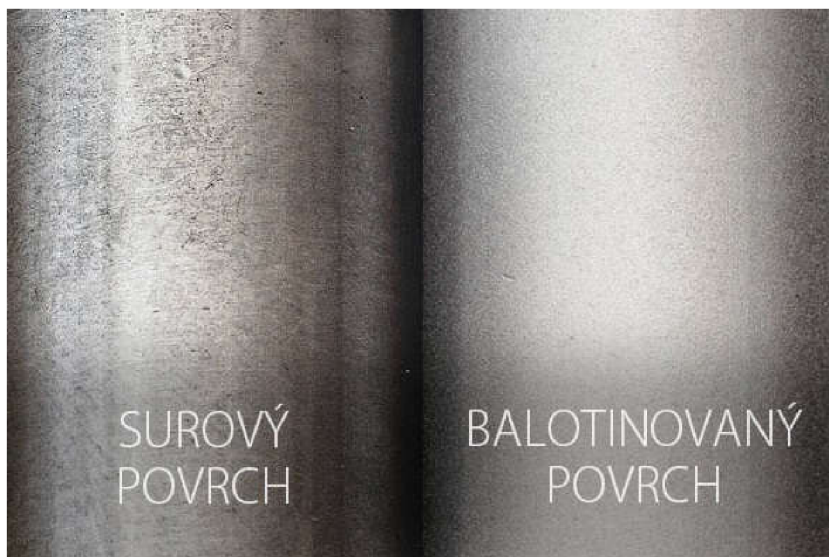
Na obrázku můžete vidět vedle sebe píst ocelový a píst z hliníkové slitiny. Oba písty jsou použity v jednom motoru. Píst ocelový má být brán jako plnohodnotná náhrada za píst z hliníkové slitiny. Jak můžeme vidět, tak píst ocelový je značně menší a není tak robustní jako píst z hliníkové slitiny. Jak bylo výše zmíněno je to z důvodu toho, že ocel má větší pevnost a dovoluje nám konstruovat písty menších rozměrů. V tomto případě je hlavním důvodem použití pístu ocelového nižší tepelná vodivost oceli, což má za následek snížení emisí CO₂. Motor je tímto schopen plnit novější emisní normu EURO.

2.6 POVRCHOVÁ ÚPRAVA PÍSTU

Povrch pláště pístu bývá broušen nebo soustružen diamantovým nožem. Však vhodnější z hlediska záběhu a třecích vlastností, je povrch s jemnými drážkami po soustružení diamantovým nožem, kde se udržuje zásoba oleje pro mazání stykové plochy. Pro urychlení záběhu se aplikují ochranné vrstvy. Cínová nebo olověná vrstva, která zároveň zvyšovala odolnost proti korozi, byla používána dříve, se galvanicky nanášela o tloušťce 0,005 až 0,02 mm. Grafitový povlak je dnes velice používaný, nanáší se nástřikem, nebo metodou sítotisku a za zvýšené teploty je vypalován. Povlak má tloušťku 0,1 až 0,2 mm. Pro zvýšení únavové pevnosti se používá kuličkování nebo balotínování povrchu, které zvyšuje únavovou pevnost o 5 až 15 %. Zvyšování únavové pevnosti otvoru pro pístní čep je provádění protlačováním, kalibrováním.[6]

Speciální případ povrchové úpravy pístu je tepelná izolace dna. Provádí se vytvořením vrstvy materiálu s nižším součinitelem tepelné vodivosti na dně pístu, tímto se dosáhne snížení teploty celého pístu, ale naopak ke zvýšení teploty ve spalovacím prostoru. U vznětových motorů toto může vést k mírnému nárůstu celkové účinnosti. Izolace se provádí několika způsoby například: izolační vložka je připevněna k pístu, píst je tedy dělený a má dno z keramického materiálu. Nebo je možné na dno pístu nanést přímý plazmový nástřik keramickým materiálem.[2]

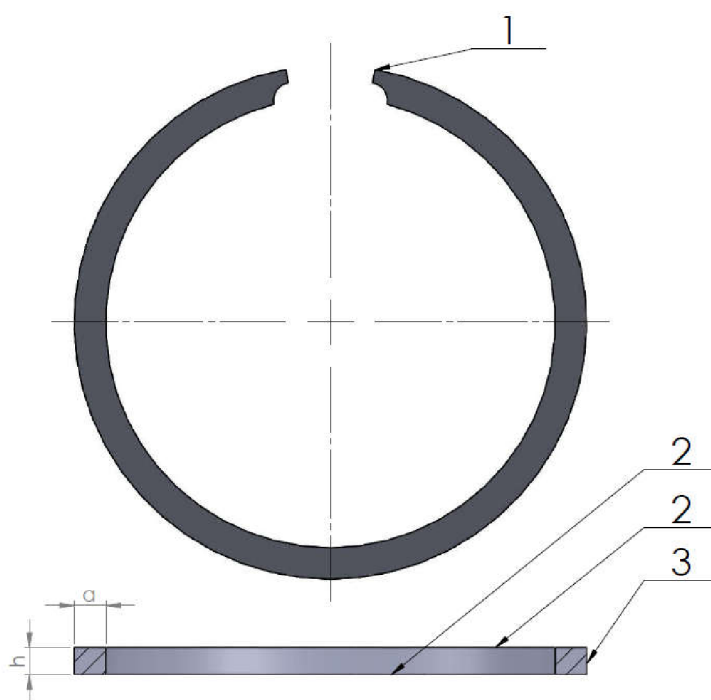
Z hlediska únavového namáhání je u vznětových motorů s přímým vstřikem paliva kritickým místem okraj spalovací komůrky ve dně pístu. Právě tady vlivem několika namáhání dochází ke vzniku únavových trhlinek. Vzniku trhlinek je možné zamezit vytvořením anodické oxidace tvrdé vrstvy oxidu hliníku na kritických místech povrchu dna. Tato úprava se nazývá eloxování a její vrstva je o tloušťce 0,4 až 0,8 mm.[6]



Obr. 11 Rozdíl mezi surovým povrchem a balotinovaným [12]

3 PÍSTNÍ KROUŽKY

Pístní kroužky spolu s písty a válci nebo vložkami určují obvykle životnost motoru. Podobně jako písty pracují i kroužky za velmi těžkých podmínek. Od pístních kroužků požadujeme utěsnění spalovacího prostoru, zamezení úniku oleje z motorové skříně, udržení optimální výšky mazacího filmu oleje a odvod tepla do stěn válce. Pístní kroužky jsou velice namáhány setrvačnými a tlakovými silami, tepelným tokem z pístu do stěn válce a třecími silami mezi kroužkem a stěnou válce. Konstruktivním řešením pístního kroužku by mělo být dosaženo trvalého rovnoměrného přitlaku ke stěnám válce, minimálního opotřebení během provozu a maximálního třecího nebo stíracího účinku. Máme dva druhy pístních kroužků, těsnící a stírací. V současné době jsou písty z pravidla osazovány třemi pístními kroužky, dvěma těsnícími a jedním stíracím.[6], [9]

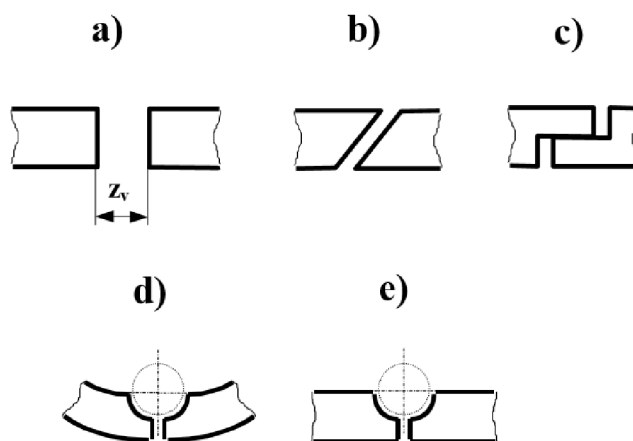


Obr. 12 Části pístního kroužku [vlastní]

- 1 - Zámek pístního kroužku
- 2 - Boční jemně broušené těsnící plochy
- 3 - Hlavní těsnící plocha
- h – tloušťka pístního kroužku
- a – radiální šířka kroužku

3.1 ZÁMKY PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

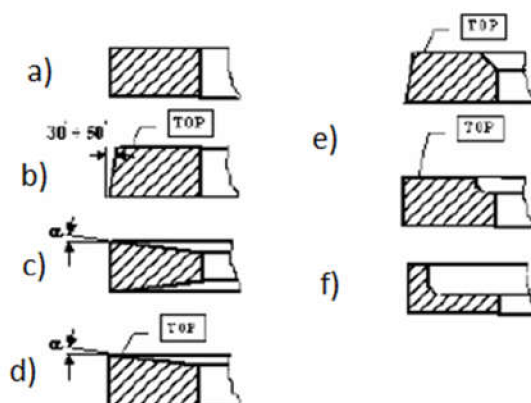
Každý pístní kroužek, jak stírací, tak i těsnící je rozříznut, je to z důvodu umístění kroužku do drážky pro pístní kroužek na pístu. Toto rozříznutí se nazývá zámek pístního kroužku. Zámek také umožňuje tepelnou dilataci. Když je píst osazen více pístními kroužky, tak je nutné, aby jejich zámkové neležely v jedné řadě. Mohlo by to způsobit zhoršení těsnících vlastností. Máme několik různých konstrukčních řešení zámků pístních kroužků. Některé řešení pouze usnadňují montáž kroužku na píst, jiné zlepšují těsnící vlastnosti pístních kroužků.[6], [9]



Obr. 13 Typy zámků pístních kroužků[6]

3.2 TĚSNÍCÍ PÍSTNÍ KROUŽKY

Jejich úkolem je těsnit spalovací prostor a zabránit úniku spalin do klikové skříně. Podílejí se na odvodu tepla do stěn válce, používají se dva těsnící pístní kroužky.[6]



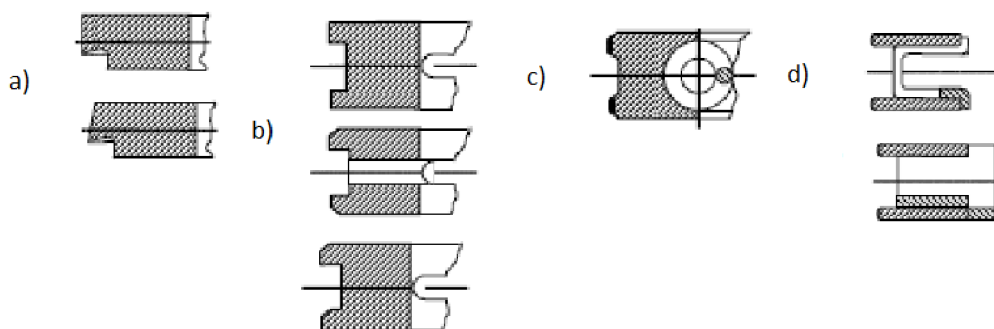
Obr. 14 Těsnící pístní kroužky[6]

- a) Kroužek s válcovou těsnící plochou (pravoúhlí) je nejběžnější a nejlevnější řešení pístního kroužku. Používá se v první drážce pístu. Těsnící plocha je opatřena galvanickou vrstvou tvrdochromu a má válcovitý tvar a boční plochy jsou broušeny. [6], [9]

- b) Kroužek s kuželovou těsnicí plochou (minutový pístní kroužek) používá se jako druhý kroužek v sestavě na pístu. Horní plocha pístu je označena nápisem *TOP*, z důvodu možnosti montáže obráceně, protože uhel sklonu je malý 30° až 50° . Tento kroužek dobře stírá olejovou vrstvu. [6], [2]
- c) Lichoběžníkový kroužek (trapézový) horní i spodní plocha je kuželového tvaru se sklonem 5° až 20° . Při chodu motoru se mění vzájemná radiální poloha pístu a kroužku, tím se mění vzájemná axiální vůle kroužku v drážce což vede k drcení karbonových usazenin. [6], [2], [9]
- d) Jednostranný lichoběžníkový kroužek má horní plochu kuželovou a dobré těsnící vlastnosti v počáteční fázi záběhu. [2], [9]
- e) Kroužky torzní mají výrazné vnitřní vybrání nebo skosení. Vlastnosti jsou podobné jak u minutového kroužku. [6], [9]
- f) Kroužek ve tvaru L se používá pro lepší činnost řídicí hrany pístu. Nevýhodou jsou vyšší třecí ztráty a přídatný ohřev kroužku od tření válce.[6], [2], [9]

