

Příloha 1 - konvenční výpočet - NA

5.1 Vstupní síly

setrvačné síly jednotlivých posuvných hmot součástí:

$$F_{sp} = 1342.046 \text{ N}$$

$$F_{sp\check{c}} = 393.617 \text{ N}$$

$$F_{so} = 843.465 \text{ N}$$

zatížení působící na jednotlivé součásti:

síly od plynů:

síly setrvačné:

$$p_p = 6.346 \text{ MPa}$$

píst:

$$F_{Hp} = 40014.466 \text{ N}$$

$$F_{Dp} = -562.31 \text{ N}$$

pístní čep:

$$F_{Hp\check{c}} = 38739.637 \text{ N}$$

$$F_{Dp\check{c}} = -1342.046 \text{ N}$$

síla v ose válce:

$$F_{HV} = 37562.334 \text{ N}$$

$$F_{DV} = -1735.663 \text{ N}$$

síla na víko ojnice:

$$F_{Hojv} = 36718.869 \text{ N}$$

$$F_{Dojv} = -2579.128 \text{ N}$$

tečná síla na klice:

$$F_{THkh} = 16442.83 \text{ N}$$

$$F_{TDkh} = -1298.66 \text{ N}$$

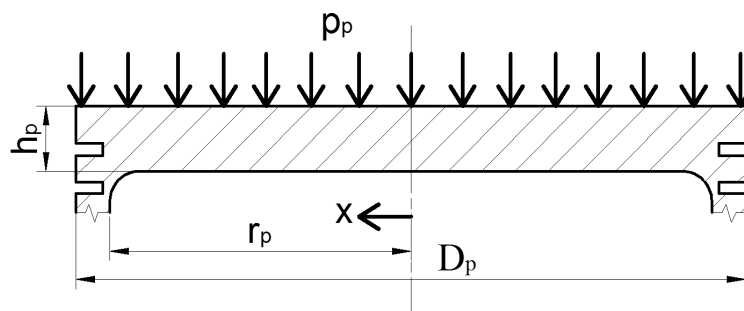
radiální síla na klice:

$$F_{RHkh} = 35842.095 \text{ N}$$

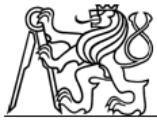
$$F_{RDkh} = -2579.128 \text{ N}$$

5.2 Píst:

Píst je z velké části namáhán tepelně, a mechanické namáhání u něho nemá rozhodující vliv. Také z důvodu pro ruční výpočet složitěho tvaru zde budu řešit jen vrchní desku pístu a to jako tenkou kruhovou desku po obvodu vetknutou a zatíženou tlakem.



Obr. 5.2.1 Rozměrový náčrtek se zatížením pístu.



rozměry pístu:

$$r_p := 38 \text{ mm} \quad \mu := 0.33 \quad x := 0 \text{ mm} \quad h_p := 8.7 \text{ mm}$$

radiální napětí desky:

$$\sigma_r := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (3 + \mu)) = 60.384 \text{ MPa} \quad (5.2.1)$$

tečné napětí desky:

$$\sigma_t := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (1 + 3 \mu)) = 60.384 \text{ MPa} \quad (5.2.2)$$

horní napětí:

$$\sigma_{hp} := \max(\sigma_r, \sigma_t) = 60.384 \text{ MPa} \quad (5.2.3)$$

dolní napětí:

$$\sigma_{dp} := -10 \text{ MPa} \quad (5.2.4)$$

5.2.1 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti 6061 AL:

$$\sigma_{ep} := 257 \text{ MPa} \quad E_p := 68900 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{fp} := 0.634 \quad c_p := -0.723$$

$$\sigma_{fp} := 394 \text{ MPa} \quad K_p' := 404 \text{ MPa} \quad n_p' := 0.062 \quad b_p := -0.045$$

Amplituda napětí:

$$\sigma_{ap} := \frac{\sigma_{hp} - \sigma_{dp}}{2} = 35.192 \text{ MPa} \quad (5.2.1.1)$$

Střední napětí:

$$\sigma_{mp} := \frac{\sigma_{hp} + \sigma_{dp}}{2} = 25.192 \text{ MPa} \quad (5.2.1.2)$$

Prodloužení elastické:

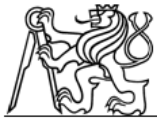
$$\varepsilon_{aELp} := \frac{\sigma_{ap}}{E_p} = 0.0005108 \quad (5.2.1.3)$$

Prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp} := \left(\frac{\sigma_{ap}}{K_p'} \right)^{\left(\frac{1}{n_p'} \right)} = 0 \quad (5.2.1.4)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp} := \varepsilon_{aELp} + \varepsilon_{aPLp} = 0.0005108 \quad (5.2.1.5)$$



Odhad počtu cyklů:

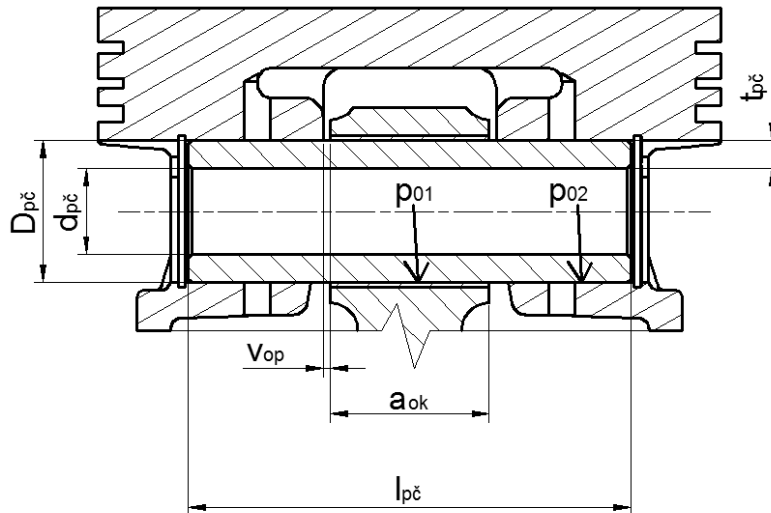
$$N_p := 1.027 \cdot 10^{23} \quad (5.2.1.6)$$

Celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{b_p}}{E_p} + \varepsilon_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{c_p} = 0.0005108 \quad (5.2.1.7)$$

5.3 Pístní čep:

Pístní čep je namáhán na ohyb a střih. Krom těchto zatížení se u něj kontroluje i ovalizace průřezu. Pístní čep budu řešit kolmo k jeho ose jako deformaci kruhového křivého prutu zatíženého spojitým zatížením s rozměry středního poloměru pístního čepu. Jelikož ale teorie křivých prutů neuvažuje tloušťku stěny vzhledem k poloměru, jako má pístní čep, je dále zaveden opravný součinitel vycházející ze zkušeností autorů.



Obr. 5.3.1 Rozměrový náčrtek pístního čepu.

Rozměry pístního čepu:

průměr vnější:

$$D_{pč} := 20.6 \text{ mm}$$

průměr vnitřní:

$$d_{pč} := 12.6 \text{ mm}$$

tloušťka stěny:

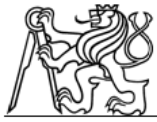
$$t_{pč} := \frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} = 4 \text{ mm} \quad (5.3.1)$$

střední poloměr:

$$\rho_{pč} := \frac{D_{pč} + d_{pč}}{4} = 8.3 \text{ mm} \quad (5.3.2)$$

délka čepu:

$$l_{pč} := 64 \text{ mm}$$



vůle mezi ojnicí a pístem:

$$v_{op} := 1 \text{ mm}$$

Youngův modul:

$$E_{pč} := 206000 \text{ MPa}$$

tloušťka ojnice:

$$a_{ok} := 22.5 \text{ mm}$$

5.3.1 Kontrola otlačení:

Tlak v ložisku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{pč}} = 81.041 \text{ MPa} \quad (5.3.1.1)$$

Tlak v ložiskách pístu:

$$p_{o2} := \frac{F_{Hp} - F_{sp}}{(l_{pč} - a_{ok} - 2 \cdot v_{op}) \cdot D_{pč}} = 47.527 \text{ MPa} \quad (5.3.1.2)$$

5.3.2 Výpočet ohybového napětí:

maximální ohybový moment horní:

$$M_{OmaxH} := \frac{F_{Hpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = 255.843 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.3.2.1)$$

maximální ohybový moment dolní:

$$M_{OmaxD} := \frac{F_{Dpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = -8.863 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.3.2.2)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{opč} := \frac{\pi \cdot D_{pč}^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{pč}}{D_{pč}} \right)^4 \right) = 738.106 \text{ mm}^3 \quad (5.3.2.3)$$

ohybové napětí horní:

$$\sigma_{OpčH} := \frac{M_{OmaxH}}{W_{opč}} = 346.621 \text{ MPa} \quad (5.3.2.4)$$

ohybové napětí dolní:

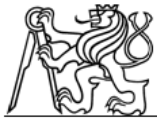
$$\sigma_{OpčD} := \frac{M_{OmaxD}}{W_{opč}} = -12.008 \text{ MPa} \quad (5.3.2.5)$$

amplituda napětí:

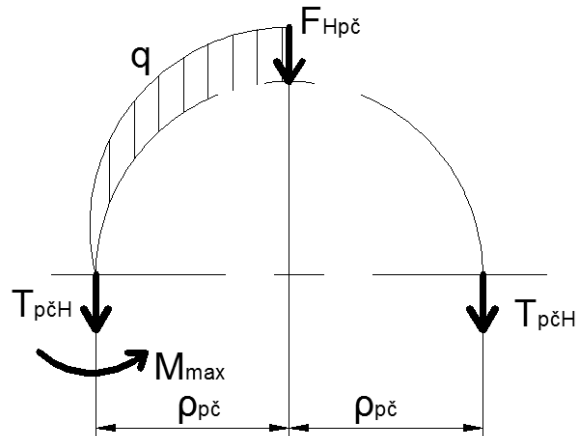
$$\sigma_{OApč} := \frac{\sigma_{OpčH} - \sigma_{OpčD}}{2} = 179.314 \text{ MPa} \quad (5.3.2.6)$$

střední napětí:

$$\sigma_{OMpč} := \frac{\sigma_{OpčH} + \sigma_{OpčD}}{2} = 167.307 \text{ MPa} \quad (5.3.2.7)$$



5.3.3 Výpočet smykového napětí:



Obr. 5.3.3.1 Rozložení sil pístního čepu při namáhání stříhem.

posouvající síla horní:

$$T_{pčH} := \frac{F_{Hpč}}{2} = 19369.818 \text{ N} \quad (5.3.3.1)$$

posouvající síla dolní:

$$T_{pčD} := \frac{F_{Dpč}}{2} = -671.023 \text{ N} \quad (5.3.3.2)$$

plocha stříhaného průřezu pístního čepu:

$$S_{pč} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{pč}^2 - d_{pč}^2) = 208.602 \text{ mm}^2 \quad (5.3.3.3)$$

horní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčH} := \frac{T_{pčH}}{S_{pč}} = 92.855 \text{ MPa} \quad (5.3.3.4)$$

dolní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčD} := \frac{T_{pčD}}{S_{pč}} = -3.217 \text{ MPa} \quad (5.3.3.5)$$

amplituda napětí:

$$\tau_{pčA} := \frac{\tau_{pčH} - \tau_{pčD}}{2} = 48.036 \text{ MPa} \quad (5.3.3.6)$$

střední napětí:

$$\tau_{pčM} := \frac{\tau_{pčH} + \tau_{pčD}}{2} = 44.819 \text{ MPa} \quad (5.3.3.7)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redA} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčA}^2 + \sigma_{OApč}^2} = 203.429 \text{ MPa} \quad (5.3.3.8)$$



střední redukované napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redM} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčM}^2 + \sigma_{OMpč}^2} = 189.807 \text{ MPa} \quad (5.3.3.9)$$

5.3.4 Výpočet ovalizace pístitního čepu:

horní spojitě zatížení:

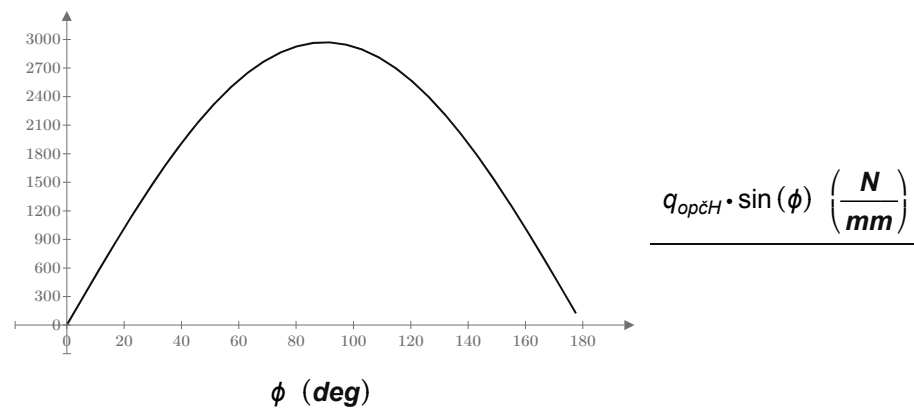
$$q_{opčH} := \frac{2 \cdot F_{Hpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = 2971375.757 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.3.4.1)$$

dolní spojitě zatížení:

$$q_{opčD} := \frac{2 \cdot F_{Dpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = -102936.546 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.3.4.2)$$

rozsah úhlu:

$$\phi := 0, 0.1 \dots 180 \text{ deg}$$



Obr. 5.3.4.1 Velikost spojitého zatížení v závislosti na úhlu.

maximální moment lze očekávat při maximálním rameni, což je při úhlu $\phi := 90 \text{ deg}$

horní spojitě zatížení:

$$q := q_{opčH} \cdot \sin(\phi) = 2971375.757 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.3.4.3)$$

dolní spojitě zatížení:

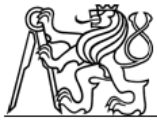
$$q := q_{opčD} \cdot \sin(\phi) = -102936.546 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.3.4.4)$$

maximální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxH} := T_{pčH} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčH} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = 58.42 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.3.4.5)$$

minimální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxD} := T_{pčD} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčD} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = -2.024 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.3.4.6)$$



poměr průměrů pístitního čepu:

$$\alpha := \frac{d_{p\check{c}}}{D_{p\check{c}}} = 0.612 \quad (5.3.4.7)$$

opravný součinitel vyjadřující vliv tl. stěny vzhledem k poloměru:

$$k_{p\check{c}} := 1.5 - 15 \cdot (\alpha - 0.4)^3 = 1.358 \quad (5.3.4.8)$$

horní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eH} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 507.348 \text{ MPa} \quad (5.3.4.9)$$

horní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iH} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -460.411 \text{ MPa} \quad (5.3.4.10)$$

dolní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eD} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -17.576 \text{ MPa} \quad (5.3.4.11)$$

dolní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iD} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 15.95 \text{ MPa} \quad (5.3.4.12)$$

amplituda napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eAp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} - \sigma_{eD}}{2} = 262.462 \text{ MPa} \quad (5.3.4.13)$$

střední napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eMp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} + \sigma_{eD}}{2} = 244.886 \text{ MPa} \quad (5.3.4.14)$$

amplituda napětí na vnitřním vlákně:

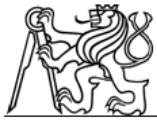
$$\sigma_{iAp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} - \sigma_{iD}}{2} = -238.18 \text{ MPa} \quad (5.3.4.15)$$

střední napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iMp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} + \sigma_{iD}}{2} = -222.231 \text{ MPa} \quad (5.3.4.16)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{OPp\check{c}} := \frac{l_{p\check{c}} \cdot \left(\frac{D_{p\check{c}} - d_{p\check{c}}}{2} \right)^2}{6} = 170.667 \text{ mm}^3 \quad (5.3.4.17)$$



kvadratický moment průřezu:

$$J_{OPpč} := \frac{I_{pč} \cdot \left(\frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} \right)^3}{12} = 341.333 \text{ mm}^4 \quad (5.3.4.18)$$

horní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčH} := \frac{M_{maxH}}{W_{OPpč}} = 342.307 \text{ MPa} \quad (5.3.4.19)$$

dolní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčD} := \frac{M_{maxD}}{W_{OPpč}} = -11.858 \text{ MPa} \quad (5.3.4.20)$$

amplituda napětí:

$$\sigma_{PApč} := \frac{\sigma_{PpčH} - \sigma_{PpčD}}{2} = 177.083 \text{ MPa} \quad (5.3.4.21)$$

střední napětí:

$$\sigma_{PMpč} := \frac{\sigma_{PpčH} + \sigma_{PpčD}}{2} = 165.224 \text{ MPa} \quad (5.3.4.22)$$

s opravnými součiniteli:

$$\delta d_{OVpč} := 0.09 \cdot \frac{F_{Hpč}}{E_{pč} \cdot I_{pč}} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 \cdot k_{pč} = 0.026 \text{ mm} \quad (5.3.4.23)$$

maximální ovalizace je volena:

$$\delta d_{OVmax} := 0.0017 \cdot D_{pč} = 0.035 \text{ mm} \quad (5.3.4.24)$$

OVALIZACE VYHOVUJE

5.3.5 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti:

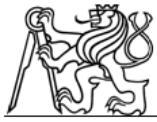
$E_{pč} := 206000 \text{ MPa}$	$\varepsilon_{fpč} := 0.13$	$c_{pč} := -0.79$	$b_{pč} := -0.1$
$K_{pč}' := 3498 \text{ MPa}$	$\eta_{pč}' := 0.1$	$\sigma_{fpč} := 3047 \text{ MPa}$	

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{redA}, \sigma_{eApč}, \sigma_{iApč}, \sigma_{PApč}) = 262.462 \text{ MPa} \quad (5.3.5.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELpč} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{pč}} = 0.0012741 \quad (5.3.5.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp\check{c}} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{p\check{c}}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{p\check{c}}'} \right)} = 0 \quad (5.3.5.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp\check{c}} := \varepsilon_{aELp\check{c}} + \varepsilon_{aPLp\check{c}} = 0.0012741 \quad (5.3.5.4)$$

odhad počtu cyklů:

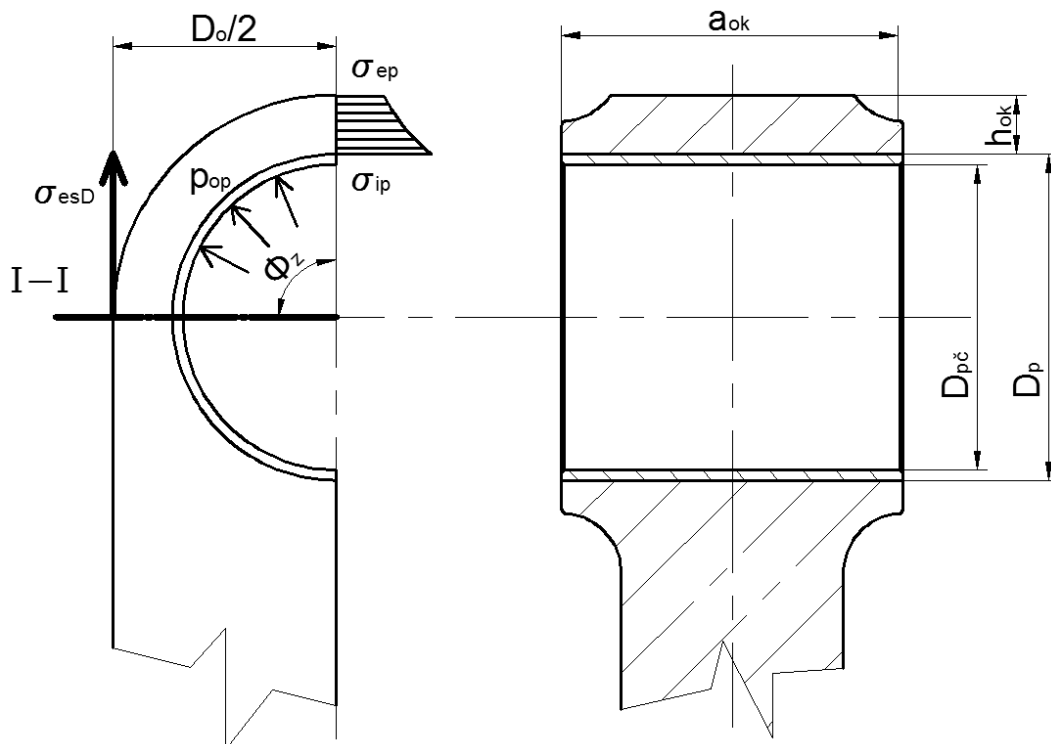
$$N_{p\check{c}} := 2.223 \cdot 10^{10}$$

celková deformace pro kontrolu:

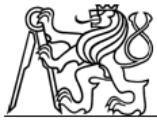
$$\varepsilon_{a'} := \frac{\sigma_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{b_{p\check{c}}}}{E_{p\check{c}}} + \varepsilon_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{c_{p\check{c}}} = 0.0012741 \quad (5.3.5.5)$$

5.4 Ojnice:

Ojnice je zatěžována silami od tlaku plynů, setrvačnými silami a odstředivými silami. Síly od tření a síly z geometrické nepřesnosti při výrobě se neuvažují a respektují se nižším dovoleným napětím. Při výpočtu se uvažuje namáhání tah/tlak a ohyb. Oko ojnice je ještě namáháno vlisovaným bronzovým pouzdem. Napětí od nalisování zde uvedu jen přibližně, protože neznám skutečný lisovací přesah a teplotu ojnice.



Obr. 5.4.1 Rozměrový náčrtek oka ojnice.



provozní teplota ojnice:

$$t_{op} := 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

teplota okolí:

$$t_{ok} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

rozdíl teplot:

$$dt := t_{op} - t_{ok} = 100 \text{ } K \quad (5.4.1)$$

lisovací přesah:

$$e := 0.02 \text{ } mm$$

roztlačnost bronzu:

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

roztlačnost ocele:

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

youngův modul pro bronz:

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

youngův modul pro ocel:

$$E_o := 2 \cdot 10^5 \text{ } MPa$$

vnější průměr pouzdra:

$$D_p := 22.5 \text{ } mm$$

vnější průměr oka:

$$D_o := 29.76 \text{ } mm$$

střední poloměr oka:

$$\rho_{ok} := \frac{D_o + D_p}{4} = 13.065 \text{ } mm \quad (5.4.2)$$

úhel zakotvení:

$$\phi_z := 90 \text{ } deg$$

tloušťka stěny oka:

$$h_{ok} := \frac{D_o - D_p}{2} = 3.63 \text{ } mm \quad (5.4.3)$$

plocha průřezu oka:

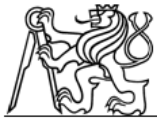
$$S_o := 83.8 \text{ } mm^2$$

plocha průřezu pouzdra:

$$S_p := 16 \text{ } mm^2$$

zatížení oka ojnice:

$$q_o := \frac{F_{HV}}{\pi \cdot \rho_{ok}} = 915.152 \frac{N}{mm} \quad (5.4.4)$$



úhel polohy výpočetního průřezu:

$$\psi := 0 \text{ deg}$$

spojité zatížení v místě přechodu dříku do oka:

$$q := q_o \cdot \sin(\psi) = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (5.4.5)$$

součinitel rozdělení přenosu normálové síly mezi oko ojnice a pouzdro:

$$k := \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o - E_b \cdot S_p} = 1.123 \quad (5.4.6)$$

5.4.1 Tlak v oku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{p\check{c}}} = 81.041 \text{ MPa} \quad (5.4.1.1)$$

5.4.2 Napětí v oku od nalisování pouzdra:

přesah při provozní teplotě:

$$e_t := D_{p\check{c}} \cdot dt \cdot (\alpha_b - \alpha_o) = 0.016 \text{ mm} \quad (5.4.2.1)$$

konstanty pro výpočet tlaku mezi pouzdrům a okem ojnice:

$$C_o := \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 3.669 \quad (5.4.2.2)$$

$$C_p := \frac{D_p^2 + D_{p\check{c}}^2}{D_p^2 - D_{p\check{c}}^2} = 11.364 \quad (5.4.2.3)$$

tlak mezi povrchem pouzdra a okem ojnice:

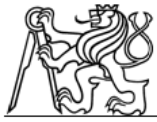
$$p_{op} := \frac{e + e_t}{D_p \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p - \mu}{E_b} \right)} = 13.984 \text{ MPa} \quad (5.4.2.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

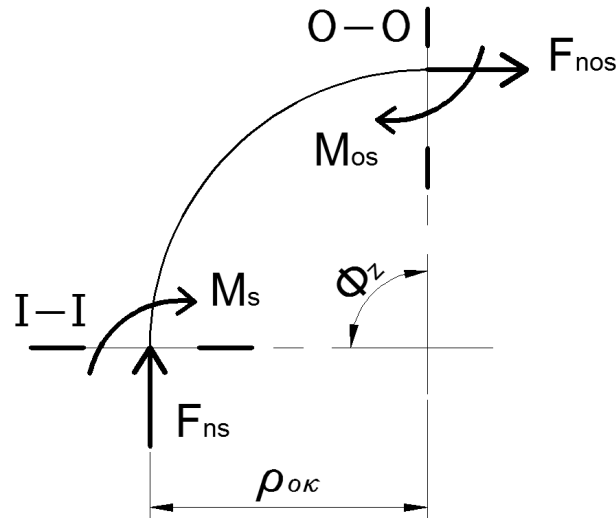
$$\sigma_{ep} := p_{op} \cdot \frac{2 \cdot D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 37.318 \text{ MPa} \quad (5.4.2.5)$$

napětí na vnitřním vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{ip} := p_{op} \cdot \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 51.302 \text{ MPa} \quad (5.4.2.6)$$



5.4.3 Napětí v oku od setrvačných sil:



Obr. 5.4.3.1 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O

$$M_{os} := |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (0.003 \cdot \phi_z - 0.0297) = -0.567 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.3.1)$$

síla namáhající průřez O-O

$$F_{nos} := |F_{DV}| \cdot (0.572 - 0.008 \cdot \phi_z) = 970.989 \text{ N} \quad (5.4.3.2)$$

moment namáhající průřez I-I

$$M_s := M_{os} + F_{nos} \cdot \rho_{ok} \cdot (1 - \cos(\phi_z)) - 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 0.781 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.3.3)$$

síla namáhající průřez I-I

$$F_{ns} := F_{nos} \cdot \cos(\phi_z) + 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 867.832 \text{ N} \quad (5.4.3.4)$$

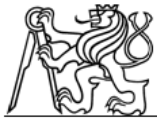
Napětí v oku se stanoví ze vzorce pro křivý prut namáhaný kombinací tahu a ohybu.

napětí na vnějším vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{esD} := \left(2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 26.458 \text{ MPa} \quad (5.4.3.5)$$

napětí na vnitřním vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{isD} := \left(-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} - h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = -7.272 \text{ MPa} \quad (5.4.3.6)$$



5.4.4 Napětí v oku od sil tlaku plynů:

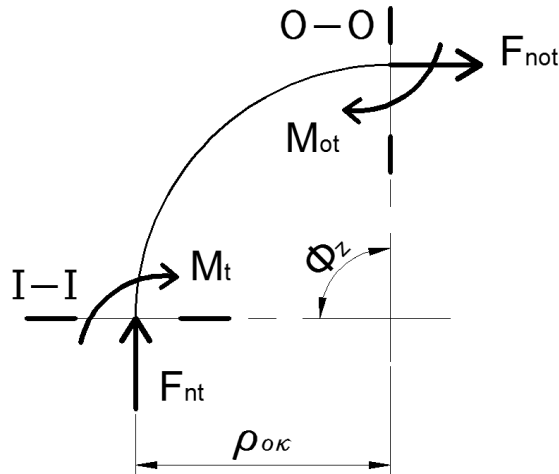
součinitelé pro odhad M_{ot} a F_{not} pro úhel Φ_z .

