

KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

OPTIMAL DESIGN OF A COMPOSITE SANDWICH STRUCTURE

Dr. Kovács György*

ABSTRACT

This study shows the optimization method of a new complex structural model [laminated carbon fiber reinforced plastic (CFRP) deck plates with polystyrene foam (EPS) inner layer]. The structure was designed for both minimal cost and minimal weight taking into consideration 6 design constraints.

1. BEVEZETÉS

A kompozitok több szempontból fontos anyagok a mérnöki gyakorlatban, a műszaki célú szerkezeti anyagok legkorszerűbb családját képezik. A tulajdonságok olyan széles skálájával rendelkeznek, melyek más anyagokkal elérhetetlenek, mint például a nagy szilárdság, kis sűrűség, korrózióval és vegyi anyagokkal szembeni ellenállás, kedvező hajlítási merevség, jó rezgéscsillapítás, esztétikus megjelenés.

A kompozitokat – ezen tulajdonságaiknak köszönhetően – jelenleg is számos iparágban (űrkutató, hadiipar, járműipar, építőipar, gépipar, vegyipar, egészségügy) alkalmazzák.

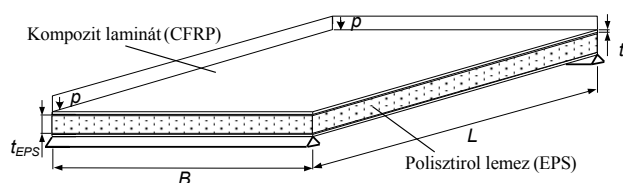
Számos szakirodalom foglalkozik a szendvicsszerkezetek vizsgálatával, tervezésével és alkalmazásával, mint például [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Gyakorlati alkalmazások esetében elvárás, hogy a szerkezet a gazdaságossági és mechanikai előírások mellett jó hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkezzen, például a vízi-, légi szállító járművek, vagy épületelemek esetében. A cikkben vizsgált új szerkezeti modell ezen esetekre kíván egy alternatívát nyújtani.

2. AZ ÚJ KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET

A vizsgált szerkezet (1. ábra) 2 CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic – karbonszálerősítéses műanyag) fedőlemezből és köztük egy polisztirol hőszigetelő rétegből (EPS) áll. A szerkezeti elemek ragasztással kerülnek összeállításra.

Ezen típusú szendvicsszerkezet számos mérnöki teherrel szembeálló szerkezetben (pl. hajófülkék, repülőgép oldalfal, épület aljzat és födém, stb.) alkalmazható.



1. ábra. A szendvicsszerkezet modellje

A CFRP fedőlemezek (laminátok) laminált karbonszál-erősítéses műanyag réteges szerkezetek. Az egyes kompozit rétegek karbonszál térfogat aránya 61%, az epoxi mátrix térfogat aránya pedig 39%.

A szigetelőként kiválasztott középső réteg lépésálló EPS polisztirol lemez, mely jó hőszigetelő tulajdonságú és igen nagy terhelhetőségű anyag, továbbá jó vízszigetelő is.

Az optimalás célja egy $L = 2250$ mm hosszúságú, $B = 2000$ mm szélességű, $p = 3,5 \cdot 10^{-3}$ N/mm² felületen megoszló terhelésű szendvicsszerkezet optimális szerkezeti méreteinek meghatározása.

A fedőlemezek összeállítása során felhasznált előimpregnált CFRP rétegek anyagjellemzői az alábbiak: az egyes rétegek vastagsága $t^* = 0,2$ mm, a rugalmassági modulus hosszirányban $E_x = E_c = 120$ GPa, keresztirányban pedig $E_y = 9$ GPa. A CFRP réteg fajlagos tömege $\rho_c = 180$ g/m², Poisson tényezői $\nu_{xy} = 0,25$ és $\nu_{yx} = 0,019$.