3.3 STÍRACÍ PÍSTNÍ KROUŽKY

Úkolem stíracích pístních kroužků je udržovat optimální výšku mazacího filmu mezi stěnou válce a pístem. Tyto kroužky mají zvýšený přitlak. Píst je osazen jedním stíracím kroužkem. [2]



Obr. 15 Stírací pístní kroužky[6]

- a) Kroužky s nosíkem nebo také polostírací. Těsnicí válcový, nebo minutkový kroužek, který má osazení s břitem pro lepší stírací účinek. [2]
- b) Stírací kroužky s výřezem, tyto kroužky mají velký stírací účinek. [2]
- c) Kroužky s výřezem a expandérem, stírací účinek je zde zvýšen použitím šroubového pera. [2]
- d) Skládané kroužky, tyto kroužky jsou složeny z dvou ocelových lamel a rozpínací pružiny. Kroužky jsou lehké a lamely mají vrstvu z tvrdochromu. [2]

3.4 MATERIÁLY PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

Každý motor má jiné pracovní podmínky, různé jsou vlastnosti válce nebo vložky. Kluzné vlastnosti a opotřebení jsou závislé na obou materiálech, a tak není nikdy zcela možné určit optimální vlastnosti pístního kroužku ve spojitosti s vlastnostmi válce. Výrobci se snaží používat co nejméně druhů vhodných materiálů pro výrobu válců. A k těmto druhům materiálů se hledají vhodné materiály pro výrobu pístních kroužků. Pístní kroužky u vznětových motorů jsou namáhány řadou zatížení. Proto při výrobě pístních kroužků je kladeno na materiál mnoho nároků. Pevnost za zvýšené teploty, nízký pokles tangenciální síly kroužku v důsledku působících teplot a dlouhodobého únavového namáhání. Hlavně u vznětových motorů s přímým vstřikováním paliva, kde jsou písty výrazně tepelně namáhány je u pístních kroužků vyžadována dobrá teplená vodivost. Dále požadavek na dobré kluzné vlastnosti a malé opotřebení povrchu kroužku. Také je velice důležité, aby pístní kroužky měly dobrou korozivzdornost a zejména dostatečnou tvrdost materiálu, aby nedocházelo k rychlému opotřebování. Měrná hmotnost je dalším důležitým požadavkem na pístní kroužek. Bohužel žádný pístní kroužek nebude mít vždy ideální vlastnosti, respektive materiál použitý k výrobě pístního kroužku. Tyto nedosažené vlastnosti nám může pomoci zlepšit povrchová úprava. Převážně se pro výrobu pístních kroužků používá litina a ocel.[6], [9], [2]

Litínové kroužky se vyrábí z šedé litiny nebo temperované litiny. Tvrdost pístních kroužků má být o 15 až 25 HB vyšší než tvrdost litinového válce. Pístní kroužky z šedé litiny jsou levné, ale nevýhodou je ztráta pružnosti při vyšší teplotě, opotřebení těsnicí plochy a náchylnost k praskání. Však litina temperovaná má vyšší pevnost a je méně náchylná k praskání.[6]

Ocelové kroužky mají vyšší pevnost a pružnost, ale jsou dražší. Však u litinových vložek válců musí být hlavní těsnicí plocha opatřena vrstvou tvrdochromu.[6]

3.5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

Jak bylo již výše zmíněno, tak nedílnou součástí při výrobě pístních kroužků je povrchová úprava. Povrchová úprava slouží k vylepšení vlastností pístního kroužku, které nejsme schopni dosáhnout samotným použitým materiálem k výrobě pístního kroužku. Díky vhodně zvoleným povrchovým úpravám jsme schopni zvýšit tvrdost, otěruvzdornost, korozivzdornost a zlepšit ochranu proti opotřebení. Povrchová úprava je buď nanášena na celý pístní kroužek, nebo jen čelní plochu, která přichází do styku se stěnou válce. Je několik druhů povrchových úprav, každá úprava zlepšuje rozdílné vlastnosti.[6], [2]

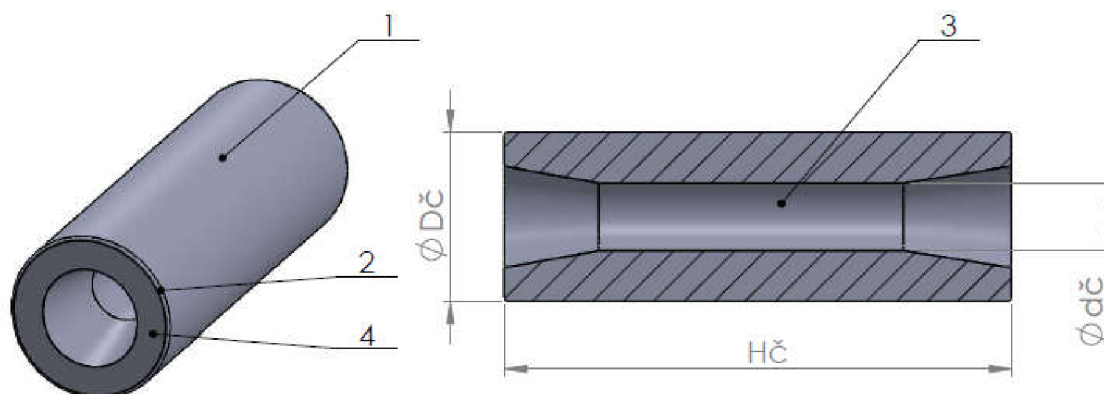
Tvrdé chromování je nanášeno galvanicky. Výhodou je téměř žádné opotřebení během provozu, což je i zároveň nevýhodou při záběhu. Nanášená tloušťka vrstvy je 0,1 až 0,25 mm, z toho je asi 0,05 mm porézního chromu.[2]

Fosfátování je nekovová úprava. Zlepšuje záběhové vlastnosti kroužku, protože dobře drží mazací olej. A má výbornou odolnost proti korozi. Velikost nanesené vrstvy je 0,002 až 0,005 mm. [2]

Nitridace povrchu snižuje u kroužků ocelových opotřebení na hlavní třecí ploše i na bočních dosedacích plochách. Vytvořená vrstva u litinových kroužku je cca 0,08 mm a u ocelových 0,1 mm. [2]

Nanášení vrstvy mědi, molybdenu, vanadia a cínu slouží ke zlepšení kluzných vlastností pístních kroužků. [2]

4 PÍSTNÍ ČEP



Obr. 16 Části pístního čepu [vlastní]

- 1 – Vnější válcová plocha broušená, lapovaná a leštěná.
- 2 – Vnější válcová plocha ukončená broušeným poloměrem. (R 0,5 – 1,0)
- 3 – Odlehčovací otvor
- 4 – Boční broušené plochy
- Hč – Délka pístního čepu
- Dč – Vnější průměr pístního čepu
- dč – Vnitřní průměr pístního čepu

Pístní čep je nedílnou a také nejvíce namáhanou součástí pístní skupiny slouží ke spojení pístu s ojnicí. Pístní čep musí odvádět část tepla z pístu do ojnice, kinematically vést ojnicí a přenášet na ni tahové a tlakové síly. Pístní čep je namáhán na ohyb a smykem od sil, které mají charakter rázů. Třením a případným odvalováním pístního ložiska. Konstruktivním řešením by mělo být dosaženo rovnoměrného opotřebení všech funkčních ploch čepu. Čep je obvykle uložen v oku ojnice a nálitcích v pístu volně (plovoucí pístní čep), montuje se do ohřátých pístů cca 80 až 100°C. Nebo může být pístní čep v jednom uložení zalisován, nejčastěji v ojnici (pevný pístní čep). Toto řešení je levnější, protože odpadá pouzdro v ojnici a není nutné axiální pojištění čepu, však demontáž je náročnější. Pístní čepy pro vznětové motory jsou normalizované dle ČSN 302131.[6], [2], [9]

Tab. 2 Tabulka srovnání rozměrů pístních čepů jednotlivých motorů[2]

	% D	% D	% D
motor	2D	4D – zážehový	4D - vznětový
Dč	22 – 40	25 – 28	33 – 45
dč	10 – 24	8 – 16	8 – 20
Hč	85	85	85
D	100	100	100

Pístní čepy se nejčastěji vyrábí z cementačních ocelí. Cementují se do hloubky 0,5 až 1,5 mm i v odlehčovacím otvoru. Po kalení jsou leštěny, nebo nitridovány.[2]

Velice důležité je pojištění pístního čepu, kde axiální pojistka pístního čepu zabraňuje kontaktu pístního čepu se stěnou válce. Pokud by se tento případ vyskytl, tak vlivem tření pístního čepu o stěnu válce došlo by k nárůstu teploty u pístního čepu, a to by mělo za následek roztavení hliníkové slitiny v oblasti oka pro pístní čep. V současné době se nejvíce používají pojistné kroužky drátěné. [2]

5 ZÁKLADNÍ NÁVRHOVÝ VÝPOČET PÍSTU

Všechny použité vztahy pro výpočet v následujících kapitolách vychází ze zdroje: [7]

Návrhový výpočet pístu vychází ze základních technických dat motoru, jako je výkon, počet válců, vrtání a další. Všechny tyto údaje jsou potřebné k provedení několika základních výpočtů jako je například: zdvihový objem jednoho válce, nebo střední pístová rychlost. Po vypočtení těchto parametrů jsme schopni z několika grafů a doplňkových výpočtů určit základní rozměry pístu. Však tyto určené rozměry jsou pouze informativní, většinou jsou dále vhodně upravovány. Z důvodu dosažení co nejlepších vlastností konkrétního motoru, do kterého je píst montován.[7]

5.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MOTORU 1.6 TDI

V této kapitole se pokusím nastínit výpočet pístu pro vznětový motor od koncernu Volkswagen 1.6 TDI CR (Common rail) verzi s 77kw. Tento motor byl vyvinut jako náhrada za starý vznětový motor 1.9 TDI PD (Pumpdüse). Motor je v nabídce od roku 2009 a od té doby se používal do řady aut koncernu od Škody Octavia až po Volkswagen Passat. V roce 2013 prošel lehkou modernizací. Do nabídky se dostala výkonově slabší verze 66kw a silnější verze 81kw a později i 85kw. Ve výpočtu se budu zabývat původní verzí se 77 kW.

Základní technické data motoru:

- Výkon motoru při otáčkách: $P_e = 77 \text{ kW} / n = 4400 \text{ min}^{-1}$
- Počet válců: $i = 4$
- Zdvihový objem: $V_m = 1598 \text{ cm}^3$
- Kompresní poměr: 16:1
- Vrtání: $D = 79,5 \text{ mm}$
- Zdvih: $Z = 80,5 \text{ mm}$
- Exhalační norma: EU 5
- Taktnost motoru: $\tau_m = 0,5$



Obr. 17 Motor 1.6 TDI 77kw [14]

5.2 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ MOTORU

Vypočtené hodnoty jsou kontrolovány dle doporučených hodnot v následující tabulce.

