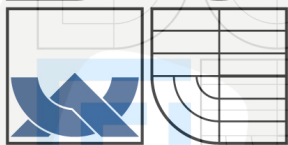




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÍST ČTYŘDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU O VÝKONU 43KW

PISTON FOR 43KW 4-STROKE SI-ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ VACULÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.

BRNO 2009

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu výpočtu a konstrukčním řešení pístu pro čtyřdobý zážehový motor o výkonu 43 kW. Dále se tato práce zabývá stanovením základních rozměrů motoru. Píst je navržen tak, aby byl schopen pracovat v těžkých podmínkách, které jsou na něj ve spalovacím prostoru kladeny. Důležitým bodem je pevnostní výpočet pístu, kde ověřuji správnost navržených rozměrů.

Klíčová slova: píst, pístní skupina, rozměry pístu, klikový mechanismus, motor, pevnostní kontrola pístu

Abstrakt

This bachelor's work describes a calculational project and design solution of a piston for 43 kW power output, four-stroke petrol engine and depicts basic sizes of this engine. The piston was constructed to be able to work in hard conditions that the piston faces in the combustion area. An important part of my thesis is the piston calculation of its resistancy by which we verify corectness of suggested sizes of the piston.

Key words: piston, piston group, crank mechanism, engine, dimensions of piston, fort control piston



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Bibliografická citace

VACULÍK, T. *Píst čtyřdobého zážehového motoru o výkonu 43 kW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing.Radim Dundálek, Ph.D.



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing.Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne.....

Podpis.....



VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing.Radimu Dundálkovi, Ph.D. Dále chci poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	PÍSTNÍ SKUPINA	9
2.1	Píst	9
2.1.1	Výroba a materiály pístů	11
2.1.2	Tepelné zatížení pístu	11
2.1.3	Chlazení pístu	13
2.2	Pístní kroužky	15
2.2.1	Zámek pístního kroužku	16
2.2.2	Těsnící pístní kroužky	17
2.2.3	Stírací pístní kroužky	18
2.3	Pístní čep	20
2.3.1	Axiální pojištění polohy pístního čepu	22
3	VÝPOČET	23
3.1	Stanovení hlavních rozměrů pístového spalovacího motoru	23
3.1.1	Stanovení základní koncepce motoru	23
3.2	Návrh hlavních rozměrů pístu	26
3.2.1	Volba rozměrů pístu pro zážehový motor	26
3.3	Drážky pro pístní kroužky	27
3.3.1	Radiální vůle	27
3.3.2	Axiální vůle pístního kroužku	28
3.3.3	Drážky pro stírací pístní kroužky	29
3.4	Pevnostní výpočet dna pístu	29
3.5	Nejslabší místo pláště pístu	32
3.5.1	Namáhání tlakem	32
3.5.2	Namáhání tahem	33
3.6	Měrný tlak na plášti pístu	34
3.7	Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem	37
4	ZÁVĚR	40
5	POUŽITÁ LITERATURA	41
6	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	42
	SEZNAM PŘÍLOH	44

1 Úvod

Čtyřdobý spalovací motor také nazýván čtyřtaktní motor nebo zkráceně jen čtyřtakt je pístový motor pracující na principu čtyř pohybů pístu (sání, komprese, expanze, výfuk). První čtyřdobý spalovací motor využíval benzín a sestrojil jej v 18. století německý inženýr Nicolaus Otto. Ve srovnání s parním strojem byl menší, lehčí, postupem času i tišší, čistší a především účinnější.

V dnešní době je nejvíce rozšířeným pohonem dopravních prostředků (např. osobní automobil, motocykl). V automobilovém průmyslu se jedná převážně o čtyřdobý spalovací motor zážehový (benzínový) nebo vznětový (dieselový). Výhodou spalovacích motorů je, že mají vysokou účinnost, jednoduchost konstrukce a kompaktnost provedení. Hlavní součástí těchto motorů je klikový mechanismus. Ten se skládá z klikového hřídele, ojnice a pístu. Jeho úkolem je převést přímočarý vratný pohyb pístu na otáčivý pohyb ve formě kroutícího momentu na klikovém hřídeli.

Píst je nejvíce namáhaná součást v klikovém mechanismu. Proto jsou na něj kladeny vysoké požadavky na životnost a tepelnou odolnost. Píst tvoří spolu s pístními kroužky (těsnící, stírací), pístním čepem a pojistnými kroužky pístní skupinu. Tato skupina zabezpečuje přenos síly od tlaku plynů na ojnici a zároveň utěšňuje spalovací prostor proti úniku spalin do klikové skříně motoru a naopak motorového oleje do spalovacího prostoru.

Součástí této práce je návrh výpočtu základních rozměrů pístu čtyřdobého zážehového motoru a jeho následná kontrola v kritických místech pístu.

2 Pístní skupina

VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

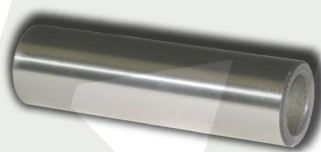
Pístní skupinu tvoří píst s těsníci a stíracími kroužky, pístním čepem a pojistkami.



Obr. 1 Píst [7]



Obr. 2 Pístní kroužky [6]



Obr. 3 Pístní čep [5]



Obr. 4 Pojistky pístního čepu [9]

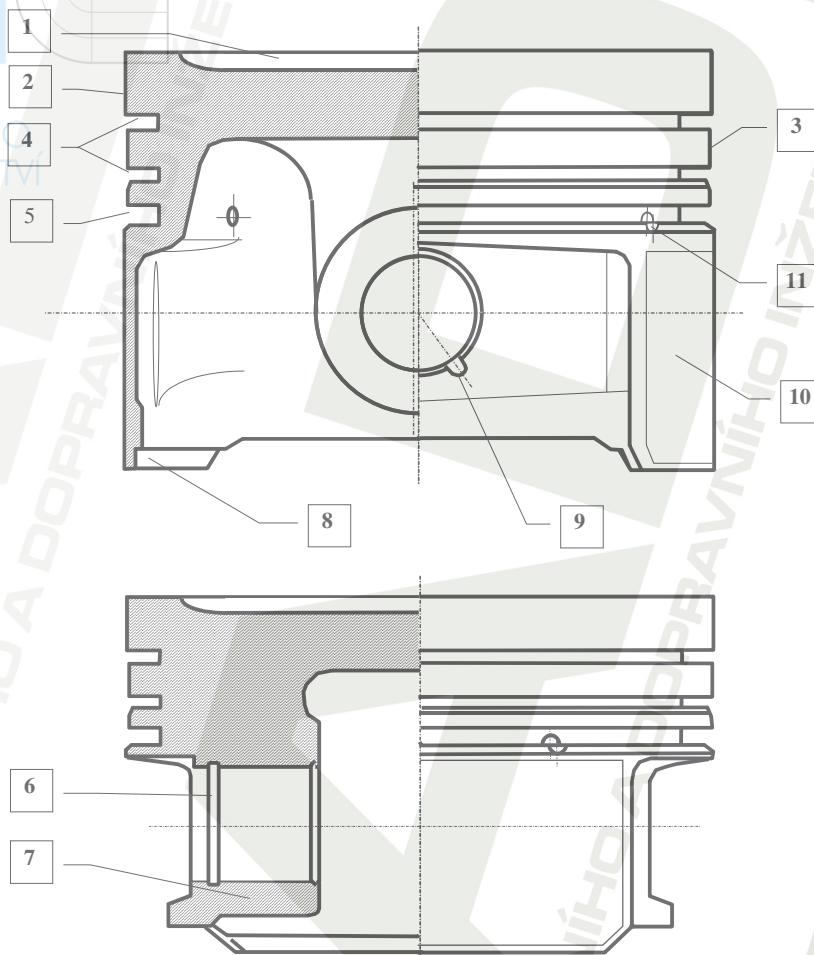
Pístní skupina musí splňovat následující požadavky:

- zabezpečit přenos síly od tlaku plynů na ojnici,
- utěsnit spalovací prostor tak aby nedocházelo k úniku spalin do klikové skříně motoru a motorového oleje do spalovacího prostoru,
- zabezpečit odvod tepla ze dna pístu do chlazených stěn spalovacího prostoru [3].

2.1 Píst

Píst patří k tepelně i mechanicky velmi namáhaným částem motoru. Mechanické namáhání je způsobeno silami od tlaku plynů a setrvačnými silami vyvolanými vratným pohybem pístu a tepelné, vysokými teplotami spalin ve spalovacím prostoru motoru.

Zatěžující účinky mají rázový charakter, který je vyvolaný prudkým nárůstem tlaku a teploty ve spalovacím prostoru. Současně, v důsledku cyklických změn těchto zatěžujících účinků, dochází k únavovému namáhání materiálu pístu .



Obr. 5 Píst čtyřdobého zážehového motoru [5]

- | | |
|---|---|
| 1) Dno pístu | 9) Drážka pro snadné vyjímání pojistky čepu |
| 2) Horní můstek | 10) Plášť pístu |
| 3) Můstek mezi drážkami pro těsnící pístní kroužky | 11) Otvory pro odvádění setřené oleje |
| 4) Drážky pro těsnící pístní kroužky | |
| 5) Drážka pro stírací pístní kroužek | |
| 6) Drážka pro axiální pojištění polohy plovoucího pístního čepu | |
| 7) Nálitky pro pístní čep | |
| 8) Vyztužení pláště pístu | |

2.1.1 Výroba a materiály pístů

V současné době se písty vyrábějí buď jako:

- odlévané (do písku, do kokily)
- kované (lisované)

Odlévané písty se používají pro sériové motory a měrné výkony do 60kW/dm^3 . Při pečlivém návrhu můžeme tyto písty použít i pro vyšší výkony za předpokladu, že nebude vyžadován dlouhodobý provoz na plný výkon. Písty vyrobené touto metodou jsou levné a výrobní zmetkovitost je na přijatelné úrovni.

Kované písty se využívají u vysoko výkonných a závodních motorů. Mají vyšší pevnost a proto můžeme snížit tloušťku stěn a dosáhnout tak nižší hmotnosti. Naopak dno pístu je předimenzováno, aby bylo schopné absorbovat velké množství tepla, které vzniká při přenášení tlaku na ojnici a klikový hřídel.

