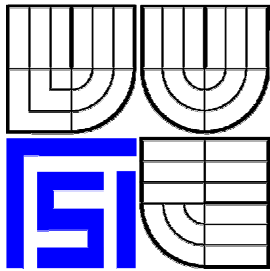




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# PÍST ČTYŘDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU O VÝKONU 96kW

PISTON FOR 96kW 4-STROKE SI-ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

KATEŘINA JOSEFÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. RADIM DUNDÁLEK, Ph. D.

BRNO 2008

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se bude zabývat výpočtovým návrhem a konstrukčním řešením pístu pro čtyřdobý zážehový motor. Dále pak stanovením základních rozměrů motoru a klikového mechanismu. Na základě empirických údajů budou stanoveny základní rozměry pístu. Pro navrženou kinematiku klikového mechanismu bude provedena pevnostní kontrola kritických průřezů pístu.

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

## **Abstrakt**

This bachelor`s thesis will deal with calculating suggestion and structural solution piston for 4-stroke petrol engine. Next then determination basic dimensions engine and crank mechanism. On the basis empirical detail will determine basic dimensions piston. For designed kinematics crank mechanism will perform fort control critical sectin piston.

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

JOSEFÍKOVÁ, K. *Píst čtyřdobého zážehového motoru o výkonu 96kW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

## **Prohlášení**

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

V Brně dne: .....

Podpis: .....

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Také chci poděkovat svým rodičům a všem, kteří mě ve studiu podporovali.

## Obsah

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Úvod.....   | 8  |
| 2       | Klikový mechanismus.....  | 9  |
| 2.1     | Pístní skupina.....   | 9  |
| 2.1.1   | Píst .....  | 10 |
| 2.1.1.1 | Materiály a výroba pístů .....                                  | 10 |
| 2.1.1.2 | Povrchová úprava pláště pístu .....                             | 11 |
| 2.1.1.3 | Tepelné zatížení pístu .....                                    | 11 |
| 2.1.1.4 | Chlazení pístu .....  | 13 |
| 2.1.2   | Pístní kroužky .....  | 13 |
| 2.1.2.1 | Tvary a rozměry .....   | 14 |
| 2.1.2.2 | Materiály a výroba pístních kroužků .....                       | 16 |
| 2.1.3   | Pístní čepy.....  | 16 |
| 2.1.3.1 | Axiální zajištění pístních čepů .....                           | 17 |
| 3       | Výpočtový návrh.....  | 18 |
| 3.1     | Stanovení hlavních rozměrů pístového spalovacího motoru .....   | 18 |
| 3.2     | Návrh základních rozměrů klikového mechanismu.....              | 20 |
| 3.3     | Návrh hlavních rozměrů pístu.....                               | 21 |
| 3.3.1   | Volba rozměrů konstrukčních prvků pístu zážehového motoru ..... | 21 |
| 3.3.2   | Drážky pro pístní kroužky .....                                 | 23 |
| 3.3.2.1 | Radiální vůle pístního kroužku .....                            | 23 |
| 3.3.2.2 | Axiální vůle pístního kroužku.....                              | 24 |
| 3.3.2.3 | Drážka pro stírací pístní kroužek .....                         | 25 |
| 3.4     | Pevnostní výpočet pístu .....                                   | 25 |
| 3.4.1   | Pevnostní výpočet dna pístu .....                               | 26 |
| 3.4.2   | Nejslabší místo pláště pístu.....                               | 28 |
| 3.4.3   | Měrný tlak na plášti pístu.....                                 | 30 |
| 3.4.4   | Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem .....             | 32 |
| 4       | Závěr .....   | 35 |
|         | Použitá literatura .....  | 36 |
|         | Použité symboly.....  | 37 |
|         | Seznam příloh .....   | 39 |

## 1 Úvod

Spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který vnitřním nebo vnějším spalováním paliva přeměňuje chemickou energii na energii tepelnou a s využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci. Energie plynného média je buď' potencionální (tlak) u pístového spalovacího stroje, nebo kinetická (rychlost proudu) u spalovacích turbin.

Spalovací motory všech typů našly uplatnění zejména v dopravních a mobilních mechanizačních prostředcích jako jsou např. lokomotivy, lodě, ponorky, motorová vozidla, letadla a vrtulníky, stavební a zemědělské stroje, nouzové generátory el. proudu atd.

V současné době je nejrozšířenějším pohonem automobilů, motocyklů, lodí a malých letadel pístový spalovací motor, který produkuje mechanickou práci na základě periodicky se opakujících pracovních oběhů, probíhajících v objemu uzavíraném pístem motoru. V automobilovém průmyslu je to pak převážně pístový spalovací motor zážehový (spalování benzínu) nebo vznětový (spalování nafty). Základní pohybovou součástí těchto strojů je píst. Výhodou pístových spalovacích motorů je jejich vysoká celková účinnost, jednoduchost konstrukce a kompaktnost, možnost rychlého spuštění a rychlého zatížení. Mezi nevýhody patří nutnost spouštět motoru cizím zdrojem, nevýhodný průběh točivého momentu a nepříznivý vliv na okolní prostředí.

Píst u spalovacích motorů slouží k zachycení a přenosu síly vyvolané od tlaků plynů na ojnici. Při práci motoru je píst zatěžován mechanicky, silami od tlaků plynů a setrvačnými silami od vratného pohybu pístu. Tepelné zatěžování je způsobeno vysokými teplotami spalin.

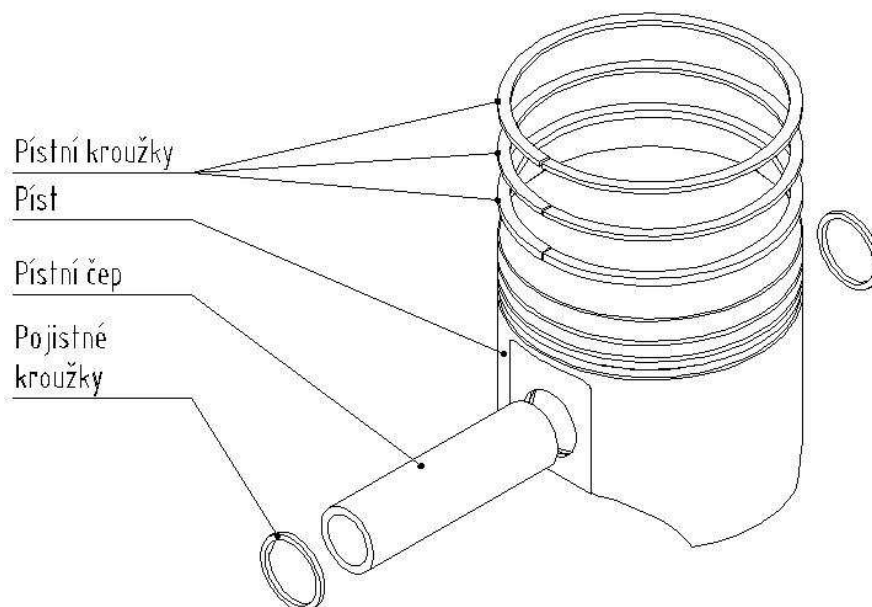
V bakalářské práci je zpracován výpočtový návrh základních rozměrů pístu čtyřdobého zážehového motoru a následná pevnostní kontrola kritických průřezů. Součástí práce je i výrobní výkres navrženého a zkontrolovaného pístu.

## 2 Klikový mechanismus

Klikovým mechanismem rozumíme sestavu klikového hřídele, ojnice a pístu. Jde o mechanismus, který převádí posuvný pohyb pístu na otáčivý pohyb klikového hřídele a je tak nezbytnou součástí spalovacího motoru. Při spalování ve válci působí na píst vysoké teploty a tlaky, které způsobí posuvný pohyb pístu.

### 2.1 Pístní skupina

Pístní skupina je součástí klikového mechanismu. Tuto skupinu tvoří píst, pístní kroužky, pístní čep a pojistné kroužky.



*Obr. 1 Pístní skupina*

Požadavky kladené na pístní skupinu:

- zabezpečení přenosu síly od tlaků plynů,
- zachycení boční síly vyvolané klikovým mechanismem a její přenos na stěnu válce,
- utěsnění spalovacího prostoru ,
- zabezpečení odvodu tepla ze dna pístu do chlazených stěn spalovacího prostoru [2].

### 2.1.1 Píst

Jako díly pohybující se ve spalovacím prostoru, jsou písty vystaveny velmi vysokému mechanickému a tepelnému namáhání. Důsledkem přímého kontaktu se spaliny je nejvíce namáháno dno pístu, horní můstek a zvláště pak přechodové hrany. Teplo vyvíjené spalováním paliva vyvolává roztahování pístu, které může v kritických případech vést až k jeho zadření ve válci motoru.

Hlavní úlohy pístů:

- zachycení a přenos sil od tlaků plynů na ojnici,
- oddělení spalovacího prostoru od prostoru klikové skříně,
- udržování správné polohy pístního čepu a pístních kroužků vůči válci motoru,
- odvádí tepla vyvolaného spalováním paliva do stěn válce.

