

MEREVCŐKÖTEGES HŐCSERÉLŐ RADIÁLIS HŐMÉRSÉKLETPROFILLAL TERHELT CSŐKÖTEGFALÁNAK SZILÁRDSÁGI VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF HEAT EXCHANGER FIXED TUBESHEET STRENGTH LOADED BY RADIAL TEMPERATURE PROFILE

Dr. Siménfalvi Zoltán *

ABSTRACT

This article describes the stresses of heat exchanger fixed tubesheet loaded by radial temperature profile based on measurements and on mechanical model.

Jelen cikk bemutatja a merevcsőköteges hőcserező radiális hőmérsékletprofillal terhelt csőköteg-falában ébredő feszültségek meghatározását méréseken és mechanikai modellen alapuló esetben.

ELŐSZÓ

A csőköteges hőcserezők szilárdsági tervezésére különféle méretezési módszerek, szabványi megoldások léteznek. Szilárdsági szempontból a szerkezet legbonyolultabb eleme a csőkötegfal, amely kényszerkapcsolatban van egyrészt a hengeres köpennyel, másrészt a csőköteggel. A megoldás során Miller [1] által javasolt modellt vizsgáltam kiegészítve a radiális hőmérsékletprofil terhelésével, amely a csőkötegfalat a csőköteg által rugalmasan ágyazott körlemezként modellezi.

A következőkben egy merevcsőköteges hőcserező csőkötegfalában ébredő feszültségek vizsgálatát mutatom be radiális hőmérsékletprofil figyelembevételével.

FESZÜLTSEGEK MEGHATÁROZÁSA RUGALMASAN ÁGYAZOTT LEMEZEK ELVE ALAPJÁN

Miller 1952-ben javasolt méretezési elve nem veszi figyelembe a csőkötegfalában kialakuló hőmérsékletprofil. A csőkötegfal és a köpeny kapcsolódásának két szélső állapota az abszolút merev és a csuklós csatlakozás. A valóságban a kapcsolat – a csőkötegfal robusztus kialakítása miatt – inkább a merev megfogáshoz áll közelebb.

* egyetemi docens, tanszékvezető, ME Vegyipari Gépek Tanszéke

A feladat megoldása során tengelyszimmetrikus terhelést feltételezve a lemez középsíkjának lehajlása szimmetrikus lesz. Feltételezzük, hogy a lemezelemek oldalfelületei síkok maradnak, miközben elfordulnak az alakváltozott síkok a középsíkra merőlegesen maradnak.

A középfelülettől x távolságra lévő szál fajlagos alakváltozásai a következők:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{x(\varphi + d\varphi) - x \cdot \varphi}{dr} = x \cdot \frac{d\varphi}{dr}, \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{2 \cdot \pi(r + x \cdot \varphi) - 2 \cdot \pi \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot r} = x \cdot \frac{\varphi}{r}, \\ \varphi &= -\frac{dw}{dr},\end{aligned}$$

amelyek alapján a belső erők és az alakváltozások közötti összefüggések meghatározhatóak. Ezekből a nyomtatékok:

$$\begin{aligned}M_r &= -B_1 \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right), \\ M_\varphi &= -B_1 \left(\nu \cdot \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right), \\ B_1 &= B \cdot \Psi = \frac{E_f \cdot s_f^3}{12(1 - \nu^2)} \cdot \frac{A - A_1}{A},\end{aligned}$$

ahol

- w a középfelület elmozdulása,
- B_1 a perforált lemez hajlítási merevsége,
- B a tömör lemez hajlítási merevsége,
- Ψ a perforációs tényező,
- E_f a csőkötegfal rugalmassági modulusa,
- s_f csőkötegfal vastagsága,
- ν Poisson tényező,
- A csőkötegfal terület,
- A_1 a csövek által határolt térrész területe,

Az elem egyensúlyi egyenlete a magasabb rendű kis mennyiségek elhanyagolásával:

$$M_r + \frac{dM_r}{dr} r - M_\varphi + Q \cdot r = 0,$$

ahol

Q a felületelem külső terhelését kiegyensúlyozó belső erő.

Differenciális alakban felírva kapjuk a

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{B_1}$$

kifejezést.

