

Vegyipari készülékek tervezése I.



GEVGT012-B



Előadó:

Dr. Siménfalvi Zoltán egyetemi docens

Gyakorlatvezető:

Petrik Máté doktorandusz

Követelmények:

Aláírás, feltétele :

- évközi feladatok teljesítése,
- 1db zh teljesítése



Ajánlott irodalom

1. Keresztes János: Tartályok és készülékek I., II., III., Tankönyvkiadó, Bp.
2. Fábry György: Vegyipari Gépészek Kézikönyve, Műszaki könyvkiadó, Bp. 1987
3. Bodor-Szabó: Nyomástartó berendezések szilárdsági méretezése, Műszaki könyvkiadó, Bp. 1982
4. Szabó József: Fémtartályok, Műszaki könyvkiadó, Bp. 1978
5. Varga László: Nyomástartó edények tervezése, Tankönyvkiadó, Bp. 1984
6. 44/2016 (XI.28.) NGM rendelet a nyomástartó berendezések és rendszerek biztonsági követelményeiről és megfelelőség tanúsításáról
7. 2/2016. (I. 5.) NGM rendelet a nyomástartó berendezések, a töltő berendezések, a kisteljesítményű sűrített gáztöltő berendezések műszaki-biztonsági hatósági felügyeletéről és az autógáz tartályok időszakos ellenőrzéséről
8. MSZ EN 13445-1, 2, 3, 4, 5, 6, 8:2014 Unfired Pressure Vessels
 - 1.rész: Általános követelmények
 - 2.rész: Szerkezeti anyagok
 - **3.rész: Tervezés**
 - 4.rész: Gyártás
 - 5.rész: Vizsgálatok
 - 6.rész: Gömbgrafitos öntöttvasból kialakított nyomástartó edények és a nyomással terhelt részek tervezési és gyártási követelményei
 - 8. rész: Alumíniumból és alumíniumötvözetből készült nyomástartó edények kiegészítő követelményei
 - 10. rész: Nikkel és nikkelötvözetű nyomástartó edények kiegészítő követelményei



Alapfogalmak I.

- Fogalmakat a 44/2016 NGM rendelet tárgyalja
- Nyomástartó berendezés: edény, csővezeték, biztonsági szerelvény és a nyomással igénybevett tartozékok
 - ✓ Edény: nyomással igénybe vett töltet befogadására tervezett és gyártott egység első csatlakozásáig a hozzá tartozó szerkezeti elemekkel
 - ✓ Csővezeték: a töltet szállítására szolgál, csőszakasz és szerelvényei
 - ✓ Biztonsági szerelvény: jellemző nyomás túllépése ellen szolgál, közvetlen működésű ill. határoló készülék
 - ✓ Tartozék: nyomástartó házzal rendelkező üzemeltetési feladattal rendelkező szerelvény
- Egyszerű nyomástartó edény: a 43. § (2) bekezdésében meghatározott ismérveknek megfelelő, levegő vagy nitrogén befogadására szolgáló hegesztett edény
 - ✓ $PS (P_{meg}) > 0.5 \text{ bar}$, nincs kitéve tűz hatásának
 - ✓ Ötvözetlen acélból, alumíniumból, vagy öregedésálló alumíniumötvözetből készül
 - ✓ Domború és/vagy síkfedelekkel lezárt körhenger
 - ✓ $PS \times V < 10\,000 \text{ bar} \times \text{liter}$; $Pop. < 30 \text{ bar}$
 - ✓ $Top. > -50^\circ\text{C}$; $Top. < 300^\circ\text{C}$ acél; $Top. < 100^\circ\text{C}$ alumínium és ötvözetei
 - ✓ $PS \times V < 50$: helyes mérnöki gyakorlat; $PS \times V > 50$ PED B modul



Alapfogalmak II.

Közegek

- A töltet az 1. csoportba tartozik és veszélyes töltetnek minősül, amennyiben
 - a) az anyagok és keverékek alábbi fizikai és egészségi veszélyességi osztályokba soroltak:
 - 1. instabil robbanóanyagok vagy az 1.1., 1.2., 1.3., 1.4. és 1.5. alosztályba tartozó robbanóanyagok;
 - 2. tűzveszélyes gázok, 1. és 2. kategória;
 - 3. oxidáló gázok, 1. kategória;
 - 4. tűzveszélyes folyadékok, 1. és 2. kategória;
 - 5. azok a 3. kategóriába tartozó tűzveszélyes folyadékok, amelyek legnagyobb megengedett hőmérséklete a lobbanáspont fölött van;
 - 6. tűzveszélyes szilárd anyagok, 1. és 2. kategória;
 - 7. önreaktív anyagok vagy keverékek, A-F típus;
 - 8. piroforos folyadékok, 1. kategória;
 - 9. piroforos szilárd anyagok, 1. kategória;
 - 10. vízzel érintkezve tűzveszélyes gázokat kibocsátó anyagok és keverékek, 1., 2. és 3. kategória;
 - 11. oxidáló folyadékok, 1., 2. és 3. kategória;
 - 12. oxidáló szilárd anyagok, 1., 2. és 3. kategória;
 - 13. szerves peroxidok, A-F típus;
 - 14. akut orális toxicitás, 1. és 2. kategória;
 - 15. akut dermális toxicitás, 1. és 2. kategória;
 - 16. akut inhalációs toxicitás, 1., 2. és 3. kategória;
 - 17. célszervi toxicitás - egyszeri expozíció, 1. kategória, vagy
 - b) a nyomástartó berendezésekben található olyan anyag vagy keverék, amelynek legnagyobb megengedett hőmérséklete a töltet lobbanáspontja fölött van.



Alapfogalmak III.

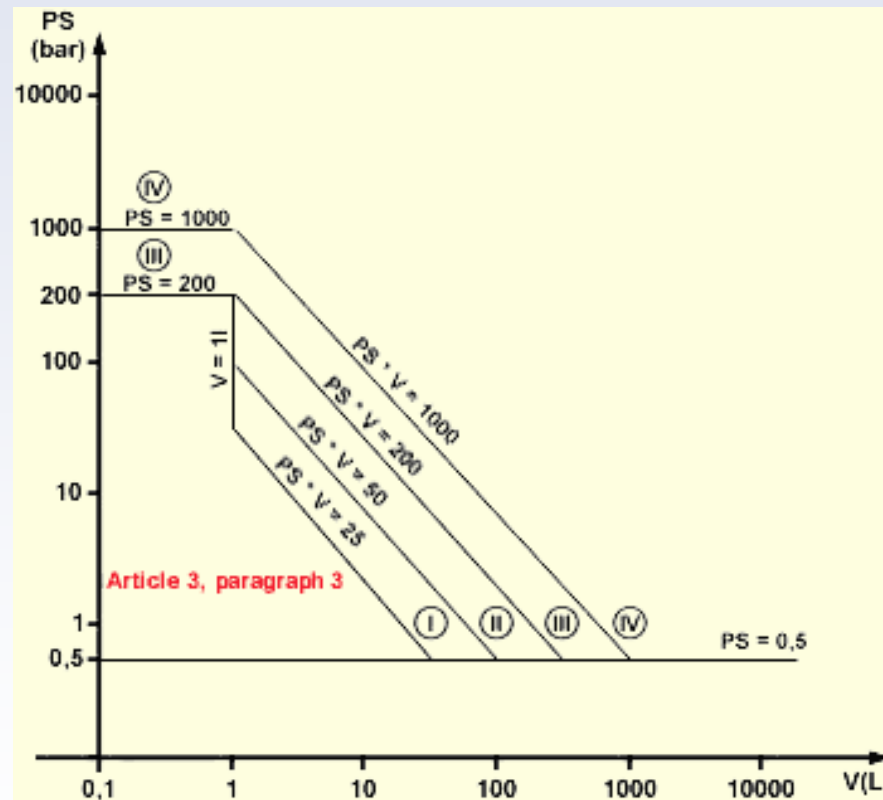
Kategória	Modul
I.	A modul
II.	A2, D1, E1 modulok
III.	B (tervezési típus) + D, B (tervezési típus) + F, B (gyártási típus) + E, B (gyártási típus) + C2, H modulok
IV.	B (gyártási típus) + D, B (gyártási típus) + F, G, H1 modulok

	Nyomástartó edények				Kazánok	Csővezetékek			
folyadék halm.áll.	gáz		folyékony			gáz		folyékony	
Folyadék csoport	v e s z é l y e s	e g y é b	v e s z é l y e s	e g y é b		v e s z é l y e s	e g y é b	v e s z é l y e s	e g y é b
Diagram melléklet II	1	2	3	4	5	6	7	8	9



Alapfogalmak IV.

- Nyomástartó edények műszaki biztonsági követelményei szerint besorolás és megfelelőség értékelési modul rendszer: (pl. töltet gáz, nyomás alatt oldott gáz, gőz és olyan folyadék, amelynek gőznyomása a megengedhető legnagyobb hőmérsékleten nagyobb, mint 0,5 bar túlnyomás, 1. csoportú anyag)



- Kazánok: nyomástartó edény+tüzelés és hőszugárzás hatásának kitéve



Alapfogalmak V.

- Nukleáris berendezések: nyomástartó, radioaktiv terhelés, földrengés, feszültséganalízis, fáradási élettartam, külön biztonsági szabályzat, osztályba sorolás (ABOS 1, 2, 3, 4)
- Veszélyes töltetű folyadéktárolók: Pop.=20-50 mbar; nagy úrtartalom, veszélyes töltet
- Közös jellemzők:
 - ✓ Alapterhelés belső és/vagy külső nyomás
 - ✓ Méretezési eljárások azonosak (MSZ EN 13445)
 - ✓ Tervezés, gyártás, üzemeltetés engedélyhez kötött
 - ✓ Időszakos vizsgálat kötelező
 - ✓ Nyomáshatárolás
- Fogalmak:

✓ Nyomás (túlnyomás)	✓ V térfogat, nyomással igénybe vett rész
✓ PS max. megengedett nyomás, tervezési nyomás	✓ DN névleges méret
✓ TS max. megengedett hőmérséklet	



Méretezési alapadatok I.

- Alapterhelés a nyomás:
 - ✓ Belső nyomás: homorú felületre hat; növekvő P , növekvő w ; a geometriai jelleget nem változtatja meg; határérték a folyáshatár (R_{eH}), a törés (R_m); (nyomáshatárolóval vagy anélkül)
 - ✓ Külső nyomás: domború felületre hat; növekvő P , a görbületi sugár csökken; először arányos, majd P_{kr} elérése után horpadás, stabilitás vesztes;
- Statikus nyomás: ha $dP/dt \leq 0.5 \text{ bar/s}$
- Üzemi nyomás: P_{op} , technológiai paraméter, egy üzemi ciklusban a legnagyobb normális technológiai nyomás. Gáztéri nyomás
- Méretezési nyomás: P_S , alapterhelés a szilárdsági méretezéshez, $P_S \geq P_{op}$
- Hidrosztatikus nyomás: $P_h = \rho gh$; $P' = P + P_h$
- Üzemi hőmérséklet: T_{op} a technológiai töltet hőmérséklete, amelyen a folyamat lejátszódik
- Méretezési hőmérséklet: T_D , a legnagyobb pozitív hőmérséklet a megengedett feszültség meghatározásához (hőtechnikai számítások, vagy mérési eredmények alapján).
 $T_D, \min = 20^\circ\text{C}$



Méretezési alapadatok II.

Requirements	Testing group ^a						
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4 ^{b,j}
Permitted materials ^g	1 to 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 9.3, 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 10	1.1, 1.2, 8.1	1.1, 8.1
Extent of NDT for governing welded joints ^{e,h}	100 %	100 %	100 % - 10% ^d	100 % - 10 % ^d	25 %	10 %	0 %
NDT of other welds	Defined for each type of weld in Table 6.6.2-1						
Joint coefficient	1	1	1	1	0,85	0,85	0,7
Maximum thickness for which specific materials are permitted	Unlimited ^f	Unlimited ^f	30 mm for groups 9.1, 9.2 16 mm for groups 9.3, 8.2, 10	50 mm for groups 1.1, 8.1 30 mm for group 1.2	30 mm for groups 9.2, 9.1 16 mm for groups 8.2, 10	50 mm for groups 1.1, 8.1 30 mm for group 1.2	12 mm for groups 1.1, 8.1
Welding process	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Fully mechanical welding only ^c		Unlimited ^f	Unlimited ^f	Unlimited ^f
Service temperature range	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Unlimited ^f	Limited to (-10 to +200) °C for group 1.1 (-50 to +300) °C for group 8.1

^a All testing groups shall require 100 % visual inspection to the maximum extent possible

^b Testing group 4 shall be applicable only for:

- Group 2 fluids; and
- $P_S \leq 20$ bar; and
- $P_S V \leq 20\,000$ bar·L above 100 °C; or
- $P_S V \leq 50\,000$ bar·L if temperature is equal or less than 100 °C;
- higher pressure test (See clause 10);
- maximum number of full pressure cycle less than 500;



Méretezési alapadatok III.

- Próbyomás:
 - ✓ közeg víz (5-40°C),
 - ✓ levegő esetén P_t 50%-ig terhelni, majd bunkerben 10%-onként növelni, végül $P_t = P_s \cdot f_a / f_t$ vizsgálati állapotra csökkenteni

- Próbyomás értéke:

✓ Testing group 1-2-3: $\max \left(P_t = 1,25 \cdot P_s \cdot \frac{f_a}{f_t}, P_t = 1,43 \cdot P_s \right)$

- ✓ Testing group 4:

1.1. anyagcsoport (acél $R_{eH} < 275$ MPa)

$$c < 1\text{mm} \quad P_t = 2,2 \cdot P_s \cdot \frac{f_a}{f_t} \cdot \frac{e_{\min}}{e_{\min} - c}$$

$$c \geq 1\text{mm} \quad P_t = 2,0 \cdot P_s \cdot \frac{f_a}{f_t} \cdot \frac{e_{\min}}{e_{\min} - c}$$

8.1. anyagcsoport (ausztenites acél $Cr < 19$ %)

$$P_t = 1,85 \cdot P_s \cdot \frac{f_a}{f_t}$$



Méretezési alapadatok IV.

- Geometriai adatok: fő méretek: R, D, L (szabványos átmérő)
- Esetleges külső terhek:
 - ✓ önsúly
 - ✓ töltetsúly, üzemi állapotban
 - ✓ víz töltetsúly próbanyomáskor
 - ✓ csatlakozó elemek okozta teher (pl. csővezeték)
 - ✓ meteorológiai teher (hóteher és szélterhelés)
 - ✓ szeizmikus terhelés (gépek, földrengés)
 - ✓ dinamikus igénybevétel (nyomás, külső gerjesztés)
 - ✓ hőfeszültségek
 - ✓ szállítási és telepítési terhelések
- Hegesztett kötések szilárdsági tényezője (z, varratszilárdsági tényező):
 - ✓ 1: teljes varratban roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálattal igazolt
 - ✓ 0,85: roncsolásmentes vizsgálattal, szűrőpróbaszerűen
 - ✓ 0,7: szemrevételezés



Méretezési alapadatok V.

