

Szendvicsszerkezetek optimális méretezése

Optimization of sandwich constructions

Dr. HORVÁTH Pál¹, Dr. TIMÁR Imre¹, Dr. BORBÉLY Tibor²

¹Pannon Egyetem, H-8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

tel.: +36 88 624 462 timar.imre@mk.uni-pannon.hu, <https://uni-pannon.hu/>

²egyetemi docens, ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, H-1053 Budapest, Egyetem tér 1–3.

tel.: +36 94 504 354 bt@inf.elte.hu, <https://www.elte.hu/>

Abstract

Sandwich structures are widely used in the construction industry and mechanical engineering due to their beneficial properties. We present the application of optimal sizing for beams, plates and shells. We formulate the objective function and the constraints and describe the obtained results.

Keywords: optimal design, sandwich constructions, cost minimization

Kivonat

A szendvicsszerkezetek előnyös tulajdonságaik miatt napjainkban széles körben elterjedtek az építő iparban és a gépészetben. Bemutatjuk az optimális méretezés alkalmazási lehetőségét tartók, lemezek és héjak esetén. Megfogalmazzuk a célfüggvényt és a korlátozási feltételeket, majd ismertetjük a kapott eredményeket.

Kulcsszavak: optimális méretezés, szendvicsszelemez, költségcsökkentés

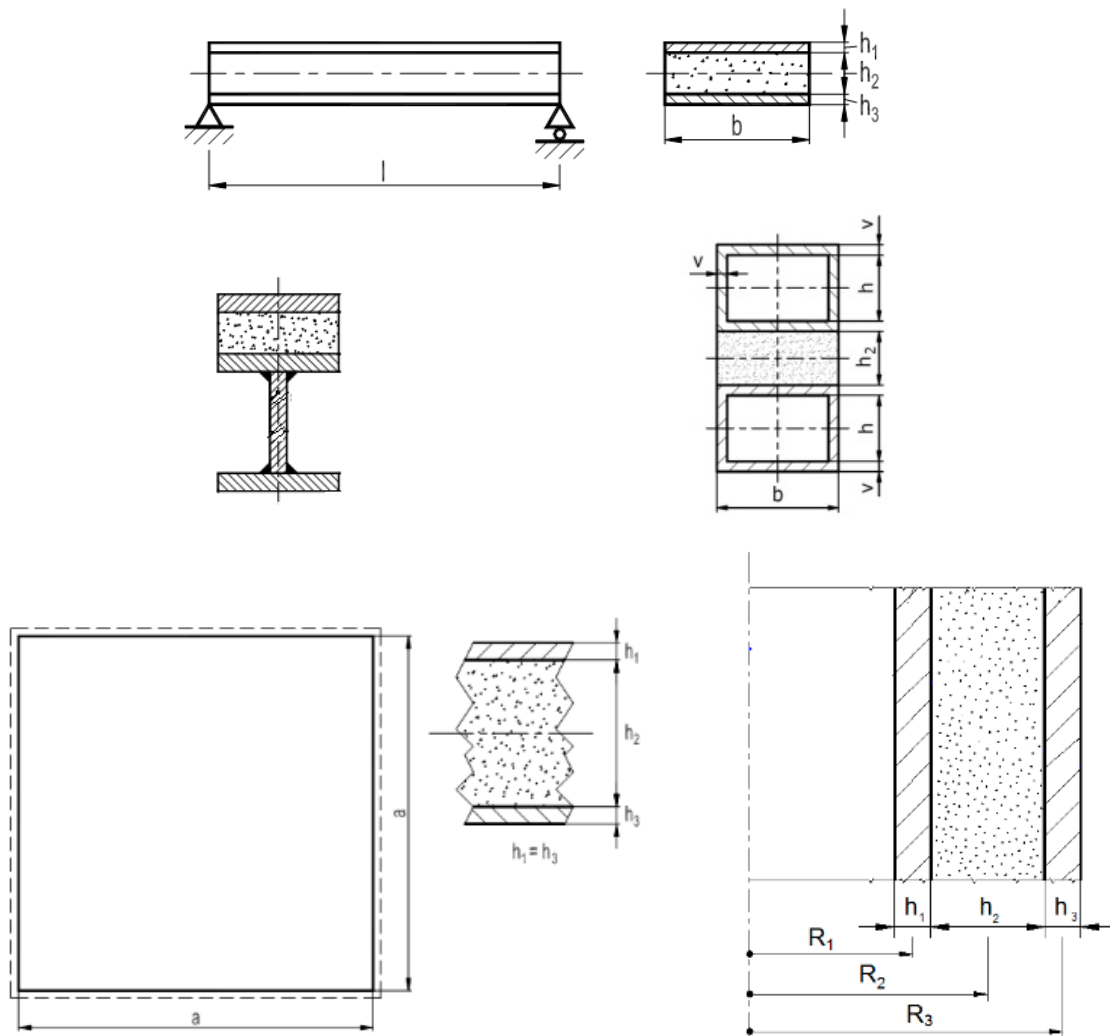
1. BEVEZETÉS

A korszerű műanyaghabok elterjedésével párhuzamosan felgyorsult a szendvicsszerkezetek széleskörű elterjedése. E szerkezettypusok három csoportját lehet megkülönböztetni: a tartókat, a lemezeket és a héjakat. A szendvicskonstrukciókat általában három vagy ritkábban több rétegben készítik. A háromrétegű szendvicskonstrukciók közös jellemzője, hogy a külső rétegek (a héjak: h_1 , h_3) valamilyen fémből készülnek, míg a kitöltő réteg (a mag h_2) valamilyen könnyű anyag pl. műanyaghab *1. ábra*. A héjak feladata a hajlításból, nyomásból származó normál feszültségek felvétele, míg a mag biztosítja a konstrukció együtt dolgozását és szinte teljes egészében felveszi a nyírásból származó igénybevételeket.

