

Příloha č. 1

Pevnostní výpočty

Pevnostní výpočty navrhovaného CKT byly provedeny podle normy „ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla.“ Vzorce a texty v této příloze jsou převzaty z této normy.

Pro tento výpočet jsem použil následující kapitoly:

- 4.2 Výpočet pevnosti. Všeobecná část pro nádoby z oceli
- 4.5 Výpočet pevnosti. Válcové části nádob
- 4.6 Výpočet pevnosti. Kuželové části nádob
- 4.7 Výpočet pevnosti. Klenutá dna nádob
- 4.12 Výpočet pevnosti. Vyztužování otvorů
- 4.17 Výpočet pevnosti. Duplikátorové pláště
- 4.21 Výpočet pevnosti. Opěrné uzly nádob
- 7.1 tlak pro tlakovou zkoušku

Pro zjištění výpočtových konstant byly použity výpočtové vztahy a diagramy, které jsou k nalezení v této normě.

4.2 Výpočet pevnosti: Všeobecná část pro nádoby z oceli

Označení použitá ve vzorcích

c [mm] – součet přídavek k výpočtové tloušťce stěny

c_1 [mm] – přídavek na kompenzaci koroze a eroze

c_2 [mm] – přídavek na kompenzaci záporných úchylek

c_3 [mm] – technologický přídavek

n_T – součinitel bezpečnosti k mezi kluzu

n_B – součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti

s [mm] – provedená tloušťka stěny

s_R [mm] – výpočtová tloušťka stěny

p [MPa] – výpočtový přetlak

p_{zk} [MPa] – zkušební přetlak

R_e [MPa] – minimální hodnota meze kluzu při výpočtové teplotě

R_m [MPa] – minimální hodnota meze pevnosti při výpočtové teplotě

$R_{p0,2}$ [MPa] – minimální hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě

τ – součinitel bezpečnosti

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání při výpočtové teplotě

$[\sigma]_{20}$ [MPa] – dovolené namáhání pro provoz při teplotě 20 °C

$[\sigma]_{zk}$ [MPa] – dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku

φ – součinitel hodnoty svarového spoje

Výpočtová teplota je rovna 20 °C jelikož teplota během procesu nepřesahuje tuto hodnotu.

Nejvyšší pracovní přetlak je roven 0,35 MPa. Zkušební přetlak jsem stanovil dle vzorce:

$$p_{zk} = \max \left\{ 1,25p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}; 0,2 \text{ Mpa} \right\} = 0,4375 \text{ MPa} \quad (1)$$

Pro tento případ je $[\sigma]_{20}$ a $[\sigma]_{zk}$ totožné proto zkušební přetlak je stanoven na 0,4375 MPa. Tento vztah je použit ze sekce 7.1 v normě ČSN 69 0010.

Součinitel bezpečnosti k mezi kluzu a součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti jsou rovny. $n_T = 1,5$ pro provoz a $n_T = 1,1$ pro tlakovou zkoušku, $n_B = 2,4$. minimální hodnota meze kluzu při výpočtové teplotě $R_e = 210$ MPa a minimální hodnota smluvní meze kluzu při výpočtové teplotě $R_{p0,2} = 550$ MPa.

Dovolené namáhání je spočteno dle vzorců 2 a 3.

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_e \text{ nebo } R_{p0,2}}{n_T}; \frac{R_m}{n_b} \right\} = 140 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$[\sigma]_{ZK} = \tau \cdot \frac{R_e^{20} \text{ nebo } R_{p0,2}}{n_T} = 190 \text{ MPa} \quad (3)$$

Výpočet pevnosti částí tlakových nádob pro podmínky tlakové zkoušky není nutný,

$$p_{ZK} \leq p \cdot \frac{[\sigma]_{ZK}}{[\sigma]} = 0,475 \text{ MPa} \quad (4)$$

Podmínka je splněna, proto nejsou nutné výpočty pro podmínky tlakové zkoušky

Součinitel hodnoty svaru $\varphi=0,7$ bezešvé části tlakových nádob

Přídavek k výpočtové tloušťce stěny je stanoven ze vzorce 5, přídavek c_3 si určí výrobce podle technologie, na výkrese musí být uvedeno minimální tloušťka stěny (např. 5 mm) $c =$

$$c = c_1 + c_2 + c_3 = 0 + 0,8 + (\text{výrobce}) = 0,8 \text{ mm} \quad (5)$$

4.5 Výpočet pevnosti. Válcové části nádob

Označení použita ve vzorcích

c [mm] – součet všech přídavků k výpočtovým tloušťkám stěn skořepin

n_u – součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability v mezích pružnosti

p [MPa] – výpočtový vnitřní nebo vnější přetlak

$[p]$ [MPa] – dovolený vnitřní nebo vnější přetlak

s [mm] – provedená tloušťka stěny skořepiny

s_R [mm] – výpočtová tloušťka stěny skořepiny bez přídavků

B_1 – součinitel určený ze vzorce (14)