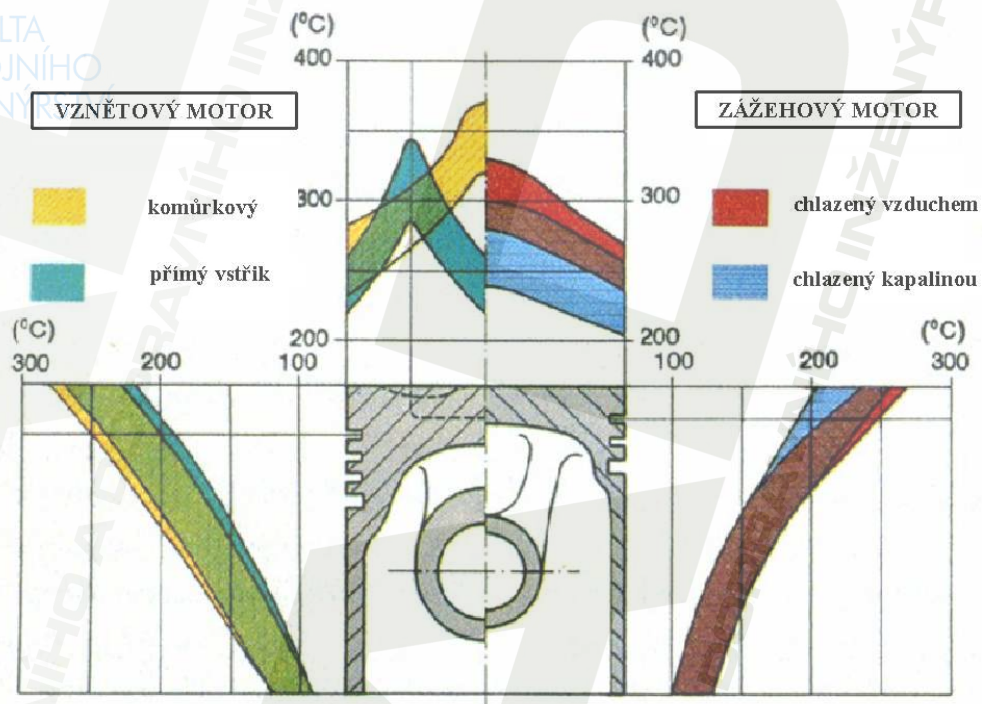
Při výrobě pístů jsou nejčastěji používaným materiálem hliníkové slitiny. Dále se používají slitiny hořčíku zejména u závodních motorů, ale jejich nevýhodou je velmi drahá výroba. Podle účelu použití pístu se liší počet a množství legujících prvků. Slitiny s vysokým obsahem křemíku mají velmi dobré pevnostní a kluzné vlastnosti a jsou určeny pro kované písty. Další jejich výhodou je menší tepelná roztažnost. Podle obsahu křemíku rozlišujeme písty pro zážehové motory (obsah Si 11-13%) a pro vznětové motory (Si 13-18%). U sériových pístů většinou obsah Si nepřesáhne 2% [4].

2.1.2 Tepelné zatížení pístu

Při přímém kontaktu se spaliny je nejvíce tepelně namáháno dno pístu, horní můstek a obzvláště přechodové hrany mezi dnem pístu a horním můstkem. Teploty spalin dosahují 2300 až 2800 K. Odvod vzniklého tepla z pístu do stěn válce je zprostředkováván pístními kroužky, můstky mezi kroužky a pláštěm pístu. U pístů, které nejsou chlazeny olejem, je pouze malá část tepla (5-10 %) odváděna pomocí vzduchu a olejové mlhy z vnitřního povrchu pístu do oleje v klikové skříni.

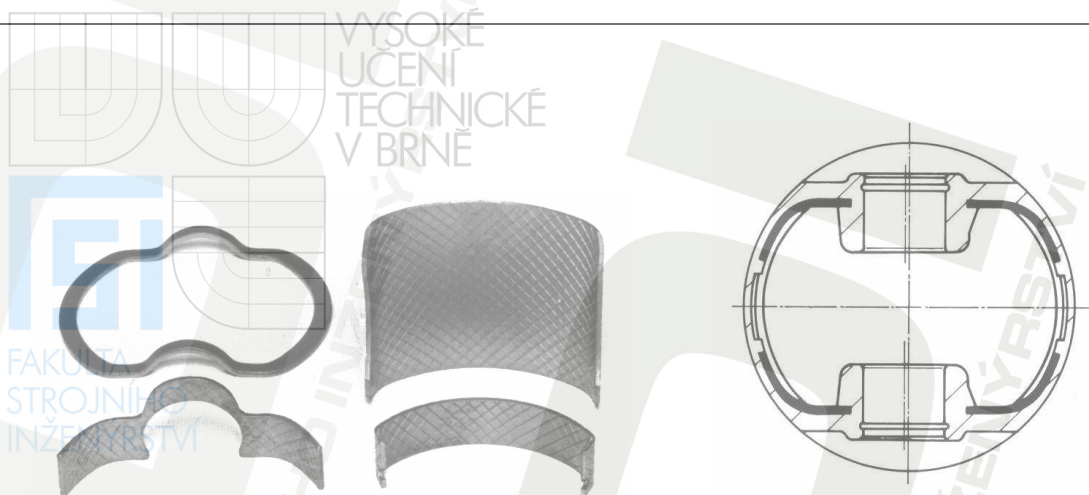
Kromě absorbovaného tepla ze spalin musí píst odvádět teplo vznikající třením pístu a pístních kroužků o stěny válce. Třecí ztráty pístní skupiny rychloběžných motorů představují 45 až 65% celkových třecích ztrát. Na obr. 6 je uvedeno porovnání teplot jednotlivých částí pístu zážehového a vznětového motoru. Zároveň jsou uvedeny i rozdíly teplot pro motory

chlazené vzduchem a kapalinou. Písty všech současných motorů jsou vyráběny z hliníkových slitin. Maximální povrchová teplota pístů z hliníkové slitiny by neměla překročit u běžných litých pístů hodnotu cca. 320 °C, kdy již dochází k výraznému poklesu pevnosti hliníkových slitin. U pístů kovaných je tento pokles pevnosti poněkud nižší.



Obr. 6 Rozložení teplot na dně a plášti pístu [3]

Tepelné namáhání podstatně ovlivňuje velikost celkového roztažení pístu. Vůle pístu ve válci by měla být co nejmenší z důvodu omezení průniku spalin do klikové skříně motoru. Avšak velká tepelná roztažnost hliníkových slitin nepříznivě ovlivňuje dodržení optimálních rozměrů pístu. Proto tvar pístu za studena není přesně válcový, ale oválný a kuželový. Po zahřátí na provozní teplotu se vše vyrovná a píst má optimální válcový tvar. Aby se omezila roztažnost je nutné použít vyrovnávací vložky z invaru (viz obr. 7), slitiny kovů s nepatrnou tepelnou roztažností.



Obr. 7 Dilatační vložky a jejich umístění [5]

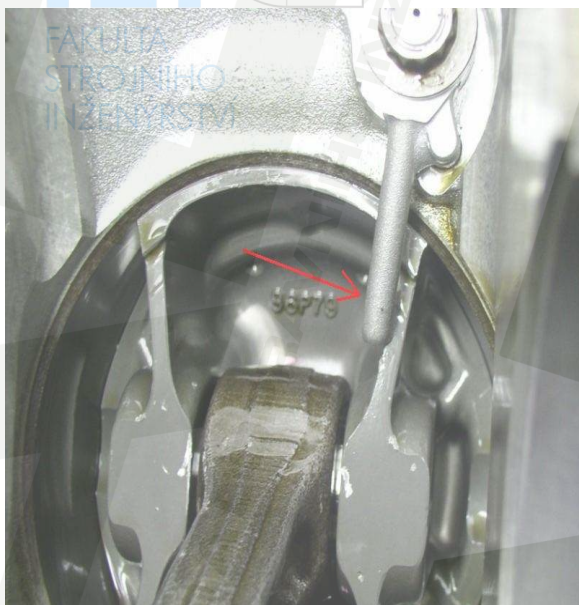
Invar má větší pevnost než hliníkové slitiny, což znemožňuje roztahování materiálu pístu v širokém rozsahu teplot. Zvýší se sice vnitřní pnutí v pístu, ale ne natolik, aby vedlo k jeho poruchám. Nevýhodou invaru je jeho vyšší měrná hmotnost což má za následek zvýšení hmotnosti pístu. Další nejčastěji používaná slitina pro dilatační vložky je Fe-Ni-Co. Poměrem prvků ve slitině se mění vlastnosti při různých teplotách a tak se dají pro to které provedení motoru vytvořit optimálně fungující písty [3, 4].

2.1.3 Chlazení pístu

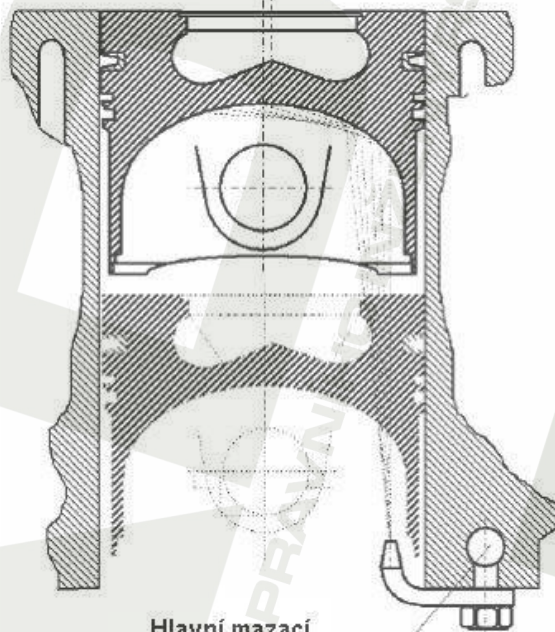
V drážce pro první pístní kroužek může teplota dosahovat až 240 °C. Při překročení této teploty je nutné zabezpečit její snížení. Tento problém nemůžeme řešit dalším zvětšením výšky horního můstku, protože by se zvýšil i škodlivý objem nad pístem v horní úvratí, což má za následek snížení ekonomičnosti provozu a nárůst obsahu zbytkových uhlovodíků ve výfukových plynech motoru. V praxi se uskutečňuje pomocí nástřiku dna pístu nebo chladícím kanálem v hlavě pístu [2, 3].