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

Obr. 5.4.4.1 Tabulka koeficientů natoční výpočtového průřezu od osy ojnice

$$\delta_1 := 0.00$$

$$\delta_2 := 0.00$$



Obr. 5.4.4.2 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O:

$$M_{ot} := \delta_2 \cdot F_{HV} \cdot \rho_{ok} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.4.1)$$

normálová síla namáhající průřez O-O:

$$F_{no} := \delta_1 \cdot F_{HV} = 0 \text{ N} \quad (5.4.4.2)$$

moment namáhající průřez I-I:

$$M_t := M_{ot} + \left(F_{no} \cdot \rho_{ok} + \rho_{ok} \cdot F_{no} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2}\right) \right) - \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok}^2 \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.4.3)$$

normálová síla namáhající průřez I-I:

$$F_{nt} := -F_{no} \cdot \cos(\pi - \phi_z) + \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \quad (5.4.4.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{etD} := \left(2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 11.936 \text{ MPa} \quad (5.4.4.5)$$



horní napětí oka:

$$\sigma_{okmax} := \sigma_{ep} + \sigma_{esD} = 63.776 \text{ MPa} \quad (5.4.4.6)$$

dolní napětí oka:

$$\sigma_{okmin} := \sigma_{ep} + \sigma_{etD} = 49.254 \text{ MPa} \quad (5.4.4.7)$$

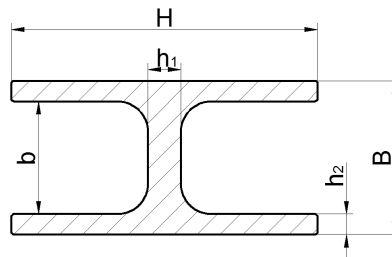
amplitudové napětí oka:

$$\sigma_{Aokoj} := \frac{\sigma_{okmax} - \sigma_{okmin}}{2} = 7.261 \text{ MPa} \quad (5.4.4.8)$$

střední napětí oka:

$$\sigma_{Mokoj} := \frac{\sigma_{okmax} + \sigma_{okmin}}{2} = 56.515 \text{ MPa} \quad (5.4.4.9)$$

5.4.5 Napětí v dříku ojnice od setrvačných sil a sil od tlaku plynů:



Obr. 5.4.5.1 Průřez dříku ojnice.

Dřík ojnice je namáhán tlakem, tahem, odstředivými silami a často také vzpěrem.

tloušťka profilu H:

$$B := 15 \text{ mm}$$

šíře profilu H:

$$H := 30 \text{ mm}$$

tloušťka mezery profilu H:

$$b := 11 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

$$h_1 := 3.2 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

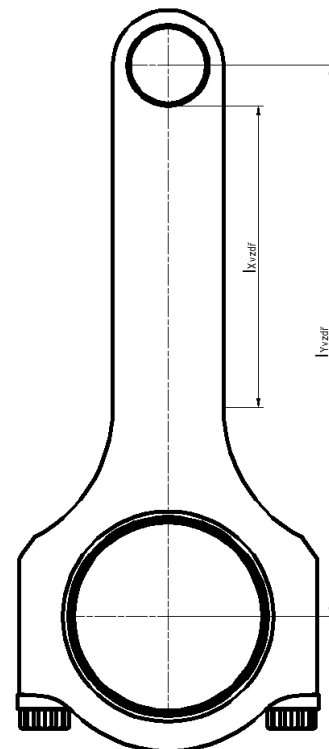
$$h_2 := 2 \text{ mm}$$

plocha dříku:

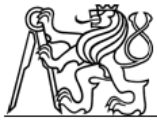
$$S_{dř} := 162 \text{ mm}^2$$

vzpěrná délka ve směru osy X:

$$l_{Xvzdř} := 81.8 \text{ mm}$$



Obr. 5.4.5.2 Výpočtové délky vzpěru.



vzpěrná délka ve směru osy Y:

$$l_{Yvdř} := 149.5 \text{ mm}$$

kvadratický moment průřezu k ose Y:

$$I_{Ydř} := 9037 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k ose X:

$$I_{Xdř} := 5640 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k nejpravděpodobnější ose vybočení.

$$I_{min} := \min(I_{Ydř}, I_{Xdř}) = 5640 \text{ mm}^4$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose Y:

$$i_{dřY} := \sqrt{\frac{I_{Ydř}}{S_{dř}}} = 7.469 \text{ mm} \quad (5.4.5.1)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose Y:

$$\lambda_{dřY} := \frac{l_{Yvdř}}{i_{dřY}} = 20.016 \quad (5.4.5.2)$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose X:

$$i_{dřX} := \sqrt{\frac{I_{min}}{S_{dř}}} = 5.9 \text{ mm} \quad (5.4.5.3)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose X:

$$\lambda_{dřX} := \frac{l_{Xvdř}}{i_{dřX}} = 13.863 \quad (5.4.5.4)$$

Štíhlost prutu pro směr X i Y je značně nižší než dolní mez u tohoto typu vzpěru. Z toho plyne, že dřík ojnice není při tomto zatížení namáhán na vzpěr. Budu ho tedy kontrolovat jen na tah/tlak.

napětí dříku v tlaku:

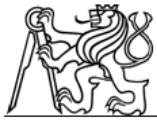
$$\sigma_{TLdřoj} := \frac{F_{HV}}{S_{dř}} = 231.866 \text{ MPa} \quad (5.4.5.5)$$

napětí dříku v tahu:

$$\sigma_{TAdřoj} := \frac{F_{DV}}{S_{dř}} = -10.714 \text{ MPa} \quad (5.4.5.6)$$

amplituda napětí dříku:

$$\sigma_{Adřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} - \sigma_{TAdřoj}}{2} = 121.29 \text{ MPa} \quad (5.4.5.7)$$



střední napětí dřívku:

$$\sigma_{Mdřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} + \sigma_{TAdřoj}}{2} = 110.576 \text{ MPa} \quad (5.4.5.8)$$

5.4.6 Napětí v hlavě ojnice od setrvačných sil.

Hlava je namáhána silami od setrvačnosti pístní skupiny a posuvné části ojnice.

Osová vzdálenost ojnicních šroubů:

$$C := 66.8 \text{ mm}$$

výpočetní průřez pod úhlem:

$$\phi_{Zhl} := 45$$

plochy průřezu víka ojnice:

$$S_{Voj} := 152 \text{ mm}^2$$

plochy průřezu pánve ojnice:

$$S_{Poj} := 167.5 \text{ mm}^2$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xvi} := 8017 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Yvi} := 876 \text{ mm}^4$$

maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Voj} := 6 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Voj} := \frac{I_{Yvi}}{e_{Voj}} = 146 \text{ mm}^3 \quad (5.4.6.1)$$

úhle vychýlení síly zatěžující průřez:

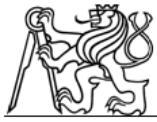
$$\alpha_{df} := 30 \text{ deg}$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xpa} := 8893 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Ypa} := 1672 \text{ mm}^4$$

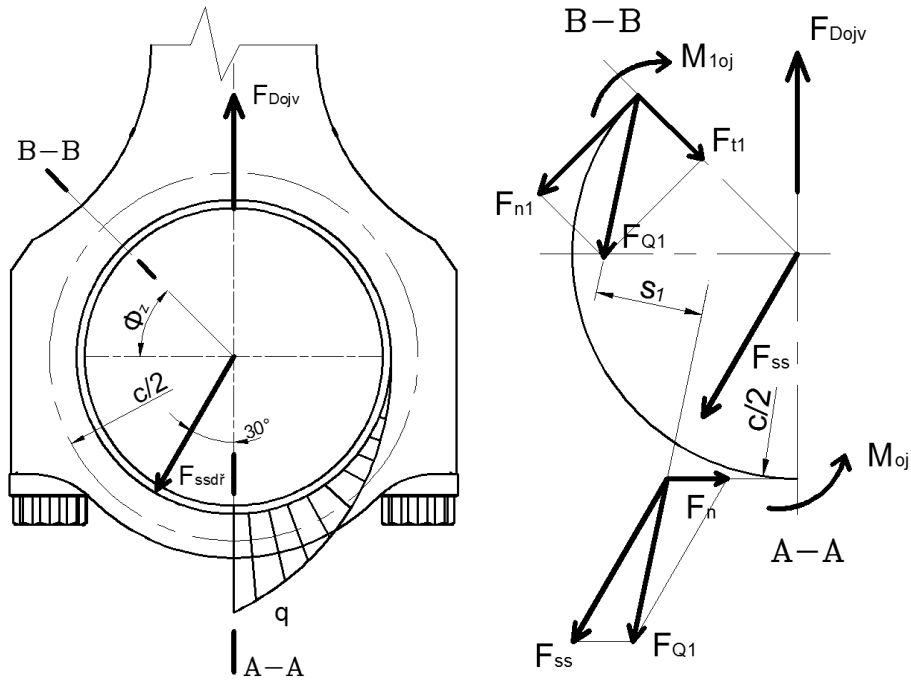


maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Poj} := 7.85 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Poj} := \frac{I_{Ypa}}{e_{Poj}} = 212.994 \text{ mm}^3 \quad (5.4.6.2)$$



Obr. 5.4.6.1 Zatížení hlavy ojnice - setrv.

moment namáhající průřez A-A:

$$M_{Aoj} := |F_{Dojv}| \cdot \frac{C}{2} \cdot (0.0127 + 0.0083 \cdot \phi_{Zhl}) = 33.268 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.6.3)$$

síla namáhající průřez A-A:

$$F_{nAoj} := |F_{Dojv}| \cdot (0.522 - 0.003 \cdot \phi_{Zhl}) = 998.123 \text{ N} \quad (5.4.6.4)$$

moment namáhající průřez B-B:

$$M_{oj} := \frac{M_{Aoj} \cdot I_{Yvi}}{I_{Yvi} + I_{Ypa}} = 11.438 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.6.5)$$

síla namáhající průřez B-B:

$$F_n := \frac{F_{nAoj} \cdot S_{voj}}{S_{voj} + S_{Poj}} = 474.85 \text{ N} \quad (5.4.6.6)$$



horní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmax} := \frac{M_{oj}}{W_{Voj}} + \frac{F_n}{S_{Voj}} = 81.464 \text{ MPa} \quad (5.4.6.7)$$

dolní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmin} := 0 \text{ MPa}$$

amplituda napětí víka:

$$\sigma_{AVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} - \sigma_{Vojmin}}{2} = 40.732 \text{ MPa} \quad (5.4.6.8)$$

střední napětí víka:

$$\sigma_{MVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} + \sigma_{Vojmin}}{2} = 40.732 \text{ MPa} \quad (5.4.6.9)$$

síla jako náhrada spojitěho zatížení působící na víko ojnice :

$$F_{ss} := \frac{|F_{Dojv}|}{2 \cdot \cos(\alpha_{df})} = 1489.061 \text{ N} \quad (5.4.6.10)$$

výslednice normálové síly a síly nahrazující spojitě zatížení:

$$F_{Q1} := 8236.667 \text{ N}$$

normálová síla v řezu B-B hlavy ojnice:

$$F_{n1oj} := 6906.667 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_1 := 16.01 \text{ mm}$$

tečná síla v řezu B-B hlavy ojnice:

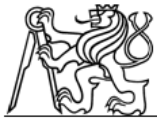
$$F_{t1oj} := 4546.667 \text{ N}$$

přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{1oj} := F_{Q1} \cdot s_1 = 131.869 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.6.11)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n1oj} := \frac{F_{n1oj}}{S_{Poj}} = 41.234 \text{ MPa} \quad (5.4.6.12)$$



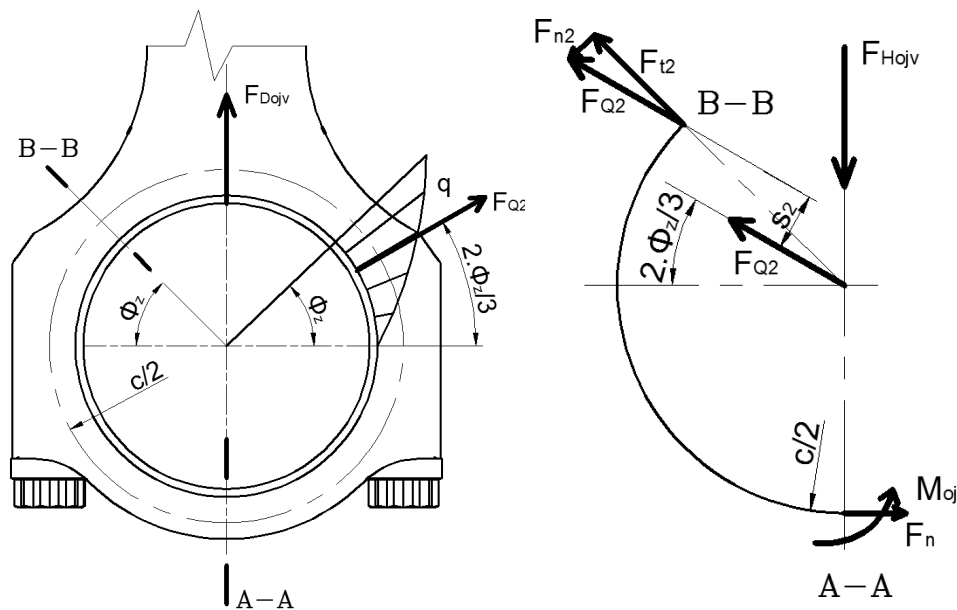
napětí normálové ve vnějším vlákne od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{01oj} := \frac{M_{oj} + M_{1oj}}{W_{Poj}} = 672.821 \text{ MPa} \quad (5.4.6.13)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t1oj} := \frac{F_{t1oj}}{S_{Poj}} = 27.144 \text{ MPa} \quad (5.4.6.14)$$

5.4.7 Napětí v hlavě ojnice od tlakových sil.



Obr. 5.4.7.1 Zatížení hlavy ojnice - tlak.

síla nahrazující spojitého zatížení v řezu B-B:

$$F_{Q2} := 0.54 \cdot \left(\frac{\phi_{Zh} \cdot \pi}{180} - 0.43 \right) \cdot F_{Hojv} = 7046.902 \text{ N} \quad (5.4.7.1)$$

normálová síla zatěžující průřez B-B:

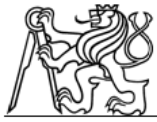
$$F_{n2} := 1660 \text{ N}$$

tečná síla zatěžující průřez B-B:

$$F_{t2} := 6190 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_2 := 8.64 \text{ mm}$$



přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{2oj} := F_{Q2} \cdot s_2 = 60.885 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.4.7.2)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n2oj} := \frac{F_{n2}}{S_{Poj}} = 9.91 \text{ MPa} \quad (5.4.7.3)$$

napětí normálové ve vnějším vlákne od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{02oj} := \frac{M_{oj} + M_{2oj}}{W_{Poj}} = 339.554 \text{ MPa} \quad (5.4.7.4)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t2oj} := \frac{F_{t2}}{S_{Poj}} = 36.955 \text{ MPa} \quad (5.4.7.5)$$

horní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmax} := \sigma_{n1oj} + \sigma_{01oj} = 714.055 \text{ MPa} \quad (5.4.7.6)$$

dolní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmin} := \sigma_{n2oj} + \sigma_{02oj} = 349.465 \text{ MPa} \quad (5.4.7.7)$$

amplituda napětí v hlavě:

$$\sigma_{Ahoj} := \frac{\sigma_{Hojmax} - \sigma_{Hojmin}}{2} = 182.295 \text{ MPa} \quad (5.4.7.8)$$

střední napětí v hlavě:

$$\sigma_{Mhoj} := \frac{\sigma_{Hojmax} + \sigma_{Hojmin}}{2} = 531.76 \text{ MPa} \quad (5.4.7.9)$$

5.4.8 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti AISI 4340:

$$\sigma_{eoj} := 870 \text{ MPa} \quad E_{oj} := 200000 \text{ MPa} \quad \epsilon_{foj} := 0.67 \quad c_{oj} := -0.64$$

$$\sigma_{foj} := 1898 \text{ MPa} \quad K_{oj}' := 1950 \text{ MPa} \quad n_{oj}' := 0.13 \quad b_{oj} := -0.09$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{Aokoj}, \sigma_{Adfoj}, \sigma_{AVoj}, \sigma_{Ahoj}) = 182.295 \text{ MPa} \quad (5.4.8.1)$$

prodloužení elastické:

$$\epsilon_{aELoj} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{oj}} = 0.0009115 \quad (5.4.8.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLoj} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{oj}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{oj}'} \right)} = 0 \quad (5.4.8.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELOj} + \varepsilon_{aPLoj} = 0.0009115 \quad (5.4.8.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{oj} := 1.011 \cdot 10^{11}$$

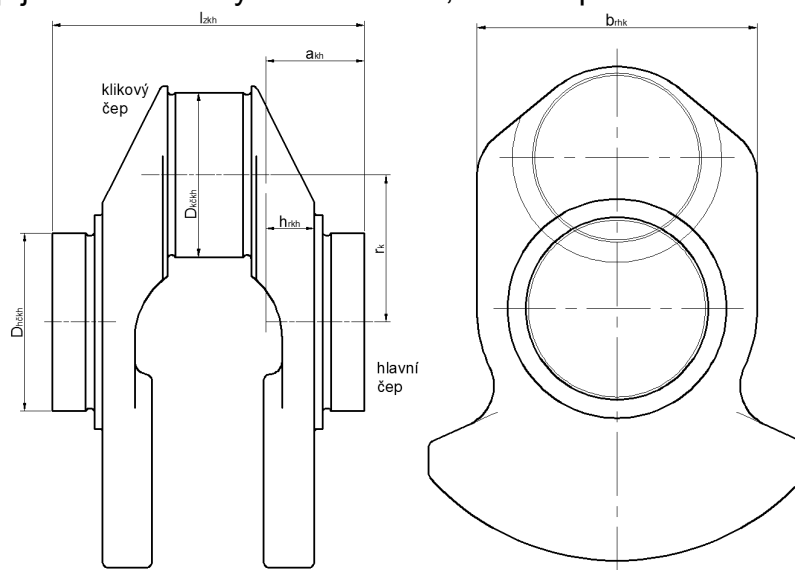
celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{b_{oj}}}{E_{oj}} + \varepsilon_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{c_{oj}} = 0.0009115 \quad (5.4.8.5)$$

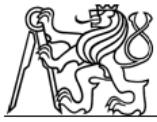
5.5 Klikový hřídel:

Klikový hřídel (dále KH) je namáhán silami od tlaku plynů, setrvačnými silami, vnějším zatížením a silami od torzního kmitání. Pevnostní kontrola se zaměřuje na nejvíce namáhané části. Při kontrole se zanedbává deformace KH, pružnost uložení a opotřebení ložisek, takže reakce v podporách jsou jen přibližné. Na velikost skutečných napětí značně působí i složitý tvar KH, který do výpočtu nelze plně zahrnout. Vzhledem ke složitosti výpočtu KH jako celku a málo odlišné míry bezpečnosti od výpočtu 1 zalomení se běžně počítá právě jen 1 zalomení.

Co se týče druhu namáhání, tak se hlavní čepy kontrolují vzhledem k jejich malé délce pouze na krut. Ohybová napětí mají malý vliv na bezpečnost. Klikový čep je namáhán ohybem a krutem, které nepůsobí současně.



Obr. 5.5.1 Rozměrový náčrtek zalomení KH.



5.5.1 Napětí v hlavním čepu.

průměr hlavního čepu:

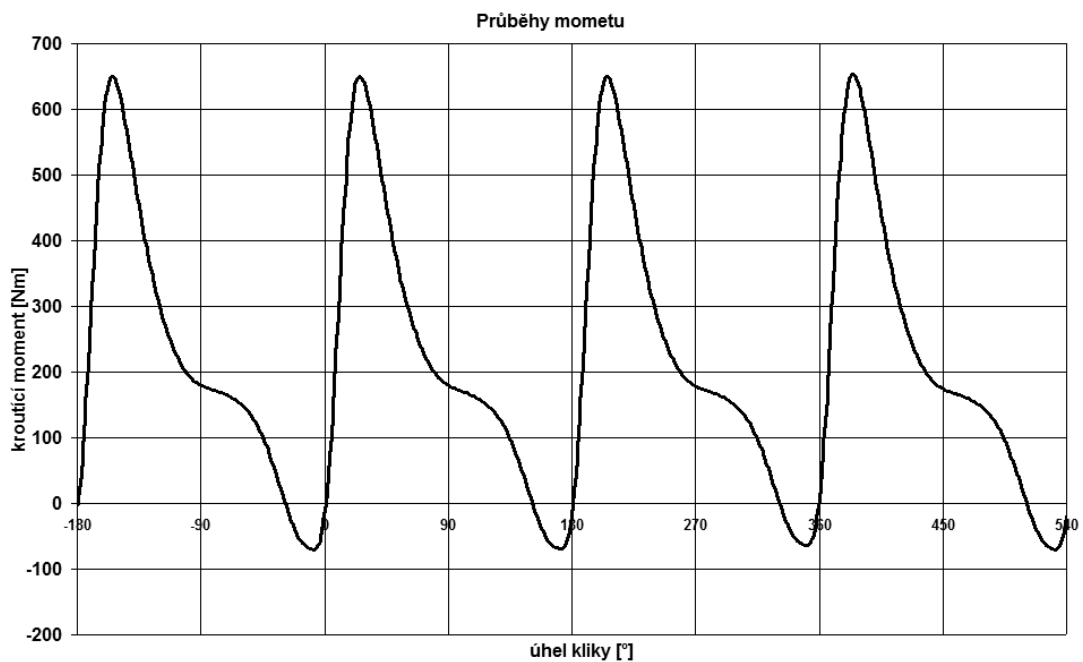
$$D_{h\check{c}kh} := 53.3 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut hlavního čepu:

$$W_{h\check{c}kh} := \frac{\pi \cdot D_{h\check{c}kh}^3}{16} = 29731.137 \text{ mm}^3 \quad (5.5.1.1)$$

poloměr kliky:

$$r_k := 45.5 \text{ mm}$$



Obr. 5.5.1.1 Průběh momentu KH.

maximální moment působící na hlavní čep:

$$M_{h\check{c}kmax} := 654 \text{ N} \cdot \text{m}$$

minimální moment působící na hlavní čep:

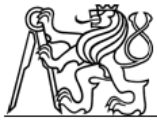
$$M_{h\check{c}kmin} := -90.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

horní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmax} := \frac{M_{h\check{c}kmax}}{W_{h\check{c}kh}} = 21.997 \text{ MPa} \quad (5.5.1.2)$$

dolní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmin} := \frac{M_{h\check{c}kmin}}{W_{h\check{c}kh}} = -3.047 \text{ MPa} \quad (5.5.1.3)$$



amplituda napětí v hlavním čepu:

$$T_{Ahckh} := \frac{T_{hckhmax} - T_{hckhmin}}{2} = 12.522 \text{ MPa} \quad (5.5.1.4)$$

střední napětí v hlavním čepu:

$$T_{Mhckh} := \frac{T_{hckhmax} + T_{hckhmin}}{2} = 9.475 \text{ MPa} \quad (5.5.1.5)$$

5.5.2 Napětí v klikovém čepu.

průměr klikového čepu:

$$D_{kckh} := 49.5 \text{ mm}$$

rameno rakce uložení:

$$a_{kh} := 21.4 \text{ mm}$$

úhel mezi osou mazacího otvoru a osou zalomení:

$$\phi_{mo} := 45 \text{ deg}$$

délka zalomení:

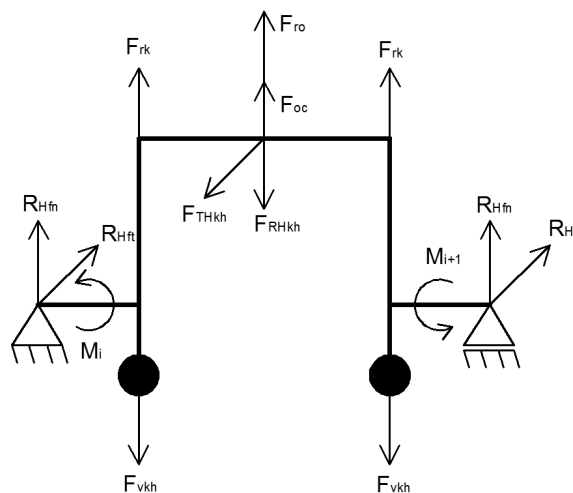
$$l_{zkh} := 96.4 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut klikového čepu:

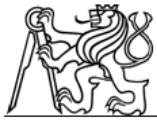
$$W_{kckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{16} = 23814.72 \text{ mm}^3 \quad (5.5.2.1)$$

průřezový modul pro ohyb klikového čepu:

$$W_{okckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{32} = 11907.36 \text{ mm}^3 \quad (5.5.2.2)$$



Obr. 5.5.2.1 Rozložení sil na 1 zalomení KH.



odstředivá síla vývažků v rovině zalomení:

$$F_{vkh} = 1722.578 \text{ N}$$

odstředivá síla rotující části ojnice:

$$F_{ro} = 1221.462 \text{ N}$$

odstředivá síla klikového (ojničního) čepu:

$$F_{oc} = 1175.478 \text{ N}$$

odstředivá síla ramene kliky:

$$F_{rk} = 1363.63 \text{ N}$$

celková odstředivá síla:

$$F_{ckh} := F_{ro} + F_{oc} + F_{rk} = 3760.57 \text{ N} \quad (5.5.2.3)$$

horní normálová reakce v uložení:

$$R_{Hfn} := \frac{F_{RHkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = 17763.341 \text{ N} \quad (5.5.2.4)$$

dolní normálová reakce v uložení:

$$R_{Dfn} := \frac{F_{RDkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = -1447.271 \text{ N} \quad (5.5.2.5)$$

horní tečná reakce v uložení:

$$R_{Hft} := \frac{F_{THkh}}{2} = 8221.415 \text{ N} \quad (5.5.2.6)$$

dolní tečná reakce v uložení:

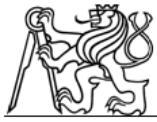
$$R_{Dft} := \frac{F_{TDkh}}{2} = -649.33 \text{ N} \quad (5.5.2.7)$$

horní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Hozkh} := R_{Hfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = 846.573 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.8)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Dozkh} := R_{Dfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = -79.378 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.9)$$



horní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Hotkh} := \frac{R_{Hft} \cdot I_{zkh}}{2} = 396.272 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.10)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Dotkh} := \frac{R_{Dft} \cdot I_{zkh}}{2} = -31.298 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.11)$$

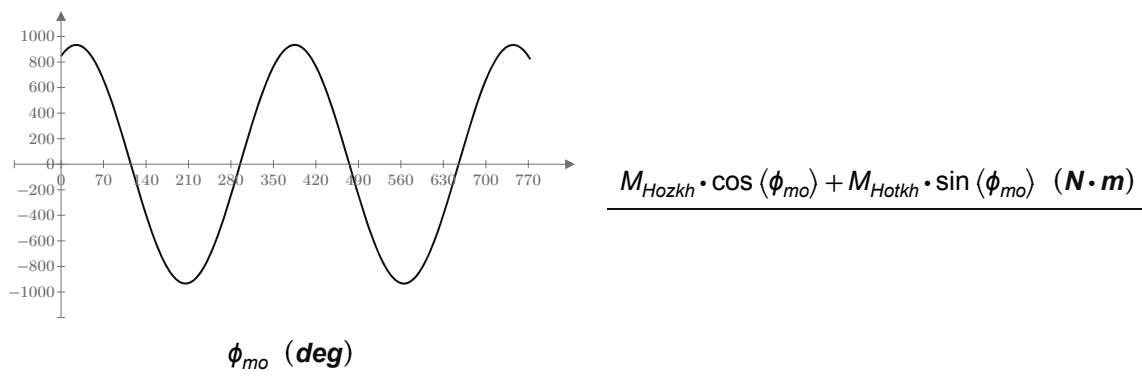
celkový ohybový moment horní:

$$M_{Ho} := \sqrt{M_{Hozkh}^2 + M_{Hotkh}^2} = 934.729 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.12)$$

celkový ohybový moment dolní:

$$M_{Do} := -\sqrt{M_{Dozkh}^2 + M_{Dotkh}^2} = -85.326 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.13)$$