D [mm] – vnitřní průměr skořepiny

E [MPa] – modul pružnosti v tahu

K_2 – součinitel

φ_p – součinitel hodnoty podélného svaru

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání válcové skořepiny při výpočtové teplotě

Výpočet je proveden pro Hladkou skořepinu s kuželovým dnem. Rozsah platnosti výpočtových vzorců 6 tento předpoklad je splněn.

$$\frac{s - c}{D} = 0,0042 \leq 0,1 \quad (6)$$

Tloušťka stěny skořepiny zatížená vnitřním přetlakem se vypočte podle vzorců 7 a 8, kde $\varphi_P = 0,7, D = 990 \text{ mm}$

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi_P - p} = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,77 \text{ mm} \quad (7)$$

$$s \geq s_R + c = 2,57 \text{ mm} \quad (8)$$

Dovolený vnitřní přetlak byl stanoven podle vztahu 9 a je roven $[p] = 0,83 \text{ MPa}$.

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_P (s - c)}{D + (s - c)} = 0,83 \text{ MPa} \quad (9)$$

Tloušťka stěny skořepiny zatížená vnějším přetlakem se spočte podle vzorců 8 a 10. kde K_2 je vyčteno z grafu a roven 0,179. Tloušťka stěny je tak stanovena na **5 mm**.

$$s_r = \max \left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 \cdot p \cdot D}{2[\sigma]} \right\} = 1,77 \text{ mm} \quad (10)$$

Dovolený vnější přetlak byl stanoven ze vzorce 11 a má hodnotu 0,98 MPa.

$$[p] = \frac{[p]_P}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_P}{[p]_E}\right)^2}} = 1,18 \text{ Mpa} \quad (11)$$

kde dovolený přetlak v plastickém oboru je

$$[p]_E = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D+(s-c)} = 1,18 \text{ MPa} \quad (12)$$

a dovolený přetlak v elastickém oboru je

$$[p]_P = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u \cdot B_1} \cdot \frac{D}{1} \cdot \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(s-c)}{D}} = 220,3 \text{ MPa} \quad (13)$$

kde $n_u=2,4$, $E=219\,000 \text{ MPa}$ a

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{100(s-c)}{D}} \right\} = 1 \quad (14)$$

Závěr: Navržená tloušťka stěny válcové části posuzované nádoby 5 mm vyhovuje požadavkům ČSN 69 0010.

4.6 Výpočet pevnosti. Kuželové části nádob

Označení použita ve vzorcích

c [mm] – součet všech přídavků k výpočtovým tloušťkám stěn skořepin

p [MPa] – výpočtový vnitřní nebo vnější přetlak

$[p]$ [MPa] – dovolený vnitřní nebo vnější přetlak

s_T [mm] – provedená tloušťka stěny přechodové části skořepiny

s_K [mm] – provedená tloušťka stěny kuželové skořepiny

s_{KR} [mm] – výpočtová tloušťka stěny kuželové skořepiny bez přídavků

D [mm] – vnitřní průměr skořepiny

D_K [mm] – vnitřní průměr hladké kuželové skořepiny

E [MPa] – modul pružnosti v tahu

$\alpha_1 = \alpha_2$ [°] – poloviční vrcholový úhel kuželové skořepiny

φ_p – součinitel hodnoty podélného svaru

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání válcové skořepiny při výpočtové teplotě

V této části byly použity vztahy určené pro Spojení kužele a válcové skořepiny. Vzorce platí pro podmínku platnosti (vzorec 15), která je splněna a má tvar $0,001 \leq \frac{s-c}{D} = 0,0042 \leq 0,05$

$$0,001 \leq \frac{s-c}{D} = 0,0042 \leq 0,05$$

$$0,001 \leq \frac{s-c}{D} = 0,0042 \leq 0,05 \quad (15)$$

Výpočet délky přechodové části se vypočte dle vzorce 16, jehož tvar je

$$a_1 = 0,5 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_2} (s-c)} = 34,65 \text{ mm} \quad (16)$$

Kde α_2 je rovna 30° . Výpočtová délka přechodové části je rovna 34,65 mm.

