

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh základních parametrů pístového spalovacího motoru s přímočarým vratným pohybem pístu

Tomáš Světlík

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Světlík**
Osobní číslo: **D08284**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Návrh základních parametrů pístového spalovacího motoru s přímočarým vratným pohybem pístu**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Materiály ve stavbě spalovacích motorů
3. Výpočet základních parametrů pístového spalovacího motoru
4. Návrh programu pro výpočet hlavních částí motoru
5. Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

GSCHEIDLE, Rolf, et al. Příručka pro automechanika. 2. upravené vydání. Praha : Sobotáles, 2002. 640 s. ISBN 80-85920-83-2.

VLK, František. Vozidlové spalovací motory. 1. vydání. Brno : Prof. Ing. František Vlk, DrSc. nakladatelství a vydavatelství, 2003. 579 s. ISBN 80-238-8756-4.

JAN, Zdeněk; ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily : Motory (3). 5. vydání. Brno : Nakladatelství Avid, spol. s r. o., 2008. 179 s.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Jilek, DiS.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **24. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2012**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. února 2012

Prohlášení

Tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci použil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na mou práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 30. 5. 2014

.....

Tomáš Světlík

Anotace

Cílem této práce je vytvořit přehled nejčastěji používaných materiálů pro výrobu hlavních částí pístového spalovacího motoru, vytvořit konstrukční návrh jednotlivých částí a vybrané součásti podrobit pevnostním výpočtům. Dalším cílem je vypracování programu na výpočet těchto součástí, vytvoření 3D modelu a 2D výkresové dokumentace.

Klíčová slova

Materiály ve stavbě spalovacích motorů, pístní skupina, píst, pístní kroužky, pístní čep, ojnice, kliková hřídel.

Title

Constructional proposal of piston combustion engine with linear reciprocating piston.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to create a list of the most commonly used materials for the production of major parts of the crank mechanism, to create the design of individual parts and components selected to undergo stress analysis. Another aim is to create a program which calculates these components, 3D models and 2D drawings.

Keywords

Materials in construction of combustion engines, piston group, piston, piston rings, piston pin, piston-rod, crankshaft

Obsah

1. Úvod.....	8
1.1. Cíl práce a metodika.....	8
2. Materiály ve stavbě spalovacích motorů.....	9
2.1. Ocel.....	9
2.2. Ocelolitinové odlitky.....	10
2.3. Litina.....	10
2.4. Hliníkové slitiny.....	11
2.4.1. Písty z hliníkových slitin.....	11
2.5. Hořčíkové slitiny.....	12
2.6. Slitiny mědi.....	12
2.7. Prášková metalurgie – slinuté materiály.....	12
3. Hlavní části spalovacího motoru.....	12
3.1. Pístní skupina.....	12
3.1.1. Píst.....	13
3.1.1.1. Tepelné namáhání pístu.....	14
3.1.1.2. Druhy pístů.....	16
3.1.1.3. Chlazení pístu.....	17
3.1.1.4. Materiály pístu.....	18
3.1.2. Pístní kroužky.....	19
3.1.2.1. Těsnící pístní kroužky.....	21
3.1.2.2. Stírací pístní kroužky.....	22
3.1.2.3. Materiály pístních kroužků.....	23
3.1.3. Pístní čep.....	23
3.1.3.1. Materiály pístních čepů.....	25
3.2. Ojnice.....	25
3.2.1. Materiál ojnic.....	28
3.3. Kliková hřídel.....	28
3.3.1. Hlavní části klikové hřídele.....	29
3.3.2. Ložiska klikové hřídele.....	30
3.3.3. Materiály klikových hřídelí.....	31
4. Návrh vybraných motorových částí.....	32
4.1. Volené hodnoty.....	32

4.2.	Výpočet základních parametrů motoru.....	33
4.3.	Návrh hlavních rozměrů pístu	35
4.3.1.	Návrh drážek pístních kroužků.....	38
4.3.1.1.	Radiální vůle pístního kroužku	38
4.3.1.2.	Axiální vůle pístního kroužku.....	39
4.3.2.	Pevnostní výpočet pístu.....	39
4.3.2.1.	Pevnostní výpočet dna pístu.....	39
4.3.2.2.	Nejslabší místo pláště pístu.....	42
4.4.	Návrh hlavních rozměrů ojnice	45
4.4.1.	Pevnostní výpočet oka ojnice	48
4.4.1.1.	Měrný tlak mezi pouzdrem a okem ojnice.....	48
4.4.1.2.	Namáhání oka ojnice setrvačnou silou.....	50
4.4.1.3.	Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů.....	53
4.4.1.4.	Únavové namáhání cyklu ojnice	55
4.5.	Návrh hlavních rozměrů klikové hřídele	56
4.5.1.	Kinematika klikového mechanismu	58
4.5.1.1.	Dráha pístu	58
4.5.1.2.	Rychlost pístu.....	59
4.5.1.3.	Zrychlení pístu	60
5.	Závěr	61
6.	Použité zdroje.....	62
7.	Seznam použitých symbolů.....	63
8.	Přílohy	66

1. Úvod

Automobil je v dnešní době běžným a nejčastěji používaným dopravním prostředkem na celém světě. V srdci každého automobilu se skrývá jeho nejpodstatnější část, a tou je spalovací motor.

Spalovací motor funguje na principu převodu tepelné energie na mechanickou práci. Tato energie vzniká díky spalování vhodných pracovních látek ve spalovacím prostoru motoru. Princip činnosti spalovacího motoru tvoří jeho pracovní cyklus. Zde se motory dělí na dva základní typy, a to na dvoudobé a čtyřdobé. Oba typy motorů mění tepelnou energii na pohybovou energii pístu, který koná přímočarý pohyb a pomocí ojnice je spojen s klikovým mechanismem motoru, jenž tento pohyb převádí na pohyb rotační.

1.1. Cíl práce a metodika

Cílem této bakalářské práce je provést konstrukční návrh základních rozměrů motoru a také podat informaci o základních a nejčastěji používaných materiálech při konstrukci hlavních motorových částí spalovacího motoru. Dále jsou zde popsány hlavní díly klikového mechanismu a je proveden podrobnější pevnostní výpočet vybraných částí klikového mechanismu motoru. Pro veškeré provedené výpočty je následně vytvořen program na jejich automatický výpočet a pro lepší přehled a ilustraci bude vytvořen 3D model a 2D výkresová dokumentace.

Metodika práce se opírá o prostudování odborné literatury. Práce obsahuje vlastní výpočty pomocí předem známých a již z praxe osvědčených vzorců a zpracování 3D a 2D modelu, který rovněž poslouží k některým výpočtům.

2. Materiály ve stavbě spalovacích motorů

Spalovací motor se skládá z několika součástí. Každá součást vykonává specifickou funkci, a proto má každá součást odlišné požadavky na výrobní materiál. Tyto materiály se neustále prověřují a doplňují - vycházejí z empirických zkušeností. Proto by konstruktér měl znát základní vlastnosti materiálu, kterými jsou:

- vlastnosti při působení vnějších sil, a to i při působení zvýšené teploty
- kluznou schopnost materiálu
- vodivost tepla
- hmotnost
- vzájemné vztahy mezi těmito vlastnostmi

Dále by měl být obeznámen s vlivy, které na danou součást působí v provozních podmínkách motoru, např. zatížení, teploty a jejich změny, koroze, opotřebovávání, tření, požadavky na spolehlivost a životnost, požadavky na vyrobitelnost, údržbu, náklady, zaujatý prostor, hmotnost apod.

2.1. Ocel

Ocel je slitina železa s uhlíkem (do 2,14 %) ¹ a několika dalšími prvky, které se do oceli dostanou při výrobě. Je poměrně levná a patří mezi nejpoužívanější kovové materiály vůbec. Podle tepelného a mechanického zpracování lze dosáhnout několika různých vlastností oceli a přizpůsobit tak ocel pro použití u dané součásti. Rozděluje se do několika tříd a při konstrukci motorů nacházejí uplatnění všechny oceli třídy 11-17.

Oceli je možno rozdělit do třech základních skupin:

- nelegované oceli – jejich vlastnosti jsou dány především obsahem uhlíku
- nízkolegované oceli – obsah legovacích prvků je do 5 %. Vlastnosti jsou podobné ocelím nelegovaným, ovšem jsou vhodnější pro tepelné zpracování, kterým se dosahuje změn mechanických vlastností. Čím více uhlíku, tím větší dosahuje ocel pevnosti.
- vysoce legované oceli – obsah legujících prvků přesahuje 5 %. Vhodnou kombinací legujících prvků se dosahuje potřebných mechanických, chemických a fyzikálních vlastností.

¹VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1

2.2. Ocelolitínové odlitky

Ocelolitínové odlitky jsou dražší než odlitky z litiny či hliníkové slitiny. Mez únavy ocelolitiny je blízká ocelových výkovků a používá se hlavně pro klikové hřídele. Vlastnosti ocelových odlitků závisí na tepelném zpracování. Vzhledem k technologii slévání jsou kladeny zvláštní požadavky na vlastnosti kovu – obvykle mají větší obsah uhlíku, křemíku a manganu.

2.3. Litina

Litina je slitina železa s uhlíkem, kterého musí být obsaženo více než 2,1 %². Litina dobře odolává tlakům a teplotám.

Litiny se rozdělují podle toho, v jaké formě se vyloučí grafit z železa při jejich výrobě. Vlastnosti litiny se určují podle velikost a struktury grafitu, to také určuje její křehkost a tvrdost. Základní druhy litiny:

- šedá litina – litina s lupínkovou strukturou grafitu. Obsah uhlíku se pohybuje v rozmezí 2,8 – 3,6 %³, mezi další prvky patří křemík, mangan, fosfor a síra. Uhlík se ve struktuře vyskytuje ve větší míře jako grafit a v menší míře jako cementit. Na strukturu má hlavní vliv rychlost ochlazování při tuhnutí a množství dalších přísad. Šedá litina se dělí podle obsahu uhlíku na podeutektickou, eutektickou a nadeutektickou. Má poměrně vysokou pevnost v tlaku, ale ostatní vlastnosti jsou nepříznivě ovlivněny tvarem grafitu, který působí jako vruby (velmi nepříznivě je ovlivněna zejména tažnost).
- tvárná litina – litina s kuličkovou strukturou grafitu. Obsah uhlíku, který je obsažen v litině od 3,2 do 4 %⁴ nejvíce doprovází křemík (1,8 – 3 %) a mangan (0,1 – 0,8 %). Tvárná litina je v závislosti na chemickém složení feritická až perlitická. Vyznačuje se dobrou pevností v tahu i mezi kluzu. Díky dobrým mechanickým vlastnostem, levné výrobě i dobré opracovatelnosti je tato litina v automobilovém průmyslu velice využívaná (40 - 50% světové

²VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1

³VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1

⁴VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1

výroby). Vyrábějí se z ní závěsy kol, části řízení, klikové hřídele, ojnice, vačkové hřídele, pístní kroužky atd.

- temperovaná litina – litina s vločkovým grafitem. Je to litina vytvořená tepelným zpracováním, tzv. temperancí. Svým složením se podobá šedé litině, ale je tvrdší. Tato litina je vhodná pro odlitky menších hmotností.
- bílá litina – zde se grafit nevylučuje, zůstává v litině vázaný na železo, čímž vzniká karbid železa. Bílá litina je velmi tvrdá, ale křehká a velmi špatně obrobitelná (pouze broušením).

2.4. Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny jsou druhým nejčastěji používaným materiálem v konstrukci spalovacích motorů. Hliník patří mezi nejvíce zastoupené prvky v zemské kůře. Je přibližně 3x lehčí než ocel ($\rho=2690 \text{ kg m}^{-3}$)⁵, mnohem lépe vede elektrický proud a má i větší vodivost tepla. Pokud slitina neobsahuje měď, je velice korozivzdorná. Naopak odolnost proti působení alkalických látek je malá. Hliník disponuje dostatečnou pevností při dobré tvárnosti, má velmi dobrou odolnost proti korozi a je lehce svařitelný v ochranné atmosféře. Naproti tomu má větší roztažnost teplem a je dražší. Je lehce obrobitelný a svůj význam si našel ve velké části dnešních výrobků. V automobilovém průmyslu nachází uplatnění při výrobě mnoha součástí.

2.4.1. Písty z hliníkových slitin

Motorové písty spalovacích motorů jsou v dnešní době nejčastěji vyráběny ze slitin hliníku. Množství a počet legujících prvků závisí na účelu použití pístu. Slitiny s vyšším obsahem křemíku mají dobré pevnostní a kluzné vlastnosti a jsou určeny pro písty kované. Tepelná roztažnost slitiny je závislá na množství křemíku, jež je v ní obsažené. Písty s obsahem do 13 % křemíku (minimálně 11 %) se používají v zážehových motorech. Písty s obsahem nad 13 % křemíku (maximálně 18 %) se používají ve vznětových motorech. V závislosti na motoru může být píst vyroben pouze ze slitiny hliníku nebo může být vyroben z více materiálů (např. hliníkový plášť a ocelové dno apod.).

⁵VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1

2.5. Hořčíkové slitiny

Jsou to nejčastěji slitiny hořčíku s hliníkem, mědí a manganem. Hořčík je přitom obsažen minimálně z 90 %. Souborně se tato slitina označuje jako elektron. Vyznačuje se nízkou hmotností, vysokou pevností a odolností proti korozi, proto je hojně využívána pro různá víka a převodové skříně zejména u leteckých motorů. Tyto slitiny se vyznačují dobrou slévatelností včetně tlakového lití.

2.6. Slitiny mědi

Slitiny mědi tvoří dvě hlavní skupiny, a to mosazi (slitina mědi se zinkem) a bronzy (slitina mědi s cínem, hliníkem nebo olovem). Ve výrobě spalovacích motorů jsou zastoupeny spíše bronzy, používají se jako pouzdra ložisek, popřípadě i pro ozubená kola.

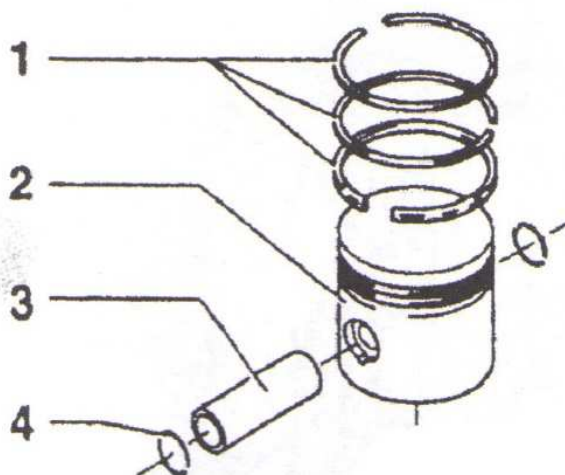
2.7. Prášková metalurgie – slinuté materiály

Součásti vyrobené pomocí této technologie se využívají stále více. Jedná se o mletý prášek z daného materiálu, který se vylisuje do žádoucího tvaru a poté v peci dochází ke slinování (spékání) vylisku. Touto technologií lze vyrobit slitiny, které jinou metodou vyrobit nelze (např. neslévatelné materiály měď-wolfram). Teplota přitom musí být nižší než teplota tavení jakékoliv složky v prášku obsažené. Částičky se spékají a tím se zvyšuje jejich soudržnost. Výsledné součásti dosahují velmi přesných tolerancí, proto už není potřeba dále je upravovat, případně jen ve velmi malém rozsahu. Pomocí této technologie se vyrábějí např. samomazná kluzná ložiska, vahadla, ventily, ojnice, čerpadla oleje a výjimečně i ozubená kola.

3. Hlavní části spalovacího motoru

3.1. Pístní skupina

Pístní skupina je tvořena pístem, pístními kroužky, pístním čepem a pojistkami pístního čepu.



1. Pístní kroužky
2. Píst
3. Pístní čep
4. Pojistka pístního čepu

Obr. 3.1 Pístní skupina⁶

Na pístní skupinu jsou kladeny následující požadavky:

- přenos síly od tlaku plynů na píst
- utěsnění spalovacího prostoru s klikovou skříní, aby z prostoru nad pístem nedocházelo k průniku spalín do klikové skříně a aby nedocházelo k průniku oleje do spalovacího prostoru
- přenos boční síly vyvolané klikovým mechanismem na stěnu válce
- odvod tepla z pístu do stěn válce

3.1.1. Píst

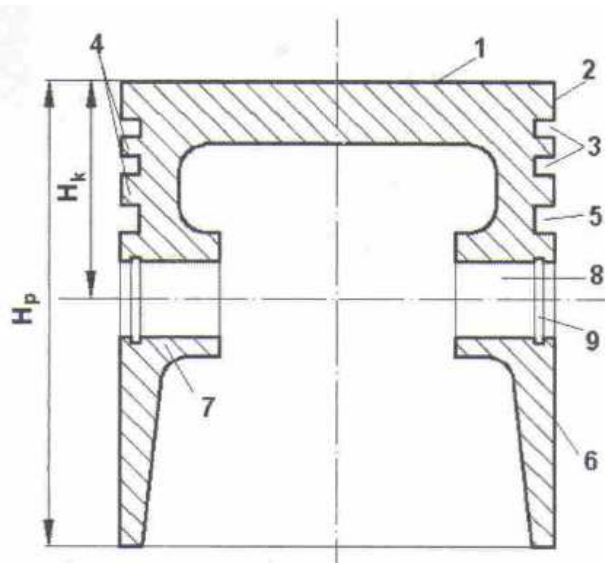
Hlavní účel pístu:

- zachycení tlaku plynů, který vzniká při spalování palivové směsi
- převedení síly tlaku na ojnici a dále na klikovou hřídel
- utěsnění spalovacího prostoru tak, aby spaliny neprošly do klikové skříně a aby mazací olej nepronikl do spalovacího prostoru
- převedení tepla ze dna pístu do stěny válce.

Píst je nedílnou součástí klikového mechanismu a je jednou z nejvíce zatěžovaných součástí motoru. Je namáhán rázově od tlaků rozpínaných plynů ve spalovacím prostoru motoru, setrvačnými silami od vlastního vratného pohybu

⁶VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

a vzhledem k periodickému opakování pracovních cyklů je materiál pístu namáhán také únavově. Tlaky ve spalovacím prostoru dosahují u zážehových motorů až 6 MPa⁷ a u vznětových motorů se horní hranice tlaků pohybuje kolem 8 MPa⁸ (u přeplňovaných motorů je to hodnota 12-14 MPa). Píst je také namáhán vysokými teplotami. U zážehových motorů teploty spalin dosahují až 2500 °C⁹, vznětové motory dosahují teplot spalin okolo 2200 °C¹⁰. Značné namáhání pístu způsobuje boční síla pístu působící na stěnu válce.



1. Dno pístu
 2. Horní můstek
 3. Drážky pro těsnící pístní kroužky
 4. Můstky mezi drážkami pro kroužky
 5. Drážka pro stírací pístní kroužek
 6. Plášť pístu
 7. Nálitek pro pístní čep
 8. Uložení pístního čepu
 9. Drážka pojistky pístního čepu
- H_p Výška pístu
 H_k Kompresní výška pístu

Obr. 3.2 Konstrukční provedení pístu¹¹

3.1.1.1. Tepelné namáhání pístu

Vzhledem k přímému kontaktu pístu se spalinami je nejvíce tepelně zatěžováno dno pístu, horní můstek pístu a jejich vzájemné přechodové hrany. Přestup tepla ze spalin do pístu závisí na velikosti plochy, s jakou se spaliny dostaví do styku. Proto je u motorů, které dosahují vysokých teplot spalovacího prostoru, snaha o zmenšení povrchu dna

⁷JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

⁸VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

⁹JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

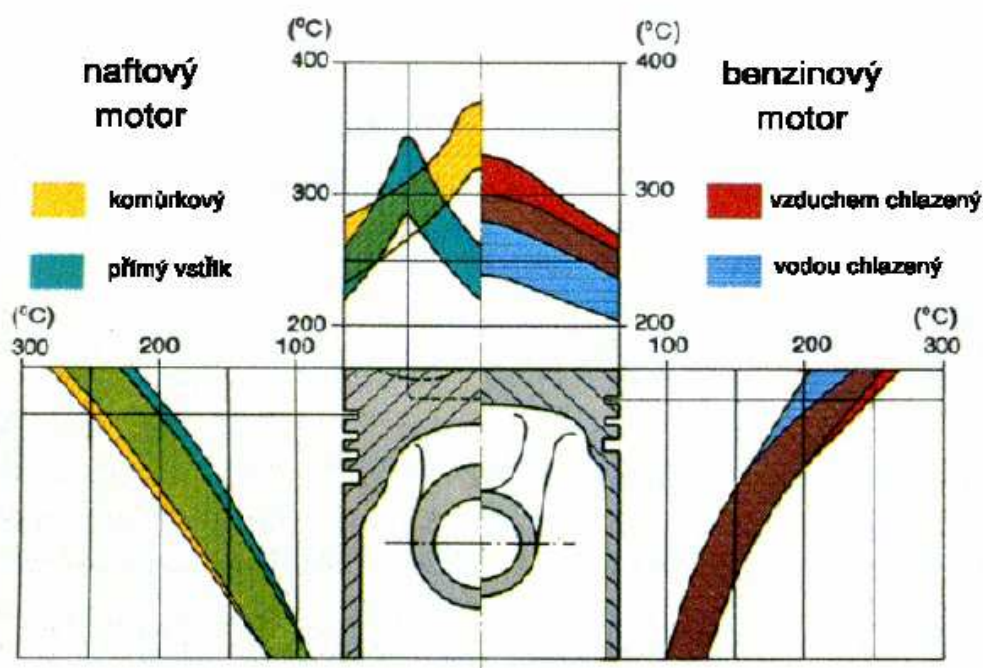
¹⁰VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

¹¹VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

pístu. Další teplo zatěžující píst je to, které vzniká třením mezi pístem a válcem a mezi pístními kroužky a válcem.