	EPS 30	EPS 70	EPS 100	EPS 150	EPS 200
$\rho_{EPS} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right]$	10 $\cdot 10^{-9}$	15 $\cdot 10^{-9}$	20 $\cdot 10^{-9}$	25 $\cdot 10^{-9}$	30 $\cdot 10^{-9}$
E_{EPS} [MPa]	0,3	0,7	1	1,5	2
$K_{EPS} \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$	0,048	0,04	0,036	0,034	0,033
$k_{EPS} \left[\frac{\text{EUR}}{\text{mm}^3} \right]$	3,53 $\cdot 10^{-8}$	3,97 $\cdot 10^{-8}$	5,27 $\cdot 10^{-8}$	7,67 $\cdot 10^{-8}$	9,33 $\cdot 10^{-8}$

1. táblázat. Különböző típusú EPS lemezek jellemzői

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

A különféle, az optimális tervezés során vizsgált EPS polisztirol lemezek jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza, ahol ρ_{EPS} a sűrűséget, E_{EPS} a rugalmassági modulus, K_{EPS} a hővezetési tényezőit, k_{EPS} a fajlagos anyagköltséget jelenti.

3. CÉLFÜGGVÉNYEK ÉS MÉRETEZÉSI FELTÉTELEK

A dolgozat célja az új szendvicsszerkezet optimálási módszerének kidolgozása. A kidolgozott célfüggvények költség- és tömeg-célfüggvények. A számítás során a teljes szerkezet középlehajlására, a kompozit lemezben ébredő maximális feszültségre, a polisztirol rétegben keletkező maximális feszültségre, a szerkezet sajátfrekvenciájára, a szerkezet hőszigetelési előírásaira vonatkozó méretezési feltételek, valamint a fedőlemez rétegszámára (n) és a polisztirol szigetelő réteg vastagságára (t_{EPS}) vonatkozó méretkorlátozási feltételek lettek figyelembe véve.

Az egycélű függvényes optimalítás során a szisztematikus kereséses módszere került alkalmazásra, mely valamennyi lehetséges szerkezetkialakítási variációt megvizsgál. Az optimalítás számításai a MathCad szoftverrel készültek.

3.1. Költségfüggvény, mint célfüggvény

Általában a leggyakoribb követelmény a szerkezettel szemben, hogy gazdaságos legyen, vagyis törekedni kell a költségminimumra. A költségfüggvény a vizsgált kompozit szendvicsszerkezet esetén az anyag és a gyártási költségek összegeként írható fel [2]:

$$K = K_{CFRP} + K_{EPS} + K_{hőkezelés} + K_{gyártás} \\ K (\text{€}) = 2 (n \cdot 31,047) + k_{EPS} (B L t_{EPS}) + \\ + 2 n \frac{525}{528} + k_f [n \cdot 14_{\min} + 230_{\min}] \quad (1)$$

ahol n a CFRP rétegek számát jelenti, k_{EPS} a polisztirol réteg fajlagos anyagköltsége, t_{EPS} a szigetelő réteg vastagsága, k_f a fajlagos gyártási költség ($k_f=0,6$ €/min), min pedig a percben kifejezett gyártási folyamatok ideje.

A szerkezet anyagköltségének jelentős részét a kompozit fedőlemezek teszik ki. Esetünkben ez a költség a 31,047 €/réteget jelenti. A hőkezelés költsége a kezelendő fedőlemezek méretétől és a mátrix-gyanta típusától függ. Esetünkben ezen költségkomponens a fedőlemez rétegszám és méret függvényeként számítható. Egy általunk már korábban legyártott 220x1200x2mm méretű CFRP fedőlemez költségét ismerjük, mely alapján a számítási példában szereplő méretű lemez költsége már származtatható az (1) egyenletben látható módon.

A teljes gyártási költség (mint az idő függvénye [min]) a CFRP lemezek gyártásához szükséges idő

($n \cdot 14_{\min} + 110_{\min}$), az EPS lemezek vágási, valamint a szerkezet összeállítási időszükséglete (120_{\min}) idővel számítható.

Az optimalizáló paraméterek a CFRP fedőlemezek rétegeinek száma (n), valamint az EPS belső réteg vastagsága (t_{EPS}).

3.2. Szerkezet tömeg, mint célfüggvény

A szerkezet teljes tömege a CFRP és az EPS komponensek tömegének összegeként írható fel:

$$m = 2 \rho_c [B L (n t^*)] + \rho_{EPS} [B L t_{EPS}] \quad (2)$$

ahol: t^* az egyes rétegek vastagsága, a fedőlemez sűrűsége $\rho_c = 180 \cdot 10^{-9}$ kg/mm³, az alkalmazott polisztirol réteg sűrűsége (ρ_{EPS}) pedig az 1. táblázatban megtalálható.