- Megengedett feszültségek

Steel designation	Normal operating load cases ^{a b}	Testing and exceptional load cases ^{b c}
Steels other than austenitic, as per 6.2 $A < 30 \% ^d$	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0,2/T}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0,2/T_{test}}}{1,05} \right)$
Steels other than austenitic, as per 6.3: Alternative route $A < 30 \% ^d$	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0,2/T}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{1,875} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0,2/T_{test}}}{1,05} \right)$
Austenitic steels as per 6.4 $30 \% \leq A < 35 \% ^d$	$f_d = \left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p1,0/T_{test}}}{1,05} \right)$
Austenitic steels as per 6.5 $A \geq 35 \% ^d$	$f_d = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right]$	$f_{test} = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/T_{test}}}{1,05} \right); \left(\frac{R_{m/T_{test}}}{2} \right) \right]$
Cast steels as per 6.6	$f_d = \min \left(\frac{R_{p0,2/T}}{1,9}; \frac{R_{m/20}}{3} \right)$	$f_{test} = \left(\frac{R_{p0,2/T_{test}}}{1,33} \right)$
^a For testing group 4 the nominal design stress shall be multiplied by 0,9. ^b Yield strength R_{eH} may be used in lieu of $R_{p0,2}$ if the latter is not available from the material standard. ^c See 5.3.2 and 6.1.2 ^d For definition of rupture elongation, see EN 13445-2:2009, Clause 4.		



Feszültséganalízis I.

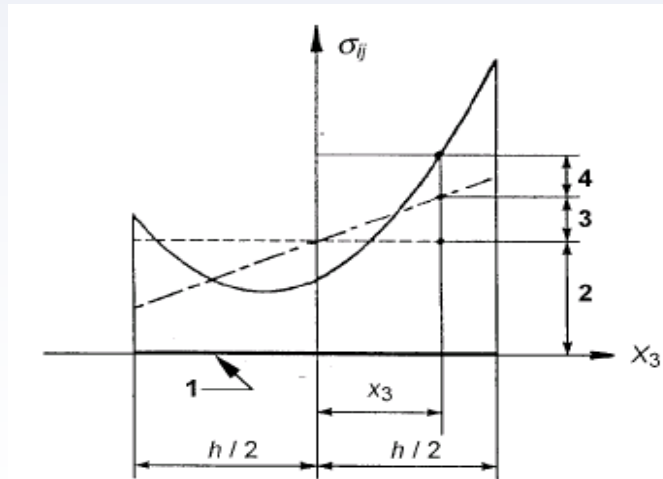
Fontosabb fogalmak:

- Mohr-szerinti redukált feszültség: $\sigma_{eq} = \max \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1| \}$
- maximális alakváltozási energia elve szerint (von Mises): $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1}$
- redukált feszültségamplitúdó: Mohr $\Delta\sigma_{eq} = \max \{ |(\Delta\sigma)_1 - (\Delta\sigma)_2|, |(\Delta\sigma)_2 - (\Delta\sigma)_3|, |(\Delta\sigma)_3 - (\Delta\sigma)_1| \}$
von Mises $\Delta\sigma_{eq} = \sqrt{(\Delta\sigma)_1^2 + (\Delta\sigma)_2^2 + (\Delta\sigma)_3^2 - \Delta\sigma_1 \cdot \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_2 \cdot \Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_3 \cdot \Delta\sigma_1}$
- nagy szerkezeti folytonossági hiány: feszültség- vagy alakváltozáscsúcs forrása, a szerkezet nagy részére van hatással. Pl. csatlakozási zóna, falvastagság változás, kivágások, csonkok környezete
- helyi szerkezeti folytonossági hiány: az anyag viszonylag kis térfogatára van hatással, éles sarkok, bemetszések, repedések
- membránfeszültség: a normálfeszültség azon egyenletes eloszlású komponense, amely az elem vastagság menti átlagfeszültség értékével egyenlő
- hajlítófeszültség: az elem vastagsága mentén ferdeszimmetrikusan eloszló normálfeszültség
- elsődleges feszültségek (P): mechanikus terhelések által okozott feszültség, amelynek eloszlása a szerkezetben olyan, hogy a terhelés következtében kialakuló megfolyás eredményeként nem jön létre a terhelés újraeloszlása
 - ✓ elsődleges membránfeszültség (Pm): belső, külső nyomás, a szerkezet egészét terhelő erő nyomaték hatására kialakuló membránfeszültség



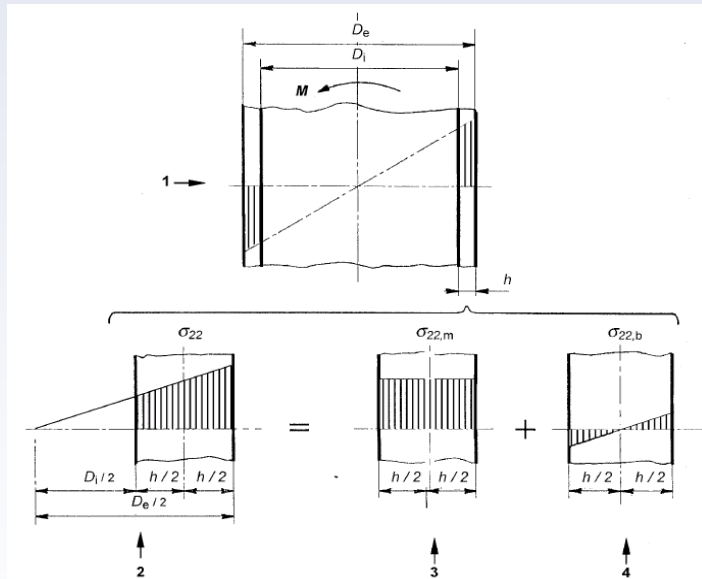
Feszültséganalízis II.

- ✓ elsődleges helyi membránfeszültség (P_L): koncentrált erőhatások közvetlen környezetében kialakuló membránfeszültség. Helyinek minősül az a membránfeszültség, amely legfeljebb $1,0\sqrt{R \cdot e_a}$ hosszon haladja meg az $1,1 f_D$ értéket
- ✓ elsődleges általános hajlítófeszültség (P_b): a szerkezeti elem valamely metszetében az egész metszet mentén megoszló hajlítófeszültség
- másodlagos feszültségek (Q_m, Q_b): korlátozott alakváltozások következtében kialakuló feszültség; önhatároló, azaz plasztikus alakváltozással kiegyenlítődik
- csúcsfeszültség (F): nem okoz torzulást, káros hatása, hogy a fáradásos vagy ridegtörés lehetséges forrása
- feszültségek felbontása: membrán (σ_m), hajlító (σ_b), linearizált ($\sigma_l = \sigma_m + \sigma_b$), nemlineáris ($\sigma_{nl} = \sigma - \sigma_l$)



Feszültséganalízis III.

- A feszültséganalízis során feltételezzük, hogy
 - az anyag követi a Hooke törvényt
 - az anyag izotróp
 - az elmozdulások és az alakváltozások kicsinyek

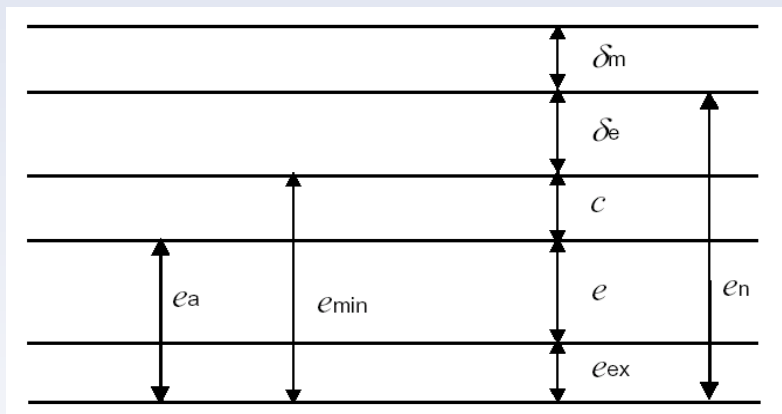


	Stress Categories				
	Primary stress			Secondary membrane + bending stress	Peak stress
	General membrane stress	Local membrane stress	Bending stress		
Description (For practical examples, see Table C-2)	Primary mean stress calculated across the wall thickness without taking into account discontinuities and stress concentrations. Caused only by mechanical loads.	Primary mean stress calculated across the wall thickness taking into account large discontinuities, but not stress concentrations. Caused only by mechanical loads.	Primary stress component proportional to the distance from the centroid of the solid wall section. Does not include discontinuities and stress concentrations. Caused only by mechanical loads	Self-equilibrating stress necessary to satisfy the continuity of the structure. Occurs at large discontinuities, but does not include stress concentrations. Can be caused by both mechanical loads and thermal effects.	a) Addition to primary or secondary stress because of stress concentration. b) Certain thermal stresses which may cause fatigue, but not distortion.
Symbol	P_m	$P_L^{(1)}$	P_b	Q (= $Q_m + Q_b$)	F
assessment against static loading	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $(\sigma_{eq})P_m \leq f$ (eq. C.7.2-1) 2) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $(\sigma_{eq})P_L \leq 1,5f$ (eq. C.7.2-2) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $(\Delta\sigma_{eq})P+Q \leq 3f$ (eq. C.7.3-1) 3) 7) </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $(\sigma_{eq})P \leq 1,5f$ (eq. C.7.2-3) 2) </div> </div> <p> ————— = design loads - - - - - = operating loads </p>				
fatigue assessment (only if required)	Assessment 4) based on : <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 5) $(\Delta\sigma_{eq})P+Q$ 7) or $\max(\Delta\sigma_j)$ </div> <div style="margin: 0 10px;">or</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 6) $(\Delta\sigma_{eq})P+Q+F$ 7) </div> </div>				



Falvastagság definíciók

- szabványos eljárások (MSZ EN 13445)
- cél a szilárdságilag szükséges falvastagság (e) meghatározása az elsődleges feszültségek alapján
- falvastagság definíciók:



e : szilárdságilag szükséges falvastagság
 e_n : névleges falvastagság
 e_{min} : minimális gyártási falvastagság (mérés)
 e_a : analízis falvastagság (számításokhoz)
 c : korróziós, eróziós pótlék
 δ_e : névleges falvastagság negatív tűrése
 δ_m : gyártástechnológiai pótlék
 e_{ex} : falvastagságtöbblet a névleges falvastagság eléréséhez

- korróziós+eróziós élettartam: $\tau_e = \frac{\Delta e}{v_c}$
- korrózió: a szerkezeti anyag roncsolódása kémiai hatásokra
- korrózió sebesség (v_c) 0-0,35 mm/év; normális viszonyok esetén; táblázat, tapasztalat, kísérlet
 - falvastagság csökkenéssel jár (c)
 - falvastagság csökkenést nem okoz:
 - + lyuk v. pont korrózió (kloridok)
 - + kristályközi korrózió (hidrogén \square metán+vas; térfogat nő, ridegedés, szén csökken)
 - + feszültségi (húzó) korrózió (közeg+szerkezeti anyag=diffúzió)
 - + rés-korrózió



Szerkezeti anyagok I.

- MSZ EN 13445-2
- Általános követelmények:
 - Korrózióállóság; közeg és a szerkezeti anyag kölcsönhatása (pl. ötvözetlen szénacél ellenáll a tömény kénsavnak és a száraz klórnak, Ti jó nedves savakkal szemben, de a száraz klórra nem)
 - Teherviselőképesség; a feszültségkategóriáknak megfelelően a méretezési hőmérsékleten (elegendő képlékeny tartalékkal rendelkezzen az anyag; $A > 14\%$, régen 16% !)
 - Biztonság a ridegtörés ellen
 - Gazdaságosság (18/8-as \rightarrow plattírozott)
 - Korlátozó előírások (D_b , P , e_{min})
 - Gyárthatóság (hegesztés, alakítás)
- Méretezési anyagjellemzők (tervezés)
 - anyagszabványok
 - nem szabványos anyagoknál bizonylat
 - a beépített anyagok jellemzőinek igazolása (vizsgálatok), gépkönyv (minden edényre)
 - R_m , $R_{m/t}$, R_{eH} , $R_{eH/t}$, A , E , G , v , α , λ , stb.
- Anyagcsoportok 1-11



Szerkezeti anyagok II.

Csoport	Alcsoport	Acélfajta
1.		$R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ ^a előírt legkisebb folyáshatárú acélok a következő %-os vegyi összetétellel: $C \leq 0,25$ $Si \leq 0,60$ $Mn \leq 1,70$ $Mo \leq 0,70$ ^b $S \leq 0,045$ $P \leq 0,045$ $Cu \leq 0,40$ ^b $Ni \leq 0,5$ ^b $Cr \leq 0,3$ (öntvényekre 0,4) ^b $Nb \leq 0,05$ $V \leq 0,12$ ^b $Ti \leq 0,05$
	1.1.	$R_{eH} \leq 275 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú acélok
	1.2.	$275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú acélok
	1.3.	$R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú, normalizált, finom szemcsés acélok
	1.4.	Légköri korrózióval szemben növelt ellenállású acélok, amelyek vegyi összetételének egyes értékei túlléphetik az 1. csoportban megadott követelményeket
2.		$R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú, termomechanikusan gyártott, finom szemcsés acélok és acélöntvények
	2.1.	$360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú, termomechanikusan gyártott, finom szemcsés acélok és acélöntvények
	2.2.	$R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú, termomechanikusan gyártott, finom szemcsés acélok és acélöntvények
3.		$R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú, nemesített és kiválasztott keményített acélok, kivéve a korrózióálló acélokat
	3.1.	$360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 690 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú nemesített acélok
	3.2.	$R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$ előírt legkisebb folyáshatárú nemesített acélok
	3.3.	A korrózióálló acélok kivételével a kiválasztott keményített acélok



Szerkezeti anyagok III.

