

Příloha-Vlastní výpočet motoru

1 Zadáné parametry motoru

Vrtání		$D := 102\text{mm}$
Zdvih		$h := 110\text{mm}$
Kompresní poměr		$\varepsilon := 16$
Stechiometrický poměr		$L_{st} := 14.5$
Atmosférický tlak	$p_a := 101325\text{Pa}$	$p_1 := p_a \quad p_1 = 101325\text{Pa}$
Absolutní teplota okolí		$T_1 := 293.\text{K}$
Poissonova konstanta vzduchu		$\kappa := 1.4$
Měrná plynová konstanta		$r := 287.1 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
Měrná tepelná kapacita		$c_v := 720 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
Jmenovité otáčky		$n := 2200\text{min}^{-1}$
Perioda	$t := \frac{1}{n}$	$t = 0.027\text{s}$
Úhlová rychlost	$\omega := \frac{2\cdot\pi}{t}$	$\omega = 230 \frac{1}{\text{s}}$
Spodní výhřevnost paliva		$H_u := 42.7\cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Součinitel přebytku vzduchu		$\lambda := 2.3$
Zdvihový objem	$V_h := \frac{\pi\cdot D^2}{4}\cdot h$	$V_h = 898.841\cdot\text{cm}^3$
Objem kompresního prostoru		
	$\varepsilon = \frac{V_c}{V_k} \quad V_c = V_h + V_k \quad \varepsilon = \frac{V_h + V_k}{V_k}$	

a z toho plyne, že

$$V_k := \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad V_k = 59.923\cdot\text{cm}^3$$

Objem spalovacího prostoru

$$V_c := V_h + V_k \quad V_c = 958.764 \cdot \text{cm}^3$$

Hmotnost vzduchu

$$m_v := \frac{p_1 \cdot V_c}{r \cdot T_1} \quad m_v = 0.001 \cdot \text{kg}$$

Hmotnost paliva

$$m_p := \frac{m_v}{L_{st} \cdot \lambda} \quad m_p = 0.000035 \text{ kg}$$

Teplo přivedené při jednom oběhu

$$Q := m_p \cdot H_u \quad Q = 1479 \cdot \text{J}$$

2 Teoretický průběh pracovního oběhu

2.1 Adiabatická komprese

Tlak na konci komprese

$$p_1 \cdot V_c^\kappa = p_2 \cdot V_k^\kappa \quad \text{z toho plyne}$$

$$p_2 := p_1 \cdot \left(\frac{V_c}{V_k} \right)^\kappa \quad p_2 = 4.915 \cdot \text{MPa}$$

Teplota na konci komprese

$$\text{ze stav rce} \quad p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad \text{plyne} \quad p = \frac{m \cdot r \cdot T}{V}$$

$$p_1 \cdot V_c^\kappa = p_2 \cdot V_k^\kappa \quad \text{po dosazení} \quad \frac{m \cdot r \cdot T_1}{V_c} \cdot V_c^\kappa = \frac{m \cdot r \cdot T_2}{V_k} \cdot V_k^\kappa$$

$$\text{po úpravě dostaneme} \quad T_1 \cdot V_c^{\kappa-1} = T_2 \cdot V_k^{\kappa-1}$$

$$T_2 := T_1 \cdot \left(\frac{V_c}{V_k} \right)^{\kappa-1} \quad T_2 = 888 \text{ K}$$

Objemová práce

$$dA = p dV \quad \text{pro adiabatický děj platí} \quad p \cdot V^\kappa = \text{konst}$$

$$p = \frac{\text{konst}}{V^\kappa} \quad A = \int \frac{\text{kons}}{V^\kappa} dV \quad A = \text{konst} \cdot \int V^{-\kappa} dV$$

$$A = \text{konst} \cdot \left(\frac{V^{-\kappa+1}}{-\kappa+1} \right) \Big|_{V_c}^{V_k} \quad \text{přičemž} \quad \text{konst} = p_1 \cdot V_c^\kappa$$

$$A_{12} = p_1 \cdot V_c^\kappa \cdot \frac{V_k^{1-\kappa} - V_c^{1-\kappa}}{1-\kappa} \quad A_{12} := -493 \text{ J}$$

