

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

HNACÍ ÚSTROJÍ ŘADOVÉHO PĚTIVÁLCOVÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

POWERTRAIN OF IN-LINE FIVE-CYLINDER SPARK IGNITION ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ROMAN SMETANA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

BRNO 2008

Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690

SMETANA, R. *Hnací ústrojí řadového pětiválcového zážehového motoru* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 32 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Abstrakt

V úvodu práce je uvedeno základní rozdělení zážehových motorů a fáze činnosti zážehových motorů. Vlastní práce obsahuje výpočet termodynamického cyklu a výpočet maximálního tlaku ve válci, návrhnutí základních rozměrů pístní skupiny a pevnostní kontrola oka ojnice. V závěru jsou dosažené výsledky zhodnoceny.

Abstrakt

In preamble of bachelor's thesis is reffered basic partition of spark ignition engines and phases actions of spark ignition engines. The bachelor's thesis contains calculation of thermodynamic cycle and calculation of maximum cylinder pressure, proposition basic sizes piston group and solidity verification of connection-rod eye. At close are achieved results reviewed.

Klíčová slova

Motor, píst, pístní skupina, oko ojnice, indikátorový diagram, zakřivený prut, tlak, napětí, setrvačná síla

Key words

Engine, piston, piston group, connection-rod eye, indicator diagram, curved bar, pressure, strain, inertial force

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně bez cizí pomoci.
Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury,
uvedené v seznamu.

V Brně dne:

.....
podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

Obsah práce

Úvod	6
1. Parametry motoru	7
2. Výpočet maximálního tlaku ve válci	8
3. Návrh hlavních rozměrů pístu.....	11
3.1 Volba rozměrů konstrukčních prvků pístu.....	12
3.2 Přibližná hmotnost pístní skupiny.....	16
4. Návrh základních rozměrů ojnice	18
5. Pevnostní kontrola oka ojnice.....	19
5.1 Měrný tlak mezi pouzdrem a okem ojnice.....	19
5.2 Namáhání oka ojnice setrvačnou silou	21
5.3 Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů.....	24
5.4 Výpočet bezpečnosti ojnice	26
Závěr	27
Seznam použitých zdrojů	28
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	29

Úvod

Zážehové motory jsou motory, které jako palivo používají benzin, ale mohou také používat jako alternativu propan-butan (LPG), zemní plyn (CNG), bionaftu nebo alkohol. Zážehové motory se dělí na čtyřdobé nebo dvoudobé motory. [5]

Dvoudobé motory:

Dvoudobý motor je jednodušší, nemá ventilový rozvod a kombinuje vždy dvě doby dohromady. Při zdvihu pístu dochází ke kompresi a sání, při expanzi je píst tlačěn dolů a souběžně probíhá fáze výfuku. Dvoudobý motor by měl mít teoreticky dvojnásobnou účinnost proti motoru čtyřdobému, v praxi tomu tak ale není. Problémy při souběhu fází vedou k nedokonalému nasátí směsi a jen částečnému využití její energie. Ve válci zůstává část výfukových plynů a naopak do výfuku odchází část nespálené směsi. Dvoudobý motor má sice o něco vyšší výkon, ale vyšší spotřebu a vyšší exhalace škodlivých látek. Navíc je třeba mazat klikový mechanismus buď mícháním oleje do paliva nebo odděleným mazacím systémem, který odstraňuje hlavní výhodu dvoudobého motoru - jeho jednoduchost. [5]

Čtyřdobé motory:

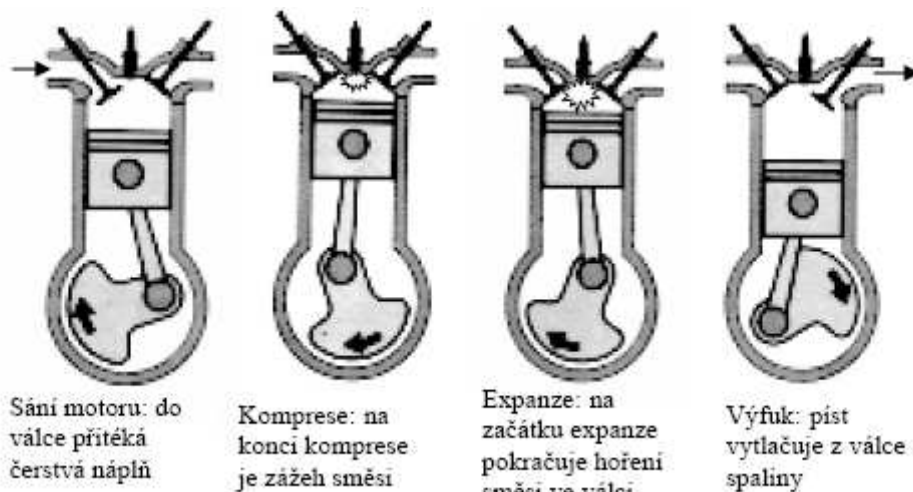
Čtyřdobý motor má čtyři základní fáze činnosti (Obr.1):

Sání - do válce je nasávána směs vzduchu s palivem, píst se pohybuje dolů

Komprese - píst se pohybuje vzhůru a stlačuje zápalnou směs paliva se vzduchem

Expanze - stlačená směs je zapálena zapalovací svíčkou, exploduje a svým roztahováním tlačí píst dolů.

Výfuk - spaliny jsou vytlačeny z válce, píst se pohybuje nahoru [5]



Obr.1 Fáze čtyřdobého zážehového motoru [2]

Zápalná směs se dříve připravovala v karburátorech, novější motory používají vstřikování paliva. Vstřikování může být nepřímé (do sacího potrubí) nebo přímé (rovnou do válce). Motor používá pro otvírání a zavírání sacího a výfukového kanálu ventily, ovládané vačkovými hřídeli. [5]

Pro svou práci jsem si vybral motor z automobilu Volvo S70 2.4 (r.v.1997). Je to čtyřdobý řadový pětiválec z rozvodem DOHC o objemu 2435 cm³.



Obr.2 Motor Volvo S70 2,4 [7]

1. Parametry motoru

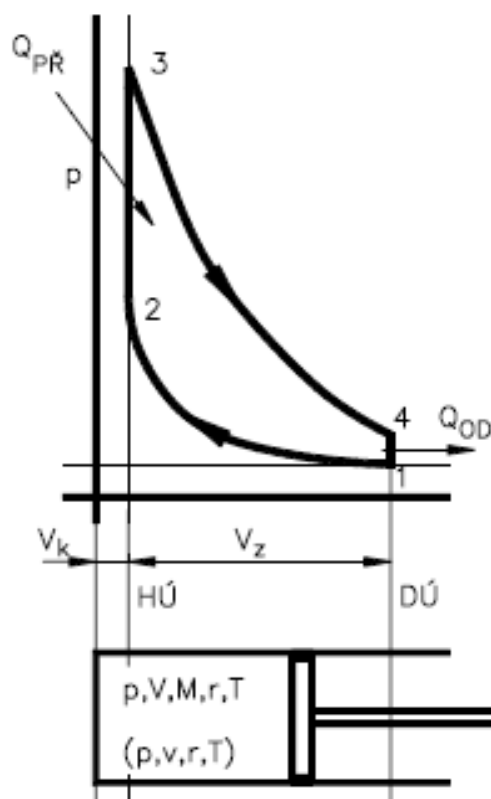
Vrtání	$D = 83 \text{ mm}$
Zdvih	$Z = 93 \text{ mm}$
Kompresní poměr	$\varepsilon = 10$
Teoretický směšovací poměr	$\lambda = 1/14,7$
Skutečný směšovací poměr	$\lambda_s = 1,1$
Atmosférický tlak	$p_1 = 98\,000 \text{ Pa}$
Teplota okolí	$T_1 = 293,15 \text{ K}$
Spodní výhřevnost paliva	$H_u = 43,2 \text{ MJ/kg}$
Izoentropický exponent	$\kappa = 1,4$
Plynová konstanta	$r = 287,1 \text{ kJ/kgK}$
Jmenovité otáčky motoru	$n = 5400 \text{ min}^{-1}$

2. Výpočet maximálního tlaku ve válci

Na obr. 3 je zakreslen ideální oběh pístových spalovacích motorů se stáloobjemovým přívodem tepla (označovaný někdy jako Ottův).

