



HEGESZTÉS



A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

**1990
NOVEMBER**

• BUDAPEST •

ISSN 0013-788X



Bordázott cellaszerkezetű lemezek optimális méretezése a hegesztési költségek figyelembevételével

DR. FARKAS JÓZSEF — DR. JÁRMAI KÁROLY*

Az optimális méretezést egy körben csuklós kerületű, megoszló terhelésű, négyzetszimmetrikus hegesztett cellalemez példáján ismertetik. Az optimálást a Rosenbrock-féle hüllőlémb-algoritmusra kidolgozott számítógépi programmal végezték.

A bordázott lemezek két alapvető típusa az egyoldalt bordázott és a cellaszerkezetű lemez. Az egyoldalt bordázott lemezek gyártása egyszerűbb, viszont a cellalemezek csavarási merevsége lényegesen nagyobb [3, 4]. E tanulmányban a cellalemezek költségminimumra történő méretezésével foglalkozunk.

A cellalemezek nagy merevségük miatt széles körben alkalmazhatók pl. hajók kettős fenékszerkezete, repülőgép-szárnyszerkezetek, tartály-úszótetők, bányászati fűrőpajzsok, hídpályalemezek, földmunkagépek vázszerkezete, gépészeti szerelőpádiumok, nagy téráthidaló födém- és tetőszerkezetek esetében.

Többek között pl. Evans és Shanmugam foglalkozott cellalemezek analízisével hajószerkezeti alkalmazás szempontjából [1, 13]. A [2] tanulmány is foglalkozott már cellalemezek költségminimumra történő méretezésével, a jelen tanulmányban azonban részletesebb költségfüggvényt alkalmazunk Pahl és Beelich [11] módszerével, amelyet már többféle szerkezet költségminimumálására használtunk pl. esőszerkezetű rácsos tartók [6, 7, 8], illetve hegesztett szekrényszelvényű hajlított tartók [9] esetében.

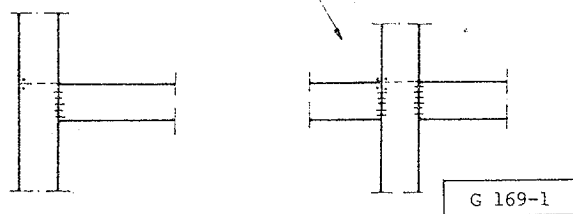
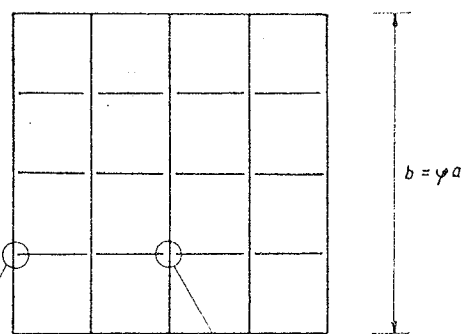
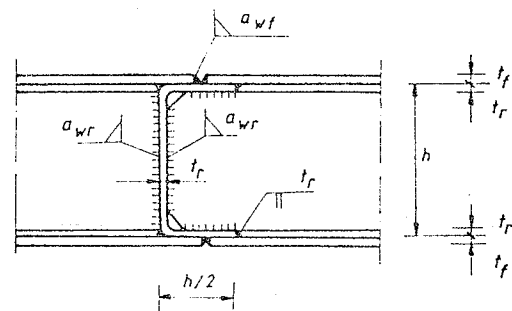
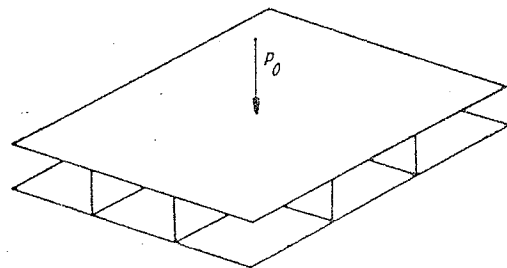
A gyártási költségek részletesebb számításán kívül fontos szempont, hogy az optimális szerkezeti megoldások paramétereit a költségtényezők széles értékterületében vizsgáljuk, mert az anyag- és gyártási költségek az időben és a gyártó országtól, illetve vállalattól függően is erősen változnak.