Nástřík dna pístu (viz obr. 8)

Se používá u méně zatížených motorů. Tento způsob snižuje teplotu v drážce prvního pístního kroužku asi o 20 °C.



Obr. 8 Chlazení pístu nástříkem dna [3, 10]

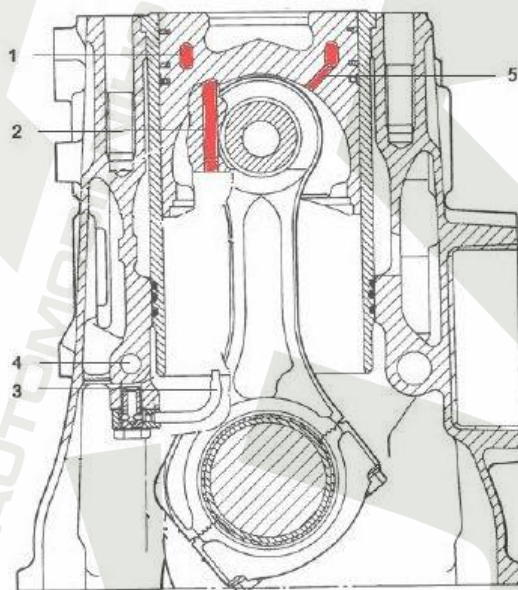


Hlavní mazací kanál motoru

Chladicí kanál v hlavě pístu (viz obr. 9)

V dnešní době se používá prakticky u všech přeplňovaných zážehových a vznětových motorů a i u některých značně zatížených motorů nepřepřňovaných. Použitím chladicího kanálu snížíme teplotu v drážce pro první pístní kroužek o cca 40 °C.

- 1) Toroidní kanál
- 2) Přívodní kanálek
- 3) Tryska
- 4) Přívodní kanál
- 5) Odpadní kanálek



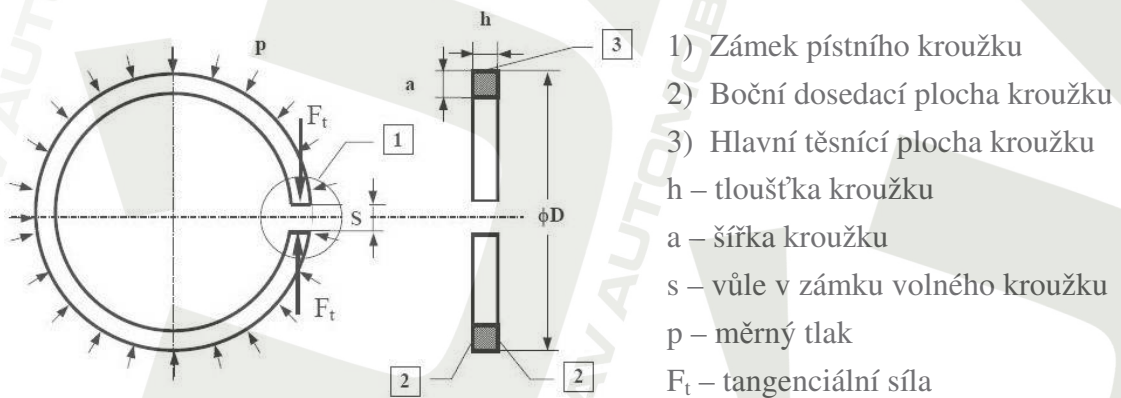
Obr. 9 Chlazení pístu chladícím kanálem [3]

2.2 Pístní kroužky

Utěsňují spalovací prostor, odvádí teplo z pístu do stěn válce a řídí výšku mazací vrstvy oleje mezi pláštěm pístu a stěnou válce. U zážehových motorů používáme tři pístní kroužky a to dva těsnící a jeden stírací. Vznětové motory mají dva těsnící a dva stírací. Dříve se používaly čtyři kroužky i u zážehových motorů pro doplnění funkce těsnících kroužků při případném zapečení jednoho z nich. První dva kroužky těsní píst ve válci proti pronikání plynů pod a nad píst, třetí kroužek zajišťuje stírání přebytečného oleje a udržuje optimální mazací vrstvu. Všechny kroužky odvedou z pístu 60-80% tepla, zbytek je odveden stěnami a umělým chlazením ostřikem spodní části dna pístu [2, 4].



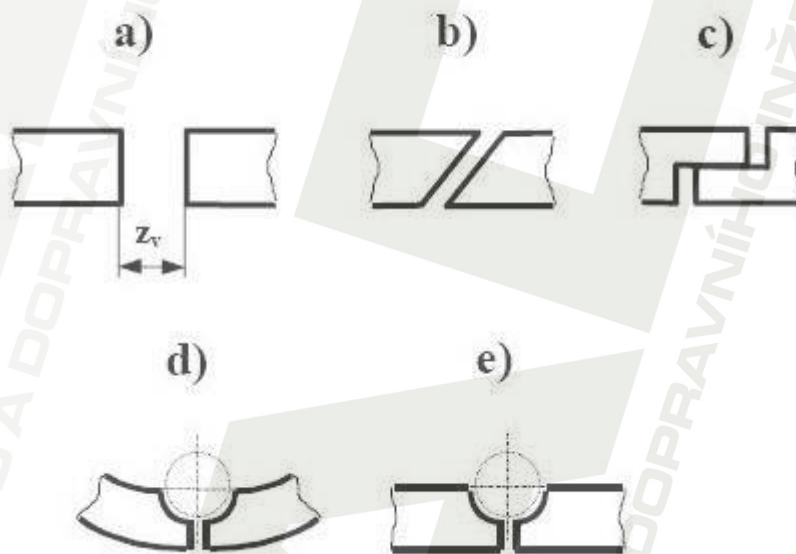
Obr. 10 Pístní kroužky [12]



Obr. 11 Základní prvky pístního kroužku [2]

2.2.1 Zámek pístního kroužku

Umožňuje navlečení pístního kroužku do drážky v pístu a dilataci kroužku při jeho ohřevu. Zámková vůle kroužku z_v při maximálním ohřevu kroužku nesmí být vymezena. Pokud k tomu dojde, nastane rozlomení kroužku.



Obr. 12 Konstrukční provedení zámků pístních kroužků [2]

Zámky čtyřdobých motorů:

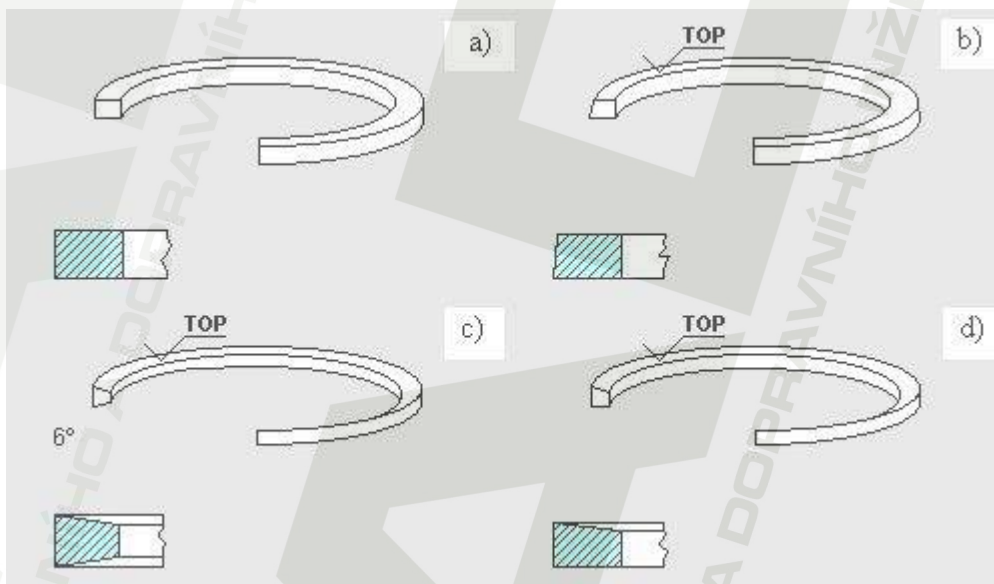
- a) kolmý
- b) šikmý
- c) tvarový

Varianty d) a e) se používají u dvoudobých motorů a jejich poloha na pístu je zajišťována čárkovaně naznačeným kolíčkem [2].

2.2.2 Těsnící pístní kroužky

Zabezpečují těsnost spalovacího prostoru proti průniku spalin do klikové skříně motoru. Z velké části se podílejí i na odvodu tepla z pístu do stěn válce. První těsnící kroužek odvede až 80 % tepla připadající na kroužky.

Základní charakteristické tvary příčných průřezů těsnících kroužků:



Obr. 13 Základní tvary pístních kroužků [11]

Pístní kroužek s válcovou těsnící plochou (pravoúhlý) (obr. 13 a)

Velmi často je používán v první drážce pístu. Dříve hlavní těsnící plocha měla čistě válcový tvar. Tyto kroužky se zachovali u motorů malé mechanizace a málo výkonných dvoudobých motorů. Poměrně vysoké třecí ztráty i nevhodné vlastnosti z hlediska regulace olejové výšky na stěně válce vedly k zavedení zaoblené těsnící plochy, tzv. provedení ballig. Zaoblení může být buď symetrické k ose příčného profilu kroužku, nebo asymetrické [3].

Pístní kroužek s kuželovou těsnící plochou (minutový) (obr. 13 b)

Úhel sklonu stěny kroužku je $30' \div 50'$ proto je také často nazývaný jako kroužek minutový. V počáteční fázi záběhu kroužku ve válci motoru se kroužek stýká se stěnou válce jen malou plochou, prakticky břitem. Vysoký měrný tlak zabezpečuje rychlé přizpůsobení tvaru kroužku případné ovalitě válce a současně i dobré setření olejové vrstvy ze stěny válce při pohybu pístu do dolní úvrati. Při pohybu pístu do horní úvrati usnadňuje kuželová plocha

průnik oleje pod kroužek. Označení „TOP“ je z důvodu správného namontování pístního kroužku do drážky pístu. V případě nesprávného zamontování kroužku dojde ke značnému nárůstu spotřeby oleje. Kroužek s kuželovou plochou nemůžeme použít jako první těsnicí kroužek, protože při působení tlaků plynů na hlavní těsnicí plochu kroužku dochází k jeho třepetání [3].