Celý oběh je sestaven ze změn: 1-2: adiabatická komprese
 2-3 izochorický přívod tepla
 3-4 adiabatická expanze
 4-1 izochorický odvod tepla

[2]



Obr. 3 Ideální indikátorový diagram (Ottův oběh) [2]

Zdvihový objem se vypočítá ze zadaných parametrů motoru, tj. vrtání válce a zdvihu válce:

$$V_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot Z \quad (2.1)$$

$$V_z = \frac{\pi \cdot 0,083^2}{4} \cdot 0,09 = \underline{\underline{4,869 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

Kompresní objem se vypočítá jako podíl zdvihového objemu a kompresní poměru zmenšeného o jedničku:

$$V_k = \frac{V_z}{\varepsilon - 1} \quad (2.2)$$

$$V_k = \frac{4,869 \cdot 10^{-4}}{10 - 1} = \underline{\underline{5,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3}}$$

Celkový objem, jak jde vidět i na Obr.3, je dán součtem zdvihového a kompresního objemu:

$$V_c = V_z + V_k \quad (2.3)$$

$$V_c = 4,869 \cdot 10^{-4} + 5,41 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{5,41 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

Pro výpočet hmotnosti paliva, které shoří při jednom oběhu potřebuji znát hmotnost vzduchu ve válci. Hmotnost vzduchu ve válci vypočítám ze stavové rovnice (2.4):

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad (2.4)$$

Po úpravě stavové rovnice (2.4) získávám vztah:

$$m_v = \frac{p_1 \cdot V_c}{r \cdot T_1} \quad (2.5)$$

$$m_v = \frac{98000 \cdot 5,41 \cdot 10^{-4}}{287,1 \cdot 293,15} = \underline{\underline{0,6299 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}}$$

Vypočtu hmotnost paliva:

$$m_{pa} = \frac{m_v \cdot \lambda}{\lambda_s} \quad (2.6)$$

$$m_{pa} = \frac{0,6299 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{14,7}}{1,1} = \underline{\underline{3,8957 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}}$$

Když znám hmotnost paliva, můžu vypočítat teplo přivedené při jednom oběhu:

$$Q = m_{pa} \cdot H_u \quad (2.7)$$

$$Q = 3,8957 \cdot 10^{-5} \cdot 43,2 \cdot 10^6 = \underline{\underline{1682,9607 \text{ J}}}$$

Při adiabatické kompresi se pohybuje píst z dolní úvrati do horní úvrati. Přičemž se snižuje objem a narůstá tlak. Tlak určím z rovnice pro adiabatickou kompresi (2.8).

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\kappa \quad (2.8)$$

Po úpravě rovnice (2.8) získám vztah pro tlak na konci komprese:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_c}{V_k} \right)^\kappa \quad (2.9)$$

$$p_2 = 98000 \cdot \left(\frac{5,41 \cdot 10^{-4}}{5,41 \cdot 10^{-5}} \right)^{1,4} = \underline{\underline{2,461 \text{ MPa}}}$$

Teplotu na konci komprese určím z rovnice pro adiabatickou kompresi (2.10).

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} \quad (2.10)$$

Po úpravě rovnice (2.10) získám vztah pro teplotu na konci komprese:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_c}{V_k} \right)^{\kappa-1} \quad (2.11)$$

$$T_2 = 293,15 \cdot \left(\frac{5,41 \cdot 10^{-4}}{5,41 \cdot 10^{-5}} \right)^{1,4-1} = \underline{\underline{736,36K}}$$

Při izochorickém přívodu tepla u zážehových motorů se využije asi 32% tepla z přivedeného tepla:

$$Q_{23} = -Q \cdot 0,32 \quad (2.12)$$

$$Q_{23} = -1682,9607 \cdot 0,32 = \underline{\underline{-538,547J}}$$

Výpočet maximálního tlaku:

$$p_3 = p_{\max} = p_2 - \frac{Q_{23}}{V_k} \cdot (\kappa - 1) \quad (2.13)$$

$$p_{\max} = 2,461 \cdot 10^6 + \frac{538,547}{5,41 \cdot 10^{-5}} \cdot (1,4 - 1) = \underline{\underline{6,443MPa}}$$

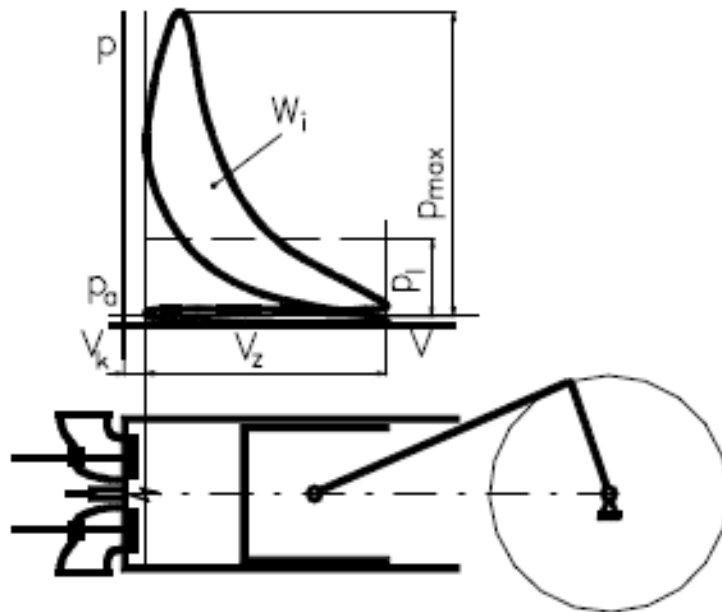
Teplotu na konci izochorického přívodu tepla určím z rovnice pro izochorický děj (2.14).

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} \quad (2.14)$$

Po úpravě rovnice (2.14) získám vztah:

$$T_3 = \frac{p_{\max} \cdot T_2}{p_2} \quad (2.15)$$

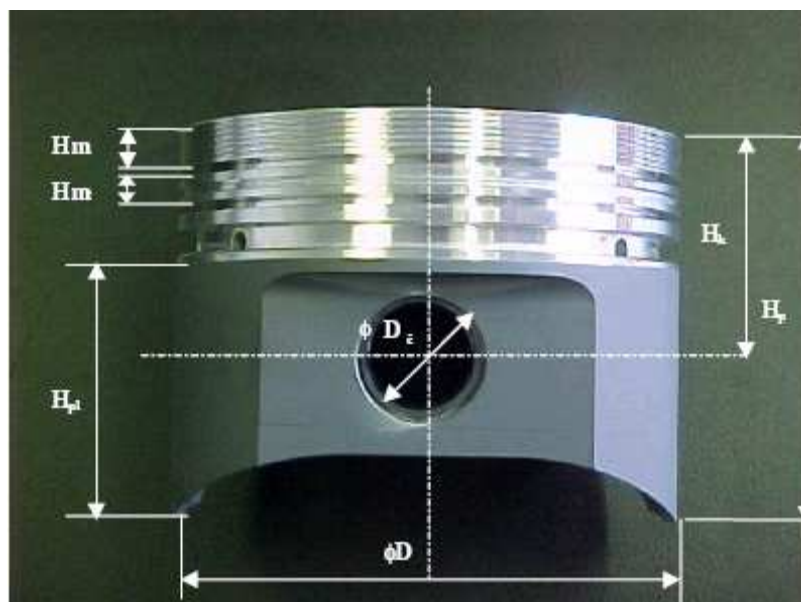
$$T_3 = \frac{6,443 \cdot 10^6 \cdot 736,36}{2,461 \cdot 10^6} = \underline{\underline{1927,464K}}$$



Obr. 4 Schéma čtyřdobého spalovacího motoru [2]

3. Návrh hlavních rozměrů pístu

Při návrhu hlavních rozměrů pístu vycházím z již dříve provedených a osvědčených konstrukcí. Pro návrh jsou rozměry vyjádřeny ve vztahu k vrtání válce D . Vyjádření těchto vztahů je buď tabulkové, nebo grafické. [1]



Obr.5 Hlavní rozměry pístu [1]

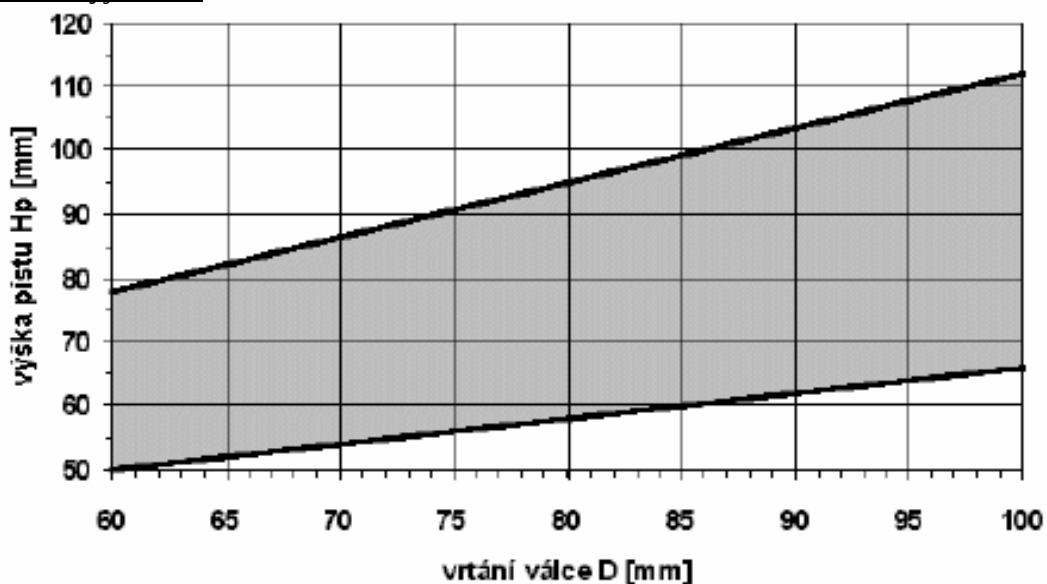
3.1 Volba rozměrů konstrukčních prvků pístu