Költségfüggvény

A költségfüggvényt, amelynek minimumát keressük a méretezési feltételek teljesítése mellett, itt négyzetszimmetrikus cellalemezekre írjuk fel.

Feltételezzük, hogy a cellalemez gyártása a következőképpen történik. Előbb hidegen hajlított U-szelvényekből vagy — nagyobb szerkezeti méretek esetén — hegesztett I-szelvényekből álló, kétirányú bordarács készül a csomópontok gondos összehesztésével, majd erre kétoldalt $a \times a$ méretű négyzetlemezablák kerülnek felhegesztésre kívülről, körbemenő sarokvarratokkal (1. ábra).

A bordarács egyik irányban végigmenő, másik irányban a csomópontoknál megszakított szelvényekből áll az 1. ábra szerint. A szélső boráknál a csomópontok kialakítása más, mint a közbülső csomópontokban.



1. ábra. Cellalemez és csomópontjainak kialakítása

Egy borda keresztmetszeti területe — állandó t_r vastagságot és $h/2$ övlemezszélességet véve — $2ht_r$. Bevezetjük a $\varphi = b/a$ bordaosztás-számot, amely csak egész számú lehet.

A bordák száma egyirányban $\varphi + 1$. Egyforma keresztmetszetű bordákat véve a teljes cellalemez térfogata

* Miskolci Egyetem szállítóberendezések tanszéke

$$V = 2b^2t_f + 4bht_r(\varphi + 1) \quad (1)$$

b a lemezoldalhossz, t_f a fedőlemezek vastagsága. A teljes költség az anyag- és gyártási költségekből áll:

$$K = K_a + K_g = k_a \rho V + k_g \sum_i T_i \quad (2)$$

k_a [\$/kg] és k_g [\$/min] anyag-, illetve gyártási költségtényezők, $\rho = 7850$ kg/m³ az acélanyag sűrűsége, T_i gyártási idők percben. Itt három gyártási időt veszünk figyelembe:

a) Előkészítési, összeállítási és összefűzési idő:

$$T_1 = C_1 \delta \sqrt{\rho V} \sqrt{\kappa}, \quad C_1 = 1,0 \text{ min/kg}^{0,5} \quad (3)$$

δ a bonyolultsági tényező, κ a szerelt elemek száma.

Itt $\delta = 3$ értéket veszünk fel, a δ ajánlott értékei a [7]-ben vannak részletezve. A szerelt elemek darabszáma $2\varphi^2$ számú fedőlemez, $\varphi(\varphi - 1)$ számú belső borda és $\varphi + 3$ számú szélső borda esetén $\kappa \approx 3(\varphi^2 + 1)$. Így

$$T_1 [\text{min}] = 3 \sqrt{\rho V} \sqrt{3(\varphi^2 + 1)} = 460,38028 \sqrt{V} \sqrt{\varphi^2 + 1} \quad (4)$$

V [m³]-ben számítandó.

) Hegesztési idő:

$$T_2 = \sum_i C_{2i} a_{wi}^{1,5} L_{wi} \quad (5)$$

kézi ívhegesztésre $C_2 = 0,80$ min/(mm^{1,5} × m)

CO₂-hegesztésre $C_2 = 0,50$ min/(mm^{1,5} × m)

a_w [mm] a varratméret, L_w [m] a varrathossz.

Itt feltételezzük, hogy a bordarács-csomópontokat kézi ívhegesztéssel hegesztjük össze, a fedőlemezeket a bordarácsra CO₂-hegesztéssel erősítjük fel.

A fedőlemez-lehegesztő varratok hossza

$$L_{wf} = 2\varphi^2 \cdot 4b/\varphi = 8b\varphi$$

$$T_{2f} = C_{2f} a_{wf}^{1,5} L_{wf} = 0,50 a_{wf}^{1,5} \cdot 8b\varphi = 4b\varphi (700t_f)^{1,5} \quad (6)$$

mert $a_{wf} = 0,7t_f$, de a t_f [m]-ben, az a_{wf} [mm]-ben helyettesítendő.