Průměr hladké kuželové části je 977,9mm a vypočte se dle vztahu

$$D_K = D - 2[r \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) + 0,7a_1 \cdot \sin \alpha_1] = 977,9 \text{ mm} \quad (17)$$

Tloušťka stěny hladké kuželové skořepiny zatížené vnitřním přetlakem se vypočte podle vzorců 18 a 19. Použitá tloušťka stěny je **5 mm**

$$S_{KR} = \frac{p \cdot D_K}{2[\sigma] \cdot \varphi_P - p} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1} = 1,77 \text{ mm} \quad (18)$$

$$S_K \geq S_{KR} + c = 2,57 \text{ mm} \quad (19)$$

Dovolený vnitřní přetlak se stanoví ze vzorce 20 a je roven 0,73 MPa

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_P (S_K - c)}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (S_K - c)} = 0,73 \text{ MPa} \quad (20)$$

Závěr: Navržená tloušťka stěny kuželové části posuzované nádoby 5 mm vyhovuje požadavkům ČSN 69 0010.

4.7 Výpočet pevnosti: Klenutá dna nádob

Označení použita ve vzorcích

c [mm] – součet všech přídavků k výpočtové tloušťce stěn skořepin

n_u – součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability v mezích pružnosti

p [MPa] – výpočtový vnitřní nebo vnější přetlak

$[p]$ [MPa] – dovolený vnitřní nebo vnější přetlak

r [mm] – vnitřní poloměr anuloidového lemu

s_1 [mm] – provedená tloušťka stěny dna

s_{1R} [mm] – výpočtová tloušťka stěny dna

D [mm] – vnitřní průměr dna

D_1 [mm] – vnější průměr dna

$\beta_1 = \beta_2$ [°] – součinitele

φ – součinitel hodnoty podélného svaru

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání při výpočtové teplotě

V této části byly použity vztahy pro torosférické dno typu C, které platí pro

$$0,002 \leq \frac{s - c}{D} = 0,0042 \leq 0,1 \quad (21)$$

Tloušťka stěny se vypočte dle vztahů 22 a 23. Použitá tloušťka stěny je **5 mm**

$$s_{1R} = \frac{p \cdot D_1 \cdot \beta_1}{2[\sigma] \cdot \varphi} = 2,45 \text{ mm} \quad (22)$$

$$s_1 \geq s_{1R} + c = 3,25 \text{ mm} \quad (23)$$

Dovolený vnitřní přetlak z podmínky pevnosti okrajové oblasti

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi(s_1 - c)}{D_1 \cdot \beta_2} = 0,76 \text{ MPa} \quad (24)$$

kde β_1 z grafu nabývá hodnoty 1,09 (pro $p/[\sigma]=0,0025$) a β_2 se pro dno typu C vypočte

$$\beta_2 = \text{Max} \left[0,9; 0,12 \left(\sqrt[3]{\frac{D_1}{(s_1 - c)}} + 3,2 \right) \right] = 1,09 \quad (26)$$

Dovolený vnitřní přetlak je tak roven **0,76 MPa**

Závěr: Navržená tloušťka stěny klenutého víka posuzované nádoby 5 mm vyhovuje požadavkům ČSN 69 0010.

4.12 Výpočet pevnosti. Vyztužování otvorů

Označení použita ve vzorcích

c [mm] – součet všech přídavek k výpočtové tloušťce stěn skořepin

c_s [mm] – součet všech přídavek k výpočtové tloušťce stěn skořepin

n_u – součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability v mezích pružnosti

D – vnitřní průměr válcového lubu nebo dna

D_R – výpočtový vnitřní průměr vyztužovaných částí

d – vnitřní průměr hrdel

d_0 – největší výpočtový průměr otvoru nevyžadujícího vyztužení, ani provedení pevnostní kontroly vyztužení

d_{oR} – pomocný výpočtový průměr

d_R – výpočtový průměr otvoru

L_0 – šířka oblasti vyztužení přilehlé k hrdlu, není-li použito výztužného límce

l – provedená šířka vsazeného vevařeného vyhrdlení

l_{2R} – výpočtová šířka výztužného límce

φ_p – součinitel hodnoty podélného svaru

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání při výpočtové teplotě

l_{3R} – výpočtová délka hrdla

s_1, s_2, s_2 - provedené tloušťky stěn a výztuží

V této části byly kontrolovány dva otvory (ve válcovém lubu $d_R = 505$ mm a v torosférickém dnu $d_R = 267$ mm), pro výpočet musí být splněny následné podmínky