Csoport	Alcsoport	Acélfajta
4.		Mo \leq 0,7% és V \leq 0,1% tartalmú, kis vanádiumtartalmú Cr-Mo-(Ni) ötvözött acélok
	4.1.	Cr \leq 0,3% és Ni \leq 0,7% tartalmú acélok
	4.2.	Cr \leq 0,7% és Ni \leq 1,5% tartalmú acélok
5.		C \leq 0,35% karbontartalmú, vanádium nélküli ^c Cr-Mo acélok
	5.1.	0,75% \leq Cr \leq 1,5% és Mo \leq 0,7% tartalmú acélok
	5.2.	1,5% $<$ Cr \leq 3,5% és 0,7% $<$ Mo \leq 1,2% tartalmú acélok
	5.3.	3,5% $<$ Cr \leq 7,0% és 0,4% $<$ Mo \leq 0,7% tartalmú acélok
	5.4.	7,0% $<$ Cr \leq 10% és 0,7% $<$ Mo \leq 1,2% tartalmú acélok
6.		Nagy vanádiumtartalmú Cr-Mo-(Ni) ötvözött acélok
	6.1.	0,3% \leq Cr \leq 0,75%, Mo \leq 0,7% és V \leq 0,35% tartalmú acélok
	6.2.	0,75% $<$ Cr \leq 3,5%, 0,7% $<$ Mo \leq 1,2% és V \leq 0,35% tartalmú acélok
	6.3.	3,5% $<$ Cr \leq 7,0%, Mo \leq 0,7% és 0,45% \leq V \leq 0,55% tartalmú acélok
	6.4.	7,0% $<$ Cr \leq 12,5%, 0,7% $<$ Mo \leq 1,2% és V \leq 0,35% tartalmú acélok
7.		C \leq 0,35% és 10,5% \leq Cr \leq 30% tartalmú, ferrites, martenzites vagy kiválasosan keményített korrozíóálló acélok
	7.1.	Ferrites korrozíóálló acélok
	7.2.	Martenzites korrozíóálló acélok
	7.3.	Kiválasosan keményített korrozíóálló acélok
8.		Auszténites acélok
	8.1.	Cr \leq 19% tartalmú, auszténites korrozíóálló acélok
	8.2.	Cr $>$ 19% tartalmú, auszténites korrozíóálló acélok
	8.3.	4% $<$ Mn \leq 12% tartalmú, mangános auszténites korrozíóálló acélok
9.		Ni \leq 10% tartalmú, nikkelötvöztetésű acélok
	9.1.	Ni \leq 3% tartalmú, nikkelötvöztetésű acélok
	9.2.	3,0% $<$ Ni \leq 8% tartalmú, nikkelötvöztetésű acélok
	9.3.	8,0% $<$ Ni \leq 10% tartalmú, nikkelötvöztetésű acélok
10.		auszténites-ferrites korrozíóálló acélok (duplex acélok).
	10.1.	Cr \leq 24% tartalmú, auszténites-ferrites korrozíóálló acélok
	10.1.	Cr $>$ 24% tartalmú, auszténites-ferrites korrozíóálló acélok
11.		A 0,25% $<$ C \leq 0,5% karbontartalmú acélok kivételével az 1 ^a -es csoportban megadott acélok
	11.1.	0,25% $<$ C \leq 0,35% karbontartalmú, a 11. csoportban jelzett acélok
	11.2.	0,35% $<$ C \leq 0,5% karbontartalmú, a 11. csoportban jelzett acélok
MEGJEGYZÉS: A nem acélananyagokat lásd az 1. fejezetben.		
^a A vonatkozó acéltérmeke szabványokban előírtaknak megfelelően, R _{eh} helyett R _{p0,2} vagy R _{p0,5} alkalmazható.		
^b Nagyobb érték elfogadható, ha Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 0,75%.		
^c „Vanádium nélküli” értsd: szándékosan nem adagolt ötvöző.		
^d Nagyobb érték elfogadható, ha Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 1%.		



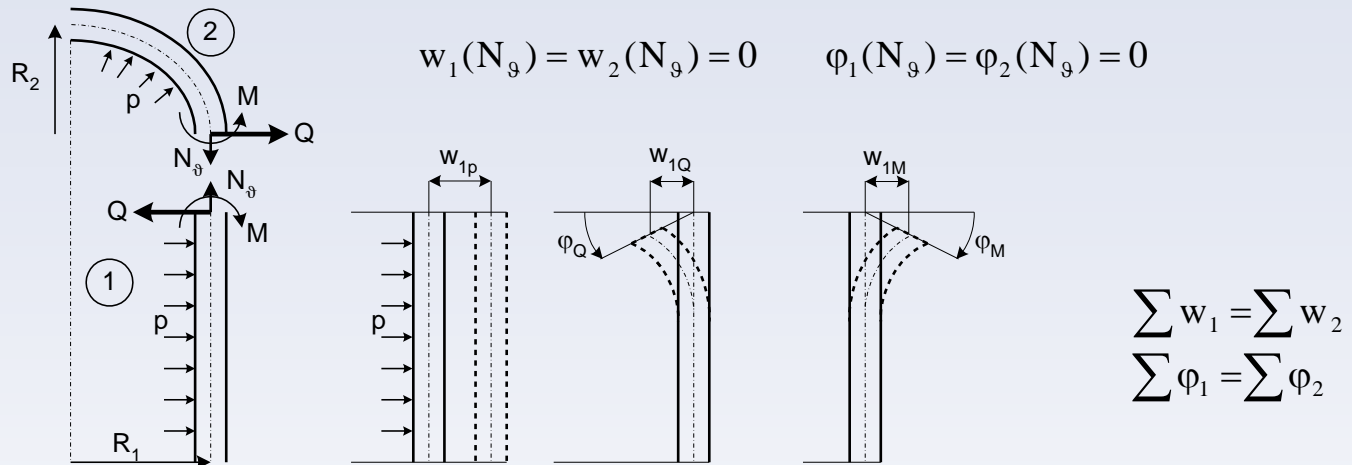
Szerkezeti anyagok IV.

- Műanyagok
 - ✓ hőre lágyuló v. hőre keményedő műanyagok korrózióálló feladatokra
 - ✓ - hőre lágyuló: olvadáspontjuk jellemzi
 - hőre keményedő: térhálós molekulák, nincs határozott olvadáspontjuk
 - ✓ szilárdsági tulajdonságok: acélhoz képest kedvezőtlen (lágyuló < keményedő), kúszás
 - ✓ korrózióállóság: jobb, mint a legtöbb fémé, pl. halogén vegyületek, klórtartalmú közegek
- Egyéb szerkezeti anyagok
 - ✓ szervetlen, nemfémes szerkezeti anyagok: pl kerámiaanyagok (hőtágulás!)
 - ✓ szén és grafit: az oxidáló légkör kivételével mindennek ellenállnak, porozitásuk miatt közvetlenül nem használhatók, impregnált formában alkalmazzák (pl. korobon hőcserélők)



Forgáshéjak membránfeszültségi állapota I.

- Illesztési feladat
- Egységnyi terhelések hatására kialakuló elmozdulás: $w_1(p)$ $w_1(Q)$ $w_1(M)$



$$w_1(p) \cdot p - w_1(Q) \cdot Q + w_1(M) \cdot M = w_2(p) \cdot p - w_2(Q) \cdot Q + w_2(M) \cdot M$$

$$\phi_1(p) \cdot p - \phi_1(Q) \cdot Q + \phi_1(M) \cdot M = \phi_2(p) \cdot p - \phi_2(Q) \cdot Q + \phi_2(M) \cdot M$$

$$\phi_1(p) = \phi_2(p) = 0$$

$$\sigma_t = \sigma_t(p) \pm \sigma_t(M) = E\varepsilon \pm \nu \frac{6M}{e^2} \quad R' = R + w \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{2\pi w}{2\pi R} = \frac{w}{R}$$

$$\sigma_t = E \frac{w}{R} \pm \nu \frac{6M}{e^2} \quad \longrightarrow \quad \sigma_{t1} = E_1 \frac{\sum w_1}{R_1} \pm \nu \frac{6M}{e_1^2} \quad \sigma_{t2} = E_2 \frac{\sum w_2}{R_2} \pm \nu \frac{6M}{e_2^2}$$



Forgáshéjak membránfeszültségi állapota II.

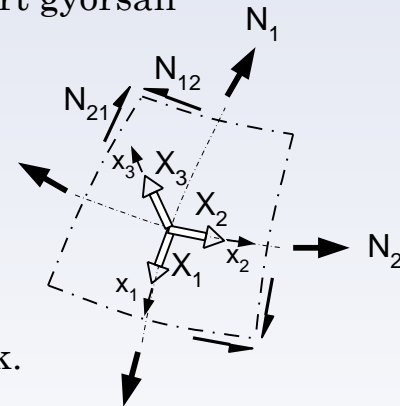
- Membránfeszültségi állapot: a terhelést a héj középfelületének síkjában membránerők ki tudják egyensúlyozni. Feltétele, hogy a felületre ható megoszló terhelés folytonos legyen, a peremterhelések érintőlegesen támadjanak, valamint a héj
 - középfelülete folytonos legyen
 - kivágások, ugrásszerű görbület és vastagság változások ne legyenek
 - peremei szabadon elmozdulhassanak
- Tiszta membránfeszültségi állapot vegyipari készüléknél nem teljesülhet, ezért gyorsan csillapodó helyi jellegű hajlítófeszültségek kísérik
- Terhelési modell az $X_R(N/mm^2)$ megoszló erőrendszer, amelyet X_1, X_2, X_3 érintőirányú komponensekre bontunk, amellyel egyensúlyt tartanak az N_1, N_2, N_{12}, N_{21} membrán élerők (középfelület metszéspontjának egységnyi hosszára redukált belső erők)
- Feltételezzük, hogy az edény vékony ($e/D < 0,09$) rugalmas héjakkal helyettesíthető, és a felületre merőleges normálfeszültségek elhanyagolhatóak.
- A kéttengelyű feszültségi állapot a

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{e} \quad \sigma_2 = \frac{N_2}{e} \quad \sigma_{12} = \sigma_{21} = \frac{N_{12}}{e}$$

membránfeszültségekkel, és a Hooke törvény alapján számítható

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{Ee} (N_1 - \nu N_2) \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{Ee} (N_2 - \nu N_1) \quad \gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{1}{eG} N_{12}$$

rugalmas alakváltozásokkal jellemezhető.



Forgáshéjak membránfeszültségi állapota II.

- A membránerők meghatározásához x_1 , x_2 , x_3 irányú egyensúlyi egyenleteket kell felírni $r d\varphi$ és $r_1 du$ oldalhosszúságú héjelemre (4 egyenlet 4 ismeretlen)

- ✓ x_1 tengely (meridián) irányú külső és belső erők egyensúlyi feltételéből:

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (N_1 r) + \frac{\partial N_{21}}{\partial \varphi} - N_2 \cos \vartheta = -X_1 r$$

- ✓ x_2 tengely (kerületi) irányú külső és belső erők egyensúlyi feltételéből

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (N_{12} r) + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + N_{21} \cos \vartheta = -X_2 r$$

- ✓ x_3 tengely (normális) irányú külső és belső erők egyensúlyi feltételéből:

$$\frac{N_1}{r_1} + \frac{N_2}{r_2} = X_3$$

- ✓ x_3 tengely (normális) körül forgató erők egyensúlyi feltételéből:

$$N_{21} \cdot r_1 \cdot d\vartheta \cdot r \cdot d\varphi - N_{12} \cdot r \cdot d\varphi \cdot r_1 \cdot d\vartheta = 0 \quad N_{21} = N_{12}$$

- Egyenletesen megoszló túlnyomás (P) okozta membránerők

- ✓ a héj felületére ható terhelések: $X_1 = X_2 = 0$, $X_3 = P$

- ✓ mivel a külső terhelés tengelyszimmetrikus a belső erők kerületi irányban nem változnak:

$$\frac{\partial(\dots)}{\partial \varphi} \equiv 0, \quad N_{12} = N_{21} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (N_1 r) - N_2 \cos \vartheta = 0 \quad \frac{N_1}{r_1} + \frac{N_2}{r_2} = p$$



Forgáshéjak membránfeszültségi állapota III.

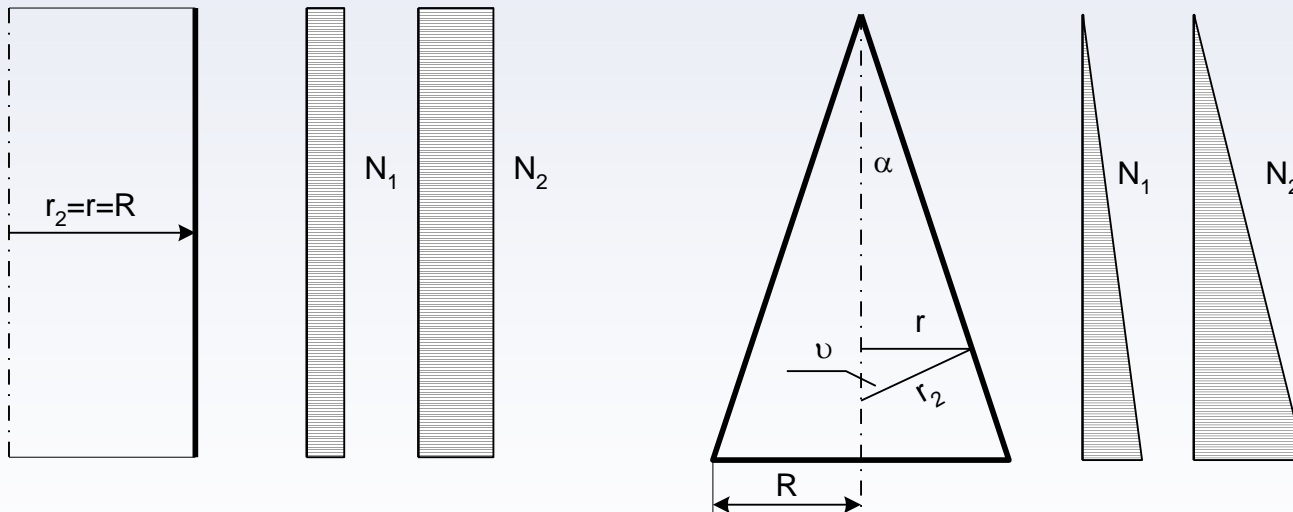
- szétválasztható differenciálegyenlethez jutunk, amelyet integrálva kapjuk:

$$N_1 = \frac{pr_2}{2} \quad N_2 = \frac{pr_2}{2} \left(2 - \frac{r_2}{r_1} \right)$$

- Egyszeresen görbült forgáshéjak (henger, kúp):

- henger $r_1 = \infty, r_2 = R \quad N_1 = \frac{pR}{2} \quad N_2 = 2N_1 = pR$

- kúp $r_2 = \frac{r}{\sin \vartheta} = \frac{r}{\cos \alpha} \quad r = R \text{ esetén } N_1 = \frac{pR}{2} \frac{1}{\cos \alpha} \quad N_2 = \frac{pR}{\cos \alpha}$



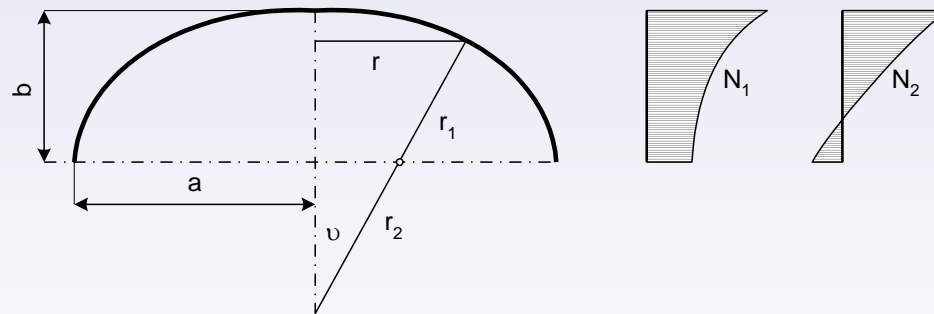
Forgáshéjak membránfeszültségi állapota IV.