Ha az életrőt q megoszló terheléssel helyettesítjük, akkor

$$Q = \int_0^R q \cdot dr.$$

Differenciálás után az alábbi alakot kapjuk rugalmas alátámasztás (N az ágyazási együttható), és radiális hőmérsékletprofil (q(r)) esetén:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{q(r) - N \cdot w}{B_1}.$$

A csőköteggel terhelései a következők:

- q_p belső nyomáskülönbségből származó terhelés,
- q_t a csövek és a köpeny hőtágulás különbségéből származó terhelés,
- q_β a köpeny és a csövek rugalmas, és hőmérséklet okozta alakváltozása következtében a terhelés-csökkenés,
- q_w a csőköteggel deformációja következtében kialakuló terheléscsökkenés.

Kifejtve a terheléseket a differenciálegyenlet gerjesztése az alábbi alakot nyeri:

$$p \cdot \frac{A - A_1}{A \cdot B_1} + k^4 \cdot l \cdot \gamma(r) - k^4 \cdot \beta - k^4 \cdot w,$$

ahol

$$\gamma(r) = \left[(a \cdot r^2 + c) \alpha_c - t_k \cdot \alpha_k \right],$$

$$k = \sqrt[4]{\frac{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot E_c \cdot n \cdot a_c}{E_f \cdot s_f^3 \cdot l \cdot (A - A_1)}},$$

E_c a csövek rugalmassági modulusza,

l a csőhossz fele,

n a csőszám,

a_c egy cső anyagkeresztmetszete,

$\gamma(r)$ a radiális hőmérséklet eloszlás,

a, c a hőmérséklet eloszlás együtthatói,

α_c a csövek hőtágulási együtthatója,

α_k a köpeny hőtágulási együtthatója,

t_k köpenyhőmérséklet,

p egyenértékű nyomás.

Amennyiben a csőköteggel hőmérsékleteloszlása állandó, a feltétel az

$$\int_0^r (a \cdot r^2 + c) dr = \int_0^r d dr$$

összefüggés szerint fogalmazható meg. Elvégezve az integrálást kapjuk az

$$\frac{a \cdot r^3}{3} + c \cdot r = d \cdot r$$

képletet. Tehát ismerve a csőköteggel kialakuló hőmérsékletkülönbséget, meghatározhatjuk az állandó hőmérsékletprofil értékét, vagy fordítva.

A differenciálegyenlet megoldása

A megoldást

$$w = w_0 + w_1$$

alakban keressük, ahol

w_0 a homogén differenciálegyenlet megoldása,

w_1 az inhomogén differenciálegyenlet partikuláris megoldása.

A homogén differenciálegyenlet megoldásával bizonyítható, hogy az egyenlet két másodrendű Bessel-típusú differenciálegyenletre bontható. A Bessel-típusú differenciálegyenletek megoldásának bizonyítására nem térünk ki, a homogén differenciálegyenlet megoldása:

$$w_0 = C_1 \cdot ber(k \cdot r) + C_2 \cdot bei(k \cdot r) + C_3 \cdot ker(k \cdot r) + C_4 \cdot kei(k \cdot r)$$

Szimmetrikus terhelés esetén

$$C_4 = 0,$$

a lemez közepén nem hat koncentrált erő, így

$$C_3 = 0.$$

Az inhomogén differenciálegyenlet megoldását próbafüggvény segítségével végezzük el.

Mivel a terhelés függvénye másodfokú, szimmetrikus függvény, ezért a próbafüggvényt is ilyen alakban vesszük fel:

$$w_1 = m \cdot r^2 + n$$

$$w_1' = 2 \cdot m \cdot r$$

$$w_1'' = 2 \cdot m$$

$$w_1''' = w_1^{IV} = 0$$

A differenciálokat behelyettesítve az egyenletbe kapjuk az inhomogén differenciálegyenlet általános megoldását:

$$w = C_1 \cdot ber(k \cdot r) + C_2 \cdot bei(k \cdot r) + p \cdot \frac{A - A_1}{A \cdot N} + l \cdot \left((a \cdot r^2 + c) \cdot \alpha_c - t_k \cdot \alpha_k \right) - \beta$$

A peremfeltételek figyelembevétele:

Mivel a csőköteggel mereven befogottnak tekintjük, a következő három határfeltétel írható fel:

1. A csőköteggel egyensúlyban van, a rá ható terhelések összege állandó.
2. $r = R$ helyen a deformáció zérus.
3. A befogás következtében a perem szögelfordulása nulla.