Tab. 3 Porovnání charakteristických parametrů vznětových motorů [10]

MOTORY vznětové	ROK	jmenovité otáčky		stř. píst. rychlost		stř. efekt. tak		kompresní poměr		zdvihový poměr		objemový výkon	
		[min ⁻¹]		[m.s ⁻¹]		[MPa]		[-]		[-]		[kW.dm ⁻³]	
		minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum
bez rozlišení	1966	3800	4200	10.6	11.7	0.68	0.72	19	21	0.96	1.3	13	19
bez rozlišení	1994	3400	5000	11.5	14.5	0.6	1.1	19	23	0.92	1.2	20	38
komůrkové	2003	3600	5000	12	13.8	0.64	0.72	21.5	23	1	1.1	24	27
přímý vstřík	2003	3000	4400	9	13.4	0.75	1.7	16	21	0.9	1.2	25	58

5.2.1 ZDVIHOVÝ OBJEM JEDNOHO VÁLCE

$$V_z = \frac{V_m}{i} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

$$V_z = \frac{1598}{4} = 399,5$$

$$V_z = 399,5 \text{ cm}^3$$

$$V_z = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

5.2.2 STŘEDNÍ EFEKTIVNÍ TLAK

$$p_e = \frac{60 \cdot P_e}{V_z \cdot n \cdot i \cdot \tau} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

$$p_e = \frac{60 \cdot 77000}{3,9 \cdot 10^{-4} \cdot 4400 \cdot 0,5 \cdot 4} = 1346153$$

$$p_e = 1346153 \text{ Pa}$$

$$p_e = 1,35 \text{ MPa}$$

5.2.3 OBJEMOVÝ VÝKON

$$P_1 = \frac{P_e}{V_z \cdot i} \quad [\text{kW} \cdot \text{dm}^{-3}] \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{77}{3,9 \cdot 10^{-4} \cdot 4} = 48185$$

$$P_1 = 48185 \text{ W} \cdot \text{dm}^{-3}$$

$$P_1 = 48,185 \text{ kW} \cdot \text{dm}^{-3}$$

5.2.4 ZDVIHOVÝ POMĚR

$$k = \frac{Z}{D} \quad [-] \quad (4)$$

$$k = \frac{80,5}{79,5} = 1,012$$

$$k = 1,012$$

5.2.5 STŘEDNÍ PÍSTOVÁ RYCHLOST

$$C_s = 2 \cdot Z \cdot \frac{n}{60} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

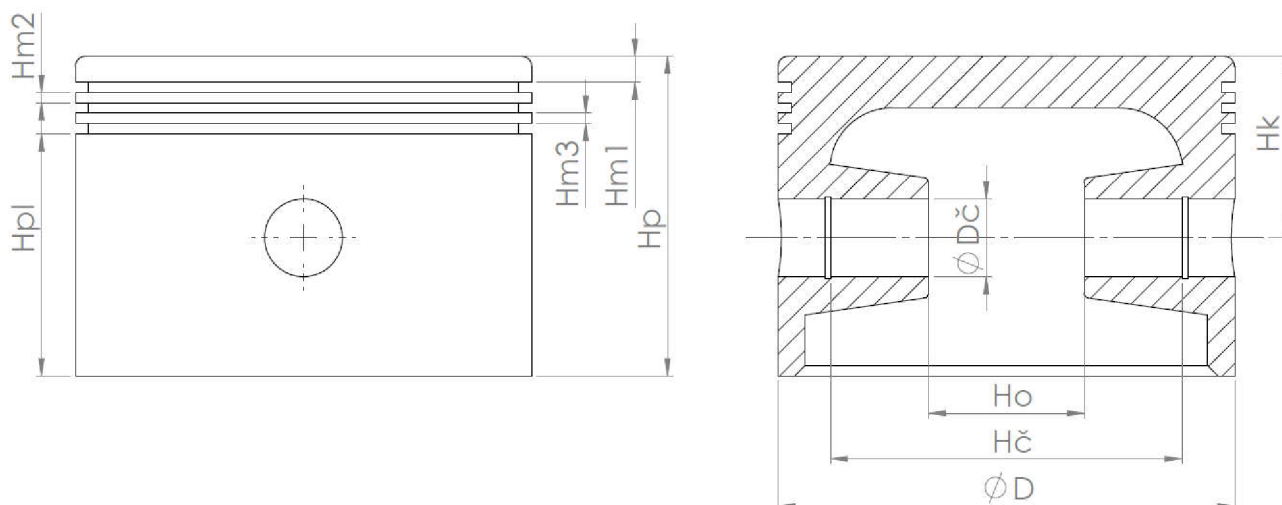
$$C_s = 2 \cdot 0,0805 \cdot \frac{4400}{60} = 11,806$$

$$C_s = 11,806 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Všechny vypočtené hodnoty spadají do intervalů v tabulce 3.

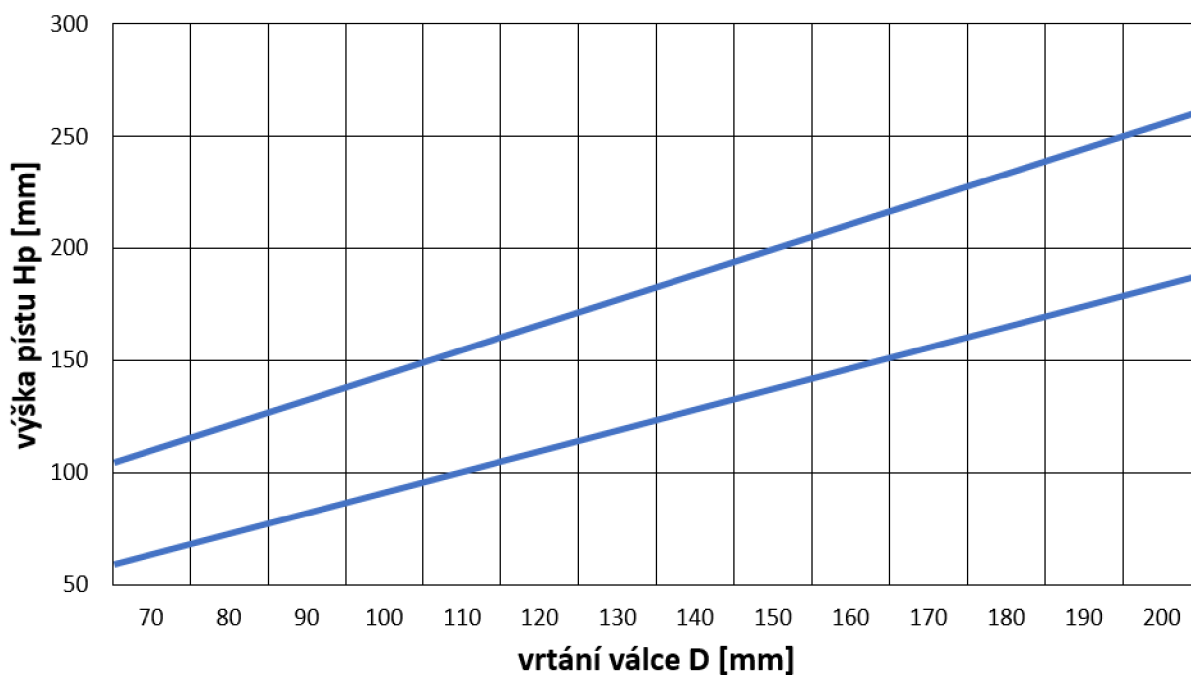
5.3 NÁVRH HLAVNÍCH ROZMĚRŮ PÍSTU

Při navrhování pístu vycházíme z již dříve osvědčených a prověřených konstrukcí. Pro návrh jsou rozměry vyjádřeny ve vztahu k vrtání válce D . Vyjádření vztahů může být tabulkové nebo grafické. Já jsme použil grafické vyjádření.



Obr. 18 Hlavní rozměry pístu [vlastní]

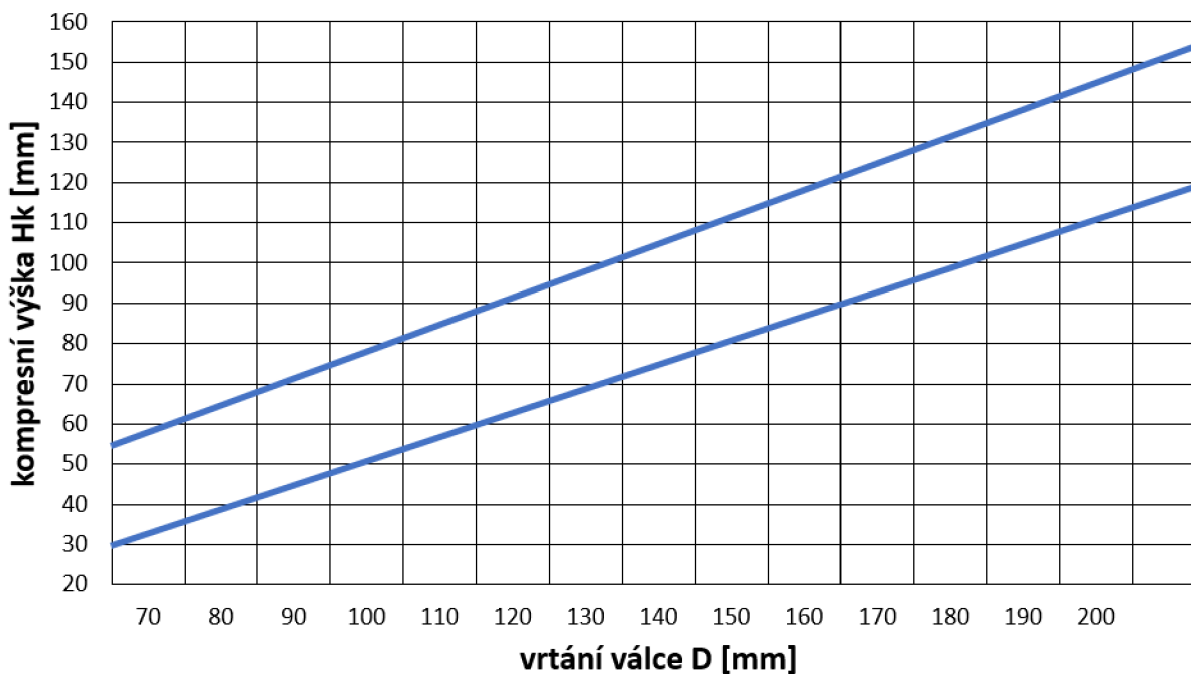
5.3.1 VÝŠKA PÍSTU H_p



Graf 1 Výška pístu H_p v závislosti na vrtání válce D. [7]

Z grafu pro volbu výšky pístu volím hodnotu $H_p = 73$ mm.

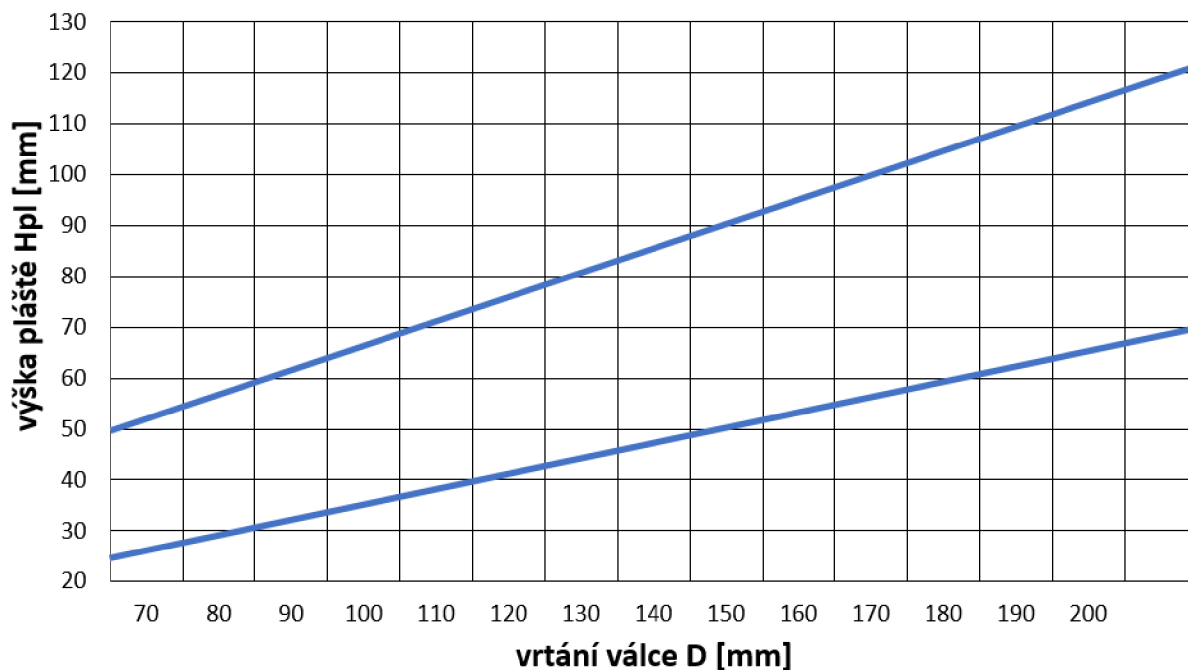
5.3.2 KOMPRESNÍ VÝŠKA PÍSTU H_k



Graf 2 Kompresní výška pístu H_k v závislosti na vrtání válce D. [7]

Z grafu pro volbu kompresní výšky pístu volím hodnotu $H_k = 50$ mm.