$$\frac{d_R - 2c_S}{D} = 0,49 \leq 1,0 \text{ ve válcových lubech} \quad (27)$$

$$\frac{d_R - 2c_S}{D} = 0,26 \leq 0,6 \text{ v torosférických dnech} \quad (28)$$

a

$$\frac{s - c}{D} = 0,004 \leq 0,1 \text{ ve válcových lubech} \quad (29)$$

$$\frac{s - c}{D} = 0,0047 \leq 0,1 \text{ v torosférických dnech} \quad (30)$$

Vzdálenost okraje hrdla od vnějšího okraje torosférického dna, měřené na průmětu čáry na rovinu základny dna musí být nejméně

$$\max.\{0,10(D + 2s); 0,09 D + s\} = 100 \text{ mm} \quad (31)$$

Malé otvory s průměrem vyhovujícím podmínce

$$d_R = \max\{(s - c); 0,2\sqrt{D_R(s - c)}\} = \mathbf{12,4 \text{ mm}} \text{ pro torosférické dno} \quad (32)$$

$$= \mathbf{9,8 \text{ mm}} \text{ pro válcovou část tanku}$$

mohou být umístěny v okrajové oblasti bez provedení speciálních výpočtů nebo experimentálních ověření.

Výpočtové průměry vyztužovaných částí se určují podle vzorců:

u válcových částí

$$D_R = D = 990 \text{ mm} \quad (33)$$

v případě torosférických dn

$$D_R = 2R = 1600 \text{ mm} \quad (34)$$

Výpočtový průměr otvoru ve stěně skořepiny v případě hrdla s kruhovým průřezem, jehož osa je totožná s normálou k povrchu v místě středu otvoru

$$\begin{aligned} d_R = d + 2c_S &= 268,6 \text{ u torosférického dna} & (35) \\ &= 501,6 \text{ u válcové částí} \end{aligned}$$

Tloušťka stěny se pak určí podle

$$s_R = \frac{p \cdot (d + 2c_S)}{2[\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - p} = \begin{aligned} &= 1 \text{ mm u torosférického dna} & (36) \\ &= 0,62 \text{ u válcové částí} \end{aligned}$$

Výpočtová délka vnější a vnitřní části kruhového hrdla, která se účastní vyztužení a uvažuje se ve výpočtu se určí podle vzorců

$$l_{1R} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2c_S) \cdot (s_1 - c_S)}\} \quad (37)$$

$$l_{3R} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2c_S) \cdot (s_3 - c_S - c_{S1})}\} \quad (38)$$

Poměry dovolených namáhání jsou pro oba otvory rovny jedné.

$$\text{Pro vnější část hrdla } \kappa_1 = \min \left\{ l; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = 1 \quad (39)$$

$$\text{Pro výztužný límec } \kappa_2 = \min \left\{ l; \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]} \right\} = 1 \quad (40)$$

$$\text{Pro vnitřní část hrdla } \kappa_3 = \min \left\{ l; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]} \right\} = 1 \quad (41)$$

Výpočtový průměr osamoceneného otvoru, který nepotřebuje vyztužení ani provedení pevnostní kontroly vyztužení se určí ze vzorce

$$d_0 = 2 \cdot \left(\frac{s-c}{s_R} - 0,8 \right) \sqrt{D_R(s-c)} = 139 \text{ mm u torosférického dna} \quad (42)$$

$$= 161 \text{ mm u válcové částí}$$

Jestliže výpočtový průměr osamoceneného otvoru vyhovuje podmínce

$$d_R \leq d_0 \quad (43)$$

není zapotřebí dále výpočtu vyztužování otvoru. Pro otvor ve válcovém lubu $d_R = 505$ mm a v torosférickém dnu $d_R = 267$ mm je tedy nutné provést kontrolní výpočet dovoleného vnitřního přetlaku. Všechny výpočtové hodnoty pro následující kontrolu jsou uvedeny na konci této kapitoly.

dovolený vnitřní přetlak se spočte ze vzorce 44. výsledné dovolené vnitřní přetlaky jsou uvedeny na konci kapitoly.

