1. Méretezés összefüggései

A szilárdságilag szükséges falvastagságot úgy kapjuk meg, hogy 3 különböző geometriai pozícióban meghatározzuk a szükséges falvastagságokat, és ezek közül az edényfeneket jellemző falvastagság a legnagyobb értékű lesz. Ezek az összefüggések a hengeres rész, tóruszív és a gömbsüveg részek csatlakozási részeire vonatkoznak, mivel hiába teljesülnek a másodrendű érintkezés feltételei, így is ébrednek járulékos feszültségek, különösképpen a tóruszív környezetében, ahol a mindkét csatlakozási oldalról csillapodó feszültségek egymásra szuperponálódnak, így még nagyobb feszültségek ébrednek.
A gömbsüvegrészre vonatkozó összefüggés:

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot z - 0,5 \cdot P} \tag{1}$$

A gömbsüveg-tóruszrész csatlakozásánál, a horpadás elkerülésére vonatkozó összefüggés:

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5}\right)} \tag{2}$$

Az összefüggésben található f_b érték nem-ausztenites acél esetén $f_b = \frac{R_{p0,2/T}}{1,5}$, míg ausztenites acél esetén $f_b = \frac{1,6 \cdot R_{p0,2/T}}{1,5}$ a tervezési állapotra. Tesztállapotban az összefüggésekben található 1,5-es értéket 1,05-re kell cserélni. A tóruszra vonatkozó összefüggés:

$$e_y = \frac{\beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)}{f_d} \tag{3}$$

Az összefüggésben található β tényező a feszültségtorlódási tényező. Az iteráció lépései a következők:

1. Feltételezünk egy kezdeti e_y falvastagságot. Számítógéppel segített tervezés esetén ez az érték bármekkora lehet, de célszerű ekkor is 2-10mm falvastagságot feltételezni (összhangban az előzőleg kiszámított két falvastagsággal).

2. Kiszámítjuk a következő tényezőket:

$$Y = \min\left(\frac{e}{R}; 0,04\right) \tag{4}$$

$$Z = \log_{10}\left(\frac{1}{Y}\right) \tag{5}$$

$$X = \frac{r}{D_i} \tag{6}$$

$$N = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4} \tag{7}$$

3. Az X függvényében számítható a β tényező értékei:

   - $X = 0,06$ esetén
     $\beta_{0,06} = \mathrm{N} \cdot (-0,3635 \cdot Z^3 + 2,2124 \cdot Z^2 - 3,2937 \cdot Z + 1,8873)$

   - $0,06 < X < 0,1$ esetén
     $\beta = 25 \cdot [(0,1 - X) \cdot \beta_{0,06} + (X - 0,06) \cdot \beta_{0,1}]$

   - $X = 0,1$ esetén
     $\beta_{0,1} = \mathrm{N} \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837)$

- $0,1 < X < 0,2$ esetén
  $\beta = 10 \cdot [(0,2 - X) \cdot \beta_{0,1} + (X - 0,1) \cdot \beta_{0,2}]$

- $X = 0,2$ esetén
  $\beta_{0,2} = \max\left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot Y - 82,5 \cdot Y^2); 0,5\right]$

4. Ezekből a minimális falvastagság

$$e = \max(e_y; e_b; e_s) \tag{8}$$

2. Példa kosárgörbe számítására

Határozzuk meg a következő kosárgörbe zárófedél szilárdságilag szükséges falvastagságát:

Hengeres héj belső átmérője	D_e	1600mm
Hengeres héj analízis falvastagsága	e_a	4,7mm
Belső túlnyomás	p	1MPa
Szakálrész hossza	L_{cyl}	50mm
Gömbsüveg sugara	R	1280mm
Tóruszív sugara	r	245mm
Megengedett feszültség (tervezés)	f_d	183,2MPa
Megengedett feszültség (tesztelés)	f_{test}	280,95MPa
Varratszilárdsági tényező	z	0,85
Üzemi hőmérsékleten folyáshatár	$R_{p0,2/80°\mathrm{C}}$	274,8MPa
Teszthőmérsékleten folyáshatár	$R_{p0,2/20°\mathrm{C}}$	295MPa
Korróziós pótlék	c	1mm

Megoldás:

$$e_s = \frac{P \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot z - 0,5 \cdot P} = \frac{1\text{MPa} \cdot 1280\text{mm}}{2 \cdot 183,2\text{MPa} \cdot 0,85 - 0,5 \cdot 1\text{MPa}} = 4,1165\text{mm}$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/T}}{1,5} = \frac{R_{274,8\text{MPa}}}{1,5} = 183,2\text{MPa}$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{P}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r}\right)^{0,825}\right]^{\left(\frac{1}{1,5}\right)} =$$

$$(0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm}) \cdot \left[\frac{1\text{MPa}}{111 \cdot 183,2\text{MPa}} \cdot \left(\frac{1590,6\text{mm}}{245\text{mm}}\right)^{0,825}\right]^{\left(\frac{1}{1,5}\right)} = 4,799\text{mm}$$