A csomópontok hegesztési ideje

$$T_{2r} = 0,8 \{ (\varphi - 1)^2 [4h a_{wr}^{1,5} \times 2h t_r^{1,5}] + 4\varphi [2h a_{wr}^{1,5} + h t_r^{1,5}] \} \quad (7)$$

mivel a belső csomópontok száma $(\varphi - 1)^2$, a külsőké pedig $(\varphi + 1)^2 - (\varphi - 1)^2 = 4\varphi$. Feltételezzük, hogy van olyan hidegen hajlított U szelvény, amelynek h és t_r méretei az optimálás során kiadódnak. Amennyiben ilyen szelvény az MSZ 4346—81 szerint nincs, akkor a gyártó vállalat saját gépén hajlíthat ilyen szelvényt vagy helyettesítheti hegesztett I szelvénnel. A hegesztett I szelvények nyakvarrathegesztési költségével itt nem számolunk.

Az összes hegesztési idő a (6) és (7) összegezésével

$$T_2 [\text{min}] = 4b\varphi a_{wf}^{1,5} + 1,6h(\varphi^2 + 1)[2a_{wr}^{1,5} + (1000t_r)^{1,5}] \quad (8)$$

itt a_{wf} és a_{wr} [mm]-ben, b , h és t_r [m]-ben helyettesítendő.

Előbb folytonos változókkal optimálunk $a_{wf} = 700t_f$ és $a_{wr} = 700t_r$ helyettesítéssel, az ezt követő diszkrétizálás során a_{wf} és a_{wr} értékeit kerekítjük.

c) Az elektródacserék és a varratleisztítás ideje:

$$T_3 = C_3 \sqrt{\delta} \sum_i a_{wi}^{1,5} L_{wi}$$

$$C_3 = 1,2 \text{ min}/(\text{mm}^{1,5} \times \text{m}) \quad (9)$$

A (8)-nak megfelelően, $\delta = 3$ értékkel számolva

$$T_3 [\text{min}] = 2,07846 \{ 8b\varphi a_{wf}^{1,5} + 2h(\varphi^2 + 1) \times [2a_{wr}^{1,5} + (1000t_r)^{1,5}] \} \quad (10)$$

A teljes célfüggvényt a (2) alapján a következő alakban írjuk fel:

$$\frac{K}{k_a} [\text{kg}] = \rho V + \frac{k_g}{k_a} (T_1 + T_2 + T_3) \quad (11)$$

Megjegyezzük, hogy a Pahl—Beelich-féle módszer [11] az elektróda anyagköltségére is ad képletet, ez viszont a jelen esetben elhanyagolható. Festési, korrózióvédelmi, szerelési és szállítási költségekkel itt nem számolunk.

Mivel az acéllemez-költségtényező $k_a = 0,5—1,5$ \$/kg, a gyártási költségtényező $k_g = 0,25—0,50$ \$/min között változónak vehető, így az optimálást a $k_g/k_a = 0—1,0$ értéktartományban végezzük, a gyártási költség hatásának érzékeltetésére $k_g/k_a = 0; 0,25; 0,50; 0,75$; és 1,0 értékeket felvéve. A 0 érték a térfogatminimumra való méretezésnek felel meg.

Méretezési feltételek

Feszültségi feltétel

Körben csuklós kerületű, egyenletesen megoszló terhű négyzetes cellalemezt vizsgálva a lemez középső felső fedőlemez-mezejében keletkező legnagyobb normálfeszültség két részből áll: a teljes lemez hajlításából és a fedőlemez-mező helyi hajlításából létrejövő feszültségből.

A teljes cellalemez hajlításából keletkező max. feszültség:

$$\sigma_{\max} = \frac{4,79 \times 10^{-2} p b^2}{B_1} E_1 e_1;$$

$$E_1 = \frac{E}{1 - \nu^2};$$

$$e_1 = \frac{h}{1 + \nu}$$

$$B_1 = E_1 h^2 t_f \frac{\nu}{1 + \nu}$$

E_1 a Poisson-számmal módosított rugalmassági modulus, e_1 a szélső szál távolsága, B_1 hajlítási merevség. Tehát

$$\sigma_{\max} = \frac{4,79 \times 10^{-2} p b^2}{h t_f \nu} \quad (12)$$

itt p az egyenletesen megoszló teherintenzitás, a külső teher p_0 értékét a saját tömeg közelítő

figyelembevételével 1,1-el szorozva számítjuk:
 $p=1,1 p_0$.