Odvod tepla z pístu je obstaráván pístními kroužky, můstky mezi kroužky a pláštěm pístu. U pístů nechlazených je odvod tepla obstaráván především přes těsnící kroužky (40 –60 %) ¹², dále přes plášť pístu (20–30 %) ¹³ a část tepla (cca 5–10 %) ¹⁴ je odvedeno pomocí vzduchu a olejové mlhy z vnitřního prostoru pístu do motorového oleje.

Písty zážehových motorů jsou zatěžovány méně než písty vznětových motorů, a to i přes to, že teplota spalování je u zážehových motorů větší. Je to způsobeno větší hustotou a turbulentností spalin, které mají vliv na přenos tepla do dna pístu. Písty vzduchem chlazených motorů dosahují nejen vyšších celkových teplot, ale i vyššího gradientu rozložení teploty v pístu. Rozložení teplot na dně a plášti pístu zážehového a vznětového můžeme vidět na obr 3.3.



Obr. 3.3 Rozložení teplot na pístu ¹⁵

¹²HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0

¹³HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0

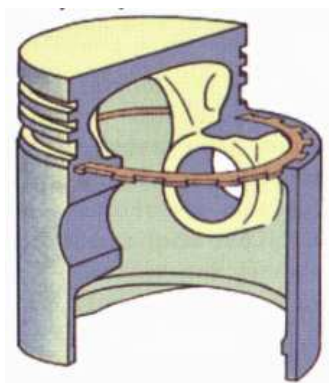
¹⁴HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0

¹⁵ JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

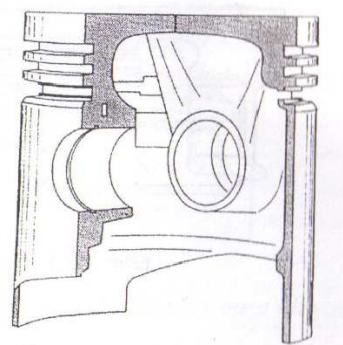
3.1.1.2. Druhy pístů

Vzhledem k vysokým teplotám ve spalovacím prostoru, které působí na píst, vzniká jeho dilatace. Proto je zapotřebí, aby vůle pístu za studena byla poměrně velká. Tím se zvyšuje hlučnost motoru za studena a zhoršuje se utěsnění spalovacího prostoru. Dno pístu a horní oblast pístu je vystavována vyšším teplotám než plášť pístu, proto je jeho konstrukce přizpůsobena těmto podmínkám – píst je tvaru oválného, nikoliv kruhovitého, a je kuželovitý nebo sudový, nikoliv válcový. Požadavek na dilataci materiálu pístu je takový, aby se úměrně roztahoval spolu s válcem. Toho lze dosáhnout několika druhy konstrukce pístu:

- píst s ocelovým kroužkem – do materiálu pístu je zalita ocelová vložka neděleného prstence (tloušťka 1,5 – 3 mm), která snižuje tepelnou roztažnost pístu (obr. 3.4)
- píst se segmentem – segment je vyroben z ocelového plechu a je zalit do vnitřní strany pláště pístu. Díky segmentu má píst větší hmotnost než píst s ocelovým kroužkem, ale také menší roztažnost a lepší rozměrovou stálost (obr. 3.5).
- píst s ocelovými pásky – píst obsahuje dva nebo čtyři pásky, které jsou zality v nálitku pro pístní čep a jejichž konce jsou zahnuty (obr. 3.6)
- píst s drážkou – u těchto typů pístu je vodorovná drážka, která omezuje prostupování tepla z koruny pístu do jeho pláště (obr. 3.7)



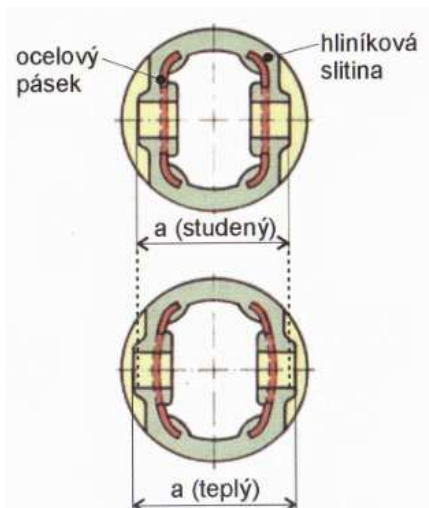
Obr. 3.4 Píst s ocelovým kroužkem¹⁶



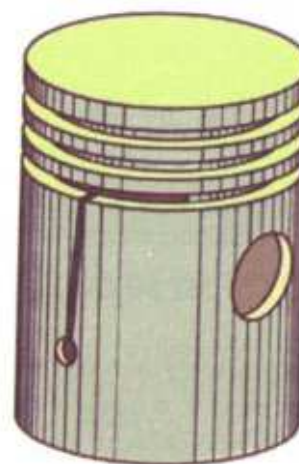
Obr. 3.5 Píst se segmentem¹⁷

¹⁶JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

¹⁷VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4



Obr. 3.6 Píst s ocelovými pásky¹⁸



Obr 3.7 Píst se štěrbinou¹⁹

3.1.1.3. Chlazení pístů

Důležitý faktor při zahřívání pístu je teplota v drážce pro první pístní kroužek. Tato teplota by se neměla dostat přes hodnotu, kdy dochází ke karbonizaci oleje, což je okolo 250 °C. Aby se zamezilo dosažení této teploty, bývají písty chlazeny nástřikem oleje na stěnu pístu, nebo je v pístu odlita chladicí drážka, která je přítokovým kanálkem plněna olejem.

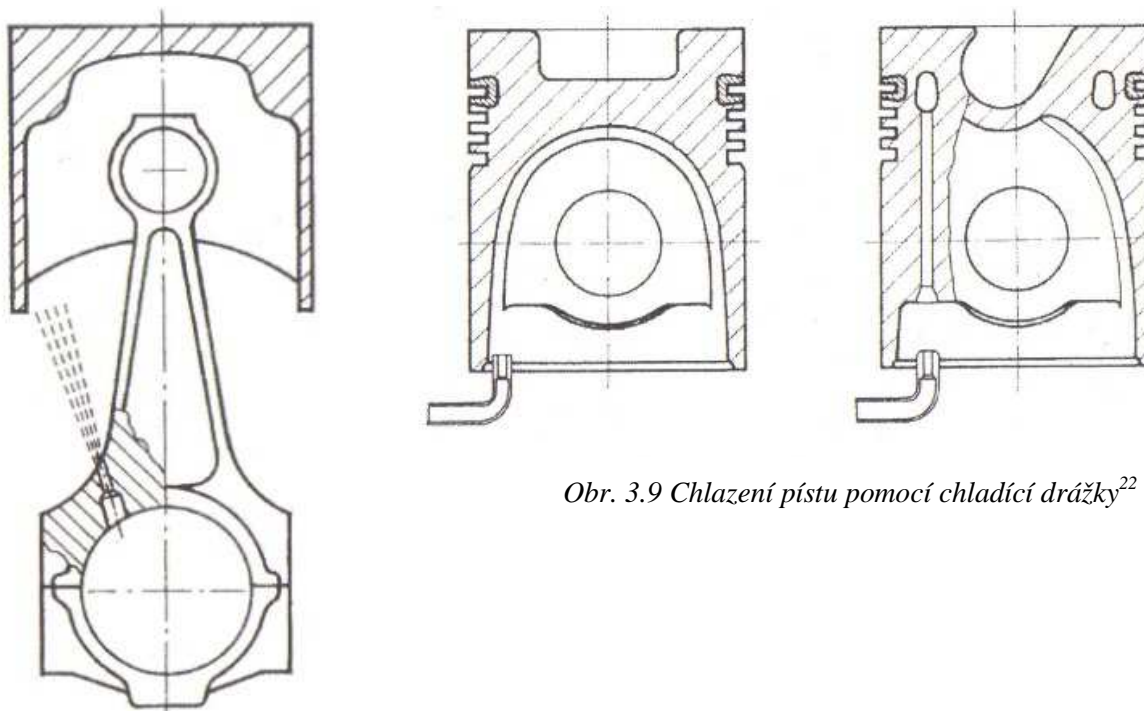
Nástřik oleje na stěnu a dno pístu se používá u méně zatížených motorů (obr. 3.8). Tento způsob provedení ochladí píst přibližně o 20 °C²⁰. U více zatěžovaných motorů se využívá druhý způsob chlazení. Do přítokového kanálku je pomocí pevné trysky v klikové skříní vstřikován olej a ten se díky pohybu pístu z horní do dolní úvratě a naopak dopravuje do chladicí drážky (obr. 3.9). Díky této metodě se píst ochladí až o 40 °C²¹.

¹⁸ JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

¹⁹ JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

²⁰ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

²¹ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4



Obr. 3.9 Chlazení pístu pomocí chladící drážky²²

Obr 3.8 Chlazení pístu nástřikem oleje na stěnu pístu²³

3.1.1.4. Materiál pístů

Vzhledem k tomu, že na píst působí proměnná mechanická a tepelná namáhání, jsou na materiál pístu kladeny následující požadavky:

- vysoká pevnost i za působení vysokých teplot
- dobrá tepelná vodivost
- tepelná roztažnost co nejbližší tepelné roztažnosti materiálu válce
- nízká měrná hmotnost vzhledem k co nejmenším setrvačným silám
- odolnost proti opotřebení
- malý součinitel tření

Písty užívané v dnešních spalovacích motorech se nejčastěji vyrábí ze slitin hliníku a křemíku. Výhodou pístů z tohoto materiálu je jeho nízká měrná hmotnost a přívětivá tepelná vodivost. Čím vyšší je v této slitině obsah křemíku, tím je nižší

²² VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

²³ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

tepelná roztažnost a opotřebení, ovšem zhoršuje se obrobitelnost a tím i výroba pístu. Vlastnosti slitin se vylepšují přidáním dalších prvků – pro dobrou slévateľnost se přidává mangan, kluznost ovlivní množství křemíku a hořčíku se využívá pro odolnost vůči korozi.

Písty čtyřdobých zážehových motorů se nejčastěji vyrábějí ze slitiny AlSi12 (složení: 10,5-13,5% Si, 0,9% Cu, 0,7% Fe, max. 0,55% Mn a ostatní)²⁴. Pro písty více tepelně namáhané, tj. pro písty motorů dvoudobých, vznětových a přeplňovaných, se používají materiály s větším obsahem křemíku, například slitiny AlSi18 (složení: 17 – 19% Si, 0,8-1,5% Cu, 0,8-1,3% Ni, 0,9-1,3% Mg, 0,5% Fe a další)²⁵, AlSi25 (složení: 22,5-27,5% Si, 1,2% Fe, 0,25% Cu a ostatní)²⁶.

Písty běžně namáhaných motorů se odlévají do kokil, kdežto písty vysoce namáhané se vyrábějí kováním do zápustek.

3.1.2. Pístní kroužky

Hlavní účel pístních kroužků:

- těsnění spalovacího prostoru
- odvádění tepla z pístu do stěny válce
- řízení výšky mazacího oleje mezi stěnou válce a pláštěm pístu

Pístní kroužky jsou pružné prstence, které jsou v jednom místě rozříznuté – toto místo se nazývá zámek pístního kroužku. U dnešních motorů se používají dva až tři těsnící a jeden až dva stírací pístní kroužky.

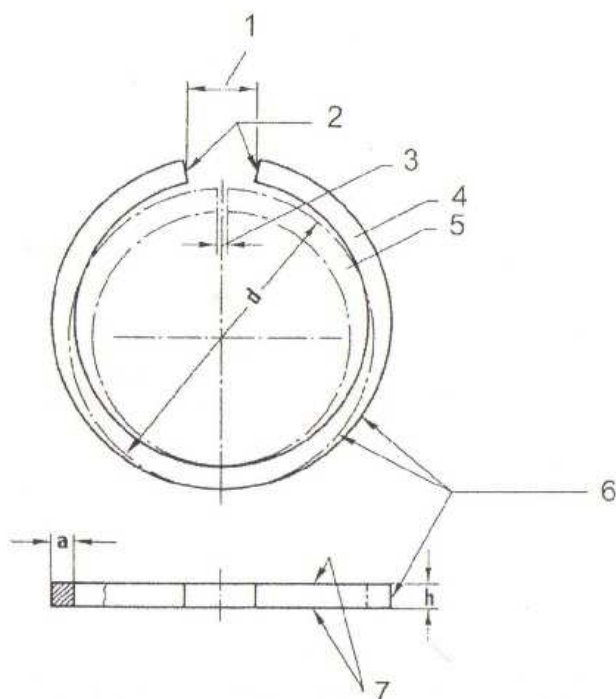
Rozměry pístních kroužků se určují z rozměru pístu. Mezi hlavní rozměry kroužku patří jeho výška, radiální šířka a vůle v zámku volného kroužku. Čím vyšší je kroužek, tím více odvede tepla z pístu do stěny válce, nižší kroužky ovšem disponují menší hmotností, tím i menšími setrvačnými silami a vyvíjejí menší tlak na boky drážek v pístu. Na radiální šířce pístního kroužku záleží, kolik tepla přijme z pístu. Dále je tento rozměr důležitý z hlediska přitlaku na stěnu válce – čím širší, tím lepší těsnící účinek,

²⁴Total Materia: Světově nejjobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

²⁵Total Materia: Světově nejjobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

²⁶Total Materia: Světově nejjobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

ovšem i větší vnitřní napětí v kroužku. Přítlak by měl být rovnoměrný po celém obvodu kroužku. Pístní kroužek je popsán na obr. 3.10.

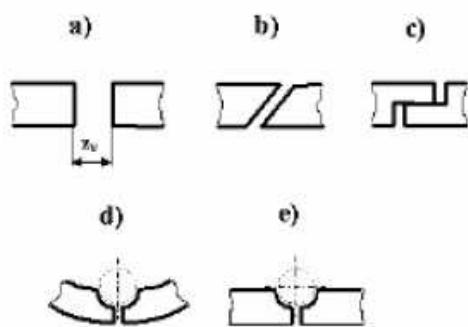


1. Rozevření
 2. Konce zámku
 3. Vůle zámku
 4. Volný pístní kroužek
 5. Stlačený pístní kroužek
 6. Pracovní plocha kroužku
 7. Boky pístního kroužku
- a- Tloušťka kroužku
d – Jmenovitý průměr kroužku
h – Výška kroužku

Obr. 3.10 Názvosloví a rozměry pístního kroužku²⁷

Rozříznutí pístního kroužku – zámek – se provádí nejčastěji rovný, dále šikmý nebo tvarový. Rovný zámek se používá u běžných motorů, šikmé a tvarové zámkové se používají u velkých motorů. Vůle v zámku má vliv na utěsnění spalovacího prostoru a na spotřebu oleje. Tato vůle je po vložení pístu s nasazeným pístním kroužkem velmi malá (0,05 – 0,3 mm) a měla by být konstruována tak, aby při maximálním zahřátí kroužku nedošlo k jejímu vymezení. Zámkové se na píst dávají vůči sobě o 180°, u dvoudobých motorů má zámek vybrání na zajišťovací kolík, aby nedošlo k jeho pootočení při provozu. Typy zámkových pístních kroužků jsou zobrazeny na obr. 3.11.

²⁷ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

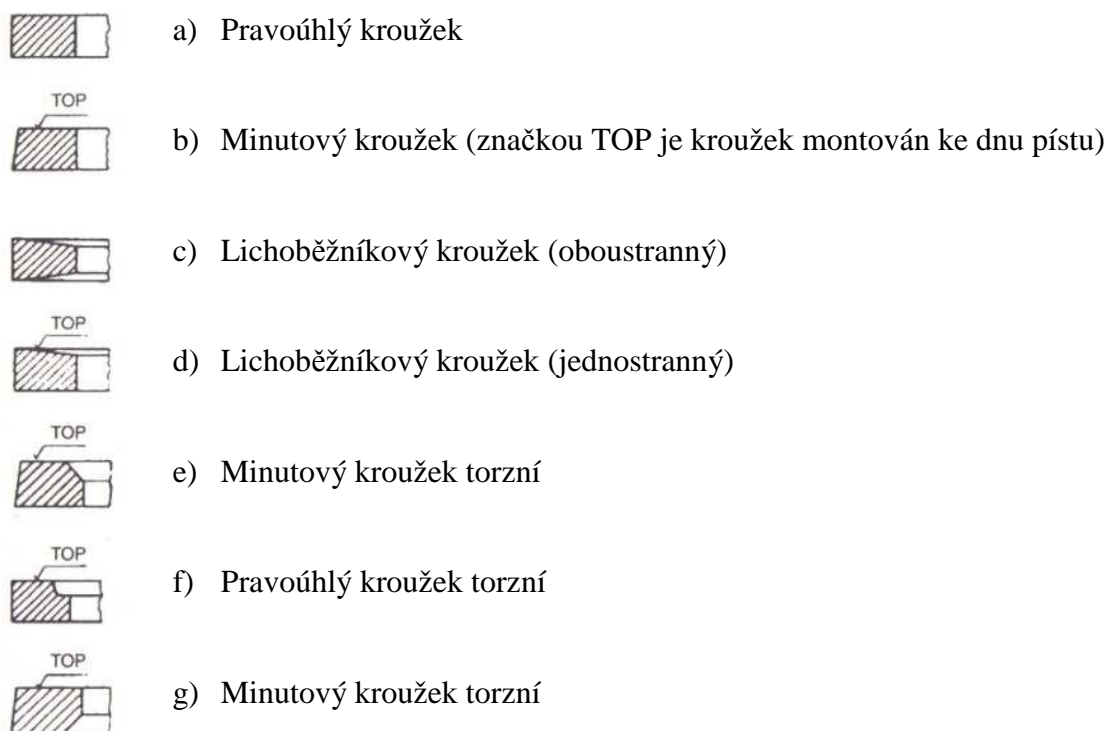


Obr. 3.11 Druhy zámků pístních kroužků²⁸

- a) Rovný zámek
- b) Šikmý zámek
- c) Tvarový zámek
- d-e) Zámky s vybráním zámku pro zajišťovací kolík dvoudobého motoru

3.1.2.1. Těsnící pístní kroužky

Tyto kroužky jsou situovány v horní části pístu a jejich hlavním účelem je utěsnit spalovací prostor tak, aby se spaliny nedostaly do klikové skříně. Dále v podstatné míře převádějí teplo z pístu do stěn válce. Těsnící kroužky jsou velice namáhány jak teplotně, tak mechanicky – působí na ně teplota spalovaných plynů, teplota pístu a polosuché tření ve styku kroužku se stěnou válce. Druhy těsnících kroužků jsou zobrazeny na obr. 3.12.