Hlavní požadavky kladené na písty:

- malá hmotnost z důvodu malého namáhání ojnice v tahu,
- dobré kluzné vlastnosti, kvůli nízkým ztrátám v důsledku tření,
- vysoká odolnost proti otěru z důvodu dlouhé životnosti,
- vysoká pevnost a tvrdost, umožňující vysoký výkon motoru,
- tepelná roztažnost co nejbližší tepelné roztažnosti bloku motoru, aby se dosáhlo malých vůlí chodu pístu [4].

#### 2.1.1.1 Materiály a výroba pístů

Lze tvrdit, že se písty nejčastěji vyrábí ze slitin typu AlSi. (Slitiny hořčíku se používají jen u závodních aut, jejich výroba je velmi drahá a dá se zdůvodnit nižší měrnou hustotou hořčíkových slitin.) Počet a množství legujících prvků se liší podle účelu použití pístu. Slitiny s vysokým obsahem křemíku mají velmi dobré vlastnosti ohledně pevnosti a kluzných vlastností a jsou určeny pro písty kované. Mají také menší tepelnou roztažnost.

Písty pro čtyřtákní motory mají většinou 11 až 13% Si (křemík). Vyšší podíl křemíku zvyšuje pevnost a snižuje tepelnou roztažnost, zhoršuje ale obrobitelnost. Ve výjimečných případech lze použít podíl křemíku až 25%.

Písty pro dvoutákní motory mají podíl křemíku 14 až 18%, protože jsou v porovnání s písty pro čtyřtákní motory v důsledku většího počtu pracovních taktů tepelně více namáhány a kvůli výřezům v plášti pístu ještě zeslabeny.

Z pohledu výrobního procesu se buď písty odlévají (do písku, do kokily), nebo kované (lisované). Lité písty dostatečně vyhovují pro sériovou výrobu a měrné výkony do  $60 \text{ kW/dm}^3$ . Kované písty mají v důsledku většího zhuštění materiálu samozřejmě větší pevnost, a mohou tak snášet i větší namáhání. Používají se např. v motoristickém sportu a ve vznětových motorech [4, 5].

### 2.1.1.2 Povrchová úprava pláště pístu

Plášť pístu má za úkol vést píst ve válci, zachycovat boční sílu a regulovat tenkou olejovou vrstvu. Proto je plášť pístu opatřen povrchovou vrstvou. Tato vrstva zkracuje dobu rozběhnutí a při krátkodobém nedostatečném mazání poskytuje potřebné kluzné vlastnosti, snižuje nebezpečí zadření pístu při záběru a omezuje oxidaci povrchu při skladování.

Povrch pláště pístu byl dříve broušen. Ukázalo se, že vhodnější je povrch s jemnými drážkami po soustružení diamantovým nožem, ve kterých se udržuje zásoba oleje. V současné době se nejčastěji používá povlak grafitu o tloušťce 10 až  $20 \mu\text{m}$  [2, 4].

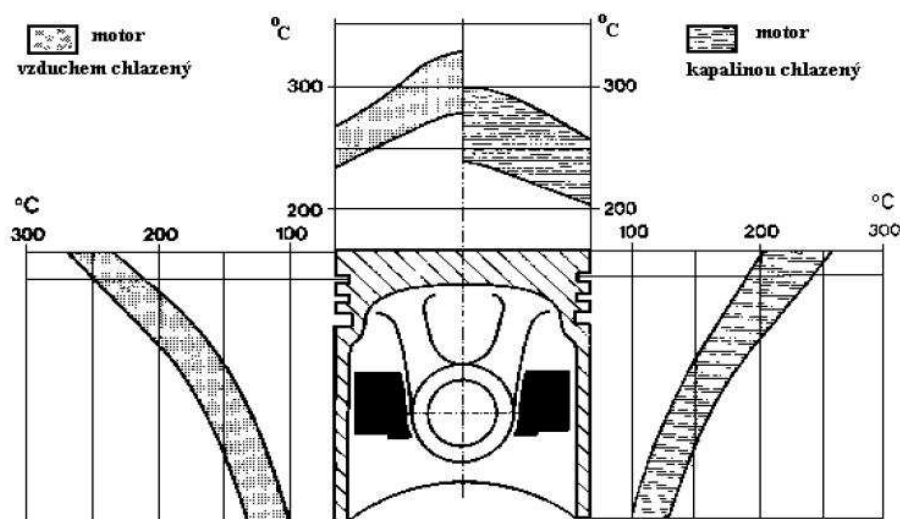
- Cínová vrstva se získá ponořením pístu do lázně cínové soli. Na povrchu se tak vysráží cín. I při velmi malé tloušťce jsou výsledkem velmi dobré kluzné vlastnosti.
- Olověná vrstva má proti cínové vrstvě výhodu ve vyšším bodu tání, a proto se u běžných pístů používá nejčastěji
- Grafitová vrstva je oproti předchozím případům získávána nástřikem. Tato úprava má dobré vlastnosti pro nouzový chod a je vynikající ochranou pro proti opotřebení pístu.
- Eloxovaná vrstva poskytuje vysokou odolnost proti otěru, ale nemá vlastnosti pro nouzový chod. Naproti tomu se eloxovaná dna pístu osvědčují při vysokém tepelném namáhání a jako ochrana proti korozi.
- Železné vrstvy. Před jejich aplikací se povrch nejprve pomědí a poté opatří asi  $0,03 \text{ mm}$  silnou vrstvou železa. Tvrdost odpovídá přibližně tvrdosti vrstvy chromu. Tenká vrstva cínu nanášená na vrstvu železa slouží jako ochrana proti korozi [4].

### 2.1.1.3 Tepelné zatížení pístu

Tepelné zatížení pístu silně ovlivňuje velikost jeho celkového roztažení. Píst by měl mít co nejmenší vůli ve válci, avšak velká tepelná roztažnost hliníkových slitin nepříznivě ovlivňuje dodržení optimálních rozměrů pístu. Proto není tvar pístu za

studena přesně válcový, ale oválný a kuželový, po zahřátí na provozní teplotu se vše vyrovná a píst má optimální válcový tvar. Teplota pístu se mění v provozu až o  $120^{\circ}\text{C}$  a i vůle pístu se v tomto poměru mění. Aby se roztahování pístu omezilo, je nutné provést určitá technická opatření. Původní prořezávání drážek v plášti pístu, které zvyšovalo pružnost pláště a řídilo tok tepla pláštěm dnes ustoupilo zalévání vyrovnávacích vložek z invaru. Invar je slitina kovů s nepatrnou tepelnou roztažností a protože má větší pevnost než hliníkové slitiny, znemožňuje roztahování materiálu pístu v širokém rozsahu teplot. Zvýší se sice vnitřní pnutí v pístu, ale ne natolik, aby vedlo k jeho poruchám. Nevýhodou je zvýšení hmotnosti pístu proti celohliníkové konstrukci, invar má vyšší měrnou hmotnost. Přesto všechno výhody nepatrné tepelné roztažnosti natolik převládají, že se už dnes nekompenzované písty prakticky nepoužívají [5].

Jako dilatační vložky se nepoužívají pouze ivary, ale i jiné slitiny jako např. Fe -Ni – Co. Poměrem prvků se mění vlastnosti při určitých teplotách. Takto se dá pro určité provedení motoru vyrobit optimální píst.

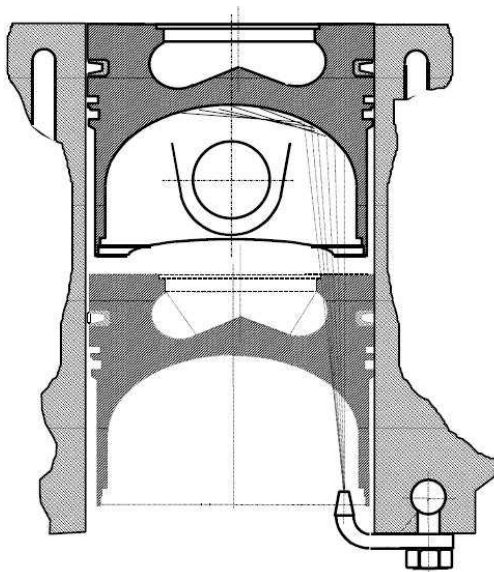


*Obr. 2 Rozložení teplot na dně a plášti pístu [2]*

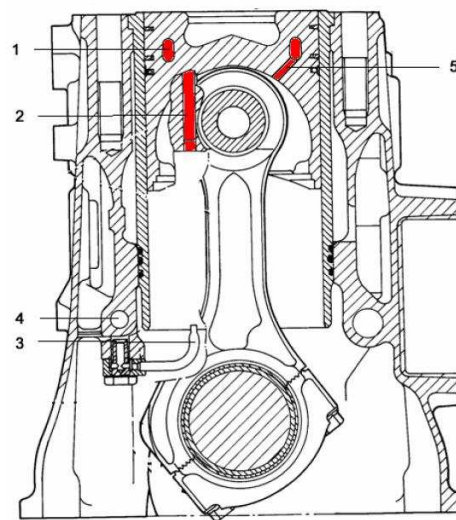
Mimo teplo, které píst přejímá v důsledku přímého kontaktu se spaliny, je tepelně zatěžován i částí tepla vznikajícího třením pístu a pístních kroužků o stěny válce. Třecí ztráty pístní skupiny rychloběžných motorů představují 45 až 65% celkových třecích ztrát. Maximální povrchová teplota pístů z hliníkové slitiny by neměla překročit hodnotu cca.  $320^{\circ}\text{C}$ , kdy již dochází k výraznému poklesu pevnosti hliníkových slitin, u kovaných pístů je tento pokles poněkud nižší [2].