A $\psi = a_e/a$ a nyomott lemez együttdolgozó lemezszélesség-viszonyszáma. A módosított Faulkner-képleteket alkalmazva, a rugalmas szakaszon, ha

$$\lambda_p \geq \lambda_{p0} = 1,9014 \sqrt{\sigma_{\max}/R_e};$$

$$R_e = 0,6 R_y$$

(R_y a folyáshatár)

$$\psi = \frac{2}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_p^2} - \frac{2\eta}{\vartheta - 2\eta};$$

$$\lambda_p = \vartheta \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{E}};$$

$$\vartheta = \frac{a}{t_f};$$

$$\eta = 3;$$

a képlékeny zónában, ha $\lambda_p \leq \lambda_{p0}$

$$\psi = 1 - (1 - \psi_0) \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_{p0}} \right)^2;$$

$$\psi_0 = \frac{2}{\lambda_{p0}} - \frac{1}{\lambda_{p0}^2} - \frac{2\eta}{\vartheta_0 - 2\eta};$$

$$\vartheta_0 = 1,9014 \sqrt{\frac{E}{R_e}}$$

A ψ képletében a harmadik tag a hegesztésből visszamaradt nyomófeszültségek hatását fejezi ki.

Mivel σ_{\max} és ψ kölcsönösen függenek egymástól, az iteráció elkerülése céljából, rugalmas zónát feltelezve, a ψ képletéből σ_{\max} -t kiküszöböljük, másodfokú egyenlet megoldásával:

$$\psi = Y_0 + \sqrt{Y_0^2 - Z_0}$$

$$Z_0 = \frac{Z_2^4 Z_3^2}{(1 + Z_2^2)^2}; \quad Z_1 = \frac{4,79 \times 10^{-2} p b^2}{h t_f} \quad (13)$$

$$Z_2 = \frac{b}{\varphi t_f} \sqrt{\frac{Z_1}{E}}; \quad Z_3 = \frac{6}{\frac{b}{\varphi t_f} - 6}$$

A fedőlemez-mező közvetlen hajlításából származó maximális normálfeszültség, a lemezmezőt négy szélén befogott izotróp lemezként számolva:

$$\sigma_{f\max} = \frac{5,13 \times 10^{-2} p_0 a}{t_f^2/6} = 0,3078 p_0 \left(\frac{b}{\varphi t_f} \right)^2 \quad (14)$$

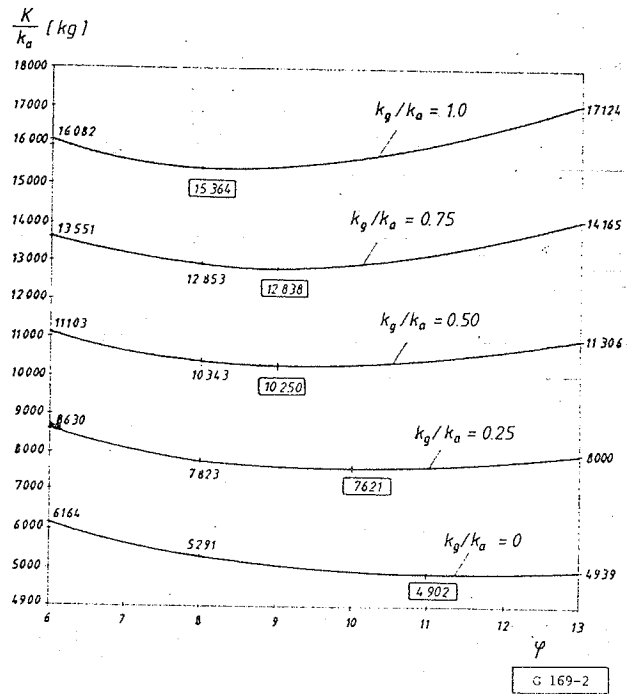
A teljes feszültség tehát a (12) és (14) alapján

$$\sigma_{\max} + \sigma_{f\max} \leq R_{adm} \quad (15)$$

ahol R_{adm} a megengedett vagy határfeszültség.