Obr. 3.12 Druhy těsnících pístních kroužků²⁹

²⁸ HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0

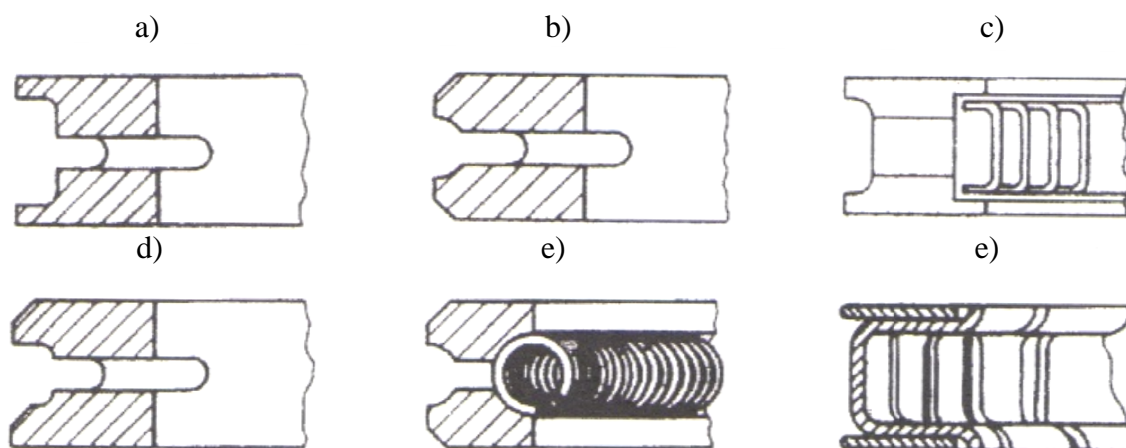
²⁹ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

3.1.2.2. Stírací pístní kroužky

Tyto pístní kroužky mají za úkol regulovat tloušťku olejové vrstvy na stěně válce a stírat přebytečný olej v takové míře, aby bylo zajištěno dostatečné mazání mezi pístem a stěnou válce. Díky této regulaci vrstvy oleje by mělo docházet k co nejmenší spotřebě oleje vzhledem k jeho spálení.

Podle konstrukčního provedení se stírací pístní kroužky dělí do třech skupin:

- litinové kroužky využívající pro přítlak na stěnu válce vlastní pružnost
- litinové nebo ocelové kroužky, které dosahují zvýšeného přítlaku pomocí pružiny
- skládané ocelové kroužky



Obr. 3.13 Druhy stíracích pístních kroužků³⁰

- Rozříznutý kroužek
- Střechovitě zkosený kroužek
- Rozříznutý kroužek s pružinou
- Souběžně zkosený kroužek
- Střechovitě zkosený kroužek se spirálovou pružinou
- Třídílný ocelový kroužek

Vyrábí se tři hlavní typy stíracích kroužků, a to kroužek s výřezy, kroužek s výřezy a pružinou a kroužek skládaný. Stírací kroužky musí mít poměrně vysoký

³⁰ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

přítlak, jelikož musí setřít přebytečný olej a propustit k těsnícím kroužkům pouze tolik oleje, kolik potřebují kvůli mazání kluzných ploch.

Stíraný olej je odváděn výřezy v kroužku do drážky pístu a dále postupuje do klikové skříně motoru.

3.1.2.3. Materiály pístních kroužků

Pístní kroužky se nejčastěji vyrábějí z šedé litiny, popřípadě zušlechtěné litiny odléváním, nebo obráběním z odstředivě litých pouzder. Nejmodernější metoda, kterou se kroužky vyrábějí, je výroba kroužků z práškové oceli. U nových automobilů se začínají rozšiřovat kroužky s titanovým pokovením. Boční dosedací plocha kroužků bývá broušena. U motorů, kde jsou větší pracovní namáhání kroužků, jsou kroužky vyrobeny z tvárné litiny nebo vysoce legované oceli. Fosfátováním, popřípadě pokovením třecí plochy se dosahuje snížení tření mezi kroužkem a stěnou válce a zlepšuje se záběh motoru. Pro zlepšení tepelné vodivosti kroužku se do materiálu přidává molybden.

První těsnící kroužek, na který působí největší namáhání, bývá po jeho obvodu tvrdě chromován. Tato úprava zvyšuje odolnost proti otěru kroužku a zvyšuje utěsnění. Další kroužky bývají upravovány fosforováním speciální litiny.

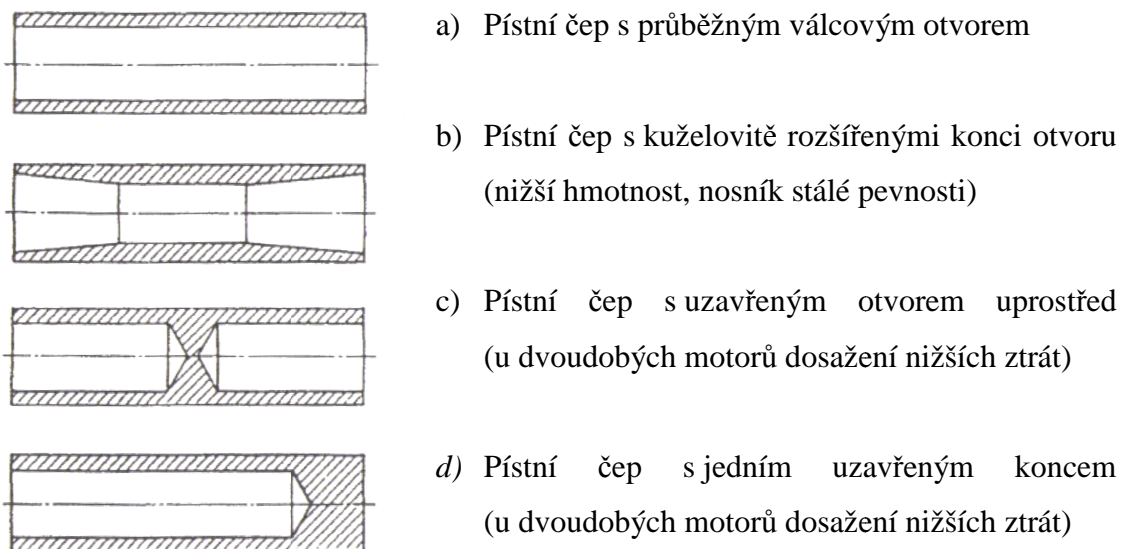
3.1.3. Pístní čep

Hlavní účel pístního čepu:

- přenos silových účinků mezi pístem a ojnicí

Pístní čep je spojujícím článkem pístu a ojnice a přenáší silové účinky mezi těmito součástmi. Vzhledem k tomu, že zatěžující síly od tlaku plynů, setrvačných hmotností pístu a pístních kroužků jsou směrově i velikostně proměnné, je pístní čep namáhán únavově. U rychloběžných motorů se namáhání pístního čepu blíží rázu.

Požadavky na pístní čep z funkčních hledisek jsou takové, aby měl co nejmenší hmotnost, dobrou odolnost vůči rázovému namáhání, pevnost, vysokou odolnost proti opotřebení a velkou tuhost. Konstruktivní řešení pístních čepů je zobrazeno na obr 3.14.



Obr. 3.14 Konstrukční tvary pístních čepů³¹

Pístní čep je uložen buď v pístu, nebo v oku ojnice.

V pístu je uložen s malou provozní vůlí. Montáž pístního čepu u tohoto uložení se provádí tak, že se pístní čep zasune do pístu ohřátého na teplotu na 60 °C až 120 °C³². Toto uložení se nazývá uložení plovoucí.

Při uložení v oku ojnice můžeme zvolit uložení s vůlí nebo pevné uložení. Při uložení s vůlí, tzv. plovoucí čep, se čep při provozu otáčí v ojnici i pístu a dochází k rovnoměrnému opotřebovávání a tím se zabraňuje vzniku ovality čepu. U pevného uložení je pístní čep v oku ojnice uložen s přesahem. Čep se montuje lisováním do ojnice zahřáté na 200 °C až 250 °C³³. Díky zvětšené teplotě ojnice se při lisování zabrání možné deformaci čepu či poškození oka ojnice.

Aby při volném uložení nedošlo k možnému axiálnímu pohybu a kontaktu pístního čepu se stěnou válce, je pístní čep proti tomuto pohybu v pístu zajištěn. Toto zajištění obstarávají pojistné kroužky – Seegerovy pojistky (u větších pístních čepů) nebo pojistné drátěné kroužky (u menších pístních čepů).

³¹ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

³² JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

³³ JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3

3.1.3.1. Materiály pístních čepů

Pístní čepy se vyrábějí z cementačních a nitridačních ocelí. Nitridační oceli se používají pro vysoké namáhání a požadovanou vysokou tvrdost povrchové vrstvy. Pro vznětové motory se používají oceli s přísadou chromu, manganu nebo niklu (např. 16MnCr5 (složení: 1-1,3% Mn, 0,8-1,1% Cr, 0,15-0,4% Si, 0,4% Cu a další)³⁴, 15CrNi6 (složení: 1,4-1,7% Ni, 1,4-1,7% Cr, 0,4-0,6% Mn, 0,15-0,4% Si, 0,12-0,17% C a další složky)³⁵. U vysoce namáhaných motorů se používají čepy z nitridačních ocelí (např. 34CrAl6, 32AlCrMo4)³⁶.

3.2. Ojnice

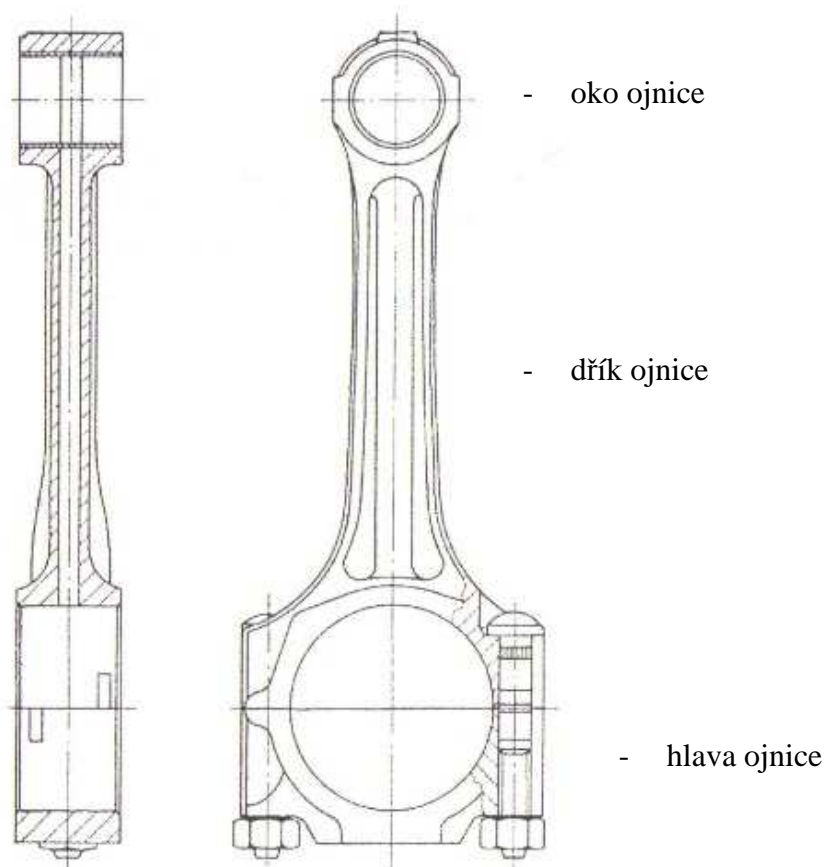
Hlavní účel ojnice:

- propojení klikové hřídele s pístem
- částečně se podílí na změně přímočarého pohybu pístu na rotační pohyb klikové hřídele
- přenesení síly vzniklé spalováním z pístu na klikovou hřídel

³⁴Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

³⁵Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

³⁶JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3



Obr. 3.2 Ojnice³⁷

Ojnice je spojovací součástí pístu a klikové hřídele. Díky svému výkyvu mění přímočarý vratný pohyb pístu na otáčivý pohyb klikové hřídele. Díky tomuto pohybu vzniká točivý moment motoru.

Namáhání ojnice je několika druhů, jelikož při provozu dochází k periodickým změnám rychlosti pístu. Vzhledem k tomu vzniká v ojnici tlakové namáhání v podélném směru, namáhání na vzpěr kvůli velkým tlakovým silám a namáhání tahové a tlakové od setrvačných sil v podélném směru. Proto je po ojnici vyžadováno, aby měla vysokou pevnost a co nejmenší hmotnost, aby se eliminovaly setrvačné síly.

Ojnice se skládá ze tří hlavních částí – oka ojnice, dříku ojnice a hlavy ojnice (obr. 3.2).

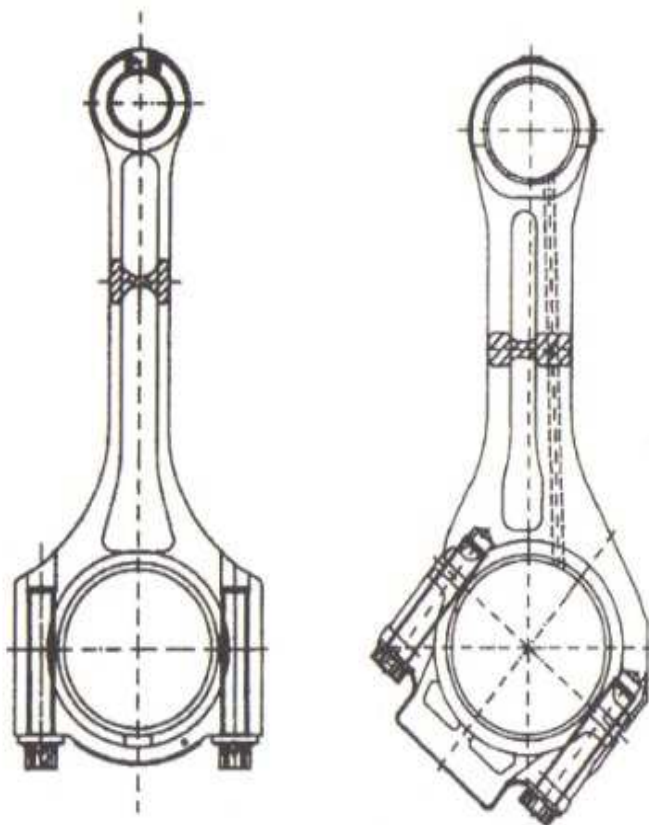
Oko ojnice slouží pro uložení pístního čepu. Šířka oka je závislá na vzdálenosti nálitků v pístu a oko je nedělené. Je-li pístní čep do oka montován volně, tj. plovoucí čep, je do oka nalisováno ložiskové pouzdro. Pokud je čep uložen v oku ojnice pevně, je do něj zalisován.

³⁷ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

Dřík ojnice spojuje její oko a hlavu. Z pevnostních důvodů má příčný profil I, jelikož je tento tvar nejlépe odolávajícím proti tlaku, ohybu a vzpěru. Vzhledem k únavovému namáhání ojnice musí být přechody mezi okem a hlavou ojnice hladké a zaoblené, aby nedocházelo ke koncentraci napětí. U více zatěžovaných motorů bývá v dříku vyvrtaný otvor pro tlakové mazání pístního čepu olejem od klikového čepu.

Hlava ojnice bývá vzhledem k montáži dělená. U menších a dvoudobých motorů nemusí být dělená, jelikož zde bývá dělená kliková hřídel, díky čemuž se ojnice uchytí na ojnicí čep klikové hřídele při jeho skládání. Dělení hlavy může být buď rovné, nebo šikmé (obr. 3.3). Aby bylo zajištěno správné smontování víka a hlavy ojnice, jsou stykové plochy opatřeny vroubkováním nebo drážkami. Hlavy ojnice bývají rozděleny takzvaným řízeným lomem. Tímto lomem, který vznikne v místě předem definovaném pomocí vrubu, se vytvoří atypická zrnitá plocha, díky které je zaručena přesná montáž. Víko je spojeno s hlavou ojnice pomocí ojnicích šroubů z kvalitní legované oceli (např. 14 321).

Do ojnicí hlavy jsou vloženy kluzné pánve, které slouží k uložení ojnice na klikové hřídeli. U čtyřdobých motorů jsou tyto pánve vyrobeny z ocelového plechu a na vnitřní straně plochy, která je ve styku s klikovým čepem, je nanášena tenká vrstvička ložiskového kovu, který má vynikající třecí vlastnosti. Pánve jsou opatřeny výstupky, které zapadají do vybrání v hlavě ojnice, aby se zabránilo jejich pootočení. Pro uložení ojnic menších a dvoudobých motorů jsou použita valivá jehlová ložiska.



Obr. 3.3 Rovné a šikmé dělení hlavy ojnice³⁸

³⁸VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

3.2.1. Materiál ojníc

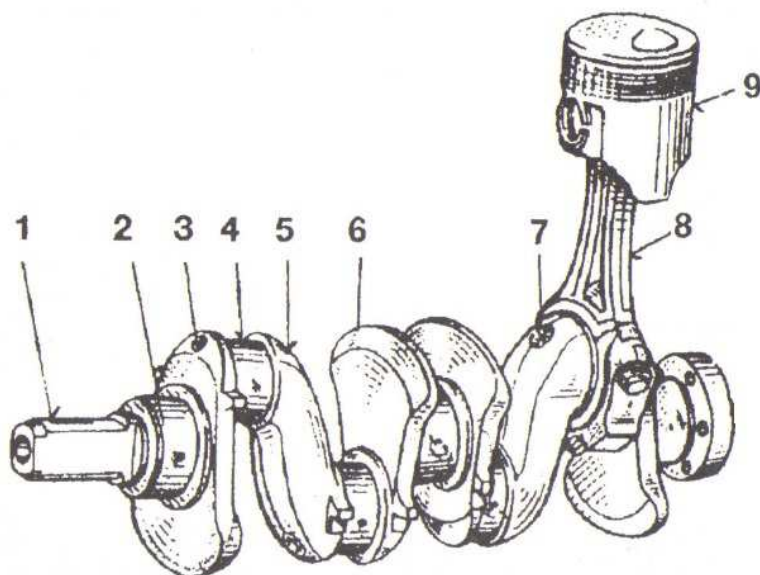
Ojnice se nejčastěji vyrábějí z legované oceli třídy 11-15 kování v zápustce, nebo z legované oceli jako slinutý celek. Aby se dosáhlo zvýšené únavové pevnosti, je povrch kuličkován, broušen či leštěn. U menších motorů se ojnice vyrábějí odléváním z temperované nebo tvárné litiny. Ojediněle bývá u těchto motorů ojnice vyrobena z lehkých slitin, případně kompozitních plastů. Ojnice závodních automobilů se vyrábějí ze slitin titanu, které dosahují nízké měrné hmotnosti při vysoké pevnosti. Pro výrobu ojnice z tohoto materiálu bývá nejčastěji použita slitina titanu s hliníkem (6%) a vanadem (4%). U výkonných motorů bývají ojnice vyrobeny práškovou technologií ze spékaných kovů.

3.3. Kliková hřídel

Hlavní účel klikové hřídele:

- změna posuvného pohybu ojnice na pohyb rotační
- přenesení točivého momentu na setrvačnick, spojku a na ostatní hnací ústrojí vozidla
- pohánění ventilového rozvodu motoru, olejového čerpadla, alternátoru a dalších pomocných agregátů nutných k provozu spalovacího motoru

Kliková hřídel spolu s ojnící zabezpečuje kinematický převod přímočarého vratného pohybu pístu na pohyb rotační. Na obr. 3.4 jsou znázorněny hlavní části klikové hřídele.



Obr. 3.4. Hlavní části klikové hřídele (1 – přední konec klikové hřídele, 2 – hlavní čep klikové hřídele, 3 – zátka olejového kanálu, 4 – klikový čep, 5 – rameno kliky, 6 – protizávaží, 7 – olejový kanál, 8 – ojnice, 9 – píst)³⁹

Jak bude kliková hřídel uspořádána a konstruována, záleží na mnoha aspektech. Především se jedná o počet válců, počtu uložení klikové hřídele, uspořádání válců motoru, zatížení motoru atd.

Namáhání klikové hřídele je velice široké. Hřídel je většinou namáhána prostorově několika silami najednou. Jedná se o síly od tlaku plynů při expanzi zápalné směsi a dále od setrvačných sil válců ostatních. Vzhledem k tomu, že silové účinky jsou proměnné časově, velikostně i směrově, vznikají v hřídeli pružné kmity, které ji namáhají na tlak, tah, ohyb a krut.

Kliková hřídel může být skládaná, kdy jsou jednotlivé díly skládány lisováním, odlitá nebo kovaná.

3.3.1. Hlavní části klikové hřídele

Volný konec klikové hřídele (dále jen KH) – využívá se pro uložení kola pro pohon rozvodového mechanismu a pomocných agregátů pro provoz motoru (pohon olejového čerpadla, alternátoru, čerpadlo chladicí kapaliny, kompresor klimatizace a další)

³⁹ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlček, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

Výstupní konec KH – tento konec je opatřen přírubou, která slouží k upevnění setrvačnicku. Bývá zde uloženo opěrné ložisko spojkové hřídele převodovky.