Az e_y első iterációs lépése végigszámítva:

$$Y = \min\left(\frac{e}{R}; 0,04\right) = \min\left(\frac{4\text{mm}}{1280\text{mm}}; 0,04\right) = 0,003125$$

$$Z = \log_{10}\left(\frac{1}{Y}\right) = \log_{10}\left(\frac{1}{0,003125}\right) = 2,50515$$

$$X = \frac{r}{D_i} = \frac{245\text{mm}}{1590,6\text{mm}} = 0,15403$$

$$\text{N} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,003125)^4} = 0,844872$$

$$\beta_{0,1} = 0,844872 \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) = 1,038284$$

$$\beta_{0,2} = \max\left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,003125 - 82,5 \cdot 0,003125^2); 0,5\right] = 0,525475$$

$$\beta = 10 \cdot [(0,2 - 0,15403) \cdot 1,038284 + (0,15403 - 0,1) \cdot 0,525475] = 0,761214$$

Ebből a falvastagság:

$$e_y = \frac{\beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i)}{f_d} = \frac{0,761214 \cdot (0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm})}{183,2\text{MPa}} = 5,3107\text{mm}$$

Látható, hogy a feltételezett és a számított falvastagság nem egyezik meg, ezért újabb iterációs lépést kell számolnunk. Legcélravezetőbb, ha az újonnan kapott értéket tekintjük feltételezettnek, egészen addig, amíg a feltételünk nem teljesül. Az iterációs lépéseket az alábbi táblázat mutatja be:

	e	Y	Z	β	e_y
1.	4 mm	0,003125	2,50515	0,761214	5,310713 mm
2.	5.310713 mm	0,004149	2,382057	0,736358	5,1373 mm
3.	5,1373 mm	0,004014	2,396475	0,739464	5,158971 mm
4.	5,158971 mm	0,00403	2,394647	0,739073	5,156242 mm
5.	5,156242 mm	0,004028	2,394877	0,739122	5,156585 mm
6.	5,156585 mm	0,004029	2,394848	0,739116	5,156542 mm
7.	5,156542 mm	0,004029	2,394851	0,739116	5,156547 mm
8.	5,156547 mm	0,004029	2,394851	0,739116	5,156547 mm

Mivel az értékek már csak milliomod milliméteres nagyságrendben változnak, így kijelenthetjük, hogy a tóruszív szükséges falvastagsága $e_y = 5,1565\text{mm}$.A kosárgörbe edényfenék szükséges falvastagsága így: $e = \max(e_y; e_s; e_b) = 5,1565\text{mm}$. Most már számítható, hogy milyen névleges falvastagságú lemezből kell legyártanunk az edényfeneket. Ehhez első lépésként a minimális falvastagsághoz hozzá kell adnunk a pótlékokat. Mivel ezt az elemet is lemezanyagból állítjuk elő, így a negatív tűrésünk lehet 0,3mm.

$$e_{min} = e + c + t_h = 5,3107\text{mm} + 1\text{mm} + 0,3\text{mm} \approx 6,46\text{mm}$$

Ehhez a mérethez legközelebb eső névleges falvastagság az $e_n = 8\text{mm}$, ebből pedig az analízis falvastagság:

$$e_a = e_n - c - t_h = 8\text{mm} - 1\text{mm} - 0,3\text{mm} = 6,7\text{mm}$$

Ellenőrizhetjük, hogy üzemi körülmények között mekkora az a maximális nyomásterhelés, amit az edényfenék kibír. Ehhez szintén ki kell számolni mindhárom összetevőre a nyomásokat, majd ezek közül a legkisebbet kell vennünk:

$$P_s = \frac{2 \cdot f_d \cdot z \cdot e_a}{R + 0,5 \cdot e_a} = \frac{2 \cdot 183,2\text{MPa} \cdot 0,85 \cdot 6,7\text{mm}}{1280\text{mm} + 0,5 \cdot 6,7\text{mm}} = 16,26\text{bar}$$

$$P_y = \frac{f_d \cdot e_a}{\beta \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i}$$

A β-tényezőt ebben az esetben nem kell iterálnunk, mivel a falvastagság ismert.