Nyírási horpadási feltétel a bordákra

Ez azt fejezi ki, hogy a bordászelvény gerinclemezeiben, a kerülettámasznál keletkező nyírófeszültség legyen kisebb, mint a nyírási horpadásra megengedett feszültség:



2. ábra. Kerekítetlen optimális méretekkel számított K_{\min}/k_a értékek a bordaosztásszám függvényében különböző k_g/k_a viszonzszámokra

$$\tau_{\max} = \frac{0,42 p b a}{h t_r} \leq \frac{5,34 \pi^2 E_1}{12 \gamma_b} \left(\frac{t_r}{h} \right)^2 \quad (16)$$

Átalakítva, $\gamma_b = 1,35$ biztonsági tényezővel, $\nu = 0,3$ értékkel

$$\frac{0,12923 p b^2 h}{E \varphi t_r^3} \leq 1 \quad (17)$$

Lehajlási feltétel

$$w_{\max} = \frac{4,06 \times 10^{-3} p_0 b^4 (1 + \psi)}{E^2 h^2 t_f \psi} \leq w^* = c^* b \quad (18)$$

ahol c^* értéke attól függ, hogy milyen merevségi követelményt támasztunk a lemezzel szemben. Magasépítési szerkezeteknél $c^* = 1/300$, míg gép-szerkezeteknél $c^* = 1/10\,000$ előírása is indokolt lehet.

Lemezvastagság-korlátozási feltétel

A vetemedésmentes gyártás érdekében szükséges megszabni a t_0 legkisebb lemezvastagságot:

$$t_f \geq t_0$$

$$t_r \geq t_0 \quad (19)$$

Szám példa optimális méretezésre

A numerikus számítógépes optimalást az alábbi adatokra végezzük:

$b = 8$ m; $p_0 = 5$ kN/m²; $R_{adm} = 120$ MPa = $1,2 \times 10^8$ kN/m²; $c^* = 1/2000$; $E = 2,06 \times 10^8$ kN/m²; $t_0 = 2$ mm.

Mivel a φ csak kerek értékeket vehet fel, az optimalást $\varphi = 6 - 13$ értékek között minden kerek értékre külön végezzük el, $k_g/k_a = 0; 0,25; 0,50; 0,75$ és $1,0$ értékekre.

A különböző k_g/k_a viszonyszámokhoz kapott optimális kerekített méretek és jellemzők

k_g/k_a	φ_{opt}	h	t_f	t_r (mm)	a_{wf}	a_{wr}	K/k_a (kg)
1	9	250	4	2	3,0	1,5	17 177
0,75	9	260	4	2	3,0	1,5	14 287
0,50	10	280	4	2	3,0	1,5	12 331
0,25	12	300	3	2	2,5	1,5	8 441
0	12	300	3	2	2,5	1,5	4 974

Az optimalizálást a Rosenbrock-féle hillelimb-algoritmusra kidolgozott számítógépi programmal végeztük [10, 12].

A kerekítetlen értékekkel számított eredményeket a 2. ábra mutatja. A 2. ábrán feltüntetett eredmények alapján a különböző k_g/k_a viszonyszámokra meghatározható az optimális osztásszám. A minimális K/k_a értékeket bekeretezéssel jelöltük meg. Összehasonlító számítások számára realisabb a kerekítetlen optimális értékeket alapul venni. A Rosenbrock-féle módszert kiegészítettük egy diszkretizálási programrészsel, amely az optimális méretekhez közeli kerekített értékekből választja ki a legkisebb K/k_a értéket adó méretkombinációt. A következő kerek értékekkel számoltunk:

h (m): 0,1—0,6, 0,01-es lépcsőkkel,

t_f, t_r (mm): 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6...10,

a_{wf}, a_{wr} (mm): 1,5; 2; 2,5; 2,5; 3; 3,5.

A kerekített t_f és t_r értékekhez tartozó a_{wf}, a_{wr} varratméreteket úgy számítottuk ki, hogy 0,7 t_f , 0,7 t_r értékekkel felfelé kerekítettük.

A táblázat a kerekített méretű optimális megoldások adatait tünteti fel.