3.3. Méretezési feltételek

3.3.1. A szerkezet középlehajlása

$$w_{\max} = \frac{5p L^4}{384(E_c I_c + E_{EPS} I_{EPS})} \leq \frac{L}{200} \quad (3)$$

ahol: I_c és I_{EPS} a kompozit lemez és a polisztirol réteg inerciája, E_c és E_{EPS} a CFRP laminát redukált rugalmassági modulusa, valamint az EPS rugalmassági modulusa.

3.3.2. Feszültségi feltétel a kompozit lemezre

A szerkezetre ható terhelésből adódó nyomaték megoszlik a szerkezet CFRP és EPS komponensei között. $X_c M$ a teljes nyomaték kompozit lemezre eső része.

$$\frac{X_c M}{I_c} \cdot \frac{h_{EPS} + nt}{2} \leq \sigma_{Call} \quad (4)$$

ahol: $M = \frac{pL^2}{8}$; $\sigma_{Call} = \frac{\sigma_T}{\gamma_c}$ a megengedett feszültség; $X_c M$ a kompozit lemezre eső nyomaték; σ_T a kompozit laminát szakító szilárdsága; γ_c a biztonsági tényező (=2).

3.3.3. Feszültségi feltétel a polisztirol rétegre

$$\frac{X_{EPS} M}{I_{EPS}} \cdot \frac{t_{EPS}}{2} \leq \sigma_{EPSall} \quad (5)$$

ahol: $X_{EPS} = \frac{E_{EPS} I_{EPS}}{E_{EPS} I_{EPS} + E_c I_c}$; $\sigma_{EPSall} = \frac{\sigma_{EPSmax}}{\gamma_{EPS}}$ a megengedett feszültség; $X_{EPS} M$ az EPS rétegre eső nyomaték; σ_{EPSmax} az EPS nyomószilárdsága; γ_{EPS} a biztonsági tényező (=2).

3.3.4. Sajátfrekvencia feltétel

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{10^3 (E_c I_c + E_{EPS} I_{EPS})}{m}} \geq f_0 \quad (6)$$

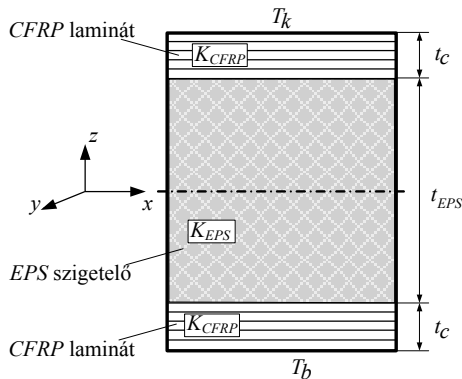
m : tömeg/folyóméter [kg/m]; f_0 : korlátozás a sajátfrekvenciára (50 Hz).

3.3.5. Hőszigetelési feltétel

Számos szerkezet esetében fokozott elvárás, hogy a szerkezet a gazdaságossági és mechanikai előírások mellett hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkezzen. A különféle anyagok és szerkezeti elemek hővezetési jellemzőinek számításával számos szakirodalom foglalkozik [9-14].

Feltételezve, hogy a szerkezeten kívüli hőmérséklet (T_k) -20°C (253,15K), a szerkezeten belüli hőmérséklet pedig (T_b) $+15^\circ\text{C}$ (288,15K). A kompozit laminát hővezetési tényezője $K_{CFRP} = 0,86 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [15], a vizsgált

különböző típusú EPS rétegek hővezetési tényezői (K_{EPS}) pedig az 1. táblázatban található meg.



2. ábra. A szendvicsszerkezet keresztmetszete

Legyen a szerkezet maximálisan megengedett hőátteresztési értéke egységnyi felületen ($F=1 \text{ m}^2$) 30 W-ban előírva (Q_{meg}), a Fourier-féle egyenlet alapján az alábbi (7) egyenlőtlenség felírható, amennyiben a szerkezeti elemeket homogén szerkezetűnek tételezzük fel:

$$Q_{valós} = F \frac{T_b - T_k}{\frac{t_c}{K_{CFRP}} + \frac{t_{EPS}}{K_{EPS}} + \frac{t_c}{K_{CFRP}}} \leq Q_{meg} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

3.3.6. Méretkorlátozási feltételek

$$\begin{aligned} 8 \leq n \leq 12 \\ 30 \leq t_{EPS} \leq 80 \end{aligned} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

A fenti méretkorlátozási feltételek gazdaságossági és gyárthatósági szempontok alapján kerültek meghatározásra.