Hlavní čep KH – tento čep slouží k uložení klikové hřídele do bloku motoru, případně do klikové skříně. Jeho rozměry jsou dány pevností, torzním namáháním od točivého momentu, od torzního kmitání klikové hřídele a měrným tlakem na povrch čepu.

Klikový čep KH – skrz tento čep jsou přenášeny síly z ojnice na klikovou hřídel. Jeho rozměry se určují podle pevnosti vůči maximálnímu tlaku plynů ve válci motoru (ohybové namáhání je posuzováno podle počtu uložení klikové hřídele), měrného tlaku v ojnicím ložisku a vlastního kmitočtu klikové hřídele.

Rameno KH – tato část spojuje hlavní a klikový čep hřídele. U motorů, kde je KH uložen na hlavních ložiskách „přes dva válce“ (čtyřválcové motory tříložiskové), spojuje rameno dva ojnicní čepy. Nedílnou součástí ramen bývají protizávaží, které slouží k odlehčení ložisek od odstředivých sil. Ramena jsou nejčastěji oválného tvaru, který dobře odolává torznímu a ohybovému namáhání.

Olejoyé kanálky KH – tyto kanálky zabezpečují přívod mazacího oleje z hlavních do ojnicních ložisek.

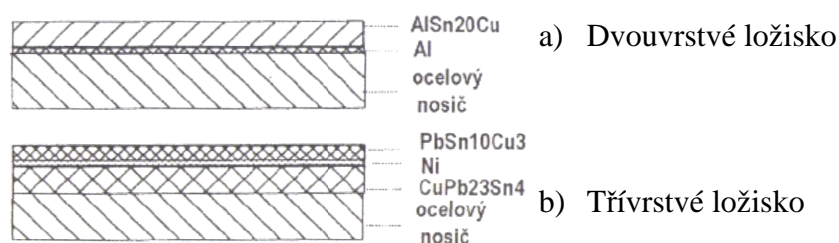
3.3.2. Ložiska klikové hřídele

Hlavní ložiska slouží k tomu, aby vedly a nesly klikovou hřídel. Bývají to dělená kluzná ložiska. Těleso ložiska je součástí klikové skříně, případně bloku motoru. K tělesu ložiska se šrouby připevní jeho druhá část – víko ložiska. V tělese a víku ložiska jsou přesné otvory, do kterých se vkládají ložiskové pánve. Veškerá uložení hřídele v ložiskách musejí být přesně souosé. Proti otočení a posunutí jsou ložiskové pánve zajištěny přesahem. Zajištění správné polohy při montáži obstarávají výstupky, které zapadají do výřezů v klikové skříně (popř. bloku motoru) a víku ložiska. Proti axiálnímu posuvu, který vzniká především při používání spojky a tepelných dilatací, je hřídel uložena v klikové skříně v jednom axiálním opěrném ložisku. Toto ložisko se zpravidla umísťuje na straně setrvačnicku, ale může být uloženo i uprostřed nebo na volném konci hřídele.

Podle počtu vrstev rozlišujeme ložiska jednovrstvá, dvouvrstvá nebo třívrstvá. Jednovrstvá a dvouvrstvá ložiska se používají u méně zatěžovaných motorů, nejčastěji

užívanými ložisky jsou tak ložiska třívrstvá. Ty se skládají z ocelové pánve, tenké vrstvy z ložiskového kovu a vlastní kluzné vrstvy z kovu s velmi dobrými kluznými vlastnostmi. Ložisková pánev se vyrábí z ocelového plechu nebo hliníkové slitiny a z pracovní kluzné vrstvy, na kterou jsou kladeny dobré třecí vlastnosti při dostatečné únosnosti. Podle použitého materiálu kluzné vrstvy se ložiska rozdělují na galvanická (galvanicky nanesená kluzná vrstva nejčastěji ze slitiny PbCuSn, dobrá schopnost absorbování částic vzniklých otěrem, mezi kluznou a nosnou vrstvou je mezivrstva niklu) a plazmová (pomocí paprsku elektronů se rozprašuje a nanáší vrstva ve velmi jemném rozptýlení, jako pojivo mezi nosnou a kluznou vrstvou slouží mezivrstva slitiny NiCr, určeno pro velmi vysoké namáhání).

Mazání je obstaráváno motorovým olejem, který je dopravován olejovým čerpadlem přes olejové kanálky k ložiskům. Ložiskové pánve mívají drážku a mazací otvor, kterým se olej dopravuje dále ke klikovému čepu.



Obr. 3.5 Ložiskové pánve⁴⁰

3.3.3. Materiály klikových hřídelí

Volba materiálu klikové hřídele se vztahuje k velikosti zatěžujících sil, ale také velice záleží na typu výroby hřídele. Ta se totiž může vyrobit kováním do zápustek, skládáním jednotlivých částí nebo tlakovým litím.

Kované klikové hřídele se nejčastěji vyrábějí z ocelí typu 12 050, 11 131, 16 342 a 16 720, které se dále zpracovávají, aby dosáhly větší pevnosti. Pro vznětové a více namáhané motory se používá legovaná ocel 14 420 a 15 260, které se zušlechťují na pevnost 800 – 950 MPa. Ojniční čepy, jež jsou nejvíce namáhané části klikové hřídele, se povrchově kalí, brousí nebo cementují.

⁴⁰ VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4

Skládané klikové hřídele se dělí podle toho, zda jsou skládané lisováním či sešroubováním. Lisované hřídele se používají u motocyklových a menších motorů, šroubované naopak u velkých motorů, např. motorů Tatra.

Klikové hřídele vyrobené tlakovým litím se používají pro běžné automobilové motory. Jsou tužší než kované hřídele, mají větší průměr ojnicích i hlavních čepů a větší přechodové poloměry, aby dosáhly stejné pevnosti. Obrovskou výhodou výroby těchto hřídelí je pořizovací cena, která je mnohokrát menší než u kovaných hřídelí. K výrobě se nejčastěji používá ocelolitina nebo tvárná litina.

4. Návrh vybraných motorových částí

V této kapitole se budeme věnovat konstrukčním návrhům pístu a pístním kroužkům, ojnici a klikové hřídeli. Budou zde navrženy hlavní zástavbové rozměry jednotlivých součástí a u pístu a ojnice budou provedeny základní pevnostní výpočty.

4.1 Volené hodnoty

Součásti budou navrhovány pro zážehový řadový čtyřválcový motor o výkonu 75 kW a maximálních otáčkách 6000 min^{-1} .

$$P = 75 \text{ kW}$$

$$n = 6000 \text{ ot/min}$$

$$i = 4$$

Kde: P – volený výkon motoru [W]

n – volené maximální otáčky motoru [min^{-1}]

i – počet válců motoru [-]

4.2 Výpočet základních parametrů motoru

Určení zdvihového objemu motoru V_z

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

Kde: P – výkon motoru [W]

V_z – zdvihový objem motoru [m^3]

τ – taktnost motoru [-] (dvoudobé $\tau = 1$, čtyřdobé $\tau = 0,5$)

p_e – střední efektivní tlak [Pa]

Tab. 1 Hodnoty středního efektivního tlaku p_e ⁴¹

Typ motoru	Hodnota[MPa]
čtyřdobý benzínový motor nepřepřlňovaný	0.7 ÷ 1.15
čtyřdobý benzínový motor přepřlňovaný	1.1 ÷ 1.9
čtyřdobý naftový motor nepřepřlňovaný	0.6 ÷ 0.8
čtyřdobý naftový motor přepřlňovaný	0.8 ÷ 1.1

Na základě doporučené literatury volím střední efektivní tlak $p_e = 1,1 \text{ MPa}$

$$V_z = \frac{P \cdot 60}{p_e \cdot i \cdot \tau \cdot n} [m^3]$$

$$V_z = \frac{75000 \cdot 60}{1,1 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot 6000}$$

$$\underline{\underline{V_z = 0,341 \cdot 10^{-3} m^3}}$$

Litrový výkon motoru P_l

$$P_l = \frac{P_e}{V_z \cdot i} \cdot 1000 [kW \cdot l^{-1}]$$

$$P_l = \frac{75000}{0,341 \cdot 10^{-3} \cdot 4} \cdot 1000$$

$$\underline{\underline{P_l = 54,99 kW \cdot l^{-1}}}$$

⁴¹ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Běžné hodnoty litrového výkonu pro čtyřdobé zážehové motory nepřepřlňované se pohybují v rozmezí 20 ÷ 60 kW/l⁴².

Vrtání válce D

Vrtání válce vypočteme z rovnice pro zdvihový objem

$$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z$$

Pro zjednodušení výpočtu zavedeme veličinu „zdvihový poměr“ $-k_k$

$$k_k = \frac{Z}{D} [-]$$

Tab. 2 Hodnoty zdvihového poměru k_k ⁴³

Typ motoru	Hodnota
čtyřdobý benzínový motor nepřepřlňovaný	0.75 ÷ 1.2
čtyřdobý benzínový motor přepřlňovaný	0.70 ÷ 1.1
čtyřdobý naftový motor	0.90 ÷ 1.2

Na základě doporučené literatury volím zdvihový poměr $k_k = 0,9$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_z}{\pi \cdot k_k}} [m]$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,341 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,9}}$$

$$\underline{\underline{D = 0,078 m}}$$

Volím vrtání válce $\underline{\underline{D = 0,08 m}}$

⁴² RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

⁴³ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Zdvih pístu Z

$$k = \frac{Z}{D}$$

$$Z = k \cdot D [m]$$

$$Z = 0,9 \cdot 0,08$$

$$\underline{\underline{Z = 0,072 m}}$$

Střední pístová rychlost c_s

Střední pístová rychlost by u zážehových motorů neměla přesáhnout hodnotu $19 m \cdot s^{-1}$ ⁴⁴

$$c_s = 2 \cdot Z \cdot \frac{n}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

$$c_s = 2 \cdot 0,072 \cdot \frac{6000}{60}$$

$$\underline{\underline{c_s = 14,4 m \cdot s^{-1}}}$$

4.3. Návrh hlavních rozměrů pístu

Návrh hlavních rozměrů pístu se určuje podle již osvědčených závislostí na velikosti vrtání válce. Vrtání válce jsme zjistili v předešlých výpočtech hlavních parametrů motoru. Píst bude vyroben ze slitiny hliníku AlSi12.

Tab. 3 Charakteristiky rozměrů pístu⁴⁵

Veličina	Značka	%D
Vrtání válce	D	100
Výška pístu	H_p	90÷140
Výška pláště pístu	H_{pl}	55÷60
Kompresní výška pístu	H_k	50÷70
Vzdálenost mezi nálitky pístního čepu	H_o	40

⁴⁴ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

⁴⁵ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

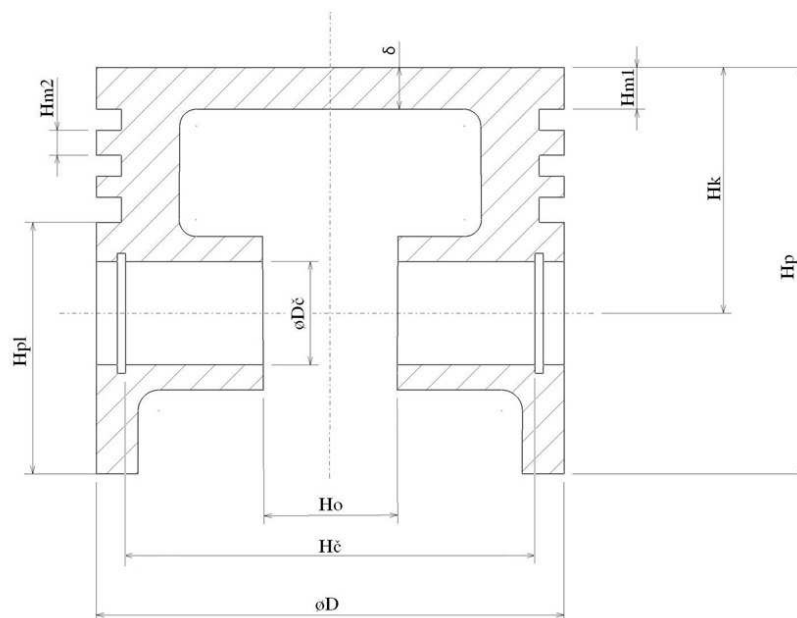
Vzdálenost segerových kroužků	H_{ξ}	85
Průměr pístního čepu	D_{ξ}	25÷28
Výška prvního můstku	H_{m1}	6÷10
Výška druhého můstku	H_{m2}	3÷6
Tloušťka dna pístu	δ	5÷7

Další rozměry:

Výška druhého můstku H_{m2} – volí se 2,5÷3,5 násobek prvního můstku H_{m1}

Výška ostatních můstků H_m – volí se 0,03D

Hloubka drážky pro pístní kroužky - vychází z osazení pístu pístními kroužky.



Obr. 4.1 Hlavní rozměry pístu

Výška pístu H_p

$$H_p = (0,9 \div 1,4) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_p = (0,9 \div 1,4) \cdot 80 = 72 \div 112 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{H_p = 80 \text{ mm}}$$

Výška pláště pístu H_{pl}

$$H_{pl} = (0,55 \div 0,60) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_{pl} = (0,55 \div 0,60) \cdot 80 = 44 \div 48 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{H_{pl} = 45 \text{ mm}}$$

Kompresní výška pístu H_k

$$H_k = (0,50 \div 0,70) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_k = (0,50 \div 0,70) \cdot 80 = 40 \div 56 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{H_k = 42 \text{ mm}}$$

Vzdálenost mezi nálitky pístního čepu H_o

$$H_o = 0,4 \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_o = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ mm} \quad \Rightarrow \underline{H_o = 32 \text{ mm}}$$

Vzdálenost segerových kroužků $H_{\check{c}}$

$$H_{\check{c}} = 0,85 \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_{\check{c}} = 0,85 \cdot 80 = 68 \text{ mm} \quad \Rightarrow \underline{H_{\check{c}} = 68 \text{ mm}}$$

Průměr pístního čepu $D_{\check{c}}$

$$D_{\check{c}} = (0,25 \div 0,28) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$D_{\check{c}} = (0,25 \div 0,28) \cdot 80 = 20 \div 22,4 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{D_{\check{c}} = 22 \text{ mm}}$$

Výška prvního můstku H_{m1}

$$H_{m1} = (0,06 \div 0,10) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_{m1} = (0,06 \div 0,10) \cdot 80 = 4,8 \div 8 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{H_{m1} = 7 \text{ mm}}$$

Výška druhého můstku H_{m2}

$$H_{m2} = (0,03 \div 0,06) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_{m2} = (0,03 \div 0,06) \cdot 80 = 4,8 \div 8 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{H_{m2} = 4 \text{ mm}}$$

Výška ostatních můstků H_m

$$H_m = 0,03 \cdot D \text{ [mm]}$$

$$H_m = 0,03 \cdot 80 = 2,4 \text{ mm} \quad \Rightarrow \underline{H_m = 2,4 \text{ mm}}$$

Tloušťka dna pístu δ

$$\delta = (0,05 \div 0,07) \cdot D \text{ [mm]}$$

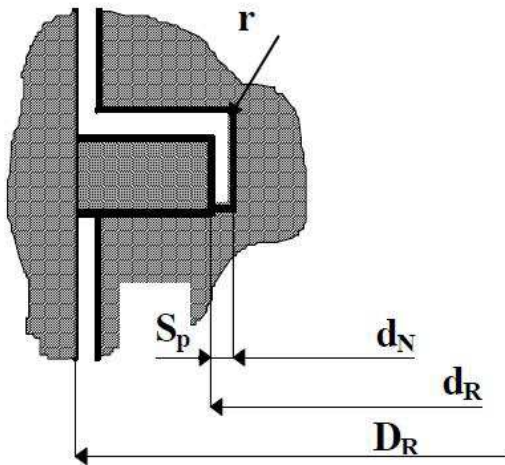
$$\delta = (0,05 \div 0,07) \cdot 80 = 4 \div 5,6 \text{ mm}$$

=>Z bezpečnostních důvodů
volím $\delta = 6,5 \text{ mm}$

4.3.1. Návrh drážek pístních kroužků

U dnešních motorů se používají nejčastěji tři pístní kroužky – dva těsnící a jeden stírací.

4.3.1.1. Radiální vůle pístního kroužku d_N



S_p – radiální vůle pístního kroužku

d_N – průměr drážky pístního kroužku

d_R – vnitřní průměr zamontovaného pístního kroužku

D_R – vnější průměr zamontovaného pístního kroužku

r – vnitřní rádiusy drážky ($r \geq 0,3 \text{ mm}$)

Obr. 4.2 Radiální vůle pístního kroužku⁴⁶

Vůle S_p by se měla pohybovat v rozmezí $0,6 \div 0,8 \text{ [mm]}$ ⁴⁷

=> volím $S_p = 0,6 \text{ mm}$

Šířku pístního kroužku a volím dle normy DIN 70 910

=> volím $a = 3,35 \text{ mm}$

$$d_N = D - 2 \cdot (a + S_p) \text{ [mm]}$$

$$d_N = 80 - 2 \cdot (3,35 + 0,6)$$

$$\underline{\underline{d_N = 72,1 \text{ mm}}}$$

⁴⁶ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

⁴⁷ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

4.3.1.2. Axiální vůle pístního kroužku

Axiální vůle pístních kroužků je ovlivněna několika faktory, ovšem největší dopad na ni má vznik karbonových úsad vlivem spalování. Vzhledem k tomuto faktu bývá první těsnicí kroužek uložen s větší vůlí než ostatní kroužky.

Podle normy DIN 70 910 určíme maximální a minimální axiální vůle kroužků:

1. těsnicí kroužek

drážka $1,5^{+0,050}_{+0,035} \text{ mm}$

kroužek $1,5^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$

2. těsnicí kroužek

drážka $1,75^{+0,040}_{+0,025} \text{ mm}$

kroužek $1,75^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$

stírací kroužek

drážka $3^{+0,040}_{+0,025} \text{ mm}$

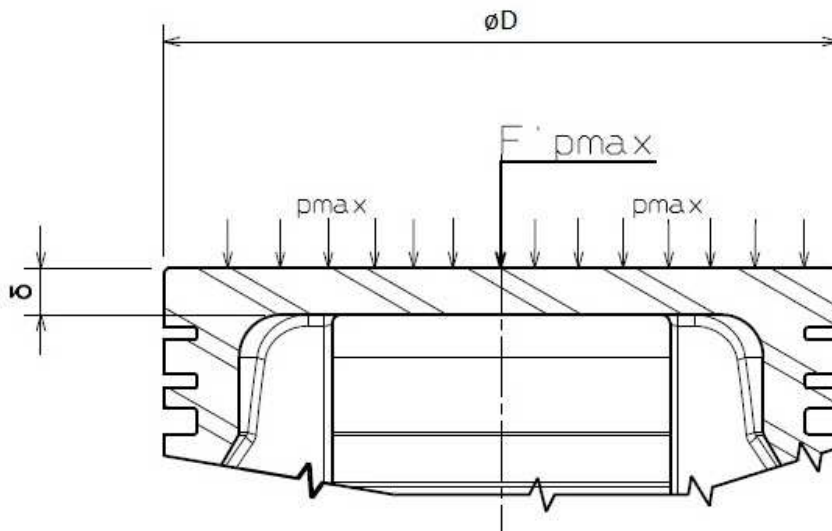
kroužek $3^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$

4.3.2. Pevnostní výpočet pístu

Pevnostní výpočet pístu je vzhledem ke složitosti tvaru a namáhání pístu pouze informativní. Výpočty jsou prováděny na základní namáhání od tlaku plynů při spalování zápalné směsi a setrvačnými silami. Ostatní účinky působící na píst, jako např. vlivy vrubových účinků, tepelný tok průřezu pístu či proměnnost zatěžujících účinků, nelze do výpočtu zahrnout a jsou obsaženy ve velikosti dovolených hodnot napětí.

4.3.2.1. Pevnostní výpočet dna pístu

Tento výpočet je prováděn na ohyb kruhové desky, kterou nahradíme dno pístu. Tato nahrazená deska je vetknutá nebo podepřená na obvodě a je rovnoměrně zatížena spojitým namáháním od tlaku plynů.