Vyjádření tabulkou:

Tab. 3.1 Doporučené meze charakter. rozměrů pístu [1]

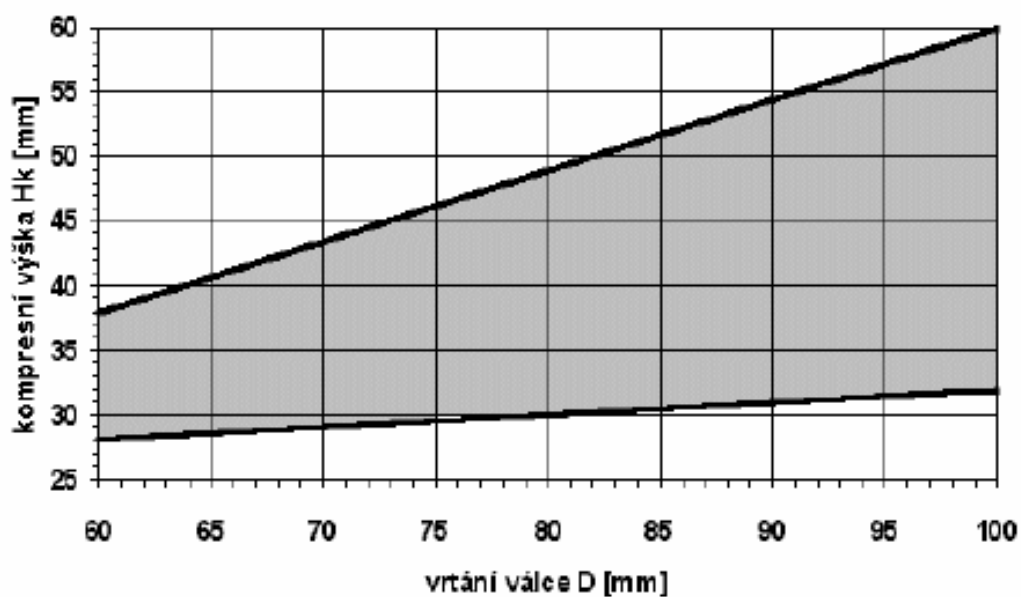
Veličina	Zážehový motor [%D]	Vypočítané meze
$\varnothing D$	100	83 mm
H_p	90 – 140	74,7 mm – 116,2 mm
H_k	50 – 70	41,5 mm – 58,1 mm
H_o	40	33,2 mm
$H_{\check{c}}$	85	70,5 mm
H_{m1}	6 – 10	4,98 mm – 8,3 mm
H_{m2}	3 – 6	2,49 mm – 4,98 mm
$\varnothing D_{\check{c}}$	25 – 28	20,75 mm – 23,24 mm
δ	5 – 7	4,15 mm – 5,81 mm

Grafické vyjádření:



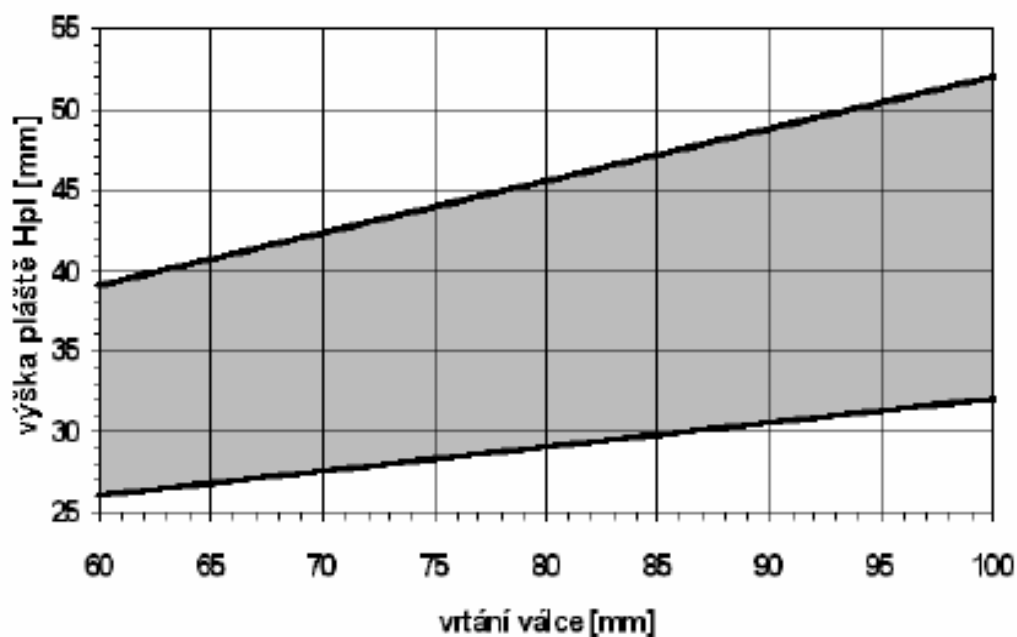
Obr. 6 Výška pístu H_p v závislosti na vrtní válce D [1]

dle Obr.6 jsou meze výšky pístu $H_p = 59 \text{ mm} - 97 \text{ mm}$



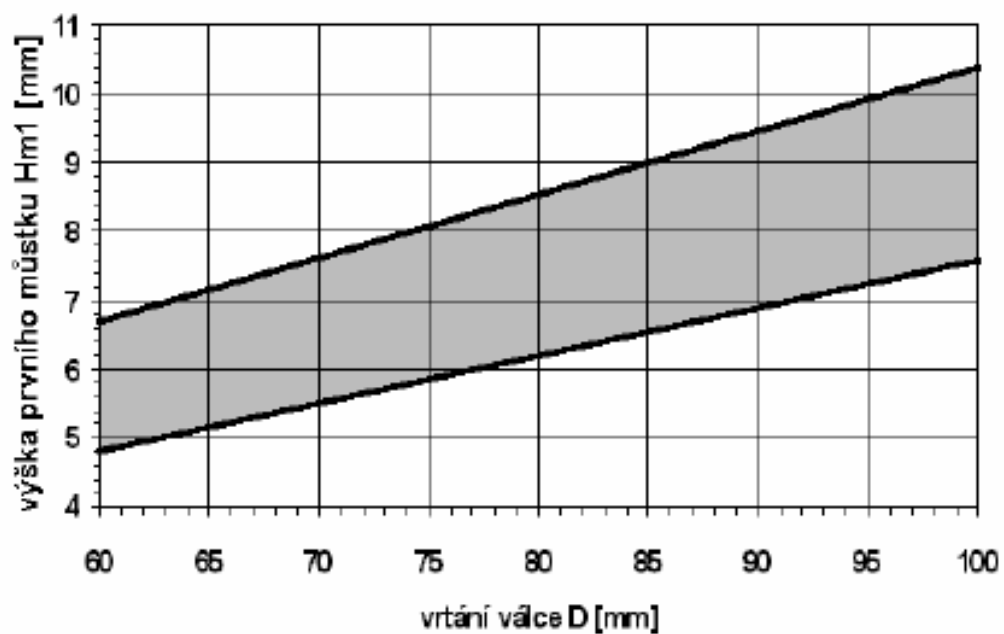
Obr.7 Kompresní výška H_k v závislosti na vtání válce D [1]

dle Obr.7 jsou meze kompresní výšky $H_k = 30 \text{ mm} - 52 \text{ mm}$



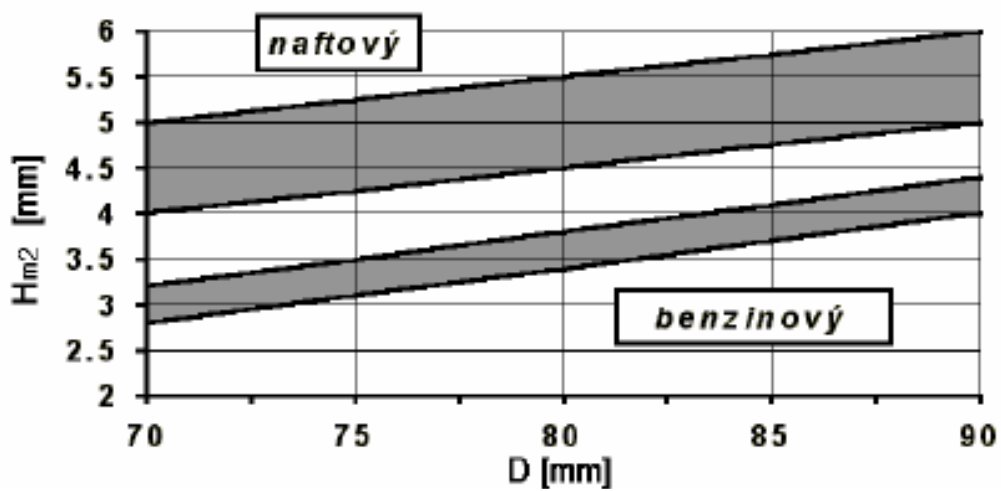
Obr.8 Výška pláště H_{pl} v závislosti na vtání válce D [1]