- Kétszeresen görbült forgáshéjak:

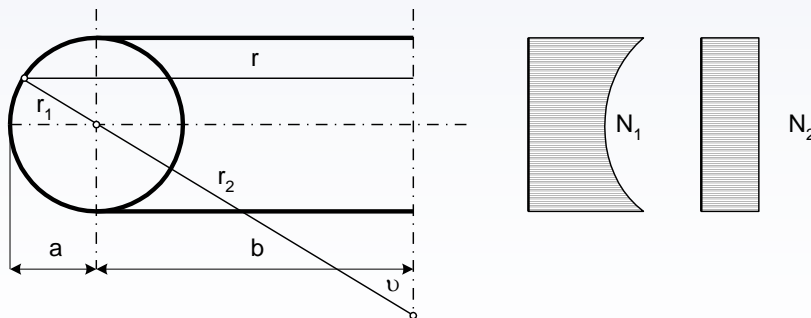
- gömb ($r_1=r_2=R$) $N_1 = N_2 = \frac{pR}{2}$ tökéletes egyenszilárdságú szerkezet

- elliptikus héj: $r_1 = \frac{a^2}{b} \frac{1}{\Theta^{3/2}}$ $r_2 = \frac{a^2}{b} \frac{1}{\Theta^{1/2}}$ $\Theta = 1 + \left(\frac{a^2}{b^2} - 1 \right) \sin^2 \vartheta$

$$N_1 = \frac{pa^2}{2b\sqrt{\Theta}} \quad N_2 = \frac{pa^2}{2b\sqrt{\Theta}} (2 - \Theta) \quad \vartheta = 0, \Theta = 1 \text{ esetén } N_1 = N_2 = \frac{pa^2}{2b}$$



- tórusz héj:



$$N_1 = \frac{pa}{a \sin \vartheta + b} \left(\frac{a}{2} \sin \vartheta + b \right) \quad N_2 = \frac{pa}{2}$$

Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra I.

- forgásszimmetrikus héjak
- a méretezési nyomás az egész felületen állandó
- névleges méret: D_k külső átmérő (szabványos)

Henger- és gömbhéjak membránfeszültségei

- feltétel: $e/D_e \leq 0.16$, ahol D_e a külső átmérő

Hengeres héjak

- a P méretezési nyomás hatására ébredő membránfeszültségi állapot (a héj középfelületén):

$$\sigma_r = -P \quad \sigma_t = \frac{PD}{2e} \quad (\text{főfeszültség}) \quad \sigma_a = \frac{\sigma_t}{2}$$

- D középfelület helyett alkalmazható a D_i (belső) vagy a D_e (külső - szabványos) átmérő:

$$D_i = D - e \quad D_e = D + e \quad e = \frac{PD_i}{2f \cdot z - P} = \frac{PD_e}{2f \cdot z + P}$$

- lemezövekből történő gyártásánál kifutó varrat a roncsolásos vizsgálathoz (azonos anyag, görbület)
- ellenőrzés: megengedett nyomás (e_a a pótlékolás nélküli falvastagság $+e_{ex}$):

$$P_{\max} = \frac{2f \cdot z \cdot e_a}{D}$$

Gömbhéjak

$$e = \frac{PD_i}{4f \cdot z - P} = \frac{PD_e}{4f \cdot z + P} \quad P_{\max} = \frac{4f \cdot z \cdot e_a}{D}$$



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra II.

Zárófelületek

- állandó falvastagságú, nem egyenszilárdságú héjak
- a külső (névleges) átmérők a szabványos sor szerint
- az azonos szerkezetű, de különböző méretű zárófelületek geometriailag hasonlóak
- különböző felületek sarokgörbülettel csatlakoznak
- a körhengerhéjhoz szakállal csatlakoznak (járulékos terhelések elkerülése a varratban)
- a szakállrész hossza nagyobb, mint $0.2\sqrt{D_i e}$, azt a hengeres héj összefüggései szerint méretezni kell, különben a vastagsága a fenék vastagságával egyezik meg

Félgömb edényfenék

- alkalmazás: felhabzó anyagok, nagy gőztér, csővég lezárás síkfedél helyett
- méretezés a gömbhéjak összefüggéseivel

$$e = \frac{PD_i}{4f \cdot Z - P} = \frac{PD_e}{4f \cdot Z + P} \quad P_{\max} = \frac{4f \cdot Z \cdot e_a}{D}$$

- hidrosztatikai terhelés:

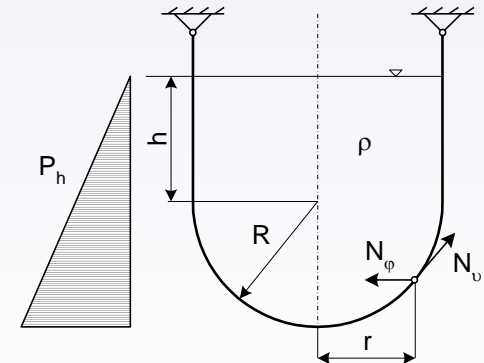
$$N_{90} = N_{\varphi 0} = \frac{\rho g R (R + h)}{2} \quad N_{9R} = \frac{1}{2} \rho g R \left(h + \frac{2}{3} R \right) \quad N_{\varphi R} = \frac{1}{2} \rho g R \left(h - \frac{2}{3} R \right)$$

$r=R$ helyen (a gömbsüveg peremén):

$$h = \frac{2}{3} R \longrightarrow N_{\varphi} = 0$$

$$h = 0 \longrightarrow N_{\varphi} = -\frac{1}{3} \rho g R^2 \quad \text{stabilitás!!}$$

ha $P_h > 0.05P$, akkor a fedelet hidrosztatikai + gáznyomásra kell méretezni.



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra III.

Kosárgörbe alakú (torispherical) edényfenék

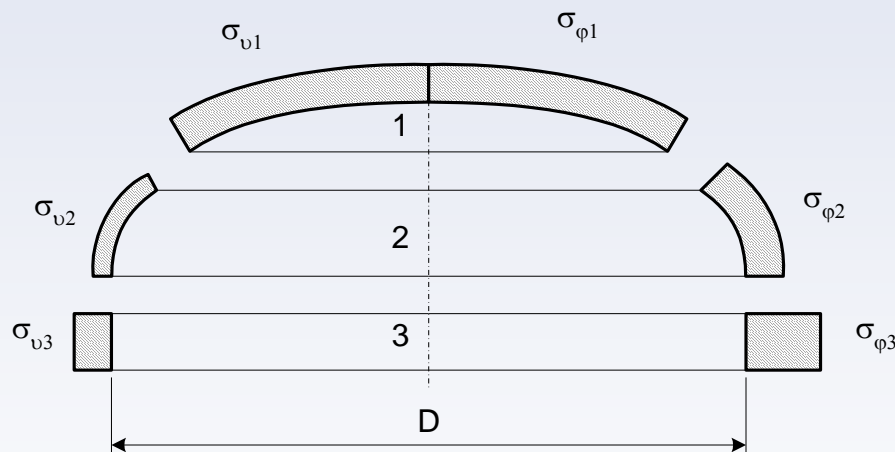
- Alak:

sekélydomborítású (28011 Kloepper, régen A típus): $R/De=1$; $r/De=0.1$

mélydomborítású (28013 Korbogen, régen C típus): $R/De=0.8$; $r/De=0.154$

- leggyakrabban alkalmazott hazai edényfenék

- membránfeszültségek: 1-gömb; 2-tórusz; 3-henger



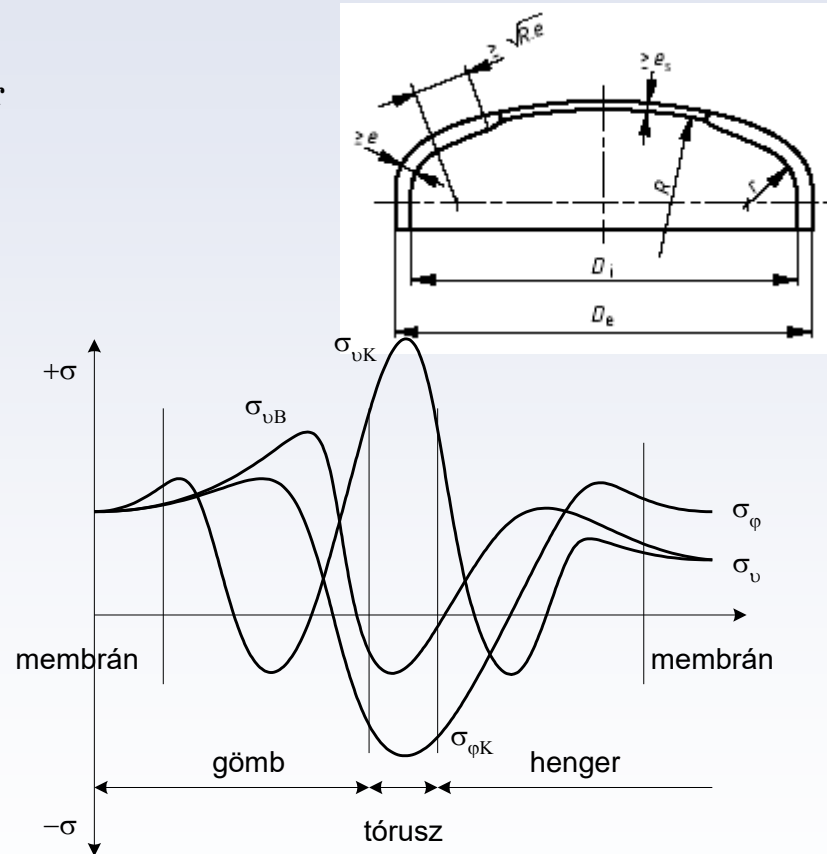
$$\sigma_{\phi 1} = \sigma_{\phi 1} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{\phi 2} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e}$$

$$\sigma_{\phi 3} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{\phi 2} \cong \frac{P \cdot r}{e}$$

$$\sigma_{\phi 3} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot e}$$



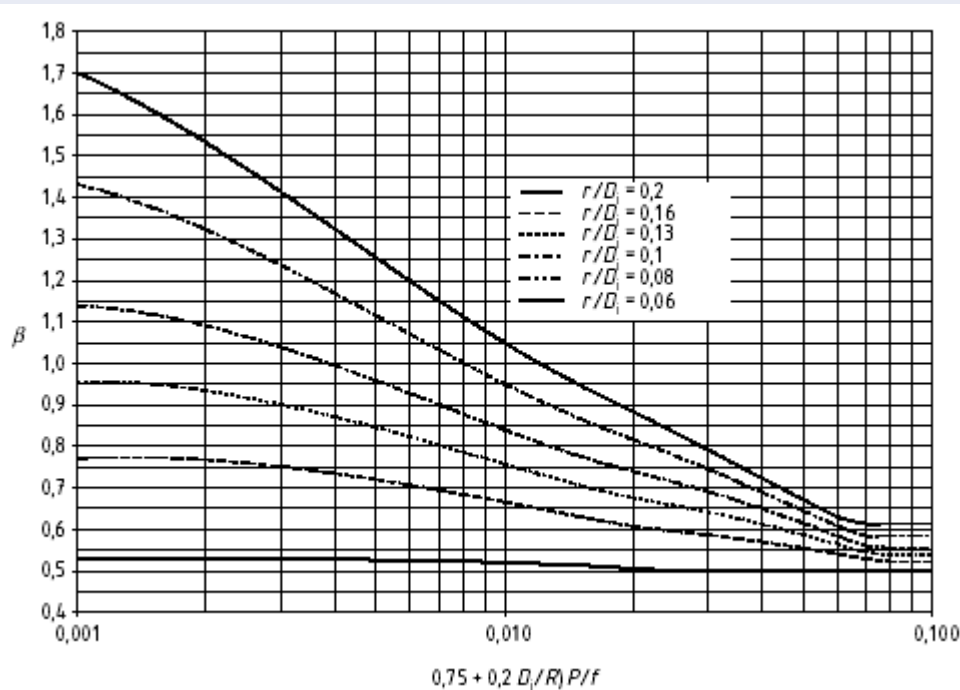
Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra IV.

- Méretezés:

$$e = \max \{e_s, e_y, e_b\} \quad e_s = \frac{P \cdot R}{2f \cdot z - 0.5P} \quad e_y = \frac{\beta \cdot P(0.75R + 0.2D_i)}{f} \quad e_b = (0.75R + 0.2D_i) \left[\frac{P}{11lf_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0.825} \right]^{\left(\frac{1}{1.5} \right)}$$

ahol $f_b = \frac{R_{p0.2/t}}{1.5}$, hidegen hengerelt, varrat nélküli ausztenites korrózióálló acélra $f_b = \frac{1.6 \cdot R_{p0.2/t}}{1.5}$

β meghatározható diagramból ($f: (0.75 + 0.2D_i/R)P/f$, paraméter r/D_i), vagy számítási eljárás eredményeként.



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra V.

✓ Ellipszis alakú edényfenék

- feltétel: $1.7 < K < 2.2$, ahol $K = D_i / (2h_i)$

- méretezése és ellenőrzése ekvivalens a kosárkörbe alakú edényfenékkel, az összefüggésekben

$$r = D_i((0.5/K) - 0.08) \quad \text{és} \quad R = D_i(0.44K + 0.02)$$

✓ Kúpos edényfenék

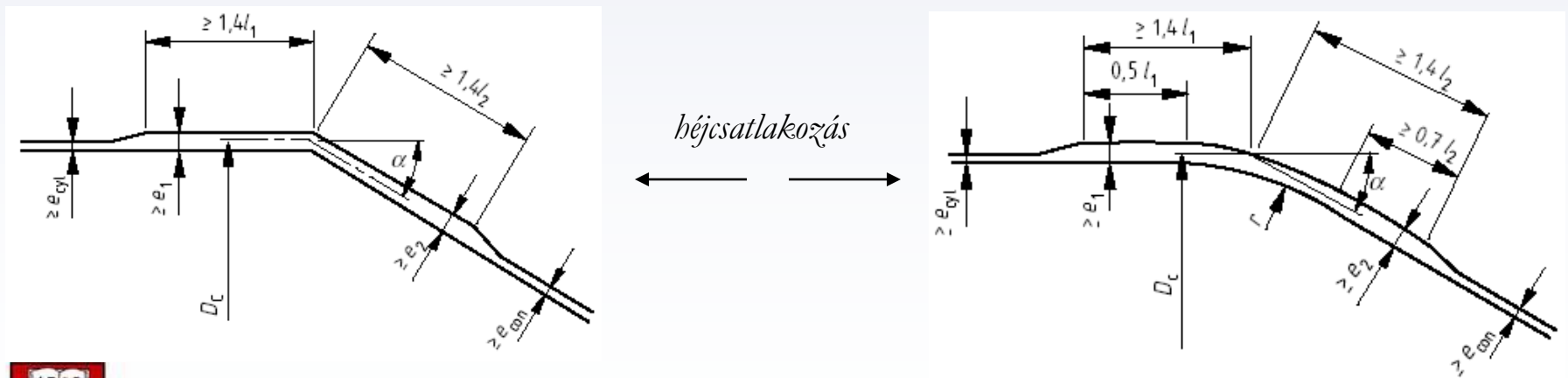
- alkalmazás:

1: zagyok, szilárd porok, alsó zárófelület (rézsűszög)

2: reaktorok, egyenletesebb gázeloszlás a belépő oldalon

3: átmeneti darab (különböző átmérőjű hengeres övek kapcsolása), változó keresztmetszetű kolonna

- szabvány alól kivétel: $\alpha > 75^\circ$, rövid kúpos kapcsolat, $\frac{e_a \cdot \cos(\alpha)}{D_c} \leq 0.001$



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra VI.