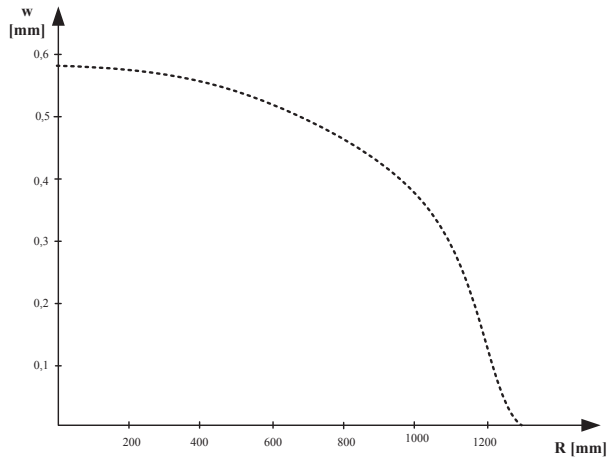
Az M_r és M_ϕ nyomatékok és a σ_r , σ_ϕ feszültségek számításához elő kell állítani az elmozdulás függvény és a Bessel-függvények első és második deriváltját. A főfeszültségek az alábbi alakot nyerik:

$$\sigma_r = \frac{E_f \cdot s_f}{2(1 - \nu^2)} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right)$$

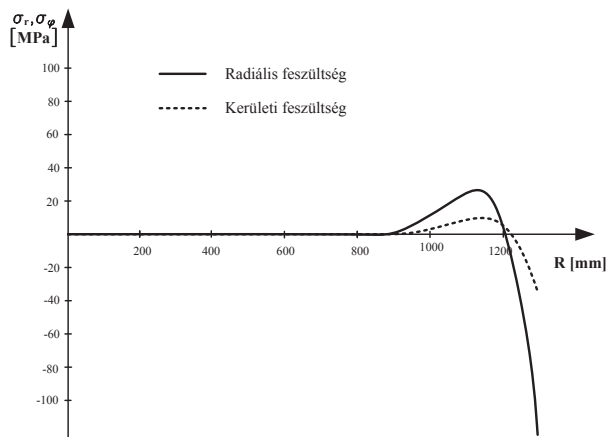
$$\sigma_{\varphi} = \frac{E_f \cdot s_f}{2(v^2 - 1)} \left(v \cdot \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right).$$

A következő ábrákon a számított elmozdulásmező, valamint a radiális és a kerületi irányú feszültségeloszlás látható a következő feltételekkel:

- csőkötegfal hőmérséklet: $t_c = 98,5 \text{ }^\circ\text{C}$,
- köpeny hőmérséklet: $t_k = 60 \text{ }^\circ\text{C}$,
- nyomásterhelés: $p = 0 \text{ barg}$.



1. ábra Számított elmozdulásmező

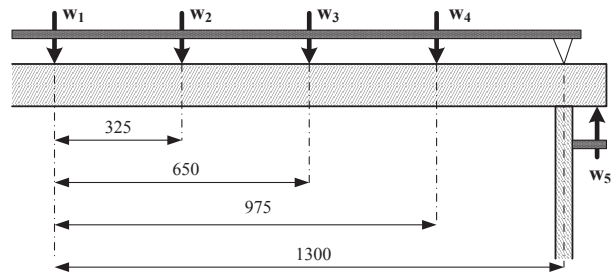


2. ábra Számított feszültségmező

FESZÜLTSEGEK MEGHATÁROZÁSA MÉRÉSI EREDMÉNYEK FELHASZNÁLÁSÁVAL

A csőkötegfal normális irányú elmozdulása különböző nyomás és hőmérséklet terhelések hatására vizsgálható.