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_P(s-c) \cdot K_1}{D_R + (s-c) \cdot \nu} \cdot \nu \quad (44)$$

kde: $K_1 = 1$ – pro válcové a kuželové luby

2 – pro klenutá dna

Součinitel zeslabení se určí ze vzorce 45. Kontrola je prováděna pro dva

$$\nu = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{I_{1R} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \kappa_1 + I_{2R} \cdot \kappa_2 \cdot s_2 + I_{3R} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \kappa_3}{I_R \cdot (s - c)}}{1 + 0,5 \frac{d_R - d_{oR}}{I_R} + \kappa_1 \cdot \frac{(d + 2c_s) \cdot \varphi \cdot l_1}{D_R \cdot \varphi_1 \cdot l_{1R}}} \right\} = 1 \quad (45)$$

	Otvor Ø 504 mm	Otvor Ø 267 mm
s [mm]	5	5
s_1 [mm]	2	6.3
$s_2 = s_3$ [mm]	6	5
d [mm]	500	254.4
D_R [mm]	990	1600
$l_1 = l_{1R}$ [mm]	75	15
$l_2 = l_{2R}$ [mm]	22,5	40
l_3 [mm]	75	5
l_{3R} [mm]	47	5
$l_0 = l_R$ [mm]	64,5	82
c, c_s [mm]	0,8	0.8
$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$	1	1
d_{oR} [mm]	25,8	32.8
d_r [mm]	501,6	268.6
φ	0,7	0.7
ν	0.526	0.757
$[p]$ [MPa]	0.436	0.78

Dovolený vnitřní přetlak pro otvor ve válcové nádobě (Ø 504 mm) je **$[p] = 0,436$ MPa** a pro otvor v torosférickém dnu (Ø 267 mm) je **$[p] = 0,78$ MPa**. Oba otvory po vyztužení vyhovují požadovanému pracovnímu přetlaku $p = 0,35$ MPa.

4.17 Výpočet pevnosti. Duplikátorové pláště

Označení použita ve vzorcích

c [mm] – součet všech přídavek k výpočtové tloušťce stěn skořepin

a [mm] – rozměr svarového spoje

b_2 [mm] – šířka kanálu

p_2 [MPa] – výpočtový přetlak v nádobě při provozu v duplikátorovém plášti nebo kanálu

$[p_2]$ [MPa] – dovolený vnitřní přetlak v duplikátorovém plášti nebo kanálu

r_2 [mm] – vnější poloměr kanálu

r_3 [mm] – střední poloměr kanálu

s_1 [mm] – provedená tloušťka stěny válcové skořepiny nádoby

s_2 [mm] provedená tloušťka stěny kanálu

s_{2R} [mm] výpočtová tloušťka stěny kanálu

$[\sigma]_1$ [MPa] – dovolené namáhání materiálu stěny nádoby při výpočtové teplotě

$[\sigma]_2$ [MPa] – dovolené namáhání materiálu stěny kanálu při výpočtové teplotě

Použity byly výpočtové vztahy pro nádoby s kanály. Výpočtové vzorce platí pro:

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{4}{5} \leq 1 \quad (46)$$

Šířka kanálu $b_2 \leq 0,1D_1$ ($50 \leq 99$)

Výška kanálu $h_2 \geq s_2$ ($48 \geq 4$)

a poloviční středový úhel $20^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$

Možnost použití koutových svarů z důvodu použití polokruhového profilu kanálu. Pás skořepiny pod kanálem v obvodovém směru válce se vypočte podle následujícího vztahu.

$$p_2 \leq [p_2] = \frac{4 \cdot [\sigma]_1 \cdot (s_1 - c)^2}{b_2^2 + 4 \cdot r_3 \cdot (s_1 - c) \cdot \cos \gamma} \left(1 + \frac{b_2^2}{2 \cdot D_1 \cdot (s_1 - c)} \right) = 3,89 \text{ MPa} \quad (47)$$

kde $[\sigma]_1 = [\sigma]_2 = 140 \text{ MPa}$.