- Méretezés:

$$e_{\text{con}} = \frac{P \cdot D_i}{2f \cdot z - P} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad e_{\text{con}} = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad P_{\text{max}} = \frac{2f \cdot z \cdot e_{\text{con}} \cdot \cos(\alpha)}{D_m}$$

$$D_i = D_k \quad D_e = D_k + 2e_2 \cos(\alpha) \quad D_m = (D_i + D_e)/2 \quad D_k = D_c - e_1 - 2r\{1 - \cos(\alpha)\} - l_2 \sin(\alpha)$$

$$l_1 = \sqrt{D_c \cdot e_1} \quad l_2 = \sqrt{\frac{D_c \cdot e_2}{\cos(\alpha)}}$$

A hengeres és a kúpos héj kapcsolata (nagy átmérőn):

1. Kapcsolat sarokgörbület nélkül:

alkalmazási feltételek: a tompavarrattal rögzített kapcsolat a henger és a kúp között falvastagság csökkenés nélkül jön létre; a hegesztési varrat 100%-ban roncsolásmentes vizsgálatnak legyen alávetve, kivéve, ha a hegesztésnél a köpenyek falvastagsága $1.4e_j$

- Méretezés:

A hengeres héj csatlakozás szükséges falvastagsága: $e_1 = \max\{e_{\text{cyl}}, e_j\}$

$$e_j = \frac{P \cdot D_c \cdot \beta}{2f} \quad \beta = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{D_c}{e_j}} \frac{\tan(\alpha)}{1 + 1/\sqrt{\cos(\alpha)}} - 0.15 \quad \text{hossza: } \min\{1.4 \cdot l_1\}$$

A kúpos héj csatlakozás szükséges falvastagsága:

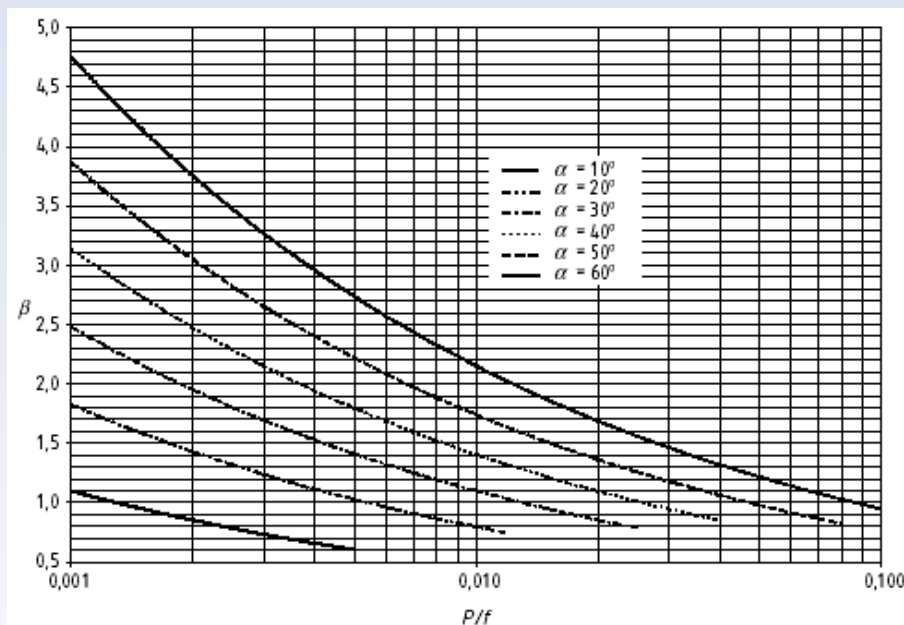
$$e_2 = \max\{e_{\text{con}}, e_j\}$$

$$e_{\text{cyl}} = \frac{PD_e}{2f \cdot z + P} \quad e_{\text{con}} = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} \cdot \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad \text{hossza: } \min\{1.4 \cdot l_2\}$$



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra VII.

β meghatározása grafikus úton:



Ellenőrzés: iterációs folyamat

2. Kapcsolat sarokgörbülettel:

- a görbület egy tóruszfelület része, amely csatlakozik a hengeres és a kúpos héjhoz
- $r < 0.3D_c$

Méretezés:

$$\beta = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{D_c}{e_j}} \frac{\tan(\alpha)}{1 + 1/\sqrt{\cos(\alpha)}} - 0.15 \quad \rho = \frac{0.028r}{\sqrt{D_c e_j}} \frac{\alpha}{1 + 1/\sqrt{\cos(\alpha)}} \quad \gamma = 1 + \frac{\rho}{1.2 \left(1 + \frac{0.2}{\rho} \right)} \quad e_j = \frac{P \cdot D_c \cdot \beta}{2f \cdot \gamma}$$



Héjszerkezetű elemek méretezése belső nyomásra VIII.

Hengeres csatlakozás: a falvastagság min hossza: $>1.4l_1$; $0.5l_1$ (ábra!) $e_1 = \max\{e_{cyl}, e_j\}$
 Kúpos csatlakozás: a falvastagság min hossza: $>1.4l_2$; $0.7l_2$ (ábra!)

Ellenőrzés: iterációs folyamat $e_2 = \max\{e_{con}, e_j\}$

Hengeres és kúpos héj kapcsolata (kisebb átmérőn):

feltételek:

- e_1 falvastagság l_1 hosszon, e_2 falvastagság l_2 hosszon legyen alkalmazva
- érvényesek az e_{cyl} , e_{con} előírások

Méretezés:

- e_1 és e_2 felvétele

- $s = e_2/e_1$

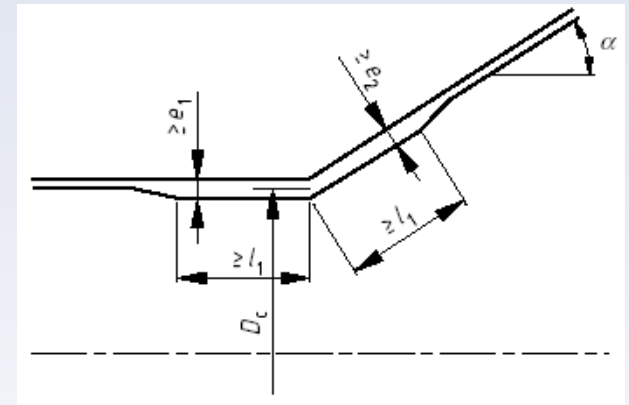
- ha $s < 1$ $\tau = s \sqrt{\frac{s}{\cos(\alpha)}} + \sqrt{\frac{1+s^2}{2}}$

- különben

$$\tau = 1 + \sqrt{s \left(\frac{1+s^2}{2 \cos(\alpha)} \right)}$$

$$\beta_H = 0.4 \sqrt{\frac{D_c}{e_1}} \frac{\tan(\alpha)}{\tau} + 0.5$$

- ha $P \leq \frac{2f \cdot z \cdot e_1}{D_c \cdot \beta_H}$ a falvastagságok elfogadhatóak, különben e_1 és/vagy e_2 értéke növelendő



Ellenőrzés: $P_{\max} = \frac{2f \cdot z \cdot e_1}{D_c \cdot \beta_H}$



Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra I.

✓ Feszültségek hatása elemi csuklóra (egytengetű fesz. áll.)

- húzó igénybevétel: F növekedésével az elem kiegyenesedik, megnyúlik, elszakad. Stabil állapot.
- nyomó igénybevétel: F növekedésével a csukló a vízszintes erő hatására elmozdul, az elem rövidül, majd összecsaplik. stabil-labilis-instabil állapot.
- Síkbeli feszültségi állapot (kéttengetű): lemezek, héjak
- Makroszkópikusan: a kritikus erő függ az anyagjellemzőktől (E , ν , R_{eH}), a geometriai alaktól (méretektől).

A stabilitás elvesztése után új alak! (egyenes rúd meghajlik, a héj behorpad)

- kritikus teher: F_{kr} , P_{kr} , M_{kr} : készülékjellemző

Feltételezhető, hogy a szerkezeti elemek stabilitása a szerkezeti anyag struktúrájának rendezetlenségével hozható kapcsolatba. A húzóigénybevétel a rendezettséget növeli, a nyomóigénybevétel csökkenti.

A „B” pont egyik esetben az AC tengely irányába mozdul, míg a másik esetben távolodik.

A mechanikai modellek a testek egyensúlyát (rudak, héjak) makroszkópikusan, ill. virtuálisan kihajlott állapotban vizsgálják és feltételezik, hogy a testre a nyomóerőn kívül makroszkópikus hajlítónyomaték is hat. Ez az állapot hasonló a mikroszkópikus modellhez (elemi csukló), azonban a kihajlás megindulásának okát a stabilitási elméletek nem tárgyalják. A kritikus terhelés (stabilitás vesztes határállapota) nem ok, hanem állapot!

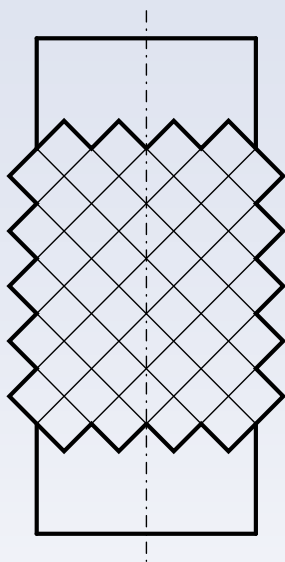
✓ Terhelési esetek

- hidrosztatikus terhelés: az edényt mindenhol ugyanazon nyomás veszi körül
- kitámasztott fenék
- lángcső
- hőfeszültség, hőcserélő csövek

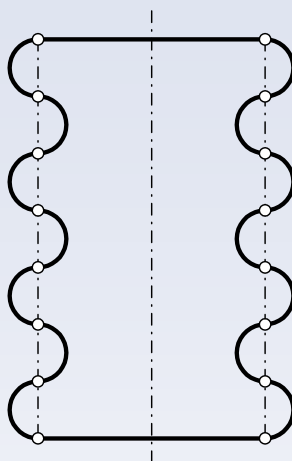


Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra II.

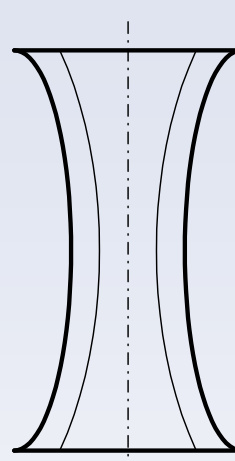
✓ Jellemző horpadási alakzatok



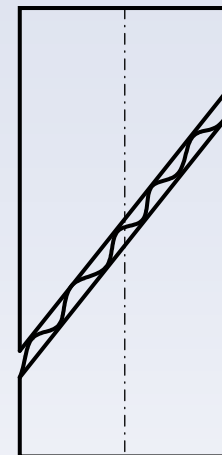
Hálós horpadás
(Yoschimura alakzat)
vékonyfalu henger



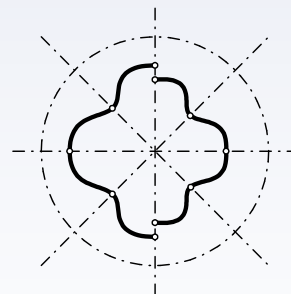
Axiális horpadás
gyűrűalakú, csomópontok az
eredeti felületen



Kerületi irányú hullámok
 $n=4$, $m=1$ (fél)
minden metszetben azonos



Spirálhorpadás
silók, hőfeszültségek,
kitámasztás



Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra III.



Axiálisan szabadon nyomott cső
($L/D=5.78$)

Hálószerű horpadás $n=4$
kerületi félhullámmal



Kívülről támasztott axiálisan
nyomott cső (száraz hüvelyben)
 $L/D=5.81$

Spirálhorpadás



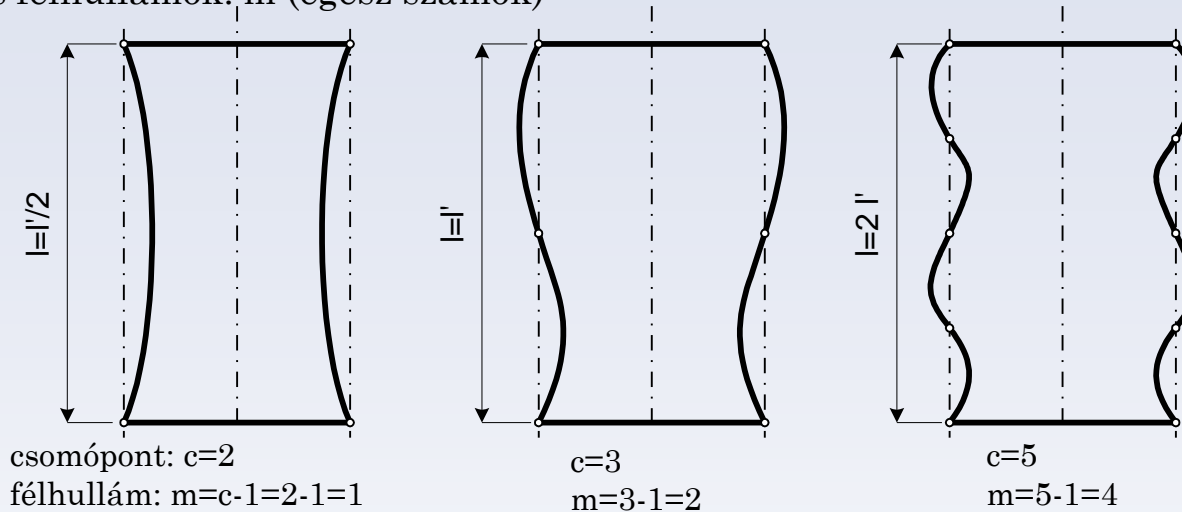
Kívülről támasztott axiálisan
nyomott cső (zsírozott
hüvelyben) $L/D=5.77$

Spirálhorpadás

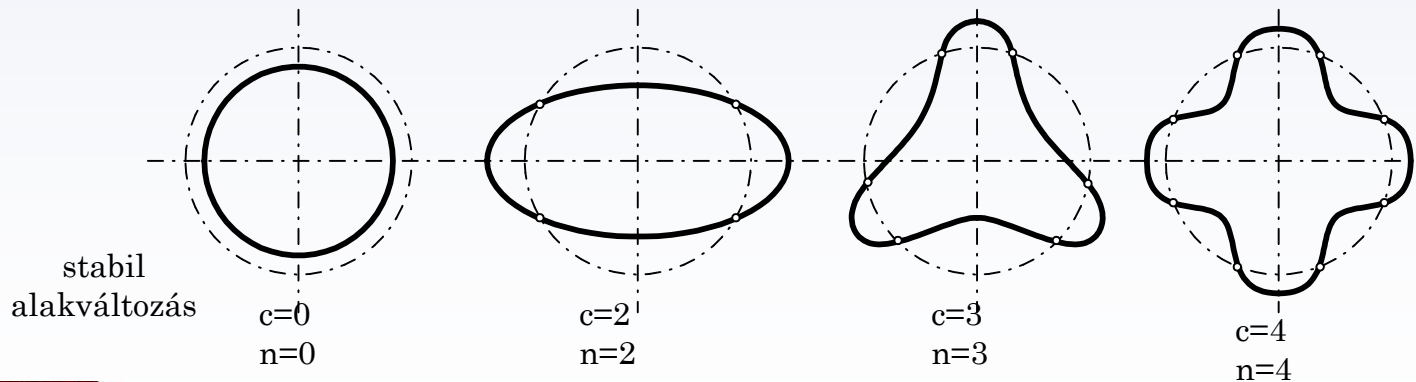
Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra IV.