Protože ke koncentraci napětí dochází u mazacího otvoru, užijeme vztah pro výpočet momentu v tomto místě:



Obr. 5.5.2.2 Průběh momentu od sil od spalování.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 385 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

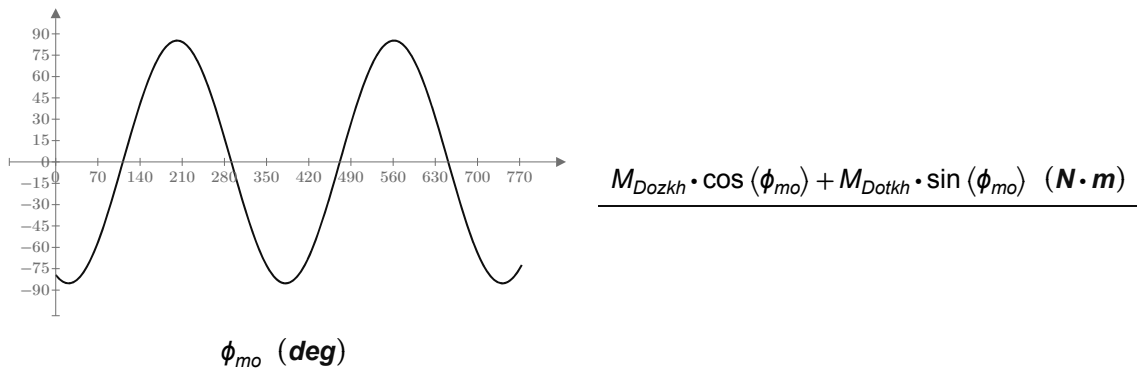
$$M_{Ho\phi_{max}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 934.728 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.14)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 205 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Ho\phi_{min}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -934.728 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.15)$$



Obr. 5.5.2.3 Průběh momentu od setrvačných sil.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 202 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

$$M_{Do\phi max} := M_{Dozych} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Dotkch} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 85.323 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.16)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 382 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Do\phi min} := M_{Dozych} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Dotkch} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -85.323 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.17)$$

Největší momenty působí tlakové síly od spalování. Z těchto momentů budou počítána napětí:

horní napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Hkckh} := \frac{M_{Ho\phi max}}{W_{okckh}} = 78.5 \text{ MPa} \quad (5.5.2.18)$$

dolní napětí klikového čepu:

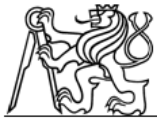
$$\sigma_{Dkckh} := \frac{M_{Ho\phi min}}{W_{okckh}} = -78.5 \text{ MPa} \quad (5.5.2.19)$$

amplituda napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Akckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} - \sigma_{Dkckh}}{2} = 78.5 \text{ MPa} \quad (5.5.2.20)$$

střední napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Mkckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} + \sigma_{Dkckh}}{2} = 0 \text{ MPa} \quad (5.5.2.21)$$



horní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc1} := M_{hčmax} + R_{Hft} \cdot r_k = 1028.074 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.22)$$

dolní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc2} := M_{hčmin} - R_{Hft} \cdot r_k = -464.674 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.2.23)$$

horní smykové napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmax} := \frac{M_{kc1}}{W_{kčkh}} = 43.17 \text{ MPa} \quad (5.5.2.24)$$

dolní napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmin} := \frac{M_{kc2}}{W_{kčkh}} = -19.512 \text{ MPa} \quad (5.5.2.25)$$

amplituda smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Akčkh} := \frac{T_{kckhmax} - T_{kckhmin}}{2} = 31.341 \text{ MPa} \quad (5.5.2.26)$$

střední napětí smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Mkčkh} := \frac{T_{kckhmax} + T_{kckhmin}}{2} = 11.829 \text{ MPa} \quad (5.5.2.27)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

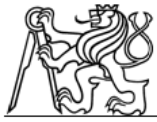
$$\sigma_{Aredkckh} := \sqrt{\sigma_{Akckh}^2 + 4 \cdot T_{Akčkh}^2} = 100.455 \text{ MPa} \quad (5.5.2.28)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

$$\sigma_{Mredkckh} := \sqrt{\sigma_{Mkckh}^2 + 4 \cdot T_{Mkčkh}^2} = 23.658 \text{ MPa} \quad (5.5.2.29)$$

5.5.3 Napětí v rameni kliky.

Rameno KH je namáháno proměnlivým ohybem, krutem, tahem a tlakem. Napětí se kontroluje v přechodu z hlavního čepu do ramen, kde je jeho největší koncentrace.



ohybový moment působící na remeno kliky:

$$M_{orkh} := R_{Hfn} \cdot a_{kh} = 380.135 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.3.1)$$

šíře ramene kliky:

$$h_{rkh} := 15 \text{ mm}$$

tloušťka ramene kliky:

$$b_{rkh} := 84.5 \text{ mm}$$

poměr stran průřezu x:

$$x := \frac{b_{rkh}}{h_{rkh}} = 5.633 \quad (5.5.3.2)$$

součinitel pro průřezový modul v krutu:

$$\alpha_{kh} := 0.00054 \cdot x^3 - 0.0099 \cdot x^2 + 0.0624 \cdot x + 0.1563 = 0.29 \quad (5.5.3.3)$$

plocha ramena kliky:

$$S_{rkh} := 1337 \text{ mm}^2$$

moment setrvačnosti k hlavní ose:

$$I_{Yrkh} := 751041.383 \text{ mm}^4 \quad (5.5.3.4)$$

vzdálenost od těžiště ke kraji průřezu:

$$e_{maxrkh} := 42.5 \text{ mm}$$

průřezový modul v ohybu ramene kliky:

$$W_{orkh} := \frac{I_{Yrkh}}{e_{maxrkh}} = 17671.562 \text{ mm}^3 \quad (5.5.3.5)$$

průřezový modul v krutu ramene kliky:

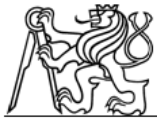
$$W_{krkh} := \alpha_{kh} \cdot b_{rkh} \cdot h_{rkh}^2 = 5517.146 \text{ mm}^3 \quad (5.5.3.6)$$

celkové napětí od ohybu a tlaku/tahu:

$$\sigma_{orkh} := \frac{M_{orkh}}{W_{orkh}} + \frac{R_{Hfn}}{S_{rkh}} = 34.797 \text{ MPa} \quad (5.5.3.7)$$

maximální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmax} := \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = 31.423 \text{ MPa} \quad (5.5.3.8)$$



minimální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmin} := \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = -6.21 \text{ MPa} \quad (5.5.3.9)$$

amplituda napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Arkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} - \sigma_{rkhmin}}{2} = 18.816 \text{ MPa} \quad (5.5.3.10)$$

střední napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Mrkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} + \sigma_{rkhmin}}{2} = 12.607 \text{ MPa} \quad (5.5.3.11)$$

horní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Hkrkh} := R_{Hft} \cdot a_{kh} = 175.938 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.3.12)$$

dolní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Dkrkh} := R_{Dft} \cdot a_{kh} = -13.896 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.5.3.13)$$

horní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Hrkh} := \frac{M_{Hkrkh}}{W_{krkh}} = 31.889 \text{ MPa} \quad (5.5.3.14)$$

dolní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Drkh} := \frac{M_{Dkrkh}}{W_{krkh}} = -2.519 \text{ MPa} \quad (5.5.3.15)$$

amplituda smykového napětí ramene kliky:

$$\tau_{Arkh} := \frac{\tau_{Hrkh} - \tau_{Drkh}}{2} = 17.204 \text{ MPa} \quad (5.5.3.16)$$

střední smykové napětí ramen kliky:

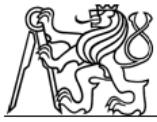
$$\tau_{Mrkh} := \frac{\tau_{Hrkh} + \tau_{Drkh}}{2} = 14.685 \text{ MPa} \quad (5.5.3.17)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Aredrkh} := \sqrt{\sigma_{Arkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Arkh}^2} = 39.217 \text{ MPa} \quad (5.5.3.18)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Mredrkh} := \sqrt{\sigma_{Mrkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Mrkh}^2} = 31.962 \text{ MPa} \quad (5.5.3.19)$$



5.5.4 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti GGG-60:

$$\begin{aligned}\sigma_{ekh} &:= 240 \text{ MPa} & E_{kh} &:= 170000 \text{ MPa} & \varepsilon_{fkh} &:= 0.26 & c_{kh} &:= -0.7 \\ \sigma_{fkh} &:= 978 \text{ MPa} & K_{kh}' &:= 938 \text{ MPa} & n_{kh}' &:= 0.1 & b_{kh} &:= -0.09\end{aligned}$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\tau_{Ahčkh}, \sigma_{Aredkckh}, \sigma_{Aredrkh}) = 100.455 \text{ MPa} \quad (5.5.4.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELkh} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{kh}} = 0.0005909 \quad (5.5.4.2)$$

prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLkh} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{kh}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{kh}'} \right)} = 0 \quad (5.5.4.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELkh} + \varepsilon_{aPLkh} = 0.0005909 \quad (5.5.4.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{kh} := 5.09 \cdot 10^{10}$$

celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{b_{kh}}}{E_{kh}} + \varepsilon_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{c_{kh}} = 0.0005878 \quad (5.5.4.5)$$



Příloha 2 - konvenční výpočet - ROOTS

6.1 Vstupní síly

setrvačné síly jednotlivých posuvných hmot součástí:

$$F_{sp} = 8387.791 \text{ N}$$

$$F_{spc} = 2460.106 \text{ N}$$

$$F_{so} = 5271.656 \text{ N}$$

zatížení působící na jednotlivé součásti:

síly od plynů:

síly setrvačné:

$$p_p = 8.986 \text{ MPa}$$

píst:

$$F_{Hp} = 56657.546 \text{ N}$$

$$F_{Dp} = -3514.437 \text{ N}$$

pístní čep:

$$F_{Hpč} = 49035 \text{ N}$$

$$F_{Dpč} = -8387.791 \text{ N}$$

síla v ose válce:

$$F_{HV} = 41987.611 \text{ N}$$

$$F_{DV} = -10847.897 \text{ N}$$

síla na víko ojnice:

$$F_{Hojv} = 36715.955 \text{ N}$$

$$F_{Dojv} = -16119.553 \text{ N}$$

tečná síla na klice:

$$F_{THkh} = 22504.086 \text{ N}$$

$$F_{TDkh} = -8245.561 \text{ N}$$

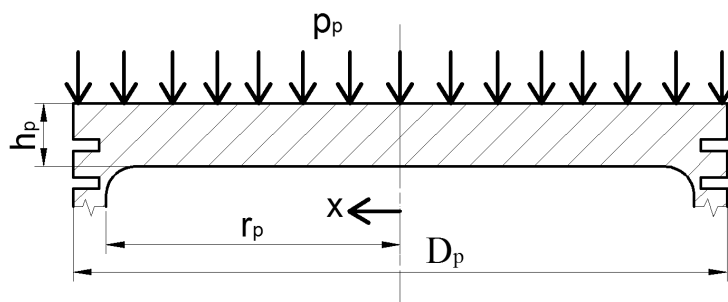
radiální síla na klice:

$$F_{RHkh} = 38436.442 \text{ N}$$

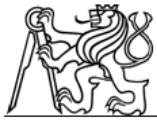
$$F_{RDkh} = -16119.553 \text{ N}$$

6.2 Píst:

Píst je z velké části namáhán tepelně, a mechanické namáhání u něho nemá rozhodující vliv. Také z důvodu pro ruční výpočet složitého tvaru zde budu řešit jen vrchní desku pístu a to jako tenkou kruhovou desku po obvodu vetknutou a zatíženou tlakem.



Obr. 6.2.1 Rozměrový náčrtek se zatížením pístu.



rozměry pístu:

$$r_p := 38 \text{ mm} \quad \mu := 0.33 \quad x := 0 \text{ mm} \quad h_p := 8.7 \text{ mm}$$

radiální napětí desky:

$$\sigma_r := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (3 + \mu)) = 85.499 \text{ MPa} \quad (6.2.1)$$

tečné napětí desky:

$$\sigma_t := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (1 + 3 \mu)) = 85.499 \text{ MPa} \quad (6.2.2)$$

horní napětí:

$$\sigma_{hp} := \max(\sigma_r, \sigma_t) = 85.499 \text{ MPa} \quad (6.2.3)$$

dolní napětí:

$$\sigma_{dp} := -10 \text{ MPa} \quad (6.2.4)$$

6.2.1 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti 6061 AL:

$$\sigma_{ep} := 257 \text{ MPa} \quad E_p := 68900 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{fp} := 0.634 \quad c_p := -0.723$$

$$\sigma_{fp} := 394 \text{ MPa} \quad K_p' := 404 \text{ MPa} \quad n_p' := 0.062 \quad b_p := -0.045$$

Amplituda napětí:

$$\sigma_{Ap} := \frac{\sigma_{hp} - \sigma_{dp}}{2} = 47.75 \text{ MPa} \quad (6.2.1.1)$$

Střední napětí:

$$\sigma_{Mp} := \frac{\sigma_{hp} + \sigma_{dp}}{2} = 37.75 \text{ MPa} \quad (6.2.1.2)$$

Prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELp} := \frac{\sigma_{Ap}}{E_p} = 0.000693 \quad (6.2.1.3)$$

Prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp} := \left(\frac{\sigma_{Ap}}{K_p'} \right)^{\left(\frac{1}{n_p'} \right)} = 0 \quad (6.2.1.4)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp} := \varepsilon_{aELp} + \varepsilon_{aPLp} = 0.000693 \quad (6.2.1.5)$$



Odhad počtu cyklů:

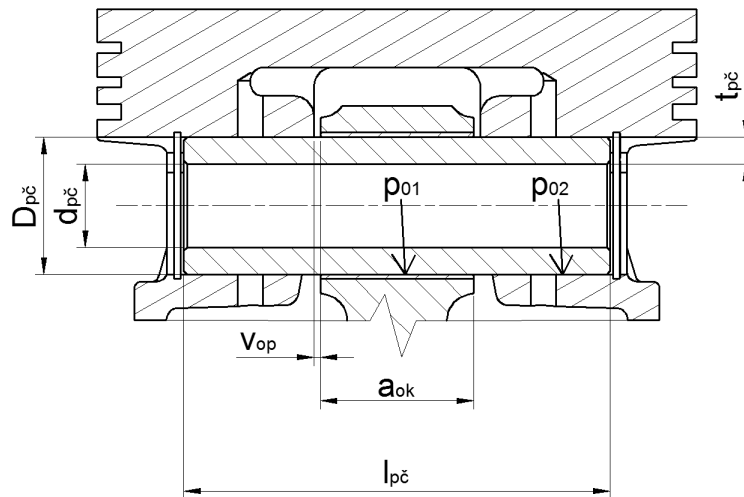
$$N_p := 1.165 \cdot 10^{20} \quad (6.2.1.6)$$

Celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{b_p}}{E_p} + \varepsilon_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{c_p} = 0.000693 \quad (6.2.1.7)$$

6.3 Pístní čep:

Pístní čep je namáhán na ohyb a střih. Krom těchto zatížení se u něj kontroluje i ovalizace průřezu. Pístní čep bude řešit kolmo k jeho ose jako deformaci kruhového křivého prutu zatíženého spojitým zatížením s rozměry středního poloměru pístního čepu. Jelikož ale teorie křivých prutů neuvažuje tloušťku stěny vzhledem k poloměru, jako má pístní čep, je dále zaveden opravný součinitel vycházející ze zkušeností autorů.



Obr. 6.3.1 Rozměrový náčrtek pístního čepu.

Rozměry pístního čepu:

průměr vnější:

$$D_{pč} := 20.6 \text{ mm}$$

průměr vnitřní:

$$d_{pč} := 12.6 \text{ mm}$$

tloušťka stěny:

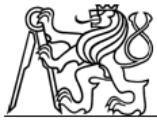
$$t_{pč} := \frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} = 4 \text{ mm} \quad (6.3.1)$$

střední poloměr:

$$\rho_{pč} := \frac{D_{pč} + d_{pč}}{4} = 8.3 \text{ mm} \quad (6.3.2)$$

délka čepu:

$$l_{pč} := 64 \text{ mm}$$



vůle mezi ojnicí a pístem:

$$v_{op} := 1 \text{ mm}$$

Youngův modul:

$$E_{pč} := 206000 \text{ MPa}$$

tloušťka ojnice:

$$a_{ok} := 22.5 \text{ mm}$$

6.3.1 Kontrola otláčení:

Tlak v ložisku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{pč}} = 90.588 \text{ MPa} \quad (6.3.1.1)$$

Tlak v ložiskách pístu:

$$p_{o2} := \frac{F_{Hp} - F_{sp}}{(l_{pč} - a_{ok} - 2 \cdot v_{op}) \cdot D_{pč}} = 59.321 \text{ MPa} \quad (6.3.1.2)$$

6.3.2 Výpočet ohybového napětí:

maximální ohybový moment horní:

$$M_{OmaxH} := \frac{F_{Hpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = 323.835 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.3.2.1)$$

maximální ohybový moment dolní:

$$M_{OmaxD} := \frac{F_{Dpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = -55.394 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.3.2.2)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{opč} := \frac{\pi \cdot D_{pč}^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{pč}}{D_{pč}} \right)^4 \right) = 738.106 \text{ mm}^3 \quad (6.3.2.3)$$

ohybové napětí horní:

$$\sigma_{OpčH} := \frac{M_{OmaxH}}{W_{opč}} = 438.738 \text{ MPa} \quad (6.3.2.4)$$

ohybové napětí dolní:

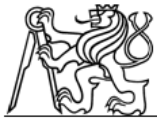
$$\sigma_{OpčD} := \frac{M_{OmaxD}}{W_{opč}} = -75.049 \text{ MPa} \quad (6.3.2.5)$$

amplituda napětí:

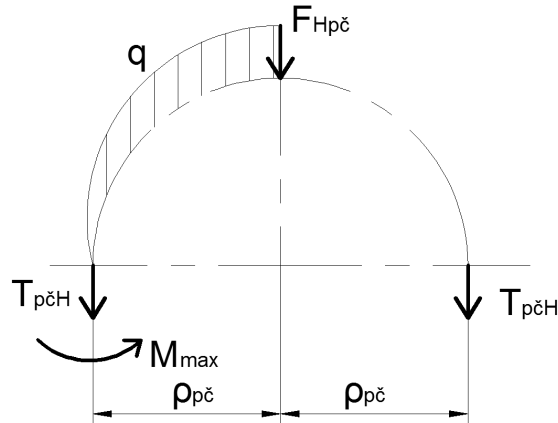
$$\sigma_{OApč} := \frac{\sigma_{OpčH} - \sigma_{OpčD}}{2} = 256.894 \text{ MPa} \quad (6.3.2.6)$$

střední napětí:

$$\sigma_{OMpč} := \frac{\sigma_{OpčH} + \sigma_{OpčD}}{2} = 181.844 \text{ MPa} \quad (6.3.2.7)$$



6.3.3 Výpočet smykového napětí:



Obr. 6.3.3.1 Rozložení sil pístního čepu při namáhání stříhem.

posouvající síla horní:

$$T_{pčH} := \frac{F_{Hpč}}{2} = 24517.5 \text{ N} \quad (6.3.3.1)$$

posouvající síla dolní:

$$T_{pčD} := \frac{F_{Dpč}}{2} = -4193.895 \text{ N} \quad (6.3.3.2)$$

plocha stříhaného průřezu pístního čepu:

$$S_{pč} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{pč}^2 - d_{pč}^2) = 208.602 \text{ mm}^2 \quad (6.3.3.3)$$

horní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčH} := \frac{T_{pčH}}{S_{pč}} = 117.533 \text{ MPa} \quad (6.3.3.4)$$

dolní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčD} := \frac{T_{pčD}}{S_{pč}} = -20.105 \text{ MPa} \quad (6.3.3.5)$$

amplituda napětí:

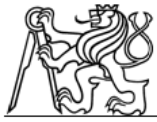
$$\tau_{pčA} := \frac{\tau_{pčH} - \tau_{pčD}}{2} = 68.819 \text{ MPa} \quad (6.3.3.6)$$

střední napětí:

$$\tau_{pčM} := \frac{\tau_{pčH} + \tau_{pčD}}{2} = 48.714 \text{ MPa} \quad (6.3.3.7)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redA} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčA}^2 + \sigma_{OApč}^2} = 291.442 \text{ MPa} \quad (2.3.3.8)$$



střední redukované napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redM} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčM}^2 + \sigma_{OMpč}^2} = 206.3 \text{ MPa} \quad (6.3.3.9)$$

6.3.4 Výpočet ovalizace pístitního čepu:

horní spojitě zatížení:

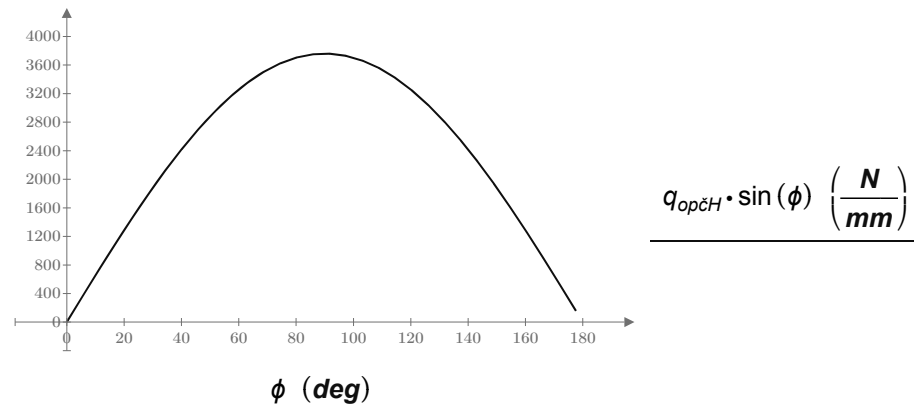
$$q_{opčH} := \frac{2 \cdot F_{Hpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = 3761042.261 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (6.3.4.1)$$

dolní spojitě zatížení:

$$q_{opčD} := \frac{2 \cdot F_{Dpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = -643353.413 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (6.3.4.2)$$

rozsah úhlu:

$$\phi := 0, 0.1 \dots 180 \text{ deg}$$



Obr. 6.3.4.1 Velikost spojitého zatížení v závislosti na úhlu.

maximální moment lze očekávat při maximálním rameni, což je při úhlu $\phi := 90 \text{ deg}$

horní spojitě zatížení:

$$q := q_{opčH} \cdot \sin(\phi) = 3761042.261 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (6.3.4.3)$$

dolní spojitě zatížení:

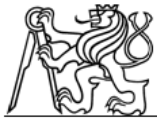
$$q := q_{opčD} \cdot \sin(\phi) = -643353.413 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (6.3.4.4)$$

maximální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxH} := T_{pčH} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčH} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = 73.946 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.3.4.5)$$

minimální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxD} := T_{pčD} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčD} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = -12.649 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.3.4.6)$$



poměr průměrů pístitního čepu:

$$\alpha := \frac{d_{p\check{c}}}{D_{p\check{c}}} = 0.612 \quad (6.3.4.7)$$

opravný součinitel vyjadřující vliv tl. stěny vzhledem k poloměru:

$$k_{p\check{c}} := 1.5 - 15 \cdot (\alpha - 0.4)^3 = 1.358 \quad (6.3.4.8)$$

horní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eH} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 642.18 \text{ MPa} \quad (6.3.4.9)$$

horní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iH} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -582.769 \text{ MPa} \quad (6.3.4.10)$$

dolní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eD} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -109.85 \text{ MPa} \quad (6.3.4.11)$$

dolní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iD} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 99.687 \text{ MPa} \quad (6.3.4.12)$$

amplituda napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eAp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} - \sigma_{eD}}{2} = 376.015 \text{ MPa} \quad (6.3.4.13)$$

střední napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eMp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} + \sigma_{eD}}{2} = 266.165 \text{ MPa} \quad (6.3.4.14)$$

amplituda napětí na vnitřním vlákně:

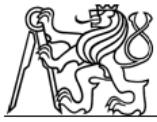
$$\sigma_{iAp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} - \sigma_{iD}}{2} = -341.228 \text{ MPa} \quad (6.3.4.15)$$

střední napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iMp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} + \sigma_{iD}}{2} = -241.541 \text{ MPa} \quad (6.3.4.16)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{OPp\check{c}} := \frac{I_{p\check{c}} \cdot \left(\frac{D_{p\check{c}} - d_{p\check{c}}}{2} \right)^2}{6} = 170.667 \text{ mm}^3 \quad (6.3.4.17)$$



kvadratický moment průřezu:

$$J_{OPpč} := \frac{I_{pč} \cdot \left(\frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} \right)^3}{12} = 341.333 \text{ mm}^4 \quad (6.3.4.18)$$

horní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčH} := \frac{M_{maxH}}{W_{OPpč}} = 433.278 \text{ MPa} \quad (6.3.4.19)$$

dolní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčD} := \frac{M_{maxD}}{W_{OPpč}} = -74.115 \text{ MPa} \quad (6.3.4.20)$$

amplituda napětí:

$$\sigma_{PApč} := \frac{\sigma_{PpčH} - \sigma_{PpčD}}{2} = 253.697 \text{ MPa} \quad (6.3.4.21)$$

střední napětí:

$$\sigma_{PMpč} := \frac{\sigma_{PpčH} + \sigma_{PpčD}}{2} = 179.581 \text{ MPa} \quad (6.3.4.22)$$

s opravnými součinitely:

$$\delta d_{OVpč} := 0.09 \cdot \frac{F_{Hpč}}{E_{pč} \cdot I_{pč}} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 \cdot k_{pč} = 0.032 \text{ mm} \quad (6.3.4.23)$$

maximální ovalizace je volena:

$$\delta d_{OVmax} := 0.0017 \cdot D_{pč} = 0.035 \text{ mm} \quad (6.3.4.24)$$

OVALIZACE VYHOVUJE

6.3.5 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti:

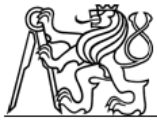
$$\begin{array}{llll} E_{pč} := 206000 \text{ MPa} & \varepsilon_{fpč} := 0.13 & c_{pč} := -0.79 & b_{pč} := -0.1 \\ K_{pč}' := 3498 \text{ MPa} & \eta_{pč}' := 0.1 & \sigma_{fpč} := 3047 \text{ MPa} & \end{array}$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{redA}, \sigma_{eApč}, \sigma_{iApč}, \sigma_{PApč}) = 376.015 \text{ MPa} \quad (6.3.5.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELpč} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{pč}} = 0.0018253 \quad (6.3.5.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp\check{c}} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{p\check{c}'}} \right)^{\left(\frac{1}{n_{p\check{c}'}} \right)} = 0 \quad (6.3.5.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp\check{c}} := \varepsilon_{aELp\check{c}} + \varepsilon_{aPLp\check{c}} = 0.0018253 \quad (6.3.5.4)$$

odhad počtu cyklů:

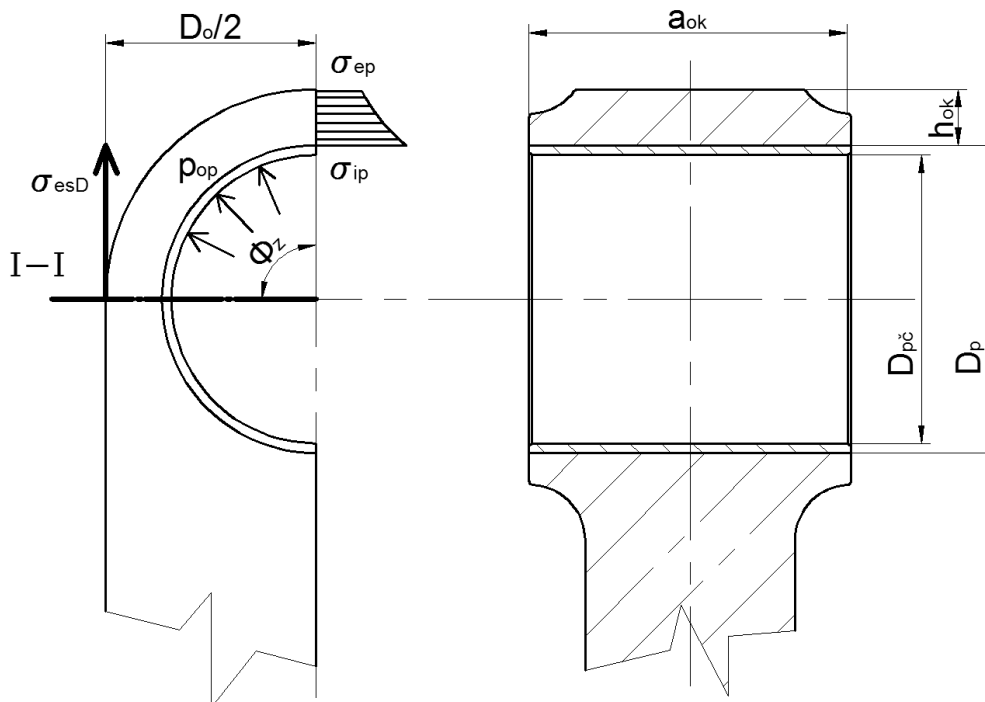
$$N_{p\check{c}} := 6.105 \cdot 10^8$$

celková deformace pro kontrolu:

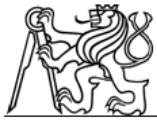
$$\varepsilon_{a'} := \frac{\sigma_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{b_{p\check{c}}}}{E_{p\check{c}}} + \varepsilon_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{c_{p\check{c}}} = 0.0018253 \quad (6.3.5.5)$$

6.4 Ojnice:

Ojnice je zatěžována silami od tlaku plynů, setrvačnými silami a odstředivými silami. Síly od tření a síly z geometrické nepřesnosti při výrobě se neuvažují a respektují se nižším dovoleným napětím. Při výpočtu se uvažuje namáhání tah/tlak a ohyb. Oko ojnice je ještě namáháno vlisovaným bronzovým pouzdem. Napětí od nalisování zde uvedu jen přibližně, protože neznám skutečný lisovací přesah a teplotu ojnice.