2. A SZENDVICSSZERKEZETEK FELÉPÍTÉSE, TULAJDONSÁGAIK

Az utóbbi években a szendvicskonstrukciók széleskörű elterjedését figyelhetjük meg Európában. Figyelemre méltó, hogy a német nyelvterület országai 1998-ban 26,2%-kal részesedtek az európai felhasználásból, míg a kelet-európai országok csupán 2,4%-kal [1]. A szendvicskonstrukciókat a repülőgépgyártásban fejlesztették ki, de ma már az építőipar, a járműipar és a gépipar számos területén eredményesen alkalmazzák. Az *1. ábra* néhány konstrukció típusát mutat be.

A szendvicskonstrukciókat legtöbb esetben habosítással készítik, ami azt jelenti, hogy a héjak közti rést folyékony műanyaghabbal töltik ki, ahol ez megszilárdul és biztosítja a rétegek együttdolgozását. Bizonyos esetekben ragasztással is készítenek szendvicsszerkezeteket. A külső rétegek, a merevség növelése érdekében, nemcsak síklemezekből, hanem profilos anyagokból pl. hullámos lemezekből, vagy valamilyen merevebb hegesztett elemekből is készülhetnek [2], [3]. Az *1. ábrán* látható tartónál az egyik külső réteg hegesztett I-tartóból készült. Gyakran előfordul, hogy az egyik, vagy mindkét külső réteg valamilyen zárt szelvényből készül.



1. ábra. A szendvicskonstrukciók szerkezeti megoldásai

A szendvicsszerkezetek számos olyan kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, ami elősegíti széleskörű elterjedésüket [4], [5], [6]. E tulajdonságok a következők: kiváló hőszigetelés, jó hangszigetelő képesség, jó rezgéscsillapító képesség, kis tömegűek, nagy merevség (ha a héjak minél távolabb helyezkednek el egymástól, illetve amennyiben profilos kialakításúak), sorozatgyártásuk könnyen megvalósítható, könnyen szerelhetők stb. A szendvicskonstrukciók jó rezgéscsillapító képessége a műanyaghaboknak köszönhető. Az anyagcsillapítást több tényező befolyásolja, ezek közül legfontosabb az anyagminőség, az igénybevétel módja, a feszültség szint, a keresztmetszet alakja, a frekvencia, a hőmérséklet. A hőmérséklet főként a műanyagok és a ragasztóanyagok csillapítóképeségét és élettartamát befolyásolja.