Lichoběžníkový pístní kroužek (trapézový) (obr. 13 c)

Dosedací plochy kroužku mají kuželový tvar se sklonem $\alpha = 3^\circ$ nebo $\alpha = 7,5^\circ$. Drážka v pístu má stejný příčný profil. Rozměry drážky a vůle v zámku jsou voleny tak, aby bylo možné celý kroužek zamáčknout o 0,1mm pod úroveň pístu [2].

Lichoběžníkový pístní kroužek jednostranný (obr. 13 d)

Pouze horní dosedací plocha je kuželového tvaru s úhlem sklonu $\alpha = 7^\circ$. Díky své vysoké odolnosti proti rozkmitání je používán u vysokootáčkových motorů. Výhodou je, že v důsledku nesymetrického příčného profilu u něj po zabudování do válce dochází k torznímu natočení, takže v počáteční, záběhové fázi účinně těsní spodní hrana kroužku [2].

Další možné konstrukční provedení těsnících pístních kroužků jsou znázorněny na obr. 14



Obr. 14 Příčné průřezy těsnících pístních kroužků [2]

2.2.3 Stírací pístní kroužky

Jako třetí pístní kroužek má pouze jedinou funkci, a to stírat přebytečný olej a udržovat optimální mazací vrstvu oleje na stěnách válce. Kroužek musí odvádět celkem velké množství oleje a tak je jeho konstrukce odlišná od předešlých dvou. Kroužek má dvojnásobnou šířku a jeho tvar je složitý obdélníkový průřez.

Podle konstrukčního provedení rozdělujeme stírací kroužky na:

- litinové pístní kroužky využívající pro přítlak na stěnu válce vlastní pružnost
- litinové nebo ocelové kroužky se zvýšeným přítlakem vyvolaným expandérem
- skládané ocelové kroužky



Obr. 15 Tvary stíracích pístních kroužků [13]

Stírací pístní kroužky s osazenou pracovní plochou (viz obr. 15 ozn. N, NM)

Také se jim říká kroužky polostírací nebo kroužky s nosníkem. V podstatě se jedná o těsnící válcový nebo minutový kroužek, u něhož je pro zvýšení stíracího účinku vytvořeno osazení břitem. Kroužky bývají používány ve druhé drážce pístu [2].

Stírací pístní kroužky s výřezy jsou uvedeny na obr. 15 s označením D, G, S

Setřený olej je odváděn středními výřezy v kroužky do drážky pístu a vratnými otvory vnitřkem pístu do klikové skříně motoru. Kroužky jsou v kontaktu se stěnou válce pouze dvěma břitmi, které mohou mít různý příčný profil. U motorů s vysokou střední pístovou rychlostí se stírací břity kroužku pokrývají tvrdochromem [2].

Stírací pístní kroužky s výřezy a expandérem (viz obr. 15 ozn. DSF, GSF, SSF)

Použitím expandéru (šroubového pera) je dosaženo zvýšení stíracího účinku kroužku. Po zamontování kroužku do válce se šroubové pero stlačí a zvyšuje tak sílu vyvolávající měrný tlak mezi břitmi kroužku a stěnou válce. Stykové plochy těchto kroužků jsou pokryty galvanicky nanesenou vrstvou tvrdochromu [2].

Stírací pístní kroužek skládaný je znázorněn na obr. 15 typ 3S

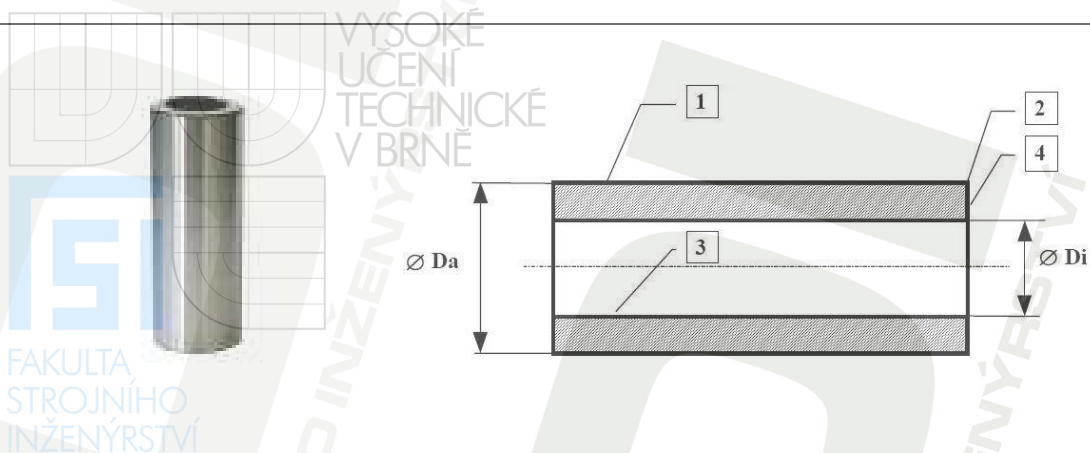
Skládá se ze dvou ocelových lamel a rozpínací pružiny. Stykové plochy lamel jsou pokryty tvrdochromem. Kroužky jsou velmi nízké a tedy i lehké. Používají se u zážehových motorů osobních automobilů. Jejich nevýhodou je, že při opotřebení povrchu kroužku dochází k rychlejšímu poklesu měrného tlaku a nárůstu spotřeby oleje. Toto je způsobeno strmou charakteristikou rozpínací pružiny [2].

2.3 Pístní čep

Dutý váleček z kaleného a broušeného ocelového materiálu. Přenáší silové účinky mezi pístem a ojnicí a je namáhán únavově. Pístní čep se používá buď pevný, nebo plovoucí.

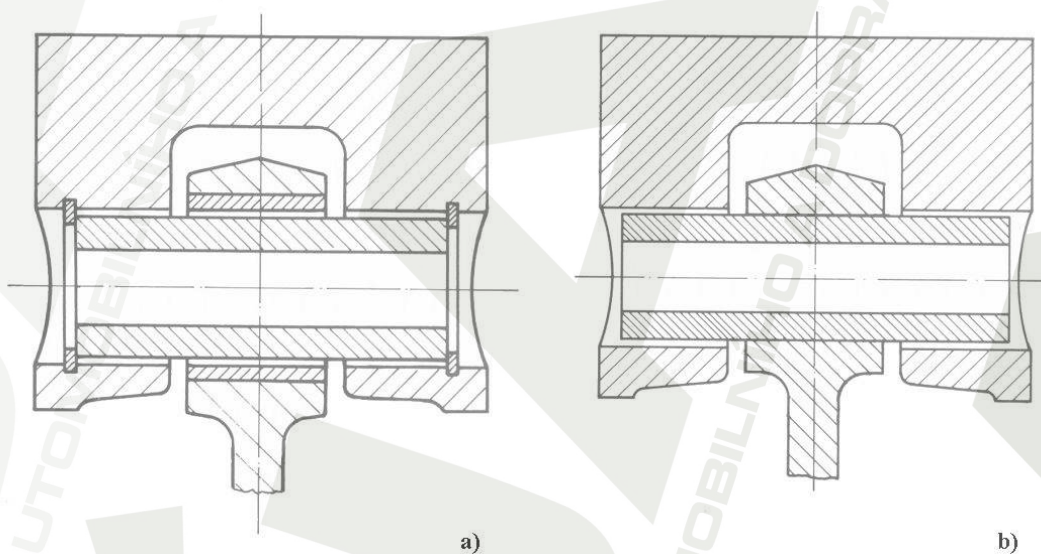
Pevný pístní čep (obr. 17 b) je nalisován za tepla do ojnicního oka a koná kývavý pohyb v pístních okách. Výhodou tohoto řešení je možnost zmenšení vnějšího průměru čepu, protože dochází k výraznému snížení ovalizace čepu. Dosáhneme tak snížení hmotnosti pístního čepu a současně odpadají axiální pojistky pístního čepu.

Plovoucí pístní čep (obr. 17 a) je uložen volně v oku ojnice i v nálitcích v pístu. Toto provedení má vyšší životnost, protože se čep volně otáčí a tak se rovnoměrně opotřebovává po celé své ploše.



Obr. 16 Pístní čep [2, 8]

Vnější válcová plocha (1) pístního čepu je cementována a kalena do hloubky 0,5 – 1 mm, poté je broušena, lapována a leštěna. Přechod (2) má poloměr 0,5 – 1 mm. Vnitřní povrch čepu je též cementován a kalen do hloubky 0,5 – 1,5 mm.

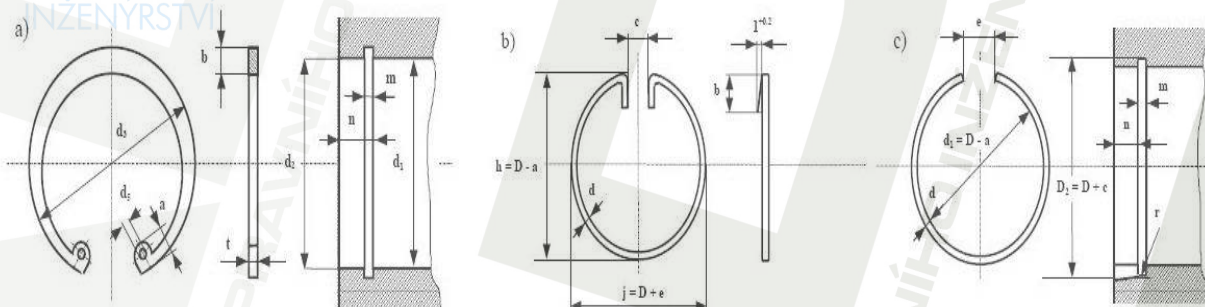


Obr.17 Uložení pístního čepu: a) Plovoucí, b) Pevné [5]

Pístní čep se vyrábí z oceli třídy 12, 14, 15 a pro vysoce zatížené motory z materiálu třídy 16, která vyniká velkou pevností a odolností proti opotřebení [2,4].

2.3.1 Axiální pojištění polohy pístního čepu

Zabraňuje kontaktu pístního čepu se stěnou válce. Pokud by nastala tato situace, došlo by k roztavení materiálu pístu v oblasti oka pro pístní čep.