4. AZ EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁS NUMERIKUS EREDMÉNYEI

4.1. Költség optimalálás

Szendvicsszerkezetek tervezése során a költséghatékonyság az elsődleges tervezési cél tekintettel arra, hogy a kompozit szerkezetek anyagköltsége igen magas. Az 1. táblázat tartalmazza a

vizsgált szerkezet költség optimalálásának eredményeit, mely az (1) egyenlet alapján, valamint a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével lett elvégezve szisztematikus keresés módszerével. A különböző (8-12 db) rétegszámú kompozit fedőlemezekből, valamint különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből álló szerkezetek teljes költségeit az alábbi 2. táblázat tartalmazza:

Költség optimalálás: K [€]						
Rétegek száma: n [db]	Szigetelő vastagság: t _{EPS} [mm]	Alkalmazott EPS polisztirol szigetelő lemez típusa				
		EPS 30	EPS 70	EPS 100	EPS 150	EPS 200
8 rétegű CFRP fedőlemez esetén	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-
	50	-	726,8	729,7	735,1	738,8
	60	727,6	728,6	732,1	738,6	743,1
10 rétegű CFRP fedőlemez esetén	80	730,6	732,2	736,8	754,5	751,5
	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	879,6
	50	-	871,8	874,7	880,1	883,8
12 rétegű CFRP fedőlemez esetén	60	872,3	873,5	877,0	883,5	888,0
	80	875,4	877,2	881,8	890,4	896,4
	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-
12 rétegű CFRP fedőlemez esetén	50	-	1017,0	1020,0	1025,0	1029,0
	60	1017,0	1019,0	1022,0	1029,0	1033,0
	80	1020,0	1022,0	1027,0	1035,0	1041,0

2. táblázat. A költség optimalálás eredménye

A táblázat azon celláiban, ahol nem szerepel költség adat, ott valamely tervezési feltétel, vagy feltételek nem teljesülnek. Az optimalálás során ezen kritikus feltételek a szerkezet teljes középkehajlásának korlátozására, valamint a szerkezet hőszigetelésére vonatkozó előírások voltak.

Összességként elmondható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet teljes költsége is nő. Költség szempontjából optimálisnak a 8 rétegű fedőlemez, 50 mm vastag EPS 70 anyagjellemzőjű polisztirol szigetelő réteggel ellátott szendvicsszerkezet adódott.

4.2. Tömeg optimalálás

A vizsgált szerkezet tömeg optimalálása a (2) tömeg-célfüggvény alapján, a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével a szisztematikus keresés módszerével lett elvégezve. A különböző rétegszámú (8-12 db) kompozit fedőlemezekből, valamint különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből álló szerkezetek teljes tömegét a 3. táblázat tartalmazza.

A táblázat azon celláiban, ahol nem szerepel tömeg adat, ott szintén valamely tervezési feltétel, vagy feltételek nem teljesülnek, melyek szintén a szerkezet teljes lehajlásának korlátozására, valamint a szerkezet hőszigetelésére vonatkozó előírások voltak.

Tömeg optimalás: m [kg]						
Rétegek száma: n [db]	Szigetelő vastagsága: t_{EPS} [mm]	Alkalmazott EPS polisztirol szigetelő lemez típusa				
		EPS 30	EPS 70	EPS 100	EPS 150	EPS 200
8 rétegű CFRP fedőlemez esetén	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-
	50	-	16,335	17,46	18,585	19,71
	60	15,66	17,01	18,36	19,71	21,06
	80	16,56	18,36	20,16	21,96	23,76
10 rétegű CFRP fedőlemez esetén	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	21,6
	50	-	19,575	20,7	21,825	22,95
	60	18,9	20,25	21,6	22,95	24,3
	80	19,8	21,6	23,4	25,2	27,0
12 rétegű CFRP fedőlemez esetén	30	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	23,94	24,84
	50	-	22,815	23,94	25,065	26,19
	60	22,14	23,49	24,84	26,19	27,54
	80	23,04	24,84	26,64	28,44	30,24