Obr. 6.4.1 Rozměrový náčrtek oka ojnice.



provozní teplota ojnice:

$$t_{op} := 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

teplota okolí:

$$t_{ok} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

rozdíl teplot:

$$dt := t_{op} - t_{ok} = 100 \text{ } \text{K} \quad (6.4.1)$$

lisovací přesah:

$$e := 0.02 \text{ } \text{mm}$$

roztlačnost bronzu:

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

roztlačnost ocele:

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

youngův modul pro bronz:

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

youngův modul pro ocel:

$$E_o := 2 \cdot 10^5 \text{ } \text{MPa}$$

vnější průměr pouzdra:

$$D_p := 22.5 \text{ } \text{mm}$$

vnější průměr oka:

$$D_o := 29.76 \text{ } \text{mm}$$

střední poloměr oka:

$$\rho_{ok} := \frac{D_o + D_p}{4} = 13.065 \text{ } \text{mm} \quad (6.4.2)$$

úhel zakotvení:

$$\phi_z := 90 \text{ } \text{deg}$$

tloušťka stěny oka:

$$h_{ok} := \frac{D_o - D_p}{2} = 3.63 \text{ } \text{mm} \quad (6.4.3)$$

plocha průřezu oka:

$$S_o := 83.8 \text{ } \text{mm}^2$$

plocha průřezu pouzdra:

$$S_p := 16 \text{ } \text{mm}^2$$

zatížení oka ojnice:

$$q_o := \frac{F_{HV}}{\pi \cdot \rho_{ok}} = 1022.968 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (6.4.4)$$



úhel polohy výpočetního průřezu:

$$\psi := 0 \text{ deg}$$

spojité zatížení v místě přechodu dříku do oka:

$$q := q_o \cdot \sin(\psi) = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (6.4.5)$$

součinitel rozdělení přenosu normálové síly mezi oko ojnice a pouzdro:

$$k := \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o - E_b \cdot S_p} = 1.123 \quad (6.4.6)$$

6.4.1 Tlak v oku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{p\check{c}}} = 90.588 \text{ MPa} \quad (6.4.1.1)$$

6.4.2 Napětí v oku od nalisování pouzdra:

přesah při provozní teplotě:

$$e_t := D_{p\check{c}} \cdot dt \cdot (\alpha_b - \alpha_o) = 0.016 \text{ mm} \quad (6.4.2.1)$$

konstanty pro výpočet tlaku mezi pouzdrům a okem ojnice:

$$C_o := \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 3.669 \quad (6.4.2.2)$$

$$C_p := \frac{D_p^2 + D_{p\check{c}}^2}{D_p^2 - D_{p\check{c}}^2} = 11.364 \quad (6.4.2.3)$$

tlak mezi povrchem pouzdra a okem ojnice:

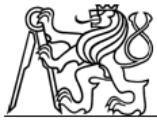
$$p_{op} := \frac{e + e_t}{D_p \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p - \mu}{E_b} \right)} = 13.984 \text{ MPa} \quad (6.4.2.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

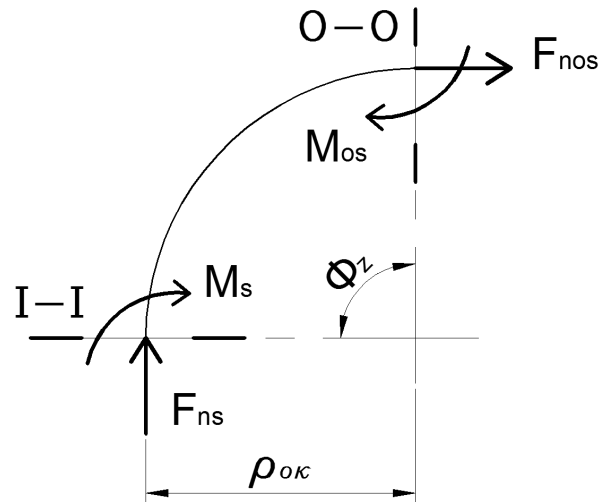
$$\sigma_{ep} := p_{op} \cdot \frac{2 \cdot D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 37.318 \text{ MPa} \quad (6.4.2.5)$$

napětí na vnitřním vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{ip} := p_{op} \cdot \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 51.302 \text{ MPa} \quad (6.4.2.6)$$



6.4.3 Napětí v oku od setrvačných sil:



Obr. 6.4.3.1 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O

$$M_{os} := |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (0.003 \cdot \phi_z - 0.0297) = -3.541 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.3.1)$$

síla namáhající průřez O-O

$$F_{nos} := |F_{DV}| \cdot (0.572 - 0.008 \cdot \phi_z) = 6068.678 \text{ N} \quad (6.4.3.2)$$

moment namáhající průřez I-I

$$M_s := M_{os} + F_{nos} \cdot \rho_{ok} \cdot (1 - \cos(\phi_z)) - 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 4.882 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.3.3)$$

síla namáhající průřez I-I

$$F_{ns} := F_{nos} \cdot \cos(\phi_z) + 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 5423.948 \text{ N} \quad (6.4.3.4)$$

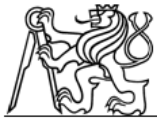
Napětí v oku se stanoví ze vzorce pro křivý prut namáhaný kombinací tahu a ohybu.

napětí na vnějším vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{esD} := \left(2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 165.363 \text{ MPa} \quad (6.4.3.5)$$

napětí na vnitřním vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{isD} := \left(-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} - h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = -45.452 \text{ MPa} \quad (6.4.3.6)$$



6.4.4 Napětí v oku od sil tlaku plynů:

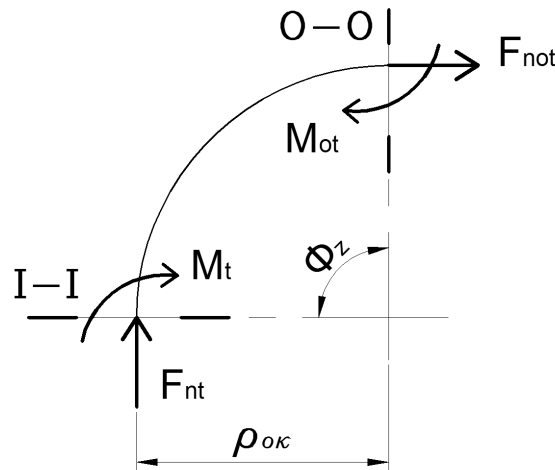
součinitelé pro odhad M_{ot} a F_{not} pro úhel Φ_z .

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

Obr. 6.4.4.1 Tabulka koeficientů natočení výpočtového průřezu od osy ojnice

$$\delta_1 := 0.00$$

$$\delta_2 := 0.00$$



Obr. 6.4.4.2 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O:

$$M_{ot} := \delta_2 \cdot F_{HV} \cdot \rho_{ok} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.4.1)$$

normálová síla namáhající průřez O-O:

$$F_{no} := \delta_1 \cdot F_{HV} = 0 \text{ N} \quad (6.4.4.2)$$

moment namáhající průřez I-I:

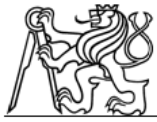
$$M_t := M_{ot} + \left(F_{no} \cdot \rho_{ok} + \rho_{ok} \cdot F_{no} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2}\right) \right) - \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok}^2 \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.4.3)$$

normálová síla namáhající průřez I-I:

$$F_{nt} := -F_{no} \cdot \cos(\pi - \phi_z) + \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \quad (6.4.4.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{etD} := \left(2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 74.599 \text{ MPa} \quad (6.4.4.5)$$



horní napětí oka:

$$\sigma_{okmax} := \sigma_{ep} + \sigma_{esD} = 202.681 \text{ MPa} \quad (6.4.4.6)$$

dolní napětí oka:

$$\sigma_{okmin} := \sigma_{ep} + \sigma_{etD} = 111.917 \text{ MPa} \quad (6.4.4.7)$$

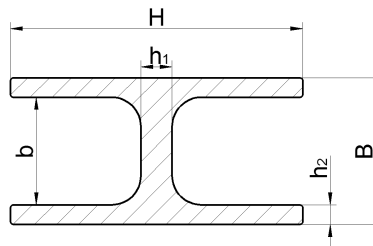
amplitudové napětí oka:

$$\sigma_{Aokoj} := \frac{\sigma_{okmax} - \sigma_{okmin}}{2} = 45.382 \text{ MPa} \quad (6.4.4.8)$$

střední napětí oka:

$$\sigma_{Mokoj} := \frac{\sigma_{okmax} + \sigma_{okmin}}{2} = 157.299 \text{ MPa} \quad (6.4.4.9)$$

6.4.5 Napětí v dříku ojnice od setrvačných sil a sil od tlaku plynů:



Obr. 6.4.5.1 Průřez dříku ojnice.

Dřík ojnice je namáhán tlakem, tahem, odstředivými silami a často také vzpěrem.

tloušťka profilu H:

$$B := 15 \text{ mm}$$

šíře profilu H:

$$H := 30 \text{ mm}$$

tloušťka mezery profilu H:

$$b := 11 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

$$h_1 := 3.2 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

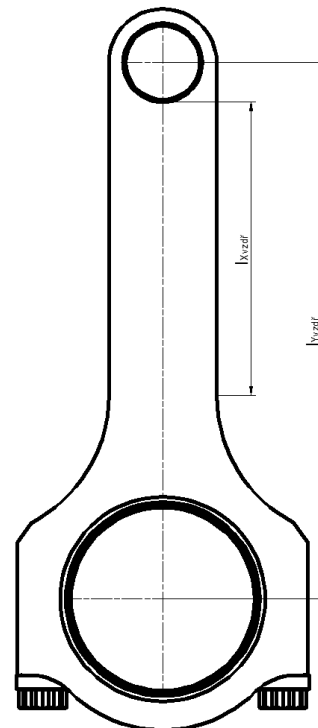
$$h_2 := 2 \text{ mm}$$

plocha dříku:

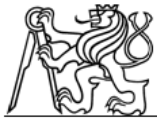
$$S_{dř} := 162 \text{ mm}^2$$

vzpěrná délka ve směru osy X:

$$l_{Xvzdř} := 81.8 \text{ mm}$$



Obr. 6.4.5.2 Výpočtové délky vzpěru.



vzpěrná délka ve směru osy Y:

$$l_{Yvdř} := 149.5 \text{ mm}$$

kvadratický moment průřezu k ose Y:

$$I_{Ydř} := 9037 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k ose X:

$$I_{Xdř} := 5640 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k nejpravděpodobnější ose vybočení.

$$I_{min} := \min(I_{Ydř}, I_{Xdř}) = 5640 \text{ mm}^4$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose Y:

$$i_{dřY} := \sqrt{\frac{I_{Ydř}}{S_{dř}}} = 7.469 \text{ mm} \quad (6.4.5.1)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose Y:

$$\lambda_{dřY} := \frac{l_{Yvdř}}{i_{dřY}} = 20.016 \quad (6.4.5.2)$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose X:

$$i_{dřX} := \sqrt{\frac{I_{min}}{S_{dř}}} = 5.9 \text{ mm} \quad (6.4.5.3)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose X:

$$\lambda_{dřX} := \frac{l_{Xvdř}}{i_{dřX}} = 13.863 \quad (6.4.5.4)$$

Štíhlost prutu pro směr X i Y je značně nižší než dolní mez u tohoto typu vzpěru. Z toho plyne, že dřík ojnice není při tomto zatížení namáhán na vzpěr. Budu ho tedy kontrolovat jen na tah/tlak.

napětí dříku v tlaku:

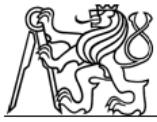
$$\sigma_{TLdřoj} := \frac{F_{HV}}{S_{dř}} = 259.183 \text{ MPa} \quad (6.4.5.5)$$

napětí dříku v tahu:

$$\sigma_{TAdřoj} := \frac{F_{DV}}{S_{dř}} = -66.962 \text{ MPa} \quad (6.4.5.6)$$

amplituda napětí dříku:

$$\sigma_{Adřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} - \sigma_{TAdřoj}}{2} = 163.073 \text{ MPa} \quad (6.4.5.7)$$



střední napětí dřívku:

$$\sigma_{Mdřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} + \sigma_{TAdřoj}}{2} = 96.11 \text{ MPa} \quad (6.4.5.8)$$

6.4.6 Napětí v hlavě ojnice od setrvačných sil.

Hlava je namáhána silami od setrvačnosti pístní skupiny a posuvné části ojnice.

Osová vzdálenost ojnicních šroubů:

$$C := 66.8 \text{ mm}$$

výpočetní průřez pod úhlem:

$$\phi_{Zhl} := 45$$

plochy průřezu víka ojnice:

$$S_{Voj} := 152 \text{ mm}^2$$

plochy průřezu pánve ojnice:

$$S_{Poj} := 167.5 \text{ mm}^2$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xvi} := 8017 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Yvi} := 876 \text{ mm}^4$$

maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Voj} := 6 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Voj} := \frac{I_{Yvi}}{e_{Voj}} = 146 \text{ mm}^3 \quad (6.4.6.1)$$

úhle vychýlení síly zatěžující průřez:

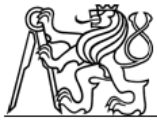
$$\alpha_{df} := 30 \text{ deg}$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xpa} := 8893 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Ypa} := 1672 \text{ mm}^4$$

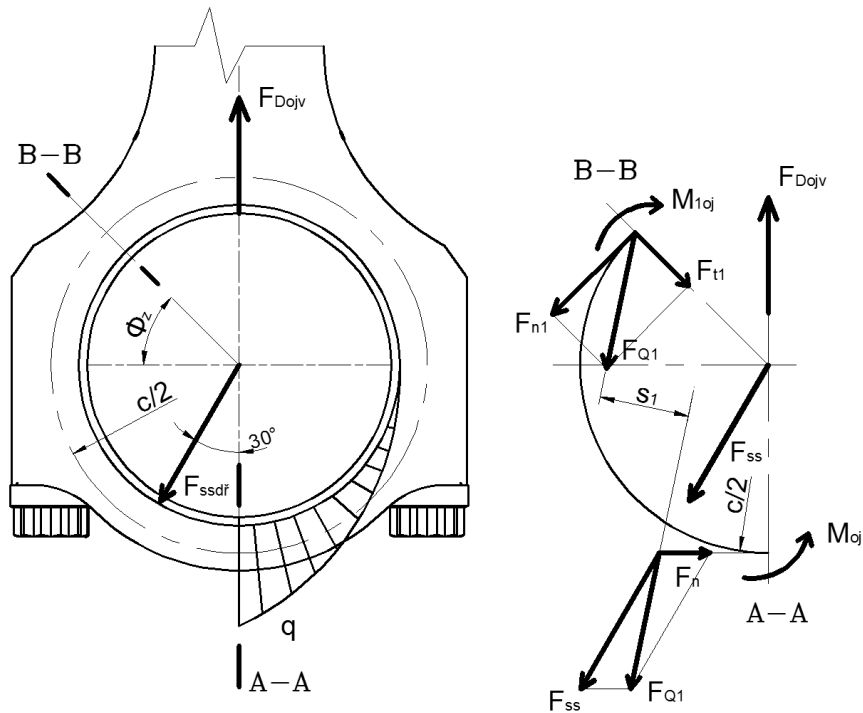


maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Poj} := 7.85 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Poj} := \frac{I_{Ypa}}{e_{Poj}} = 212.994 \text{ mm}^3 \quad (6.4.6.2)$$



Obr. 6.4.6.1 Zatížení hlavy ojnice - setrv.

moment namáhající průřez A-A:

$$M_{Aoj} := |F_{Dojv}| \cdot \frac{C}{2} \cdot (0.0127 + 0.0083 \cdot \phi_{Zhl}) = 207.927 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.6.3)$$

síla namáhající průřez A-A:

$$F_{nAoj} := |F_{Dojv}| \cdot (0.522 - 0.003 \cdot \phi_{Zhl}) = 6238.267 \text{ N} \quad (6.4.6.4)$$

moment namáhající průřez B-B:

$$M_{oj} := \frac{M_{Aoj} \cdot I_{Yvi}}{I_{Yvi} + I_{Ypa}} = 71.485 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.6.5)$$

síla namáhající průřez B-B:

$$F_n := \frac{F_{nAoj} \cdot S_{voj}}{S_{voj} + S_{Poj}} = 2967.814 \text{ N} \quad (6.4.6.6)$$



horní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmax} := \frac{M_{oj}}{W_{Voj}} + \frac{F_n}{S_{Voj}} = 509.15 \text{ MPa} \quad (6.4.6.7)$$

dolní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmin} := 0 \text{ MPa}$$

amplituda napětí víka:

$$\sigma_{AVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} - \sigma_{Vojmin}}{2} = 254.575 \text{ MPa} \quad (6.4.6.8)$$

střední napětí víka:

$$\sigma_{MVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} + \sigma_{Vojmin}}{2} = 254.575 \text{ MPa} \quad (6.4.6.9)$$

síla jako náhrada spojitěho zatížení působící na víko ojnice :

$$F_{ss} := \frac{|F_{Dojv}|}{2 \cdot \cos(\alpha_{df})} = 9306.628 \text{ N} \quad (6.4.6.10)$$

výslednice normálové síly a síly nahrazující spojitě zatížení:

$$F_{Q1} := 8236.667 \text{ N}$$

normálová síla v řezu B-B hlavy ojnice:

$$F_{n1oj} := 6906.667 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_1 := 16.01 \text{ mm}$$

tečná síla v řezu B-B hlavy ojnice:

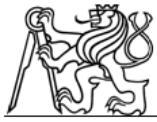
$$F_{t1oj} := 4546.667 \text{ N}$$

přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{1oj} := F_{Q1} \cdot s_1 = 131.869 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.6.11)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n1oj} := \frac{F_{n1oj}}{S_{Poj}} = 41.234 \text{ MPa} \quad (6.4.6.12)$$



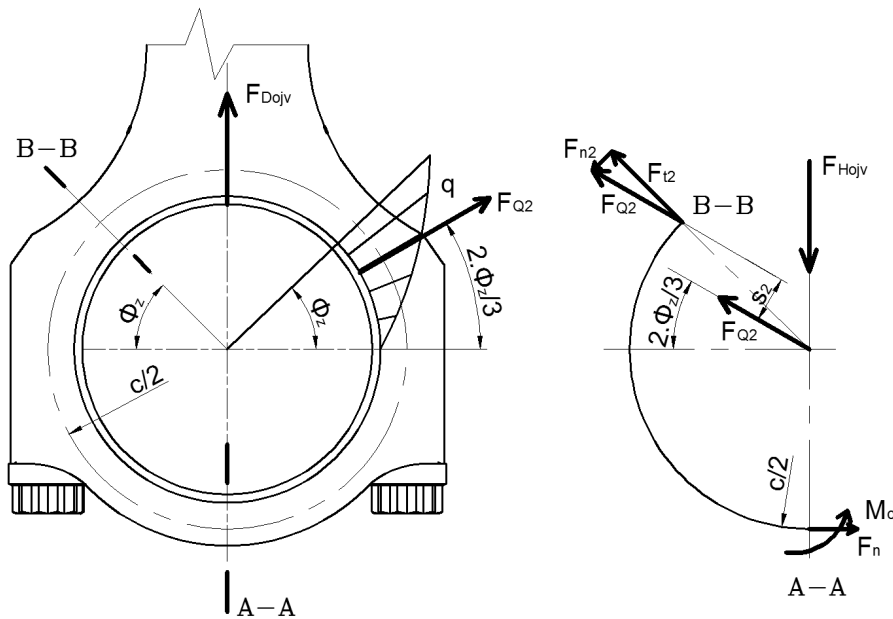
napětí normálové ve vnějším vlákne od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{01oj} := \frac{M_{oj} + M_{1oj}}{W_{Poj}} = 954.743 \text{ MPa} \quad (6.4.6.13)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t1oj} := \frac{F_{t1oj}}{S_{Poj}} = 27.144 \text{ MPa} \quad (6.4.6.14)$$

6.4.7 Napětí v hlavě ojnice od tlakových sil.



Obr. 6.4.7.1 Zatížení hlavy ojnice - tlak.

síla nahrazující spojitého zatížení v řezu B-B:

$$F_{Q2} := 0.54 \cdot \left(\frac{\phi_{Zhl} \cdot \pi}{180} - 0.43 \right) \cdot F_{Hojv} = 7046.343 \text{ N} \quad (6.4.7.1)$$

normálová síla zatěžující průřez B-B:

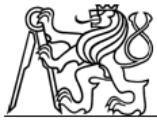
$$F_{n2} := 1660 \text{ N}$$

tečná síla zatěžující průřez B-B:

$$F_{t2} := 6190 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_2 := 8.64 \text{ mm}$$



přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{2oj} := F_{Q2} \cdot s_2 = 60.88 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.4.7.2)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n2oj} := \frac{F_{n2}}{S_{Poj}} = 9.91 \text{ MPa} \quad (6.4.7.3)$$

napětí normálové ve vnějším vlákne od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{02oj} := \frac{M_{oj} + M_{2oj}}{W_{Poj}} = 621.454 \text{ MPa} \quad (6.4.7.4)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t2oj} := \frac{F_{t2}}{S_{Poj}} = 36.955 \text{ MPa} \quad (6.4.7.5)$$

horní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmax} := \sigma_{n1oj} + \sigma_{01oj} = 995.977 \text{ MPa} \quad (6.4.7.6)$$

dolní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmin} := \sigma_{n2oj} + \sigma_{02oj} = 631.364 \text{ MPa} \quad (6.4.7.7)$$

amplituda napětí v hlavě:

$$\sigma_{Ahlaj} := \frac{\sigma_{Hojmax} - \sigma_{Hojmin}}{2} = 182.307 \text{ MPa} \quad (6.4.7.8)$$

střední napětí v hlavě:

$$\sigma_{Mhlaj} := \frac{\sigma_{Hojmax} + \sigma_{Hojmin}}{2} = 813.671 \text{ MPa} \quad (6.4.7.9)$$

6.4.8 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti AISI 4340:

$$\sigma_{eoj} := 870 \text{ MPa} \quad E_{oj} := 200000 \text{ MPa} \quad \epsilon_{foj} := 0.67 \quad c_{oj} := -0.64$$

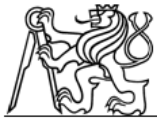
$$\sigma_{foj} := 1898 \text{ MPa} \quad K_{oj}' := 1950 \text{ MPa} \quad n_{oj}' := 0.13 \quad b_{oj} := -0.09$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{Aokoj}, \sigma_{Adfoj}, \sigma_{AVoj}, \sigma_{Ahlaj}) = 254.575 \text{ MPa} \quad (6.4.8.1)$$

prodloužení elastické:

$$\epsilon_{aELoj} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{oj}} = 0.0012729 \quad (6.4.8.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLoj} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{oj}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{oj}'} \right)} = 0.0000002 \quad (6.4.8.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELoj} + \varepsilon_{aPLoj} = 0.001273 \quad (6.4.8.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{oj} := 2.48 \cdot 10^9$$

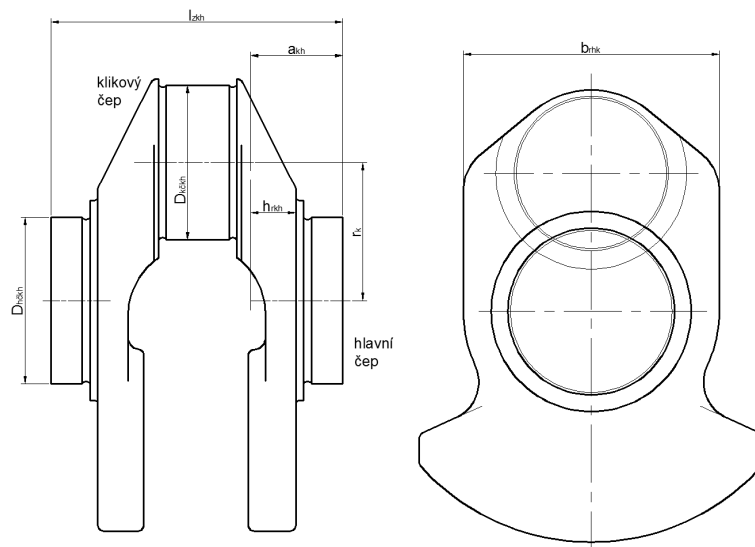
celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{b_{oj}}}{E_{oj}} + \varepsilon_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{c_{oj}} = 0.001273 \quad (6.4.8.5)$$

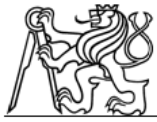
6.5 Klikový hřídel:

Klikový hřídel (dále KH) je namáhán silami od tlaku plynů, setrvačnými silami, vnějším zatížením a silami od torzního kmitání. Pevnostní kontrola se zaměřuje na nejvíce namáhané části. Při kontrole se zanedbává deformace KH, pružnost uložení a opotřebení ložisek, takže reakce v podporách jsou jen přibližné. Na velikost skutečných napětí značně působí i složitý tvar KH, který do výpočtu nelze plně zahrnout. Vzhledem ke složitosti výpočtu KH jako celku a málo odlišné míry bezpečnosti od výpočtu 1 zalomení se běžně počítá právě jen 1 zalomení.

Co se týče druhu namáhání, tak se hlavní čepy kontrolují vzhledem k jejich malé délce pouze na krut. Ohybová napětí mají malý vliv na bezpečnost. Klikový čep je namáhán ohybem a krutem, které nepůsobí současně.



Obr. 6.5.1 Rozměrový náčrtek zalomení KH.