2.2 Izochorický přívod tepla

Předpoklad, že se přivede 40% tepla

Přivedené teplo

$$Q_{23} := 0.4 \cdot Q \quad Q_{23} = 591 \text{ J}$$

Teplota na konci děje

$$\text{I Termodynamický zákon:} \quad dQ = dU + dA \quad dU = m \cdot c_v \cdot dT \quad dA = p \cdot dV$$

$$dQ = m \cdot c_v \cdot dT + p \cdot dV \quad dV = 0$$

z toho plyne, že:

$$Q_{23} = m_v \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \quad \frac{Q_{23}}{m_v \cdot c_v} = T_3 - T_2$$

$$T_3 := \frac{Q_{23}}{m_v \cdot c_v} + T_2 \quad T_3 = 1600 \text{ K}$$

Tlak na konci děje

pro izochorický děj se dá ze stavové rovnice odvodit

$$p_2 \cdot V = m \cdot r \cdot T_2 \quad p_3 \cdot V = m \cdot r \cdot T_3$$

podělením rovnic dostaneme

$$\frac{p_2 \cdot V}{p_3 \cdot V} = \frac{m \cdot r \cdot T_2}{m \cdot r \cdot T_3} \quad \text{z toho} \quad \frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3}$$

$$p_3 := p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} \quad p_3 = 8.85 \cdot \text{MPa}$$

2.3 Izobarická expanze

$$p_4 := p_3$$

Předpokládá se, že se přivede 60% tepla

Přivedené teplo

$$Q_{34} := 0.6 \cdot Q \quad Q_{34} = 887 \text{ J}$$

Objem na konci izobarické expanze

$$\text{z l. TDZ plyne, že} \quad dQ = m \cdot c_v \cdot dT + dA$$

$$dA = p \cdot dV$$

$$p = \text{konst} \quad \text{z toho plyne, že} \quad A = p \cdot \int_{V_k}^{V_4} 1 \, dV \quad A = p_4 \cdot (V_4 - V_k)$$

$$Q_{34} = m_v \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3) + p_4 \cdot (V_4 - V_k)$$

$$p_3 \cdot V_3 = m \cdot r \cdot T_3 \quad p_4 \cdot V_4 = m \cdot r \cdot T_4 \quad p_4 = p_3 \quad \frac{p \cdot V_3}{p \cdot V_4} = \frac{m \cdot r \cdot T_3}{m \cdot r \cdot T_4} \quad \frac{V_3}{V_4} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$T_4 = T_3 \cdot \frac{V_4}{V_3} \quad V_3 = V_k \quad Q_{34} = m_v \cdot c_v \cdot \left(T_3 \cdot \frac{V_4}{V_k} - T_3 \right) + p_4 \cdot (V_4 - V_k)$$

$$Q_{34} = m_v \cdot c_v \cdot T_3 \cdot \frac{V_4}{V_k} - m_v \cdot c_v \cdot T_3 + p_4 \cdot V_4 - p_4 \cdot V_k$$

$$Q_{34} + m_v \cdot c_v \cdot T_3 + p_4 \cdot V_k = V_4 \cdot \left(m_v \cdot c_v \cdot \frac{T_3}{V_k} + p_4 \right)$$

$$V_4 := \frac{Q_{34} + m_v \cdot c_v \cdot T_3 + p_4 \cdot V_k}{m_v \cdot c_v \cdot \frac{T_3}{V_k} + p_4} \quad V_4 = 88.499 \cdot \text{cm}^3$$

Teplota na konci izobarické expanze

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{T_3}{T_4} \quad V_3 = V_k$$

$$T_4 := T_3 \cdot \frac{V_4}{V_k} \quad T_4 = 2362 \text{ K}$$

Objemová práce při izobarické expanzi

$$dA = p \cdot dV \quad p = \text{konst} \quad \text{z toho plyne, že} \quad A = p \cdot \int_{V_k}^{V_4} 1 \, dV$$

$$A_{34} := p_4 \cdot (V_4 - V_k) \quad A_{34} = 253 \text{ J}$$

2.4. Adiabatická expanze

Tlak na konci adiabatické expanze

$$p_4 \cdot V_4^\kappa = p_5 \cdot V_c^\kappa \quad \text{z toho plyne}$$

$$p_5 := p_4 \cdot \left(\frac{V_4}{V_c} \right)^\kappa \quad p_5 = 0.315 \cdot \text{MPa}$$