Obr. 18 Axiální pojištění pístního čepu [2]

U velkých průměrů, např. pístní čepy naftových motorů pro nákladní automobily, se používají pojistné kroužky pro díry dle ČSN 022931 (viz obr. 18 a). U plovoucích pístních čepů menších průměrů jsou používány pojistné kroužky drátěné zahnuté dle ČSN 022928 (viz obr. 18 b). Nevýhodou drátěných kroužků je riziko ulomení montážního zobáčku v důsledku únavového ohybového namáhání což má za následek zadření pístu. V současné době se proto používají pojistné drátěné kroužky dle ČSN 022925 (viz obr. 18 c) [2].

3 Výpočet

3.1 Stanovení hlavních rozměrů pístového spalovacího motoru

Hlavní rozměry pístového spalovacího motoru jsou:

- průměr válce D
- zdvih pístu Z
- počet válců motoru i

3.1.1 Stanovení základní koncepce motoru

Navrhovaný píst je určen pro čtyřdobý zážehový motor vodou chlazený. Jedná se o motor montovaný od roku 1989 do osobního automobilu Škoda Favorit.

Základní parametry motoru:

Počet válců motoru	4
Počet ventilů na válec	2
Rozvod	OHV

Zadané hodnoty:

Výkon motoru 43kW při otáčkách $n = 5000$ 1/min

Další potřebné parametry pro výpočet jsou voleny z **Tab. 1**.

Tab. 1 Porovnání charakteristických parametrů zážehových motorů [1]

Motory zážehové	Rok	jmenovité otáčky [min ⁻¹]		střední pístová rychlost [min ⁻¹]		střední efektivní Tlak [MPa]	
		minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum
Bez rozlišení	1966	3400	5700	8,6	14,7	0,65	1,1
		kompresní poměr [-]		zdvihový poměr [-]		objemový výkon [kW·dm ⁻³]	
		minimum	maximum	minimum	maximum	minimum	maximum
		6,6	9	0,83	1,46	15	37

Zdvihový objem jednoho válce:

Vypočítáme ze vztahu pro efektivní výkon motoru:

$$P_e = p_e \cdot V_z \frac{n}{60} \cdot \tau \cdot i \quad (1)$$

Úpravou rovnice (1) dostaneme vztah:

$$V_z = \frac{60 \cdot P_e}{p_e \cdot n \cdot \tau \cdot i}$$

$$V_z = \frac{60 \cdot 43000}{0,8 \cdot 10^6 \cdot 5000 \cdot 0,5 \cdot 4} = 3,225 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

$$V_z = 3,225 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 322,5 \text{ cm}^3$$

Pro čtyřdobý motor je $\tau = 0,5$. Střední efektivní tlak P_e a jmenovité otáčky motoru určíme z **Tab. 1** jako střední hodnoty rozmezí.

Zdvihový objem motoru:

$$V_m = V_z \cdot i$$

$$V_m = 322,5 \cdot 4 = 1290 \quad (3)$$

$$V_m = 1290 \text{ cm}^3$$

Kontrola objemového výkonu motoru:

$$P_l = \frac{P_e}{V_z \cdot i} \cdot 1000$$

$$P_l = \frac{43000}{3,225 \cdot 10^{-4} \cdot 4} \cdot 1000 = 33333,33 \quad (4)$$

$$P_l = 33333,33 \text{ W / l} = 33,3 \text{ kW / l}$$

Vypočítaná hodnota se pohybuje v přijatelných mezích podle **Tab. 1**.

Stanovení zdvihu Z a průměru válce D :

Při výpočtu průměru válce D vycházíme ze vzorce pro zdvihový objem válce motoru:

$$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z \quad (5)$$

Pro výpočet zavádíme veličinu k - zdvihový poměr:

$$k = \frac{Z}{D} \quad (6)$$

Velikost zdvihového poměru $k = 1,2$ jsem volil jako střední hodnotu dle **Tab. 1**.

Po vyjádření z rovnice (6) a následným dosazením do rovnice (5) dostáváme vztah:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_z}{\pi \cdot k}}$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 3,225 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 1,2}} = 0,06995 \quad (7)$$

$$D = 0,06995m = 69,95mm \Rightarrow \text{volím } 70mm$$

Zdvih pístu vypočítáme ze vzorce pro zdvihový poměr:

$$Z = k \cdot D$$
$$Z = 1,2 \cdot 70 = 84$$
$$Z = 84mm \quad (8)$$

Kontrola střední pístové rychlosti:

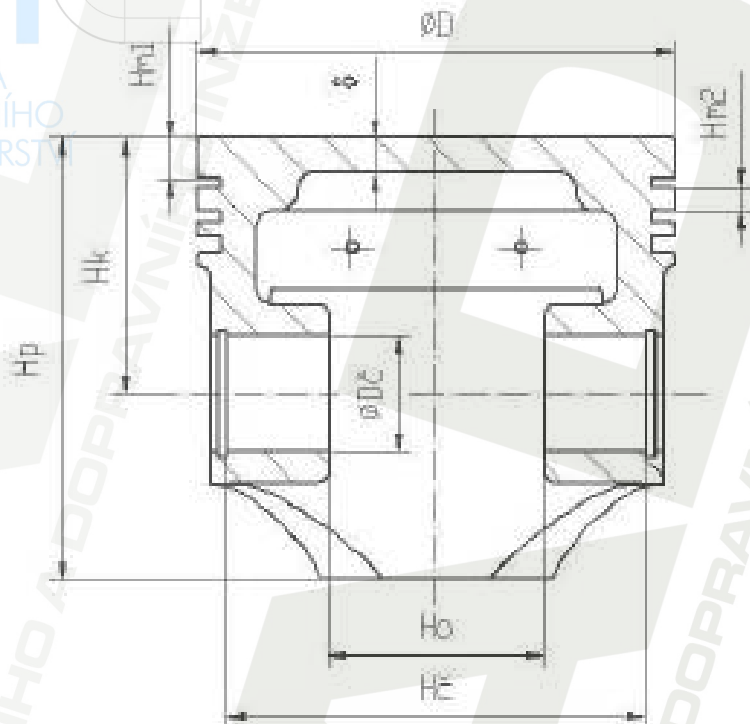
$$c_s = 2 \cdot Z \cdot \frac{n}{60}$$
$$c_s = 2 \cdot 0,084 \cdot \frac{5000}{60} = 14 \quad (9)$$
$$c_s = 14m/s$$

U zážehových motorů by neměla střední pístová rychlost překročit hodnotu 19m/s.

Vypočítaná hodnota $c_s = 14m/s$ splňuje kritérium.

3.2 Návrh hlavních rozměrů pístu

Při návrhu hlavních rozměrů pístu vycházíme z již dříve provedených a osvědčených konstrukcí. Rozměry jsou vyjádřeny ve vztahu k vrtání válce D . Vyjádření těchto vztahů může být tabulkové nebo grafické [1].



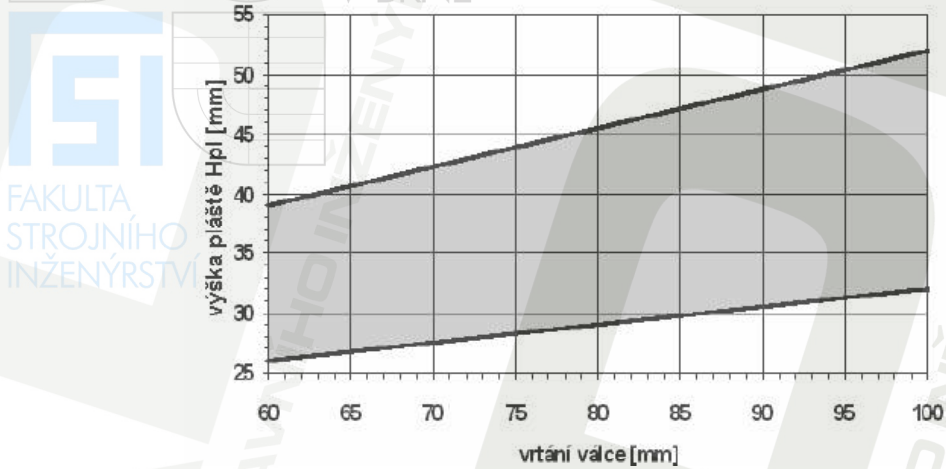
Obr. 19 Hlavní rozměry pístu [1]

3.2.1 Volba rozměrů pístu pro zážehový motor

Tab. 2 Charakteristické rozměry pístů

Veličina	Ozn.	Zážehový [%D]	Navržené rozměry [mm]
Výška pístu	H_p	90 - 140	65
Kompresní výška pístu	H_k	50 - 70	42
Délka pístního čepu	H_c	85	60
Průměr pístního čepu	D_c	25 - 28	18
Hloubka dna pístu	δ	5 - 7	5
Výška prvního můstku	H_{m1}	6 - 10	6
Výška druhého můstku	H_{m2}	3 - 6	3
Vzdálenost čel nálitků pro pístní čep	H_o	40	28
Výška ostatních můstků	H_m	3	2

Výška pláště pístu H_{pl}



Obr. 20 Výška pláště pístu H_{pl} v závislosti na vrtání válce [1]

Podle grafu (viz obr. 20) jsem volil hodnotu $H_{pl} = 35\text{mm}$.

3.3 Drážky pro pístní kroužky

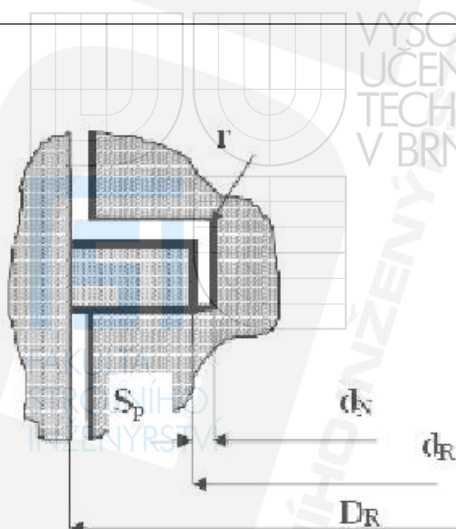
V dnešní době se u pístů pro zážehové motory používají tři pístní kroužky a to dva těsnící a jeden stírací. Pro správnou funkci a dlouhou životnost motoru je velmi důležitá správná velikost radiální a axiální vůle kroužku v drážce.