Dovolený přetlak v kanále se pak stanoví podle vztahu 49, kde $\varphi_3 = 0,153$ a $r_2 = 23,75$

$$[p_2] = \frac{[\sigma]_2 \cdot (s_2 - c)}{r_2} \cdot \varphi_3 = 1,53 \text{ MPa} \quad (48)$$

a tloušťka stěny podle vzorců 49 až 50, kde $\varphi_4 = 0,4$ a $p_2 = 0,6$ MPa.

$$s_{2R} = \frac{2 \cdot r_2 \cdot p_2}{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_4 + p_2} = 0,25 \text{ mm} \quad (49)$$

$$s_2 \geq s_{2R} + c = 1,2 \text{ mm} \quad (50)$$

$$a \geq 0,6 \cdot s_{2R} = 0,7 \text{ mm pro koutové sváry} \quad (51)$$

Závěr: Provedená tloušťka stěny chladicího kanálu je **2,5 mm** a vypočtený dovolený vnitřní přetlak je **1,53 MPa, což vyhovuje.**

4.21 Výpočet pevnosti. Opěrné uzly nádob

Označení použita ve vzorcích

s [mm] – tloušťka stěny skořepiny

s_1 [mm] – tloušťka stěny kužele

s_2 [mm] – tloušťka podložné desky

b_2 [mm] – šířka podložné desky

n_T – součinitel bezpečnosti k mezi kluzu

p [MPa] – výpočtový přetlak při provozu

d_1 [mm] – průměr základové roztečné kružnice opěrných noh

d_2 [mm] – vnější průměr opěrné nohy

d_3 [mm] – průměr podložné desky

d_4 [mm] – průměr roztečné kružnice opěrných noh na nádobě

d_e [mm] – efektivní průměr opěrné nohy

r_m [mm] – střední průměr křivosti dna v místě nohy

α [°] – úhel sklonu tečny meridiánu v místě nohy

β [°] – úhel mezi osou nohy a svislicí

D [mm] – vnitřní průměr válcové skořepiny

D_K [mm] – vnitřní průměr kuželové skořepiny v řezu, který odpovídá polovině výšky opěrného uzlu

F_1 [N] – síla působící na i -tou oporu při provozu nebo tlakové zkoušce

$[F]_1$ [N] – dovolená síla na opěrný prvek při provozu nebo tlakové zkoušce

G [N] – tíže nádoby při provozu nebo tlakové zkoušce

$[\sigma]$ [MPa] – dovolené namáhání při výpočtové teplotě

Výpočtový průměr pro válcovou skořepinu se spočte $D_R = D$

$$D_R = D = 990 \text{ mm} \quad (53)$$

Mezní ohybové namáhání se vypočte podle vztahu

$$[\sigma_i] = K_1 [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2} = 338,8 \text{ MPa} \quad (54)$$

kde $K_1 = 1,21$ a $K_2 = 1,2$

Základní obvodové membránové napětí ve válcové a kuželové části skořepiny se určí ze vzorce

$$\bar{\sigma}_m = \frac{p \cdot D_R}{2 \cdot (s - c)} + \frac{F}{\pi \cdot D_R (s - c)} = 44,7 \text{ MPa} \quad (55)$$

Výpočtové vzorce platí při splnění podmínky

$$\frac{s-c}{D_R} = 0,0042 \leq 0,05 \quad (56)$$

Svislá síla se při použití 4 nohou spočte podle vzorce 57. kde $M = 0$ Nm. Tíže plně nádoby při provozu je přibližně $G = 45\,000$ N.

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{d_4} = 11\,250 \text{ N} \quad (57)$$

Pro potvrzení únosnosti nohou, jsem použil vztahy pro opěrné patky. Dovolená síla na jednu podporu se určí podle vzorce $F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i] \cdot h_1 (s-c)}{K_7 \cdot e_1} \cdot \left(0,5 + \frac{g}{h_1}\right)$

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i] \cdot h_1 (s-c)}{K_7 \cdot e_1} \cdot \left(0,5 + \frac{g}{h_1}\right) = 14934 \text{ N} \quad (58)$$

kde $g = 60$ mm, $h_1 = 150$ mm $K_7 = 0,81$. Dovolená síla na jednu podporu je tak rovna 14934 N což vyhovuje podmínce únosnosti ze vzorce 58.

Shrnutí

Všechny výpočtové vztahy byly převzaty z normy „ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla.“.

Z provedených pevnostních výpočtu byly stanoveny všechny tloušťky stěn skořepin, přírub a chladicího pláště. Z výpočtů také vzešel maximální dovolený vnitřní přetlak **$[p]=0,436$ MPa**, který udává maximální dovolený vnitřní přetlak pro otvor ve válcové nádobě (průlez - \emptyset 504 mm) a maximální dovolený vnitřní přetlak v duplikátorovém plášti **$[p] = 1,53$ MPa**.

Navržený cylindro-kónický tank vyhovuje požadavkům ČSN 69 0010.