✓ Horpadási hullámok értelmezése

- Axiális félhullámok: m (egész számok)



- Kerületi félhullámok: n (egész számok) (n =csomópontok száma a fél keresztmetszeten)



Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra V.

MSZ EN 134445-3

- általános megjegyzések:

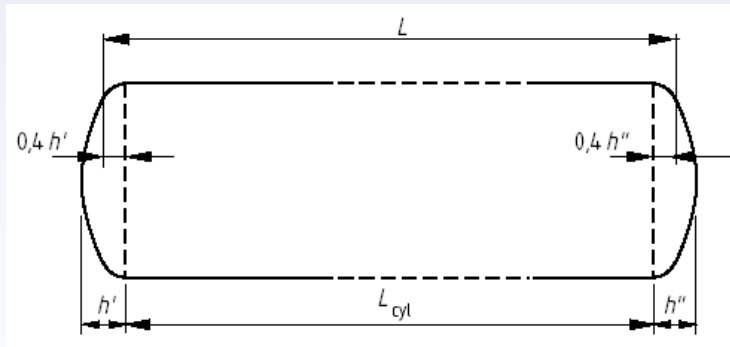
a falvastagság nem lehet kisebb, mint ugyanakkora belső nyomásra adódó falvastagság
nem ausztenites acélok esetén: $\sigma_e = R_{p0.2/t}$

ausztenites acélokra: $\sigma_e = R_{p0.2/t} / 1.25$

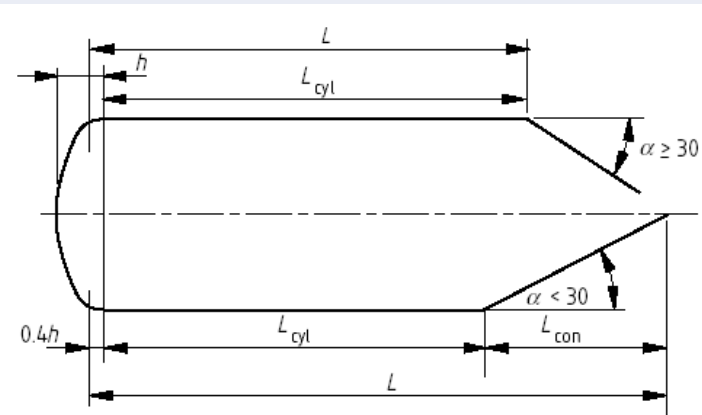
minimális biztonsági tényező tervezéskor $S=1.5$, vizsgálati állapotban $S=1.1$

- Merevítetlen hengeres héjak:

terheletlen hossz:



$$L = L_{cyl} + 0.4h' + 0.4h''$$



$$\alpha \geq 30^\circ \quad L = L_{cyl} + 0.4h$$

$$\alpha < 30^\circ \quad L = L_{cyl} + 0.4h + L_{con}$$



Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra VI.

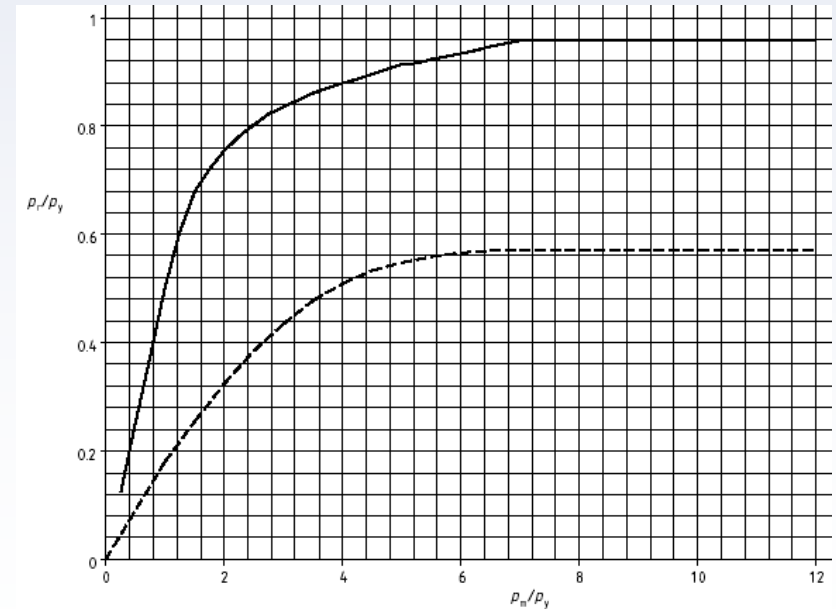
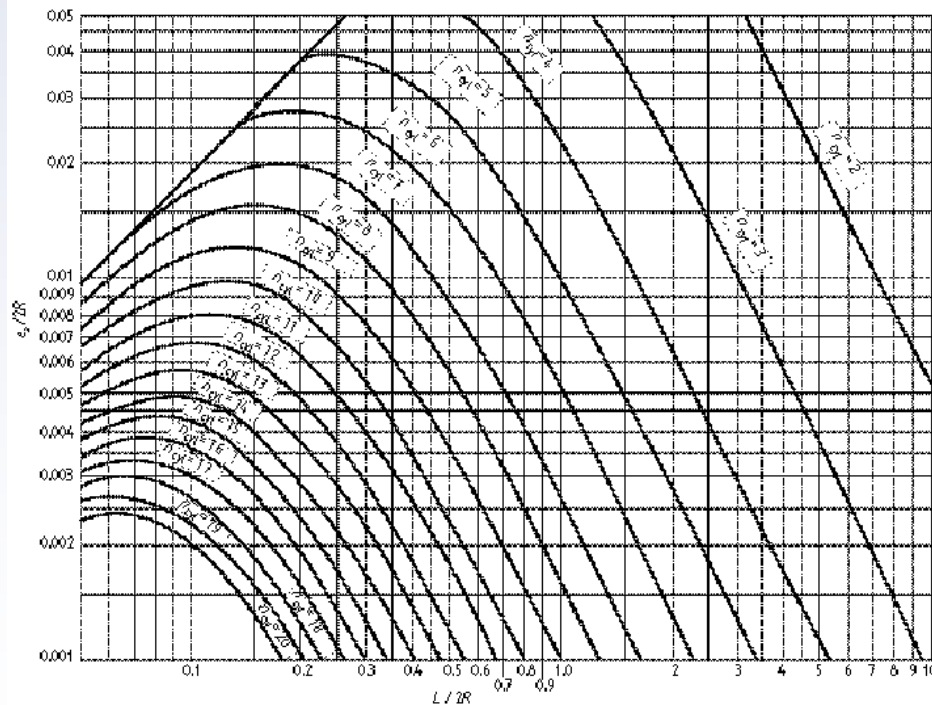
falvastagság számítása:

$$1: P_y = \frac{\sigma_e e_a}{R}$$

$$2: P_m = \frac{E e_a \varepsilon}{R} \quad \varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \left\{ \frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{e_a^2}{12R^2(1-\nu^2)} (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\} \quad Z = \frac{\pi R}{L}$$

3: P_m/P_v számítása, majd P_r/P_y meghatározása

$P < P_r/S$, ellenkező esetben e_a növelése



Héjszerkezetű elemek méretezése külső nyomásra VII.

1 - Cylinders and cones

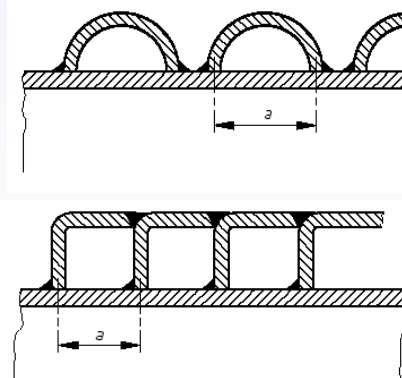
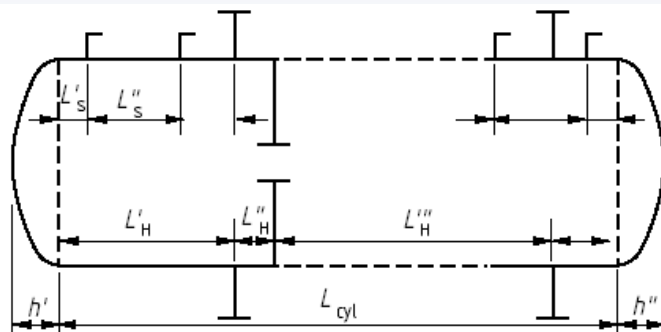
P_m/P_y	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
P_r/P_y	0	0,125	0,251	0,375	0,5	0,605	0,68	0,72	0,755	0,78	0,803	0,822	0,836	0,849	0,861
P_m/P_y		3,75	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	5,5	5,75	6,0	6,25	6,5	6,75	$\geq 7,0$
P_r/P_y		0,87	0,879	0,887	0,896	0,905	0,914	0,917	0,923	0,929	0,935	0,941	0,947	0,953	0,959

2 - Spheres and dished ends

P_m/P_y	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4	4,5	5,0	5,5	6	$\geq 6,5$
P_r/P_y	0	0,09	0,18	0,255	0,324	0,386	0,435	0,479	0,51	0,533	0,548	0,565	0,56	0,57

- Merevített héjak: (a szabvány részletesen tárgyalja)

- a) „erős” merevítés
- b) „lágý” merevítés
- c) fűtő/hűtő bordázat



Kivágások, csonkok héjszerkezeteken I.

- megbomlik a nyomásterhelés okozta membránfeszültségi állapot
- a kivágás peremétől távolodva a zavarás csökken
- görbült edényfalakon kialakított kivágások végtelen nagy síklemezzel modellezhetők, amennyiben a kivágás mérete a görbületi sugárhoz viszonyítva nem nagy.

✓ Egytengelyű húzófeszültséggel terhelt síklemez (állóhengeres folyadéktartály)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0}{2} \left[1 - \frac{a^2}{r^2} + \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right]$$

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_0}{2} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right]$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\sigma_0}{2} \left[1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right] \sin 2\varphi$$

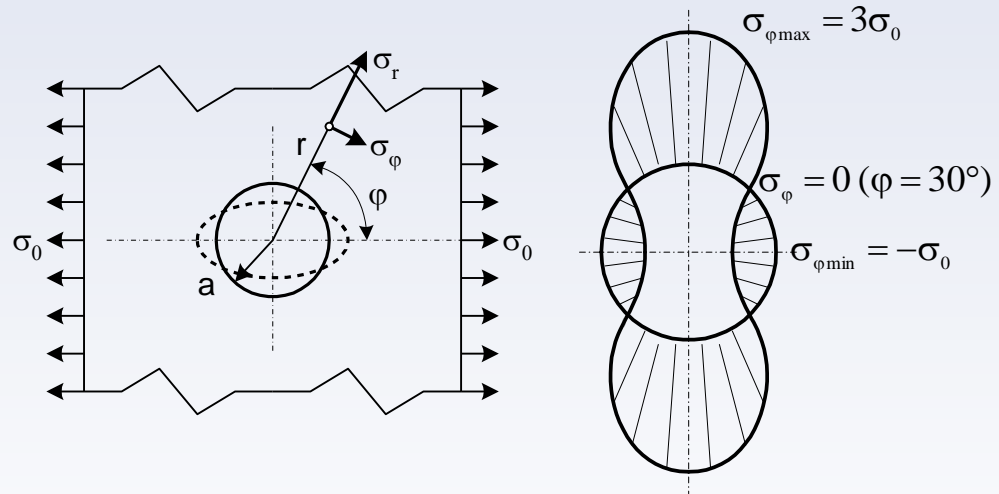
A furat peremén: $a = r = \frac{d}{2}$

$$\sigma_r = 0 \quad (\text{nincs a furatban nyomás}) \quad \sigma_\varphi = \sigma_0(1 - 2\cos 2\varphi) \quad \tau_{xy} = 0$$

Feszültségkoncentráció:

$$\sigma_{\varphi=90^\circ} = \sigma_0(1 - 2\cos 180^\circ) = 3\sigma_0 \quad \alpha_\sigma = \frac{3\sigma_0}{\sigma_0} = 3$$

$$\text{Hengeres készülékben (folyadékkal töltött, lapos fenekű hengeres tartály): } \alpha_{\sigma H} = \frac{4K^2 + 2}{K^2 + 1} \quad K = \frac{D_k}{D_b} = 1 + \frac{e}{R}$$



Kivágások, csonkok héjszerkezeteken II.