Következtetések

1. Az optimális bordaosztásszám függ a gyártási költségektől, számpéldánkban $k_g/k_a=1$ -hez 8—9, $k_g/k_a=0$ -hoz 11—12 osztásszám az optimális.

2. Kerekítetlen optimális méretekkel számolva, $k_g/k_a=1$ esetében, a 8 osztású, költségre optimális lemez és a 11 osztású, térfogatra optimális lemez költsége közötti különbség $100/(16\ 099 - 15\ 364)/15\ 364=5\%$, tehát ilyen mértékű a költségtakarítás, ha térfogatminimum helyett költségminimumra méretezünk.

3. A gyártási költség aránya a teljes költséghez $k_g/k_a=1$ és 8 osztás esetében $100 \times 10\ 040/15\ 364=65\%$, tehát a cellalemezeknél a gyártási költségarány igen nagy. Pl. rácsos csőszerkezeteknél vagy

hegesztett szekrényszelvényű tartónál ez az arány csak kb. 25—30%.

4. A felvett számpélda esetében a méretezési feltételek közül a normálfeszültségi feltétel és a lemezvastagság-korlátozási feltétel bizonyult aktívoknak.

5. Minél nagyobb a k_g/k_a viszonyszám, a 2. ábra szerint annál laposabb a költségfüggvény a bordaosztásszám függvényében. A költségfüggvény érzékenysége az osztásszám változtatására a következő adatokkal jellemezhető: ha az osztásszám 8 és 11 között változik, azaz 27%-kal, akkor a célfüggvény változása $k_g/k_a=1$ esetében $100(16\ 001 - 15\ 364)/15\ 364=4\%$, $k_g/k_a=0$ esetében pedig $100(5291 - 4902)/4902=8\%$.

I R O D A L O M

- [1] Evans, H. R.—Shanmugam, N. E.: Simplified analysis for cellular structures. J. Struct. Eng. ASCE 110 (1984) No. 3. p. 531—543.
- [2] Farkas, J.: Minimum cost design of welded square cellular plates. Publ. Techn. Univ. Miskolc Sér. C. Machinery 37 (1982) p. 111—130.
- [3] Farkas, J.: Fémszerkezetek. Egyetemi tankönyv. 2. kiadás. Budapest, Tankönyvkiadó, 1983.
- [4] Farkas, J.: Optimum design of metal structures. Bp. Akadémiai Kiadó — Chichester, Ellis Horwood, 1984.
- [5] Farkas, J.: Discussion to „Simplified analysis for cellular structures” by Evans, H. R. and Shanmugam, N. E. J. Struct. Eng. ASCE 110 (1984) p. 531—543. J. Struct. Eng. ASCE 111 (1985) No. 10. p. 2269—2271.
- [6] Farkas, J.: Consideration of fabrication costs in the optimum design of welded tubular trusses. IIW—Doc. XV.—677—88. Vienna, 1988.
- [7] Farkas, J.: Négyzetcsövekből hegesztett rácsos tartók optimális méretezése költségminimumra fáradási feltételekkel. Géptervezők VII. országos szemináriuma. Előadások. Miskolc, 1989. GTE.
- [8] Farkas, J.: Minimum cost design of tubular trusses considering buckling and fatigue constraints. Symposium Tubular Structures. Lappeenranta University of Technology, Finland, 1989. Preprints. p. 7.08—9.
- [9] Farkas, J.: Fabrication aspects in the optimum design of welded structures. IIW—Doc. XV.—725—90. Montreal, 1990.
- [10] Jármai, K.: Single- and multicriteria optimizer as a tool of decision support system. Computen in Industry 11 (1989) p. 249—266.
- [11] Pahl, G.—Beelich, K. H.: Kostenwachstumsgesetzes nach Ähnlichkeitsbeziehungen für Schweissverbindungen. VDI-Berichte Nr. 457. Düsseldorf, 1982. p. 129—141.
- [12] Rosenbrock, H. H.: An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer J. 3 (1960) No. 3. p. 175—184.
- [13] Shanmugam, N. E.—Evans, H. R.: A grillage analysis of the nonlinear and ultimate load behavior of cellular structures under bending loads. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 71 (1981) Part 2. p. 705—719.