### 2.1.1.4 Chlazení pístu

Pokud překročí teplota v drážce prvního pístního kroužku 240 °C je nutné zabezpečit její snížení. Zvětšování výšky horního můstku je nepříjemné, protože se zvětšuje škodlivý objem nad pístem v horní úvratí a to vede ke snížení ekonomičnosti provozu a nárůstu obsahu zbytkového uhlovodíku ve výfukových plynech motoru. Další možností je chlazení pístu, ale i u značně zatížených motorů nepřepřehovaných. V současnosti je používáno u všech přeplňovaných motorů jak zážehových, tak i vznětových. U méně zatížených motorů se používá nástřík dna pístu (viz obr. 3) u více zatěžovaných motorů jsou vytvořeny kanály v hlavě pístu (viz obr. 4) [2].



**Obr. 3** Nástřík dna pístu [2]



**Obr. 4** Chlazení pístu chladícím kanálem [3]

1 – Toroidní chladicí kanál

2 – Přívodní kanál

3 – Tryska

4 – Přívodní kanál

5 – Odpadní kanál

### 2.1.2 Pístní kroužky

Úkolem pístních kroužků je:

- utěsnění spalovacího prostoru,
- odvádění část tepla vzniklého při spalování na válce,
- řízení výšky mazací vrstvy oleje.

První dvě úlohy plní těsnící kroužky, poslední pak kroužky stírací.

V dnešní době se u zážehových motorů používají zpravidla tři kroužky (jeden stírací a dva těsnící), u vznětových motorů pak čtyři (tři těsnící a jeden stírací). První dva kroužky mají za úkol těsnit píst ve válci proti pronikání pod i nad píst, třetí kroužek zajišťuje stírání přebytečného oleje.

Pístní kroužky jsou při provozu motoru namáhány silami setrvačnými, silami od tlaku plynů a třením o stěnu válce motoru. Tyto síly jsou časově proměnné a působí na kroužek, který je ohřátý na poměrně vysokou teplotu, jednak průtokem tepla z pístu, jednak teplem vyvolaným třením o stěnu válce. Za těchto obtížných provozních podmínek je nutno zabezpečit odpovídající funkčnost a životnost pístního kroužku [2].

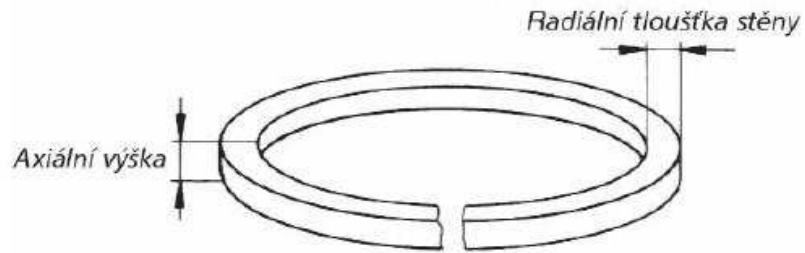


*Obr. 5 Pístní kroužky*

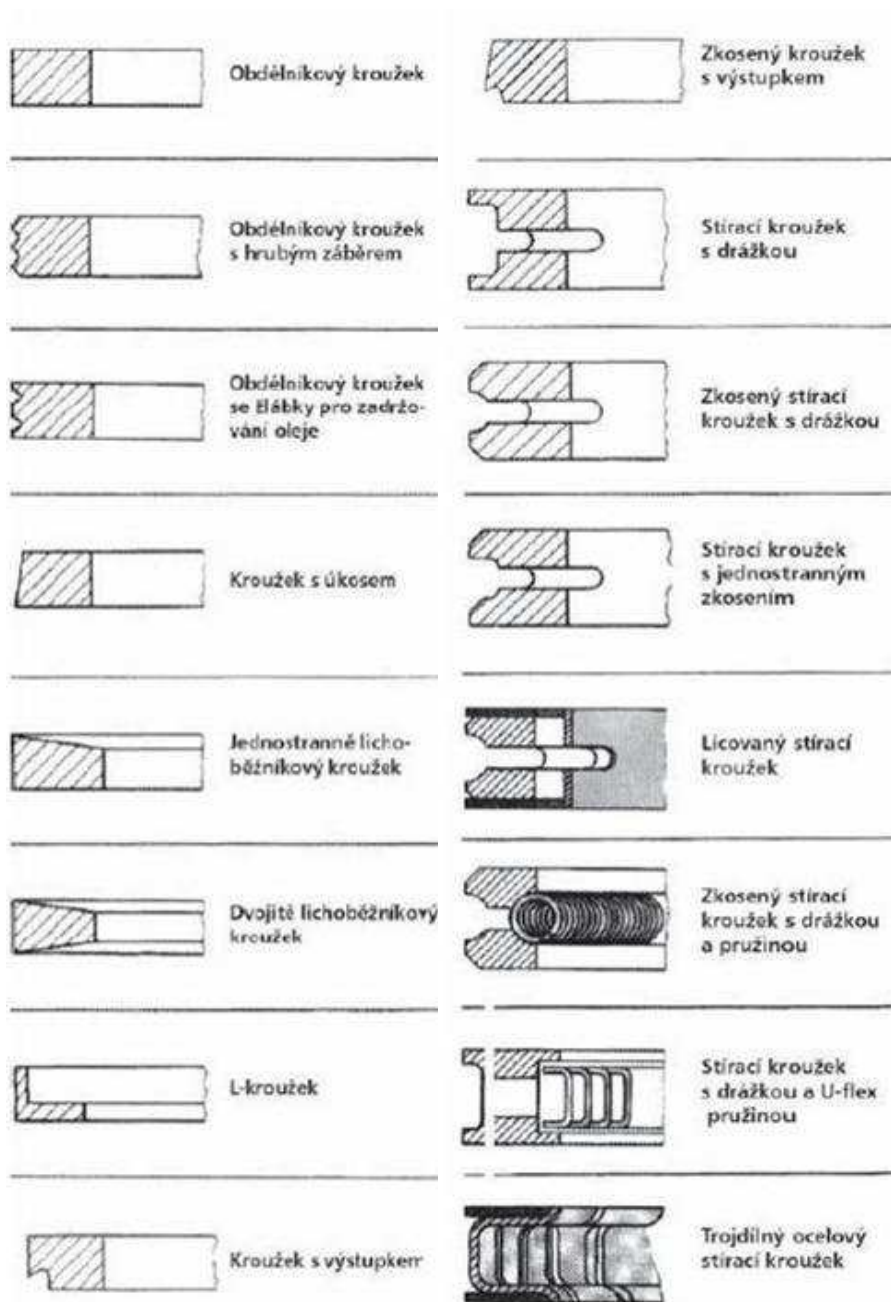
### 2.1.2.1 Tvary a rozměry

Těsnící kroužky mají většinou axiální výšku 1,5 až 4 mm, jejich radiální tloušťka činí zpravidla  $1/22$  až  $1/25$  průměru válce. Axiální výška a radiální tloušťka pístního kroužku je znázorněna na Obr. 6. Pro zvýšení schopnosti vytváření dostatečného dosedacího tlaku na stěnu válce mají pístní kroužky tvar otevřeného pérového prstence. Otevření spáry (většinou přímé, někdy však vyříznuté šikmo pod úhlem  $45^\circ$  k podélné ose, označované jako zámek) je pro vyvolávání pružné síly ve volném stavu roztaženo o 0,10 až 0,15 D (průměr válce). V uzavřeném stavu musí být dimenzováno tak, aby následkem teplotní roztažnosti nedocházelo ke svírání.

Pod těsnícími kroužky se většinou nachází kroužek stírací. Radiální tloušťka stěny a roztažení bývá u stíracích kroužků podobná jako u kroužků těsnících. Jejich výška je naproti tomu většinou větší (4 až 7 mm). Různé tvary pístních kroužků (viz Obr. 7) [4].



Obr. 6 Rozměry pístních kroužků [4]



Obr. 7 Tvary pístních kroužků [4]

### 2.1.2.2 Materiály a výroba pístních kroužků

Na materiály pístních kroužků bývají kladeny nároky vyplývající z jejich z jejich tepelného a mechanického zatížení. Musí mít dobrou pevnost za zvýšené teploty, nízký pokles tangenciální síly kroužku, jak v důsledku působení teplot, tak i dlouhodobého únavového namáhání, dobré kluzné vlastnosti ve vztahu k materiálu stěny válce při nedostatečném mazání a malé opotřebení povrchu kroužku.