dle Obr.8 jsou meze výšky pláště $H_{pl} = 29 \text{ mm} - 47 \text{ mm}$



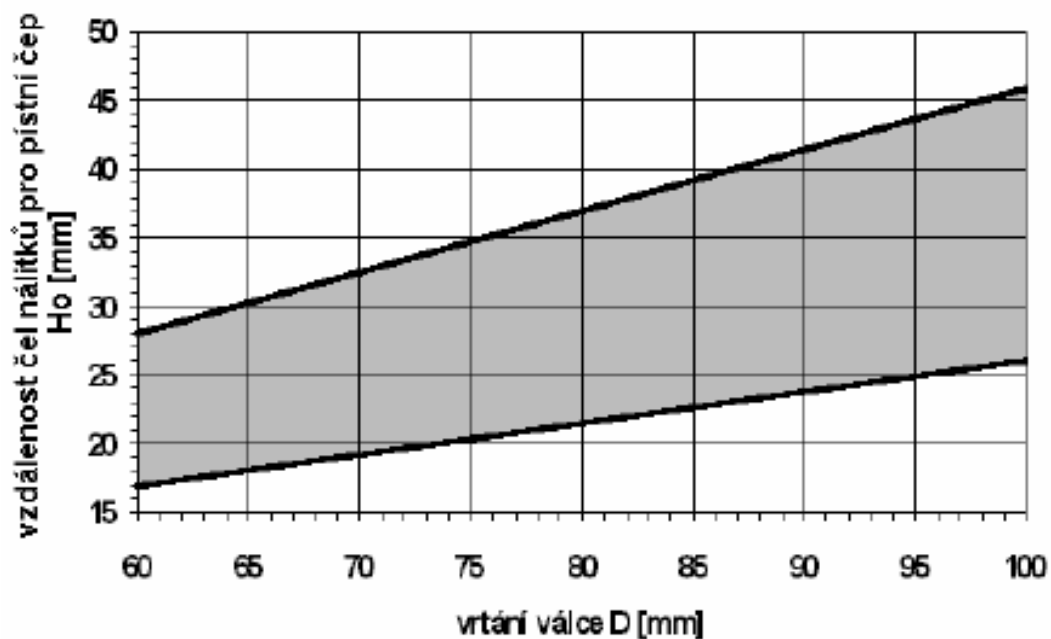
Obr. 9 Výška prvního můstku H_{m1} v závislosti na vrtání válce D [1]

dle Obr.9 jsou meze výšky prvního můstku $H_{m1} = 6,2 \text{ mm} - 8,9 \text{ mm}$



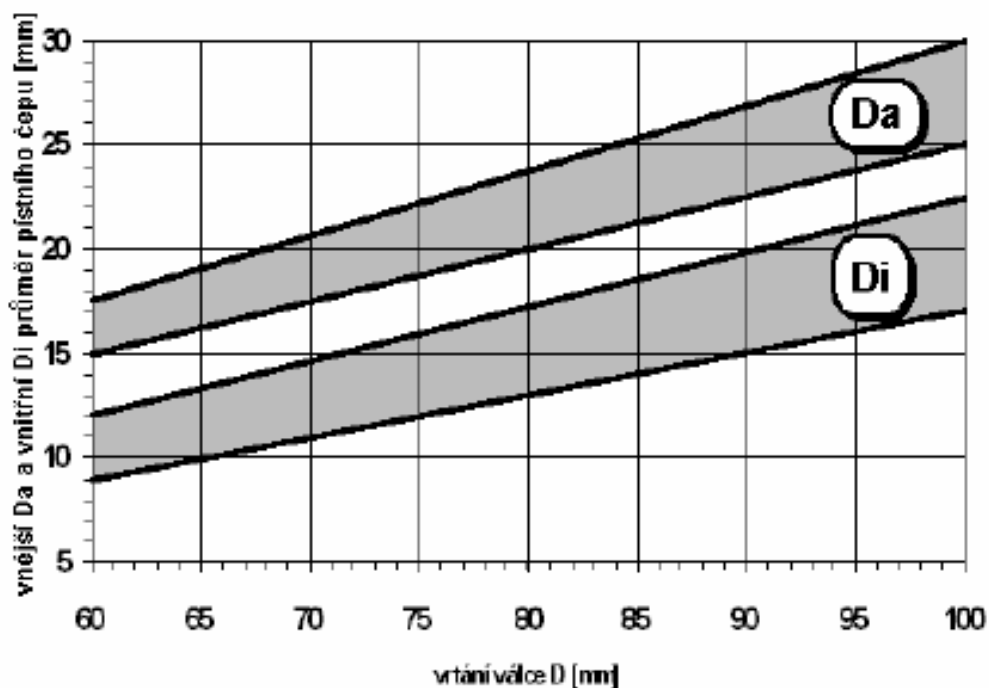
Obr. 10 Výška druhého můstku H_{m2} v závislosti na vrtání válce D [1]

dle Obr.10 jsou meze výšky druhého můstku $H_{m2} = 3,5 \text{ mm} - 4 \text{ mm}$



Obr.11 Vzdálenost čel nálitků pro pístní čep H_o v závislosti na vrtání válce D [1]

dle Obr.11 jsou meze vzdálenost čel nálitků pro pístní čep $H_o = 22,5\text{ mm} - 38,5\text{ mm}$



Obr.12 Vnější D_a a vnitřní průměr D_i pístního čepu v závislosti na vrtání válce D [1]

dle Obr.12 jsou meze pro vnější průměr $D_a = 21\text{ mm} - 24,5\text{ mm}$
 pro vnitřní průměr $D_i = 13,5\text{ mm} - 18\text{ mm}$

Pro zvolení rozměrů jsem zkombinoval oba způsoby a zvolené hodnoty zapsal do tab. 3.2.

Tab. 3.2 Zvolené charakter. rozměry pístu

Veličina	Zvolené rozměry
$\varnothing D$	83 mm
H_p	80 mm
H_k	45 mm
H_o	33,2 mm
H_{ξ}	70,55 mm
H_{m1}	7,5 mm
H_{m2}	3,8 mm
$\varnothing D_{\xi}$	22 mm
δ	5,5 mm
H_{pl}	38 mm
D_i	16 mm
D_a	24,5 mm

3.2 Přibližná hmotnost pístní skupiny

Plocha pístu:

$$S_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.1)$$

$$S_p = \frac{\pi \cdot 0,083^2}{4} = \underline{\underline{5,4106 \cdot 10^{-3} m^2}}$$

Objem plného pístu:

$$V_{pp} = S_p \cdot H_p \quad (3.2)$$

$$V_{pp} = 5,4106 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08 = \underline{\underline{0,4328 \cdot 10^{-3} m^3}}$$

Objem dutiny pro čep:

$$V_{d\check{c}} = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} \cdot D \quad (3.3)$$

$$V_{d\check{c}} = \frac{\pi \cdot 0,0245^2}{4} \cdot 0,083 = \underline{\underline{3,9129 \cdot 10^{-5} m^3}}$$

Objem dutiny pístu:

volím $D_d = 55 \text{ mm}$

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} \cdot (H_p - \delta) \quad (3.4)$$

$$V_D = \frac{\pi \cdot 0,055^2}{4} \cdot (0,08 - 0,0055) = \underline{\underline{1,7699 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

Přibližný objem pístu:

$$V_p = V_{pp} - V_{d\epsilon} - V_D \quad (3.5)$$

$$V_p = 0,4328 \cdot 10^{-3} - 3,9129 \cdot 10^{-5} - 1,7699 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{2,1667 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

Přibližná hmotnost pístu:

volím hliníkovou slitinu AlSi12Mn ČSN 42 4330, hustota této slitiny je 2650 kg/m^3

$$m_p = \rho \cdot V_p \quad (3.6)$$

$$m_p = 2650 \cdot 2,1667 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{0,5741 \text{ kg}}}$$

Přibližný objem čepu:

$$V_\epsilon = \frac{\pi \cdot (D_a - D_i)^2}{4} \cdot H_\epsilon \quad (3.7)$$

$$V_\epsilon = \frac{\pi \cdot (0,0245 - 0,016)^2}{4} \cdot 0,07055 = \underline{\underline{4,003 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}}$$