3.3.1 Radiální vůle

Tato vůle se nachází mezi kroužkem a zadní stěnou drážky pístu. Při návrhu musíme dbát na to, aby radiální vůle nebyla příliš velká, protože se jedná o ztrátový objem, do kterého se v průběhu komprese stlačuje vzduch a v průběhu expanze jsou do toho prostoru vtlačovány částice nespáleného paliva. Dále musíme počítat s tím, že v průběhu provozu se bude v drážce usazovat karbon, který by neměl omezovat pohyb kroužku.

Průměr drážky pro pístní kroužky:

$$\begin{aligned}
 d_n &= D - 2 \cdot (a + S_p) \\
 d_n &= 70 - 2 \cdot (2,95 + 0,6) \\
 d_n &= 62,9\text{mm}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$



- $D_R = \bar{D}$ - vnější průměr kroužku v zamontovaném stavu
- d_R - vnitřní průměr kroužku v zamontovaném stavu
- d_N - průměr drážky pro pístní kroužek
- r - vnitřní poloměr, který by neměl být menší než 0,3mm
- S_p - radiální vůle pístního kroužku (0,6 - 0,8)mm

Obr. 21 Radiální vůle pístního kroužku [1]

3.3.2 Axiální vůle pístního kroužku

Při návrhu axiální vůle kroužku musíme zahrnout řadu faktorů. Nejdůležitějším faktorem je pravděpodobnost vzniku karbonových úsad. Značné nebezpečí vzniku karbonové vrstvy je u prvního pístního kroužku z důvodu působení vysokých teplot, a proto je axiální vůle větší než u druhého pístního kroužku.

Vůle je určena rozdílem výšky drážky a výšky kroužku a její mezní hodnoty jsou určeny tolerančními poli výšky kroužku a drážky.

Axiální vůle prvního pístního kroužku

- o Pístní kroužek $1,5_{-0,022}^{-0,010}$
- o Drážka pro kroužek $1,5_{+0,035}^{+0,050}$

Maximální vůle kroužku v drážce: 0,072

Minimální vůle kroužku v drážce: 0,045

Axiální vůle druhého pístního kroužku

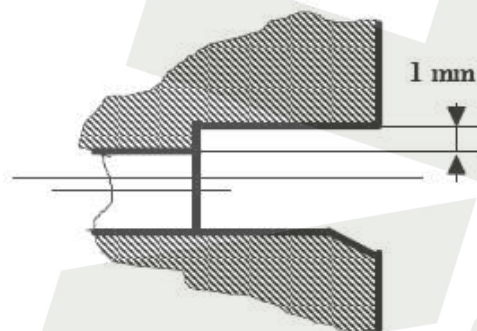
- o Pístní kroužek $2,0_{-0,022}^{-0,010}$
- o Drážka pro kroužek $2,0_{+0,030}^{+0,045}$

Maximální vůle kroužku v drážce: 0,067

Minimální vůle kroužku v drážce: 0,040

3.3.3 Drážky pro stírací pístní kroužky

Tyto drážky jsou širší než drážky těsnících pístních kroužků, protože součástí jejich konstrukce jsou otvory pro odvod setřeného oleje ze stěny válce. Rozměr těchto otvorů je asi o 1mm menší než je šířka drážky. Při konstrukci pístů chlazených nástřikem oleje musíme dbát na vhodné umístění. V opačném případě by mohlo dojít ke zvýšení spotřeby oleje v důsledku špatného směru proudění oleje.



Obr. 22 Otvor pro odvod oleje z drážky stíracího kroužku [1]

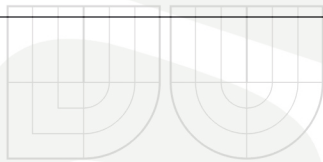
Tloušťka stěny pláště pístu

U benzínových motorů by měla být minimálně $0,02 \cdot D = 0,02 \cdot 70 = 1,4\text{mm}$

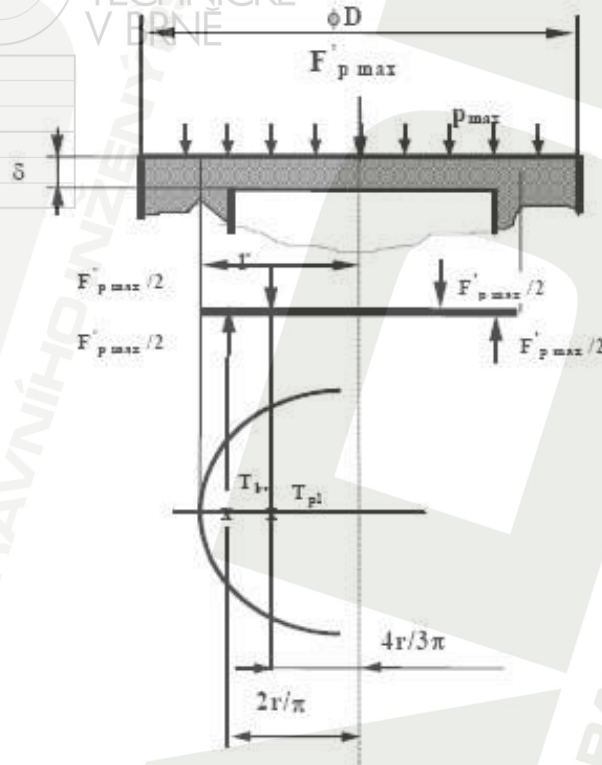
Volím tloušťku 2 mm.

3.4 Pevnostní výpočet dna pístu

Vychází z podobnosti namáhání provedených a osvědčených konstrukcí pístu. Výpočet je prováděn na ohyb. Jako výpočtový model dna pístu je použita kruhová deska, vetknutá nebo podepřená na obvodě zatížená rovnoměrným zatížením od tlaků plynů. Setrvačné síly zanedbáváme.

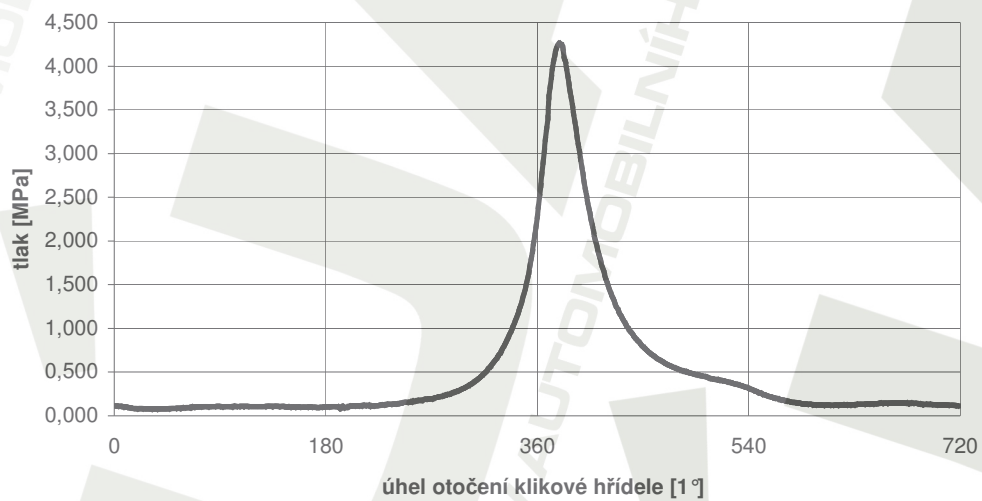


VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



Obr. 23 Zatížení dna pístu a výpočtový model [1]

indikátorový diagram



Obr. 24 Indikátorový diagram

Maximální tlak plynů ve válci motoru $p_{\max} = 4,261 \text{ MPa}$ jsem určil z indikátorového diagramu pro střední efektivní tlak $0,8 \text{ MPa}$.

Maximální síla tlaku plynů působící na kruhovou desku:

- poloměr vetknutí desky volím $r = 24 \text{ mm}$

$$F'_{p,\max} = \pi \cdot r^2 \cdot p_{\max}$$

$$F'_{p,\max} = \pi \cdot 0,024^2 \cdot 4,261 \cdot 10^6 = 7710,5$$

$$F'_{p,\max} = 7710,5 \text{ N}$$

(11)

Maximální ohybový moment:

$$M_{o,\max} = \frac{r^3}{3} \cdot p_{\max}$$

$$M_{o,\max} = \frac{(0,024)^3}{3} \cdot 4,261 \cdot 10^6 = 19,63$$

$$M_{o,\max} = 19,63 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(12)

Moment odporu v ohybu:

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot r \cdot \delta^2$$

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot 0,024 \cdot 0,005^2 = 2,0 \cdot 10^{-7}$$

$$W_o = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

(13)

Maximální ohybové napětí:

$$\sigma'_{o,\max} = p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\delta} \right)^2$$

$$\sigma'_{o,\max} = 4,261 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,024}{0,005} \right)^2 = 98173440$$

$$\sigma'_{o,\max} = 98173440 \text{ Pa} = 98,17 \text{ MPa}$$

(14)

Tato hodnota napětí odpovídá použitému modelu kruhové desky, ale skutečná hodnota napětí je výrazně ovlivněna vetknutím nebo podepřením desky na obvodě. Dna pístů zážehových motorů je možné považovat za desku vetknutou.

Pro vetknutou desku platí vzorec:

$$\sigma_{o,\max} = 0,25 \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\sigma}\right)^2$$

$$\sigma_{o,\max} = 0,25 \cdot 4,261 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,024}{0,005}\right)^2 = 24543360 \quad (15)$$

$$\sigma_{o,\max} = 24543360 \text{ Pa} = 24,54 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí pro písty z hliníkové slitiny [1]:

Dno bez žeber	$\sigma_{dov} = 20 \div 25 \text{ MPa}$
---------------	---

Vypočítané napětí se pohybuje v daném rozmezí.

3.5 Nejslabší místo pláště pístu

Se u většiny pístů nachází tam kde je stěna pístu zeslabena drážkou pro stírací kroužek, ale i otvory, kterými je odváděn setřený olej do klikové skříně motoru. Toto místo je namáháno na tlak a tah.

3.5.1 Namáhání tlakem

Je způsobeno tlakem plynů nad pístem.