Pístní kroužky bývají (s výjimkou ocelových kroužků pro motory s vysokým výkonem) vyráběny technologií odděleného lití z šedé litiny se zjemněným zrnem, legované fosforem. Tvrdost kroužků má být o 15 až 25 HB vyšší, než je tvrdost stěny litinového válce. Výhodou těchto kroužků je jejich cena a mezi hlavní nevýhody patří jejich křehkost, ztráta pružnosti při vyšších teplotách a rychlé opotřebení hlavní těsnicí plochy. Naproti tomu kroužky z temperované litiny se zrnitým grafitem mají výrazně vyšší pevnost a jsou méně náchylné k praskání.

Aby se zmenšil otěr pístních kroužků, urychlil se jejich rozběh a zabránilo se tvoření spálených skvrn, bývá mnoho pístních kroužků povrchově zpracováno fosfátováním, pocínováním, poměděním, kroužky jsou často feritované, chromované a zabrušované. Kluzné plochy mohou být i vyplněny nebo potaženy molybdenem [2, 4].

### 2.1.3 Pístní čepy

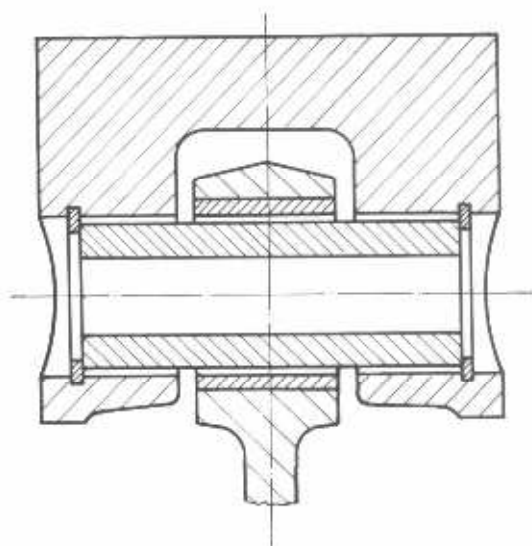
Pístní čepy přenáší silové účinky mezi pístem a ojnicí a jsou velmi silně namáhány v ohybu. Protože v plochách jejich uložení v pístu i v ojnici dochází k relativně pomalému klouzání při vysokém tlaku a nedostatečném mazání, musí být jejich povrch tvrdý a ořezuvzdorný.

Většina pístních čepů je vyrobena z ocelí, které jsou na potřebnou pevnost zušlechťovány bez legujících příměsí nebo jen s jejich malým množstvím. Potřebná tvrdost povrchu se vytváří povrchovým vytvrzením nebo nitridováním. Povrchové vytvrzení vyžaduje určitou nejmenší tloušťku stěny. Nezbytná je velká hladkost vnějších ploch, již se dosahuje jemným broušením a následným lapováním, stejně jako dokonalá kruhovitost, rovnoměrná tloušťka stěny a čisté vrtání [2, 4].

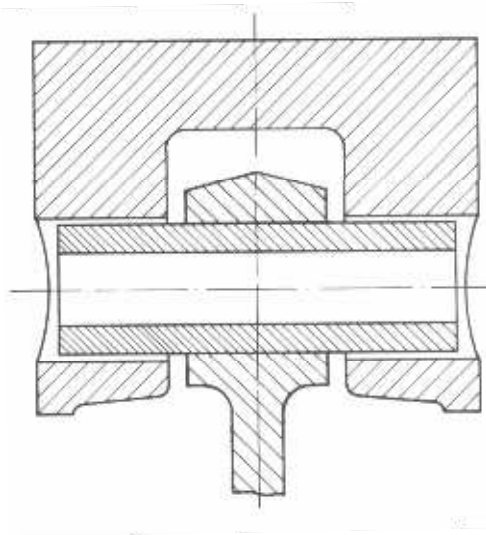


**Obr. 8** Pístní čepy [6]

Pístní čepy bývají většinou uloženy volně v oku ojnice i nálticích v pístu. Potom mluvíme o tzv. „plovoucím“ pístním čepu (viz obr. 9). Pokud je pístní čep do ojnicního oka nalisován za tepla mluvíme o tzv. „pevném“ uložení (viz obr. 10).



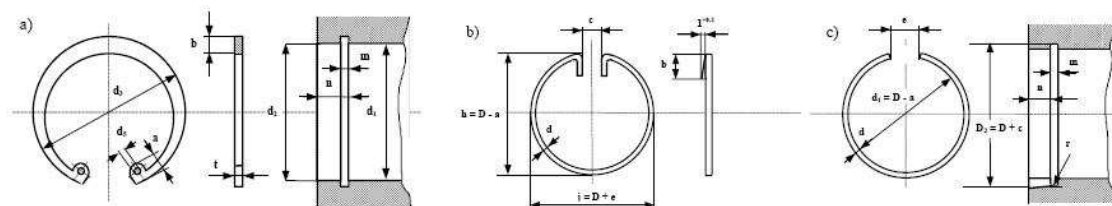
**Obr. 9** Plovoucí pístní čep [7]



**Obr. 10** Pevný pístní čep [7]

### 2.1.3.1 Axiální zajištění pístních čepů

Axiální pojištění zabraňuje kontaktu pístního čepu se stěnou válce. Pokud by k tomuto došlo, tak by v důsledku tření čepu a stěny válce, v místě kontaktu nastal takový ohřev pístního čepu, že by se materiál z hliníkové slitiny v oblasti oka pro pístní čep roztavil.



**Obr. 11** Axiální pojištění pístního čepu [2]

Pro pojištění velkých pístních čepů, např. naftových motorů pro nákladní automobily, se používají pojistné kroužky pro díry dle ČSN 022931 (viz Obr. 11a). U plovoucích pístních čepů menších průměrů se používají pojistné drátěné kroužky dle ČSN 022928 (viz Obr. 11b). V současné době se nejčastěji používají pojistné drátěné kroužky dle ČSN 022925 (viz Obr. 11c).

### 3 Výpočtový návrh

#### 3.1 Stanovení hlavních rozměrů pístového spalovacího motoru

Hlavní rozměry pístového spalovacího motoru jsou:

- průměr (vrtání) válce  $D$
- zdvih pístu  $Z$
- počet válců motoru  $i$

Při výpočtu budeme vycházet ze zadaného jmenovitého výkonu motoru. Ostatní parametry potřebné pro výpočet jsou voleny z Tab. 1. Stanovená koncepce motoru je 4-válcový nepřepřlňovaný zážehový motor s vícebodovým vstřikováním paliva.

**Tab. 1** – Charakteristické parametry zážehových motorů [1]

| Motory zážehové | Rok  | jmenovité otáčky<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] |      | stř. píst. rychlost<br>[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] |      | stř. efekt. tlak<br>[MPa]                           |      |
|-----------------|------|---|------|---|------|---|------|
|                 |      | min.                                      | max. | min.  | max. | min.  | max. |
| sací            | 2003 | 4500                                      | 8800 | 11,5  | 24   | 0,8   | 1,3  |
|                 |      | kompresní poměr<br>[-]                    |      | zdvihový poměr<br>[-]                                   |      | objemový výkon<br>[ $\text{kW}\cdot\text{l}^{-1}$ ] |      |
|                 |      | min.                                      | max. | min.  | max. | min.  | max. |
|                 |      | 9   | 12,5 | 0,7   | 1,3  | 31  | 88   |

**Zadané hodnoty:** Výkon motoru

$$P_e = 96 \text{ kW}$$

Jmenovité otáčky motoru

$$n = 5700 \text{ min}^{-1}$$

**Zdvihový objem jednoho válce motoru**

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

$$V_z = \frac{60 \cdot 96000}{0,9 \cdot 10^6 \cdot 5700 \cdot 4 \cdot 0,5}$$

$$V_z = 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

**Kontrola objemového „litrového“ výkonu motoru**

$$P_l = \frac{P_e}{V_z \cdot i} \quad (2)$$

$$P_l = \frac{96}{0,56 \cdot 4}$$

$$P_l = 42,78 \text{ kW} \cdot \text{l}^{-1}$$

Doporučené hodnoty litrového výkonu jsou uvedeny v Tab. 1. Vypočtená hodnota se pohybuje v požadovaných mezích.