3. A SZENDVICSSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE

A szendvicsszerkezetek optimális méretezése a nemlineáris optimálás elterjedésével párhuzamosan indult meg, melynek kapcsán a rétegvastagságokat igyekeztek meghatározni. Élfüggvénynek az optimálás kezdeti szakaszában a szerkezet tömegét [7], [8], illetve térfogatát választották majd fokozatosan az anyagköltség ill. az összköltség került előtérbe. A szendvicskonstrukciókkal szemben támasztott követelményeket korlátozási feltételek formájában fogalmazzák meg, melyek lehetnek feszültség alakváltozás (lehajlás), sajátfrekvencia, rezgéscsillapítás, stabilitás merevség], valamint technológiai és méretkorlátozások.

Az optimálási feladatok egy részénél a korlátozási feltételek nem fogalmazhatók meg zárt alakban (függvényként), emiatt értéküket valamilyen numerikus módszerrel kell meghatározni. Különböző numerikus módszerek összekapcsolását tehát gyakran alkalmazzák műszaki (optimálási) problémák megoldására. A [7], [8]-ban állandó rétegvastagságú szendvicselemek anyagköltség-minimumra méretezése található, amikor a célfüggvény és a korlátozási feltételek függvényként megfogalmazhatók.

Gyakorlati alkalmazás szempontjából fontos helyet foglalnak el a szendvicstartók, melyek legegyszerűbb kialakításánál a külső fémlemezek (héjak) közti rést a műanyaghab tölti ki.

4. PROFILOS SZENDVICSTARTÓK OPTIMÁLÁSA

A 2. ábrán látható tartó külső rétegek hegesztett kivitelű I-tartóból készültek, míg a kitöltő réteget poliuretánhab alkotja. Ismeretlenek a tartó geometriai méreteit választjuk (t, s, h, h_2, b).

A célfüggvényben az alábbi költségeket vesszük figyelembe: a lemezvágás költségét (K_v), a hegesztés költségét (K_h), a lemez tisztításának költségét (K_t), az alapozás és a festés költségét (K_{af}), a habosítás költségét (K_{hab}), az anyagköltséget (K_a).

A fentiek felhasználásával a célfüggvény a következőképpen írható fel

$$K = K_v + K_h + K_t + K_{af} + K_{hab} + K_a.$$

A hegesztési költségek ismerete fontos szerepet játszik a hegesztett szerkezetek tervezésekor. Emiatt különböző megfontolások alapján módszereket dolgoztak ki az egyes hegesztés-technológiák költségeinek számítására [9], [10]. A gyártástechnológiák fejlődésének megfelelően a módszereket folyamatosan fejlesztik. A kézi elektromos ívhegesztés költségének számítása a [11] eredményeinek felhasználásával az alábbi egyenletet dolgoztuk ki

$$K_h = k_m c_1 \alpha_n \sqrt{m} \sqrt{n_h} + (1 + \alpha_f)(k_{a1} + k_m + k_e \frac{U_h I}{\eta}) t_h + \alpha_{el} a_v^2 l_v k_{el} \rho_v + k_m t_n,$$

ahol c_1 paraméter ($c_1 = 1 \text{ min}/\sqrt{\text{kg}}$); α_n az ún. nehézségi tényező; m a hegesztett szerkezet tömege; n_h a hegesztendő elemek száma; α_f az összeállítási időnek a hegesztési időhöz viszonyított aránya; k_a a fajlagos amortizációs költség; k_e a villamos energia fajlagos költsége; U_h a hegesztési feszültség; I a hegesztési áramerősség; η a hegesztő berendezés hatásfoka; t_h a hegesztési idő; α_{el} a hegesztési eljárástól függő tényező; a_v a varrat mérete (sarokvarrat esetén a háromszög alakú keresztmetszet magassága); l_v a varratok teljes hossza; k_{el} az elektróda ára; ρ_v a hegesztési varrat sűrűsége; t_n az elektróda csere és az újbóli hegesztés mellékideje.