$$Y = \min\left(\frac{e}{R}; 0,04\right) = \min\left(\frac{6,7\text{mm}}{1280\text{mm}}; 0,04\right) = 0,005234$$

$$Z = \log_{10}\left(\frac{1}{Y}\right) = \log_{10}\left(\frac{1}{0,005234}\right) = 2,281135$$

$$X = \frac{r}{D_i} = \frac{245\text{mm}}{1590,6\text{mm}} = 0,15403$$

$$\text{N} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,005234)^4} = 0,845981$$

$$\beta_{0,1} = 0,844872 \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) = 0,940408$$

$$\beta_{0,2} = \max\left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,003125 - 82,5 \cdot 0,003125^2); 0,5\right] = 0,520206$$

$$\beta = 10 \cdot [(0,2 - 0,15403) \cdot 1,038284 + (0,15403 - 0,1) \cdot 0,525475] = 0,713373$$

$$P_y = \frac{183,2\text{MPa} \cdot 6,7\text{mm}}{\beta \cdot (0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm}} = 13,46\text{bar}$$

$$P_b = 111 \cdot f_b \cdot \left[\frac{e_a}{0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i}\right]^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i}\right)^{0,825}$$

Mivel most is tervezési állapotról beszélünk, az f_b értéke nem változik:

$$P_b = 111 \cdot 183,2\text{MPa} \cdot \left[\frac{6,7\text{mm}}{0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm}}\right]^{1,5} \cdot \left(\frac{245\text{mm}}{1590,6\text{mm}}\right)^{0,825} = 16,49\text{bar}$$

Ezek alapján a korrodált, üzemi állapotban az a nyomás, amit a szerkezet képlékeny alakváltozás nélkül kibír:

$$P_{op,max} = \min(P_s; P_y; P_b) = 13,46\text{bar}$$

A következő lépésben meg kell arról bizonyosodnunk, hogy tesztállapotban nagyobb nyomás elviselésére képes az edényfenekünk, mint maga a próbanyomás. Mivel a próbanyomást új berendezés esetén végezzük el, így a falvastagságoknál nem kell levonnunk a korróziós ráhagyást, valamint az f_b értéknél kell vigyáznunk, hogy kiszámítási módja változik. Ezek alapján:

$$P_{s,test} = \frac{2 \cdot f_{test} \cdot z \cdot e_{a,test}}{R + 0,5 \cdot e_{a,test}} = \frac{2 \cdot 280,9\text{MPa} \cdot 0,85 \cdot 7,7\text{mm}}{1280\text{mm} + 0,5 \cdot 7,7\text{mm}} = 28,64\text{bar}$$

A β-tényezőt ebben az esetben sem kell iterálnunk, mivel a falvastagság most is ismert.

$$Y = \min\left(\frac{e_{a,test}}{R}; 0,04\right) = \min\left(\frac{7,7\text{mm}}{1280\text{mm}}; 0,04\right) = 0,006016$$

$$Z = \log_{10}\left(\frac{1}{Y}\right) = \log_{10}\left(\frac{1}{0,006016}\right) = 2,220719$$

$$X = \frac{r}{D_i} = \frac{245\text{mm}}{1590,6\text{mm}} = 0,15403$$

$$\text{N} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4} = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,006016)^4} = 0,846914$$

$$\beta_{0,1} = 0,844872 \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837) = 0,911071$$

$$\beta_{0,2} = \max\left[0,95 \cdot (0,56 - 1,94 \cdot 0,003125 - 82,5 \cdot 0,003125^2); 0,5\right] = 0,518077$$

$$\beta = 10 \cdot [(0,2 - 0,15403) \cdot 1,038284 + (0,15403 - 0,1) \cdot 0,525475] = 0,698736$$

$$P_{y,test} = \frac{280,9\text{MPa} \cdot 7,7\text{mm}}{0,698736 \cdot (0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm}} = 24,22\text{bar}$$

$$f_b = \frac{R_{p0,2/20°C}}{1,5} = \frac{295\text{MPa}}{1,05} = 280,95\text{MPa}$$

$$P_{b,test} = 111 \cdot 280,95\text{MPa} \cdot \left[\frac{7,7\text{mm}}{0,75 \cdot 1280\text{mm} + 0,2 \cdot 1590,6\text{mm}}\right]^{1,5} \cdot \left(\frac{r}{D_i}\right)^{0,825} = 31,16\text{bar}$$

Ismételten a legkisebb értéket kell keresnünk:

$P_{test,max} = \min(P_{s,test}; P_{y,test}; P_{b,test}) = 24,22\text{bar}$

Ezek után már csak a szükséges hidrosztatikai próbanyomás értékét kell tudnunk, ami jelen esetben az üzemi nyomás 143%-a:

$P_{test} = 1,43 \cdot P = 1,43 \cdot 10\text{bar} = 14,3\text{bar}$

Mivel a szükséges próbanyomás értéke kisebb, mint a leggyengébb elem teherviselő képessége, ezért az edényfenék ilyen anyagból, ekkora falvastagsággal megépíthető.