Teplota na konci adiabatické expanze

$$\text{ze stav rce} \quad p \cdot V = m \cdot r \cdot T \quad \text{plyne} \quad p = \frac{m \cdot r \cdot T}{V}$$

$$p_4 \cdot V_4^\kappa = p_5 \cdot V_c^\kappa \quad \text{po dosazení} \quad \frac{m \cdot r \cdot T_4}{V_4} \cdot V_4^\kappa = \frac{m \cdot r \cdot T_5}{V_c} \cdot V_c^\kappa$$

$$\text{po úpravě dostaneme} \quad T_4 \cdot V_4^{\kappa-1} = T_5 \cdot V_c^{\kappa-1}$$

$$T_5 := T_4 \cdot \left(\frac{V_4}{V_c} \right)^{\kappa-1} \quad 40 \quad T_5 = 911 \text{ K}$$

Práce vykonaná při adiabatické expanzi

$$dA = p dV \quad \text{pro adiabatický děj platí} \quad p \cdot V^\kappa = \text{konst}$$

$$p = \frac{\text{konst}}{V^\kappa} \quad A = \int \frac{\text{kons}}{V^\kappa} dV \quad A = \text{konst} \int V^{-\kappa} dV$$

$$A = \text{konst} \cdot \left(\frac{V^{-\kappa+1}}{-\kappa+1} \right) \Big|_{V_4}^{V_c} \quad \text{konst} = p_4 \cdot V_4^\kappa$$

$$A_{45} = p_4 \cdot V_4^\kappa \cdot \frac{V_c^{1-\kappa} - V_4^{1-\kappa}}{1-\kappa} \quad A_{45} := 1202 \text{ J}$$

2.5 Objemová práce cyklu

$$A_c = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{45} + A_{51} \quad A_{23} = A_{51} = 0$$

$$A_c := A_{12} + A_{34} + A_{45} \quad A_c = 962 \text{ J}$$

2.6 Odvedené teplo

$$A_c = Q - |Q_{51}|$$

$$Q_{51} := A_c - Q \quad Q_{51} = -517 \text{ J}$$

3 Silové působení na píst

3.1 Síla od tlaků plynů

Plocha pístu

$$S_{ps} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad S_{ps} = 8171 \cdot \text{mm}^2$$