Přibližná hmotnost čepu:

$$m_\epsilon = \rho_o \cdot V_\epsilon \quad (3.8)$$

$$m_\epsilon = 7850 \cdot 4,003 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{0,0314 \text{ kg}}}$$

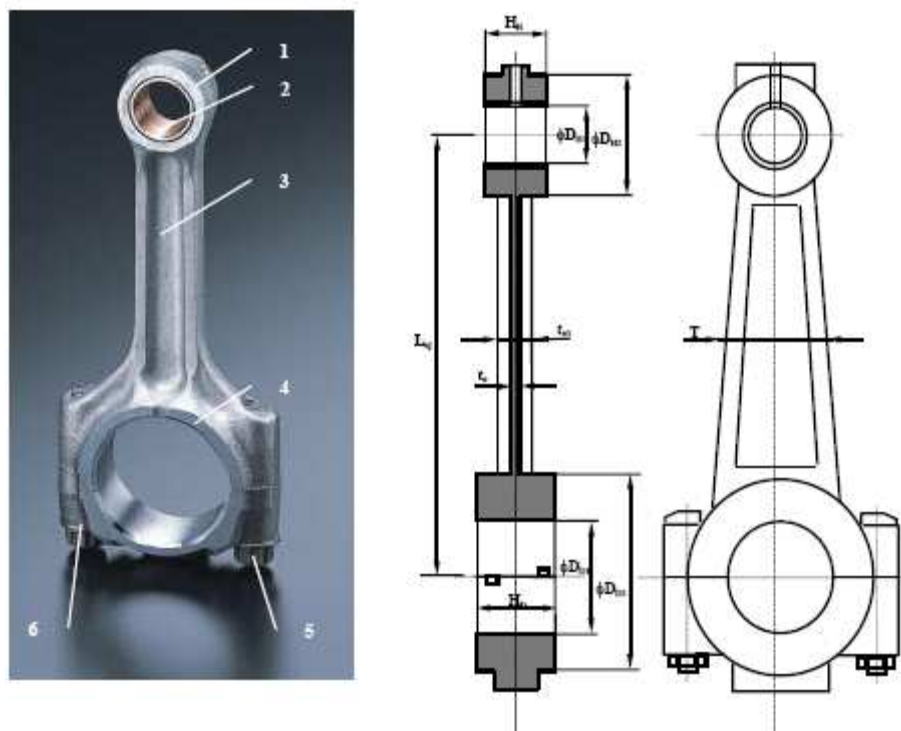
Přibližná hmotnost pístní skupiny:

$$m'_p = m_p + m_\epsilon \quad (3.9)$$

$$m'_p = 0,5741 + 0,0314 = \underline{\underline{0,6055 \text{ kg}}}$$

4. Návrh základních rozměrů ojnice

Ojnice čtyřdobého zážehového motoru, viz obr. 13, je tvořena okem pro pístní čep 1, ložiskovým pouzdem 2, dříkem 3, dělenou hlavou ojnice 4, přičemž víko 5 je připojeno ojnicními šrouby 6. Základní rozměry ojníc čtyřdobých motorů vztažené na vrtání válce motoru D jsou uvedeny na obr. 13. [1]



Obr.13 Charakteristické rozměry ojnice [1]

Tab. 4.1 Charakteristické rozměry ojnice

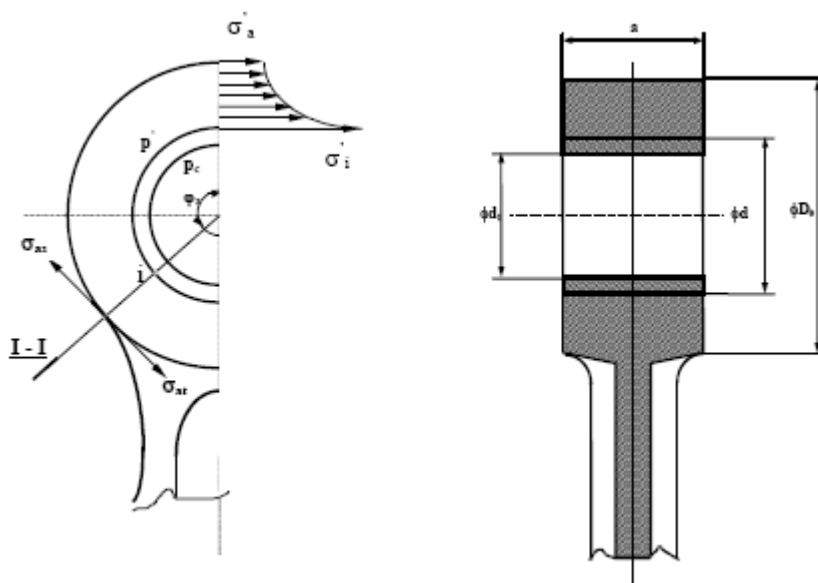
Doporučené hodnoty		zvolené hodnoty	vypočtené hodnoty
øD – vrtání válce motoru			
T/D	0,26 ÷ 0,3	0,28	T = 23,24 mm
L _{oj} /D	1,7 ÷ 2,3	1,9	L _{oj} = 157,7 mm
øD _{H1} /D	0,28 ÷ 0,5	0,349	øD _{H1} = 29 mm
øD _{H2} / øD _{H1}	1,5	1,5	øD _{H2} = 37,5 mm
øD _{D1} /D	0,6 ÷ 0,75	0,65	øD _{D1} = 53,95 mm
øD _{D2} / øD _{D1}	1,15	1,15	øD _{D2} = 62,04 mm
H _H /D	0,35 ÷ 0,38	0,36	H _H = 29,88 mm
H _D /D	0,4 ÷ 0,45	0,41	H _D = 34,03 mm
t _{o1} [mm]	10 ÷ 25	15	
t _o [mm]	3 ÷ 8	4	

5. Pevnostní kontrola oka ojnice

Nejvíce namáhaným průřezem oka ojnice, v němž dochází nejčastěji k lomům, je průřez I-I přechodu oka ojnice do dříku. Jeho namáhání je velmi složité a je vyvoláno všemi výše uvedenými zatíženími. Je třeba uvážit dynamický charakter zatěžujících účinků, tedy únavové namáhání. [1]

5.1 Měrný tlak mezi pouzdem a okem ojnice

Tím, že do oka ojnice zalisujeme ložiskové pouzdro vznikne spojitě zatížení (měrný tlak) na vnitřním povrchu ojničního oka, který vyvolává ve všech příčných průřezích oka určité konstantní napětí. Toto napětí vyvolané zalisováním pouzdra se za provozu motoru po ohřátí ojničního oka ještě zvětší v důsledku vyšší roztažnosti materiálu bronzového silnostěnného pouzdra. Pokud je použita tenkostěnná ocelová pánev s výstelkou z ložiskového kovu je možno vliv roztažnosti materiálu zanedbat. [1]



Obr. 14 Ojniční oko [1]

volím ohřev oka $\Delta t = 120\text{K}$

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

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

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

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

Poissonova konstanta $\mu = 0,3$

zvětšení přesahu pouzdra v důsledku ohřátí:

$$e_t = D_{H1} \cdot \Delta t \cdot (\alpha_b - \alpha_o) \quad (5.1)$$

$$e_t = 0,029 \cdot 120 \cdot (1,8 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-5}) = \underline{\underline{3,072 \cdot 10^{-5} \text{ m}}}$$

$$C_o = \frac{D_{H2}^2 + D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2} \quad (5.2)$$

$$C_o = \frac{0,0375^2 + 0,029^2}{0,0375^2 - 0,029^2} = 3,975$$

$$C_p = \frac{D_{H1}^2 + d_a^2}{D_{H1}^2 - d_a^2} \quad (5.3)$$

$$C_p = \frac{0,029^2 + 0,0245^2}{0,029^2 - 0,0245^2} = 5,986$$

Výsledný měrný tlak mezi povrchem pouzdra a ojnice v ohřátém stavu:

$$p' = \frac{e + e_t}{D_{H1} \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p - \mu}{E_b} \right)} \quad (5.4)$$

$$p' = \frac{0,00003 + 3,072 \cdot 10^{-5}}{0,029 \cdot \left(\frac{3,975 + 0,3}{2,2 \cdot 10^{11}} + \frac{5,986 - 0,3}{1,15 \cdot 10^{11}} \right)} = \underline{\underline{30,390117 MPa}}$$

Napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma'_a = p' \cdot \frac{2 \cdot D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2} \quad (5.5)$$

$$\sigma'_a = 30390117 \cdot \frac{2 \cdot 0,029^2}{0,0375^2 - 0,029^2} = \underline{\underline{90,431096 MPa}}$$

Napětí na vnitřní vláknem:

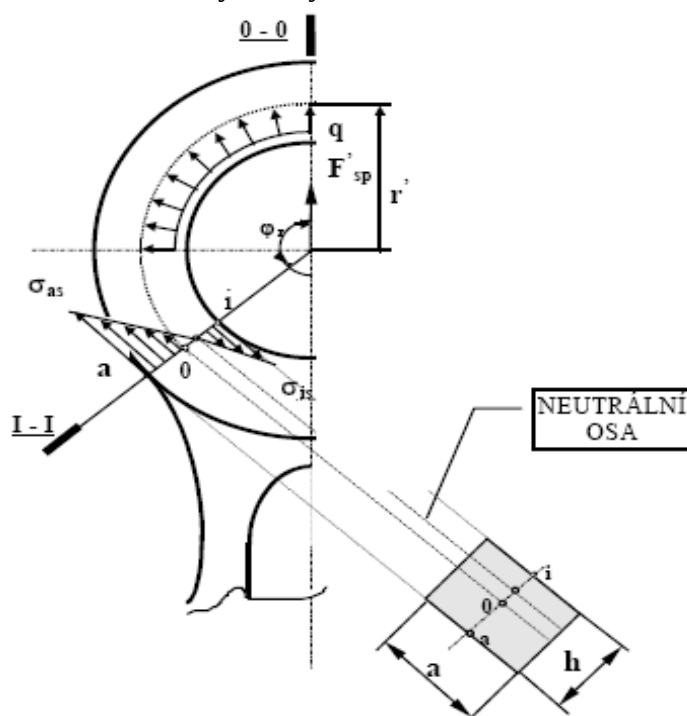
$$\sigma'_i = p' \cdot \frac{D_{H2}^2 + D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2} \quad (5.6)$$

$$\sigma'_i = 30390117 \cdot \frac{0,0375^2 + 0,029^2}{0,0375^2 - 0,029^2} = \underline{\underline{120,82121 MPa}}$$

Dovolené napětí pro vnitřní a vnější vlákna je 100 až 150 MPa. Vypočtená napětí ze vztahů (5.5) a (5.6) nepřekračují toto rozmezí.

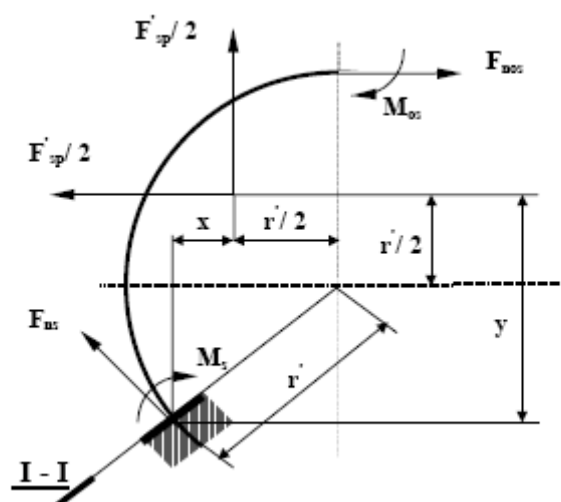
5.2 Namáhání oka ojnice setrvačnou silou

Je vyvoláno posuvnými hmotami pístní skupiny, přičemž maximum je dosaženo při doběhu pístu do horní úvratí mezi výfukovým a sacím zdvihem. [1]



Obr. 15 Průběhy zatížení a napětí v ojničném oku [1]

Oko ojnice je zatěžováno setrvačnou silou F'_{sp} . Pro výpočet napětí vyvolaný touto silou nahrazujeme oko ojnice (bez ložiskového pouzdra) modelem, silně zakřiveným prutem kruhového tvaru o poloměru r' s vetknutím v bodě 0 průřezu I-I, viz obr. 16. [1]



Obr. 16 Model silně zakřiveného kruhového prut [1]

Poloměr těžiště v příčném průřezu:

$$r' = \frac{D_{H2} + D_{H1}}{4} \quad (5.7)$$

$$r' = \frac{0,0375 + 0,029}{4} = \underline{\underline{0,016625m}}$$

hmotnost pístní skupiny včetně pístního čepu m'_p znám ze vztahu (3.9)

Poloměr zalomení klikového hřídele:

$$r_k = 0,5 \cdot Z \quad (5.8)$$

$$r_k = 0,5 \cdot 0,09 = \underline{\underline{0,045m}}$$

Maximální úhlová rychlost otáčení klikového hřídele:

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (5.9)$$

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot 5400}{30} = \underline{\underline{565,486s^{-1}}}$$

ojniční poměr:

$$\lambda_o = \frac{r_k}{L_{oj}} = \frac{0,045}{0,1577} = \underline{\underline{0,285}}$$

Velikost setrvačné síly posuvných hmot pístní skupiny :

$$F'_{sp} = m'_p \cdot r_k \cdot \omega_{\max}^2 \cdot (1 + \lambda_o) \quad (5.10)$$

$$F'_{sp} = 0,6055 \cdot 0,045 \cdot 565,486^2 \cdot (1 + 0,285) = \underline{\underline{11196,274N}}$$

ohybový moment na průřezu 0-0 od setrvačné síly:

$$M_{os} = F'_{sp} \cdot r' \cdot (0,00033 \cdot \varphi_z - 0,0297) \quad (5.11)$$

$$M_{os} = 11196,274 \cdot 0,016625 \cdot (0,00033 \cdot 120 - 0,0297) = \underline{\underline{1,8427Nm}}$$

normálová síla na průřezu 0-0 od setrvačné síly:

$$F_{nos} = F'_{sp} \cdot (0,572 - 0,0008 \cdot \varphi_z) \quad (5.12)$$

$$F_{nos} = 11196,274 \cdot (0,572 - 0,0008 \cdot 120) = \underline{\underline{5329,4264N}}$$

výsledný vnitřní moment M_s pro průřez I-I od setrvačné síly:

$$M_s = M_{os} + F_{nos} \cdot r' \cdot (1 - \cos \varphi_z) - 0,5 \cdot F'_{sp} \cdot r' \cdot (\sin \varphi_z - \cos \varphi_z) \quad (5.13)$$

$$M_s = 1,8427 + 5329,4264 \cdot 0,017375 \cdot (1 - \cos 120^\circ) - 0,5 \cdot 11196,274 \cdot 0,017375 \cdot (\sin 120^\circ - \cos 120^\circ)$$

$$M_s = \underline{\underline{7,8707Nm}}$$

výsledná normálová síla na průřezu I-I od setrvačné síly:

$$F_{ns} = F_{nos} \cdot \cos \varphi_z + 0,5 \cdot F'_{sp} \cdot (\sin \varphi_z - \cos \varphi_z) \quad (5.14)$$

$$F_{ns} = 5329,4264 \cdot \cos 120^\circ + 0,5 \cdot 11196,274 \cdot (\sin 120^\circ - \cos 120^\circ) = \underline{\underline{4982,4842N}}$$

Normálová napětí na vnějším a vnitřním vláknem:
volím šířku oka ojnice $a = 30 \text{ mm}$

tloušťka stěny oka ojnice:

$$h = \frac{D_{H2} - D_{H1}}{2} \quad (5.15)$$

$$h = \frac{0,0375 - 0,029}{2} = \underline{\underline{0,00425m}}$$

příčný průřez oka ojnice:

$$S_o = \left(\frac{D_{H2} - D_{H1}}{2} \right) \cdot a \quad (5.16)$$

$$S_o = \left(\frac{0,0375 - 0,029}{2} \right) \cdot 0,03 = \underline{\underline{1,275 \cdot 10^{-4} m^2}}$$

příčný průřez pouzdra oka ojnice:

$$S_{p2} = \left(\frac{D_{H1} - D_a}{2} \right) \cdot a \quad (5.17)$$

$$S_{p2} = \left(\frac{0,029 - 0,0245}{2} \right) \cdot 0,03 = \underline{\underline{6,75 \cdot 10^{-5} m^2}}$$

Konstanta k_1 vyjadřuje podíl normálové síly F_{ns} přenášené okem ojnice ve vztahu k přenosu ložiskovým pouzdrům oka:

$$k_1 = \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o + E_b \cdot S_{p2}} \quad (5.18)$$

$$k_1 = \frac{2,2 \cdot 10^5 \cdot 1,275 \cdot 10^{-4}}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 1,275 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^5 \cdot 6,75 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{0,78}}$$

Normálové napětí ve vnějším vlákně průřezu I-I vyvolané setrvačnou silou:

$$\sigma_{as} = \left[2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' + h)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{a \cdot h} \quad (5.19)$$

$$\sigma_{as} = \left[2 \cdot 7,8707 \cdot \frac{6 \cdot 0,016625 + 0,00425}{0,00425 \cdot (2 \cdot 0,016625 + 0,00425)} + 0,78 \cdot 4982,4842 \right] \cdot \frac{1}{0,03 \cdot 0,00425}$$

$$\sigma_{as} = \underline{\underline{38,537578 MPa}}$$

Normálové napětí ve vnitřním vlákně průřezu I-I vyvolané setrvačnou silou:

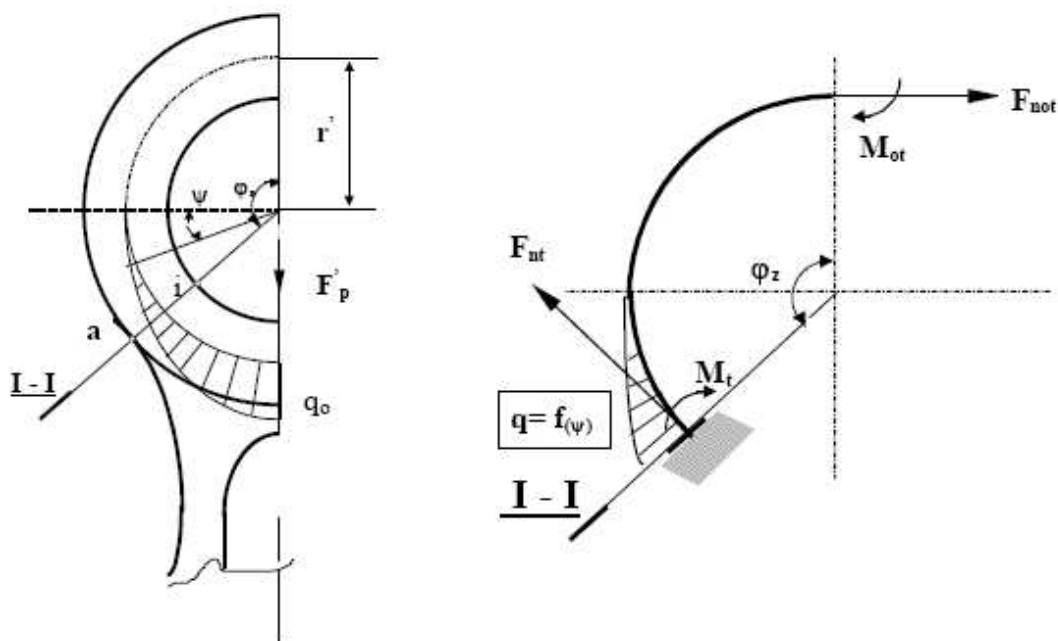
$$\sigma_{is} = \left[-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' - h)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{a \cdot h} \quad (5.20)$$

$$\sigma_{is} = \left[-2 \cdot 7,8707 \cdot \frac{6 \cdot 0,016625 + 0,00425}{0,00425 \cdot (2 \cdot 0,016625 - 0,00425)} + 0,78 \cdot 4982,4842 \right] \cdot \frac{1}{0,03 \cdot 0,00425}$$

$$\sigma_{is} = \underline{\underline{-73,697777 MPa}}$$

5.3 Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů

Na obr. 17 je ukázáno zatížení ojničního oka tlakem plynů nad pístem. Předpokládáme, že výslednice spojitého zatížení $q=f(\psi)$, osamělá síla F' působí v ose ojnice. Skutečné těleso a ztížení je nahrazeno prutovým modelem. Jedná se o silně zakřivený prut, vetknutý v průřezu I-I. Tak jako v předchozím případě je vzhledem k symetričnosti zadání úlohy řešena pouze polovina oka. Výsledné vnitřní účinky v průřezu 0-0 jsou normálová síla F_{not} a ohybový moment M_{ot} . [1]



Obr. 17 Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů [1]

Osamělá síla působící v ose ojnice:

$$F'_p = p_{\text{max}} \cdot S_p - F'_{sp} \quad (5.21)$$

$$F'_p = 6,443515 \cdot 10^6 \cdot 5,4106 \cdot 10^{-3} - 11196,274 = \underline{\underline{23667,008N}}$$

Tab. 5.3.1 Závislost velikosti součinitelů a_1 a a_2 na úhlu zakotvení oka v dříku ojnice φ_z

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

[1]

Dle tab. 5.3.1 volím $a_1 = 0,0030$ a $a_2 = -0,0012$ pro $\varphi_z = 120^\circ$.

$$J = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_z}{2} \right) \cdot \sin \varphi_z - 0,5 \cdot \cos \varphi_z \quad (5.22)$$

$$J = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2,094395\text{rad}}{2} \right) \cdot \sin 2,094395\text{rad} - 0,5 \cdot \cos 2,094395\text{rad} = \underline{\underline{0,02327}}$$

Síla v místě vetknutí průřezu I-I od tlaku plynů:

$$F_{nt} = F'_p \cdot \left(a_1 \cdot \cos \varphi_z + \frac{2}{\pi} \cdot J \right) \quad (5.23)$$

$$F_{nt} = 23667,008 \cdot \left(0,003 \cdot \cos 2,094395 \text{ rad} + \frac{2}{\pi} \cdot 0,02327 \right) = \underline{\underline{315,1058 N}}$$

Ohybový moment v místě vetknutí průřezu I-I od tlaku plynů:

$$M_t = F'_p \cdot r' \cdot \left[a_2 + a_1 (1 - \cos \varphi_z) - \frac{2}{\pi} \cdot J \right] \quad (5.24)$$

$$M_t = 23667,008 \cdot 0,016625 \cdot \left[-0,0012 + 0,003 \cdot (1 - \cos 2,094395) - \frac{2}{\pi} \cdot 0,02327 \right] = \underline{\underline{-4,5304 Nm}}$$

Napětí vyvolané tlakovou silou ve vnějších vláknech oka ojnice:

$$\sigma_{at} = \left[2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' + h)} + k_1 \cdot F_{nt} \right] \cdot \frac{1}{a \cdot h} \quad (5.25)$$

$$\sigma_{at} = \left[2 \cdot (-4,5304) \cdot \frac{6 \cdot 0,016625 + 0,00425}{0,00425 \cdot (2 \cdot 0,016625 + 0,00425)} + 0,78 \cdot 315,1058 \right] \cdot \frac{1}{0,03 \cdot 0,00425}$$

$$\sigma_{at} = \underline{\underline{2,232136 MPa}}$$

Napětí vyvolané tlakovou silou ve vnitřních vláknech oka ojnice:

$$\sigma_{it} = \left[-2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot r' + h}{h \cdot (2 \cdot r' - h)} + k_1 \cdot F_{nt} \right] \cdot \frac{1}{a \cdot h} \quad (5.26)$$

$$\sigma_{it} = \left[-2 \cdot (-4,5304) \cdot \frac{6 \cdot 0,016625 + 0,00425}{0,00425 \cdot (2 \cdot 0,016625 + 0,00425)} + 0,78 \cdot 315,1058 \right] \cdot \frac{1}{0,03 \cdot 0,00425}$$

$$\sigma_{it} = \underline{\underline{61,917724 MPa}}$$

Maximální napětí v oku ojnice:

maximální napětí na vnějším průměru:

$$\sigma_{\max 1} = \sigma'_a + \sigma_{as} \quad (5.27)$$

$$\sigma_{\max 1} = 90,431096 + 38,537578 = \underline{\underline{128,96867 MPa}}$$

$$\sigma_{\min 1} = \sigma'_a + \sigma_{at} \quad (5.28)$$

$$\sigma_{\min 1} = 90,431096 + 2,232136 = \underline{\underline{92,663232 MPa}}$$

maximální napětí na vnitřním průměru:

$$\sigma_{\max 2} = \sigma'_i + \sigma_{is} \quad (5.29)$$

$$\sigma_{\max 2} = 120,82121 - 73,697777 = \underline{\underline{47,123433 MPa}}$$

$$\sigma_{\min 2} = \sigma'_i + \sigma_{it} \quad (5.30)$$

$$\sigma_{\min 2} = 120,82121 + 61,917724 = \underline{\underline{182,73893 MPa}}$$

5.4 Výpočet bezpečnosti ojnice

Bezpečnost při únavě materiálu:

Materiál ojnice volím ocel 15 241 s mezí pevnosti $R_m = 980\text{MPa}$.

mez únavy vzorku:

$$\sigma_{co} = 0,5 \cdot R_m \quad (5.31)$$

$$\sigma_{co} = 0,5 \cdot 980 = 490\text{MPa}$$

součinitel povrchu:

$$k_a = 4,51 \cdot (R_m)^{-0,265} \quad (5.32)$$

$$k_a = 4,51 \cdot (980)^{-0,265} = \underline{\underline{0,726}}$$

součinitel velikosti:

$$k_b = 1,24 \cdot (H_H)^{-0,170} \quad (5.33)$$

$$k_b = 1,24 \cdot (29,88)^{-0,170} = 0,862$$

součinitel teploty:

$$k_d = 1,2$$

součinitel spolehlivosti:

$$k_e = 0,814$$

mez únavy reálné součásti:

$$\sigma_c = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{co} \quad (5.34)$$

$$\sigma_c = 0,726 \cdot 0,862 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 490 = \underline{\underline{299,53365\text{MPa}}}$$

amplituda napětí:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max 2} - \sigma_{\min 2}}{2} \quad (5.35)$$

$$\sigma_a = \frac{47,123433 - 182,73893}{2} = \underline{\underline{-67,807751\text{MPa}}}$$

střední napětí:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max 2} + \sigma_{\min 2}}{2} \quad (5.36)$$

$$\sigma_m = \frac{47,123433 + 182,73893}{2} = \underline{\underline{114,93118\text{MPa}}}$$

bezpečnost podle Goodmana:

$$k = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \frac{\sigma_m}{R_m}} \quad (5.37)$$

$$k = \frac{1}{\frac{67,807751}{299,53365} + \frac{114,93118}{980}} = \underline{\underline{2,91}}$$