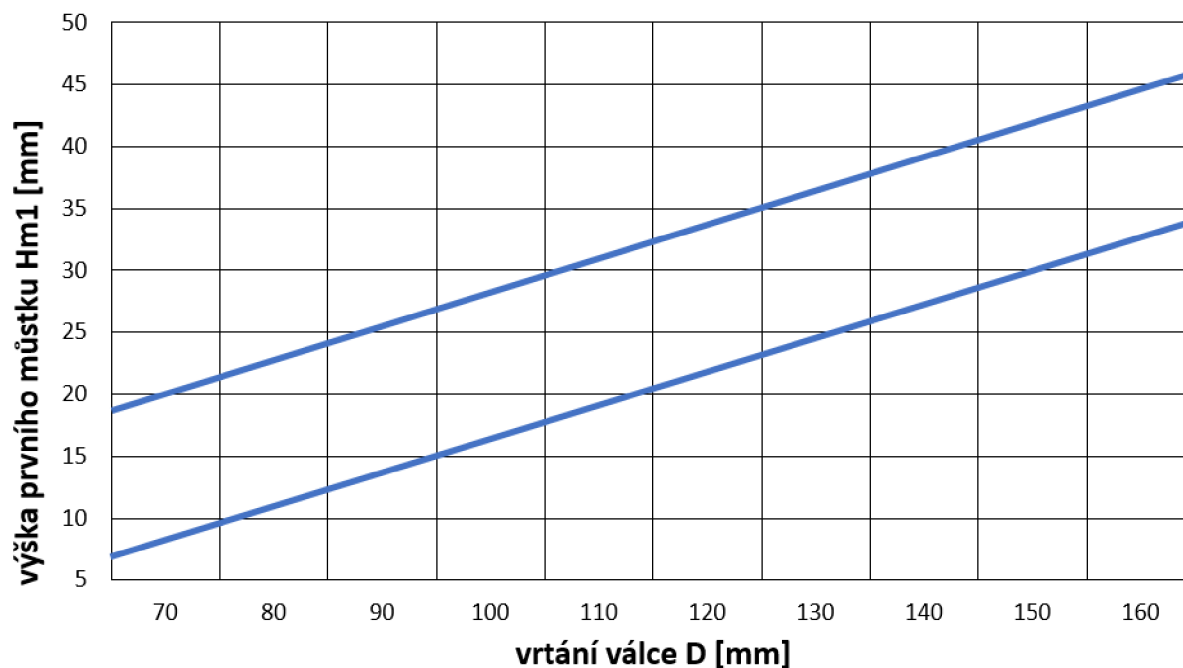
5.3.3 VÝŠKA PLÁŠTĚ PÍSTU H_{PL}



Graf 3 Výška pláště H_{pl} v závislosti na vrtání válce D . [7]

Z grafu pro volbu výšky pístu volím hodnotu $H_{pl} = 40$ mm.

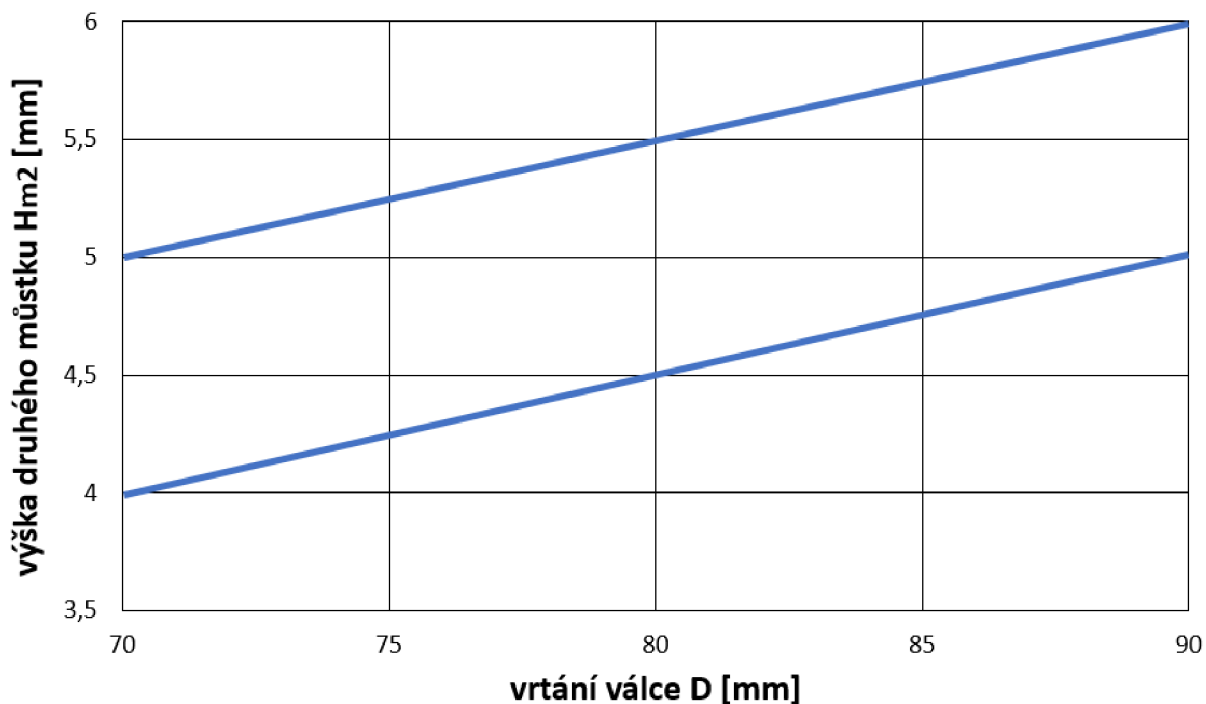
5.3.4 VÝŠKA PRVNÍHO MŮSTKU PÍSTU H_{M1}



Graf 4 Výška prvního můstku H_{m1} v závislosti na vrtání válce D . [7]

Z grafu pro volbu výšky prvního můstku volím hodnotu $H_{m1} = 13$ mm.

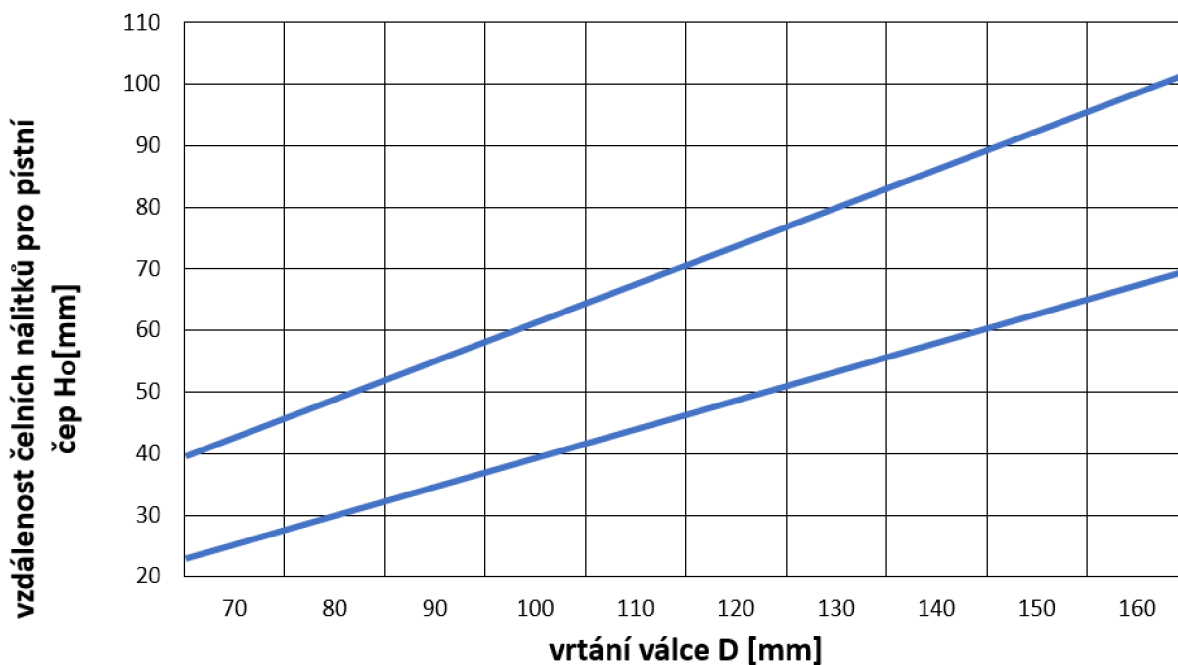
5.3.5 VÝŠKA DRUHÉHO MŮSTKU PÍSTU H_{m2}



Graf 5 Výška druhého můstku H_{m2} v závislosti na vrtání válce D . [7]

Z grafu pro volbu výšky druhého můstku volím hodnotu $H_{m2} = 4,7$ mm.

5.3.6 VZDÁLENOST ČEL NÁLITKŮ PRO PÍSTNÍ ČEP H_o



Graf 6 Vzdálenost čel nálitků pro pístní čep H_o v závislosti na vrtání válce D . [7]

Z grafu pro volbu vzdálenosti čel nálitků pro pístní čep volím hodnotu $H_o = 30$ mm.

Další rozměry pístu jsou voleny z následující tabulky.

Tab. 4 Doporučené meze charakteristických rozměrů pístu čtyřdobých motorů. [7]

Veličina	Zážehový motor [% D]	Vznětový motor [% D]
ϕD	100	100
H_p	90 – 140	120 – 170
H_k	50 – 70	55 – 85
H_o	40	40
$H_{\check{c}}$	85	85
H_{m1}	6 – 10	10 – 18
H_{m2}	3 – 6	4 – 7
$\phi D_{\check{c}}$	25 – 28	33 – 45
δ	5 - 7	7- 10

5.3.7 TLOUŠŤKA DNA PÍSTU δ

$$\delta = 0,1132 \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

$$\delta = 0,1132 \cdot 79,5 = 9 \text{ mm}$$

$$\delta = 9 \text{ mm}$$

Tloušťka dna pístu je volena o 1,1 mm větší. Je to z důvodu toho, že s původní zvolenou hodnotou 7,9 mm nevyhovovala kontrola na maximální ohybové napětí.

5.3.8 PRŮMĚR PÍSTNÍHO ČEPU $D_{\check{c}}$

$$D_{\check{c}} = (0,33 \div 0,45) \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

$$D_{\check{c}} = (0,33 \div 0,45) \cdot 79,5 = 26,235 \div 35,775 \text{ mm}$$

$$\text{Voleno } D_{\check{c}} = 28 \text{ mm}$$

5.3.9 VZDÁLENOST POJISTNÝCH KROUŽKŮ PRO PÍSTNÍ ČEP $H_{\check{c}}$

$$H_{\check{c}} = 85 \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

$$H_{\check{c}} = 85 \cdot 79,5 = 67,575 \text{ mm}$$

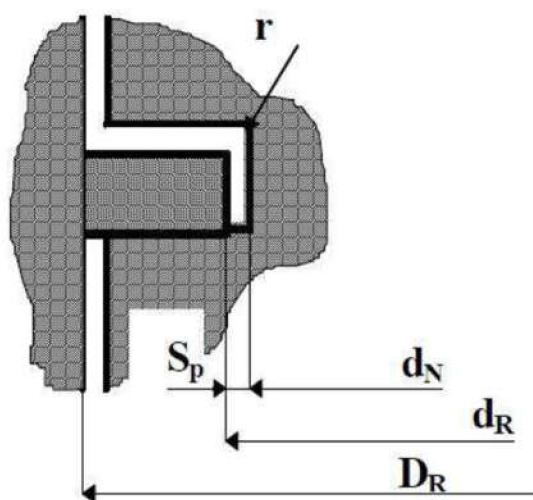
$$\text{Voleno } H_{\check{c}} = 68 \text{ mm}$$

5.4 DRÁŽKY PRO PÍSTNÍ KROUŽKY

Jak již bylo zmíněno, tak v dnešní době se pro vznětové motory používají tři pístní kroužky, dva těsnící a jeden stírací. Pro správnou funkci kroužku po dobu životnosti motoru je důležitá velikost radiální a axiální vůle kroužku v drážce. [7]