Síla od tlaků plynů

$$F_p := (p_3 - p_1) \cdot S_{ps} \quad F_p = 71490 \cdot \text{N}$$

3.2. Návrh posuvných částí pístoní skupiny

3.2.1 Výpočet hlavních rozměrů pístoní skupiny

Výška pístu

$$H_p := 1.2 \cdot D$$

$$H_p = 122.4 \cdot \text{mm}$$

Vnitřní průměr pístu

$$H_{\zeta} := 0.85 \cdot D$$

$$H_{\zeta} = 86.7 \cdot \text{mm}$$

Výška dna pístu

$$\delta := 8 \text{mm}$$

Objem dna pístu

$$V_d := S_{ps} \cdot \delta$$

$$V_d = 65.37 \cdot \text{cm}^3$$

Objem pláště pístu

$$V_{pl} := \frac{\pi \cdot (D - H_{\zeta})^2}{4} \cdot (H_p - \delta)$$

$$V_{pl} = 21.033 \cdot \text{cm}^3$$

Vnější průměr pístoního čepu

$$d_a := 0.33 \cdot D$$

$$d_a = 33.66 \cdot \text{mm}$$

Vnější průměr nálitku

$$d_n := 0.6 \cdot D$$

$$d_n = 61.2 \cdot \text{mm}$$

Vzdálenost mezi nálitky pro pístoní čep

$$H_o := 0.4 \cdot D$$

$$H_o = 40.8 \cdot \text{mm}$$

Objem nálitky pro pístoní čep

$$V_n := \frac{\pi \cdot (d_n - d_a)^2}{4} \cdot (H_{\zeta} - H_o)$$

$$V_n = 27.342 \cdot \text{cm}^3$$

Celkový objem pístu

$$V_{cp} := V_d + V_{pl} + V_n$$

$$V_{cp} = 113.745 \cdot \text{cm}^3$$

Vnitřní průměr pístoního čepu

$$d_i := 0.20 \cdot D$$

$$d_i = 20.4 \cdot \text{mm}$$

Délka pístoního čepu

$$l_c := 0.95 \cdot D$$

$$l_c = 96.9 \cdot \text{mm}$$

Objem pístoního čepu

$$V_{\check{c}} := \frac{\pi \cdot (d_a - d_i)^2}{4} \cdot l_c$$

$$V_{\check{c}} = 13.381 \cdot \text{cm}^3$$

3.2.2. Výpočet celkové hmotnosti pístu

slitina pístu AlSi12

12% křemíku

hustota Si

$$\rho_{\text{Si}} := 2330 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

hustota Al

$$\rho_{\text{Al}} := 2699 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Celková hustota

$$\rho := 0.12 \cdot \rho_{\text{Si}} + 0.88 \cdot \rho_{\text{Al}}$$

$$\rho = 2654.72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hmotnost pístu

$$m_{\text{pi}} := \rho \cdot V_{\text{cp}}$$

$$m_{\text{pi}} = 0.302 \text{ kg}$$

Hustota oceli

$$\rho_{\text{O}} := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hmotnost čepu

$$m_{\check{c}} := V_{\check{c}} \cdot \rho_{\text{O}}$$

$$m_{\check{c}} = 0.105 \text{ kg}$$

Celková hmotnost posuvných částí pístoní skupiny

$$m_c := m_{\check{c}} + m_{\text{pi}}$$

$$m_c = 0.407 \text{ kg}$$

3.3. Výpočet sil působících na pístní skupinu

3.3.1. Zjištění maxima zrychlení a setrvačné síly

délka ojnice $l_o := 2.05 \cdot D$ $l_o = 209.1 \cdot \text{mm}$

poloměr kliky $r_k := 0.5 \cdot h$ $r_k = 55 \cdot \text{mm}$

klikový poměr $\lambda_k := \frac{r_k}{l_o}$ $\lambda_k = 0.263$

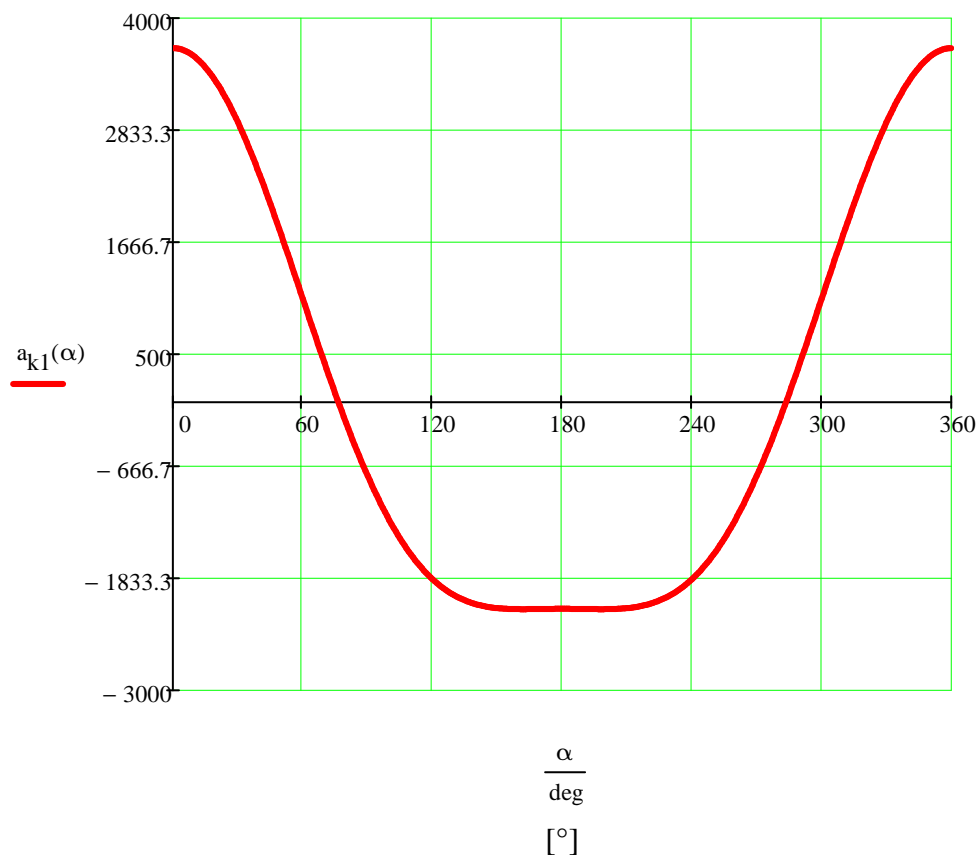
Závislost zrychlení na úhlu natočení klikového hřídele