3. táblázat. A tömeg optimalás eredménye

Látható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet tömege is nő. Tömeg szempontjából optimálisnak a 8 rétegű fedőlemezes, 60 mm vastag EPS 30 anyagjellemzőjű polisztirol szigetelő réteggel ellátott szendvicsszerkezet adódott.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy új szerkezeti modell szerkezet-optimalási módszere került bemutatásra. A szerkezet laminált karbonszál-erősítéses fedőlemezekből és különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből ragasztással lett összeállítva.

A tervezés során az ideális rétegszámú CFRP fedőlemezekből, valamint az ideális típusú és vastagságú EPS belső rétegből összeállított optimális szendvicsszerkezet került meghatározásra, mely szerkezet biztosítja a minimális költséget és/vagy tömeget amellett, hogy teljesíti a megfogalmazott méretezési feltételeket is.

Összefoglalásként elmondható, hogy ezen típusú szendvicsszerkezet számos mérnöki teherviselő szerkezetben (vízi-, közúti-, légi járművek; híd; hajófedém; épület padozat, stb.) alkalmazható, ahol a tömeg megtakarítás és a jó hőszigetelő képesség az elsődleges cél.

A kompozit szerkezetek további előnyös tulajdonságai a rezgéscsillapítás, a hangszigetelő képesség, valamint a korrózióállóság, melyeknek köszönhetően rohamosan terjed a felhasználási körük és mértékük.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió

támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatta az OTKA T 75678 számú projekt keretében.

IRODALOM

- [1] Barbero E. J. (1999) *Introduction to composite materials design*, USA: Taylor & Francis.
- [2] Farkas, J.; Jármái, K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structure*, Balkema: Rotterdam-Brookfield.
- [3] Farkas, J.; Jármái, K. (1998) Minimum material cost design of five-layer sandwich beams. *Structural Optimization* 15 No.3-4, pp.: 215-220.
- [4] Farkas, J.; Jármái, K. (2003) *Economic design of metal structures*. Rotterdam: Millpress
- [5] Jármái, K.; Farkas, J.; Petershagen, H. (1999) Optimum design of welded cellular plates for ship deck panels. *Welding in the World* 43 No.1, pp.: 51-54.
- [6] Noor, A. K.; Burton, W.S.; Bert, C. W. (1996) Computational models for sandwich panels and shells. *Appl. Mech. Rev.* 49 No. 3, pp.: 155-199.
- [7] Vinson, J. R. (2001) *Sandwich structures*, Appl. Mech. Rev. 54 No. 3, pp.: 201-214.
- [8] Zenkert, D. (1995) *An introduction to sandwich construction*, W Midlands: EMAS Publ.
- [9] Springer, G. S. & Tsai, S. W. (1976) Thermal conductivities of unidirectional materials, *Journal of Composite Materials*, No. 1., pp.: 166.-
- [10] Grove, S. M. (1990) A model of transverse thermal conductivity in unidirectional fibre-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 38, pp.: 199.
- [11] Pilling, M. W., Yates, B., Black, M. A. & Tattersall, P. (1979) The thermal conductivity of carbon fiber-reinforced composites, *Journal of Material Science*, 14, pp.: 1326.
- [12] Kulkarni, M. R. & Brady R. P. (1997) A model of global thermal conductivity in laminated carbon/carbon composites, *Composites Science and Technology*, 57, pp.: 277.
- [13] Charles, J. A. & Wilson, D. W. (1981) A model of passive thermal nondestructive evaluation of composite laminates, *Polymer Composites*, 2, pp.: 105.
- [14] Faltin, H. (1970) *Műszaki hőtan*, Műszaki könyvkiadó, Budapest
- [15] Kovács, Gy. (2011) Thermal properties of composite sandwich structures, MAS XXI. Conference, 8-11 November 2011. Villa Clara Cuba, CD Edition 8 pages, Proceedings on CD file: E:\AutoPlay\Docs\ponencias\c1\c1.051.pdf, ISBN: 978-959-250-693-0