6.5.1 Napětí v hlavním čepu.

průměr hlavního čepu:

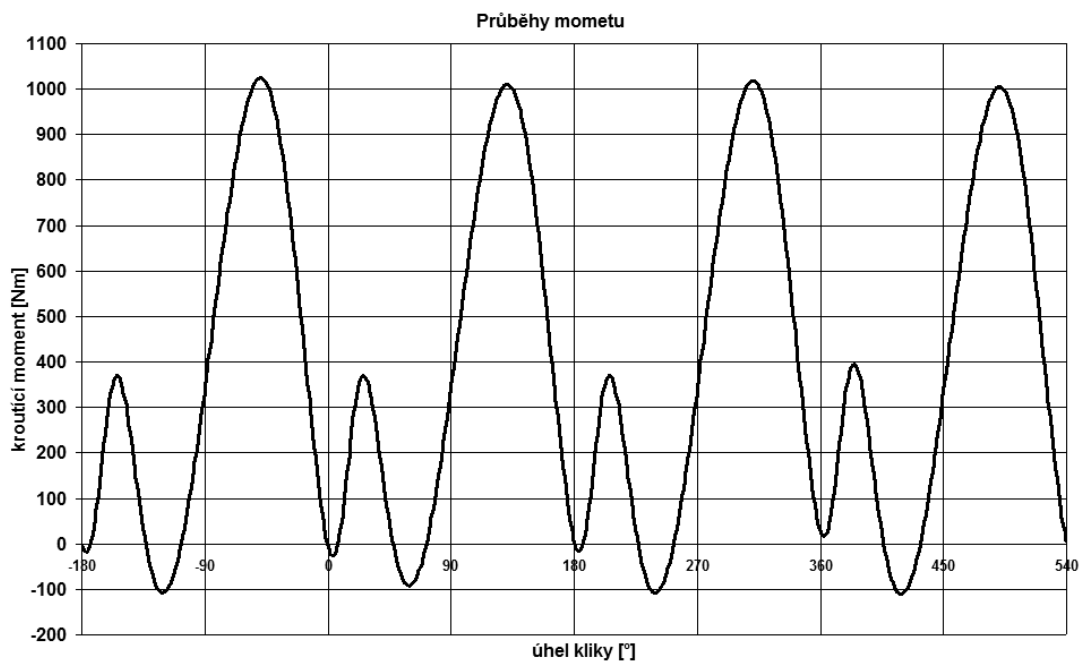
$$D_{h\check{c}kh} := 53.3 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut hlavního čepu:

$$W_{h\check{c}kh} := \frac{\pi \cdot D_{h\check{c}kh}^3}{16} = 29731.137 \text{ mm}^3 \quad (6.5.1.1)$$

poloměr kliky:

$$r_k := 45.5 \text{ mm}$$



Obr. 6.5.1.1 Průběh momentu KH.

maximální moment působící na hlavní čep:

$$M_{h\check{c}kmax} := 1024 \text{ N}\cdot\text{m}$$

minimální moment působící na hlavní čep:

$$M_{h\check{c}kmin} := -141 \text{ N}\cdot\text{m}$$

horní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmax} := \frac{M_{h\check{c}kmax}}{W_{h\check{c}kh}} = 34.442 \text{ MPa} \quad (6.5.1.2)$$

dolní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmin} := \frac{M_{h\check{c}kmin}}{W_{h\check{c}kh}} = -4.743 \text{ MPa} \quad (6.5.1.3)$$



amplituda napětí v hlavním čepu:

$$T_{Ahckh} := \frac{T_{hckhmax} - T_{hckhmin}}{2} = 19.592 \text{ MPa} \quad (6.5.1.4)$$

střední napětí v hlavním čepu:

$$T_{Mhckh} := \frac{T_{hckhmax} + T_{hckhmin}}{2} = 14.85 \text{ MPa} \quad (6.5.1.5)$$

6.5.2 Napětí v klikovém čepu.

průměr klikového čepu:

$$D_{kckh} := 49.5 \text{ mm}$$

rameno rakce uložení:

$$a_{kh} := 21.4 \text{ mm}$$

úhel mezi osou mazacího otvoru a osou zalomení:

$$\phi_{mo} := 45 \text{ deg}$$

délka zalomení:

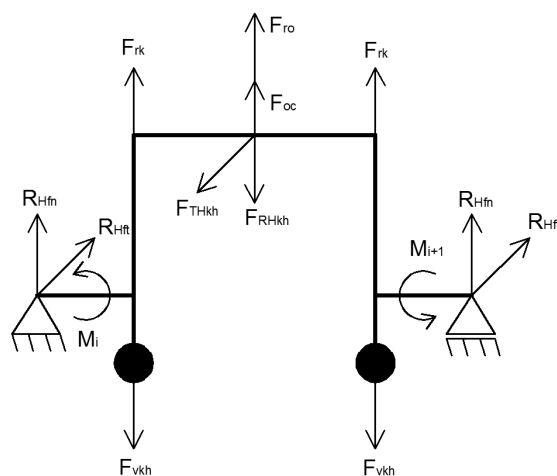
$$l_{zkh} := 96.4 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut klikového čepu:

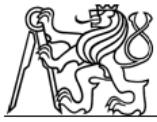
$$W_{kckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{16} = 23814.72 \text{ mm}^3 \quad (6.5.2.1)$$

průřezový modul pro ohyb klikového čepu:

$$W_{okckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{32} = 11907.36 \text{ mm}^3 \quad (6.5.2.2)$$



Obr. 6.5.2.1 Rozložení sil na 1 zalomení KH.



odstředivá síla vývažků v rovině zalomení:

$$F_{vkh} = 10766.112 \text{ N}$$

odstředivá síla rotující části ojnice:

$$F_{ro} = 7634.139 \text{ N}$$

odstředivá síla klikového (ojničního) čepu:

$$F_{oc} = 7346.736 \text{ N}$$

odstředivá síla ramene kliky:

$$F_{rk} = 8522.688 \text{ N}$$

celková odstředivá síla:

$$F_{ckh} := F_{ro} + F_{oc} + F_{rk} = 23503.563 \text{ N} \quad (6.5.2.3)$$

horní normálová reakce v uložení:

$$R_{Hfn} := \frac{F_{RHkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = 18232.551 \text{ N} \quad (6.5.2.4)$$

dolní normálová reakce v uložení:

$$R_{Dfn} := \frac{F_{RDkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = -9045.446 \text{ N} \quad (6.5.2.5)$$

horní tečná reakce v uložení:

$$R_{Hft} := \frac{F_{THkh}}{2} = 11252.043 \text{ N} \quad (6.5.2.6)$$

dolní tečná reakce v uložení:

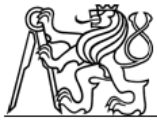
$$R_{Dft} := \frac{F_{TDkh}}{2} = -4122.78 \text{ N} \quad (6.5.2.7)$$

horní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Hozkh} := R_{Hfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = 818.685 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.8)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Dozkh} := R_{Dfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = -496.114 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.9)$$



horní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Hotkh} := \frac{R_{Hft} \cdot I_{zkh}}{2} = 542.348 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.10)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Dotkh} := \frac{R_{Dft} \cdot I_{zkh}}{2} = -198.718 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.11)$$

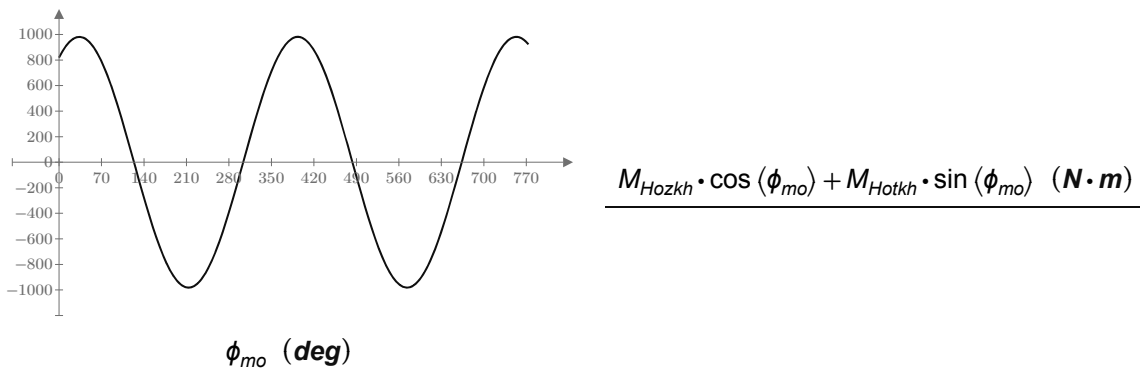
celkový ohybový moment horní:

$$M_{Ho} := \sqrt{M_{Hozkh}^2 + M_{Hotkh}^2} = 982.032 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.12)$$

celkový ohybový moment dolní:

$$M_{Do} := -\sqrt{M_{Dozkh}^2 + M_{Dotkh}^2} = -534.433 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.13)$$

Protože ke koncentraci napětí dochází u mazacího otvoru, užijeme vztah pro výpočet momentu v tomto místě:



Obr. 6.5.2.2 Průběh momentu od sil od spalování.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 390 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

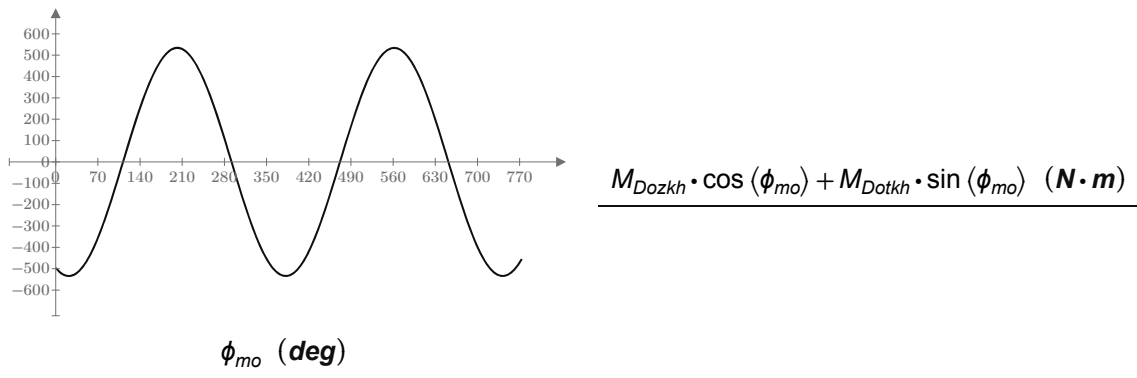
$$M_{Ho\phi_{max}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 980.176 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.14)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 210 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Ho\phi_{min}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -980.176 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.15)$$



Obr. 6.5.2.3 Průběh momentu od setrvačných sil.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 196 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

$$M_{Do\phi max} := M_{Dozkh} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Dotkh} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 531.67 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.16)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 376 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Do\phi min} := M_{Dozkh} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Dotkh} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -531.67 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.17)$$

Největší momenty působí tlakové síly od spalování. Z těchto momentů budou počítána napětí:

horní napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Hkckh} := \frac{M_{Ho\phi max}}{W_{okckh}} = 82.317 \text{ MPa} \quad (6.5.2.18)$$

dolní napětí klikového čepu:

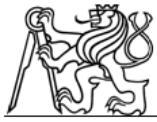
$$\sigma_{Dkckh} := \frac{M_{Ho\phi min}}{W_{okckh}} = -82.317 \text{ MPa} \quad (6.5.2.19)$$

amplituda napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Akckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} - \sigma_{Dkckh}}{2} = 82.317 \text{ MPa} \quad (6.5.2.20)$$

střední napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Mkckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} + \sigma_{Dkckh}}{2} = 0 \text{ MPa} \quad (6.5.2.21)$$



horní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc1} := M_{hčmax} + R_{Hft} \cdot r_k = 1535.968 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.22)$$

dolní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc2} := M_{hčmin} - R_{Hft} \cdot r_k = -652.968 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.2.23)$$

horní smykové napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmax} := \frac{M_{kc1}}{W_{kčkh}} = 64.497 \text{ MPa} \quad (6.5.2.24)$$

dolní napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmin} := \frac{M_{kc2}}{W_{kčkh}} = -27.419 \text{ MPa} \quad (6.5.2.25)$$

amplituda smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Akčkh} := \frac{T_{kckhmax} - T_{kckhmin}}{2} = 45.958 \text{ MPa} \quad (6.5.2.26)$$

střední napětí smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Mkčkh} := \frac{T_{kckhmax} + T_{kckhmin}}{2} = 18.539 \text{ MPa} \quad (6.5.2.27)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

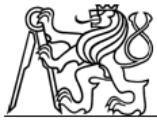
$$\sigma_{Aredkckh} := \sqrt{\sigma_{Akckh}^2 + 4 \cdot T_{Akčkh}^2} = 123.388 \text{ MPa} \quad (6.5.2.28)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

$$\sigma_{Mredkckh} := \sqrt{\sigma_{Mkckh}^2 + 4 \cdot T_{Mkčkh}^2} = 37.078 \text{ MPa} \quad (6.5.2.29)$$

6.5.3 Napětí v rameni kliky.

Rameno KH je namáháno proměnlivým ohybem, krutem, tahem a tlakem. Napětí se kontroluje v přechodu z hlavního čepu do ramen, kde je jeho největší koncentrace.



ohybový moment působící na remeno kliky:

$$M_{orkh} := R_{Hfn} \cdot a_{kh} = 390.177 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.3.1)$$

šíře ramene kliky:

$$h_{rkh} := 15 \text{ mm}$$

tloušťka ramene kliky:

$$b_{rkh} := 84.5 \text{ mm}$$

poměr stran průřezu x:

$$x := \frac{b_{rkh}}{h_{rkh}} = 5.633 \quad (6.5.3.2)$$

součinitel pro průřezový modul v krutu:

$$\alpha_{kh} := 0.00054 \cdot x^3 - 0.0099 \cdot x^2 + 0.0624 \cdot x + 0.1563 = 0.29 \quad (6.5.3.3)$$

plocha ramena kliky:

$$S_{rkh} := 1337 \text{ mm}^2$$

moment setrvačnosti k hlavní ose:

$$I_{Yrkh} := 751041.383 \text{ mm}^4 \quad (6.5.3.4)$$

vzdálenost od těžiště ke kraji průřezu:

$$e_{maxrkh} := 42.5 \text{ mm}$$

průřezový modul v ohybu ramene kliky:

$$W_{orkh} := \frac{I_{Yrkh}}{e_{maxrkh}} = 17671.562 \text{ mm}^3 \quad (6.5.3.5)$$

průřezový modul v krutu ramene kliky:

$$W_{krkh} := \alpha_{kh} \cdot b_{rkh} \cdot h_{rkh}^2 = 5517.146 \text{ mm}^3 \quad (6.5.3.6)$$

celkové napětí od ohybu a tlaku/tahu:

$$\sigma_{orkh} := \frac{M_{orkh}}{W_{orkh}} + \frac{R_{Hfn}}{S_{rkh}} = 35.716 \text{ MPa} \quad (6.5.3.7)$$

maximální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmax} := \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = 14.626 \text{ MPa} \quad (6.5.3.8)$$



minimální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmin} := \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = -38.809 \text{ MPa} \quad (6.5.3.9)$$

amplituda napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Arkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} - \sigma_{rkhmin}}{2} = 26.718 \text{ MPa} \quad (6.5.3.10)$$

střední napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Mrkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} + \sigma_{rkhmin}}{2} = -12.092 \text{ MPa} \quad (6.5.3.11)$$

horní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Hkrkh} := R_{Hft} \cdot a_{kh} = 240.794 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.3.12)$$

dolní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Dkrkh} := R_{Dft} \cdot a_{kh} = -88.227 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.5.3.13)$$

horní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Hrkh} := \frac{M_{Hkrkh}}{W_{krkh}} = 43.645 \text{ MPa} \quad (6.5.3.14)$$

dolní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Drkh} := \frac{M_{Dkrkh}}{W_{krkh}} = -15.992 \text{ MPa} \quad (6.5.3.15)$$

amplituda smykového napětí ramene kliky:

$$\tau_{Arkh} := \frac{\tau_{Hrkh} - \tau_{Drkh}}{2} = 29.818 \text{ MPa} \quad (6.5.3.16)$$

střední smykové napětí ramen kliky:

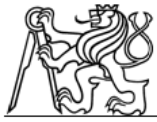
$$\tau_{Mrkh} := \frac{\tau_{Hrkh} + \tau_{Drkh}}{2} = 13.827 \text{ MPa} \quad (6.5.3.17)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Aredrkh} := \sqrt{\sigma_{Arkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Arkh}^2} = 65.348 \text{ MPa} \quad (6.5.3.18)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Mredrkh} := \sqrt{\sigma_{Mrkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Mrkh}^2} = 30.181 \text{ MPa} \quad (6.5.3.19)$$



6.5.4 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti GGG-60:

$$\sigma_{ekh} := 240 \text{ MPa}$$

$$E_{kh} := 170000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fkh} := 0.26$$

$$c_{kh} := -0.7$$

$$\sigma_{fkh} := 978 \text{ MPa}$$

$$K_{kh}' := 938 \text{ MPa}$$

$$n_{kh}' := 0.1$$

$$b_{kh} := -0.09$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\tau_{Ahčkh}, \sigma_{Aredkckh}, \sigma_{Aredrkh}) = 123.388 \text{ MPa} \quad (6.5.4.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELkh} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{kh}} = 0.0007258 \quad (6.5.4.2)$$

prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLkh} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{kh}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{kh}'} \right)} = 0 \quad (6.5.4.3)$$

celkové prodloužení:

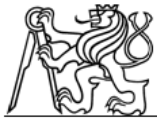
$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELkh} + \varepsilon_{aPLkh} = 0.0007258 \quad (6.5.4.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{kh} := 4.885 \cdot 10^9$$

celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{b_{kh}}}{E_{kh}} + \varepsilon_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{c_{kh}} = 0.0007258 \quad (6.5.4.5)$$



Příloha 3 - konvenční výpočet - ROOTS 2

7.1 Vstupní síly

setrvačné síly jednotlivých posuvných hmot součástí:

$$F_{sp} = 8387.791 \text{ N}$$

$$F_{spc} = 2460.106 \text{ N}$$

$$F_{so} = 5271.656 \text{ N}$$

zatížení působící na jednotlivé součásti:

síly od plynů:

síly setrvačné:

$$p_p = 8.078 \text{ MPa}$$

píst:

$$F_{Hp} = 50933.863 \text{ N}$$

$$F_{Dp} = -3514.437 \text{ N}$$

pístní čep:

$$F_{Hpč} = 43520.452 \text{ N}$$

$$F_{Dpč} = -8387.791 \text{ N}$$

síla v ose válce:

$$F_{HV} = 36696.251 \text{ N}$$

$$F_{DV} = -10847.897 \text{ N}$$

síla na víko ojnice:

$$F_{Hojv} = 31424.595 \text{ N}$$

$$F_{Dojv} = -16119.553 \text{ N}$$

tečná síla na klice:

$$F_{THkh} = 21444.95 \text{ N}$$

$$F_{TDkh} = -8116.626 \text{ N}$$

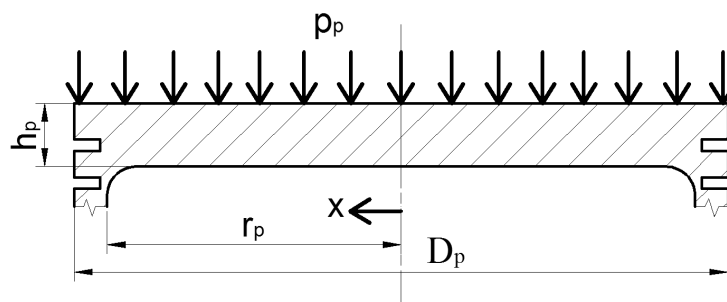
radiální síla na klice:

$$F_{RHkh} = 32630.259 \text{ N}$$

$$F_{RDkh} = -16119.553 \text{ N}$$

7.2 Píst:

Píst je z velké části namáhán tepelně, a mechanické namáhání u něho nemá rozhodující vliv. Také z důvodu pro ruční výpočet složitěho tvaru zde budu řešit jen vrchní desku pístu a to jako tenkou kruhovou desku po obvodu vetknutou a zatíženou tlakem.



Obr. 7.2.1 Rozměrový náčrtek se zatížením pístu.



rozměry pístu:

$$r_p := 38 \text{ mm} \quad \mu := 0.33 \quad x := 0 \text{ mm} \quad h_p := 8.7 \text{ mm}$$

radiální napětí desky:

$$\sigma_r := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (3 + \mu)) = 76.862 \text{ MPa} \quad (7.2.1)$$

tečné napětí desky:

$$\sigma_t := \frac{3 \cdot p_p}{8 \cdot h_p^2} \cdot (r_p^2 \cdot (1 + \mu) - (x)^2 \cdot (1 + 3 \mu)) = 76.862 \text{ MPa} \quad (7.2.2)$$

horní napětí:

$$\sigma_{hp} := \max(\sigma_r, \sigma_t) = 76.862 \text{ MPa} \quad (7.2.3)$$

dolní napětí:

$$\sigma_{dp} := -10 \text{ MPa} \quad (7.2.4)$$

7.2.1 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti 6061 AL:

$$\sigma_{ep} := 257 \text{ MPa} \quad E_p := 68900 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{fp} := 0.634 \quad c_p := -0.723$$

$$\sigma_{fp} := 394 \text{ MPa} \quad K_p' := 404 \text{ MPa} \quad n_p' := 0.062 \quad b_p := -0.045$$

Amplituda napětí:

$$\sigma_{ap} := \frac{\sigma_{hp} - \sigma_{dp}}{2} = 43.431 \text{ MPa} \quad (7.2.1.1)$$

Střední napětí:

$$\sigma_{mp} := \frac{\sigma_{hp} + \sigma_{dp}}{2} = 33.431 \text{ MPa} \quad (7.2.1.2)$$

Prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELp} := \frac{\sigma_{ap}}{E_p} = 0.0006303 \quad (7.2.1.3)$$

Prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp} := \left(\frac{\sigma_{ap}}{K_p'} \right)^{\left(\frac{1}{n_p'} \right)} = 0 \quad (7.2.1.4)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp} := \varepsilon_{aELp} + \varepsilon_{aPLp} = 0.0006303 \quad (3.2.1.5)$$



Odhad počtu cyklů:

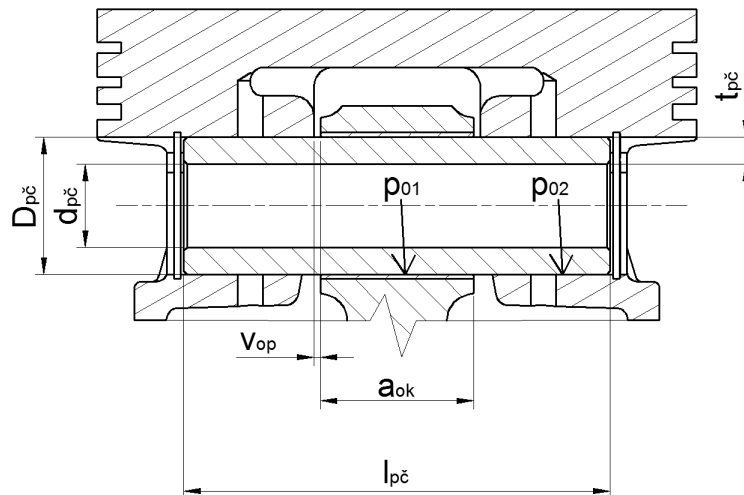
$$N_p := 9.6 \cdot 10^{20} \quad (7.2.1.6)$$

Celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{b_p}}{E_p} + \varepsilon_{fp} \cdot (2 \cdot N_p)^{c_p} = 0.0006303 \quad (7.2.1.7)$$

7.3 Pístní čep:

Pístní čep je namáhán na ohyb a střih. Krom těchto zatížení se u něj kontroluje i ovalizace průřezu. Pístní čep bude řešit kolmo k jeho ose jako deformaci kruhového křivého prutu zatíženého spojitým zatížením s rozměry středního poloměru pístního čepu. Jelikož ale teorie křivých prutů neuvažuje tloušťku stěny vzhledem k poloměru, jako má pístní čep, je dále zaveden opravný součinitel vycházející ze zkušeností autorů.



Obr. 7.3.1 Rozměrový náčrtek pístního čepu.