### Velikost vrtání válce

Pro zdvihový objem válce platí:

$$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z \quad (3)$$

Pro výpočet zavádíme veličinu  $k$  – zdvihový poměr. Viz Tab. 1:

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

Po vyjádření z rovnice (4) a dosazení do rovnice (3) dostáváme:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_z}{\pi \cdot k}} \quad (5)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,561 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,28}}$$

$$D = 0,0822 \text{ m} \quad \rightarrow \quad D = 82 \text{ mm}$$

### Zdvih pístu

Vyjádřením  $Z$  z rovnice (4) dostáváme:

$$Z = k \cdot D \quad (6)$$

$$Z = 1,28 \cdot 82$$

$$Z = 105 \text{ mm}$$

### Kontrola střední pístové rychlosti

$$c_s = 2 \cdot Z \cdot \frac{n}{60} \quad (7)$$

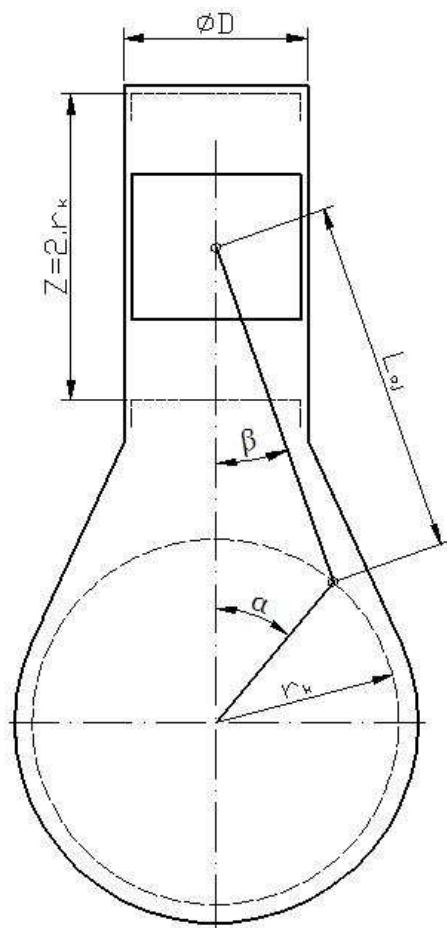
$$c_s = 2 \cdot 0,105 \cdot \frac{5700}{60}$$

$$c_s = 19,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Doporučené hodnoty střední pístové rychlosti jsou uvedeny v Tab. 1. Vypočtená hodnota se pohybuje v požadovaných mezích.

### 3.2 Návrh základních rozměrů klikového mechanismu

Mezi základní rozměry klikového mechanismu patří:



**Velikost vrtání válce:**

$$D = 82 \text{ mm}$$

**Zdvih pístu:**

$$Z = 105 \text{ mm}$$

**Poloměr klikového hřídele:**

$$r_k = \frac{Z}{2} \quad (8)$$

$$r_k = \frac{105}{2}$$

$$r_k = 52,5 \text{ mm}$$

**Délka ojnice:**

$$L_{oj} = (1,7 \div 2,3) \cdot D$$

$$L_{oj} = 2 \cdot D \quad (9)$$

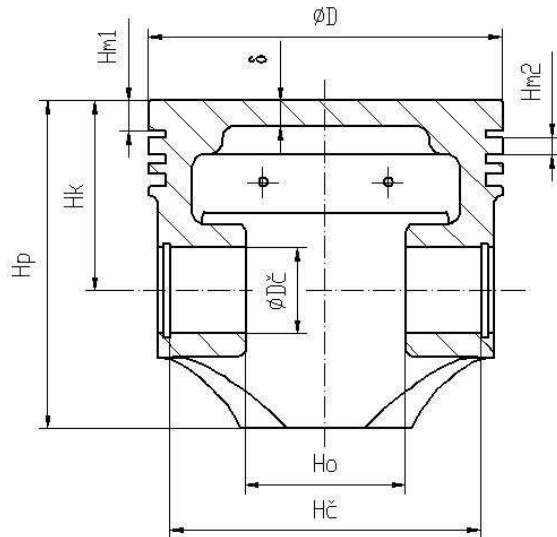
$$L_{oj} = 2 \cdot 82$$

$$L_{oj} = 164 \text{ mm}$$

**Obr.12** Schéma klikového mechanismu

### 3.3 Návrh hlavních rozměrů pístu

Při návrhu rozměrů vycházíme z dříve provedených a osvědčených konstrukcí. Jednotlivé rozměry jsou vyjádřeny ve vztahu k vrtání válce  $D$ .



Obr. 13 Hlavní rozměry pístu [1]

Tab. 2 Doporučené meze charakteristických rozměrů pístu pro zážehový motor [1]

| veličina   | %D       |
|------------|----------|
| $\phi D$   | 100      |
| $H_p$      | 90 – 140 |
| $H_k$      | 50 – 70  |
| $H_o$      | 40       |
| $H_c$      | 85       |
| $H_{m1}$   | 6 – 10   |
| $H_{m2}$   | 3 -6     |
| $\phi D_c$ | 25 – 28  |
| $\delta$   | 5 - 7    |

#### 3.3.1 Volba rozměrů konstrukčních prvků pístu zážehového motoru

##### Výška pístu

$$H_p = 0,93 \cdot D \quad (10)$$

$$H_p = 0,93 \cdot 82$$

$$H_p = 76\text{mm}$$

##### Kompresní výška pístu

$$H_k = 0,54 \cdot D \quad (11)$$

$$H_k = 0,54 \cdot 82$$

$$H_k = 44\text{mm}$$

**Vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep**

$$H_o = 0,4 \cdot D \quad (12)$$

$$H_o = 0,4 \cdot 82$$

$$H_o = 33mm$$

**Délka pístního čepu**

$$H_\zeta = 0,85 \cdot D \quad (13)$$

$$H_\zeta = 0,85 \cdot 82$$

$$H_\zeta = 70mm$$

**Výška prvního můstku**

$$H_{m1} = 0,09 \cdot D \quad (14)$$

$$H_{m1} = 0,09 \cdot 82$$

$$H_{m1} = 7,4mm$$

**Výška druhého můstku**

$$H_{m2} = 0,05 \cdot D \quad (15)$$

$$H_{m2} = 0,05 \cdot 82$$

$$H_{m2} = 4mm$$

**Průměr pístního čepu**

$$D_\zeta = 0,25 \cdot D \quad (16)$$

$$D_\zeta = 0,25 \cdot 82$$

$$D_\zeta = 20mm$$

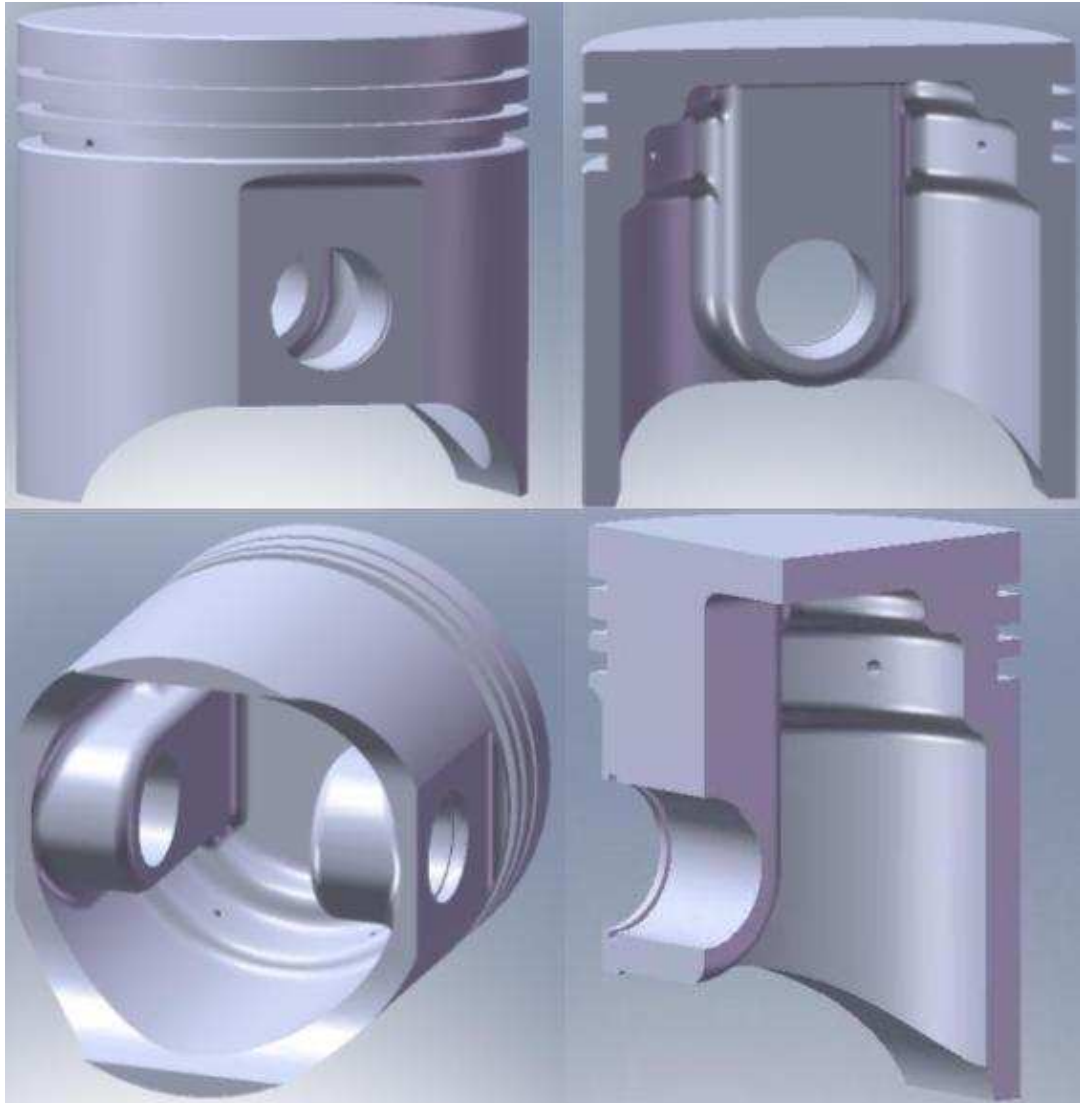
**Šířka dna pístu**

$$\delta = 0,07 \cdot D \quad (17)$$

$$\delta = 0,07 \cdot 82$$

$$\delta = 6mm$$

Na základě určených rozměrů pístu, byl vypracován 3D model, pomocí programu SolidWorks 2007.