Obr. 4.3 Spojité zatížení dna pístu od tlaku plynů

Maximální síla od tlaku plynů $F'_{p_{max}}$

Nejdříve je potřeba určit maximální tlak, ten vzniká ve válci při adiabatickém ději, který je definován následujícím vztahem:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa$$

Kde: p_1 – barometrický tlak ($p_1 = p_b = 0,1 \text{ MPa}$)

V_1 – celkový objem ($V_1 = V_z + V_k$)

p_2 – maximální tlak ve válci ($p_2 = p_{max}$)

V_2 – kompresní objem ($V_2 = V_k$)

κ – poissonova konstanta pro dvouatomové plyny ($\kappa = 1,4$)

Pro výpočet kompresního objemu je nutné zvolit si kompresní poměr ε [-]. Ten se u čtyřdobých benzinových nepřehřívávaných motorů volí v rozmezí $9 \div 12^{48}$.

Na základě doporučené literatury volím kompresní poměr $\varepsilon = 10,5$ [-].

$$\varepsilon = \frac{V_z + V_k}{V_k} \text{ [-]}$$

⁴⁸RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Kde: ε – kompresní poměr [-]

V_k – kompresní objem motoru [m^3]

$$V_k = \frac{V_z}{\varepsilon - 1} [m^3]$$

$$V_k = \frac{0,341 \cdot 10^{-3}}{10,5 - 1} = \frac{0,341 \cdot 10^{-3}}{9,5}$$

$$\underline{\underline{V_k = 0,359 \cdot 10^{-4} m^3}}$$

$$p_{max} = \frac{p_b \cdot (V_z + V_k)^\alpha}{V_k^\alpha} = \frac{100000 \cdot (0,341 \cdot 10^{-3} + 0,359 \cdot 10^{-4})^{1,4}}{(0,359 \cdot 10^{-4})^{1,4}}$$

$$\underline{\underline{p_{max} = 2688960,14 Pa \Rightarrow 2,69 MPa}}$$

Z bezpečnostních důvodů bude vypočítán maximální tlak vynásoben koeficientem bezpečnosti $k = 1,5 \div 2$.

$$p_{max}^* = 1,7 \cdot p_{max} = 1,7 \cdot 2,69$$

$$\underline{\underline{p_{max}^* = 4,57 MPa}}$$

Nyní jsou známy všechny potřebné parametry pro výpočet maximální síly působící na dno pístu.

$$F'_{pmax} = \pi \cdot r^2 \cdot p_{max}^* [N]$$

$$F'_{pmax} = \pi \cdot 0,04^2 \cdot 4,57 \cdot 10^6$$

$$\underline{\underline{F'_{pmax} = 22981,79 N \Rightarrow 22,98 kN}}$$

Maximální ohybový moment M_{omax}

$$M_{omax} = \frac{r}{3} \cdot \frac{F'_{pmax}}{\pi} [Nm]$$

$$M_{omax} = \frac{0,04}{3} \cdot \frac{22981,79}{\pi}$$

$$\underline{\underline{M_{omax} = 97,53 Nm}}$$

Modul odporu v ohybu W_o

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

$$W_o = \frac{1}{3} \cdot 0,04 \cdot 0,0065^2$$

$$\underline{\underline{W_o = 5,633 \cdot 10^{-7} m^3}}$$

Maximální ohybové napětí σ_{omax}

$$\sigma_{omax} = p_{max}^* \cdot \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 [MPa]$$

$$\sigma_{omax} = 4570000 \cdot \left(\frac{0,04}{0,0065}\right)^2$$

$$\underline{\underline{\sigma_{omax} = 176,07 MPa}}$$

Maximální ohybové napětí uvažované pro vetknutou desku σ'_{omax}

$$\sigma'_{omax} = 0,25 \cdot \sigma_{omax} [MPa]$$

$$\sigma'_{omax} = 0,25 \cdot 176,07$$

$$\underline{\underline{\sigma'_{omax} = 43,27 MPa}}$$

Tab. 4. Dovolené hodnoty napětí pro píst ze slitin hliníku⁴⁹

Dno pístu bez žeber	σ_{dov}	20÷25 MPa
Dno pístu s nízkými žebry	σ_{dov}	40÷50 MPa

Volím píst s nízkými žebry, pro který maximální ohybové napětí vyhovuje.

4.3.2.2. Nejslabší místo pláště pístu

Nejslabší místo na plášti pístu bývá v drážce pro stírací pístní kroužek, kde jsou otvory pro odvod oleje setřeného ze stěny válce.

⁴⁹ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Namáhání tlakem

Minimální příčný průřez pístu v drážce pro stírací pístní kroužek:

$$S_x = \frac{\pi \cdot (d_N^2 - d_x^2)}{4} [m^2]$$

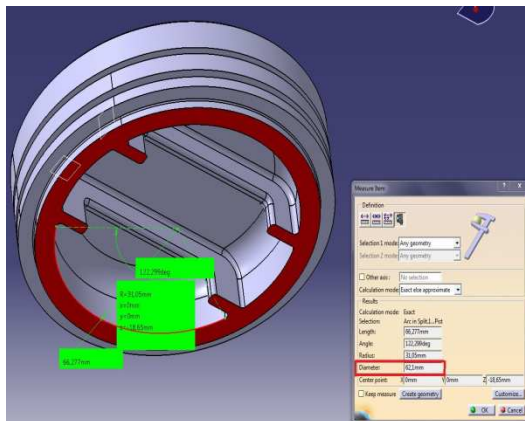
Kde: d_N^2 – drážka pro pístní kroužek

d_x – průměr plochy S_x

$d_x = 62,1 \text{ mm}$ (odečteno z 3D modelu, obr XY)

$$S_x = \frac{\pi \cdot (0,0721^2 - 0,0621^2)}{4}$$

$$\underline{\underline{S_x = 1,054 \cdot 10^{-3} m^2}}$$



Obr. 4.4 Vnitřní průměr plochy S_x – 3D model

Napětí vyvolané tlakem plynů

$$\sigma_{tl} = \frac{F'_{pmax}}{S_x} [MPa]$$

$$\sigma_{tl} = \frac{22981}{1,054 \cdot 10^{-3}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{tl} = 21804262 Pa = 21,80 MPa}}$$

Dovolená hodnota napětí pro materiál AlSi12 $\sigma_{dov} = 30 \div 40 MPa^{50} \Rightarrow$ vyhovuje.

Namáhání tahem

Při pohybu pístu z horní úvratě do dolní se mění tlakové namáhání na tahové, které způsobují setrvačné síly hmotnosti koruny pístu.

Maximální úhlová rychlost otáčení klikového hřídele ω_{max} :

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot n_{max}}{30} [s^{-1}]$$

⁵⁰Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

$$\omega_{max} = \frac{\pi \cdot 6000}{30}$$

$$\underline{\underline{\omega_{max} = 628,32 \text{ s}^{-1}}}$$

Setrvačná síla $F_{sp,x}$

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

Kde: m_x – hmotnost koruny pístu nad řezem X-X, $m_x = 0,242 \text{ kg}$
(odečteno z 3D modelu)

r_k – poloměr klikové hřídele, $r_k = 0,036 \text{ m}$

λ_o – ojníční poměr, $\lambda_o = 0,225 [-]$

$$F_{sp,x} = 0,242 \cdot 0,036 \cdot 628,319^2 \cdot (1 + 0,225)$$

$$\underline{\underline{F_{sp,x} = 4213,22 \text{ N}}}$$

Tahové napětí σ_t

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

$$\sigma_t = \frac{4213,22}{1,054 \cdot 10^{-3}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_t = 3997342 \text{ Pa} = 4 \text{ MPa}}}$$

Dovolená hodnota tahového napětí pro slitinu AlSi12 je $\sigma_{tdov} = 4 \div 10 \text{ MPa}^{51} \Rightarrow$
vyhovuje.

⁵¹Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

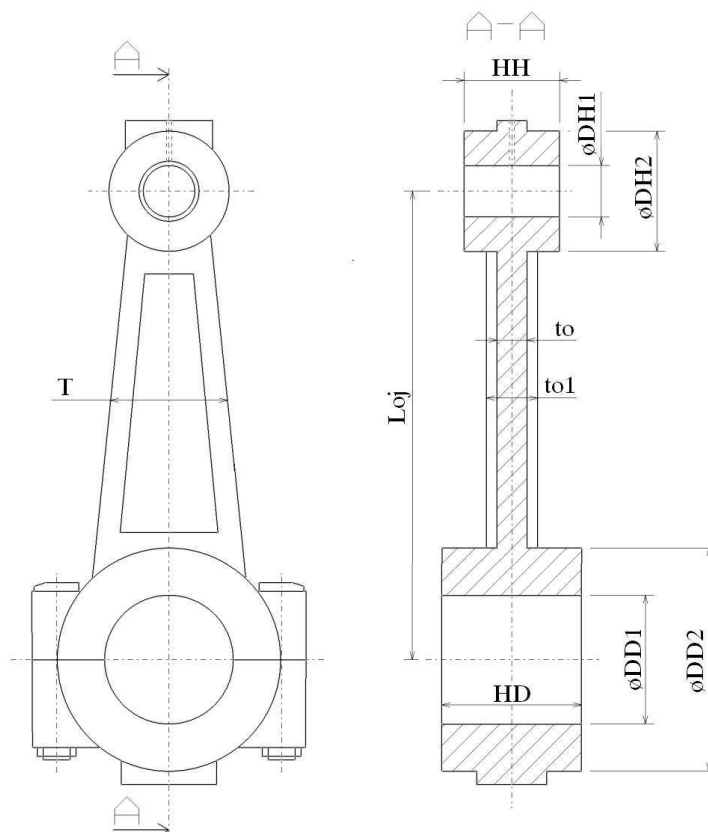
4.4. Návrh hlavních rozměrů ojnice

Rozměry ojnice se určují obdobně jako rozměry pístu, tj. podle již osvědčených empirických vztahů v závislosti na velikosti vrtání válce. Ojnice bude vyrobena z oceli 12 050.

Tab. 5 Charakteristické rozměry ojnice⁵²

Veličina	Značka	Rozměr
Délka ojnice	L_{oj}	$(1,70 \div 2,30) D$
Šířka ojnice	T	$(0,26 \div 0,30) D$
Vnitřní průměr oka ojnice	$\varnothing D_{H1}$	$(0,28 \div 0,5) D$
Vnější průměr oka ojnice	$\varnothing D_{H2}$	$1,5 D_{H1}$
Šířka oka ojnice	H_H	$(0,35 \div 0,38) D$
Vnitřní průměr hlavy ojnice	$\varnothing D_{D1}$	$(0,60 \div 0,75) D$
Vnější průměr hlavy ojnice	$\varnothing D_{D2}$	$1,5 D_{D1}$
Šířka hlavy ojnice	H_D	$(0,40 \div 0,45) D$
Tloušťka ojnice	t_{o1}	$(10 \div 25) \text{ mm}$
Tloušťka dřívku ojnice	t_o	$(3 \div 8) \text{ mm}$

⁵² RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8



Obr. 4.5 Hlavní rozměry ojnice

Délka ojnice L_{oj}

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

$$L_{oj} = (1,7 \div 2,3) \cdot 80 = 136 \div 184 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{L_{oj} = 160 \text{ mm}}$$

Šířka ojnice T

$$T = (0,26 \div 0,30) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$T = (0,26 \div 0,30) \cdot 80 = 20,8 \div 24 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{T = 24 \text{ mm}}$$

Vnitřní průměr oka ojnice D_{HI}

$$D_{HI} = (0,28 \div 0,750) \cdot D \text{ [mm]}$$

$$D_{HI} = (0,28 \div 0,50) \cdot 80 = 22,4 \div 40 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{známe z výpočtu pístu}$$

$$\underline{D_{HI} = 22 \text{ mm}}$$

Vnější průměr oka ojnice D_{H2}

$$D_{H2} = 1,5 \cdot D_{H1} [mm]$$

$$D_{H2} = 1,5 \cdot 22 = 36 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \underline{D_{H2} = 36 \text{ mm}}$$

Šířka oka ojnice H_H

$$H_H = (0,35 \div 0,38) \cdot D [mm]$$

$$H_H = (0,35 \div 0,38) \cdot 80 = 28 \div 30,4 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím } \underline{H_H = 28 \text{ mm}}$$

Vnitřní průměr hlavy ojnice D_{D1}

$$D_{D1} = (0,60 \div 0,75) \cdot D [mm]$$

$$D_{D1} = (0,60 \div 0,75) \cdot 80 = 48 \div 60 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím } \underline{D_{D1} = 54 \text{ mm}}$$

Vnější průměr hlavy ojnice D_{D2}

$$D_{D2} = 1,5 \cdot D_{D1} [mm]$$

$$D_{D2} = 1,5 \cdot 54 = 81 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím z rozměrových důvodů } \underline{D_{D2} = 76 \text{ mm}}$$

Šířka hlavy ojnice H_D

$$H_D = (0,40 \div 0,45) \cdot D [mm]$$

$$H_D = (0,40 \div 0,45) \cdot 80 = 32 \div 36 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím } \underline{H_D = 32 \text{ mm}}$$

Tloušťka ojnice t_{o1}

$$t_{o1} = (10 \div 25) \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím } \underline{t_{o1} = 16 \text{ mm}}$$

Tloušťka dřívku ojnice t_o

$$t_o = (3 \div 8) \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Volím } \underline{t_o = 6 \text{ mm}}$$

4.4.1. Pevnostní výpočet oka ojnice

Oko ojnice je namáháno na tah od setrvačných sil, tlakem od spalování zápalné směsi a předpětím od zalisování ložiskového pouzdra pro uložení pístního čepu.

4.4.1.1. Měrný tlak mezi pouzdrem a okem ojnice

Vzhledem k tomu, že ložiskové pouzdro bude do oka ojnice zalisované, vznikne mezi okem a pouzdrem spojitě zatížení. Jelikož je zvažováno bronzové pouzdro, dochází vzhledem k zahřívání motoru k jeho většímu roztahování než ojnice a tím i ke zvětšování napětí.

Zvětšení přesahu pouzdra vlivem zahřátí

$$e_t = d_{vn} \cdot \Delta t \cdot (\alpha_b - \alpha_o) [m]$$

Kde: d_{vn} – vnější průměr pouzdra

Δt – ohřev oka. Ohřev oka se pohybuje v rozmezí

$$\Delta t = 100 \div 150 \text{ K}^{53} \Rightarrow \text{volím } \Delta t = \underline{\underline{120 \text{ K}}}$$

α_b – součinitel tepelné roztažnosti pro bronz, $\alpha_b = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

α_o – součinitel tepelné roztažnosti pro ocel, $\alpha_o = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Vnější průměr pouzdra

$$d_{vn} = D_{H1} + 3 [mm]$$

$$d_{vn} = 22 + 3$$

$$\underline{\underline{d_{vn} = 25 \text{ mm}}}$$

$$e_t = 0,025 \cdot 120 \cdot (1,8 \cdot 10^{-5} - 1,0 \cdot 10^{-5})$$

$$\underline{\underline{e_t = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}}}$$

⁵³ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Měrný tlak mezi pouzdrům a okem ojnice v zahřátém stavu

$$p' = \frac{e + e_t}{d_{vn} \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p + \mu}{E_b} \right)} \text{ [MPa]}$$

Kde: e – přesah bronzového pouzdra. U současných automobilů bývá přesah bronzového pouzdra v rozmezí $e = 0,01 \div 0,06 \text{ mm} \Rightarrow$ volím $e = 0,04 \text{ mm}$.

E_o – modul pružnosti v tahu pro ocel, $E_o = 2,2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

E_b – modul pružnosti v tahu pro bronz, $E_b = 1,15 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

$$C_o = \frac{D_{H2}^2 + d_{vn}^2}{D_{H2}^2 - d_{vn}^2} = 2,86$$

$$C_p = \frac{d_{vn}^2 + D_{H1}^2}{d_{vn}^2 - D_{H1}^2} = 7,87$$

μ – poissonova konstanta, $\mu = 0,3$

$$p' = \frac{0,04 \cdot 10^{-4} + 2,4 \cdot 10^{-5}}{0,025 \cdot \left(\frac{2,86 + 0,3}{2,2 \cdot 10^{11}} + \frac{7,87 + 0,3}{1,15 \cdot 10^{11}} \right)}$$
$$\underline{\underline{p' = 31935512,1 \text{ Pa} = 32 \text{ MPa}}}$$

Napětí ve vnějším a vnitřním vlákne

Vnější vlákno

$$\sigma_a = p' \cdot \frac{2 \cdot d_{vn}^2}{D_{H2}^2 - d_{vn}^2} \text{ [MPa]}$$
$$\sigma_a = 32 \cdot 10^6 \cdot \frac{2 \cdot 0,025^2}{0,036^2 - 0,025^2}$$
$$\underline{\underline{\sigma_a = 59492384 \text{ Pa} = 59 \text{ MPa}}}$$

Vnitřní vlákno

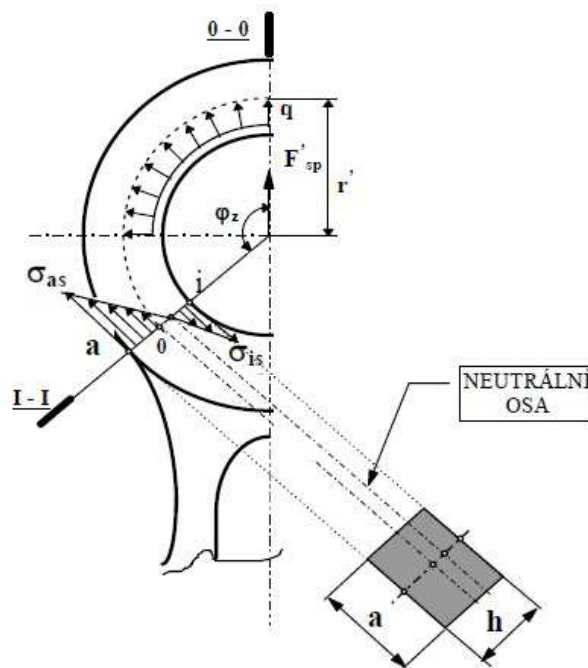
$$\sigma_i = p' \cdot \frac{D_{H2}^2 + d_{vn}^2}{D_{H2}^2 - d_{vn}^2} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_i = 32 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,036^2 + 0,025^2}{0,036^2 - 0,025^2}$$

$$\underline{\underline{\sigma_i = 91427896,7 Pa = 91 MPa}}$$

4.4.1.2. Namáhání oka ojnice setrvačnou silou

Setrvačná síla působící na oko ojnice je vyvolána od hmotnosti pístní skupiny. Maximální hodnoty dosahuje v horní úvratí. Nejvíce namáhanou částí oka ojnice je přechod oka do dřívku ojnice, viz řez I-I



Obr 4.6 Průběhy zatížení a napětí v ojničním oku vyvolané setrvačnými silami⁵⁴

Setrvačná síla

$$F'_{sp} = m_{psk} \cdot r_k \cdot \omega_{max}^2 \cdot (1 + \lambda_o) [N]$$

Kde: m_{psk} – hmotnost pístní skupiny, $m_{psk} = 0,441$ kg (odečteno z 3D modelu)

r_k – poloměr klikové hřídele, $r_k = 0,036$ m

λ_o – ojniční poměr, $\lambda_o = 0,225$ [-]