Maximální síla od tlaku plynů:

$$F_{p,\max} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{\max}$$

$$F_{p,\max} = \frac{\pi \cdot 0,070^2}{4} \cdot 4,261 \cdot 10^6 = 16389,93 \quad (16)$$

$$F_{p,\max} = 16389,93 \text{ N}$$

Maximální spalovací tlak:

$$\sigma_{il,max} = \frac{F_{p,max}}{S_x}$$

$$\sigma_{il,max} = \frac{16389,9}{0,0010324} = 15875561,8$$

$$\sigma_{il,max} = 15,87MPa$$
(17)

S_x je minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací kroužek.

Vypočtená hodnota $S_x = 1023,4 \text{ mm}^2 = 0,0010324 \text{ m}^2$

Pro současné hliníkové slitiny je dovolená hodnota napětí v rozmezí 30–40Mpa .

3.5.2 Namáhání tahem

Je vyvoláno setrvačnými silami hmotnosti koruny pístu na konci výfukového zdvihu při doběhu pístu do horní úvrati.

Maximální úhlová rychlost otáčení klikového hřídele:

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

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot 5500}{30} = 576$$

$$\omega_{max} = 576 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$
(18)

Setrvačná síla:

$$F_{sp,x} = m_x \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 + \lambda_o)$$

$$F_{sp,x} = 0,073 \cdot 0,042 \cdot 576^2 \cdot (1 + 0,25) = 1271,5$$

$$F_{sp,x} = 1271,5N$$
(19)

kde:

m_x – hmotnost koruny pístu nad vyšetřovaným řezem x-x

r_k – poloměr klikového hřídele $\rightarrow r_k = \frac{Z}{2} = \frac{84}{2} = 42mm$

λ_o - ojnicní poměr, který se u současných motorů pohybuje od 0,2 do 0,3

Volím střední hodnotu rozmezí $\lambda_o = 0,25$

Dále mohu získat ze vzorce pro ojnicní poměr $\lambda_o = \frac{r_k}{l_o}$ délku ojnice $l_o = 164\text{mm}$

Tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu:

$$\sigma_t = \frac{F_{sp,x}}{S_x}$$

$$\sigma_t = \frac{1271,5}{0,0010324} = 1231596,3$$

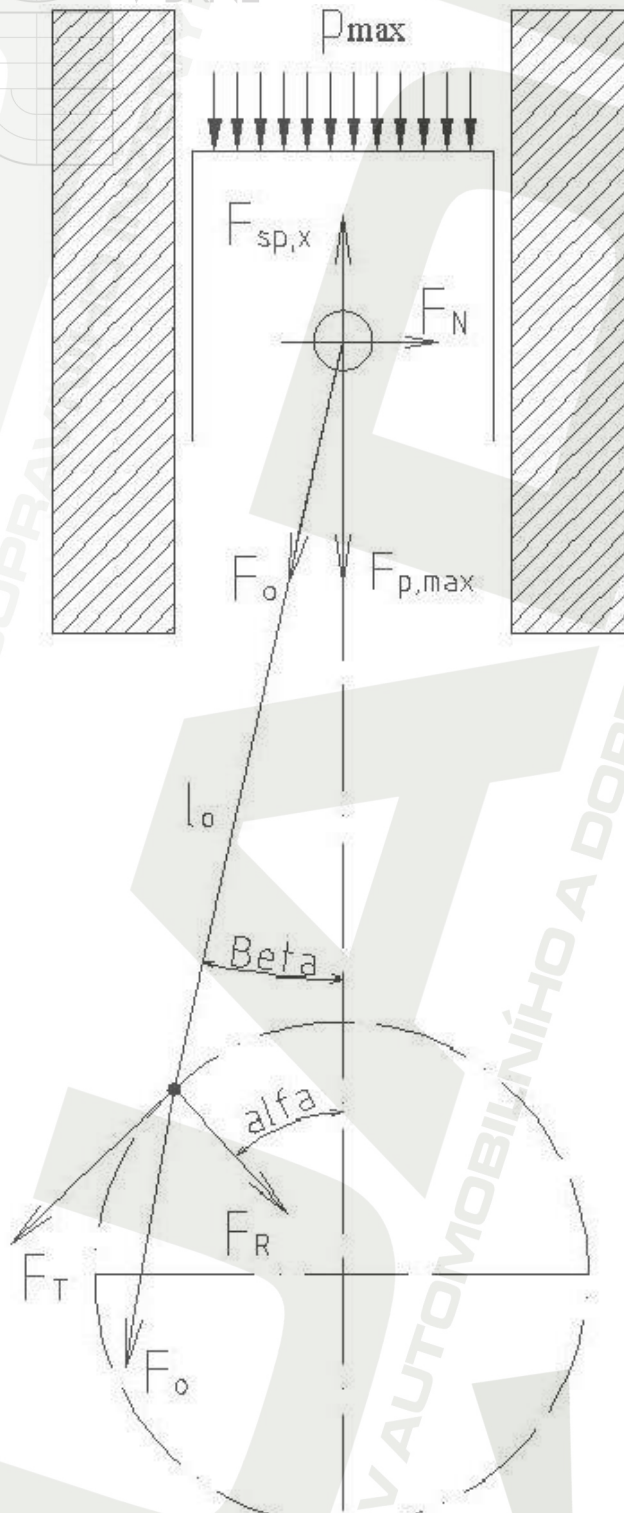
$$\sigma_t = 1,23\text{MPa}$$

(20)

Dovolené tahové napětí pro hliníkové slitiny $\sigma_{t,dov} = 4 - 10\text{MPa}$

3.6 Měrný tlak na plášti pístu

Je vyvoláván normálovou silou. Tato síla působí na stěnu válce a její maximální velikost je dosahována blízko horní úvratě při pohybu pístu v průběhu expanzního zdvihu.



Obr. 25 Rozbor sil v klikovém mechanismu

Celková síla působící v ose pístu:

$$F_c = F_{p \max} - F_{sp,x}$$

$$F_c = 16389,9 - 1271,5 = 15118,4$$

$$F_c = 15118,4N$$
(21)

Při maximální síle od tlaku plynů je úhel natočení klikového hřídele 379° .
Potom velikost úhlu α bude:

$$\alpha = 379^\circ - 360^\circ = 19^\circ$$

Úhel mezi osou ojnice a osou válce β :

$$\sin \beta = r_k \cdot \frac{\sin \alpha}{l_o}$$

$$\sin \beta = 42 \cdot \frac{\sin 19^\circ}{168} = 0,081$$

$$\sin \beta = 0,081 \Rightarrow \beta = 4^\circ 40' 6''$$
(22)

Velikost maximální normálové síly:

$$F_{N,\max} = F_c \cdot \operatorname{tg} \beta$$

$$F_{N,\max} = 15118,4 \cdot \operatorname{tg} 4^\circ 40' 6'' = 1234,6$$

$$F_{N,\max} = 1234,6N$$
(23)

Měrný tlak na plášti pístu:

$$p_{pl} = \frac{F_{N,\max}}{D_{pl} \cdot L_{pl}}$$

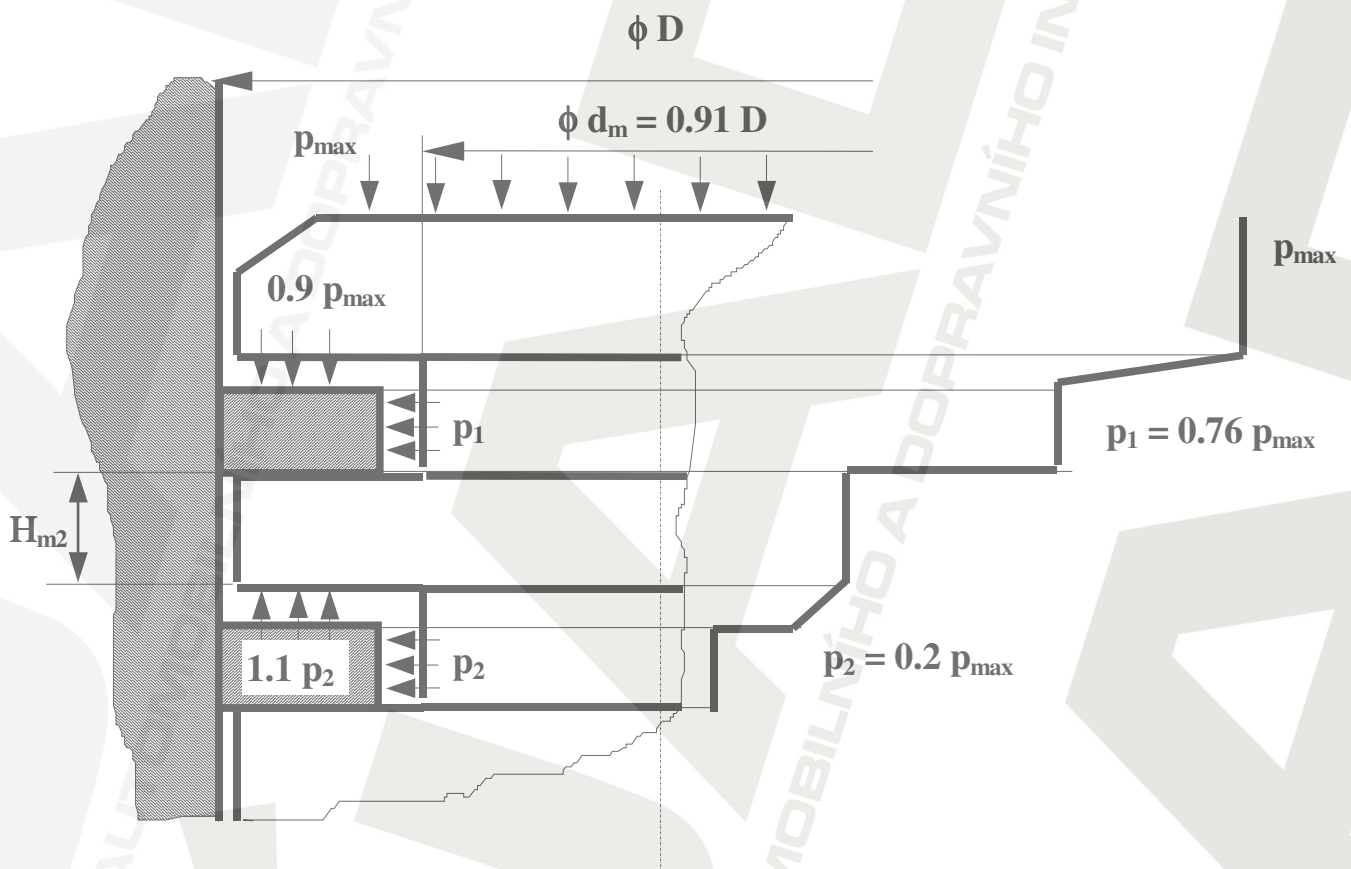
$$p_{pl} = \frac{1234,6}{0,070 \cdot 0,065} = 271344,2$$

$$p_{pl} = 0,27 \text{ MPa}$$
(24)