5.4.1 PRVNÍ PÍSTNÍ KROUŽEK A RADIÁLNÍ VŮLE PRVNÍHO PÍSTNÍHO KROUŽKU

Mezi zadní stěnou drážky a pístním kroužkem musí být zachována určitá radiální vůle. Však tato vůle nesmí být příliš velká, protože se jedná o ztrátový objem a jsou do tohoto prostoru vtlačovány částice nespáleného paliva a spaliny, což má za následek zvýšení množství škodlivin ve spalínách. Je také nutné počítat s tím, že se v tomto prostoru bude usazovat karbon, který by neměl omezit pohyb kroužku. [7]



Obr. 19 Radiální vůle pístního kroužku [7]

D_R – vnější průměr namontovaného pístního kroužku

d_N – průměr drážky pístního kroužku

d_R – vnitřní průměr namontovaného pístního kroužku

S_p – radiální vůle pístního kroužku

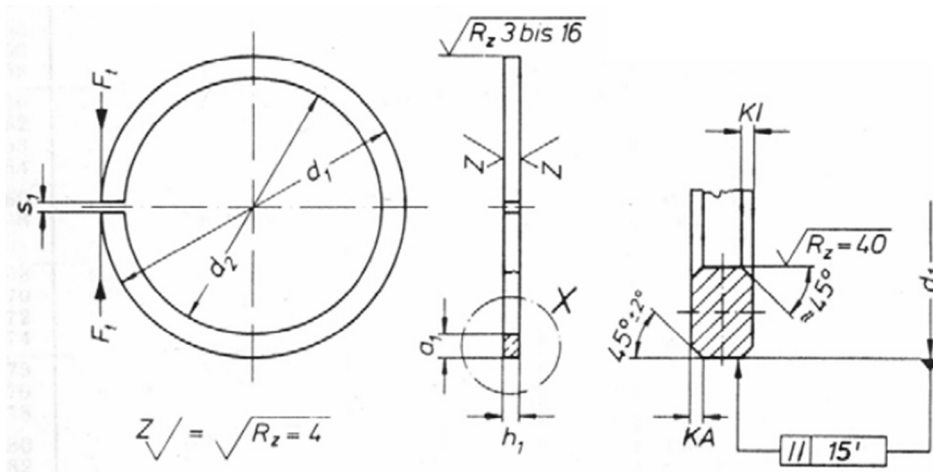
r – vnitřní rádiusy drážky

Vnitřní poloměry by neměly být menší než 0,3 mm

Volím $r = 0,3$ mm

Radiální vůle pístního kroužku bývá v rozmezí 0,6 až 0,8 mm.

Volím $S_p = 0,8$ mm



Obr. 20 První těsnící pístní kroužek

Vzhledem k tomu, že průměr vrtání válce $D = 79,5$ mm není v normách DIN 70 910. Tak na základě těchto norem a rozměrů prvního pístního kroužku těsnícího pro vrtání válce $D = 80$ mm. Volím tyto hodnoty prvního těsnícího pístního kroužku:

$$d_1 = 79,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 72,8 \text{ mm}$$

$$a = 3,35^{+0,10}_{-0,25} \text{ mm}$$

$$h_1 = 1,5^{+0,010}_{-0,022} \text{ mm}$$

$$S_1 = 0,3_0^{+0,2} \text{ mm}$$

Průměr drážky pro první pístní kroužek těsnící:

$$d_n = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (8)$$

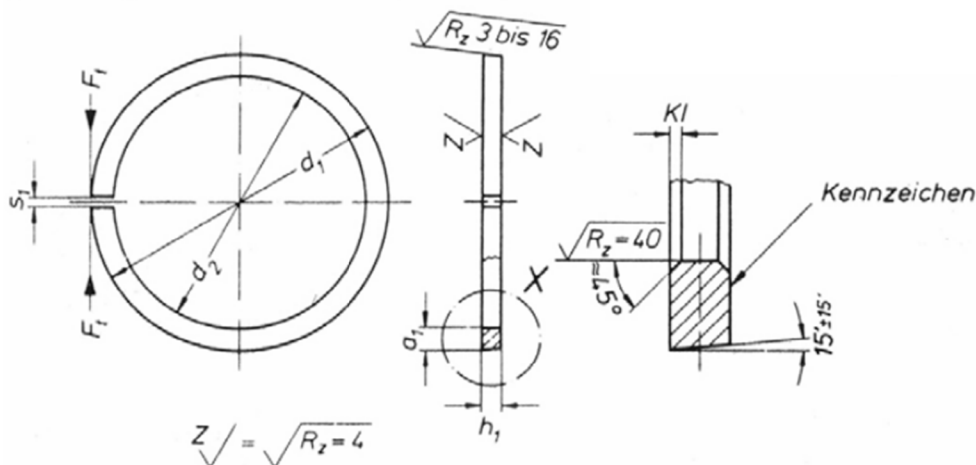
$$d_n = 79,5 - 2 \cdot (3,35 + 0,8) = 71,2$$

$$d_n = 71,2 \text{ mm}$$

5.4.2 DRUHÝ PÍSTNÍ KROUŽEK A RADIÁLNÍ VŮLE DRUHÉHO PÍSTNÍHO KROUŽKU

Radiální vůle pístního kroužku bývá v rozmezí 0,6 až 0,8 mm.

Volím $S_p = 0,8$ mm



Obr. 21 Druhý těsnící pístní kroužek minutový

Vzhledem k tomu, že průměr vrtání válce $D = 79,5$ mm není v normách DIN 70 915. Tak na základě těchto norem a rozměrů druhého pístního kroužku těsnícího pro vrtání válce $D = 80$ mm. Volím tyto hodnoty druhého těsnícího pístního kroužku:

$$d_1 = 79,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 72,8 \text{ mm}$$

$$a = 3,35_{-0,25}^{+0,10} \text{ mm}$$

$$h_1 = 2_{-0,022}^{+0,010} \text{ mm}$$

$$S_1 = 0,3_0^{+0,2} \text{ mm}$$

Průměr drážky pro druhý pístní kroužek těsnící:

$$d_n = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (9)$$

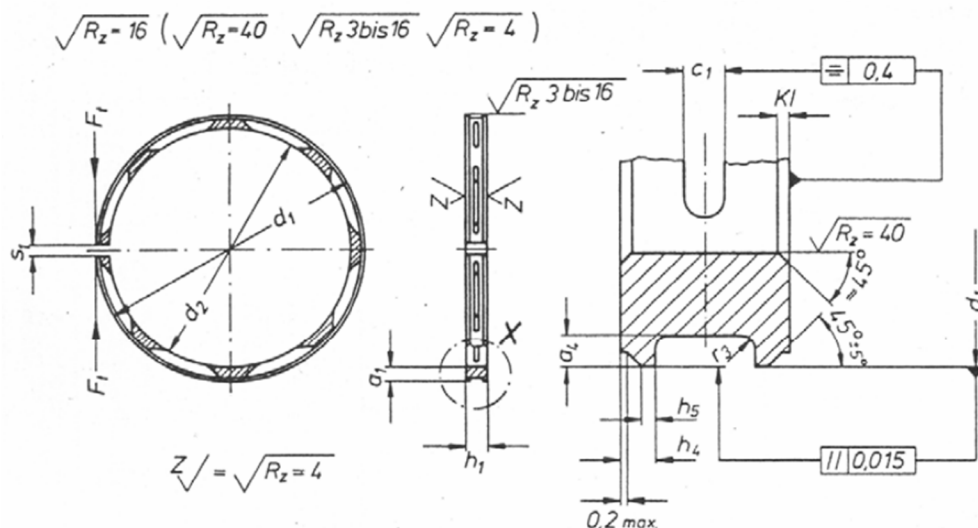
$$d_n = 79,5 - 2 \cdot (3,35 + 0,8) = 71,2$$

$$d_n = 71,2 \text{ mm}$$

5.4.3 TŘETÍ PÍSTNÍ KROUŽEK A RADIÁLNÍ VŮLE TŘETÍHO PÍSTNÍHO KROUŽKU

Radiální vůle pístního kroužku bývá v rozmezí 0,6 až 0,8 mm.

Volím $S_p = 0,8$ mm



Obr. 22 Třetí pístní kroužek s výřezy, střechovitě zkosen se šroubovým expandérem

Vzhledem k tomu, že průměr vrtání válce $D = 79,5$ mm není v normách DIN 70 947. Tak na základě těchto norem a rozměrů pístního kroužku stíracího pro vrtání válce $D = 80$ mm. Volím tyto hodnoty stíracího pístního kroužku:

$$d_1 = 79,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 72,8 \text{ mm}$$

$$a = 3,35^{+0,10}_{-0,25} \text{ mm}$$

$$h_1 = 5^{+0,010}_{-0,022} \text{ mm}$$

$$S_1 = 0,25^{+0,25}_0 \text{ mm}$$

Průměr drážky pro pístní kroužek stírací:

$$d_n = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (10)$$

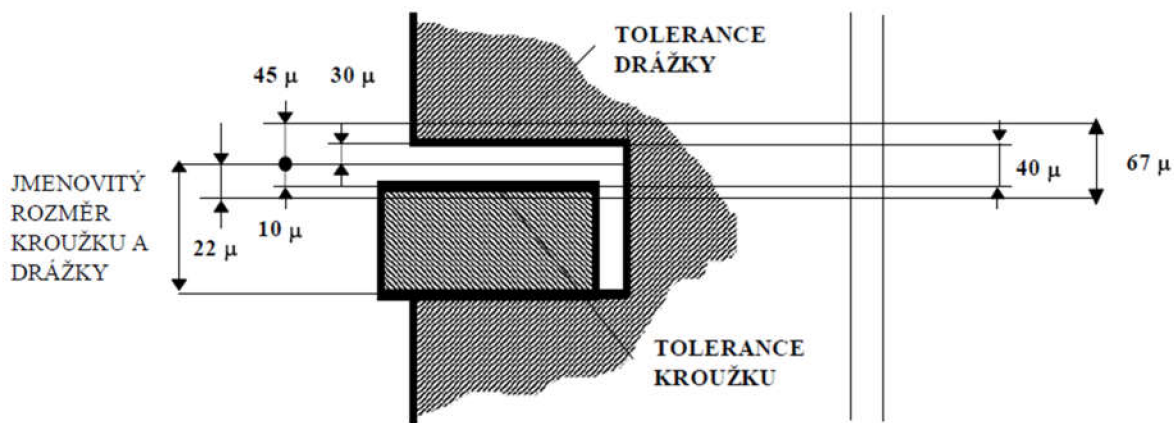
$$d_n = 79,5 - 2 \cdot (3,35 + 0,8) = 71,2$$

$$d_n = 71,2 \text{ mm}$$

5.4.4 AXIÁLNÍ VŮLE PÍSTNÍCH KROUŽKŮ

Axiální vůle je určována hodně faktory. Rozhodující faktor je vznik karbonových usazenin. V důsledku vysokých teplot u prvního pístního kroužku jsou voleny axiální vůle větší než u druhého pístního kroužku. [7]

Drážky pro stírací kroužky jsou z pravidla širší než drážky pro těsnící pístní kroužky. Je to z důvodu toho, že součástí jejich konstrukce jsou i průřezy pro odvod setřené oleje. [7]



Obr. 23 Toleranční pole a axiální vůle pístního kroužku [7]

Podle normy DIN určíme maximální a minimální axiální vůle kroužků

První těsnící kroužek:	drážka	$1,5^{+0,050}_{+0,035} \text{ mm}$
	kroužek	$1,5^{-0,10}_{-0,022} \text{ mm}$
Druhý těsnící kroužek:	drážka	$2^{+0,040}_{+0,025} \text{ mm}$
	kroužek	$2^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$
Stírací kroužek:	drážka	$5^{+0,040}_{+0,025} \text{ mm}$
	kroužek	$5^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$

5.5 TLOUŠŤKA STĚNY PLÁŠTĚ PÍSTU

Aby bylo dosaženo dobrého vedení pístu ve válci motoru, nesmí překročit měrný tlak mezi pláštěm pístu a stěnou válce hodnotu 0,6 až 1,4 MPa. [7]