$$\alpha := 0, 1 \text{deg}.. 360 \text{deg}$$

$$a_{k1}(\alpha) := r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda_k \cdot \cos(2 \cdot \alpha))$$

$$a_{k1}(\alpha) =$$

3687	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
3686	
3683	
3679	
3672	
3664	
3654	
3642	
3629	
3614	
...	



Obr. 15 Závislost zrychlení pístu na úhlu natočení klikového hřídele

Maximální zrychlení

Maximální zrychlení je při úhlu

$$\alpha_{\max} := 0$$

$$a_k := r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha_{\max}) + \lambda_k \cdot \cos(2 \cdot \alpha_{\max}))$$

$$a_k = 3687 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Závislost setrvačné síly na úhlu natočení klikového hřídele

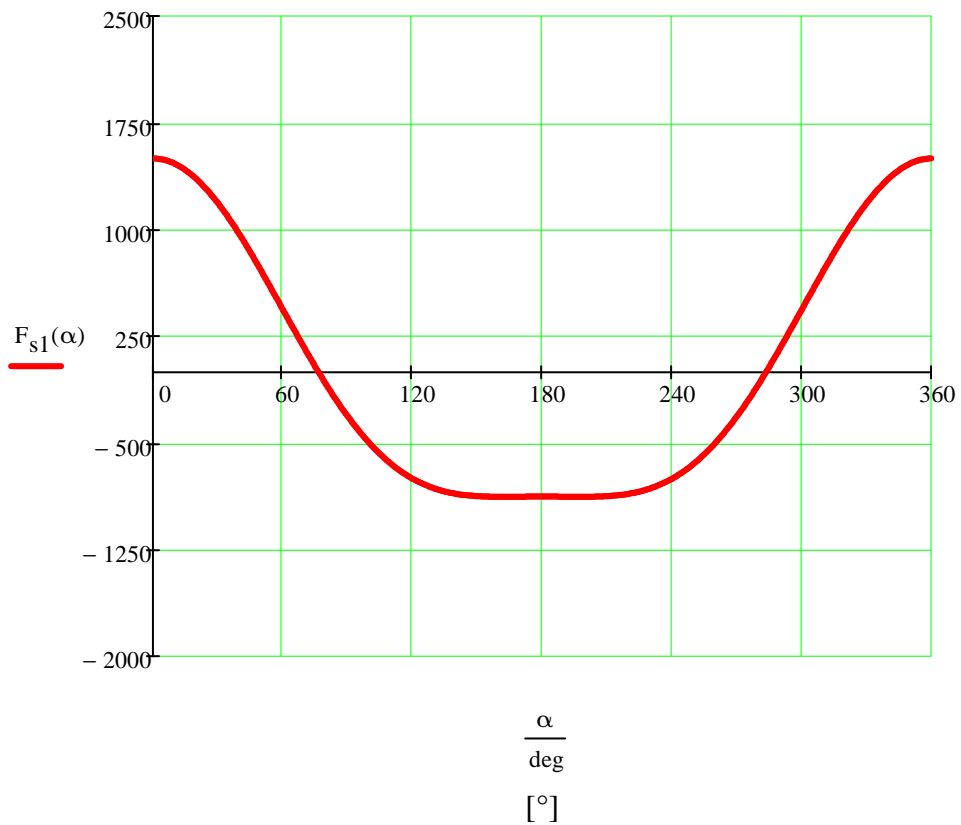
$\alpha := 0, 1 \text{deg}.. 360 \text{deg}$

$$F_{s1}(\alpha) := m_c \cdot \left[r_k \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha) + \lambda_k \cdot \cos(2 \cdot \alpha)) \right]$$

$F_{s1}(\alpha) =$

1501
1500
1499
1497
1495
...