⁵⁴ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

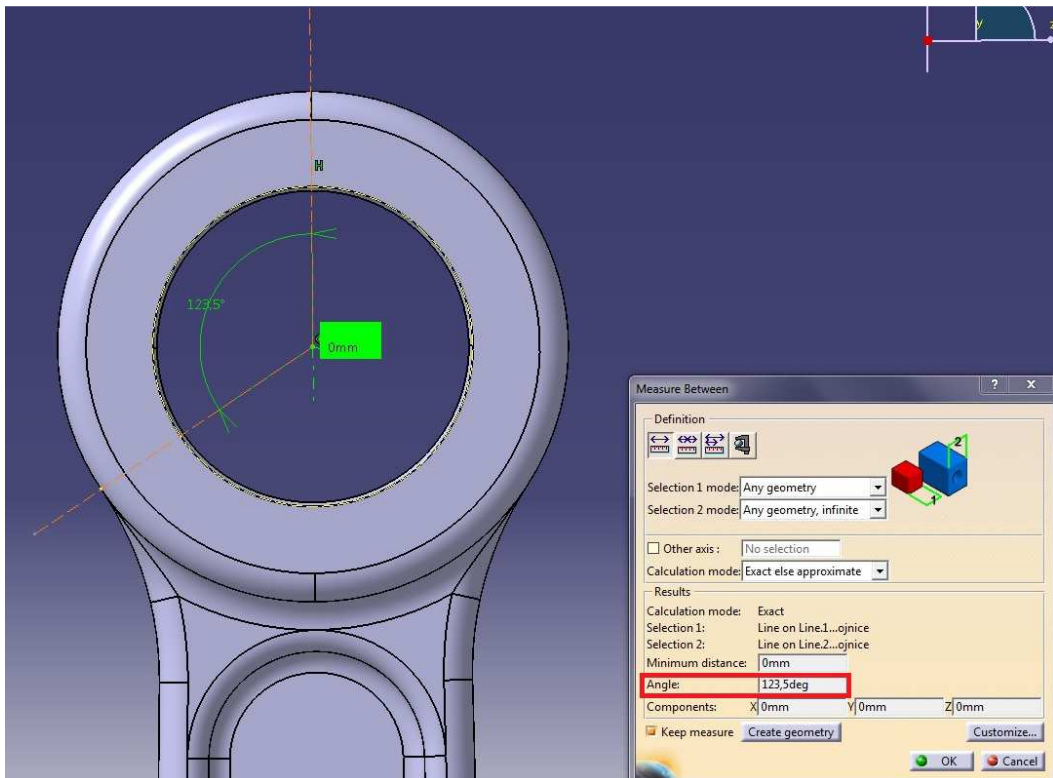
$$F'_{sp} = 0,441 \cdot 0,0036 \cdot 268,319^2 \cdot (1 + 0,225)$$

$$\underline{\underline{F'_{sp} = 7677,80 \text{ N}}}$$

Určení momentu ve vazbě

$$M_s = M_{os} + F_{nos} \cdot r' \cdot (1 - \cos\varphi_z) - 0,5 \cdot F'_{sp} \cdot r' \cdot (\sin\varphi_z - \cos\varphi_z) \text{ [Nm]}$$

Kde: φ_z – úhel, kde přechází dřík ojnice do oka ojnice, $\varphi_z = 123,5^\circ$
(odečteno z 3D modelu, viz Obr. 4.7)



Obr. 4.7 Úhel přechodu dříku ojnice do oka ojnice – 3D model

Ostatní neznámé vypočteme pomocí empirických vztahů

Poloměr těžiště příčného průřezu

$$r' = \frac{D_{H2} + d_{vn}}{4} \text{ [m]}$$

$$r' = \frac{0,036 + 0,025}{4}$$

$$\underline{\underline{r' = 0,01525m}}$$

Náhradní moment působící ve vazbě

$$M_{os} = F'_{sp} \cdot r' \cdot (0,00033 \cdot \varphi_z - 0,0297) [Nm]$$

$$M_{os} = 7677,80 \cdot 0,01525 \cdot (0,00033 \cdot 123,5 - 0,0297)$$

$$\underline{\underline{M_{os} = 1,29 Nm}}$$

Náhradní síla působící ve vazbě

$$F_{nos} = F'_{sp} \cdot (0,572 - 0,008 \cdot \varphi_z - 0,097) [N]$$

$$F_{nos} = 7677,80 \cdot (0,572 - 0,008 \cdot 123,5)$$

$$\underline{\underline{F_{nos} = 3633,14 N}}$$

$$M_s = 1,29 + 3633,14 \cdot 0,01525 \cdot (1 - \cos 123,5) - 0,5 \cdot 7677,80 \cdot 0,01525 \cdot (\sin 123,5 - \cos 123,5)$$

$$\underline{\underline{M_s = 6,15 Nm}}$$

Určení síly ve vazbě

$$F_{ns} = F_{nos} \cdot \cos \varphi_z + 0,5 \cdot F'_{sp} \cdot (\sin \varphi_z - \cos \varphi_z) [N]$$

$$F_{ns} = 3633,14 \cdot \cos 123,5 + 0,5 \cdot 7677,80 \cdot (\sin 123,5 - \cos 123,5)$$

$$\underline{\underline{F_{ns} = 3314,77 N}}$$

Výsledné normálové napětí

Ve vnějším vlákne

$$\sigma_{as} = \left[2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' + h)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{H_H \cdot h} [Pa]$$

Ve vnitřním vlákně

$$\sigma_{is} = \left[-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' + h)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{H_H \cdot h} [Pa]$$

Kde: H_H – šířka oka ojnice, $H_H = 0,028 \text{ m}$

h – šířka kontrolního průřezu:

$$h = \frac{D_{H2} - d_{vn}}{2} = \underline{\underline{0,0055 \text{ m}}}$$

S_o – šířka příčného průřezu oka ojnice:

$$S_o = \frac{D_{H2} - d_{vn}}{2} \cdot a = \underline{\underline{0,000154 \text{ m}^2}}$$

S_p – průřez pouzdra oka ojnice:

$$S_p = \frac{d_{vn} - D_{H1}}{2} \cdot a = \underline{\underline{0,000042 \text{ m}^2}}$$

k_1 – koeficient vlisování pouzdra v oku:

$$k_1 = \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o + E_b \cdot S_p} = 0,827 [-]$$

$$\sigma_{as} = \left[2 \cdot 6,14 \cdot \frac{6 \cdot 0,01525 + 0,0055}{0,0055 \cdot (2 \cdot 0,01525 + 0,0055)} + 0,827 \cdot 3314,77 \right] \cdot \frac{1}{0,028 \cdot 0,0055}$$

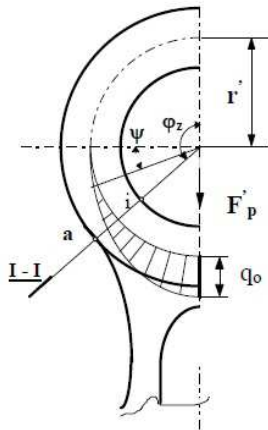
$$\underline{\underline{\sigma_{as} = 57963308,5 \text{ Pa} = 57,96 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{is} = \left[-2 \cdot 6,14 \cdot \frac{6 \cdot 0,01525 + 0,0055}{0,0055 \cdot (2 \cdot 0,01525 + 0,0055)} + 0,827 \cdot 3314,77 \right] \cdot \frac{1}{0,028 \cdot 0,0055}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{is} = -20285685 \text{ Pa} = 20,29 \text{ MPa}}}$$

4.4.1.3. Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů

Okno ojnice je v tomto případě zatěžováno silou F_{pmax} , která vzniká při spalování zápalné směsi.



Obr. 4.8 Zatížení oka ojnice od tlaku plynů⁵⁵

$$\sigma_{at} = \left[2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' + h)} + k_1 \cdot F_{nt} \right] \cdot \frac{1}{H_H \cdot h} \text{ [Pa]}$$

Pro výpočet vnitřních účinků M_t a F_{nt} je potřeba určit koeficienty a_1 a a_2 , které jsou závislé na úhlu ukotvení oka ojnice do dřívku.

Tab. 6 Závislost velikosti koeficientů a_1 a a_2 na úhlu zakotvení oka v dřívku ojnice⁵⁶

φ_z	90°	100°	110°	120°	130°
a_1	0	0,0002	0,0008	0,0030	0,0085
a_2	0	-0,0001	-0,0003	-0,0012	-0,0030

$$a_1(\varphi_z = 123,5^\circ) = 0,004925$$

$$a_2(\varphi_z = 123,5^\circ) = -0,00183$$

Pomocí empirických vztahů vypočteme vnitřní účinky

$$M_t = F'_{pmax} \cdot r' \cdot \left[a_2 + a_1 \cdot (1 - \cos\varphi_z) - \frac{\pi}{2} \cdot J \right] \text{ [Nm]}$$

$$M_t = 22981 \cdot 0,01525$$

$$\cdot \left[(-0,00183) + 0,004925 \cdot (1 - \cos 123,5) - \frac{\pi}{2} \cdot 0,032188 \right]$$

⁵⁵ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

⁵⁶ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

$$\underline{\underline{M_t = -5,144 Nm}}$$

$$F_{nt} = F'_{pmax} \cdot \left(a_1 \cdot \cos\varphi_z - \frac{\pi}{2} \cdot J \right) [N]$$

$$F_{nt} = 22981 \cdot \left(0,004925 \cdot \cos 123,5 - \frac{\pi}{2} \cdot 0,032188 \right)$$

$$\underline{\underline{F_{nt} = 408,46 N}}$$

$$J = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_z}{2} \right) \cdot \sin\varphi_z - \frac{1}{2} \cdot \cos\varphi_z [-]$$

$$J = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2,15548}{2} \right) \cdot \sin 123,5 - \frac{1}{2} \cdot \cos 123,5$$

$$\underline{\underline{J = 0,032188 [-]}}$$

Nyní již lze vypočítat normálové napětí ve vnějších vláknech oka ojnice

$$\sigma_{at} = \left[2 \cdot (-5,144) \cdot \frac{6 \cdot 0,01525 + 0,0055}{0,0055 \cdot (2 \cdot 0,01525 + 0,0055)} + 0,827 \cdot 408,46 \right] \cdot \frac{1}{0,028 \cdot 0,0055}$$

$$\underline{\underline{\sigma_{at} = -30408517 Pa = -30,40 MPa}}$$

4.4.1.4. Únavové namáhání cyklu

Maximální napětí cyklu

$$\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_{as} [MPa]$$

$$\sigma_{max} = 59,49 + 57,96$$

$$\underline{\underline{\sigma_{max} = 117,46 MPa}}$$

Minimální napětí cyklu

$$\sigma_{min} = \sigma_a + \sigma_{at}$$

$$\sigma_{min} = 59,49 + (-30,40)$$

$$\underline{\underline{\sigma_{min} = 29,08 \text{ MPa}}}$$

Pro materiál 12 050 je $\sigma_{Dt} = (100 \div 120) \text{ MPa}$ ⁵⁷ $\Rightarrow \sigma_{max} < \sigma_{Dt} \Rightarrow$ vyhovuje.

4.5. Návrh hlavních rozměrů klikové hřídele

Hlavní rozměry klikové hřídele se také určují v závislosti na vrtání válce. Kliková hřídel bude vyrobena z oceli 12 050.

Tab. 7 Návrh hlavních rozměrů klikové hřídele⁵⁸

Veličina	Značka	%D
Průměr hlavního čepu	$\varnothing d_2$	60÷80
Šířka hlavního čepu	b_2	40÷60
Průměr ojničního čepu	$\varnothing d_1$	60÷70
Šířka ojničního čepu	b_1	40÷60
Šířka ramena kliky	c	20÷50
Rozteč válců	P_V	112÷135

⁵⁷ Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

⁵⁸ RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8

Šířka ojnicního čepu b_1

$$b_1 = (0,4 \div 0,6) \cdot D [mm]$$

$$b_1 = (0,4 \div 0,6) \cdot 80 = 32 \div 48 mm \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{b_1 = 34 mm}$$

Šířka ramene klikové hřídele c

$$c = (0,2 \div 0,5) \cdot D [mm]$$

$$c = (0,2 \div 0,5) \cdot 80 = 16 \div 40 mm \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{c = 16 mm}$$

Rozteč válců P_v

$$P_v = (1,12 \div 1,35) \cdot D [mm]$$

$$P_v = (1,12 \div 1,35) \cdot 80 = 89,6 \div 108 mm \quad \Rightarrow \text{Volím } \underline{P_v = 106 mm}$$

4.5.1. Kinematika klikového mechanismu

Kinematický model klikového mechanismu nám určuje tři základní kinematické veličiny, a to dráhu, rychlost a zrychlení. Tyto veličiny jsou vypočítávány v závislosti na úhlu natočení klikové hřídele.

4.5.1.1. Dráha pístu

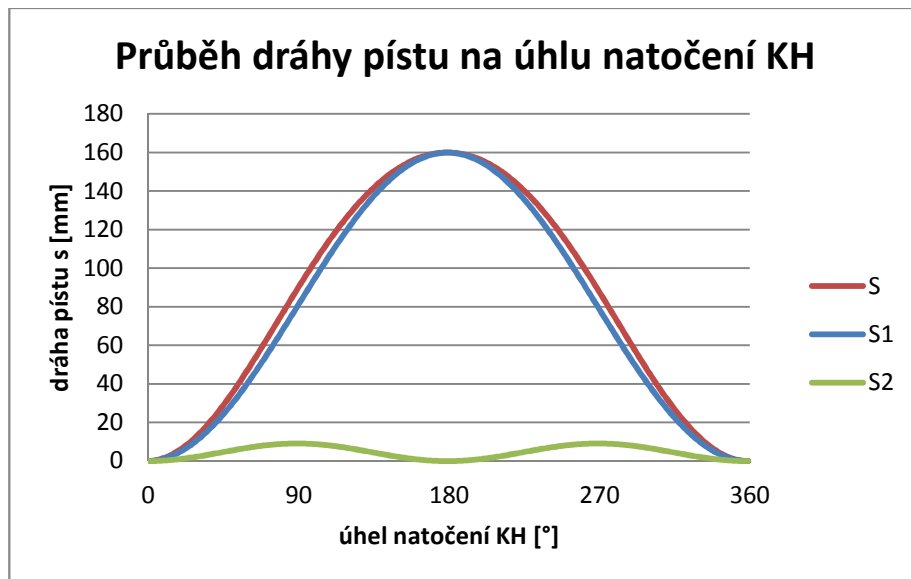
Pro výpočet dráhy pístu bylo použito následujícího vztahu:

$$s_{pi}(\alpha) = r \cdot \left[1 - \cos\alpha_i + \frac{\lambda_o}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha_i)) \right] [mm]$$

Dráha pístu se dále rozděluje na její 1. a 2. harmonickou složku:

$$s_{p1}(\alpha) = r \cdot (1 - \cos\alpha_i) [mm]$$

$$s_{p2}(\alpha) = r \cdot \frac{\lambda_o}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha_i)) [mm]$$



Graf 1. Průběh dráhy pístu na úhlu natočení klikové hřídele

4.5.1.2. Rychlost pístu

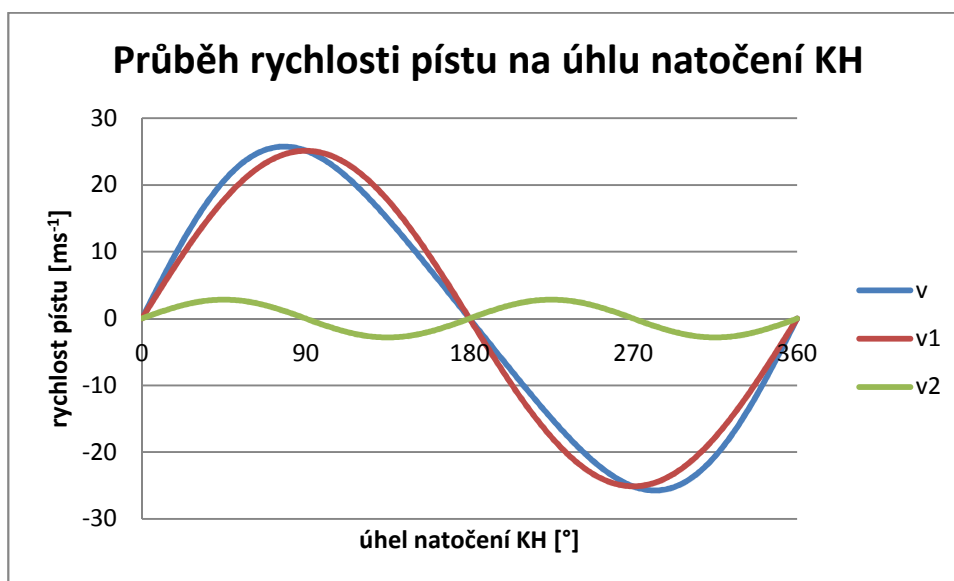
Pro výpočet rychlosti pístu bylo použito následujícího vztahu:

$$v_{pi}(\alpha) = r \cdot \omega \cdot \left(\sin\alpha_i + \frac{\lambda_o}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_i) \right) [mm \cdot s^{-1}]$$

Rychlost pístu se dále rozděluje na její 1. a 2. harmonickou složku:

$$v_{p1}(\alpha) = r \cdot \omega \cdot \sin\alpha_i [mm \cdot s^{-1}]$$

$$v_{p2}(\alpha) = r \cdot \omega \cdot \frac{\lambda_o}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_i) [mm \cdot s^{-1}]$$



Graf 2. Průběh rychlosti pístu na úhlu natočení klikové hřídele

4.5.1.3. Zrychlení pístu

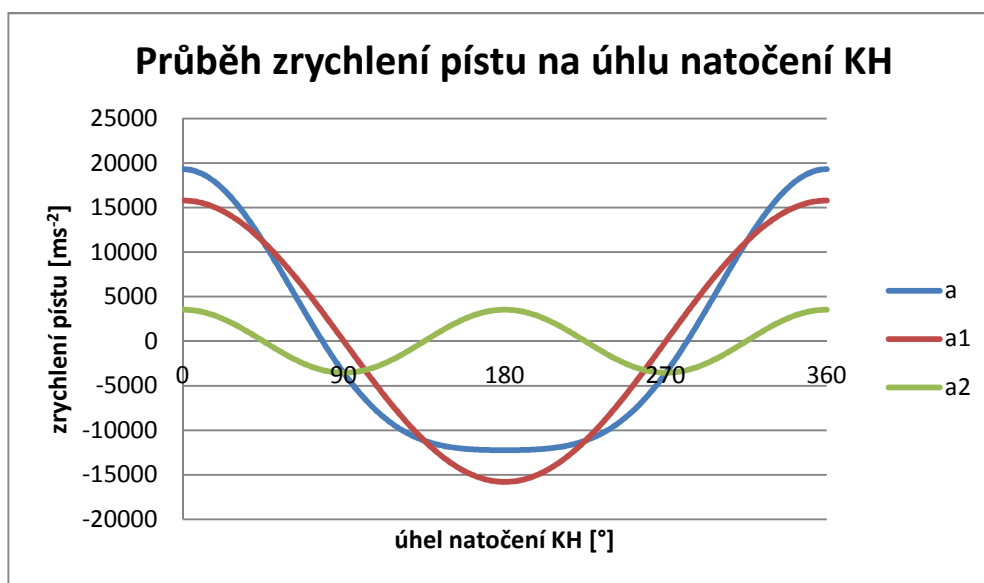
Pro výpočet zrychlení pístu bylo použito následujícího vztahu:

$$a_{pi}(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\alpha_i + \lambda_o \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i)) [mm \cdot s^{-2}]$$

Zrychlení pístu se dále rozděluje na její 1. a 2. harmonickou složku:

$$a_{p1}(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha_i [mm \cdot s^{-2}]$$

$$a_{p2}(\alpha) = r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_o \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i) [mm \cdot s^{-2}]$$



Graf 3. Průběh zrychlení pístu na úhlu natočení klikové hřídele

5. Závěr

Cílem práce bylo navržení hlavní součásti klikového mechanismu a vytvoření programu pro jejich výpočet. V první části práce jsem se zaměřil na materiály užívané v konstrukci pístových spalovacích motorů a popis funkcí jednotlivých součástí. Ve druhé části práce jsem se zaměřil na výpočty jednotlivých dílů klikového mechanismu. Výpočty byly provedeny podle odborné literatury na základě doporučených hodnot opírajících se o vrtání válce a typ motoru.

Při výpočtech jsem si nejprve zvolil základní parametry motoru – výkon, otáčky a počet válců motoru. Pomocí těchto hodnot jsem dopočítal další základní parametry motoru. Následoval návrh základních rozměrů pístu, ojnice a klikové hřídele. Dále byl proveden podrobnější výpočet pístu a ojnice. Píst byl pevnostně spočítán tak, aby dno pístu a nejslabší místo pláště pístu, které se nachází v drážce pro stírací pístní kroužek, vyhovovalo maximálnímu namáhání motoru. U ojnice jsem se zaměřil na pevnostní výpočet oka ojnice. Následně byl vytvořen kinematický model klikového ústrojí, který zobrazuje dráhu, rychlost a zrychlení pístu v závislosti na natočení klikové hřídele.

Dalším bodem bylo vytvoření programu pro veškeré výpočty, které byly užity v mé práci. Program jsem vytvořil v programu Microsoft Office Excel 2007. Díky tomuto programu jsem si sám zkontroloval mé výsledky a zároveň docílil toho, že následné nutné změny vzhledem k nevyhovujícím pevnostním výpočtům byly okamžitě vypočteny. Program je vytvořen pro čtyřválcový motor, tudíž se volí pouze maximální výkon a otáčky motoru.

Posledním krokem mé práce bylo vytvoření 3D modelu a jeho výkresové dokumentace. Tento model jsem vytvořil pro lepší ilustraci a představu o rozměrech jednotlivých dílů. 3D návrh klikového mechanismu a 2D výkresovou dokumentaci jsem provedl v programu Catia V5R19.