Tloušťka stěny pro vznětové motory by měla být minimálně – $0,03 \cdot D$

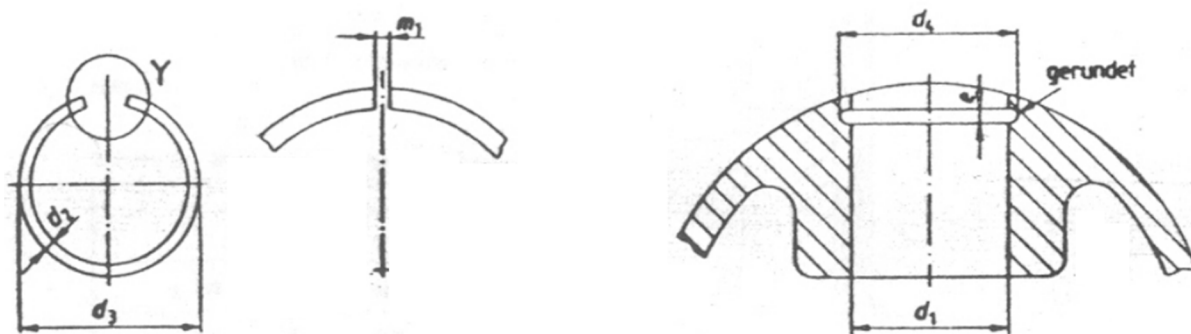
$$\delta_{\min} = 0,03 \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

$$\delta_{\min} = 0,03 \cdot 79,5 = 2,385$$

$$\delta_{\min} \geq 2,385 \text{ mm}$$

5.6 POJIŠTĚNÍ AXIÁLNÍ POLOHY PÍSTNÍHO ČEPU

Pojištění axiální polohy pístního čepu je realizováno pístními kroužky. Ty to kroužky volíme dle normy DIN 73 130. [7]



Obr. 24 Pojišťovací kroužek a drážka pro kroužek. [7]

5.6.1 POJIŠŤOVACÍ KROUŽEK

$$d_{p3} = 36^{+1,0} \text{ mm} \quad (12)$$

$$d_{p2} = 2_{-0,04}^0 \text{ mm}$$

$$m_{p1} = 0,7 \div 2,0 \text{ mm}$$

5.6.2 DRÁŽKA PRO POJIŠŤOVACÍ KROUŽEK

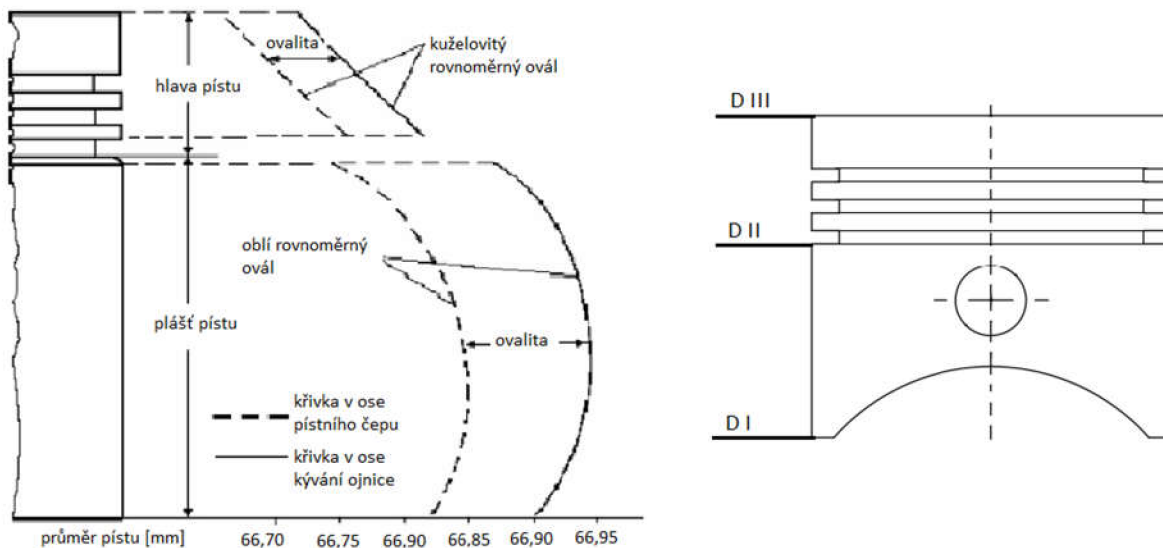
$$d_{d3} = 32 \text{ mm} \quad (13)$$

$$d_{d2} = 34,4_0^{+0,25} \text{ mm}$$

$$e = 2,1_0^{+0,1} \text{ mm}$$

5.7 BOČNÍ KŘIVKA PÍSTU

Jak bylo zmíněno v kapitole konstrukce pístu, tak píst z hliníkové slitiny při normální teplotě není zcela válcový. Válcovitosti dosahuje až po zahřátí na provozní teplotu motoru. Tomu odpovídá tvar boční křivky uvedený na obrázku níže. Však skutečný tvar boční křivky pístu je možno stanovit pouze experimentálně. Základní návrh průměrů D_I , D_{II} , D_{III} , je možno stanovit z grafů, které se nachází v příloze této práce. [11], [7]



Obr. 25 Tvar boční křivky, ovalita pístu a průměry pro určení boční křivky. [7]

$$D_I = D - 0,1 \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

$$D_I = 79,5 - 0,1 = 79,4$$

$$D_I = 79,4 \text{ mm}$$

$$D_{II} = D - 0,2 \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

$$D_{II} = 79,5 - 0,2 = 79,3$$

$$D_{II} = 79,3 \text{ mm}$$

$$D_{III} = D - 0,32 \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

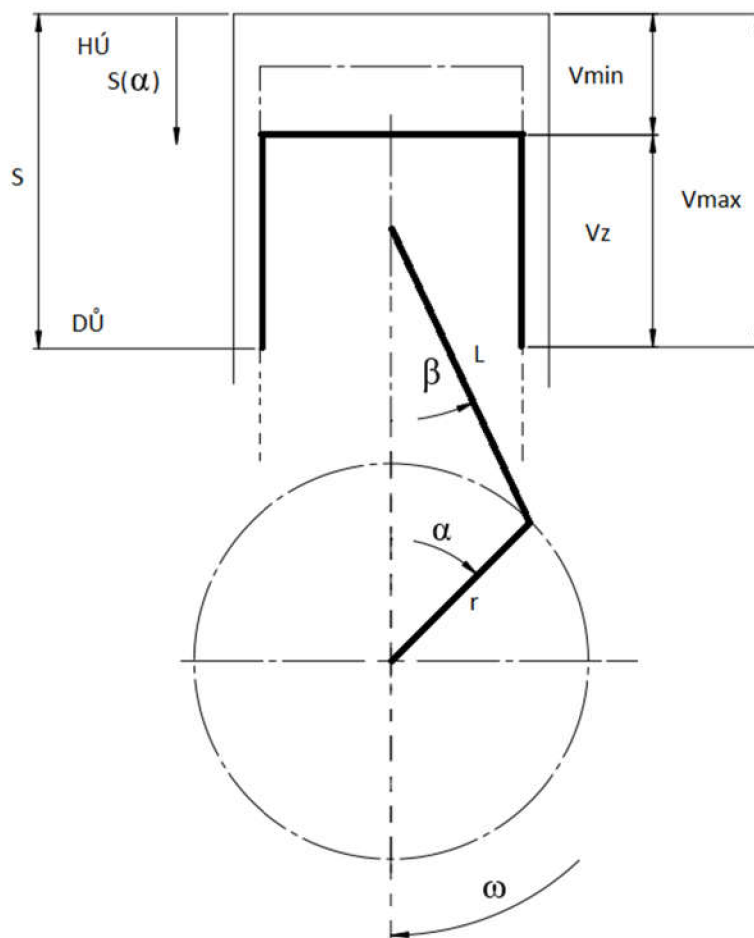
$$D_{III} = 79,5 - 0,32 = 79,18$$

$$D_{III} = 79,18 \text{ mm}$$

6 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY KLIKOVÉHO MECHANISMU A SILOVÝ ROZBOR

Je nutné provést výpočet poloměru klikové hřídele, délky ojnice a silový rozbor klikového mechanismu. Z důvodu toho, že tyto vypočtené hodnoty jsou potřebné pro pevnostní výpočet pístu.

6.1 HLAVNÍ ROZMĚRY KLIKOVÉHO MECHANISMU



Obr. 27 Schéma klikového mechanismu [vlastní]

- vrtání (průměr) válce D ,
- zdvih pístu Z ,
- poloměr klikové hřídele r_k ,
- délka ojnice l_o ,

Hodnoty jako vrtání a zdvih pístu byly již dříve určeny.

6.1.1 VÝPOČET POLOMĚRU KLIKOVÉ HŘÍDELE

$$r_k = \frac{Z}{2} \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

$$r_k = \frac{80,5}{2} = 40,25$$

$$r_k = 40,25 \text{ mm}$$

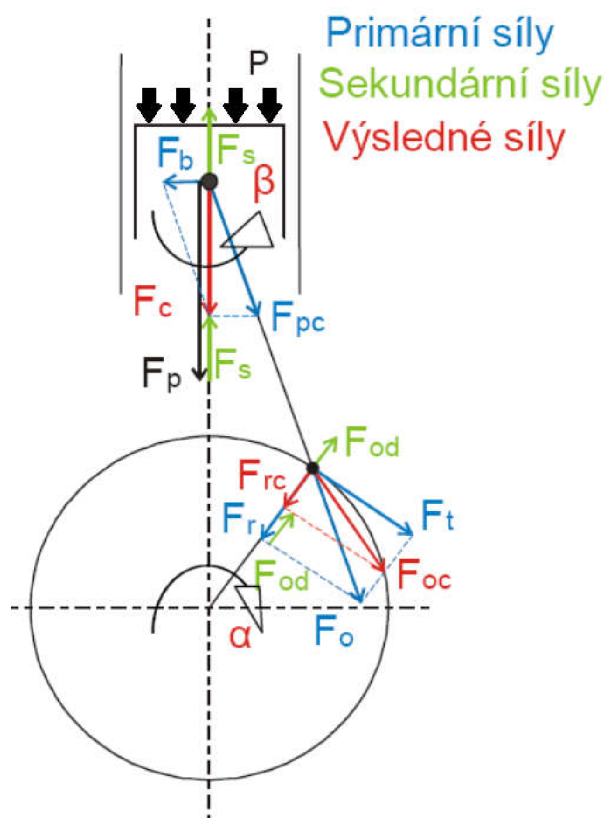
6.1.2 VÝPOČET DÉLKY OJNICE:

Ojniční poloměr λ_0 má být volen v rozsahu $0,2 \div 0,3$. Volím hodnotu $\lambda_0 = 0,25$

$$l_0 = \frac{r_k}{\lambda_0} \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

$$l_0 = \frac{40,25}{0,25} = 161$$

$$l_0 = 161 \text{ mm}$$

6.2 SILOVÝ ROZBOR KLIKOVÉHO MECHANISMU

Obr. 28 Silový rozbor pístu [7]

Pro další výpočty je potřeba znát tyto jednotlivé síly:

- Maximální sílu od tlaků plynů $F_{p,max}$
- Maximální setrvačnou sílu $F_{s,max}$
- Maximální normálovou sílu $F_{n,max}$
- Celkovou maximální sílu $F_{c,max}$

6.2.1 MAXIMÁLNÍ SÍLA OD TLAKŮ PLYNŮ

Maximální hodnotu tlaků plynů ve válci jsem vyčetl z indikátorového diagramu. Kde při úhlu natočení klikového hřídele 240° je přibližně hodnota $p_{max} = 16,7 \text{ Mpa}$

$$F_{p,max} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{max} \quad [\text{kN}] \quad (17)$$

$$F_{p,max} = \frac{\pi \cdot 0,0795^2}{4} \cdot 16,7 \cdot 10^6 = 82897$$

$$F_{p,max} = 82897 \text{ N}$$

$$F_{p,max} = 93,817 \text{ kN}$$

6.2.2 MAXIMÁLNÍ SETRVAČNÁ SÍLA

Pro výpočet setrvačné síly potřebujeme znát hmotnost koruny pístu $m_x = 0,262 \text{ kg}$. Vypočítáno programem Solidworks.

A dále je třeba znát úhlovou rychlost ω_{max} otáčení klikového hřídele.