N



Obr. 16 Závislost setrvačné síly na úhlu natočení klikového hřídele

Maximální setrvačná síla

$$F_s := m_c \cdot a_k \quad F_s = 1501 \text{ N}$$

Setrvačná síla bez uvažování hmotnosti pístního čepu

$$F_{s2} := m_{pi} \cdot a_k \quad F_{s2} = 1113 \text{ N}$$

3.3.2. Maximální síla působící na pístní skupinu

Maximální síla při expanzním zdvihu v horní úvratí

$$F_c := F_p - F_s \quad F_c = 69990 \text{ N}$$

$$F_{c2} := F_p - F_{s2} \quad F_{c2} = 70377 \text{ N}$$

Maximální síla při sacím zdvihu

sací podtlak $p_s := 20000 \text{ Pa}$

$$F_{cs} := p_s \cdot S_{ps} + F_s \quad F_{cs} = 1664 \text{ N}$$

4 Pevnostní výpočet pístního čepu

4.1 Měrný tlak

4.1.1 Otláčení mezi pístním čepem a pouzdem oka ojnice

Činná délka pouzdra oka ojnice

$$a := H_o - 4 \text{ mm} \quad a = 36.8 \text{ mm}$$

$$p_o := \frac{F_c}{a \cdot d_a} \quad p_o = 56.5 \text{ MPa}$$

4.2.2 Otláčení mezi pístním čepem a oky v pístu

Pomocný rozměr b pro výpočet činné délky plochy otláčení mezi čepem a pístem

$$b := H_o + 2 \text{ mm} \quad b = 42.8 \text{ mm}$$

$$p_p := \frac{F_{c2}}{(l_c - b) \cdot d_a} \quad p_p = 38.6 \text{ MPa}$$

4.2 Namáhání pístitního čepu ohybem

Maximální ohybový moment

$$M_{\text{omax}} := \frac{F_c}{12} \cdot \left(l_c + 2 \cdot b - \frac{3}{2} \cdot a \right) \quad M_{\text{omax}} = 742.5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Modul průřezu v ohybu

$$W_o := \frac{\pi \cdot d_a^3}{32} \cdot (1 - p^4) \quad p := \frac{d_i}{d_a} \quad W_o = 3239 \cdot \text{mm}^3$$

Maximální ohybové napětí

$$\sigma_{\text{omax}} := \frac{M_{\text{omax}}}{W_o} \quad \sigma_{\text{omax}} = 229.2 \cdot \text{MPa}$$

4.3 Namáhání pístitního čepu smykem

$$\tau_{\text{max}} := \frac{0.85 \cdot F_c \cdot (1 + p + p^2)}{d_a^2 \cdot (1 - p^4)} \quad \tau_{\text{max}} = 119.8 \cdot \text{MPa}$$