A rögzített hőmérséklet értékek segítségével meghatározható a csövek és a köpeny közti hőmérsékletkülönbség. Adott időpontban a csőkötegfal felületén mért hőmérsékletekből megállapítható a radiális hőmérsékleteloszlás, illetve ebből a fiktív állandó hőmérsékleteloszlás.



3. ábra Csőkötegfal mérés összeállítása

A 3. ábra mutatja be egy vinil-klorid technológiában üzemelő csőköteges reaktoron végzett vizsgálat elrendezését. A merevcsőköteges reaktor 2600 mm köpeny-átmérőjű, csőkötegfala 1027db 57x2,75 méretű 3500 mm hosszú csőköteget tartalmaz.

A kamrát eltávolítva lehetőség nyílt a csőkötegfal radiális elmozdulásának (w) mérésére. Az elmozdulás mérőfejek (5db) a köpeny-csőkötegfal csatlakozásra támaszkodó merev tartóra (U160) van erősítve. A mérőfejek pozíciójában hőmérséklet mérés is történt.

Az elmozdulás mérés eredményei alapján, a mért pontok függvény közelítésével, majd a függvény deriváltjainak előállításával meghatározható a radiális és a kerületi irányú feszültségeloszlás.

A mért pontok közelítését a végeselemes számításkor alkalmazott 8-ad fokú Legendre-polinommal végeztem, amelyet a legkisebb négyzetek módszerével illesztettem a mérési pontokra. A közelítő függvényt

$$\tilde{f}(x) = \underline{N}(x) \cdot \underline{q}$$

alakban keressük, ahol

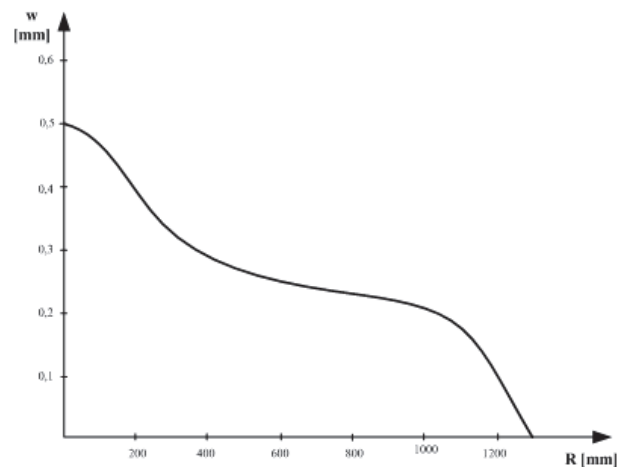
$\underline{N}(x)$ az approximációs függvények mátrixa,

$\underline{q}(x)$, az ismeretlen együtthatók vektora.

A közelítés hibáját az alábbi integrál fejezi ki:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \int_a^b (-f(x) + \tilde{f}(x))^2 dx$$

ahol a , b a közelítés intervalluma.



4. ábra Közelített elmozdulásmező

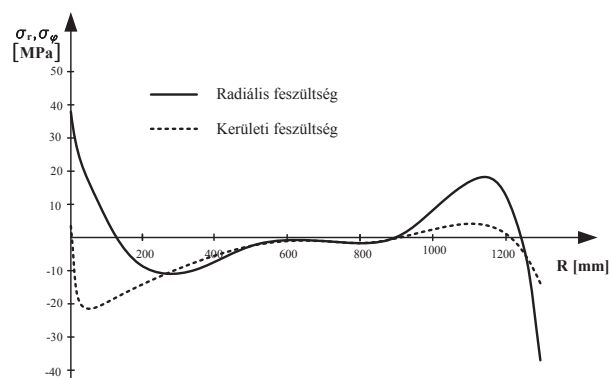
Az I integrál minimumát az első variáció zérus értékénél kapjuk. Az megoldást a Gauss-féle numerikus integrálás módszerével keressük, amely szerint tetszőleges $F(x)$ függvényre x_1, x_2 határok közötti integrálja az alábbi függvénnyel számítható

$$\int_{x_1}^{x_2} F(x)dx = \int_{-1}^1 F(\xi)d\xi = \sum_{i=1}^{NG} W_i \cdot F(\xi_i),$$

ahol W_i a Gauss-pontokban értelmezett súlyfaktorok.