*Obr. 14 Model pístu*

### 3.3.2 Drážky pro pístní kroužky

#### 3.3.2.1 Radiální vůle pístního kroužku

Pístní kroužky nesmí dosedat vnitřní stranou na dno drážky v pístu tzn. musí být zachována určitá radiální vůle.

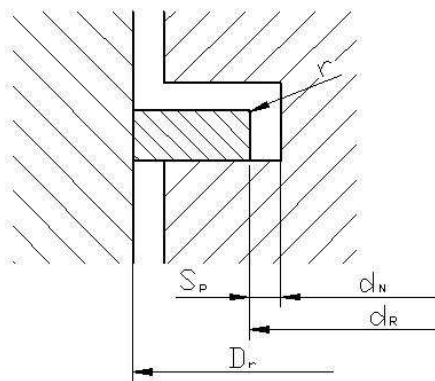
### Průměr drážky pro pístní kroužky

Velikost radiální vůle  $S_p$  volena dle literatury [1]. Šířka pístního kroužku volena dle normy DIN 70 910.

$$d_N = D - 2 \cdot (a + S_p) \quad (18)$$

$$d_N = 82 - 2 \cdot (3,45 + 0,6)$$

$$d_N = 73,9 \text{ mm}$$



- $D_T = D$ .... vnější průměr kroužku v zamontovaném stavu  
 $d_N$ ..... průměr drážky pro pístní kroužek v pístu  
 $d_R$ ..... vnitřní průměr kroužku v zamontovaném stavu  
 $S_P$ ..... radiální vůle pístního kroužku

*Obr. 15 Radiální vůle pístního kroužku [1]*

#### 3.3.2.2 Axiální vůle pístního kroužku

Hlavní faktor při určování axiální vůle je pravděpodobnost vzniku karbonových úsad. U prvního kroužku jsou vůle větší v důsledku působení vysokých teplot je nebezpečí vzniku karbonových vrstev velké.

Dle normy DIN 70 910 jsou pístní kroužky vyráběny s tolerancí  $-0,010 \text{ mm}$  až  $-0,022 \text{ mm}$  a drážky pro kroužky v šířce tolerančního pole  $+0,015 \text{ mm}$  až  $+0,030 \text{ mm}$  (např.  $+0,035 \text{ mm}$  až  $+0,050 \text{ mm}$ ).

#### Axiální vůle prvního těsnícího kroužku

- pístní kroužek  $1,5_{-0,022}^{-0,010} \text{ mm}$
- drážka  $1,5_{+0,035}^{+0,050} \text{ mm}$

Maximální vůle kroužku v drážce  $0,072 \text{ mm}$

Minimální vůle kroužku v drážce  $0,045 \text{ mm}$

### Axiální vůle druhého těsnícího kroužku

- pístní kroužek  $2_{-0,022}^{-0,010}$  mm
- drážka  $2_{+0,025}^{+0,040}$  mm

Maximální vůle kroužku v drážce 0,062 mm

Minimální vůle kroužku v drážce 0,035 mm

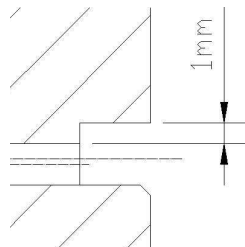
### Axiální vůle stíracího kroužku

- pístní kroužek  $3_{-0,022}^{-0,010}$  mm
- drážka  $3_{+0,025}^{+0,040}$  mm

Maximální vůle kroužku v drážce 0,062 mm

Minimální vůle kroužku v drážce 0,035 mm

#### 3.3.2.3 Drážka pro stírací pístní kroužek



*Obr. 16* Otvor pro odvod oleje z drážky stíracího kroužku [1]

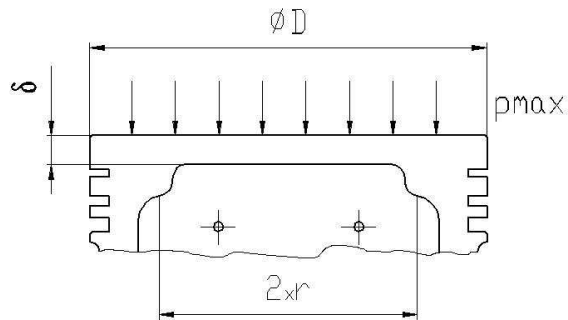
Součástí drážek pro stírací pístní kroužky jsou i otvory pro odvod oleje. Z tohoto důvodu bývají širší než drážky těsnících kroužků.

### 3.4 Pevnostní výpočet pístu

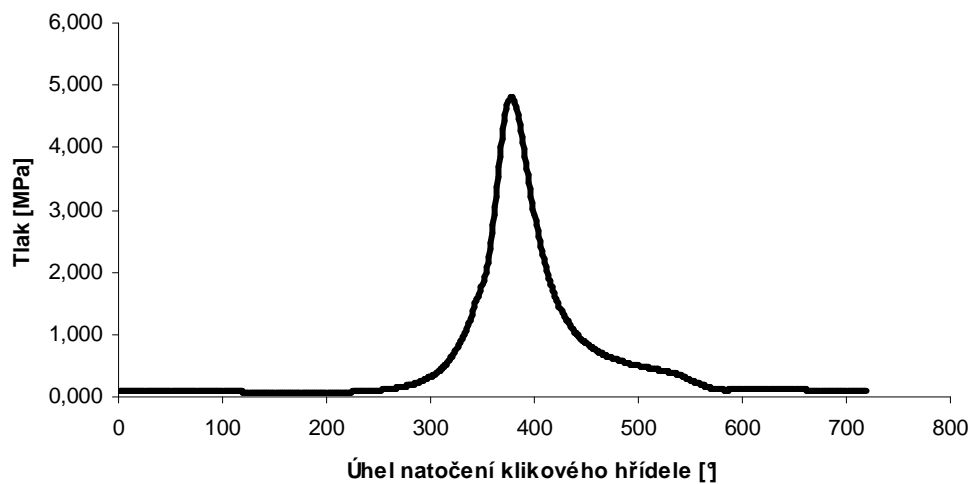
Z důvodu složitosti tvaru pístu je možno provést pouze informační výpočet, který zahrnuje namáhání vyvolané od tlaků plynů a setrvačnými silami. Mezi další zatěžující účinky patří např. vrubové účinky, které vyvolávají koncentraci napětí, nebo tepelný tok průřezy pístu. Nelze je přímo zahrnout do výpočtu. Z praktického hlediska postačuje kontrolní výpočet.

### 3.4.1 Pevnostní výpočet dna pístu

Dno pístu je kontrolováno na ohyb. Při výpočtu uvažujeme spojitě zatíženou kruhovou desku na obvodě podepřenou nebo vetknutou. Vliv setrvačných sil zanedbáváme.



Obr. 17 Zatížení dna pístu [1]



Obr. 18 Indikátorový diagram

Hodnota maximálního tlaku plynů ve válci motoru je určena z indikátorového diagramu (viz obr. 17).

#### Maximální síla od tlaků plynů

$$F'_{p\max} = \pi \cdot r^2 \cdot p_{\max} \quad (19)$$

$$F'_{p\max} = \pi \cdot 0,026^2 \cdot 4,802 \cdot 10^6$$

$$F'_{p\max} = 10198,08N$$

### Maximální ohybový moment

$$M_{o\max} = \frac{r^3}{3} \cdot p_{\max} \quad (20)$$

$$M_{o\max} = \frac{0,026^3}{3} \cdot 4,802 \cdot 10^6$$

$$M_{o\max} = 28,13 Nm$$

### Moment odporu v ohybu

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot r \cdot \delta^2 \quad (21)$$

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot 0,026 \cdot 0,006^2$$

$$W_o = 0,312 \cdot 10^{-6} m^3$$

### Maximální ohybové napětí

$$\sigma'_{o\max} = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{r^3}{3} \cdot p_{\max} \cdot \frac{3}{r \cdot \delta^2} = p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \quad (22)$$

$$\sigma'_{o\max} = 4,802 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,026}{0,006}\right)^2$$

$$\sigma'_{o\max} = 90,17 \cdot 10^6 Pa$$

Dna pístů zážehových motorů lze považovat za desku vetknutou. Potom je maximální ohybové napětí:

$$\sigma_{o\max} = 0,25 \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \quad (23)$$

$$\sigma_{o\max} = 0,25 \cdot 4,802 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,026}{0,006}\right)^2$$

$$\sigma_{o\max} = 22,54 \cdot 10^6 Pa$$

Dovolené hodnoty napětí pro písty z hliníkové slitiny bez žeber se pohybují v mezích od 20 do 25 MPa. Vypočtená hodnota se pohybuje v přijatelných mezích a vyhovuje.