5 Výpočet ojnice

5.1. Rozměry ojnice

Výška I profilu ojnice

$$T_i := 0.26 \cdot D \quad T_i = 26.52 \cdot \text{mm}$$

Délka ojnice

$$l_o = 209.1 \cdot \text{mm}$$

Vnitřní průměr oka ojnice

$$D_{H1} := 0.42 \cdot D \quad D_{H1} = 42.84 \cdot \text{mm}$$

Vnější průměr oka ojnice

$$D_{H2} := 1.48 \cdot D_{H1} \quad D_{H2} = 63.403 \cdot \text{mm}$$

Vnitřní průměr hlavy ojnice

$$D_{D1} := 0.67 \cdot D$$

$$D_{D1} = 68.34 \cdot \text{mm}$$

Vnější průměr hlavy ojnice

$$D_{D2} := 1.2 \cdot D_{D1}$$

$$D_{D2} = 82.008 \cdot \text{mm}$$

Šířka oka ojnice

$$H_H := 0.38 \cdot D$$

$$H_H = 38.76 \cdot \text{mm}$$

Šířka hlavy ojnice

$$H_D := H_H$$

$$H_D = 38.76 \cdot \text{mm}$$

Šířka pásnice

$$t_{o1} := 38 \text{mm}$$

Šířka stojiny

$$t_o := 6 \text{mm}$$

5.2. Pevnostní kontrola oka ojnice

5.2.1. Měrný tlak

Součinitel tepelné roztažnosti bronzu

$$\alpha_b := 1.8 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$$

Modul pružnosti v tahu pro bronz

$$E_b := 1.15 \cdot 10^5 \text{MPa}$$

Součinitel tepelné roztažnosti oceli

$$\alpha_o := 1 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$$

Modul pružnosti v tahu pro ocel

$$E_o := 2.1 \cdot 10^5 \text{MPa}$$

přesah bronzového pouzdra

$$e_p := 0.06 \text{mm}$$

rozdíl teplot při ohřevu

$$\Delta t := 150 \text{K}$$

Zvětšení přesahu v důsledku ohřátí

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

$$e_t = 0.051 \cdot \text{mm}$$

$$C_o := \frac{D_{H2}^2 + D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2}$$

$$C_o = 2.68$$

$$C_p := \frac{D_{H1}^2 + d_a^2}{D_{H1}^2 - d_a^2}$$

$$C_p = 4.227$$

Poissonova konstanta

$$\mu := 0.3$$

Výsledný měrný tlak mezi pouzdrem a okem ojnice

$$p_m := \frac{e_p + e_t}{D_{H1} \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p - \mu}{E_b} \right)} \quad p_m = 53.8 \cdot \text{MPa}$$

Napětí na vnějším vlákně

$$\sigma_{ma} := p_m \cdot \frac{2 \cdot D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2} \quad \sigma_{ma} = 90.4 \cdot \text{MPa}$$

Napětí na vnitřním vlákně

$$\sigma_{mi} := p_m \cdot \frac{D_{H2}^2 + D_{H1}^2}{D_{H2}^2 - D_{H1}^2} \quad \sigma_{mi} = 144.2 \cdot \text{MPa}$$

5.2.2. Namáhání oka ojnice setrvačnou silou

Úhel od vetknutí po střed oka ojnice

$$\phi_Z := 130 \text{deg}$$

Poloměr těžiště příčného průřezu

$$r' := \frac{D_{H2} + D_{H1}}{4} \quad r' = 26.561 \cdot \text{mm}$$

Nahrazení vazbových účinků momentem a silou

$$M_{os} := F_{cs} \cdot r' \cdot (0.00033 \cdot \phi_Z - 0.0297) \quad M_{os} = -1 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$F_{nos} := F_{cs} \cdot (0.572 - 0.0008 \cdot \phi_Z) \quad F_{nos} = 949 \text{ N}$$

Moment a normálová síla v místě vetknutí

$$M_s := M_{os} + F_{nos} \cdot r' \cdot (1 - \cos(\phi_Z)) - 0.5 \cdot F_{cs} \cdot r' \cdot (\sin(\phi_Z) - \cos(\phi_Z))$$

$$M_s = 9 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$F_{ns} := F_{nos} \cdot \cos(\phi_Z) + 0.5 \cdot F_{cs} \cdot (\sin(\phi_Z) - \cos(\phi_Z))$$

$$F_{ns} = 562 \text{ N}$$

Tloušťka stěny oka ojnice

$$h_o := \frac{D_{H2} - D_{H1}}{2} \quad h_o = 10.282 \cdot \text{mm}$$

Průřez oka ojnice

$$S_o := h_o \cdot a \quad S_o = 378.363 \cdot \text{mm}^2$$

Průřez pouzdra ojnice

$$S_{po} := \frac{D_{H1} - d_a}{2} \cdot a \quad S_{po} = 168.912 \cdot \text{mm}^2$$

konstanta vyjadřující podíl normálové síly F_{ns} přenášené okem ojnice ve vztahu přenosu ložiskovým pouzdem oka

$$k_1 := \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o + E_b \cdot S_{po}} \quad k_1 = 0.804$$

Normálové napětí na vnějším vlákne

$$\sigma_{as} := \left[2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h_o}{h_o \cdot (2 \cdot r' + h_o)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{h_o \cdot a} \quad \sigma_{as} = 13.6 \cdot \text{MPa}$$

Normálové napětí na vnitřním vlákne

$$\sigma_{is} := \left[-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot r' + h_o}{h_o \cdot (2 \cdot r' - h_o)} + k_1 \cdot F_{ns} \right] \cdot \frac{1}{h_o \cdot a} \quad \sigma_{is} = -17.1 \cdot \text{MPa}$$