Na závěr je nutno říci, že výpočty veškerých částí jsou pouze základní a informativní a pro výrobu kteréhokoliv dílu by bylo potřeba mnoha dalších výpočtů pomocí MKP, analýz a experimentálních pokusů.

6. Použité zdroje

Literární zdroje

VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4.

HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.

JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily motory*. 4. vyd. Brno: Avid s.r.o., 2007. ISBN 978-80-903671-7-3.

RAUSCHER, Jaroslav. *Ročníkový projekt*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996. ISBN 80-214-0780-8.

KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I*. Praha: SNTL, 1978.

KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. Praha: SNTL, 1983.

VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1.

LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA, Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3. přepr. vyd. Praha: Scientia, 1999, 985 s. ISBN 80-718-3164-6.

Internetové zdroje

Total Materia: Světově nejobsáhlejší databáze materiálů [online]. 1999 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://keytometals.com/>

7. Seznam použitých symbolů

a	[mm]	šířka pístního kroužku
a_1	[-]	součinitel normálové síly
a_2	[-]	součinitel ohybového momentu
a_{p1}	[mm·s ⁻²]	1. složka harmonického pohybu zrychlení pístu
a_{p2}	[mm·s ⁻²]	2. složka harmonického pohybu zrychlení pístu
a_{pi}	[mm·s ⁻²]	zrychlení pístu
b_1	[mm]	šířka ojnicního čepu klikové hřídele
b_2	[mm]	šířka hlavního čepu klikové hřídele
c	[mm]	šířka ramene klikové hřídele
c_s	[m·s ⁻¹]	střední pístová rychlost
D	[m]	vrtání válce
d_1	[mm]	průměr ojnicního čepu klikové hřídele
d_2	[mm]	průměr hlavního čepu klikové hřídele
$D_{\dot{c}}$	[mm]	průměr pístního čepu
D_{D1}	[mm]	vnitřní průměr hlavy ojnice
D_{D2}	[mm]	vnější průměr hlavy ojnice
D_{H1}	[mm]	vnitřní průměr oka ojnice
D_{H2}	[mm]	vnější průměr oka ojnice
d_N	[m]	průměr drážky pístního kroužku
d_{vn}	[mm]	vnější průměr pouzdra oka ojnice
d_x	[m]	průměr plochy S_x
e	[mm]	přesah pouzdra
\mathcal{E}	[-]	kompresní poměr
E_b	[MPa]	modul pružnosti v tahu pro bronz
E_o	[MPa]	modul pružnosti v tahu pro ocel
e_t	[mm]	přesah pouzdra vlivem zahřátí
F_{nos}	[N]	náhradní síla působící ve vazbě
F_{ns}	[N]	síla ve vazbě
F_{nt}	[N]	normálová síla v průřezu I-I
F'_{pmax}	[N]	maximální síla působící na dno pístu
F'_{sp}	[N]	setrvačná síla pístní skupiny
$F_{sp,x}$	[N]	setrvačná síla koruny pístu
h	[m]	šířka kontrolního průřezu oka ojnice
$H_{\dot{c}}$	[mm]	vzdálenost Seggerových kroužků
H_D	[mm]	šířka hlavy ojnice
H_H	[mm]	šířka oka ojnice

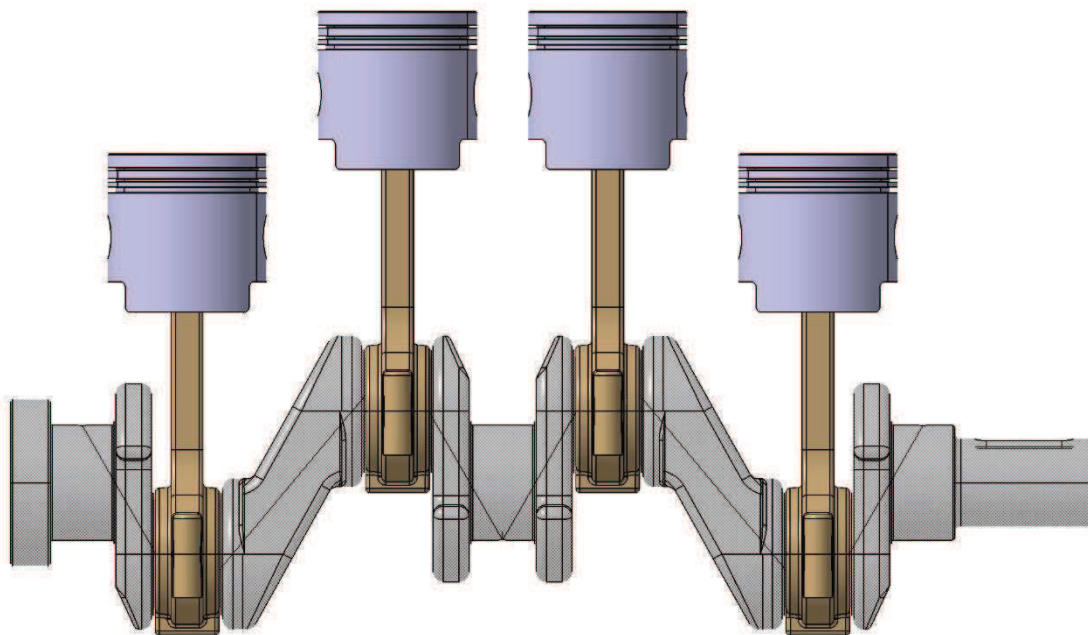
H_k	[mm]	kompresní výška pístu
H_m	[mm]	výška ostatních můstků
H_{m1}	[mm]	výška prvního můstku
H_{m2}	[mm]	výška druhého můstku
H_o	[mm]	vzdálenost mezi nálitky pro pístní čep
H_p	[mm]	výška pístu
H_{pl}	[mm]	výška pláště pístu
i	[-]	počet válců motoru
J	[-]	empirický součinitel
k	[-]	koeficient bezpečnosti
k_l	[-]	koeficient vlisování pouzdra v oku ojnice
k_k	[-]	zdvihový poměr
L_{oj}	[mm]	délka ojnice
M_{omax}	[Nm]	maximální ohybový moment
M_{os}	[Nm]	náhradní moment působící ve vazbě
m_{psk}	[kg]	hmotnost pístní skupiny
M_s	[Nm]	moment ve vazbě
M_t	[Nm]	ohybový moment v průřezu I-I
m_x	[kg]	hmotnost koruny pístu
n	[s ⁻¹]	volené maximální otáčky motoru
P	[kW]	volený výkon motoru
p'	[MPa]	měrný tlak mezi okem a pouzdrům ojnice
p^*_{max}	[Pa]	maximální bezpečný tlak ve válci
p_b	[Pa]	barometrický tlak
p_e	[Pa]	střední efektivní tlak
P_l	[Pa]	litrový výkon motoru
p_{max}	[Pa]	maximální tlak ve válci
P_v	[mm]	rozteč válců
r'	[m]	poloměr těžiště příčného průřezu
r_k	[m]	poloměr klikového hřídele
S_o	[m ²]	šířka příčného průřezu oka ojnice
S_p	[m]	radiální vůle pístního kroužku
S_p	[m ²]	průřez pouzdra ojnice
s_{p1}	[mm]	1. složka harmonického pohybu dráhy pístu
s_{p2}	[mm]	2. složka harmonického pohybu dráhy pístu
s_{pi}	[mm]	dráha pístu
S_x	[m ²]	minimální příčný průřez pístu
T	[mm]	šířka ojnice

t_o	[mm]	tloušťka dřívku ojnice
t_{o1}	[mm]	tloušťka ojnice
V_l	[m ³]	celkový objem spalovacího prostoru
V_k	[m ³]	kompresní objem
v_{p1}	[mm·s ⁻¹]	1. složka harmonického pohybu rychlosti pístu
v_{p2}	[mm·s ⁻¹]	2. složka harmonického pohybu rychlosti pístu
v_{pi}	[mm·s ⁻¹]	rychlost pístu
V_z	[m ³]	zdvihový objem motoru
W_o	[m ³]	modul odporu v ohybu
Z	[m]	zdvih pístu
α_b	[K ⁻¹]	součinitel tepelné roztažnosti bronzu
α_o	[K ⁻¹]	součinitel tepelné roztažnosti oceli
δ	[mm]	tloušťka dna pístu
Δt	[K]	ohřev oka ojnice
κ	[-]	Poissonova konstanta
λ_o	[-]	ojniční poměr
μ	[-]	Poissonova konstanta materiálu
π	[-]	Ludolfovo číslo
σ_a	[MPa]	napětí na vnějším vlákne
σ_{as}	[MPa]	normálové napětí ve vnějším vlákne
σ_{at}	[MPa]	normálové napětí v průřezu I-I
σ_{dov}	[MPa]	dovolené napětí materiálu
σ_i	[MPa]	napětí na vnitřním vlákne
σ_{is}	[MPa]	normálové napětí ve vnitřním vlákne
σ_{max}	[MPa]	maximální napětí únavového cyklu
σ_{min}	[MPa]	minimální napětí únavového cyklu
σ_{omax}	[MPa]	maximální ohybové napětí
σ'_{omax}	[MPa]	maximální ohybové napětí pro vetknutou desku
σ_t	[MPa]	tahové napětí
σ_{tl}	[MPa]	napětí vyvolané tlakem pístu
τ	[-]	taktnost motoru
ω_{max}	[s ⁻¹]	maximální úhlová rychlost klikové hřídele

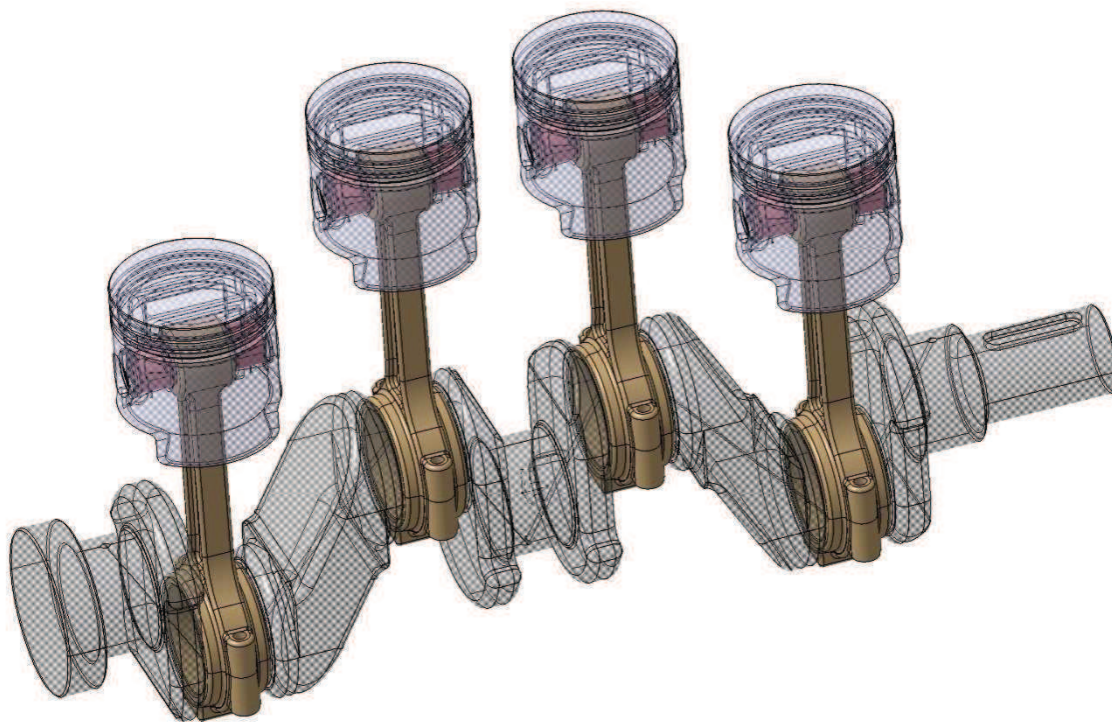
8. Přílohy

- P1 Pohledy vytvořeného 3D modelu, *vytvořeno v programu Catia V5R19*
- P2 Výrobní výkres sestavy klikového mechanismu motoru (číslo výkresu 0000), klikové hřídele motoru (číslo výkresu 0001), pístu motoru (číslo výkresu 0002), sestavy ojnice motoru (číslo výkresu 0100), ojnice motoru (číslo výkresu 0101) a hlavy ojnice (číslo výkresu 0102), *vytvořeno v programu Catia V5R19.*
- P3 CD (program, 3D model)