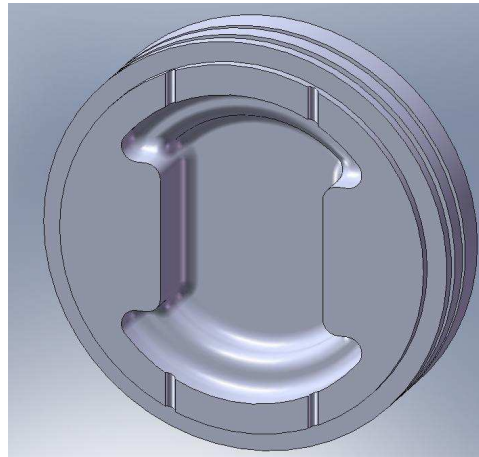
### 3.4.2 Nejslabší místo pláště pístu

Ve většině případů bývá v drážce pro stírací kroužek. Zde je stěna pístu zeslabena samotnou drážkou a zároveň i otvory pro odvod oleje do klikové skříně.

#### Namáhání tlakem

$$\sigma_{tl \max} = \frac{F_{p \max}}{S_x} \quad (24)$$

- kde  $S_x$  je minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací kroužek. Tato hodnota je vypočtena pomocí programu SolidWorks 2007 -  $S_x = 1228,64 \text{ mm}^2$ .



*Obr. 19 Průřez pístu v drážce pro stírací kroužek*

- **Maximální síla od tlaků plynů**

$$F_{p \max} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_{\max} \quad (25)$$

$$F_{p \max} = \frac{\pi \cdot 0,082^2}{4} \cdot 4,802 \cdot 10^6$$

$$F_{p \max} = 25359,5 \text{ N}$$

Dosazením  $S_x$  a  $F_{pmax}$  do rovnice (24) dostaneme výslednou hodnotu napětí.

$$\sigma_{tl\ max} = \frac{25359,5}{1228,63}$$

$$\sigma_{tl\ max} = 20,64\text{MPa}$$

Dovolené hodnoty napětí pro písty z hliníkové slitiny se pohybují v mezích od 30 do 40 MPa.

### Namáhání tahem

$$\sigma_t = \frac{F_{sp,x}}{S_x} \quad (26)$$

#### ▪ Setrvačná síla

$$F_{sp,x} = m_x \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 + \lambda_0) \quad (27)$$

kde:

- $m_x$  je hmotnost koruny pístu nad řezem x-x. Tato hodnota je vypočtena pomocí programu SolidWorks 2007 -  $m_x = 0,170\text{kg}$ .
- $\omega_{max}$  maximální úhlová rychlost otáček motoru

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} \quad (28)$$

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot 5700}{30}$$

$$\omega_{max} = 597\text{s}^{-1}$$

- $\lambda_0$  ojnicní poměr. U současných motorů se pohybuje v intervalu 0,2 až 0,3. Voleno  $\lambda_0 = 0,2$

Po dosazení do rovnice (27) dostáváme:

$$F_{sp,x} = 0,170 \cdot 0,0525 \cdot 597^2 \cdot (1 + 0,2)$$

$$F_{sp,x} = 3817,14\text{N}$$

Dosažením  $S_x$  a  $F_{sp,x}$  do rovnice (26) dostaneme výslednou hodnotu napětí v tahu.

$$\sigma_t = \frac{3817,14}{1228,64}$$

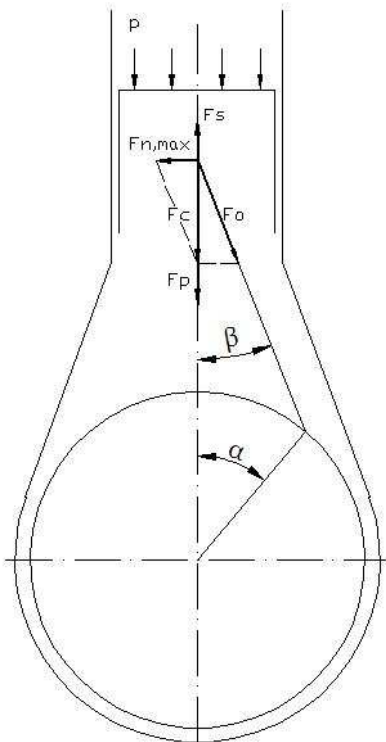
$$\sigma_t = 3,1 \text{ MPa}$$

Dovolená hodnota napětí pro hliníkové slitiny je 4 až 10 MPa.

### 3.4.3 Měrný tlak na plášti pístu

Tento tlak je vyvolán normálovou silou, kterou píst působí na stěnu válce.

$$p_{pl} = \frac{F_{n \max}}{D_{pl} \cdot L_{pl}} \quad (29)$$



**Obr. 20** Síly působící v  
 klikovém mechanismu

#### Výpočet výsledné síly $F_c$

$$F_c = F_p + F_s \quad (30)$$

- Síla od tlaků plynů působící na píst ve vertikálním směru  $F_p$

$$F_p = (p_{\max} - p_{atm}) \cdot S_p \quad (31)$$

$$F_p = (4,802 \cdot 10^6 - 101325) \cdot \frac{\pi \cdot 0,082^2}{4}$$

$$F_p = 24824,35 \text{ N}$$

- Síla setrvačná působící na píst ve vertikálním směru  $F_s$

$$F_s = -(m_p \cdot r_k \cdot \omega_{\max}^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda_o \cdot \cos 2\alpha)) \quad (32)$$

kde:

- $m_p$  je hmotnost pístu. Tato hodnota je vypočtena pomocí programu SolidWorks 2007 -  $m_p = 0,44 \text{ kg}$ . Při výpočtu by se správně měla uvažovat

hmotnost celé pístní skupiny a části ojnice. Z důvodu složitosti výpočtu postup neuvádím.

- $\alpha$  je úhel při kterém je síla  $F_c$  maximální.  $F_{c,max}$  působí přibližně v tom samém okamžiku kdy je vyvolaný  $p_{max}$ . Nejvyššího tlaku je dosahováno při natočení klikového hřídele o  $378^\circ$  oproti základní poloze. Úhel  $\alpha$  je tedy  $18^\circ$ .

$$F_s = -(0,44 \cdot 0,0525 \cdot 597^2 \cdot (\cos 18^\circ + 0,2 \cdot \cos 2 \cdot 18^\circ))$$

$$F_s = -9162,23N$$

Po dosazení do rovnice (30) je pak celková síla  $F_c$ :

$$F_c = 24824,35 + (-9162,23)$$

$$F_c = 15662,12N$$

### Úhel mezi osou pístu a ojnice

$$\beta = a \sin(\lambda_o \cdot \sin \alpha) \quad (33)$$

$$\beta = \arcsin(\lambda_o \cdot \sin 18^\circ)$$

$$\beta = 3,54^\circ$$

### Maximální normálová síla

$$F_{nmax} = F_c \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (34)$$

$$F_{nmax} = 15662,12 \cdot \operatorname{tg} 3,54^\circ$$

$$F_{nmax} = 968,9N$$

Dosazením do rovnice (29) dostáváme:

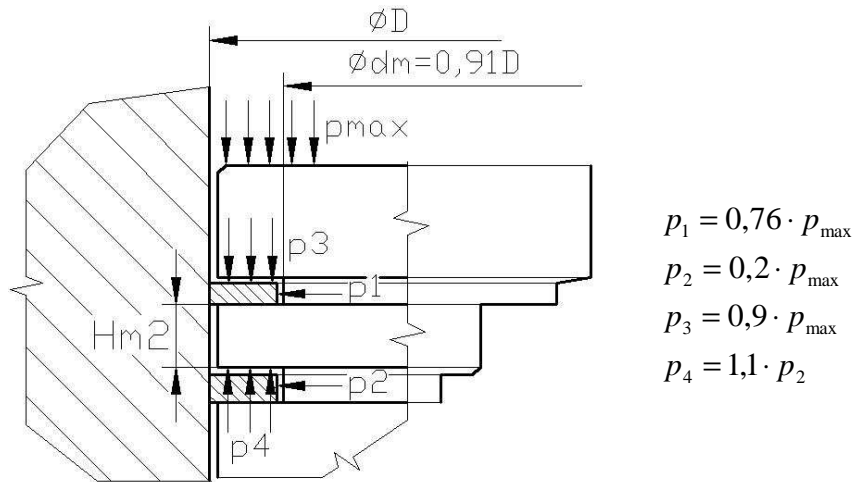
$$p_{pl} = \frac{968,9}{0,082 \cdot 0,056}$$

$$p_{pl} = 0,21 \cdot 10^6 Pa \quad \rightarrow \quad p_{pl} = 0,21MPa$$

Nejvyšší doporučené hodnoty měrného tlaku jsou 0,6 až 1,4 MPa.

### 3.4.4 Můstek mezi prvním a druhým těsnícím kroužkem

Tento můstek je vystaven vysokému namáhání od tlaků plynů ve spalovacím prostoru a současně působení vysokých teplot.