Rozměry pístního čepu:

průměr vnější:

$$D_{pč} := 20.6 \text{ mm}$$

průměr vnitřní:

$$d_{pč} := 12.6 \text{ mm}$$

tloušťka stěny:

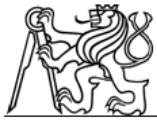
$$t_{pč} := \frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} = 4 \text{ mm} \quad (7.3.1)$$

střední poloměr:

$$\rho_{pč} := \frac{D_{pč} + d_{pč}}{4} = 8.3 \text{ mm} \quad (7.3.2)$$

délka čepu:

$$l_{pč} := 64 \text{ mm}$$



vůle mezi ojnicí a pístem:

$$v_{op} := 1 \text{ mm}$$

Youngův modul:

$$E_{pč} := 206000 \text{ MPa}$$

tloušťka ojnice:

$$a_{ok} := 22.5 \text{ mm}$$

7.3.1 Kontrola otlačení:

Tlak v ložisku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{pč}} = 79.172 \text{ MPa} \quad (7.3.1.1)$$

Tlak v ložiskách pístu:

$$p_{o2} := \frac{F_{Hp} - F_{sp}}{(l_{pč} - a_{ok} - 2 \cdot v_{op}) \cdot D_{pč}} = 52.287 \text{ MPa} \quad (7.3.1.2)$$

7.3.2 Výpočet ohybového napětí:

maximální ohybový moment horní:

$$M_{OmaxH} := \frac{F_{Hpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = 287.416 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.3.2.1)$$

maximální ohybový moment dolní:

$$M_{OmaxD} := \frac{F_{Dpč}}{12} \cdot (l_{pč} + 2 \cdot (a_{ok} + 2 \cdot v_{op}) - 1.5 \cdot a_{ok}) = -55.394 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.3.2.2)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{opč} := \frac{\pi \cdot D_{pč}^3}{32} \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{pč}}{D_{pč}} \right)^4 \right) = 738.106 \text{ mm}^3 \quad (7.3.2.3)$$

ohybové napětí horní:

$$\sigma_{OpčH} := \frac{M_{OmaxH}}{W_{opč}} = 389.397 \text{ MPa} \quad (7.3.2.4)$$

ohybové napětí dolní:

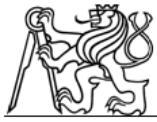
$$\sigma_{OpčD} := \frac{M_{OmaxD}}{W_{opč}} = -75.049 \text{ MPa} \quad (7.3.2.5)$$

amplituda napětí:

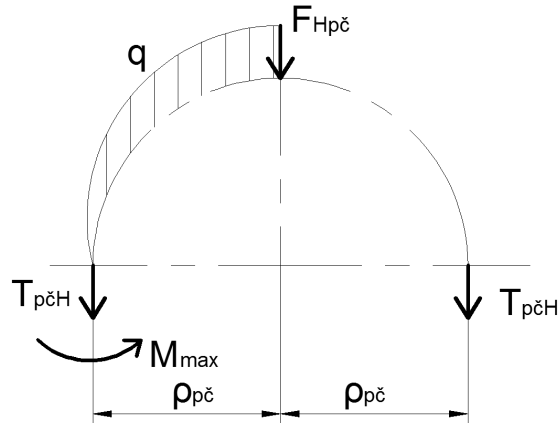
$$\sigma_{OApč} := \frac{\sigma_{OpčH} - \sigma_{OpčD}}{2} = 232.223 \text{ MPa} \quad (7.3.2.6)$$

střední napětí:

$$\sigma_{OMpč} := \frac{\sigma_{OpčH} + \sigma_{OpčD}}{2} = 157.174 \text{ MPa} \quad (7.3.2.7)$$



7.3.3 Výpočet smykového napětí:



Obr. 7.3.3.1 Rozložení sil pístního čepu při namáhání stříhem.

posouvající síla horní:

$$T_{pčH} := \frac{F_{Hpč}}{2} = 21760.226 \text{ N} \quad (7.3.3.1)$$

posouvající síla dolní:

$$T_{pčD} := \frac{F_{Dpč}}{2} = -4193.895 \text{ N} \quad (7.3.3.2)$$

plocha stříhaného průřezu pístního čepu:

$$S_{pč} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{pč}^2 - d_{pč}^2) = 208.602 \text{ mm}^2 \quad (7.3.3.3)$$

horní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčH} := \frac{T_{pčH}}{S_{pč}} = 104.315 \text{ MPa} \quad (7.3.3.4)$$

dolní napětí ve stříhu:

$$\tau_{pčD} := \frac{T_{pčD}}{S_{pč}} = -20.105 \text{ MPa} \quad (7.3.3.5)$$

amplituda napětí:

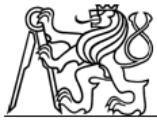
$$\tau_{pčA} := \frac{\tau_{pčH} - \tau_{pčD}}{2} = 62.21 \text{ MPa} \quad (7.3.3.6)$$

střední napětí:

$$\tau_{pčM} := \frac{\tau_{pčH} + \tau_{pčD}}{2} = 42.105 \text{ MPa} \quad (7.3.3.7)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redA} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčA}^2 + \sigma_{OApč}^2} = 263.454 \text{ MPa} \quad (7.3.3.8)$$



střední redukované napětí kombinovaného namáhání:

$$\sigma_{redM} := \sqrt{4 \cdot \tau_{pčM}^2 + \sigma_{OMpč}^2} = 178.311 \text{ MPa} \quad (7.3.3.9)$$

7.3.4 Výpočet ovalizace pístitního čepu:

horní spojitě zatížení:

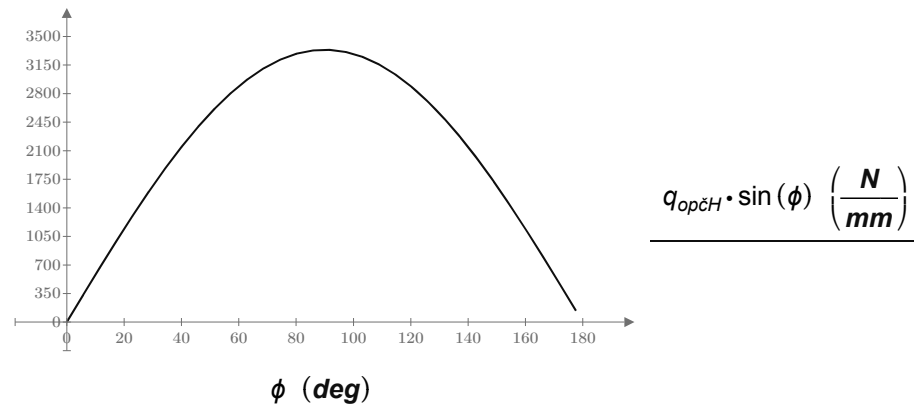
$$q_{opčH} := \frac{2 \cdot F_{Hpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = 3338069.885 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (7.3.4.1)$$

dolní spojitě zatížení:

$$q_{opčD} := \frac{2 \cdot F_{Dpč}}{\pi \cdot \rho_{pč}} = -643353.413 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (7.3.4.2)$$

rozsah úhlu:

$$\phi := 0, 0.1 \dots 180 \text{ deg}$$



Obr. 7.3.4.1 Velikost spojitého zatížení v závoslosti na úhlu.

maximální moment lze očekávat při maximálním rameni, což je při úhlu $\phi := 90 \text{ deg}$

horní spojitě zatížení:

$$q := q_{opčH} \cdot \sin(\phi) = 3338069.885 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (7.3.4.3)$$

dolní spojitě zatížení:

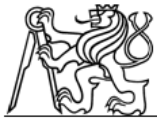
$$q := q_{opčD} \cdot \sin(\phi) = -643353.413 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (7.3.4.4)$$

maximální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxH} := T_{pčH} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčH} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = 65.63 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.3.4.5)$$

minimální moment namáhající průřez v rovině kolmé na osu čepu:

$$M_{maxD} := T_{pčD} \cdot \rho_{pč} \cdot (1 - \cos(\phi)) + \frac{q_{opčD} \cdot \rho_{pč}^2}{2} \cdot (\phi \cdot \cos(\phi) - \sin(\phi)) = -12.649 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.3.4.6)$$



poměr průměrů písního čepu:

$$\alpha := \frac{d_{p\check{c}}}{D_{p\check{c}}} = 0.612 \quad (7.3.4.7)$$

opravný součinitel vyjadřující vliv tl. stěny vzhledem k poloměru:

$$k_{p\check{c}} := 1.5 - 15 \cdot (\alpha - 0.4)^3 = 1.358 \quad (7.3.4.8)$$

horní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eH} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 569.96 \text{ MPa} \quad (7.3.4.9)$$

horní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iH} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxH}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}H} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -517.23 \text{ MPa} \quad (7.3.4.10)$$

dolní napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eD} := \left(\frac{2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} + t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = -109.85 \text{ MPa} \quad (7.3.4.11)$$

dolní napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iD} := \left(\frac{-2 \cdot M_{maxD}}{t_{p\check{c}}} \cdot \left(\frac{6 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}}{2 \cdot \rho_{p\check{c}} - t_{p\check{c}}} \right) + T_{p\check{c}D} \right) \cdot \frac{k_{p\check{c}}}{t_{p\check{c}} \cdot l_{p\check{c}}} = 99.687 \text{ MPa} \quad (3.3.4.12)$$

amplituda napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eAp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} - \sigma_{eD}}{2} = 339.905 \text{ MPa} \quad (7.3.4.13)$$

střední napětí na vnějším vlákně:

$$\sigma_{eMp\check{c}} := \frac{\sigma_{eH} + \sigma_{eD}}{2} = 230.055 \text{ MPa} \quad (7.3.4.14)$$

amplituda napětí na vnitřním vlákně:

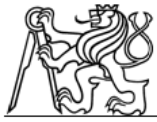
$$\sigma_{iAp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} - \sigma_{iD}}{2} = -308.458 \text{ MPa} \quad (7.3.4.15)$$

střední napětí na vnitřním vlákně:

$$\sigma_{iMp\check{c}} := \frac{\sigma_{iH} + \sigma_{iD}}{2} = -208.771 \text{ MPa} \quad (7.3.4.16)$$

průřezový modul v ohybu:

$$W_{OPp\check{c}} := \frac{I_{p\check{c}} \cdot \left(\frac{D_{p\check{c}} - d_{p\check{c}}}{2} \right)^2}{6} = 170.667 \text{ mm}^3 \quad (7.3.4.17)$$



kvadratický moment průřezu:

$$J_{OPpč} := \frac{I_{pč} \cdot \left(\frac{D_{pč} - d_{pč}}{2} \right)^3}{12} = 341.333 \text{ mm}^4 \quad (7.3.4.18)$$

horní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčH} := \frac{M_{maxH}}{W_{OPpč}} = 384.551 \text{ MPa} \quad (7.3.4.19)$$

dolní napětí v ohybu:

$$\sigma_{PpčD} := \frac{M_{maxD}}{W_{OPpč}} = -74.115 \text{ MPa} \quad (7.3.4.20)$$

amplituda napětí:

$$\sigma_{PApč} := \frac{\sigma_{PpčH} - \sigma_{PpčD}}{2} = 229.333 \text{ MPa} \quad (7.3.4.21)$$

střední napětí:

$$\sigma_{PMpč} := \frac{\sigma_{PpčH} + \sigma_{PpčD}}{2} = 155.218 \text{ MPa} \quad (7.3.4.22)$$

s opravnými součiniteli:

$$\delta d_{OVpč} := 0.09 \cdot \frac{F_{Hpč}}{E_{pč} \cdot I_{pč}} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 \cdot k_{pč} = 0.029 \text{ mm} \quad (7.3.4.23)$$

maximální ovalizace je volena:

$$\delta d_{OVmax} := 0.0017 \cdot D_{pč} = 0.035 \text{ mm} \quad (7.3.4.24)$$

OVALIZACE VYHOVUJE

7.3.5 Výpočet počtu cyklů:

materiálové vlastnosti:

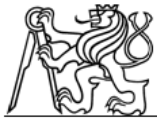
$$\begin{array}{llll} E_{pč} := 206000 \text{ MPa} & \varepsilon_{fpč} := 0.13 & c_{pč} := -0.79 & b_{pč} := -0.1 \\ K_{pč}' := 3498 \text{ MPa} & \eta_{pč}' := 0.1 & \sigma_{fpč} := 3047 \text{ MPa} & \end{array}$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{redA}, \sigma_{eApč}, \sigma_{iApč}, \sigma_{PApč}) = 339.905 \text{ MPa} \quad (7.3.5.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELpč} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{pč}} = 0.00165 \quad (7.3.5.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLp\check{c}} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{p\check{c}'}} \right)^{\left(\frac{1}{n_{p\check{c}'}} \right)} = 0 \quad (7.3.5.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{cp\check{c}} := \varepsilon_{aELp\check{c}} + \varepsilon_{aPLp\check{c}} = 0.00165 \quad (7.3.5.4)$$

odhad počtu cyklů:

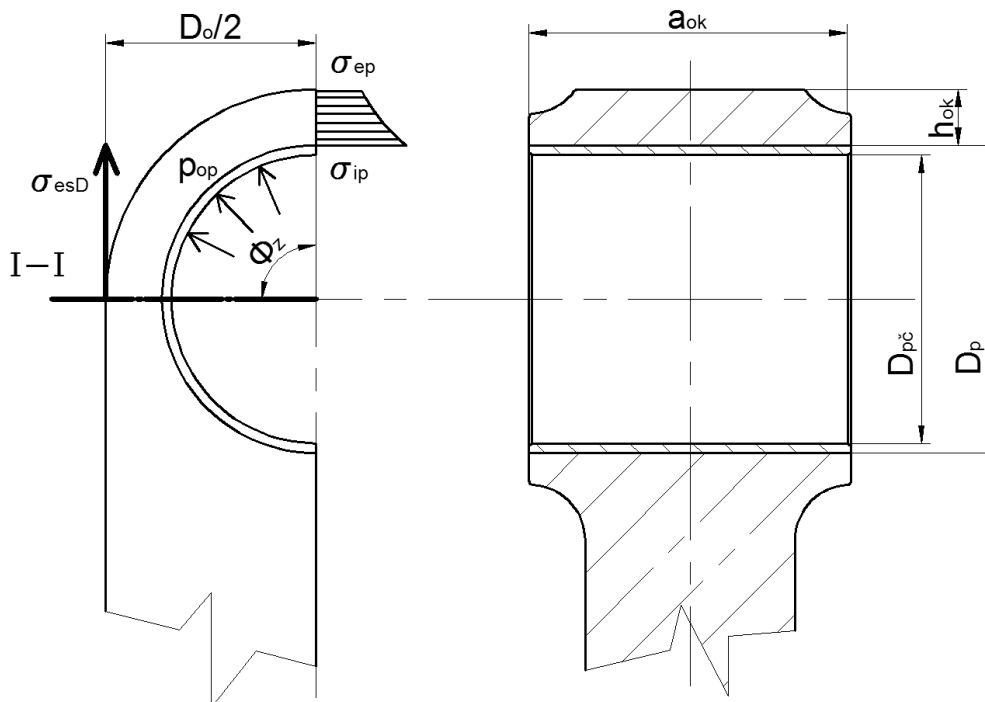
$$N_{p\check{c}} := 1.676 \cdot 10^9$$

celková deformace pro kontrolu:

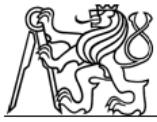
$$\varepsilon_{a'} := \frac{\sigma_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{b_{p\check{c}}}}{E_{p\check{c}}} + \varepsilon_{fp\check{c}} \cdot (2 \cdot N_{p\check{c}})^{c_{p\check{c}}} = 0.00165 \quad (7.3.5.5)$$

7.4 Ojnice:

Ojnice je zatěžována silami od tlaku plynů, setrvačnými silami a odstředivými silami. Síly od tření a síly z geometrické nepřesnosti při výrobě se neuvažují a respektují se nižším dovoleným napětím. Při výpočtu se uvažuje namáhání tah/tlak a ohyb. Oko ojnice je ještě namáháno vlisovaným bronzovým pouzdem. Napětí od nalisování zde uvedu jen přibližně, protože neznám skutečný lisovací přesah a teplotu ojnice.



Obr. 7.4.1 Rozměrový náčrtek oka ojnice.



provozní teplota ojnice:

$$t_{op} := 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

teplota okolí:

$$t_{ok} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

rozdíl teplot:

$$dt := t_{op} - t_{ok} = 100 \text{ } K \quad (7.4.1)$$

lisovací přesah:

$$e := 0.02 \text{ } mm$$

roztlačnost bronzu:

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

roztlačnost ocele:

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

youngův modul pro bronz:

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

youngův modul pro ocel:

$$E_o := 2 \cdot 10^5 \text{ } MPa$$

vnější průměr pouzdra:

$$D_p := 22.5 \text{ } mm$$

vnější průměr oka:

$$D_o := 29.76 \text{ } mm$$

střední poloměr oka:

$$\rho_{ok} := \frac{D_o + D_p}{4} = 13.065 \text{ } mm \quad (7.4.2)$$

úhel zakotvení:

$$\phi_z := 90 \text{ } deg$$

tloušťka stěny oka:

$$h_{ok} := \frac{D_o - D_p}{2} = 3.63 \text{ } mm \quad (7.4.3)$$

plocha průřezu oka:

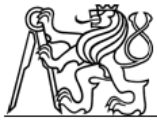
$$S_o := 83.8 \text{ } mm^2$$

plocha průřezu pouzdra:

$$S_p := 16 \text{ } mm^2$$

zatížení oka ojnice:

$$q_o := \frac{F_{HV}}{\pi \cdot \rho_{ok}} = 894.051 \frac{N}{mm} \quad (7.4.4)$$



úhel polohy výpočetního průřezu:

$$\psi := 0 \text{ deg}$$

spojité zatížení v místě přechodu dříku do oka:

$$q := q_o \cdot \sin(\psi) = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (7.4.5)$$

součinitel rozdělení přenosu normálové síly mezi oko ojnice a pouzdro:

$$k := \frac{E_o \cdot S_o}{E_o \cdot S_o - E_b \cdot S_p} = 1.123 \quad (7.4.6)$$

7.4.1 Tlak v oku ojnice:

$$p_{o1} := \frac{F_{HV}}{a_{ok} \cdot D_{p\check{c}}} = 79.172 \text{ MPa} \quad (7.4.1.1)$$

7.4.2 Napětí v oku od nalisování pouzdra:

přesah při provozní teplotě:

$$e_t := D_{p\check{c}} \cdot dt \cdot (\alpha_b - \alpha_o) = 0.016 \text{ mm} \quad (7.4.2.1)$$

konstanty pro výpočet tlaku mezi pouzdrům a okem ojnice:

$$C_o := \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 3.669 \quad (7.4.2.2)$$

$$C_p := \frac{D_p^2 + D_{p\check{c}}^2}{D_p^2 - D_{p\check{c}}^2} = 11.364 \quad (7.4.2.3)$$

tlak mezi povrchem pouzdra a okem ojnice:

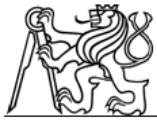
$$p_{op} := \frac{e + e_t}{D_p \cdot \left(\frac{C_o + \mu}{E_o} + \frac{C_p - \mu}{E_b} \right)} = 13.984 \text{ MPa} \quad (7.4.2.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

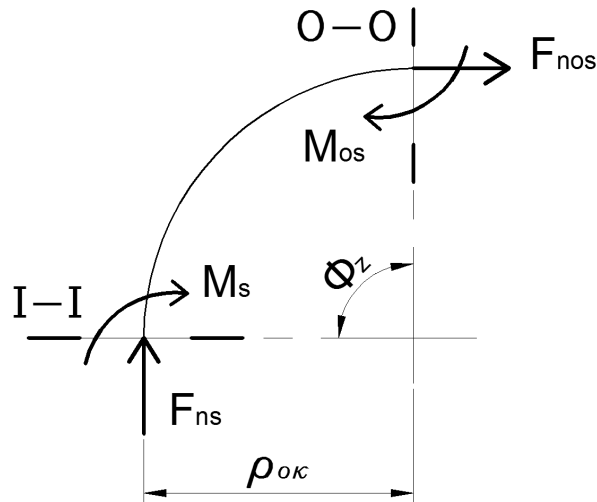
$$\sigma_{ep} := p_{op} \cdot \frac{2 \cdot D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 37.318 \text{ MPa} \quad (7.4.2.5)$$

napětí na vnitřním vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{ip} := p_{op} \cdot \frac{D_o^2 + D_p^2}{D_o^2 - D_p^2} = 51.302 \text{ MPa} \quad (7.4.2.6)$$



7.4.3 Napětí v oku od setrvačných sil:



Obr. 7.4.3.1 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O

$$M_{os} := |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (0.003 \cdot \phi_z - 0.0297) = -3.541 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.3.1)$$

síla namáhající průřez O-O

$$F_{nos} := |F_{DV}| \cdot (0.572 - 0.008 \cdot \phi_z) = 6068.678 \text{ N} \quad (7.4.3.2)$$

moment namáhající průřez I-I

$$M_s := M_{os} + F_{nos} \cdot \rho_{ok} \cdot (1 - \cos(\phi_z)) - 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot \rho_{ok} \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 4.882 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.3.3)$$

síla namáhající průřez I-I

$$F_{ns} := F_{nos} \cdot \cos(\phi_z) + 0.5 \cdot |F_{DV}| \cdot (\sin(\phi_z) - \cos(\phi_z)) = 5423.948 \text{ N} \quad (7.4.3.4)$$

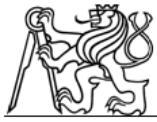
Napětí v oku se stanoví ze vzorce pro křivý prut namáhaný kombinací tahu a ohybu.

napětí na vnějším vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{esD} := \left(2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 165.363 \text{ MPa} \quad (7.4.3.5)$$

napětí na vnitřním vlákně okna ojnice:

$$\sigma_{isD} := \left(-2 \cdot M_s \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} - h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = -45.452 \text{ MPa} \quad (7.4.3.6)$$



7.4.4 Napětí v oku od sil tlaku plynů:

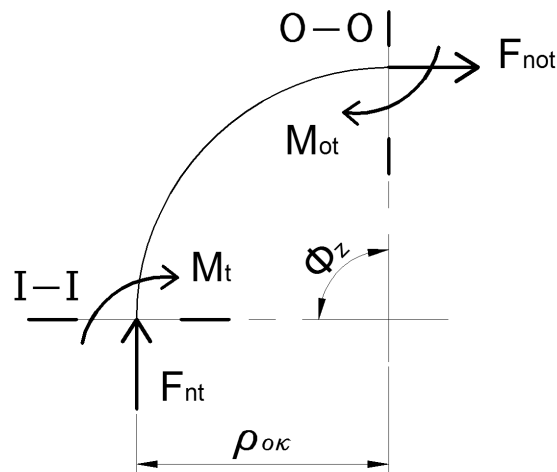
součinitelé pro odhad M_{ot} a F_{not} pro úhel Φ_z .

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

Obr. 7.4.4.1 Tabulka koeficientů natočení výpočtového průřezu od osy ojnice

$$\delta_1 := 0.00$$

$$\delta_2 := 0.00$$



Obr. 7.4.4.2 Namáhání křivého prutu.

moment namáhající průřez O-O:

$$M_{ot} := \delta_2 \cdot F_{HV} \cdot \rho_{ok} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.4.1)$$

normálová síla namáhající průřez O-O:

$$F_{no} := \delta_1 \cdot F_{HV} = 0 \text{ N} \quad (7.4.4.2)$$

moment namáhající průřez I-I:

$$M_t := M_{ot} + \left(F_{no} \cdot \rho_{ok} + \rho_{ok} \cdot F_{no} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2}\right) \right) - \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok}^2 \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.4.3)$$

normálová síla namáhající průřez I-I:

$$F_{nt} := -F_{no} \cdot \cos(\pi - \phi_z) + \int_0^{\phi_z - \frac{\pi}{2}} q \cdot \rho_{ok} \cdot \sin\left(\phi_z - \frac{\pi}{2} - \psi\right) d\psi = 0 \text{ N} \quad (7.4.4.4)$$

napětí na vnějším vlákně oka ojnice:

$$\sigma_{etD} := \left(2 \cdot M_t \cdot \frac{6 \cdot \rho_{ok} + h_{ok}}{h_{ok} \cdot (2 \cdot \rho_{ok} + h_{ok})} + k \cdot F_{ns} \right) \cdot \frac{1}{a_{ok} \cdot h_{ok}} = 74.599 \text{ MPa} \quad (7.4.4.5)$$



horní napětí oka:

$$\sigma_{okmax} := \sigma_{ep} + \sigma_{esD} = 202.681 \text{ MPa} \quad (7.4.4.6)$$

dolní napětí oka:

$$\sigma_{okmin} := \sigma_{ep} + \sigma_{etD} = 111.917 \text{ MPa} \quad (7.4.4.7)$$

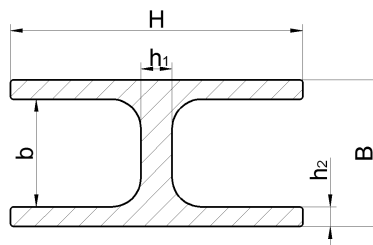
amplitudové napětí oka:

$$\sigma_{Aokoj} := \frac{\sigma_{okmax} - \sigma_{okmin}}{2} = 45.382 \text{ MPa} \quad (7.4.4.8)$$

střední napětí oka:

$$\sigma_{Mokoj} := \frac{\sigma_{okmax} + \sigma_{okmin}}{2} = 157.299 \text{ MPa} \quad (7.4.4.9)$$

7.4.5 Napětí v dříku ojnice od setrvačných sil a sil od tlaku plynů:



Obr. 7.4.5.1 Průřez dříku ojnice.

Dřík ojnice je namáhán tlakem, tahem, odstředivými silami a často také vzpěrem.

tloušťka profilu H:

$$B := 15 \text{ mm}$$

šíře profilu H:

$$H := 30 \text{ mm}$$

tloušťka mezery profilu H:

$$b := 11 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

$$h_1 := 3.2 \text{ mm}$$

tloušťka stěny profilu H:

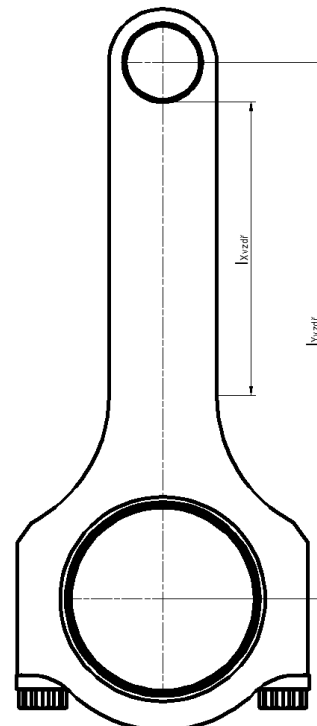
$$h_2 := 2 \text{ mm}$$

plocha dříku:

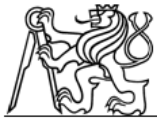
$$S_{dř} := 162 \text{ mm}^2$$

vzpěrná délka ve směru osy X:

$$l_{Xvzdř} := 81.8 \text{ mm}$$



Obr. 7.4.5.2 Výpočtové délky vzpěru.



vzpěrná délka ve směru osy Y:

$$l_{Yvdř} := 149.5 \text{ mm}$$

kvadratický moment průřezu k ose Y:

$$I_{Ydř} := 9037 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k ose X:

$$I_{Xdř} := 5640 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu k nejpravděpodobnější ose vybočení.

$$I_{min} := \min(I_{Ydř}, I_{Xdř}) = 5640 \text{ mm}^4$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose Y:

$$i_{dřY} := \sqrt{\frac{I_{Ydř}}{S_{dř}}} = 7.469 \text{ mm} \quad (7.4.5.1)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose Y:

$$\lambda_{dřY} := \frac{l_{Yvdř}}{i_{dřY}} = 20.016 \quad (7.4.5.2)$$

poloměr setrvačnosti vztaženo k ose X:

$$i_{dřX} := \sqrt{\frac{I_{min}}{S_{dř}}} = 5.9 \text{ mm} \quad (7.4.5.3)$$

štíhlost prutu vztaženo k ose X:

$$\lambda_{dřX} := \frac{l_{Xvdř}}{i_{dřX}} = 13.863 \quad (7.4.5.4)$$

Štíhlost prutu pro směr X i Y je značně nižší než dolní mez u tohoto typu vzpěru. Z toho plyne, že dřík ojnice není při tomto zatížení namáhán na vzpěr. Budu ho tedy kontrolovat jen na tah/tlak.

napětí dříku v tlaku:

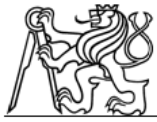
$$\sigma_{TLdřoj} := \frac{F_{HV}}{S_{dř}} = 226.52 \text{ MPa} \quad (7.4.5.5)$$

napětí dříku v tahu:

$$\sigma_{TAdřoj} := \frac{F_{DV}}{S_{dř}} = -66.962 \text{ MPa} \quad (7.4.5.6)$$

amplituda napětí dříku:

$$\sigma_{Adřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} - \sigma_{TAdřoj}}{2} = 146.741 \text{ MPa} \quad (7.4.5.7)$$



střední napětí dřívku:

$$\sigma_{Mdřoj} := \frac{\sigma_{TLdřoj} + \sigma_{TAdřoj}}{2} = 79.779 \text{ MPa} \quad (7.4.5.8)$$

7.4.6 Napětí v hlavě ojnice od setrvačných sil.

Hlava je namáhána silami od setrvačnosti pístní skupiny a posuvné části ojnice.