Závěr

Cílem této práce bylo provést výpočet termodynamického cyklu, navrhnout základní rozměry pístní skupiny a provést pevnostní kontrolu oka ojnice, což bylo provedeno. Ve výpočtu termodynamického cyklu byla vypočítána hodnota maximálního tlaku, která byla potřeba pro další výpočet. Hodnota maximálního tlaku ve válci je 6,44MPa. V další části byly navrženy základní rozměry pístní skupiny. Dále byly navrženy základní rozměry ojnice. V poslední části byla provedena bezpečnostní kontrola oka ojnice. V této části byla vypočtená napětí, která jsou vyvolána měrným tlakem mezi pouzdrem a okem ojnice, setrvačnou silou a silou od tlaku plynů. Hodnota maximálního napětí při namáhání oka ojnice je 182,74MPa. V poslední řadě byla provedena kontrola bezpečnosti při cyklickém namáhání. Pro zvolený materiál ojnice bylo dosaženo bezpečnosti 2,91. Bezpečnost vyhovuje, protože se nachází v rozmezí 2,5-5, které je dáno v literatuře.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Rausher, J.: Ročníkový projekt.
- [2] Beroun, S.: Vozidlové motory.
- [3] Macek, J., Suk, B.: Spalovací motory I, Vydavatelství ČVUT 2000, ISBN 80-01-02085-1
- [4] <http://cesar.fme.vutbr.cz/towin.cs/informace/nezelezo/As8.htm>
- [5] <http://auta5p.eu/informace/motory/motory.htm>
- [6] <http://studenti-studentum.blogspot.com/2007/08/spalovac-motory-zehov-tydob.html>
- [7] http://www.eurosporttuning.ca/Merchant2/merchant.mvc?Screen=CTGY&Category_Code=VL-S70-en-kit-t5

Seznam použitých zkratek a symbolů

a	[m]	šířka oka ojnice
a_1	[-]	součinitel závislý na úhlu zakotvení oka v dříku ojnice
a_2	[-]	součinitel závislý na úhlu zakotvení oka v dříku ojnice
C_o	[-]	poměr průměrů na oku ojnice
C_p	[-]	poměr průměrů ojnicního pouzdra
D	[m]	vrtání
D_a	[m]	vnější průměr pístního čepu
$D_{\check{c}}$	[m]	průměr čepu
D_d	[m]	průměr dutiny pístu
D_{D1}	[m]	vnitřní průměr hlavy ojnice
D_{D2}	[m]	vnější průměr hlavy ojnice
D_{H1}	[m]	vnitřní průměr oka ojnice
D_{H2}	[m]	vnější průměr oka ojnice
D_i	[m]	vnitřní průměr čepu
e	[m]	přesah bronzového pouzdra
e_t	[m]	zvětšení přesahu pouzdra v důsledku ohřátí
E_b	[Pa]	modul pružnosti v tahu pro bronz
E_o	[Pa]	modul pružnosti v tahu pro ocel
F_{nos}	[N]	normálová síla na průřezu 0-0 od setrvačné síly
F_{ns}	[N]	výsledná normálová síla na průřezu I-I od setrvačné síly
F_{nt}	[N]	síla v místě vetknutí průřezu I-I od tlaku plynů
F'_p	[N]	osamělá síla působící v ose ojnice
F'_{sp}	[N]	setrvačná síla posuvných hmot pístní skupiny
h	[m]	tloušťka stěny oka ojnice
$H_{\check{c}}$	[m]	vnitřní průměr pístu
H_D	[m]	šířka hlavy ojnice
H_H	[m]	šířka oka
H_k	[m]	kompresní výška
H_{m1}	[m]	výška prvního můstku
H_{m2}	[m]	výška druhého můstku
H_p	[m]	výška pístu
H_{pl}	[m]	výška pláště
H_o	[m]	vzdálenost čel nálitků pro pístní čep
H_u	[J/kg]	spodní výhřevnost paliva
J	[-]	konstanta úhlu vetknutí
k	[-]	bezpečnost
k_a	[-]	součinitel povrchu
k_b	[-]	součinitel velikosti
k_c	[-]	součinitel zatížení
k_d	[-]	součinitel teploty
k_e	[-]	součinitel spolehlivosti
k_f	[-]	součinitel dalších vlivů
k_1	[-]	konstanta vyjadřující podíl zatížení oka ojnice
L_{oj}	[m]	délka ojnice
$m_{\check{c}}$	[kg]	hmotnost čepu
m_p	[kg]	hmotnost pístu
m_{pa}	[kg]	hmotnost paliva
m'_p	[kg]	hmotnost pístní skupiny

m_v	[kg]	hmotnost vzduchu ve válci
M_{os}	[Nm]	ohybový moment na průřezu 0-0 od setrvačné síly
M_s	[Nm]	výsledný vnitřní moment M_s pro průřez I-I od setrvačné síly
M_t	[Nm]	ohybový moment v místě vetknutí průřezu I-I od tlaku plynů
n	[min ⁻¹]	jmenovité otáčky
p'	[Pa]	výsledný měrný tlak mezi povrchem pouzdra a ojnice
p_1	[Pa]	atmosférický tlak
p_2	[Pa]	tlak na konci komprese
p_3	[Pa]	maximální tlak ve válci
Q	[J]	teplo přivedené při oběhu
r	[J/kgK]	plynová konstanta
r'	[m]	poloměr těžiště v příčném průřezu
r_k	[m]	poloměr zalomení klikového hřídele
R_m	[Pa]	mez pevnosti materiálu
S_o	[m ²]	příčný průřez oka ojnice
S_p	[m ²]	plocha pístu
S_{p2}	[m ²]	příčný průřez pouzdra oka ojnice
t_o	[m]	šířka stojiny
t_{o1}	[m]	šířka pásnice
Δt	[K]	ohřev oka
T_1	[K]	teplota okolí
T_2	[K]	teplota na konci komprese
T_3	[K]	teplota na konci izochorického přívodu tepla
V_c	[m ³]	celkový objem
$V_{\check{c}}$	[m ³]	objem čepu
V_D	[m ³]	objem dutiny pístu
V_{dc}	[m ³]	objem dutiny pro čep
V_k	[m ³]	kompresní objem
V_p	[m ³]	objem pístu
V_{pp}	[m ³]	objem plného pístu
V_z	[m ³]	zdvihový objem
Z	[m]	zdvih
α_b	[K ⁻¹]	součinitel lineární tepelná roztažnosti bronzu
α_o	[K ⁻¹]	součinitel lineární tepelná roztažnosti oceli
δ	[m]	výška dna pístu
ε	[-]	kompresní poměr
μ	[-]	Poissonova konstanta
κ	[-]	izoentropický exponent
λ	[-]	teoretický směšovací poměr
λ_o	[-]	ojniční poměr
λ_s	[-]	skutečný směšovací poměr
π	[-]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg/m ³]	hustota slitiny
ρ_o	[kg/m ³]	hustota oceli
σ_a	[Pa]	amplituda napětí
σ'_a	[Pa]	napětí na vnějším vlákne
σ_{as}	[Pa]	normálové napětí ve vněj. vlákne průř. I-I vyvolané setrvač. silou
σ_{at}	[Pa]	napětí vyvolané tlak. silou ve vněj. vláknech oka ojnice
σ_c	[Pa]	mez únavy reálné součásti
σ_c	[Pa]	mez únavy vzorku

σ'_i	[Pa]	napětí na vnitřním vlákne
σ_{is}	[Pa]	normálové napětí ve vnitř. vlákne průř. I-I vyvolané setrvač. silou
σ_{it}	[Pa]	napětí vyvolané tlak. silou ve vnitř. vláknech oka ojnice
σ_m	[Pa]	střední napětí
σ_{max1}	[Pa]	maximální napětí na vnějším průměru
σ_{max2}	[Pa]	 maximální napětí na vnitřním průměru
σ_{min1}	[Pa]	maximální napětí na vnějším průměru
σ_{min2}	[Pa]	 maximální napětí na vnitřním průměru
φ_z	[°,rad]	 úhel zakotvení ojnicního oka
ω_{max}	[s ⁻¹].	maximální úhlová rychlost otáčení klik. hřídele