5.2.3. Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů

při $\phi_z = 130^\circ$ jsou konstanty rovny $a_1 := 0.0085$

$$a_2 := -0.0030$$

ϕ_z v radiánech je

$$\phi_z = 2.269 \cdot \text{rad}$$

$$J_o := \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_z}{2} \right) \cdot \sin(\phi_z) - \frac{1}{2} \cdot \cos(\phi_z) \quad J_o = 0.054$$

Ohybový moment

$$M_t := F_p \cdot r' \cdot \left[a_2 + a_1 \cdot (1 - \cos(\phi_z)) - \frac{2}{\pi} \cdot J_o \right] \quad M_t = -44 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Normálová síla

$$F_{nt} := F_p \cdot \left(a_1 \cdot \cos(\phi_z) + \frac{2}{\pi} \cdot J_o \right) \quad F_{nt} = 2067 \text{ N}$$

Normálové napětí na vnějším vlákne

$$\sigma_{at} := \left[2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot r' + h_o}{h_o \cdot (2r' + h_o)} + k_1 \cdot F_{nt} \right] \cdot \frac{1}{h_o \cdot a} \quad \sigma_{at} = -56.8 \cdot \text{MPa}$$

Normálové napětí na vnitřním vlákne

$$\sigma_{it} := \left[-2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot r' + h_o}{h_o \cdot (2r' - h_o)} + k_1 \cdot F_{nt} \right] \cdot \frac{1}{h_o \cdot a} \quad \sigma_{it} = 94.9 \cdot \text{MPa}$$

5.3. Maximální napětí v oku ojnice

5.3.1. Napětí na vnějším průměru

$$\sigma_{\max 1} := \sigma_{at} + \sigma_{ma} \quad \sigma_{\max 1} = 33.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\max 2} := \sigma_{as} + \sigma_{ma} \quad \sigma_{\max 2} = 103.9 \cdot \text{MPa}$$

5.3.2. Napětí na vnitřním průměru

$$\sigma_{\max 3} := \sigma_{it} + \sigma_{mi} \quad \sigma_{\max 3} = 239.1 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\max 4} := \sigma_{is} + \sigma_{mi} \quad \sigma_{\max 4} = 127.1 \cdot \text{MPa}$$

5.3.3. Maximální napětí dosažené v oku ojnice

$$\sigma_{\max} := \sigma_{\max 3} \quad \sigma_{\max} = 239.1 \cdot \text{MPa}$$

materiál oka ojnice: ocel 16240

$$R_m := 785 \text{ MPa}$$

$$R_e := 590 \text{ MPa}$$

5.4. Bezpečnost oka ojnice vůči mezi kluzu

$$k_k := \frac{R_e}{\sigma_{\max}} \quad k_k = 2.47$$

5.5. Kontrola na únavu

Mez únavy vzorku

$$\sigma_{CO} := 0.504 \cdot R_m \quad \sigma_{CO} = 395.6 \text{ MPa}$$

Součinitel povrchu

$$k_a := 4.51 \cdot \left(\frac{R_m}{\text{MPa}} \right)^{-0.265} \quad k_a = 0.771$$

Součinitel velikosti

$$k_b := 1.24 \cdot \left(\frac{H_H}{\text{mm}} \right)^{-0.107} \quad k_b = 0.838$$

Součinitel zatížení

$$k_c := 1$$

Součinitel teploty

$$k_d := 1.02$$

Součinitel spolehlivosti

$$k_e := 0.868$$

Součinitel dalších vlivů

$$k_f := 1$$

Mez únavy reálné součásti

$$\sigma_c := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{CO} \quad \sigma_c = 226.4 \text{ MPa}$$

Amplituda napětí

$$\sigma_a := \frac{\sigma_{\max 3} - \sigma_{\max 4}}{2} \quad \sigma_a = 56 \text{ MPa}$$

Střední napětí

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{\max 3} + \sigma_{\max 4}}{2} \quad \sigma_m = 183.1 \text{ MPa}$$

Bezpečnost vůči únavě podle Gerbera

$$k_{\text{cykl}} := \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_m}{\sigma_m} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_a}{\sigma_c} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \sigma_m \cdot \sigma_c}{R_m \cdot \sigma_a} \right)^2} \right] \quad k_{\text{cykl}} = 2.58$$