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (18)$$

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot 4400}{30}$$

$$\omega_{max} = 460,76 \text{ s}^{-1}$$

Pak pro maximální setrvačnou sílu platí:

$$F_{s,max} = m_x \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 \cdot \lambda_0) \quad [\text{kN}] \quad (18)$$

$$F_{s,max} = 0,262 \cdot 0,04025 \cdot 460,76^2 \cdot (1 \cdot 0,25) = 2798,5$$

$$F_{s,max} = 2798,5 \text{ N}$$

$$F_{s,max} = 2,798 \text{ kN}$$

6.2.3 CELKOVÁ MAXIMÁLNÍ SÍLA

$$F_{c,max} = F_{p,max} - F_{s,max} \quad [\text{kN}] \quad (19)$$

$$F_{c,max} = 82,897 - 2,798 = 80,09$$

$$F_{c,\max} = 80,09 \text{ kN}$$

6.2.4 MAXIMÁLNÍ NORMÁLOVÁ SÍLA

K výpočtu maximální normálové síly je třeba určit úhel β svírající osu pístu s osou ojnice, při kterém je maximální tlak ve spalovacím prostoru. Maximální tlak je při úhlu 248° oproti základní poloze. Úhel natočení klikového hřídele je tedy $\alpha = 112^\circ$.

Výpočet úhlu β :

$$\beta = \arcsin \cdot (\lambda_0 \cdot \sin\alpha) \quad [^\circ] \quad (20)$$

$$\beta = \arcsin \cdot (0,25 \cdot \sin 112^\circ)$$

$$\beta = 13,3^\circ$$

Pak pro maximální normálovou sílu platí:

$$F_{n,\max} = F_{c,\max} \cdot \tan\beta \quad [\text{kN}] \quad (21)$$

$$F_{n,\max} = 80,09 \cdot \tan 13,3^\circ = 18,93$$

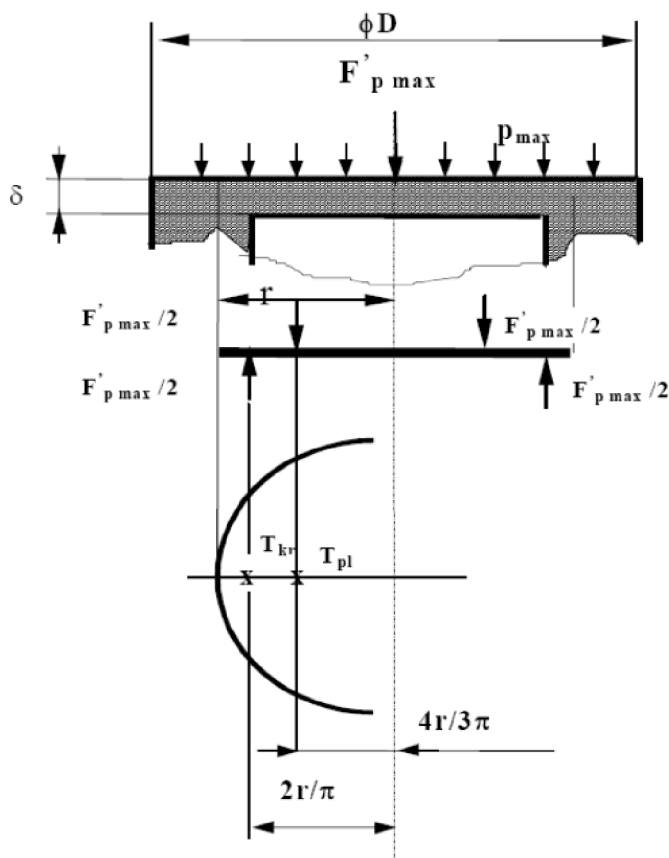
$$F_{n,\max} = 18,93 \text{ kN}$$

7 PEVNOSTNÍ VÝPOČET PÍSTU

Píst má poměrně složitý tvar, jak jste mohli vidět na obr.3 řez pístem vznětového motoru. A jeho namáhání umožňuje pouze informativní výpočet, který zahrnuje pouze základní namáhání, vyvolané tlakem plynů při spalování a setrvačnými silami. Několik dalších zatěžujících účinků jako je tepelný tok průřezy pístu, proměnnost zatěžujících účinků a vlivy vrubových účinků vyvolávající koncentraci napětí není možné přímo do výpočtu zahrnout a jsou souhrnně respektovány velikostí dovolených hodnot napětí. [7]

7.1 VÝPOČET DNA PÍSTU

Pevnostní výpočet dna pístu je prováděn na ohyb. Modelem výpočtu dna je kruhová deska, která je vetknutá či podepřená a rovnoměrně spojitě zatížená od tlaků plynů. U výpočtu maximálního ohybového napětí je možné nahradit kruhovou desku přímým nosníkem, kde zatěžující účinek nahrazuje osamělá síla.[7]



Obr. 29 Zatížení dna pístu a výpočtový model[7]

Maximální tlak plynů ve válci motoru $p_{\max} = 16,7 \text{ MPa}$.

Poloměr vetknutí uvažujeme $r = 30 \text{ mm}$.

7.1.1 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÝ MOMENT

$$M_{o,max} = \frac{r^3}{3} \cdot p_{max} \quad [Nm] \quad (22)$$

$$M_{o,max} = \frac{0,030^3}{3} \cdot 16,7 \cdot 10^6 = 150,3$$

$$M_{o,max} = 200,05 \text{ Nm}$$

7.1.2 MOMENT ODPORU V OHYBU

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot 2 \cdot r \cdot \delta^2 \quad [m^3] \quad (23)$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot 2 \cdot 0,033 \cdot 0,009^2 = 0,810 \cdot 10^{-6}$$

$$W_o = 0,810 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

7.1.3 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÉ NAPĚTÍ

$$\sigma_{o,max} = \frac{M_{o,max}}{W_o} \quad [MPa] \quad (24)$$

$$\sigma_{o,max} = \frac{150,3}{0,810 \cdot 10^{-6}} = 185555555$$

$$\sigma_{o,max} = 185555555 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{o,max} = 185,5 \text{ MPa}$$

7.1.4 MAXIMÁLNÍ OHYBOVÉ NAPĚTÍ NA VETKNUTOU DESKU

$$\sigma_{o,max} = 0,25 \cdot p_{max} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \quad [MPa] \quad (25)$$

$$\sigma_{o,max} = 0,25 \cdot 16,7 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,030}{0,009}\right)^2 = 46388888$$

$$\sigma_{o,max} = 46388888 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{o,max} = 46,3 \text{ MPa}$$

Pro písty z hliníkových slitin je dovolená hodnota napětí $\sigma_{dov} = 40 \div 50 \text{ MPa}$.

Vypočtená hodnota náleží do intervalu.

7.2 NEJSLABŠÍ MÍSTO PLÁŠTĚ PÍSTU

U většiny pístů bývá nejslabší místo v drážce pro pojistný kroužek. Je to z důvodu toho, že právě v tomto místě je stěna zeslabena drážkou a otvory které slouží pro odvod setřené oleje do klikové skříně motoru. [7]

7.2.1 TLAKOVÉ NAMÁHÁNÍ

Minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek $S_x = 3,52 \cdot 10^{-3}$

$$\sigma_{tl,max} = \frac{F_{p,max}}{S_x} \quad [\text{MPa}] \quad (26)$$

$$\sigma_{tl,max} = \frac{82897}{3,52 \cdot 10^{-3}} = 23550284$$

$$\sigma_{tl,max} = 23550284 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{tl,max} = 23,5 \text{ MPa}$$

7.2.2 TAHOVÉ NAPĚTÍ VE VYŠETŘOVANÉM PRŮŘEZU

$$\sigma_t = \frac{F_{sp,x}}{S_x} \quad [\text{MPa}] \quad (27)$$

$$\sigma_t = \frac{2798}{3,52 \cdot 10^{-3}} = 794886$$

$$\sigma_t = 794886 \text{ Pa}$$

$$\sigma_t = 0,79 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota napětí pro současné hliníkové slitiny je: $\sigma_{t,dov} = 4 \div 10 \text{ MPa}$. Píst je předimenzován z hlediska tahového napětí.

7.3 MĚRNÝ TLAK NA PLÁŠŤ PÍSTU

Měrný tlak je vyvolaný normálovou silou, kterou působí píst na stěnu válce.

Nosná délka pláště L_{pl} [m]

$$p_{pl} = \frac{F_{n,max}}{D \cdot L_{pl}} \quad [\text{MPa}] \quad (28)$$

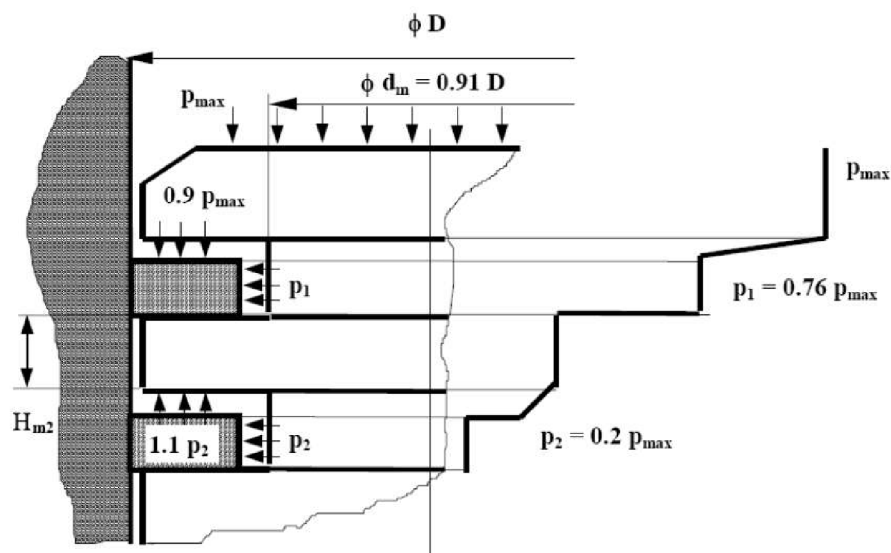
$$p_{pl} = \frac{18930}{0,0795 \cdot 0,073} = 3261824$$

$$p_{pl} = 3261824 \text{ Pa}$$

$$p_{pl} = 3,26 \text{ MPa}$$

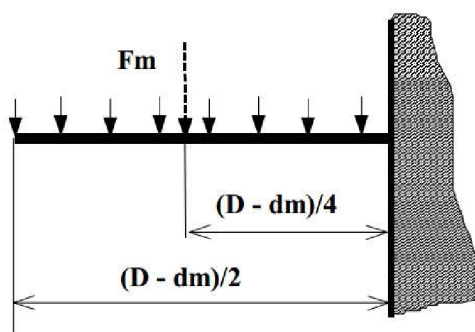
7.4 MŮSTEK MEZI PRVNÍM A DRUHÝM TĚSNÍCÍM KROUŽKEM

Tento můstek je vystavován tlakovému namáhání od plynů ve spalovacím prostoru za působení vysokých teplot. Při dosažení maximální hodnoty tlaku nad pístem je rozložení tlaků v mezikroužkových objemech znázorněno na obrázku níže.[7]



Obr. 31 Rozložení tlaků v mezikroužkových objemech. [7]

Výsledkem je síla F_m která namáhá můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem na ohyb a stříh.



Obr. 30 Namáhání můstku. [7]

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 \cdot d_m^2) \cdot (0,9 \cdot p_{\max} - 0,22 \cdot p_{\max}) \quad [\text{kN}] \quad (29)$$

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0795^2 - 0,072345^2) \cdot (0,9 \cdot 16,7 \cdot 10^6 - 0,22 \cdot 16,7 \cdot 10^6) = 9690$$

$$F_m = 9690 \text{ N}$$

$$F_m = 9,69 \text{ kN}$$

7.4.1 OHYBOVÉ NAPĚTÍ VE VETKNUTÉM MŮSTKU

Ohybový moment:

$$M_o = F_m \cdot \frac{D - d_m}{4} \quad [\text{Nm}] \quad (30)$$

$$M_o = 9690 \cdot \frac{79,5 - 72,345}{4} = 17,332$$

$$M_o = 19,615 \text{ Nm}$$

Modul odporu proti pohybu:

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2 \quad [\text{m}^3] \quad (31)$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,072345 \cdot 0,0047^2 = 0,836 \cdot 10^{-6}$$

$$W_o = 0,836 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Výsledné ohybové napětí:

$$\sigma_{o,\max} = \frac{M_o}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (32)$$

$$\sigma_{o,\max} = \frac{17,332}{0,836 \cdot 10^{-6}} = 20732057 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{o,\max} = 20732057 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{o,\max} = 20,73 \text{ MPa}$$

7.4.2 SMYKOVÉ NAPĚTÍ

Průřez v místě vetknutí:

$$S = \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2 \quad [\text{m}^2] \quad (33)$$

$$S = \pi \cdot 0,072345 \cdot 0,0047 = 1,06 \cdot 10^{-3}$$

$$S = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Výsledné smykové napětí:

$$\tau = \frac{F_m}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (34)$$

$$\tau = \frac{9690}{1,06 \cdot 10^{-3}} = 9141509$$

$$\tau = 91415093 \text{ Pa}$$

$$\tau = 9,14 \text{ MPa}$$

7.4.3 VÝSLEDNÉ REDUKOVANÉ NAPĚTÍ

Hodnota redukovaného napětí by neměla přesáhnout hodnotu $60 \div 80 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{(\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau^2)} \quad [\text{MPa}] \quad (32)$$

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{(20732057^2 + 3 \cdot 9141509^2)} = 26076809$$

$$\sigma_{\text{red}} = 26076809 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\text{red}} = 26,07 \text{ MPa}$$

Vypočtená hodnota splňuje podmínku.