P1

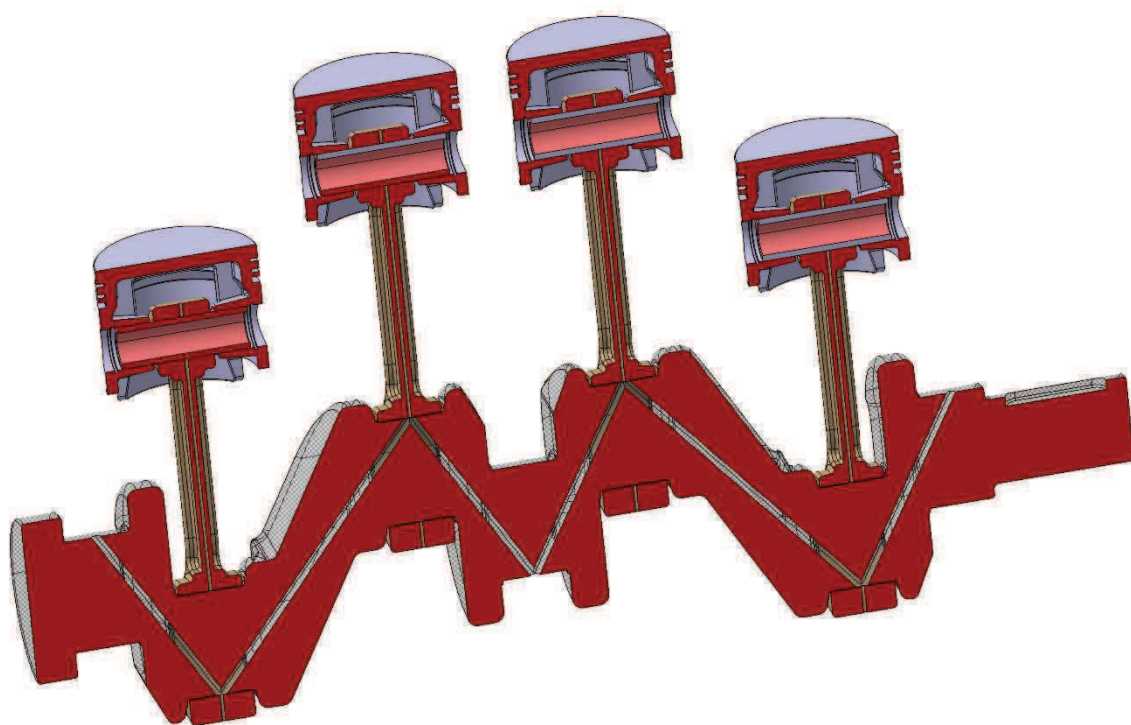


Obr. 5.1a Sestava klikového mechanismu navržených dílů

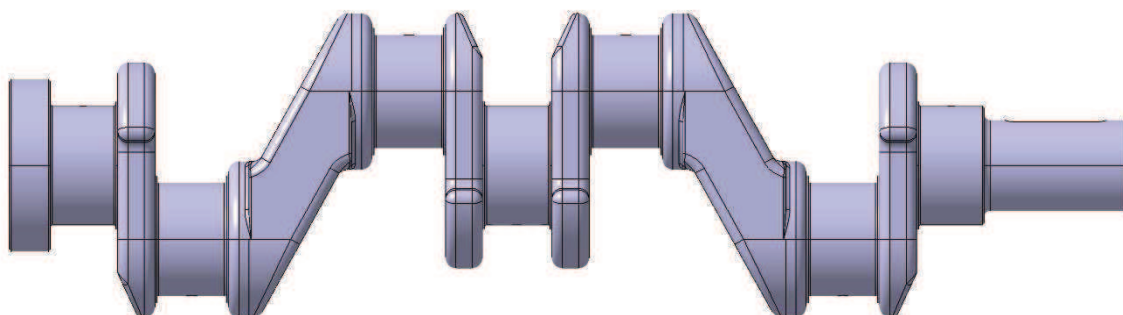


Obr. 5.1b Sestava klikového mechanismu navržených dílů

P1

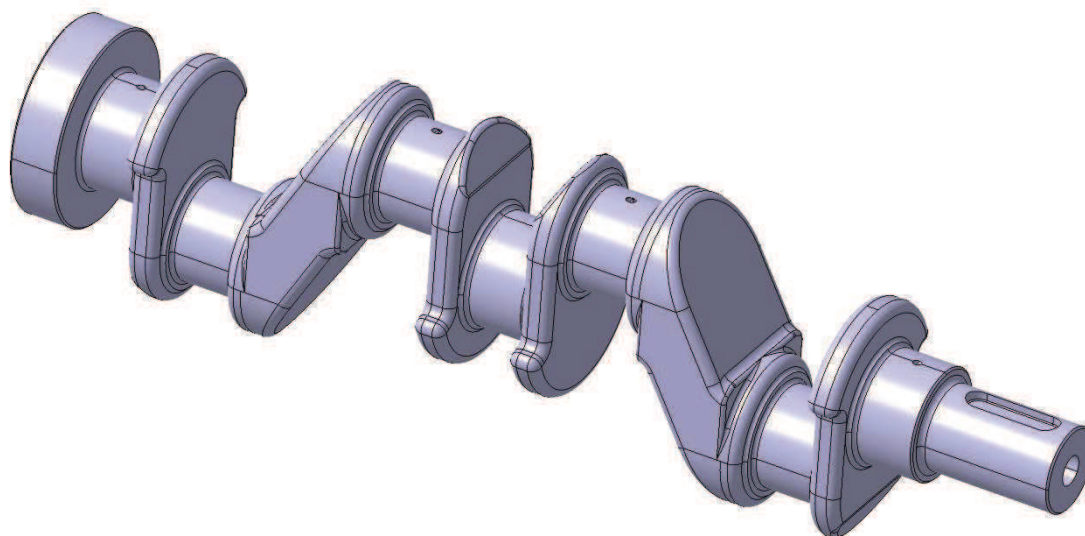


Obr. 5.1c Řez sestavou klikového mechanismu navržených dílů

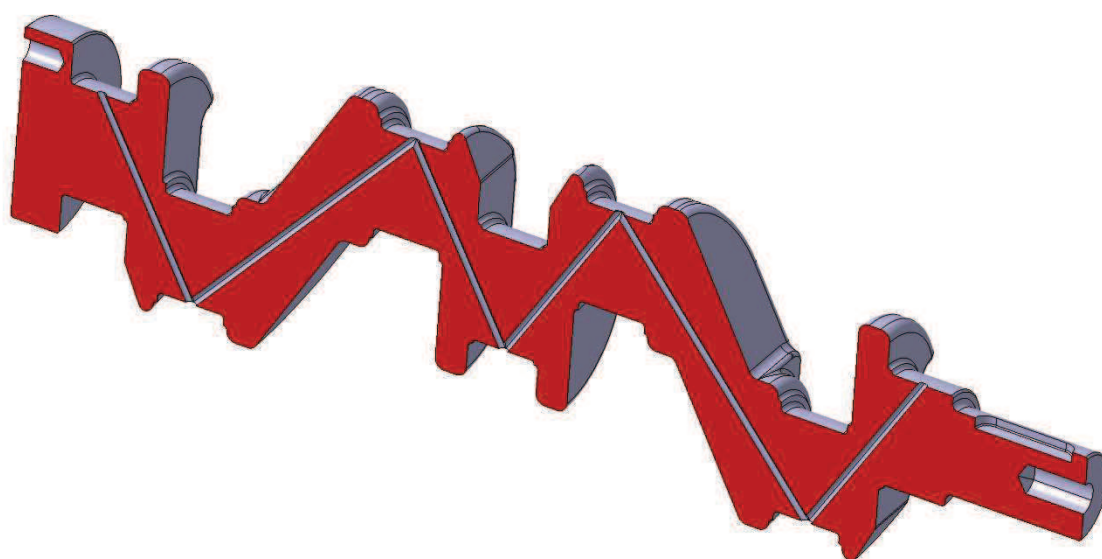


Obr. 5.2a Návrh klikového hřídele

P1

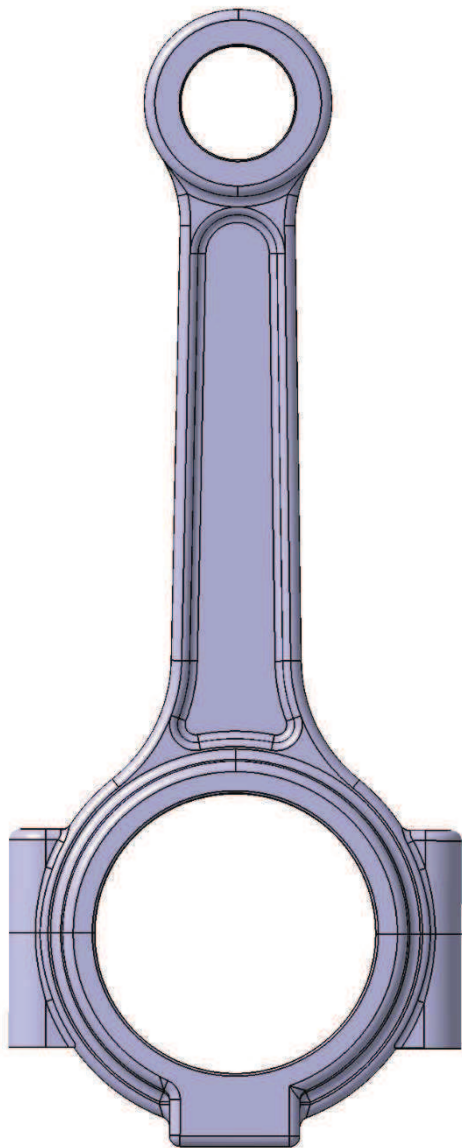


Obr. 5.2b Návrh klikového hřídele

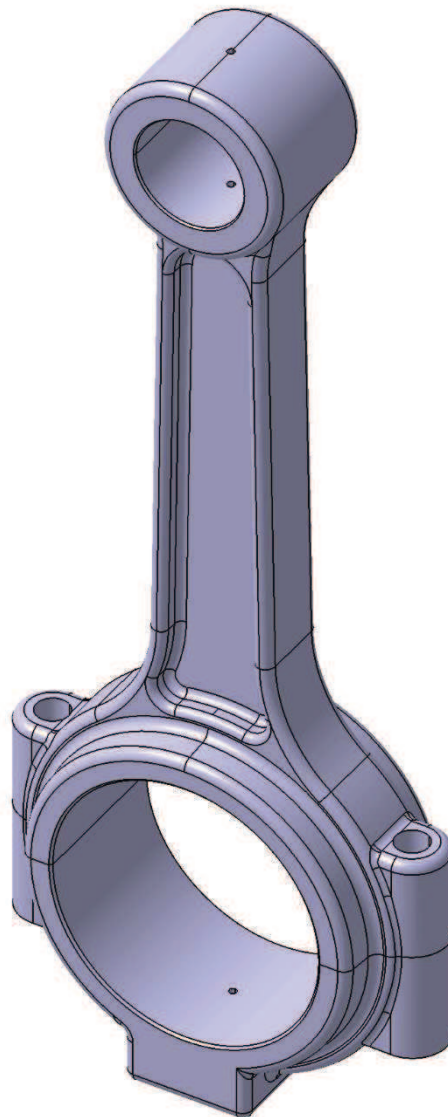


Obr. 5.2c Řez navrženým klikovým hřídelem

P1

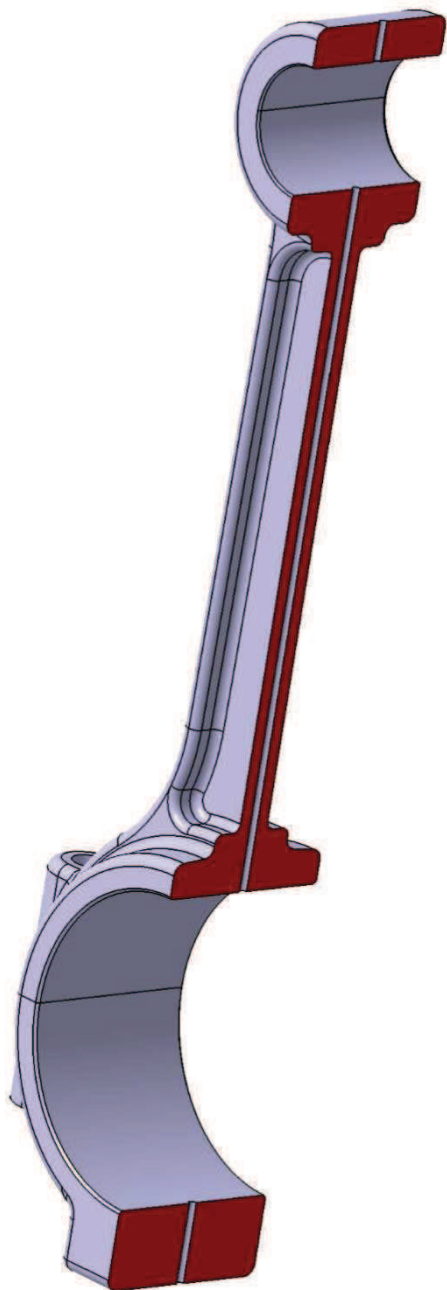


Obr. 5.3a Návrh ojnice

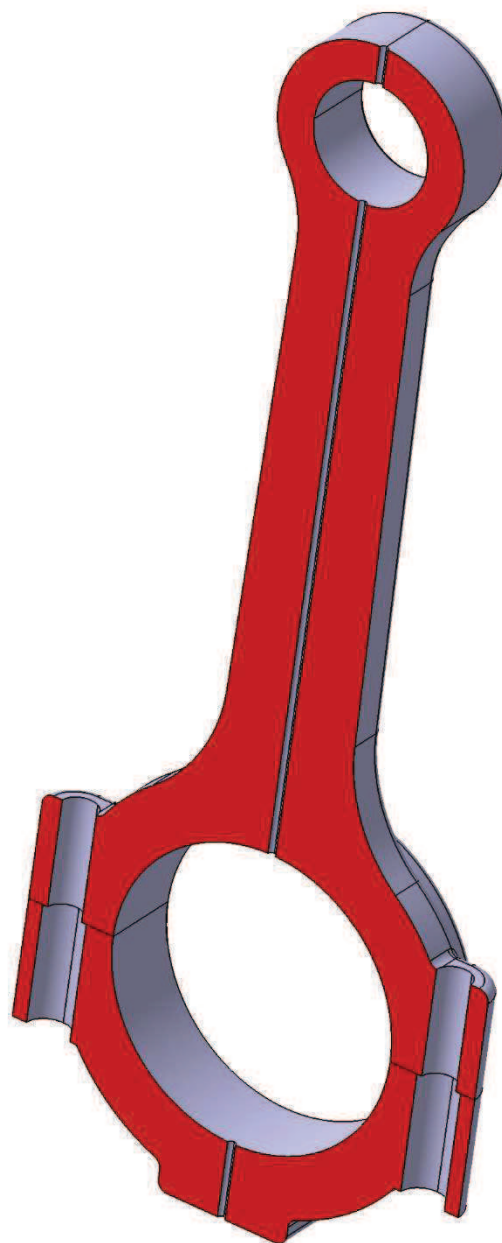


Obr. 5.3b Návrh ojnice

P1

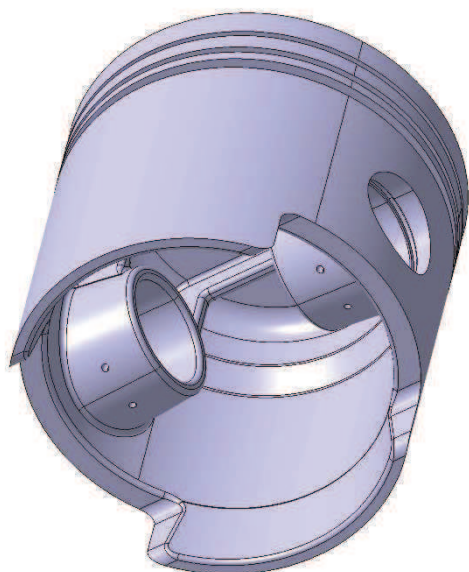


Obr. 5.3c Příčný řez navrženou ojnici

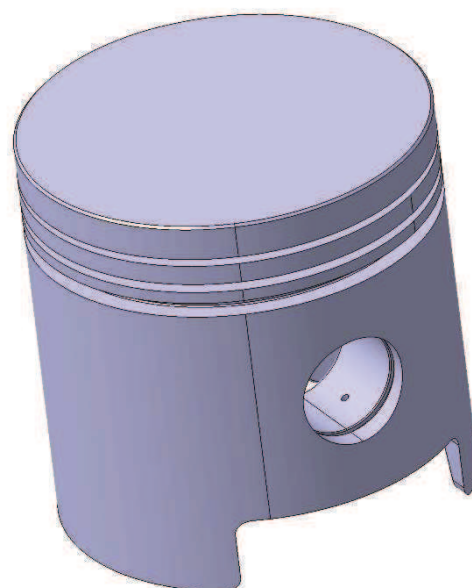


Obr. 5.3d Čelní řez navrženou ojnici

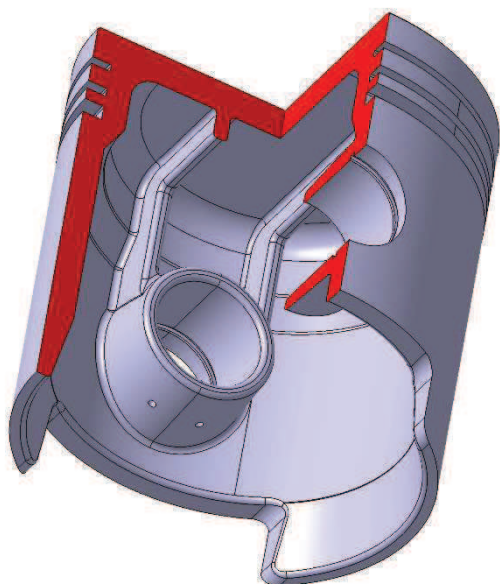
P1



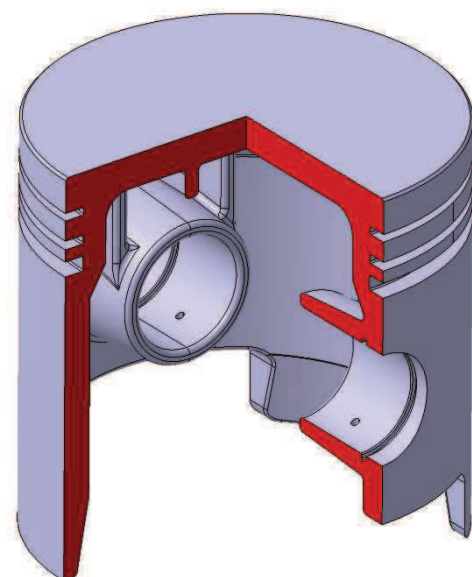
Obr. 5.4a Návrh pístu motoru



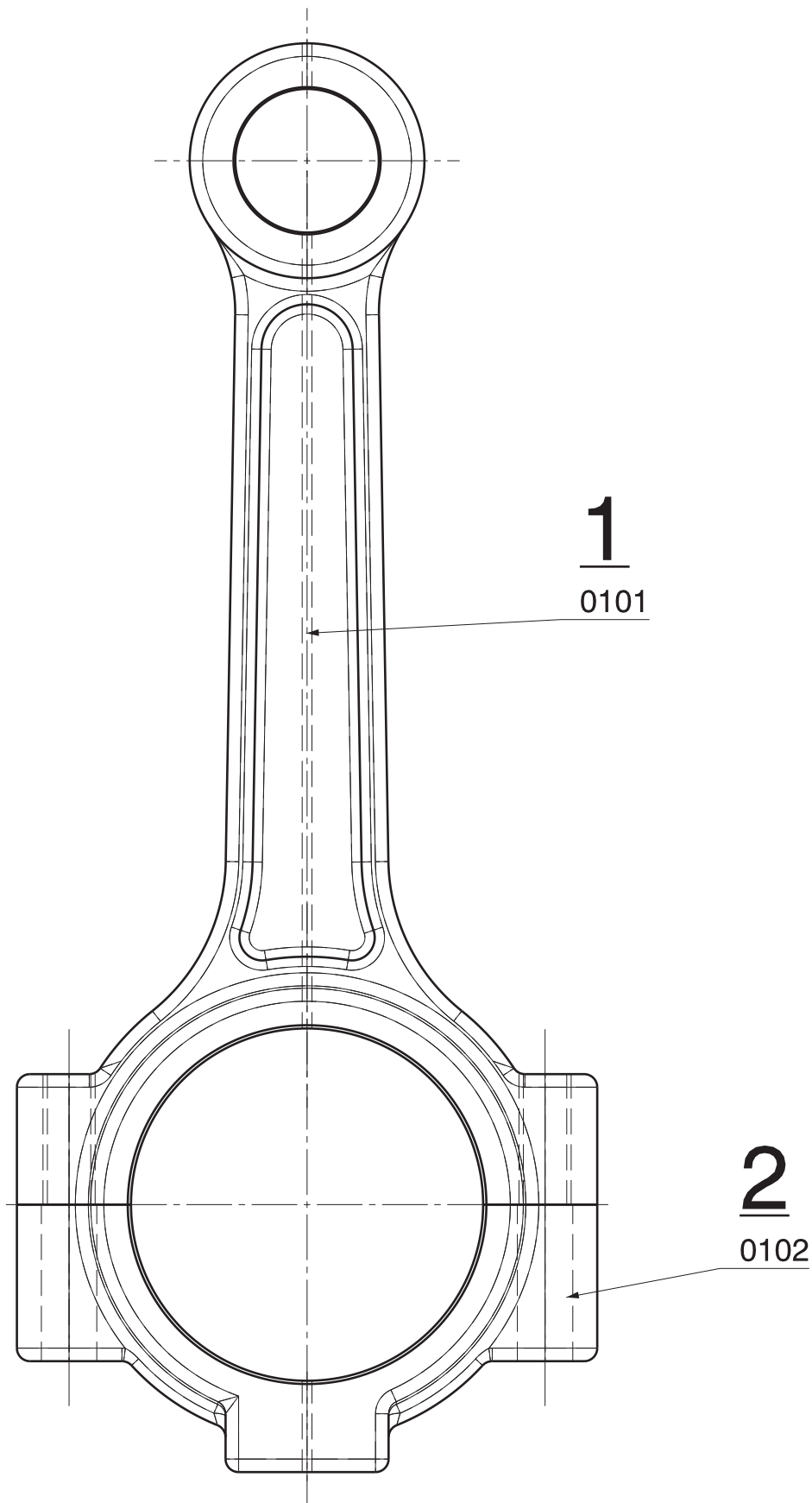
Obr. 5.4b Návrh pístu motoru



Obr. 5.4c Částečný řez navrženým pístem



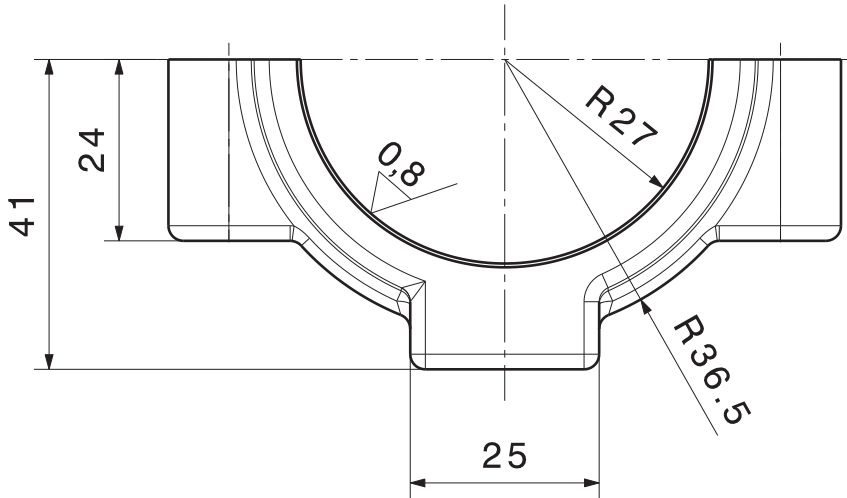
Obr. 5.4d Částečný řez navrženým pístem



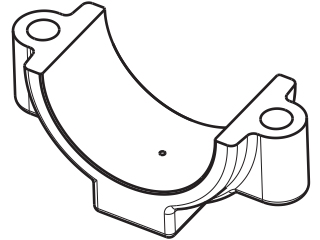
2	Hlava ojnice	0102	12 050		1
1	Ojnice	0101	12 050		1
POZ.	NÁZEV SOUČÁSTKY	Č. VÝKRESU/OBJ. KÓD	MATERIAL/FIRMA	POLOTOVAR/SKLAD	KS
<p>Tato dokumentace je určena pouze pro důvěrné použití. Další vyžívání a předávání jen s výslovným souhlasem. Všechna práva vyhrazena. This document has to be treated confidentially. Its contents are not to be passed on, duplicated, exploited or disclosed without our express permission. All rights reserved, especially the right to apply for protective rights.</p>	Datum: 27.04.2014	Hmotnost: [kg]	Název: SESTAVA OJNICE		Počet kusů: 1
	Kreslil: Tomas Svetlik	Tel.:			
UNIVERZITA PARDUBICE		Pracoviště:	Číslo výkresu: 0100		Meřítko: 1:1 1 / 1
		Projekt: BAKALARSKA PRACE			

1,6 / (x /)

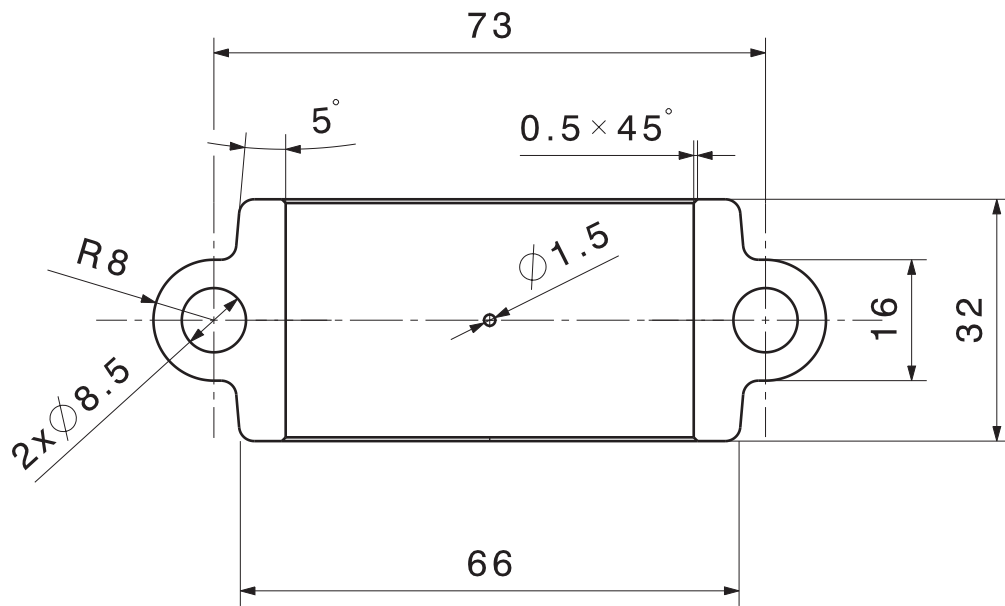
Front view



Isometric view
Scale: 1:2



Top view



NEKOTOVANE RADIUSY R2

Uprava hran dle: ČSN ISO 13715 	Nepředepsané mezní úchytky délkových a dílkových rozměrů dle: ČSN ISO 2768-1: m Nepředepsané geometrické tolerance dle: ČSN ISO 2768-2: H	Tepelné zprac.:		Materiál: 12 050		
		Povrchová úprava:		Sestava: SESTAVA OJNICE 0100		Pozice: 2
	Tato dokumentace je určena pouze pro dočasné použití. Další využití a předávání jen s výslovným souhlasem. Všechna práva vyhrazena, zvláště patentesprávní vztahy. This document has to be treated confidentially. Its contents are not to be passed on, duplicated, exploited or disclosed without our express permission. All rights reserved, especially the right to apply for protective rights.	Datum: 02.05.2014	Hmotnost: 0,26 [kg]	Název: Hlava OJNICE		Počet kusů: 1
		Kreslil: Tomas Svetlik	Tel.:			Číslo výkresu: 0102
UNIVERZITA PARDUBICE		Původ dílce:		0102		1 / 1
		Projekt: BAKALARSKA PRACE				1 / 1