A 4. ábrán a mért pontokra illesztett közelített elmozdulás függvény látható.

Az elmozdulás függvény deriváltjainak előállítása után meghatározható a radiális és a kerületi irányú feszültségeloszlása (5. ábra).



5. ábra Közelített feszültségmező

KÖVETKEZTETÉSEK

A mérésekből és számításokból egyaránt következik, hogy a csőkötegfal általános maximális igénybevétele a köpenyhez közelebb eső övezetben található. Tehát szilárdsági okokból a meghibásodás a csőkötegfal külső sugarának $0.6 \leq r \leq R$ szakaszán nagyobb valószínűséggel következik be, mint annak belső területén.

A számítási eljárás alapjául szolgáló Miller elmélete szerint a csőkötegfalat rugalmasan ágyazott, állandó falvastagságú, perforált körlemeznek tekinthetjük, melyet q egyenletesen megoszló erőrendszer terhel. A mérések bizonyították, hogy a csőkötegfalban, így a csövekben a hőterhelés, következésképpen a csövek hőmérséklete sugárirányban változik. Ennek a következménye viszont az, hogy a csőkötegfalnak a hőhatás okozta terhelése a sugár mentén nem állandó.

A radiális irányban változó hőmérsékletprofil figyelembevétele módosítja a csőkötegfalban ébredő maximális feszültség nagyságát, és eltolja annak helyét a hőcserélő közepe felé. Így adott esetben a feszültségek, és ezzel az alakváltozások jellege is megváltozik, a csőkötegfal veszélyes zónájában a képlékeny alakváltozás helyett rugalmas alakváltozás jelentkezik.

A radiális hőmérsékletprofil megléte a magyarázata annak, hogy az elvileg – csövek és a köpeny különböző

hőmérséklete okozta – hőfeszültség mentes úszófejes hőcserélő csőkötegfalában is ébred hőfeszültség.

A számítások során a csőkötegfal és a köpeny csatlakozásánál merev befogást feltételezünk. Említettem, hogy egy csőkötegfal csatlakozásánál nem állíthatjuk teljes bizonyossággal, hogy az mereven befogott, vagy csuklósan megtámasztott. A valóság a két határeset között helyezkedik el. Ezt bizonyítja a w_5 elmozdulás érzékelő által regisztrált elmozdulás, melyet az elméleti és a valóságban tapasztalt elmozdulások és feszültségek összehasonlíthatósága érdekében figyelmen kívül hagytam.

A feszültségábrák összehasonlítása során a mért eredményekből megállapítható, hogy a köpeny és a csőkötegfal csatlakozásánál ébred a legnagyobb feszültség, ami kielégíti a merev befogás elméleti alapjait.

A mérési eredményekre alapozva megállapíthatjuk, hogy a csőkötegfal (és a csövek) hőmérséklete radiális irányban változik. Ideális esetben az eloszlás körszimmetrikus, a valóságban azonban ettől eltérő.

Megállapítható, hogy a radiális irányú hőmérséklet változás ($\sim 10^\circ\text{C}$) esetén a csőkötegfal általános feszültségét csak kis mértékben módosítja. Nagyobb hőmérsékletkülönbségek esetén ezek a hőfeszültségek önmagukban még mindig nem játszanak döntő szerepet, de más járulékos (pl. gyártástechnológia következtében) kialakuló feszültségek szuperpozíciójával már számottevőek lehetnek.

Összességében megállapítható, hogy a csőköteges hőcserélők és reaktorok tervezésekor célszerű figyelembe venni a radiális hőmérsékletprofil.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] MILLER K. A. G.: The Design of Tube Plates in Heat Exchangers. Mechanical Engineers Series B, Vol 1. 1952.
- [2] PÁCZELT I.: A végesseleemes módszer modellezési kérdései, hibaanalízis. Miskolci Egyetemi Kiadó, 1994.
- [3] KERESZTES J., KISS L.: A csőkötegfal méretezésének egyes kérdéseiről. Borsodi Vegyipari Napok előadás 1983.
- [4] KERESZTES J.: A csőköteges hőcserélők méretezésének és tervezésének egyes kérdéseiről. Borsodi Vegyipari Napok előadás 1970.