8 SHRnutí VÝPOČTU A POROVNÁNÍ PÍSTŮ

Základní návrhový výpočet pístu je proveden pro motor 1.6 TDI CR od koncernu VW. Nejprve bylo nutné dopočítat základní parametry motoru ze zadaných hodnot. Hodnoty jako: zdvihový objem jednoho válce, střední efektivní tlak, zdvihový poměr a další. Ty to všechny vypočtené hodnoty jsou kontrolovány podle doporučených hodnot v Tab. 3. Za použití hodnoty vrtání válce D a grafického vyjádření jsou určeny základní rozměrové parametry pístu viz kapitola 5.3. Veškeré tyto údaje jsou voleny na základě nastudované problematiky ohledně pístů a pístní skupiny. Především je bráno v úvahu, aby navržený píst nebyl moc těžký, a hlavně aby splňoval veškeré kladené nároky na píst. Menší problém se vyskytl u návrhu tloušťky dna, kde jsem původní hodnotu, na základě tab. č4, zvolil 7.9 mm. Později při kontrole maximálního ohybového napětí jsem zjistil, že tato hodnota je nevyhovující. Z toho důvodu je volena tloušťka dna pístu = 9 mm. Však tato hodnota byla při samotném modelování pístu z konstrukčního hlediska překročena. Pístní kroužky jsou voleny na základě dostupných norem DIN. Bohužel v těchto normách nejsou uvedeny přímo rozměry pístních kroužků pro vrtání válce $D = 79,5$ mm, tak bylo nutné zvolit pístní kroužky pro hodnotu vrtání válce $D = 80$ mm. Však některé rozměry pístních kroužků jsou upraveny tak aby je bylo možné použít v našem případě. Dále bylo nutné vypočítat základní rozměry klikového mechanismu, které jsou potřebné pro pevnostní výpočet pístu. Z hlediska pevnosti z výpočtů plyne, že píst vyhovuje ve všech kontrolovaných oblastech. V některých oblastech se dá říci, že je píst dokonce předimenzován. Jak bylo již zmíněno, tak toto je jen základní návrhový výpočet. Pro přesnější návrh pístu by bylo dalším krokem aplikování metody konečných prvků.

8.1 POROVNÁNÍ PÍSTU NAVRŽENÉHO S PÍSTEM OD KONCERNU VW

Výsledné rozměry pístu navrhovaného v této práci můžeme porovnat s hodnotami pístu od koncernu VW.

Tab. 5 Porovnání základních rozměrů pístů [vlastní]

		Navrhovaný píst [mm]	Píst od koncernu VW [mm]
Výška pístu	H_p	73	68
Kompresní výška pístu	H_k	50	45
Výška pláště pístu	H_{pl}	44	40
Vzdálenost čel nálitků pro pístní čep	H_o	30	28
Vzdálenost pojistných kroužků	$H_č$	68	65
Výška prvního můstku pístu	H_{m1}	13	12
Výška druhého můstku pístu	H_{m2}	4,7	5,5
Výška třetího můstku pístu	H_{m3}	3	3
Průměr pístního čepu	$\phi D_č$	28	26

Jak můžeme vidět v tabulce a příloze, tak rozměry se nijak zvláště neliší. Výška navrhovaného pístu je o 5 mm větší, kompresní výška je větší také o 5 mm a průměr čepu se liší o 2 mm. Celkově píst navrhovaný nabývá větších rozměrů, což má vliv na hmotnost pístu. Liší se také velikost prvního a druhého můstku. První pístní kroužek těsnící je u navrhovaného pístu o 0,3 mm menší, druhý se neliší. Třetí pístní kroužek stírací je značně větší než u pístu od koncernu VW. Zde je vidět, že rozměry pístních kroužků se zcela nadržují norem a jsou z různých konstrukčních hledisek uzpůsobeny přímo pro píst.

Tab. 6 Porovnání drážek pro pístní kroužky [vlastní]

	Navrhovaný píst [mm]	Píst od koncernu VW [mm]
Drážka pro první těsnící kroužek	1,5	1,8
Drážka pro druhý těsnící kroužek	2	2
Drážka pro třetí stírací kroužek	5	3

Zajímavostí je, že výrobce nabízí pro tento píst jak pístní kroužky s vnějším rozměrem $d_1 = 79,5$ mm tak i $d_1 = 80$ mm. Důvodem je, že když dojde na výměnu pístů a pístních kroužků, tak je brána v úvahu vůle ve válci vzniklá opotřebením.

ZÁVĚR

První část práce je rešeršního charakteru a zabývá se problematikou pístní skupiny. Hlavně konstrukcí pístů a materiály pístů. Teorie obsažená v této části je podkladovým materiálem pro část druhou, která je zaměřena na samotný základní návrh pístu pro vznětový motor 1.6 TDI CR 77kW od koncernu VW. Návrh hlavních rozměrů byl proveden na základě zadaných parametrů, kterými motor disponuje. Nejzákladnější hodnotou pro výpočet je vrtání válce $D=79,5$ mm. Z této hodnoty vychází několik základních rozměrů pístu. Celé shrnutí výpočtu je popsáno v kapitole 8. Díky možnosti porovnání pístu navrhovaného s pístem přímo od výrobce je patrné, že na základě grafického vyjádření vrtání válce na jednotlivých základních rozměrech pístu z již dříve osvědčených a prověřených konstrukcí můžeme navrhnout relativně fungující píst. Samozřejmě musíme brát v úvahu, že tento návrh pístu je pouze základní a není tu zahrnuto a zkontrolováno několik dalších aspektů. Z toho důvodu je zcela možné, že by navrhovaný píst nebyl zcela efektivní, protože v návrhu není zahrnut například výpočet spalovacího prostoru. Tvar spalovacího prostoru je navržen pouze na základě získaných přechozích znalostí. A není tedy přímo uzpůsoben pro tento motor. Aby bylo možné konstatovat, že navržený píst je možno zaměnit přímo s pístem navrženým od výrobce bylo by potřeba provést několik dalších výpočtů a také píst přímo otestovat. Tyto další výpočty však nejsou náplní této práce.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GSCHEIDLE, Rolf. Příručka pro automechanika. 3. přeprac. vyd. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jiří Handlíř. Praha: Europa - Sobotáles, 2007, 685 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [2] JAROŠ, Karel. Spalovací motory II: konstrukce spalovacích motorů. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 80-214-0131-1.
- [3] KOŠTÁL, Jan a Bohuslav SUK. Pístové spalovací motory. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963.
- [4] KOVAŘÍK, Ladislav, Viktor FERENCEY, Radomír SKALSKÝ a Ladislav ČÁSTEK. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. Praha: Naše vojsko, nakladatelství a knižní obchod, 1992. ISBN 80-206-0131-7.
- [5] KROUŽEK, J.: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II, Praha, STLN 198
- [6] RAUSCHER, J. Vozidlové motory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. Studijní opory VUT v Brně.
- [7] RAUSCHER, J. Ročníkový projekt. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. Studijní opory VUT v Brně.
- [8] RAUSCHER, J. Spalovací motory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. Studijní opory VUT v Brně.
- [9] RIEGER, Alois. Písty a jejich příslušenství: [určeno pro stř. a vyš. kádry strojírenského prům.]. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. Řada strojnické literatury.
- [10] VLK, František. Vozidlové spalovací motory. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4.
- [11] TESAŘ, Miroslav a Ivo ŠEFČÍK. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 8071945501.
- [12] Balotinovani. www.balotinovani.com [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.balotinovani.com/balotinovani>.
- [13] Daimler leads steel charge. Just-auto [online]. 2014 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://www.just-auto.com/analysis/piston-days-daimler-leads-steel-charge_id149114.aspx.
- [14] Reconditioned Volkswagen Engines For Sale - High Quality Engines. Volkswagenreconditionedengines [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://volkswagenreconditionedengines.co.uk/start/volkswagen-reconditioned-engines-for-sale:1707/161-tdi-volkswagen-reconditioned-engine-for-sale:1710>.
- [15] Způsoby vstřikování paliva. Naatrium.mypage [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://naatrium.mypage.cz/menu/motory/spalovaci-prostory-vznetovych>.

- [16] DIN 70 910: 1973, R - ringe
- [17] DIN 70 915: 1973, M - ringe
- [18] DIN 70 947: 1973, D - ringe

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m]	šířka prvního pístního kroužku
c_s	[m.s ⁻¹]	střední pístová rychlost
D	[m]	vrtání válce motoru
$D_č$	[m]	průměr pístního čepu
d_r	[m]	vnitřní průměr kroužku v zamontovaném stavu
d_m	[m]	průměr drážky pro pístní kroužek v pístu
F_m	[N]	výsledný silový účinek na můstku
$F_{b,max}$	[N]	maximální velikost normálové síly
$F_{c,max}$	[N]	maximální velikost celkové síly
$F_{n,max}$	[N]	maximální velikost normálové síly
$F'_{p,max}$	[N]	maximální síla tlaku plynů na kruhovou desku
$F_{p,max}$	[N]	maximální síla od tlaku plynů
$F_{s,max}$	[N]	maximální velikost setrvačné síly
H	[m]	výška prvního pístního kroužku
H_d	[m]	výška drážky kroužku
H_k	[m]	kompresní výška pístu
H_{m1}	[m]	výška prvního můstku
H_{m2}	[m]	výška druhého můstku
H_o	[m]	vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep
H_p	[m]	výška pístu
H_{pl}	[m]	výška pláště pístu
i	[-]	počet válců motoru
k	[-]	zdvihový poměr
L_{pl}	[m]	nosná délka pláště pístu
l_o	[m]	délka ojnice
M_o	[Nm]	ohybové napětí ve vetknutém můstku
$M_{o,max}$	[Nm]	maximální ohybový moment
m_x	[kg]	hmotnost koruny pístu nad řezem x-x

n	$[\text{min}^{-1}]$	jmenovité otáčky motoru
P_e	$[\text{W}]$	efektivní výkon motoru
P_l	$[\text{kW.l}^{-1}]$	litrový výkon
p_e	$[\text{Pa}]$	střední efektivní tlak
p_{pl}	$[\text{Pa}]$	měrný tlak na plášti pístu
p_{\max}	$[\text{Pa}]$	maximální tlak plynů ve válci motoru
r	$[\text{m}]$	poloměr vetknutí (podepření) desky
r_k	$[\text{m}]$	poloměr klikové hřídele
S_t	$[\text{m}^2]$	vůle v mezeře kroužku
S_t	$[\text{m}^2]$	průřez v místě vetknutí
S_p	$[\text{m}]$	radiální vůle pístního kroužku
S_x	$[\text{m}^2]$	minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek
V_a	$[\text{m}]$	axiální vůle pístního kroužku
V_s	$[\text{m}]$	radiální vůle pístního kroužku
V_z	$[\text{m}^3]$	zdvihový objem jednoho válce motoru
W_o	$[\text{m}^3]$	moment odporu v ohybu (průřezový modul)
Z	$[\text{m}]$	zdvih pístu
δ	$[\text{m}]$	tloušťka dna pístu
λ_o	$[-]$	ojniční poměr
σ_o	$[\text{Pa}]$	ohybové napětí

SEZNAM PŘÍLOH

- P1. Obrázky pístů
- P2. Základní rozměry pístů
- P3. Výkres pístu
- P4. Graf