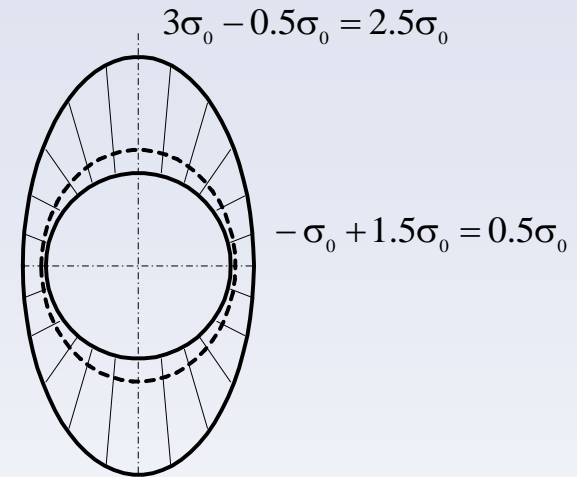
- ✓ **Kéttengelyű húzófeszültséggel terhelt síklemez (hengeres edény)** $\sigma_{01} = \sigma_t$ $\sigma_{02} = \frac{1}{2}\sigma_t = \sigma_a$
 - az előző eset és a 90°-kal elfogatott terhelés szuperpozíciója

$$\sigma_0 = \sigma_t = \frac{PD}{2e}$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_{\varphi 1} + \sigma_{\varphi 2} = \sigma_t \left(1 - 2\cos 2\varphi\right) + 0.5\sigma_t \left(1 - 2\cos 2\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

Feszültségkoncentráció:

$$\alpha_\sigma = \frac{2.5\sigma_0}{\sigma_0} = 2.5 \quad \alpha_{\sigma H} = \frac{4K^2 + 1}{K^2 + 1}$$



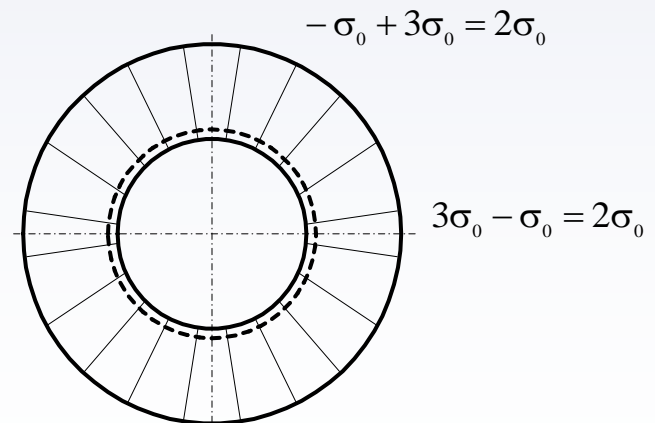
- ✓ **Kéttengelyű húzófeszültséggel terhelt síklemez (gömbhéj, kosárgörbe zárófelület)**

$$\sigma_0 = \sigma_t = \frac{PD}{4e}$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_{\varphi 1} + \sigma_{\varphi 2} = \sigma_0 \left(1 - 2\cos 2\varphi\right) + \sigma_0 \left(1 - 2\cos 2\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right) = 2\sigma_0 = \text{állandó}$$

Feszültségkoncentráció:

$$\alpha_\sigma = \frac{2\sigma_0}{\sigma_0} = 2 \quad \alpha_{\sigma H} = \frac{3K^2 + 1}{K^2 + 1}$$



Kivágások, csonkok héjszerkezeteken III.

✓ A kivágás zavaró hatása

- a közeli kivágások hatása nem hanyagolható el
- a szabad kivágások peremén a lemez szilárdságának teljes kihasználása mellett a folyáshatárt meghaladó (fáradást okozó) feszültség ébred (lokális)
- egyedülállónak tekinthető a kivágás, ha a gátméret (t_g)

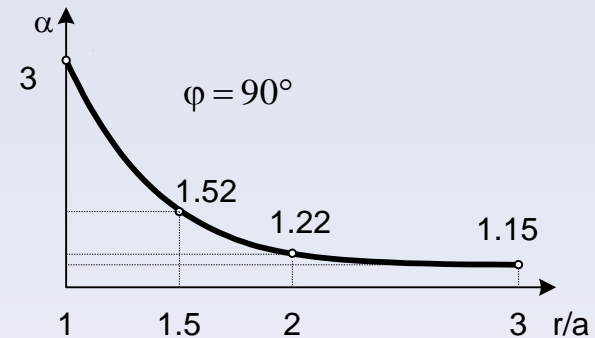
$$t_g \geq 2d \quad a \geq \frac{t}{d} = \frac{t_g + d}{d} = \frac{2d + d}{d} = 3$$

- görbe felületen (héjak): $t_g \geq 2\sqrt{De}$

✓ - lyuksor gátjaiban kialakuló feszültségek (pl csőköteggfal):

$$\sigma_\varphi = \frac{DP}{2e} \left\{ 1 + k + 0.187d^2 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(t-x)^2} + \frac{d^2}{4x^2} + \frac{d^2}{4(t-x)^4} \right] \right\}$$

Furatok peremén repedések keletkezhetnek



$$k = \frac{2\frac{t}{d}-1}{2\frac{t}{d}-2} \left[\frac{1}{\left(2\frac{t}{d}-1\right)^2} + \frac{1}{\left(2\frac{t}{d}-1\right)^4} \right]$$

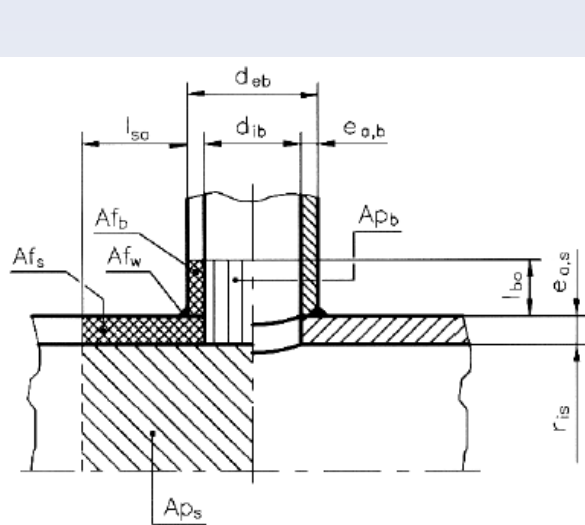


Kivágások, csonkok héjszerkezeteken IV.

✓ Kivágásba illesztett csomk

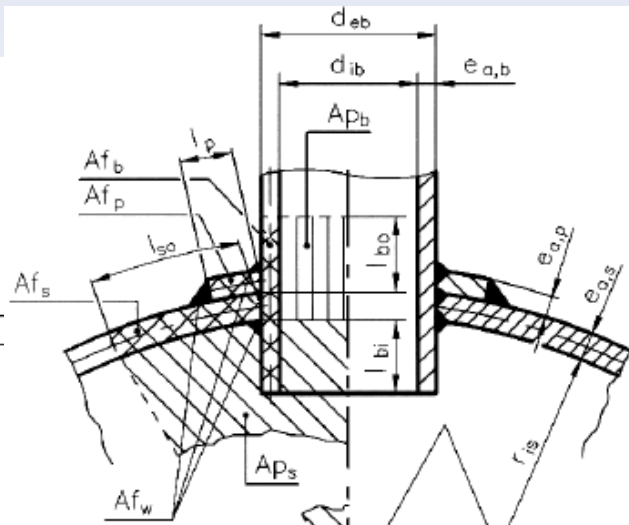
- szabványos elemek (karima, cső, hengeres toldat)
- csőátmérő: áramlástanilag szükséges keresztmetszet
- falvastagság: nyomásnak megfelelő, szabványos érték
- bűvönnyílás (DN500, DN600)

Köpeny kialakítása a csomk környezetében (alaptípusok):



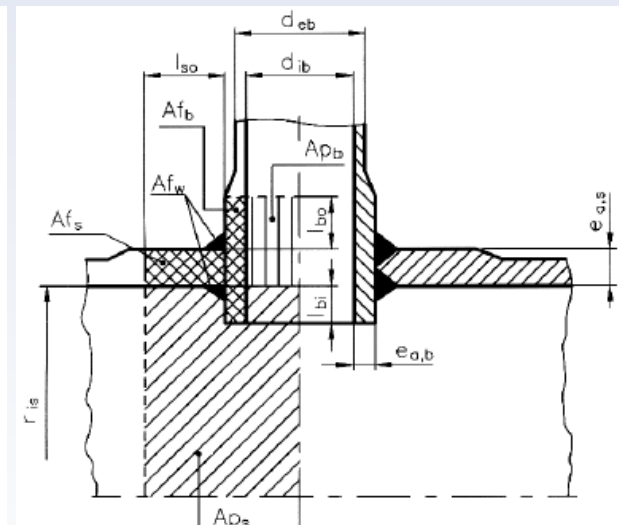
merevítés csomkkal
kisméretű csomk

$$\frac{d}{D} \leq 0.3$$



Csomk+párnalemez
közepes méretű kivágás

$$\frac{d}{D} > 0.5$$



Lemezöv vastagítás
nagy méret, vagy lyuksor

$$0.3 \leq \frac{d}{D} \leq 0.5$$



Kivágások, csonkok héjszerkezeteken V.

- légfúvat szerepe:

hegesztéskor gázok távozása
hegesztési varrat ellenőrzése
furatot lezárni! (korrózió)

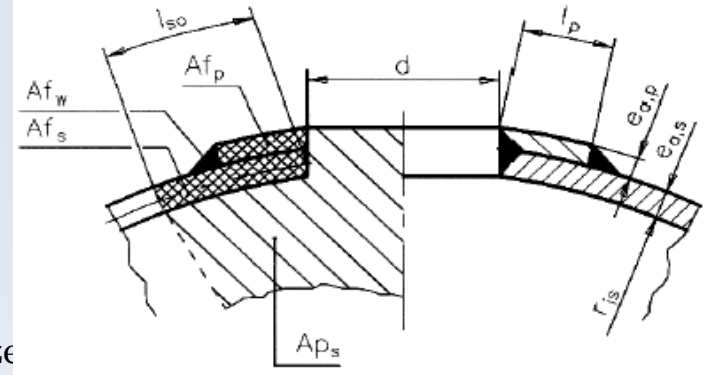
- ✓ Köpeny szilárdságilag szükséges falvastagsága:

- elv: terhelő felületre ható erő =

teherviselő keresztmetszetben ébredő erővel (felület össze

- Terhelő felület: A_p (nyomással terhelt felület)

- Teherviselő felület: A_f (megengedett feszültséggel terhelt felület)



$$P \sum A_{p_i} = \bar{\sigma} \sum A_{f_i}$$

$$(A_{f_s} + A_{f_w})(f_s - 0.5P) + A_{f_p}(f_{op} - 0.5P) + A_{f_b}(f_{ob} - 0.5P) \geq P(A_{p_s} + A_{p_b} + 0.5A_{p_\varphi})$$

$$f_{ob} = \min(f_s, f_b)$$

$$f_{op} = \min(f_s, f_p)$$

- mivel A_p technológiai méretekből adott, ezért A_f módosítandó, amely tartalmazza a hég falvastagságát

- a felületek részletes kifejtésével egy v gyengítési tényező fogalmazható meg:

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot f \cdot v}$$

$$v = f(l_{so}, l_{bo}, d, D, e_{a,b}, e_{a,s})$$

- ✓ Csonkcsatlakozások kialakítása

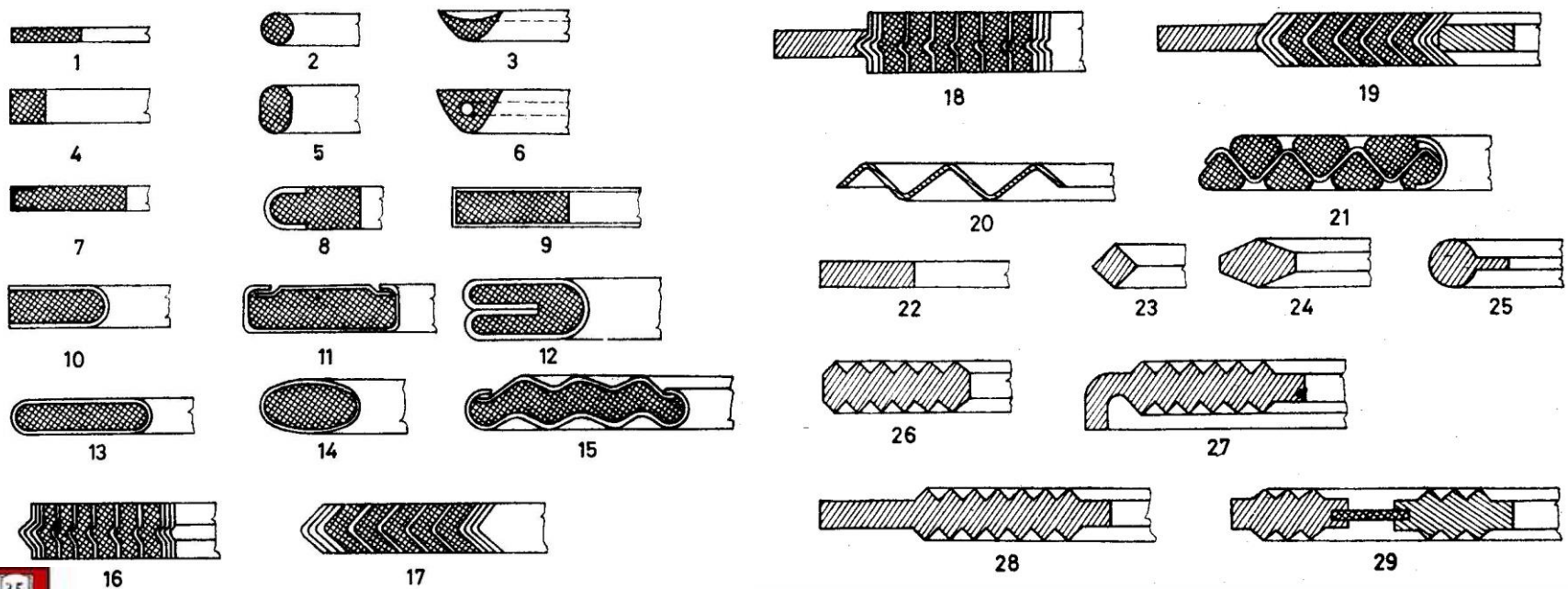
csont, benyúló csont, tárcsa, tárcsa+benyúló csont, erősített csont, kihúzott csont, rugalmas csatlakozás, cseppentőél, gőzbevezetés probléma



Tömítések, karimák I.