Osová vzdálenost ojnicních šroubů:

$$C := 66.8 \text{ mm}$$

výpočetní průřez pod úhlem:

$$\phi_{Zhl} := 45$$

plochy průřezu víka ojnice:

$$S_{Voj} := 152 \text{ mm}^2$$

plochy průřezu pánve ojnice:

$$S_{Poj} := 167.5 \text{ mm}^2$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xvi} := 8017 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Yvi} := 876 \text{ mm}^4$$

maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Voj} := 6 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Voj} := \frac{I_{Yvi}}{e_{Voj}} = 146 \text{ mm}^3 \quad (7.4.6.1)$$

úhly vychýlení síly zatěžující průřez:

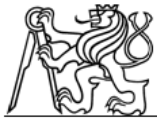
$$\alpha_{df} := 30 \text{ deg}$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose X:

$$I_{Xpa} := 8893 \text{ mm}^4$$

kvadratický moment průřezu víka ojnice vztažen k ose Y:

$$I_{Ypa} := 1672 \text{ mm}^4$$

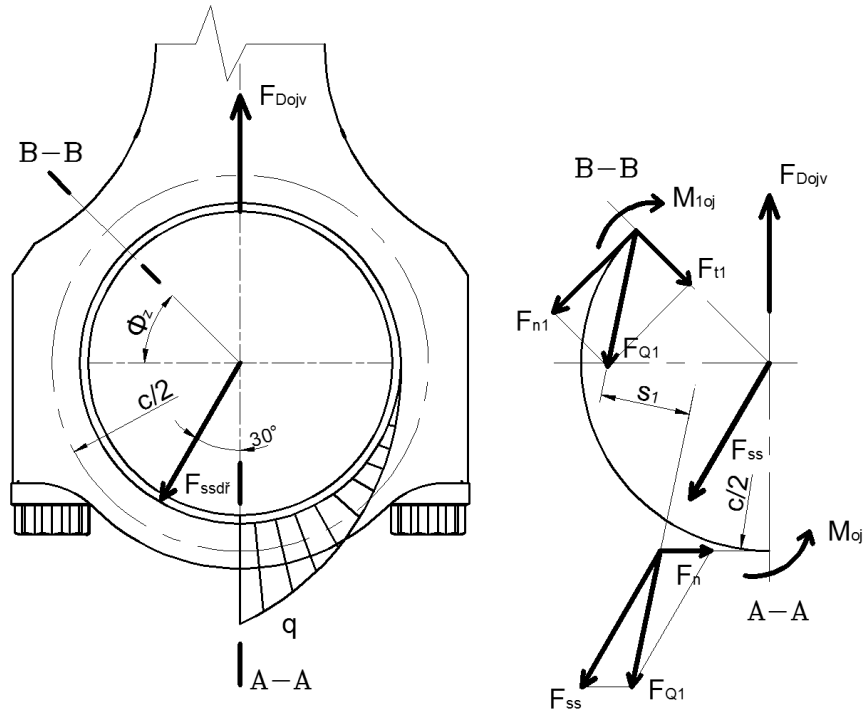


maximální vzdálenost od neutrální osy víka ojnice ke kraji průřezu:

$$e_{Poj} := 7.85 \text{ mm}$$

momenty setrvačnosti průřezu víka hlavy ojnice:

$$W_{Poj} := \frac{I_{Ypa}}{e_{Poj}} = 212.994 \text{ mm}^3 \quad (7.4.6.2)$$



Obr. 7.4.6.1 Zatížení hlavy ojnice - setrv.

moment namáhající průřez A-A:

$$M_{Aoj} := |F_{Dojv}| \cdot \frac{C}{2} \cdot (0.0127 + 0.0083 \cdot \phi_{Zhl}) = 207.927 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.6.3)$$

síla namáhající průřez A-A:

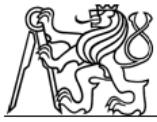
$$F_{nAoj} := |F_{Dojv}| \cdot (0.522 - 0.003 \cdot \phi_{Zhl}) = 6238.267 \text{ N} \quad (7.4.6.4)$$

moment namáhající průřez B-B:

$$M_{oj} := \frac{M_{Aoj} \cdot I_{Yvi}}{I_{Yvi} + I_{Ypa}} = 71.485 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.6.5)$$

síla namáhající průřez B-B:

$$F_n := \frac{F_{nAoj} \cdot S_{voj}}{S_{voj} + S_{poj}} = 2967.814 \text{ N} \quad (7.4.6.6)$$



horní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmax} := \frac{M_{oj}}{W_{Voj}} + \frac{F_n}{S_{Voj}} = 509.15 \text{ MPa} \quad (7.4.6.7)$$

dolní napětí v krajním vlákně:

$$\sigma_{Vojmin} := 0 \text{ MPa}$$

amplituda napětí víka:

$$\sigma_{AVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} - \sigma_{Vojmin}}{2} = 254.575 \text{ MPa} \quad (7.4.6.8)$$

střední napětí víka:

$$\sigma_{MVoj} := \frac{\sigma_{Vojmax} + \sigma_{Vojmin}}{2} = 254.575 \text{ MPa} \quad (7.4.6.9)$$

síla jako náhrada spojitěho zatížení působící na víko ojnice :

$$F_{ss} := \frac{|F_{Dojv}|}{2 \cdot \cos(\alpha_{df})} = 9306.628 \text{ N} \quad (7.4.6.10)$$

výslednice normálové síly a síly nahrazující spojitě zatížení:

$$F_{Q1} := 8236.667 \text{ N}$$

normálová síla v řezu B-B hlavy ojnice:

$$F_{n1oj} := 6906.667 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_1 := 16.01 \text{ mm}$$

tečná síla v řezu B-B hlavy ojnice:

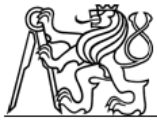
$$F_{t1oj} := 4546.667 \text{ N}$$

přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{1oj} := F_{Q1} \cdot s_1 = 131.869 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.6.11)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n1oj} := \frac{F_{n1oj}}{S_{Poj}} = 41.234 \text{ MPa} \quad (7.4.6.12)$$



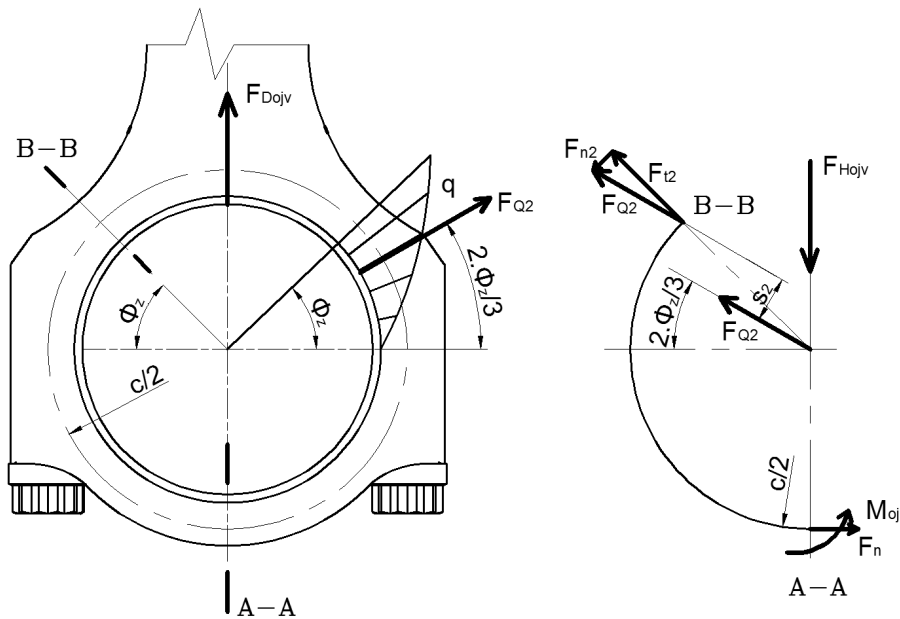
napětí normálové ve vnějším vlákně od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{01oj} := \frac{M_{oj} + M_{1oj}}{W_{Poj}} = 954.743 \text{ MPa} \quad (7.4.6.13)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t1oj} := \frac{F_{t1oj}}{S_{Poj}} = 27.144 \text{ MPa} \quad (7.4.6.14)$$

7.4.7 Napětí v hlavě ojnice od tlakových sil.



Obr. 7.4.7.1 Zatížení hlavy ojnice - tlak.

síla nahrazující spojitého zatížení v řezu B-B:

$$F_{Q2} := 0.54 \cdot \left(\frac{\phi_{Zh1} \cdot \pi}{180} - 0.43 \right) \cdot F_{Hojv} = 6030.851 \text{ N} \quad (7.4.7.1)$$

normálová síla zatěžující průřez B-B:

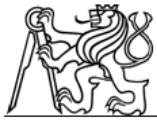
$$F_{n2} := 1660 \text{ N}$$

tečná síla zatěžující průřez B-B:

$$F_{t2} := 6190 \text{ N}$$

vzdálenost výslednic Fq/rameno přidavného momentu:

$$s_2 := 8.64 \text{ mm}$$



přídavný moment namáhající průřez B-B:

$$M_{2oj} := F_{Q2} \cdot s_2 = 52.107 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.4.7.2)$$

napětí od normálové setrvačné síly v řezu B-B:

$$\sigma_{n2oj} := \frac{F_{n2}}{S_{Poj}} = 9.91 \text{ MPa} \quad (7.4.7.3)$$

napětí normálové ve vnějším vlákne od momentů v řezu B-B:

$$\sigma_{02oj} := \frac{M_{oj} + M_{2oj}}{W_{Poj}} = 580.261 \text{ MPa} \quad (7.4.7.4)$$

napětí tangenciální od tečné setrvačné síly v řezu B-B:

$$\tau_{t2oj} := \frac{F_{t2}}{S_{Poj}} = 36.955 \text{ MPa} \quad (7.4.7.5)$$

horní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmax} := \sigma_{n1oj} + \sigma_{01oj} = 995.977 \text{ MPa} \quad (7.4.7.6)$$

dolní napětí v hlavě ojnice:

$$\sigma_{Hojmin} := \sigma_{n2oj} + \sigma_{02oj} = 590.171 \text{ MPa} \quad (7.4.7.7)$$

amplituda napětí v hlavě:

$$\sigma_{Ahlaj} := \frac{\sigma_{Hojmax} - \sigma_{Hojmin}}{2} = 202.903 \text{ MPa} \quad (7.4.7.8)$$

střední napětí v hlavě:

$$\sigma_{Mhlaj} := \frac{\sigma_{Hojmax} + \sigma_{Hojmin}}{2} = 793.074 \text{ MPa} \quad (7.4.7.9)$$

7.4.8 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti AISI 4340:

$$\sigma_{eoj} := 870 \text{ MPa} \quad E_{oj} := 200000 \text{ MPa} \quad \epsilon_{foj} := 0.67 \quad c_{oj} := -0.64$$

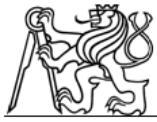
$$\sigma_{foj} := 1898 \text{ MPa} \quad K_{oj}' := 1950 \text{ MPa} \quad n_{oj}' := 0.13 \quad b_{oj} := -0.09$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\sigma_{Aokoj}, \sigma_{Adfoj}, \sigma_{AVoj}, \sigma_{Ahlaj}) = 254.575 \text{ MPa} \quad (7.4.8.1)$$

prodloužení elastické:

$$\epsilon_{aELoj} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{oj}} = 0.0012729 \quad (7.4.8.2)$$



prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLoj} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{oj}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{oj}'} \right)} = 0.0000002 \quad (7.4.8.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELoj} + \varepsilon_{aPLoj} = 0.001273 \quad (7.4.8.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{oj} := 2.48 \cdot 10^9$$

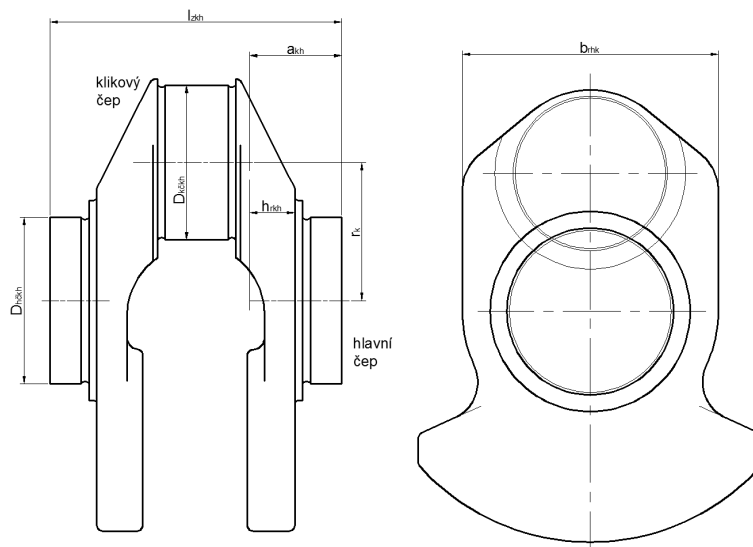
celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{b_{oj}}}{E_{oj}} + \varepsilon_{foj} \cdot (2 \cdot N_{oj})^{c_{oj}} = 0.001273 \quad (7.4.8.5)$$

7.5 Klikový hřídel:

Klikový hřídel (dále KH) je namáhán silami od tlaku plynů, setrvačnými silami, vnějším zatížením a silami od torzního kmitání. Pevnostní kontrola se zaměřuje na nejvíce namáhané části. Při kontrole se zanedbává deformace KH, pružnost uložení a opotřebení ložisek, takže reakce v podporách jsou jen přibližné. Na velikost skutečných napětí značně působí i složitý tvar KH, který do výpočtu nelze plně zahrnout. Vzhledem ke složitosti výpočtu KH jako celku a málo odlišné míry bezpečnosti od výpočtu 1 zalomení se běžně počítá právě jen 1 zalomení.

Co se týče druhu namáhání, tak se hlavní čepy kontrolují vzhledem k jejich malé délce pouze na krut. Ohybová napětí mají malý vliv na bezpečnost. Klikový čep je namáhán ohybem a krutem, které nepůsobí současně.



Obr. 7.5.1 Rozměrový náčrtek zalomení KH.



7.5.1 Napětí v hlavním čepu.

průměr hlavního čepu:

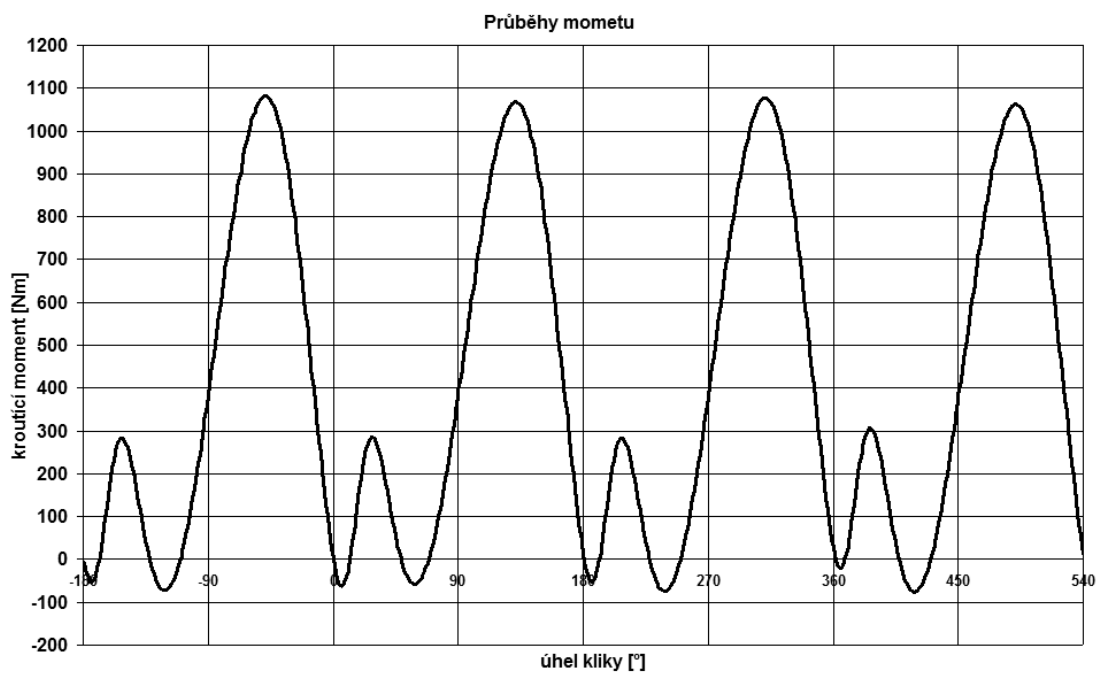
$$D_{h\check{c}kh} := 53.3 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut hlavního čepu:

$$W_{h\check{c}kh} := \frac{\pi \cdot D_{h\check{c}kh}^3}{16} = 29731.137 \text{ mm}^3 \quad (7.5.1.1)$$

poloměr kliky:

$$r_k := 45.5 \text{ mm}$$



Obr. 7.5.1.1 Průběh momentu KH.

maximální moment působící na hlavní čep:

$$M_{h\check{c}max} := 1081.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

minimální moment působící na hlavní čep:

$$M_{h\check{c}min} := -99.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

horní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmax} := \frac{M_{h\check{c}max}}{W_{h\check{c}kh}} = 36.363 \text{ MPa} \quad (7.5.1.2)$$

dolní napětí hlavního čepu:

$$T_{h\check{c}khmin} := \frac{M_{h\check{c}min}}{W_{h\check{c}kh}} = -3.34 \text{ MPa} \quad (7.5.1.3)$$



amplituda napětí v hlavním čepu:

$$T_{Ahckh} := \frac{T_{hckhmax} - T_{hckhmin}}{2} = 19.851 \text{ MPa} \quad (7.5.1.4)$$

střední napětí v hlavním čepu:

$$T_{Mhckh} := \frac{T_{hckhmax} + T_{hckhmin}}{2} = 16.511 \text{ MPa} \quad (7.5.1.5)$$

7.5.2 Napětí v klikovém čepu.

průměr klikového čepu:

$$D_{kckh} := 49.5 \text{ mm}$$

rameno rakce uložení:

$$a_{kh} := 21.4 \text{ mm}$$

úhel mezi osou mazacího otvoru a osou zalomení:

$$\phi_{mo} := 45 \text{ deg}$$

délka zalomení:

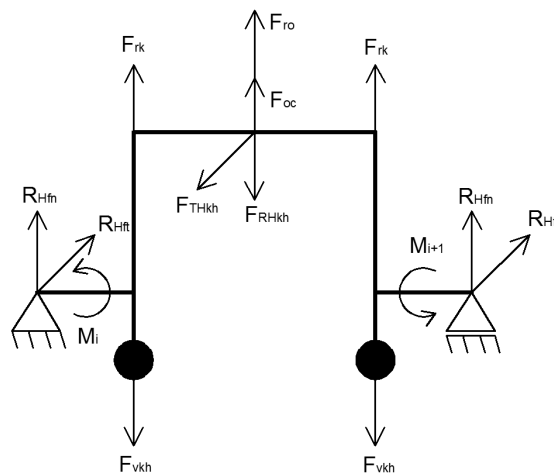
$$l_{zkh} := 96.4 \text{ mm}$$

průřezový modul pro krut klikového čepu:

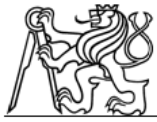
$$W_{kckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{16} = 23814.72 \text{ mm}^3 \quad (7.5.2.1)$$

průřezový modul pro ohyb klikového čepu:

$$W_{okckh} := \frac{\pi \cdot D_{kckh}^3}{32} = 11907.36 \text{ mm}^3 \quad (7.5.2.2)$$



Obr. 7.5.2.1 Rozložení sil na 1 zalomení KH.



odstředivá síla vývažků v rovině zalomení:

$$F_{vkh} = 10766.112 \text{ N}$$

odstředivá síla rotující části ojnice:

$$F_{ro} = 7634.139 \text{ N}$$

odstředivá síla klikového (ojničního) čepu:

$$F_{oc} = 7346.736 \text{ N}$$

odstředivá síla ramene kliky:

$$F_{rk} = 8522.688 \text{ N}$$

celková odstředivá síla:

$$F_{ckh} := F_{ro} + F_{oc} + F_{rk} = 23503.563 \text{ N} \quad (7.5.2.3)$$

horní normálová reakce v uložení:

$$R_{Hfn} := \frac{F_{RHkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = 15329.46 \text{ N} \quad (7.5.2.4)$$

dolní normálová reakce v uložení:

$$R_{Dfn} := \frac{F_{RDkh} - (F_{ckh} - 2 \cdot F_{vkh})}{2} = -9045.446 \text{ N} \quad (7.5.2.5)$$

horní tečná reakce v uložení:

$$R_{Hft} := \frac{F_{THkh}}{2} = 10722.475 \text{ N} \quad (7.5.2.6)$$

dolní tečná reakce v uložení:

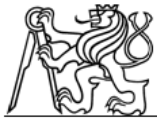
$$R_{Dft} := \frac{F_{TDkh}}{2} = -4058.313 \text{ N} \quad (7.5.2.7)$$

horní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Hozkh} := R_{Hfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = 678.756 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.8)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině zalomení:

$$M_{Dozkh} := R_{Dfn} \cdot \frac{l_{zkh}}{2} + (F_{rk} - F_{vkh}) \cdot \left(\frac{l_{zkh}}{2} - a_{kh} \right) = -496.114 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.5.2.9)$$



horní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Hotkh} := \frac{R_{Hft} \cdot I_{zkh}}{2} = 516.823 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.10)$$

dolní moment namáhající klikový čep v rovině kolmé na rovinu zalomení:

$$M_{Dotkh} := \frac{R_{Dft} \cdot I_{zkh}}{2} = -195.611 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.11)$$

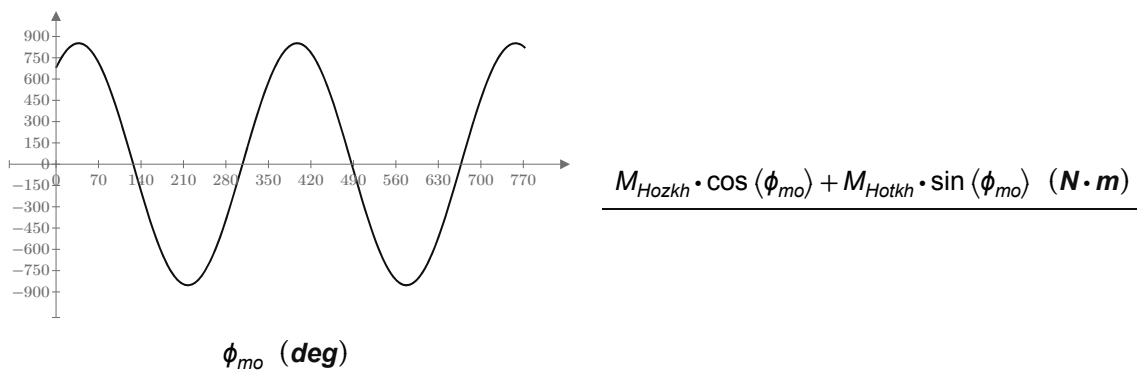
celkový ohybový moment horní:

$$M_{Ho} := \sqrt{M_{Hozkh}^2 + M_{Hotkh}^2} = 853.122 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.12)$$

celkový ohybový moment dolní:

$$M_{Do} := -\sqrt{M_{Dozkh}^2 + M_{Dotkh}^2} = -533.285 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.13)$$

Protože ke koncentraci napětí dochází u mazacího otvoru, užijeme vztah pro výpočet momentu v tomto místě:



Obr. 7.5.2.2 Průběh momentu od sil od spalování.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 395 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

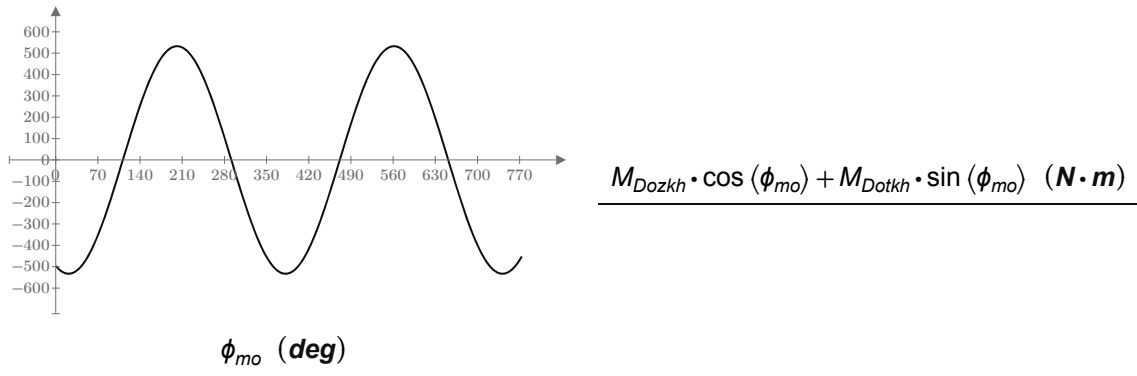
$$M_{Ho\phi_{max}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 852.442 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.14)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 215 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Ho\phi_{min}} := M_{Hozkh} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Hotkh} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -852.442 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.15)$$



Obr. 7.5.2.3 Průběh momentu od setrvačných sil.

úhel maximálního horního momentu:

$$\phi_{mo1} := 202 \text{ deg}$$

maximální horní moment:

$$M_{Do\phi max} := M_{Dozkh} \cdot \cos(\phi_{mo1}) + M_{Dotkh} \cdot \sin(\phi_{mo1}) = 533.266 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.16)$$

úhel minimálního dolního momentu:

$$\phi_{mo2} := 382 \text{ deg}$$

minimální dolní moment:

$$M_{Do\phi min} := M_{Dozkh} \cdot \cos(\phi_{mo2}) + M_{Dotkh} \cdot \sin(\phi_{mo2}) = -533.266 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.2.17)$$

Největší momenty působí tlakové síly od spalování. Z těchto momentů budou počítána napětí:

horní napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Hkckh} := \frac{M_{Ho\phi max}}{W_{okckh}} = 71.59 \text{ MPa} \quad (7.5.2.18)$$

dolní napětí klikového čepu:

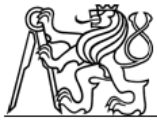
$$\sigma_{Dkckh} := \frac{M_{Ho\phi min}}{W_{okckh}} = -71.59 \text{ MPa} \quad (7.5.2.19)$$

amplituda napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Akckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} - \sigma_{Dkckh}}{2} = 71.59 \text{ MPa} \quad (7.5.2.20)$$

střední napětí klikového čepu:

$$\sigma_{Mkckh} := \frac{\sigma_{Hkckh} + \sigma_{Dkckh}}{2} = 0 \text{ MPa} \quad (7.5.2.21)$$



horní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc1} := M_{hčmax} + R_{Hft} \cdot r_k = 1568.973 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (7.5.2.22)$$

dolní moment namáhající klikový čep na krut:

$$M_{kc2} := M_{hčmin} - R_{Hft} \cdot r_k = -587.173 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (7.5.2.23)$$

horní smykové napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmax} := \frac{M_{kc1}}{W_{kčkh}} = 65.882 \text{ MPa} \quad (7.5.2.24)$$

dolní napětí klikového čepu:

$$T_{kckhmin} := \frac{M_{kc2}}{W_{kčkh}} = -24.656 \text{ MPa} \quad (7.5.2.25)$$

amplituda smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Akčkh} := \frac{T_{kckhmax} - T_{kckhmin}}{2} = 45.269 \text{ MPa} \quad (7.5.2.26)$$

střední napětí smykového napětí klikového čepu:

$$T_{Mkčkh} := \frac{T_{kckhmax} + T_{kckhmin}}{2} = 20.613 \text{ MPa} \quad (7.5.2.27)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

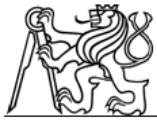
$$\sigma_{Aredkckh} := \sqrt{\sigma_{Akckh}^2 + 4 \cdot T_{Akčkh}^2} = 115.422 \text{ MPa} \quad (7.5.2.28)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání klikového čepu:

$$\sigma_{Mredkckh} := \sqrt{\sigma_{Mkckh}^2 + 4 \cdot T_{Mkčkh}^2} = 41.227 \text{ MPa} \quad (7.5.2.29)$$

7.5.3 Napětí v rameni kliky.

Rameno KH je namáháno proměnlivým ohybem, krutem, tahem a tlakem. Napětí se kontroluje v přechodu z hlavního čepu do ramen, kde je jeho největší koncentrace.



ohybový moment působící na remeno kliky:

$$M_{orkh} := R_{Hfn} \cdot a_{kh} = 328.05 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.3.1)$$

šíře ramene kliky:

$$h_{rkh} := 15 \text{ mm}$$

tloušťka ramene kliky:

$$b_{rkh} := 84.5 \text{ mm}$$

poměr stran průřezu x:

$$x := \frac{b_{rkh}}{h_{rkh}} = 5.633 \quad (7.5.3.2)$$

součinitel pro průřezový modul v krutu:

$$\alpha_{kh} := 0.00054 \cdot x^3 - 0.0099 \cdot x^2 + 0.0624 \cdot x + 0.1563 = 0.29 \quad (7.5.3.3)$$

plocha ramena kliky:

$$S_{rkh} := 1337 \text{ mm}^2$$

moment setrvačnosti k hlavní ose:

$$I_{Yrkh} := 751041.383 \text{ mm}^4 \quad (7.5.3.4)$$

vzdálenost od těžiště ke kraji průřezu:

$$e_{maxrkh} := 42.5 \text{ mm}$$

průřezový modul v ohybu ramene kliky:

$$W_{orkh} := \frac{I_{Yrkh}}{e_{maxrkh}} = 17671.562 \text{ mm}^3 \quad (7.5.3.5)$$

průřezový modul v krutu ramene kliky:

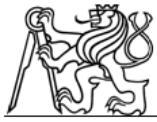
$$W_{krkh} := \alpha_{kh} \cdot b_{rkh} \cdot h_{rkh}^2 = 5517.146 \text{ mm}^3 \quad (7.5.3.6)$$

celkové napětí od ohybu a tlaku/tahu:

$$\sigma_{orkh} := \frac{M_{orkh}}{W_{orkh}} + \frac{R_{Hfn}}{S_{rkh}} = 30.029 \text{ MPa} \quad (7.5.3.7)$$

maximální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmax} := \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RHkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = 8.939 \text{ MPa} \quad (7.5.3.8)$$



minimální napětí cyklu:

$$\sigma_{rkhmin} := \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2} \cdot \frac{a_{kh}}{W_{orkh}} + \frac{F_{RDkh} - F_{ckh}}{2 \cdot S_{rkh}} = -38.809 \text{ MPa} \quad (7.5.3.9)$$

amplituda napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Arkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} - \sigma_{rkhmin}}{2} = 23.874 \text{ MPa} \quad (7.5.3.10)$$

střední napětí ramene kliky:

$$\sigma_{Mrkh} := \frac{\sigma_{rkhmax} + \sigma_{rkhmin}}{2} = -14.935 \text{ MPa} \quad (7.5.3.11)$$

horní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Hkrkh} := R_{Hft} \cdot a_{kh} = 229.461 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.3.12)$$

dolní kroutící moment působící na rameno kliky:

$$M_{Dkrkh} := R_{Dft} \cdot a_{kh} = -86.848 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (7.5.3.13)$$

horní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Hrkh} := \frac{M_{Hkrkh}}{W_{krkh}} = 41.591 \text{ MPa} \quad (7.5.3.14)$$

dolní smykové napětí v rameni kliky:

$$\tau_{Drkh} := \frac{M_{Dkrkh}}{W_{krkh}} = -15.741 \text{ MPa} \quad (7.5.3.15)$$

amplituda smykového napětí ramene kliky:

$$\tau_{Arkh} := \frac{\tau_{Hrkh} - \tau_{Drkh}}{2} = 28.666 \text{ MPa} \quad (7.5.3.16)$$

střední smykové napětí ramen kliky:

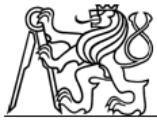
$$\tau_{Mrkh} := \frac{\tau_{Hrkh} + \tau_{Drkh}}{2} = 12.925 \text{ MPa} \quad (7.5.3.17)$$

amplituda redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Aredrkh} := \sqrt{\sigma_{Arkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Arkh}^2} = 62.104 \text{ MPa} \quad (7.5.3.18)$$

střední redukovaného napětí kombinovaného namáhání ramene kliky:

$$\sigma_{Mredrkh} := \sqrt{\sigma_{Mrkh}^2 + 4 \cdot \tau_{Mrkh}^2} = 29.853 \text{ MPa} \quad (7.5.3.19)$$



7.5.4 Výpočet počtu cyklů:

Materiálové vlastnosti GGG-60:

$$\sigma_{ekh} := 240 \text{ MPa}$$

$$E_{kh} := 170000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fkh} := 0.26$$

$$c_{kh} := -0.7$$

$$\sigma_{fkh} := 978 \text{ MPa}$$

$$K_{kh}' := 938 \text{ MPa}$$

$$n_{kh}' := 0.1$$

$$b_{kh} := -0.09$$

největší amplitudové napětí:

$$\sigma_{maxA} := \max(\tau_{Ahčkh}, \sigma_{Aredkckh}, \sigma_{Aredrkh}) = 115.422 \text{ MPa} \quad (7.5.4.1)$$

prodloužení elastické:

$$\varepsilon_{aELkh} := \frac{\sigma_{maxA}}{E_{kh}} = 0.000679 \quad (7.5.4.2)$$

prodloužení plastické:

$$\varepsilon_{aPLkh} := \left(\frac{\sigma_{maxA}}{K_{kh}'} \right)^{\left(\frac{1}{n_{kh}'} \right)} = 0 \quad (7.5.4.3)$$

celkové prodloužení:

$$\varepsilon_{ckh} := \varepsilon_{aELkh} + \varepsilon_{aPLkh} = 0.000679 \quad (7.5.4.4)$$

odhad počtu cyklů:

$$N_{kh} := 1.025 \cdot 10^{10}$$

celková deformace pro kontrolu:

$$\varepsilon_a' := \frac{\sigma_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{b_{kh}}}{E_{kh}} + \varepsilon_{fkh} \cdot (2 \cdot N_{kh})^{c_{kh}} = 0.000679 \quad (7.5.4.5)$$



Příloha 4 - Realizace

8.1. Příprava motoru

Myšlenka byla zhotovit středně přeplňovaný motoru, který by byl v daném vozidle unikátní. K jeho jedinečnosti měly přispívat právě charakteristiky rootsova dmyhadla jako jeho zvukový projev a průběh momentu motoru. V Evropě nejsou motory přeplňované tímto způsobem zdaleka tak rozšířené jako motory přeplňované turbodmychadlem. To se psal roku 2013.

Počáteční krok bylo obstarat motor, který jde do daného vozidla vsadit. Následovalo rozebrání a zjištění jeho stavu. Po kontrole, výměně některých běžně opotřebitelných dílů, srovnání hlavy a zabroušení ventilů byl motor složen.



Obr.8.1.1 Motor před kontrolou a čištěním.

Za účelem menšího odporu sacích kanálů byla odstraněna ploška mezi jednotlivými přívody k ventilům viz Obr.8.1.3 a Obr.8.1.4. Pozdější měření průtokových součinitelů kanálů ovšem ukázalo, že průtok kanály se cca o 4% zhoršil. Tuto úpravu tedy vyhodnocuji jako nevhodnou. Otázkou je, jaký rozdíl průtoku by byl, pokud by se měřilo s připevněným sáním.

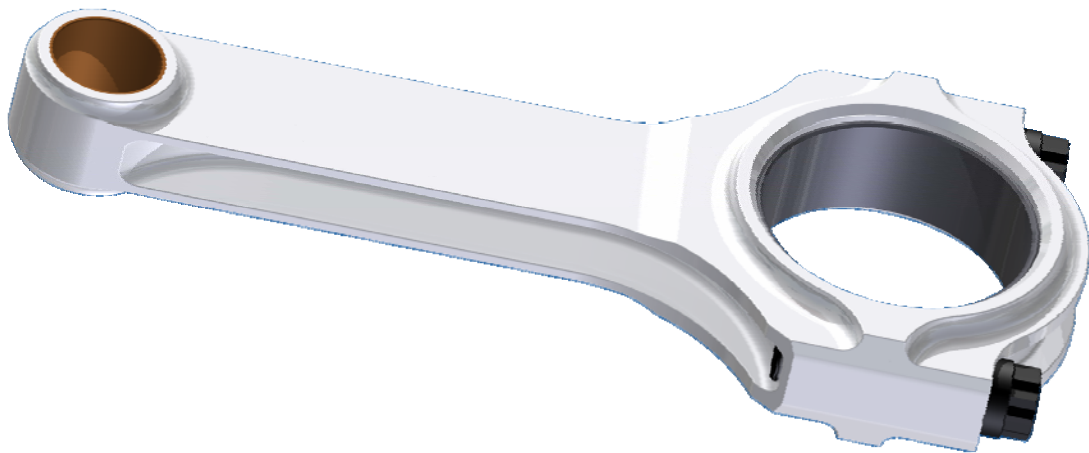


Obr.8.1.2 Sací kanál neupravený.



Obr.8.1.3 Sací kanál upravený.

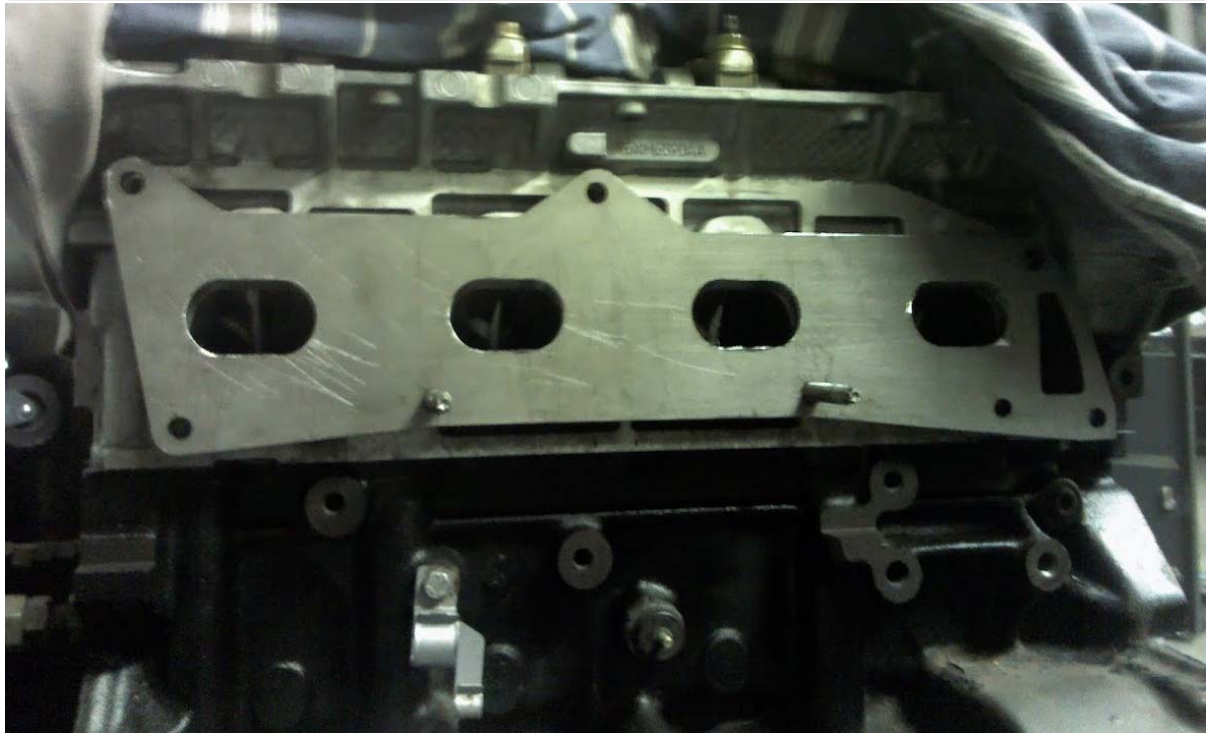
Jelikož bylo plánováno přeplňování, dostal motor druhovýrobové ojnice. Nechtěl jsem nic nechat náhodě, protože dle výpočtu zatížení pomocí Ottova cyklu původní ojnice nevyhovovaly.



Obr. 8.1.4 Ojnice řešeného motoru.

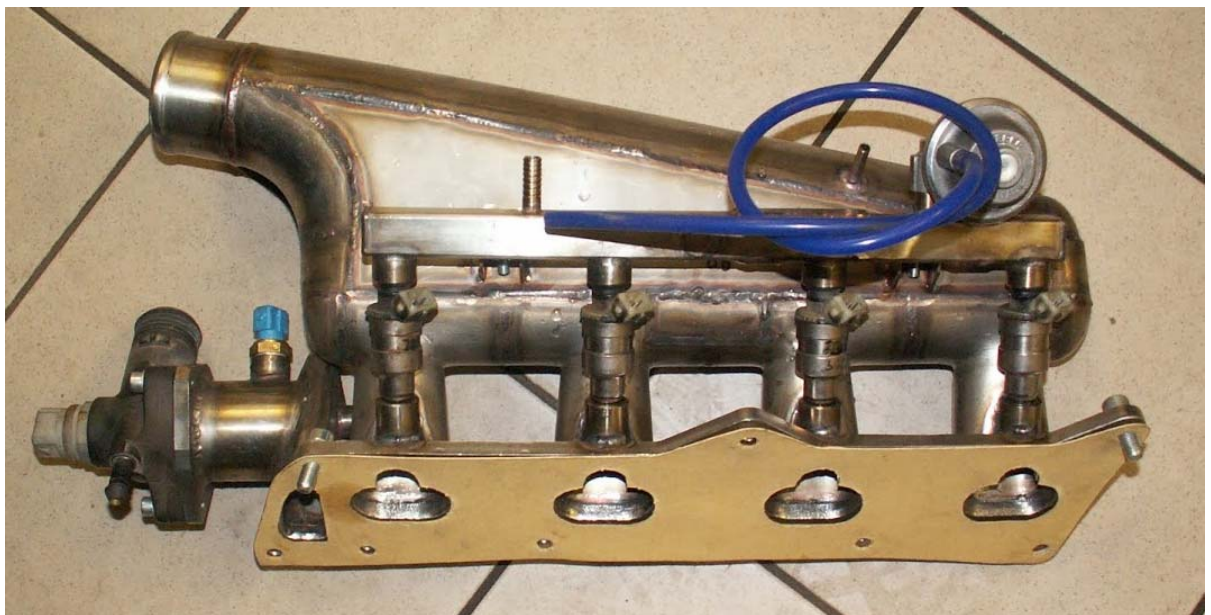
8.2. Příslušenství motoru

Po bližším ohledání byla zjištěna neopravitelná prasklina v sání. Vzhledem ke špatné dostupnosti tohoto dílu (praskal i na jiných motorech) a k požadavku nižších hydraulických ztrát bylo rozhodnuto o tvorbě sání individuálního. Jako základ posloužil plech o tloušťce 8mm z materiálu AISI 304, který byl vyříznut laserem a do kterého byly vyfrézovány otvory sacích kanálů pod úhlem, o který jsou kanály skloněn v hlavě.



Obr.8.2.1 Základní plech sání usazen na motoru.

Protože původní vstříky motoru byly na požadovaná výkon nedostačující, došlo k jejich nahrazení vstříky s dostatečným průtokem paliva. Z tohoto důvodu, a také z důvodu lepšího napojení na sání a engine management byla zhotovena individuální palivová lišta.



Obr.8.2.2 Zhotovené sání včetně palivové lišty.



Ideální by bylo ověřit totožné spalování ve válcích indikováním veličiny uvnitř válce, ale to by bylo velice nákladné. Rovnoměrné spalování uvnitř všech válců bylo kontrolováno podle zbarvení zapalovacích svíček.

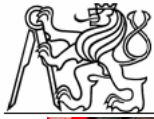
Současně s tvorbou sání bylo umísťováno i dmychadlo. Z důvodu jeho velikosti, sacího potrubí a aby nebylo dodatečně ohříváno výfukovým potrubím byl Eaton M90 umístěn na druhé straně motoru, než jsou výfukové svody. Nakonec byl uchycen 3 šrouby. 1 šroub na držák servo pumpy a 2 na držák motoru. Mezi motorem a dmychadlem byla úmyslně ponechána mezera z montážních důvodů a také aby byl kompresor ofukován ze všech stran. Jelikož bylo dmychadlo připevněno na místo alternátoru, alternátor našel místo na druhé straně motoru.



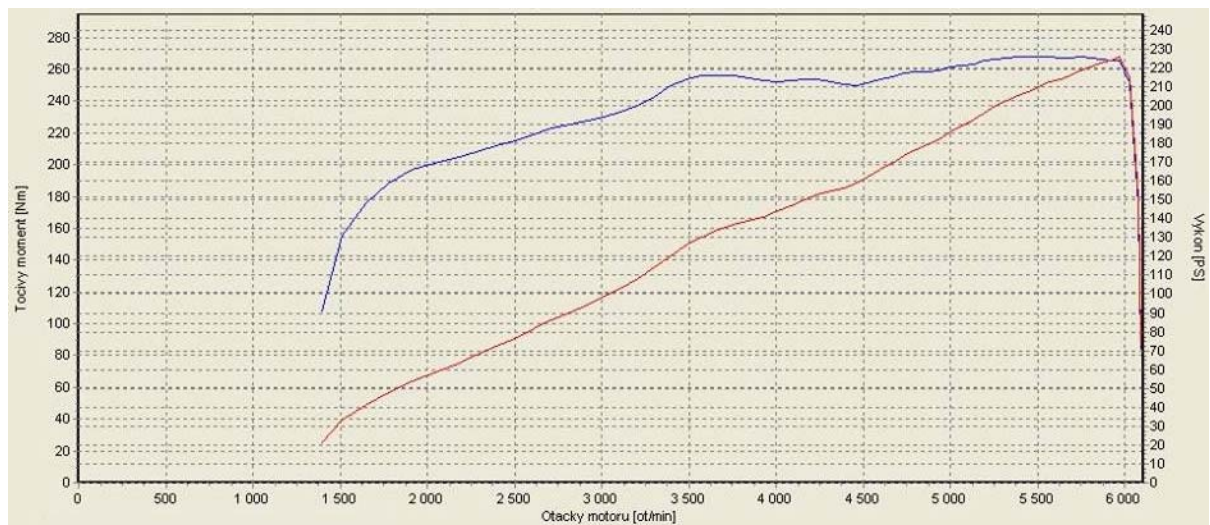
Obr.8.2.3 Optimalizace umístění Eatonu M90.

8.3. První zástavba

U první přeplňované verze nebyl použit mezichladič stlačeného vzduchu kvůli co nejkratší odezvě motoru na změnu polohy regulačního orgánu. Po změření vnější charakteristiky byl průběh zaznamenán do grafu na Obr. 8.3.2.



Obr. 8.3.1 První montáž motoru.



Obr. 8.3.2 Vnější charakteristika prvního sestavení.

Tlakový poměr v sání rostl od nižších otáček téměř konstantně a při maximálních otáčkách byl 1,6 bar. Bylo dosaženo výkonu 166 kW a momentu 267 Nm. Jako další krok byla záměna řemenice za řemenici s menším průměrem. Plnicí tlak vzrostl v maximálních otáčkách na 0,86 bar. Z důvodu nárůstu momentu bylo dále třeba z důvodu prokluzu spojky vyměnit spojkovou sadu za sadu s větším průměrem lamely. Po drobném doladění předstihu bylo vozidlo změřeno a výsledek je zobrazen v Obr. 8.3.3.



Obr. 8.3.3. Vnější charakteristika sestavení ROOTS.

U konfigurace ROOTS bylo dosaženo výkonu 178 kW a momentu 292 Nm.



Obr. 8.3.4 Konfigurace ROOTS při testovacím provozu.

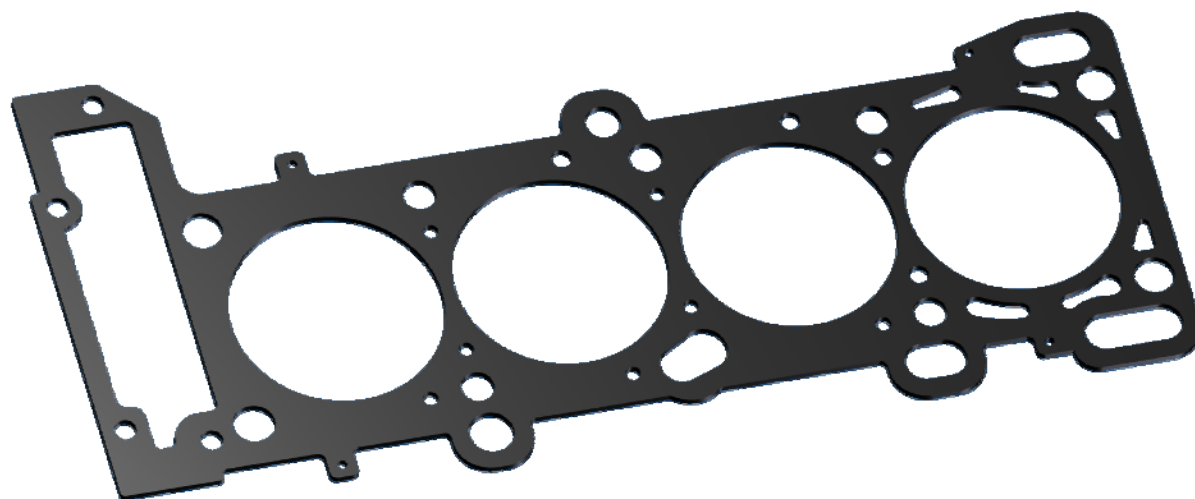
Konfigurace ROOTS měla obrovskou nevýhodu, která spočívala ve velice teplém vzduchu vstupujícího do sání. Tato teplota se při okolní teplotě 21°C v nejvyšších zatíženích pohybovala kolem 143°C. Důvodem nebylo pouze stlačení samotné vzdušiny, ale také umístění vzduchového filtru, který nasával vzduch v blízkosti sacího traktu. Umístění filtru bylo provedeno takto z časových a prostorových důvodů. V další verzi se počítalo s celkovým "učesáním" motorového prostoru včetně sání chladného vzduchu. S konfigurací ROOTS bylo najeto spíše s Zážehový motor přeplňovaný kompresorem



větším zatížením motoru přibližně 2000 km. Motor byl z vozidla vyjmut a následně rozebrán. Díly vykazovali vizuálně běžné opotřebení.

8.4. Konfigurace ROOTS 2

V roce 2015 začala realizace konfigurace ROOTS 2. Po testovacím provozu konfigurace ROOTS, nasbírání dalších financí a bližším poznání problematiky jsem se rozhodl jít s úpravou dále. Při skládání motoru bylo provedeno několik změn. Využil jsem 4 dílné těsnění hlavy motoru, a distanční plech jsem nahradil plechem z žáruvzdorné nerez o větší tloušťce než plech původní. Tím bylo dosaženo geometrického kompresního poměru 8,4:1 při zachování ostatních parametrů těsnění. Opět došlo k rovnání hlavy a zabroušení ventilů i jejich sedel. Po sestavení konfigurace ROOTS 2 auto mělo výborný záběr od nízkých otáček, ale brzy se záběr v celém spektru zhoršil. Povrch řemenice byl před zajetím hrubší, a po zajetí naprosto hladký. Provedl jsem kontrolní výpočet a přenesený moment byl i při vhodných adhezních podmínkách na hranici použitelnosti. Došlo tedy k výměně klínového řemenu z 6 drážkového na 8 drážkový. Bylo nutné upravit řemenici na klíce, 2 řemenice vyrobit nové a rozšířit kladky řemene. Řemenice dmyhadla byla stažena, a upravena pro upevnění šrouby. Na místo ní byla za tepla nasazena příruba připravena pro přišroubování přizpůsobené řemenice.



Obr. 8.4.1 Plech těsnění.



Obr. 8.4.2 Demontovatelná řemenice dmyhadla.

Vzhledem k předchozí teplotě nasávaného vzduchu jak do dmyhadla tak do válců došlo k přepracování sacího traktu. Vzduchový filtr byl přesunut do podběhu, aby kompresor nasával chladný vzduch okolí a mezi kompresor a sání byl nainstalován tepelný výměník vzduch/vzduch. Chladnější vzduch nasávaný do kompresoru chladí rotory. To má za následek nižší termickou roztažnost a vyšší životnost rotorů.



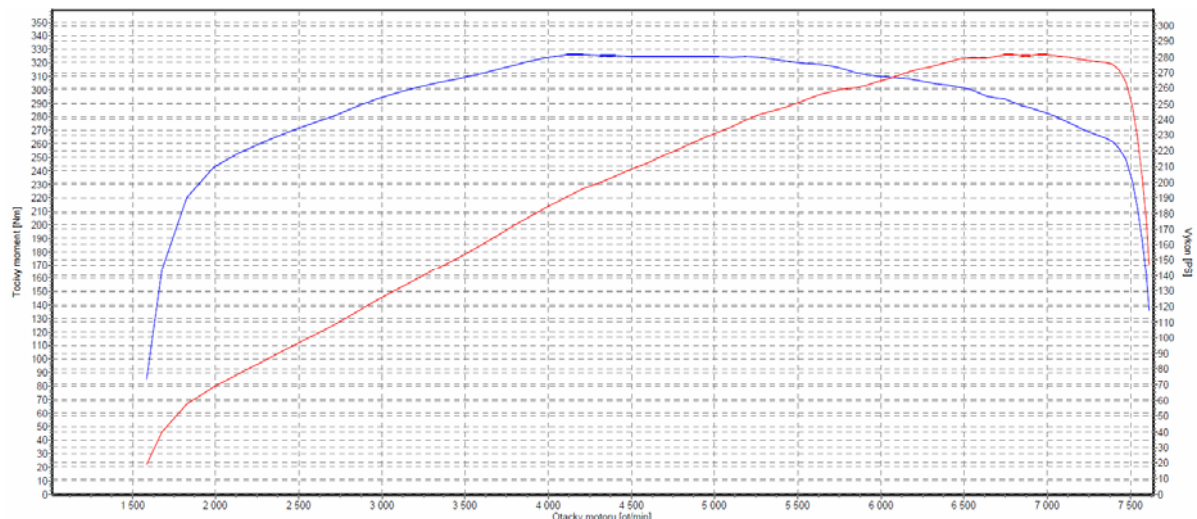
Obr. 8.4.3 Sací strana motoru s Eaton M90 konfigurace ROOTS 2.



Pro další testování byla potřeba zapojit veškeré nádoby na provozní kapaliny a celkově uspořádat lépe motorový prostor. Po tomto ne úplně jednoduchém úkonu (přesouvaly se všechny nádoby z jedné strany motoru na druhou) probíhalo další testování, při kterém byl zjištěn nedostatek na straně palivového čerpadla. Vozidlo při větším zatížení cukalo. Následně byl zapojen online měřič tlaku paliva, který prokázal obavu z poklesu tlaku právě při potřebě většího množství paliva. Následně bylo vyměněno čerpadlo za čerpadlo schopné udržet potřebný tlak při potřebném průtoku.

Při vstupu chladnějšího vzduchu do válce oproti verzi ROOTS bylo vstřikováno také více paliva, z čehož plyne i větší množství výfukových plynů. Při měření výkonu jsme vyzkoušeli odstranit zadní část výfuku, a v následujícím měření bylo změřeno zvýšení točivého momentu o 10 Nm. Provedl jsem tedy změnu celého výfuku i v matematickém modelu a nárůst momentu byl 29 Nm. Na tomto základě jsem se rozhodl pro nové výfukové potrubí většího průřezu. Jelikož je více tepelně zatížen olej, došlo k montáži olejového hladiče hlavně pro nižší rychlost vozidla v kombinaci s větším zatížením.

Následně po obstarání mechanické stránky bylo doladěno palivo a předstih. Při teplotě okolí 20°C byla maximální teplota vzduchu vstupujícího do sání 34°C. Dá se očekávat, že při větší okolní teplotě bude nasávaný vzduch teplejší, ale zdaleka ne tak vysoký jako u konfigurace ROOTS. Nakonec bylo dosaženo výkonu 207 kW a momentu 326 Nm, což jsou hodnoty značně odlišné od hodnot původních.



Obr. 8.4.2 Vnější charakteristika ROOTS 2.



Obr. 8.4.3 Konfigurace ROOTS 2 při testovacím provozu.

8.5. Názor vlastníka

Vozidlo s turbodmychadlem by zpravidla dosáhlo vyššího točivého momentu, nikoliv však s průběhem a reakcí na změnu regulačního orgánu jako konfigurace ROOTS nebo ROOTS 2. Pokud nedojde nějakou chybou ke značným detonacím, nebo k zadření pístního čepu, měl by být motor v konfiguraci ROOTS 2 schopný nějakou dobu fungovat. Celý projekt je tvořen s rozumem, a žádná součást krom ovalizace pístního čepu není hnána na hranici svých možností. Motor je velice tepelně namáhán, a je třeba dbát na jeho řádné chlazení. Cena i časová náročnost teorie či praktické práce je sice velice vysoká, ale nešlo zde pouze o náklady, nýbrž i o získané znalosti a zkušenosti. Vozidlo je navíc oproti novějším výkonným vozům s turbodmychadly velice zábavné nízkou prodlevou v přechodových režimech.

Za pomoc s velkou částí realizace bych chtěl poděkovat p.Ladislavu Třasákovi ze společnosti FALCON Racing s.r.o.