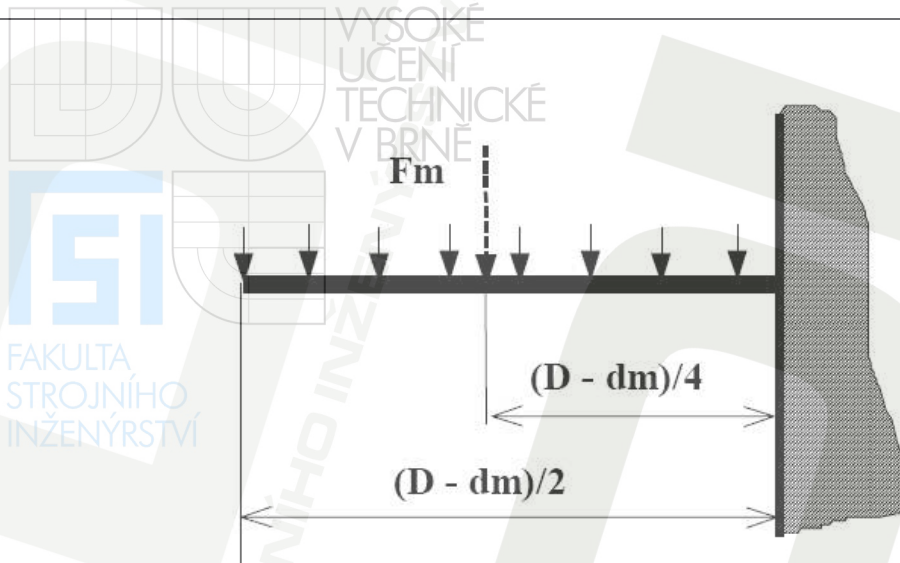
Vypočtený měrný tlak na plášti pístu nepřesahuje doporučenou hodnotu měrného tlaku $0,6 - 1,4 \text{ MPa}$.

3.7 Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem

Druhý můstek je vystaven vysokému namáhání od tlaku plynů ve spalovacím prostoru za současného působení značných teplot. Rozložení tlaků v jednotlivých mezikroužkových objemech, při dosažení maximální hodnoty tlaku nad pístem, je podle výsledků měření uvedeno na obr. 26.



Obr. 26 Rozložení tlaků v mezikroužkových objemech [1]



Obr. 27 Namáhání můstku [1]

Síla namáhající můstek jako vetknutý nosník na ohyb a střih:

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_m^2) \cdot (0,9 p_{\max} - 0,22 p_{\max})$$

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot [0,070^2 - (0,91 \cdot 0,070)^2] \cdot (0,9 \cdot 4,261 \cdot 10^6 - 0,22 \cdot 4,261 \cdot 10^6) = 1915,9 \quad (25)$$

$$F_m = 1915,9 N$$

Ohybový moment:

$$M_o = F_m \cdot \frac{D - d_m}{4}$$

$$M_o = 1915,9 \cdot \frac{0,070 - (0,91 \cdot 0,070)}{4} = 3,02 \quad (26)$$

$$M_o = 3,02 N \cdot m$$

Modul odporu v ohybu:

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot 0,91 \cdot 0,070 \cdot 0,003^2 = 3,0 \cdot 10^{-7} \quad (27)$$

$$W_o = 3,0 \cdot 10^{-7} m^3$$

Ohybové napětí:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o}$$

$$\sigma_o = \frac{3,02}{3,0 \cdot 10^{-7}} = 100666666 Pa \quad (28)$$

$$\sigma_o = 10,06 MPa$$

Smykové napětí:

$$\tau_s = \frac{F_m}{S}$$

$$\tau_s = \frac{F_m}{\pi \cdot d_m \cdot H_{m2}}$$

$$\tau_s = \frac{1915,9}{\pi \cdot 0,91 \cdot 0,070 \cdot 0,003} = 3193166$$

$$\tau_s = 3,19 MPa \quad (29)$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{10,06^2 + 3 \cdot 3,19^2} = 11,52 \quad (30)$$

$$\sigma_{red} = 11,52 MPa$$

Hodnota σ_{red} nepřesahuje dovolenou hodnotu redukovaného napětí, která se pohybuje v rozmezí 60-80 MPa.

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo na základě zadaného jmenovitého výkonu a otáček motoru vypracovat návrh základních rozměrů motoru a klikového mechanismu. Návrh výpočtu je určen pro čtyřdobý zážehový motor o výkonu 43kW. Na základě empirických vztahů byly navrženy základní rozměry pístu vzhledem k vrtání válce. Dno pístu jsem volil rovné, protože přesnější výpočet vyžaduje metodu konečných prvků nebo experimentální měření, což je nad rámec této práce. Píst je konstruován se dvěma drážkami pro těsnící kroužky a jednou drážkou pro stírací kroužek. Tato drážka je větší z důvodu odvodu oleje do klikové skříně motoru. Dalším krokem výpočtu je pevnostní kontrola dna pístu na ohyb. Následně se kontroluje nejslabší místo pláště pístu, které je v drážce pro stírací kroužek. Dále je kontrola prováděna na tlakové namáhání pláště pístu. Namáhání je vyvoláno normálovou silou, kterou píst působí na stěnu válce. Tuto sílu vypočteme z klikového mechanismu.

Teoretická část bakalářské práce pojednává o problematice pístní skupiny, kterou tvoří píst, pístní kroužky, pístní čep a pojistné kroužky. Zde uvádím příslušné materiály, způsob výroby, konstrukční provedení a funkce jednotlivých prvků pístní skupiny ve spalovacím motoru.

Všechny body zadání byly splněny.

5 Použitá literatura

- [1] Rauscher, J.: Ročníkový projekt (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [2] Rauscher, J.: Vozidlové motory (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [3] Rauscher, J.: Spalovací motory (studijní opory), Brno, FSI VUT
- [4] <http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=397>
- [5] http://www.iae.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove_motory/prednasky_pist.html
- [6] http://www.mjauto.cz/images/pistni_krouzky.jpg
- [7] http://i270.photobucket.com/albums/jj114/powertvmedia/07_News/FordCleveland.jpg
- [8] http://img.alibaba.com/photo/52176638/Piston_Pin.summ.jpg
- [9] <http://www.model-rc.cz/images/original/7458.jpg>
- [10] http://i272.photobucket.com/albums/jj194/sr20det_motor_build/contact1.jpg
- [11] <http://www.reycomotor.com/Reyco/Ksmotor/Segment2.htm>
- [12] <https://www.horsepowerparts.com/images/products/closeups/TOT/t0664.jpg>
- [13] *Catalog for piston rings*. Mahle GmbH. 2004- . Stuttgart Pragstrasse 25-46 : Bereich Aftermarket. Dostupný z WWW: <mahle-aftermarket.com>

6 Seznam použitých symbolů

a	[mm]	šířka pístního kroužku
c_s	[m·s ⁻¹]	střední pístová rychlost
D	[mm]	vrtání válce
$D_{\check{c}}$	[mm]	průměr pístního čepu
d_n	[mm]	průměr drážky pro pístní kroužek v pístu
D_r	[mm]	vnější rozměr kroužku v zamontovaném stavu
d_r	[mm]	vnitřní rozměr kroužku v zamontovaném stavu
$F_{p,max}$	[N]	maximální síla tlaku plynů působící na kruhovou desku
F_c	[N]	celková síla působící v ose pístu
F_m	[N]	síla namáhající první můstek
F_N	[N]	normálová síla působící na plášť pístu
$F_{N,max}$	[N]	maximální normálová síla
F_o	[N]	síla působící v ose ojnice
$F_{p,max}$	[N]	maximální síla od tlaku plynů
$F_{sp,x}$	[N]	setrvačná síla
$H_{\check{c}}$	[mm]	délka pístního čepu
H_k	[mm]	kompresní výška pístu
H_m	[mm]	výška ostatních můstků
H_{m1}	[mm]	výška prvního můstku
H_{m2}	[mm]	výška druhého můstku
H_o	[mm]	vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep
H_p	[mm]	výška pístu
H_{pl}	[mm]	výška pláště pístu
i	[-]	počet válců motoru
k	[-]	zdvihový poměr
l_o	[mm]	délka ojnice
$M_{o,max}$	[N.m]	maximální ohybový moment
m_x	[kg]	hmotnost koruny pístu v řezu x-x
n	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky motoru
P_e	[W]	efektivní výkon motoru
p_e	[Pa]	střední efektivní tlak
P_l	[kW·l ⁻¹]	objemový výkon
p_{max}	[MPa]	maximální tlak plynů ve válci motoru
p_{pl}	[MPa]	měrný tlak plynů na plášti
r	[mm]	poloměr vetknutí desky



r_k	[mm]	poloměr klikového hřídele
S	[mm]	průřez v místě vetknutí
S_p	[mm]	radiální vůle pístního kroužku
S_x	[mm ²]	minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací kroužek
V_m	[cm ³]	zdvihový objem motoru
V_z	[m ³]	zdvihový objem jednoho válce motoru
W_o	[m ³]	modul odporu v ohybu
Z	[mm]	zdvih pístu
α	[°]	úhel natočení klikového hřídele
β	[°]	úhel mezi osou ojnice a osou válce
δ	[mm]	šířka dna pístu
σ_o	[MPa]	ohybové napětí
$\sigma_{o,max}$	[MPa]	maximální ohybové napětí
σ_{red}	[MPa]	redukované napětí
σ_t	[MPa]	tahové napětí
$\sigma_{t,max}$	[MPa]	maximální spalovací tlak
τ	[-]	taktnost motoru
τ_s	[MPa]	smykové napětí
ω_{max}	[s ⁻¹]	maximální úhlová rychlost otáček klikového hřídele



Seznam příloh

Výkresová dokumentace:
Výrobní výkres pístu

CD:
Technická zpráva
Výkres