✓ Nyugvó tömítések

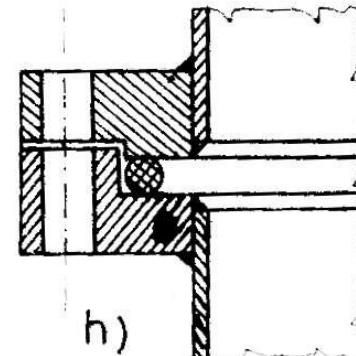
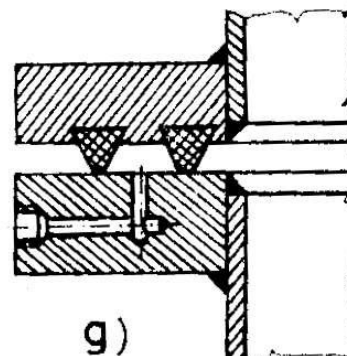
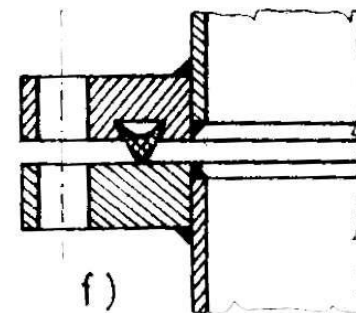
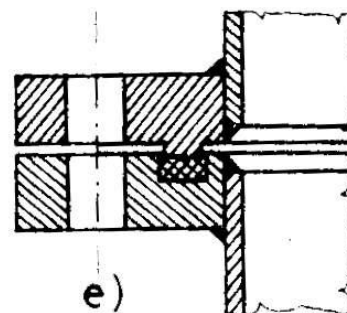
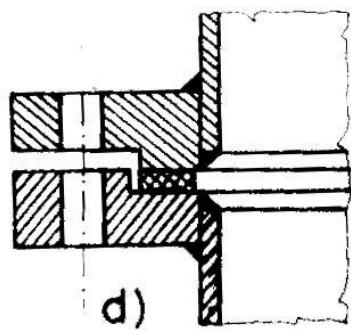
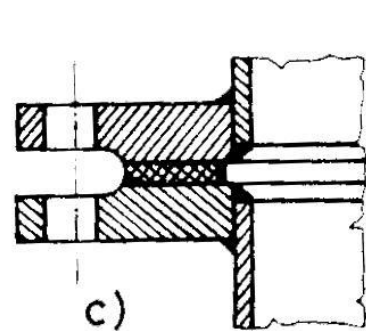
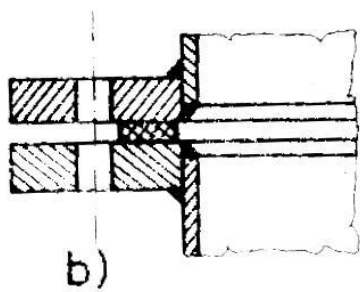
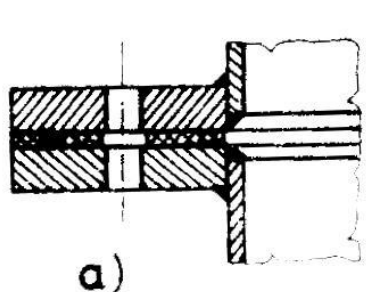
- a készülékek bontható felületei között biztosítja a tömör zárást
- 1-6: lágy tömítések (It, gumi, műanyag lemez, profilos gumi, fonott zsinór, stb.)
- 7-15: részben vagy egészben fémllemez borított lágy tömítés (fém: szilárdság, alaktartósság növelése, átszivárgás megakadályozása)
- 16-19: spiráltömítések vagy lágy tömítőanyag-fémllemez kombináció közepes nyomásra és nagy hőmérsékletre (V alakú fémbetét belső nyomásra; fémgyűrűk központosításra és szilárdságnövelésre)
- 20-29: fémtömítések nagy nyomásra és hőmérsékletre (kis érintkező felület nagy felületi nyomás, az az élek megfolynak)



Tömítések, karimák II.

Tömítőfelületek és tömítések változatai

- a: átmenő tömítés igen lágy tömítőanyaghoz
- f, g: vákuumkészülékekhez
- h: O-gyűrű kismértékű előfeszítés, tömítést a közeg nyomása fejti ki, csavar igénybevétele kicsi



Tömítések, karimák III.

Tömítési tényező:

- üzemi állapotban a tömítés feltétele a felületek közötti p_0 érintkezési nyomás: $P_0 = m \cdot P$
- m tömítési tényező: lágygumi (0.5-1), műanyagok (1.5-3), It lemez (2.25-2.75), spirál fémlemez betéttel (2.5-3), fémgyűrű (4-6.5)

Karima tömítés teherbírás ellenőrzése:

- csavarterhelések:

$$H = \frac{\pi}{4} G^2 P \quad H_G = 2\pi \cdot b \cdot G \cdot m \cdot P$$

szerelési állapotban a minimális csavarerő:

$$W_A = \pi \cdot b \cdot G \cdot y \quad y: \text{min. tömítési nyomás}$$

üzemi állapotban:

$$W_{op} = H + H_G$$

a szükséges csavar keresztmetszet:

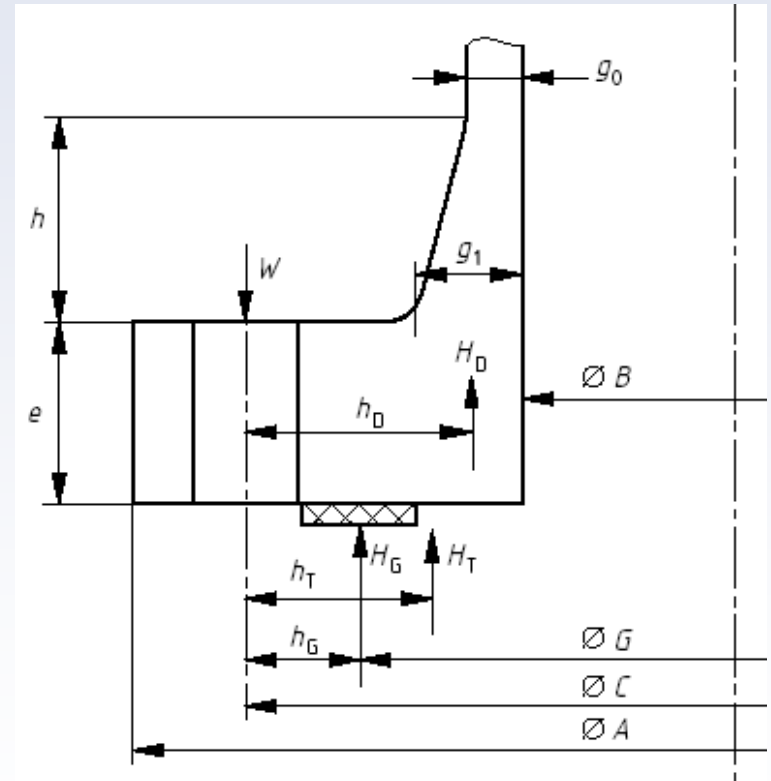
$$A_{B,min} = \max \left\{ \frac{W_A}{f_{B,A}}; \frac{W_{op}}{f_B} \right\}$$

- karima nyomatékok:

$$H_D = \frac{\pi}{4} \cdot B^2 \cdot P \quad H_T = H - H_D$$

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2} \quad h_G = \frac{C - G}{2} \quad h_T = \frac{2C - B - G}{4}$$

$$W = \frac{A_{B,min} + A_B}{2} f_{B,A}$$



Tömítések, karimák IV.

szerelési állapotban: $M_A = W \cdot h_G$

üzemi állapotban: $M_{op} = H_D h_D + H_T h_T + H_G h_G$

✓ Karima feszültségek

szerelési állapot: $M = M_A \frac{C_F}{B}$

üzemi állapot: $M = M_{op} \frac{C_F}{B}$

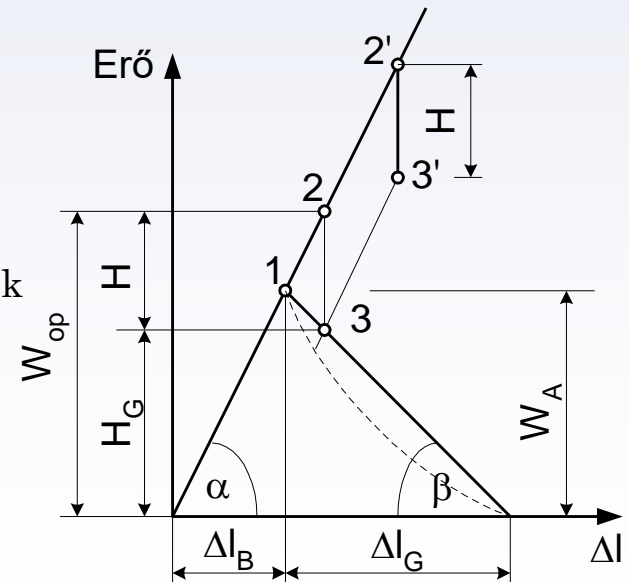
$$C_F = \max \left(\sqrt{\frac{\delta_B}{2d_B + \frac{6e}{m+0.5}}}; 1 \right)$$

$$K = A/B \quad l_0 = \sqrt{B g_0}$$

$$\sigma_H = \frac{\varphi M}{\lambda g_1^2} \quad \sigma_r = \frac{(1.333e\beta_F + l_0)M}{\lambda e^2 l_0} \quad \sigma_\Theta = \frac{\beta_y M}{e^2} - \sigma_r \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \lambda, \beta_F, \beta_V, \varphi \text{ függvények}$$

✓ Tömítés hatásábrája

- a csavarok és a tömítés rugalmas alakváltozása, az üzemi és a tömítőerő közötti összefüggést ábrázolja
- a tömítési nyomás a csavarok között változik a karima és a tömítés rugalmas alakváltozása miatt vagy a tömítőfelületek geometriai egyenetlenségének hatására
- periodikusan lüktető üzemi erő hatására az erők aránya a rugalmassági viszonyok arányában változik
 - meghatározható a minimális tömítőerőhöz és a tömítés maximális teherbírásához tartozó szerelési csavarerő



Tömítések, karimák V.

✓ További tulajdonságok, megfontolások

- relaxáció: a tömítés vagy a működő csavar alakváltozás nélküli feszültségcsökkenése; az It-t 4, a teflon

tömítést 24 óra elteltével ismételten elő kell feszíteni

- tömítések szivárgása: a tömítések anyagán vagy a felületek között átáramló anyagmennyiség

- a karima-igénybevétel csökkentése: az erők hatásvonalának eltolása (pl. kengyeles megoldás zománcozott készülékeknél)

- jellemző karima kialakítások:

laza karima: nem túl nagy nyomás, alakítható anyagok

kötőgyűrűs karima: megmunkált tömítőfelület

hegesztett lapos karima: korlátozott igénybevétel

összetett készülékkarima

hegesztőtoldatos karima

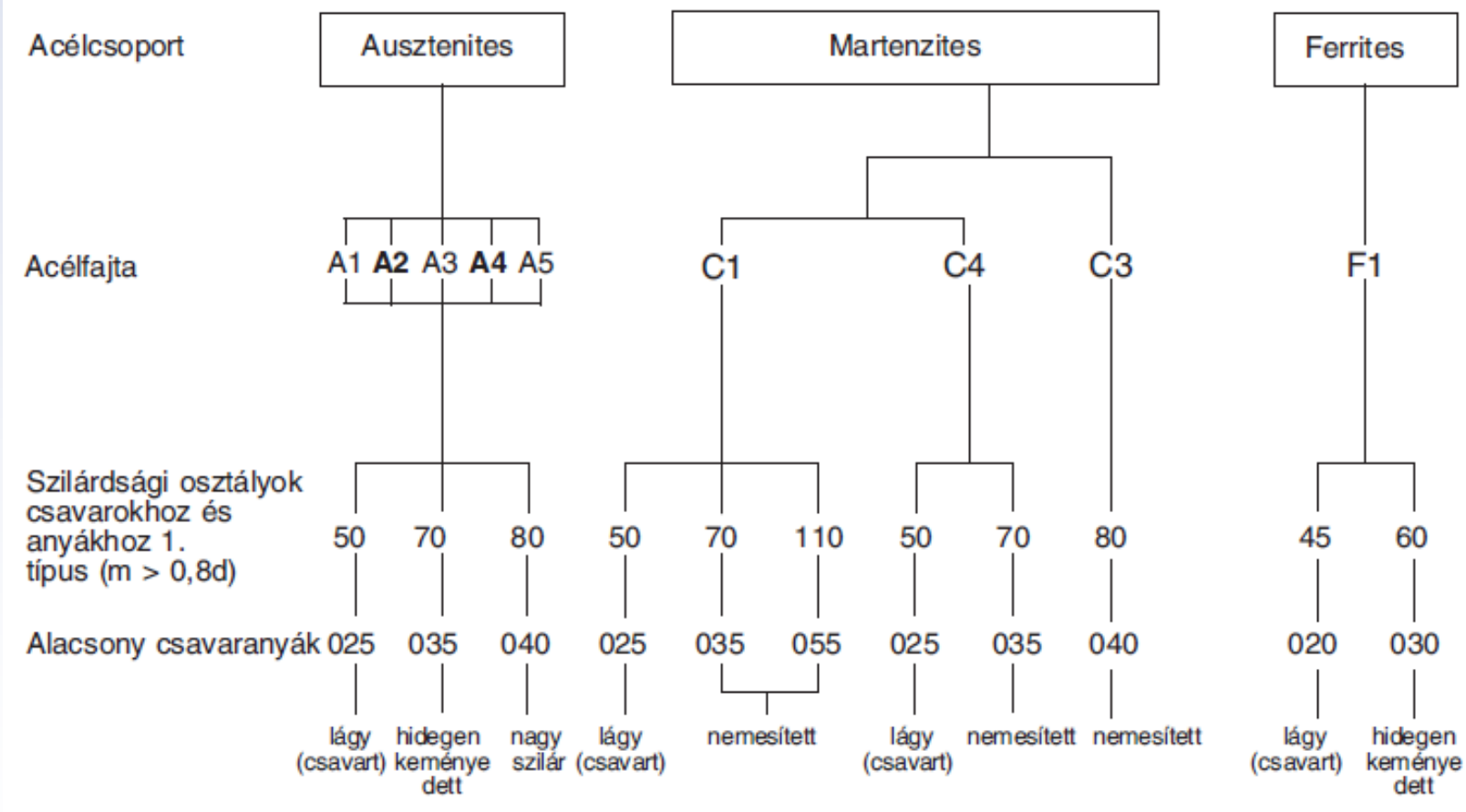
✓ Kötőelemek (DIN EN ISO 898-1)

sub- clause num- ber	Mechanical and physical property	Property class										
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 ^a		9.8 ^b	10.9	12.9
								d ≤ 16mm ^c	d > 16mm ^c			
5.1	Nominal tensile strength, N/mm ² R _m Nenn	300	400		500		600	800	800	900	1000	1200
5.2	Minimum ^{d e} tensile strength, N/mm ² R _m min	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220



Tömítések, karimák VI.

Csavarok és csavaranyák jelölési rendszere a DIN EN ISO 3506 szerint



Tömítések, karimák VII.

Acélcsoport	Nyersanyag-szám.	Nyersanyag megnevezése	Tanácsok
A1	1.4305	X 8 Cr Ni S 18-8	Kénadagolással megfelelő forgácsolhatóság, gyengébb korrózióállóság érhető el, mint az A2 esetén
A2	1.4301 1.4303	X 5 Cr Ni 18-10 X 4 Cr Ni 18-12	Standard acélcsoport átlagos követelményekhez, rozsdamentes
A3	1.4541	X 6 Cr Ti 18-11	
A4	1.4401 1.4404	X 5 Cr Ni Mo 17-12 X 2 Cr Ni Mo 17-12	Standard acélcsoport szigorúbb követelményekhez, túlnyomórészt saválló
A5	1.4571	X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12-2	

Ausztenites acélfajtákból készült kötőelemek mechanikai tulajdonságai

Csavarok					
Acélfajta	Szilárdsági osztály	Átmérő-tartomány d	Húzószilárdság R_m N/mm ² min.	0,2%-folyáshatár $R_{p0,2}$ N/mm ² min.	Szakadási nyúlás A mm min.
A1, A2, A3, A4, A5	50	≤ M 39	500	210	0,6 d
	70	≤ M 24	700	450	0,4 d
	80	≤ M 24	800	600	0,3 d