Obr. 21 Rozložení tlaků v mezikroužkových objemech [1]

$$p_1 = 0,76 \cdot p_{\max}$$

$$p_2 = 0,2 \cdot p_{\max}$$

$$p_3 = 0,9 \cdot p_{\max}$$

$$p_4 = 1,1 \cdot p_2$$

#### Síla namáhající můstek jako vetknutý nosník na ohyb a střih

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_m^2) \cdot (0,9 \cdot p_{\max} - 0,22 \cdot p_{\max}) \quad (35)$$

$$F_m = \frac{\pi}{4} (0,082^2 - (0,91 \cdot 0,082)^2) \cdot (0,9 \cdot 4,802 \cdot 10^6 - 0,22 \cdot 4,802 \cdot 10^6)$$

$$F_m = 2964,32N$$

#### Ohybové napětí

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (36)$$

##### ▪ Ohybový moment

$$M_o = F_m \cdot \frac{D - d_m}{4} \quad (37)$$

$$M_o = 2964,32 \cdot \frac{0,082 - (0,91 \cdot 0,082)}{4}$$

$$M_o = 5,47Nm$$

- **Modul odporu v ohybu**

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_m \cdot H_{m2}^2 \quad (38)$$

$$W_o = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot (0,91 \cdot 0,082) \cdot 0,004^2$$

$$W_o = 0,625 \cdot 10^{-6} m^3$$

Dosazením  $M_o$  a  $W_o$  do rovnice (36) dostaneme hodnotu ohybového napětí.

$$\sigma_o = \frac{5,47}{0,625 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_o = 8,752 \cdot 10^6 Pa$$

### Smykové napětí

$$\tau = \frac{F_m}{S} \quad (39)$$

- **Průřez v místě vetknutí**

$$S = \pi \cdot d_m \cdot H_{m2} \quad (40)$$

$$S = \pi(0,91 \cdot 0,082) \cdot 0,004$$

$$S = 0,94 \cdot 10^{-3} m^2$$

Dosazením  $S$  a  $F_m$  do rovnice (39) dostávám hodnotu smykového napětí.

$$\tau = \frac{2964,32}{0,94 \cdot 10^{-3}}$$

$$\tau = 3,15 \cdot 10^6 Pa$$

**Redukované napětí**

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (41)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{(8,752 \cdot 10^6)^2 + 3 \cdot (3,15 \cdot 10^6)^2}$$

$$\sigma_{red} = 10,31 \cdot 10^6 Pa$$

Při uvažování poklesu pevnosti hliníkových slitin s nárůstem teploty a zohledněním vrubových účinků, nemá hodnota redukovaného napětí přesáhnout (60÷80)MPa.

## 4 Závěr

Na základě zadaného jmenovitého výkonu a otáček motoru, byl proveden návrh základních rozměrů motoru a klikového mechanismu. Tyto parametry určují základní zástavbové rozměry motoru.

Dle empirických vzorců byl realizován návrh hlavních rozměrů pístu, které jsou vyjádřeny ve vztahu k vrtání válce. Konstrukční řešení je jedno z nejjednodušších co se v praxi používá a není náročné na výrobu. Dno pístu není žádným způsobem tvarované. Drážky pro těsnicí kroužky jsou dvě, jak je zvykem u většiny dnešních pístů. Pro stírací pak jedna drážka, která je výrazně větší kvůli otvorům pro odvod oleje do klikové skříně. Uložení pístního čepu je voleno tzv. plovoucí.

Pevnostně kontrolováno je dno pístu a to na ohyb. Dále pak nejslabší místo pláště pístu, které je v drážce pro stírací kroužek. Další kontrola je prováděna na tlakové namáhání pláště pístu, které je vyvoláno normálovou silou, kterou píst působí na stěnu válce. Tato síla je určována z kinematiky klikového mechanismu. Ovšem samotná problematika kinematiky klikového mechanismu je velmi složitá a není předmětem řešení této práce, proto zde není příliš detailně popsána. Můstek mezi prvním a druhým těsnicím kroužkem je vystaven velmi vysokým teplotám a namáhán od tlaků plynů. Je kontrolován jako vetknutý nosník. U všech výpočtů nebyly překročeny maximální dovolené hodnoty.

Úkoly obsažené v zadání práce byly splněny. Uvedený postup je jednou z možností při řešení pevnostní kontroly pístu. Není zde však zahrnuté působení teploty které do značné míry ovlivňuje mechanické vlastnosti. Pro navržený píst by bylo za potřebí dalších zkoušek.

**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] Čumpelík, J. : Praktická dílna - Spalovací motory II, AutoEXPERT, 2005
- [5] <http://mtw.fordclubs.org/article.php?article=3&rubrik=4>
- [6] [http://www.motorpal.cz/index.php?id=produkty\\_autodily&num=pistcep](http://www.motorpal.cz/index.php?id=produkty_autodily&num=pistcep)
- [7] [http://www.iae.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove\\_motory/prednasky\\_pist.html](http://www.iae.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove_motory/prednasky_pist.html)

**Použité symboly**

|                 |                       |   |
|-----------------|-----------------------|---|
| $c_s$           | [m.s <sup>-1</sup> ]  | kontrola střední pístové rychlosti                        |
| $D$             | [mm]                  | velikost vrtání válce                                     |
| $D_{\check{c}}$ | [mm]                  | průměr pístního čepu                                      |
| $D_r$           | [mm]                  | vnější průměr kroužku v zamontovaném stavu                |
| $d_N$           | [mm]                  | průměr drážky pro pístní kroužky                          |
| $d_R$           | [mm]                  | vnitřní průměr kroužku v zamontovaném                     |
| $F_c$           | [N]                   | výsledná síla působící na píst ve vertikálním směru       |
| $F_m$           | [N]                   | síla namáhající můstek jako vetknutý nosník               |
| $F_{n,max}$     | [N]                   | maximální normálová síla                                  |
| $F_p$           | [N]                   | síla od tlaků plynů působící na píst ve vertikálním směru |
| $F_{p,max}$     | [N]                   | maximální síla od tlaků plynů                             |
| $F_S$           | [N]                   | síla setrvačná působící na píst ve vertikálním směru      |
| $F_{sp,x}$      | [N]                   | setrvačná síla  |
| $H_{\check{c}}$ | [mm]                  | délka pístního čepu                                       |
| $H_k$           | [mm]                  | kompresní výška pístu                                     |
| $H_{m1}$        | [mm]                  | výška prvního můstku                                      |
| $H_{m2}$        | [mm]                  | výška druhého můstku                                      |
| $H_o$           | [mm]                  | vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep                    |
| $H_P$           | [mm]                  | výška pístu   |
| $i$             | [-]                   | počet válců motoru  |
| $k$             | [-]                   | zdvihový poměr  |
| $L_{oj}$        | [mm]                  | délka ojnice  |
| $M_o$           | [Pa]                  | ohybový moment  |
| $M_{o,max}$     | [Nm]                  | maximální ohybový moment                                  |
| $m_p$           | [kg]                  | hmotnost pístu  |
| $m_x$           | [mx]                  | hmotnost koruny pístu nad řezem vyšetřovaného průřezu     |
| $n$             | [min <sup>-1</sup> ]  | jmenovité otáčky motoru                                   |
| $P_e$           | [W]                   | výkon motoru  |
| $P_l$           | [kW.l <sup>-1</sup> ] | objemový „litrový“ výkon motoru                           |
| $p_{atm}$       | [Pa]                  | atmosférický tlak   |
| $p_{max}$       | [Pa]                  | maximální tlak plynů ve válci motoru                      |
| $p_{pl}$        | [Pa]                  | měrný tlak na plášti pístu                                |
| $r$             | [mm]                  | poloměr vetknutí desky                                    |
| $r_k$           | [mm]                  | poloměr klikového hřídele                                 |
| $S$             | [mm <sup>2</sup> ]    | průřez v místě vetknutí                                   |
| $S_p$           | [mm]                  | radiální vůle pístního kroužku                            |

|                   |                    |  |
|-------------------|--------------------|--|
| $S_x$             | [mm <sup>2</sup> ] | minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací kroužek |
| $V_Z$             | [m <sup>3</sup> ]  | zdvihový objem jednoho válce motoru                        |
| $W_o$             | [m <sup>3</sup> ]  | moment odporu v ohybu                                      |
| $Z$               | [mm]               | zdvih pístu  |
| $\alpha$          | [°]                | úhel natočení klikového hřídele                            |
| $\beta$           | [°]                | úhel mezi osou pístu a ojnice                              |
| $\delta$          | [mm]               | šířka dna pístu  |
| $\lambda_o$       | [-]                | ojniční poměr  |
| $\pi$             | [-]                | Ludolfovo číslo  |
| $\sigma_o$        | [Pa]               | ohybové napětí   |
| $\sigma_{o,max}$  | [Pa]               | maximální ohybové napětí                                   |
| $\sigma_{red}$    | [Pa]               | redukované napětí  |
| $\sigma_t$        | [Pa]               | tahové napětí ve vyšetřovaném průřezu                      |
| $\sigma_{tl,max}$ | [Pa]               | namáhání vyvolané tlakem plynů                             |
| $\tau$            | [-]                | taktnost motoru  |
| $\tau$            | [Pa]               | smykové napětí   |
| $\omega_{max}$    | [s <sup>-1</sup> ] | maximální úhlová rychlost otáček motoru                    |

**Seznam příloh**

Výkresová dokumentace:

Výrobní výkres pístu

CD:

Technická zpráva

Výkres

Metadata