A hegesztési idő az alábbi összefüggéssel számítható

$$t_h = \frac{m_v}{m_h} = \frac{a_v^2 l_v \rho_v}{m_h},$$

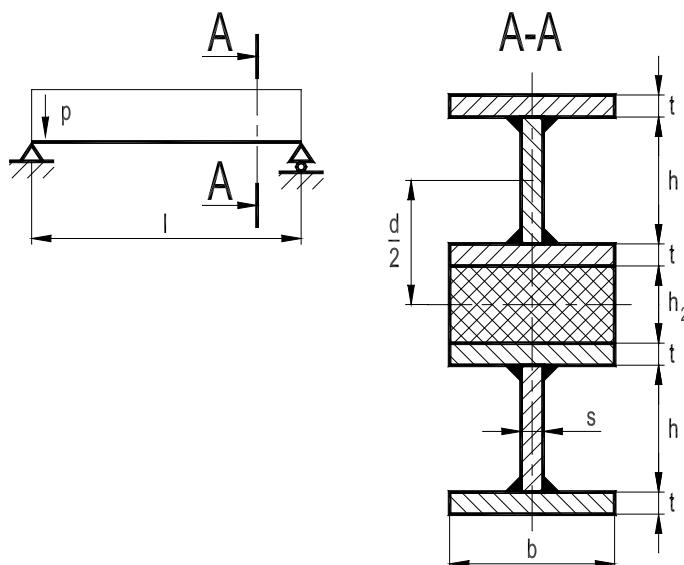
ahol m_v a hegesztési varrat tömege; m_h a heganyag leválasztási teljesítménye.

A korlátozási feltételek a következők: a maximális lehajlás korlátozása, a héjakban ébredő maximális normál feszültség korlátozása, a magban ébredő nyírófeszültség korlátozása, a tartó csillapítási tényezőjének korlátozása és a geometriai korlátozási feltételek.

A fentiekben megfogalmazott optimálási modell alkalmazási lehetőségét egy konkrét feladat megoldásán mutatjuk be. Látható, hogy a célfüggvény és a korlátozási feltételek öt ismeretlent tartalmaznak. A feladatot a SUMT (Sequetial Uncostrained Mionimization Tecnique) nemlineáris optimálási módszer alapján készített programmal oldjuk meg.

5. AZ OPTIMÁLÁSI PROBLÉMA MEGOLDÁSA, EREDMÉNYEK

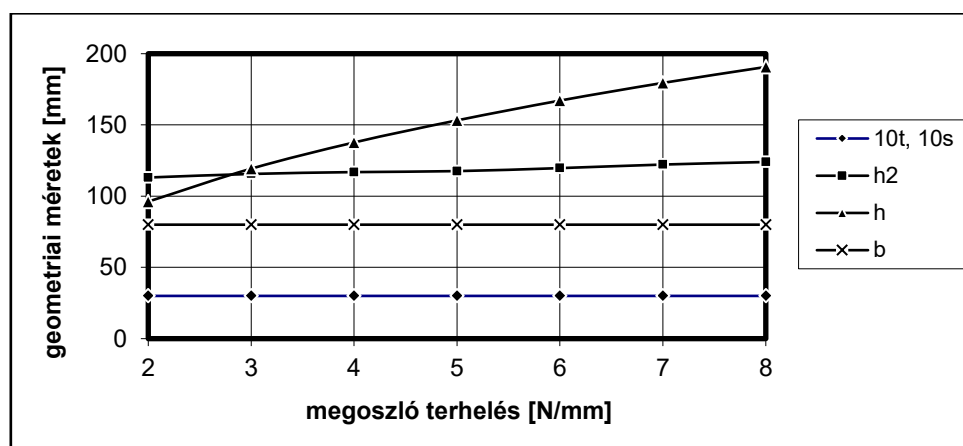
A 2. ábrán látható tartó optimálásához az alábbi adatokat használjuk fel. A fajlagos költségeknél pénzegység (PE) szerepel, mivel bármilyen pénznemet lehet használni, de esetünkben a pénzegység Forintot jelent.



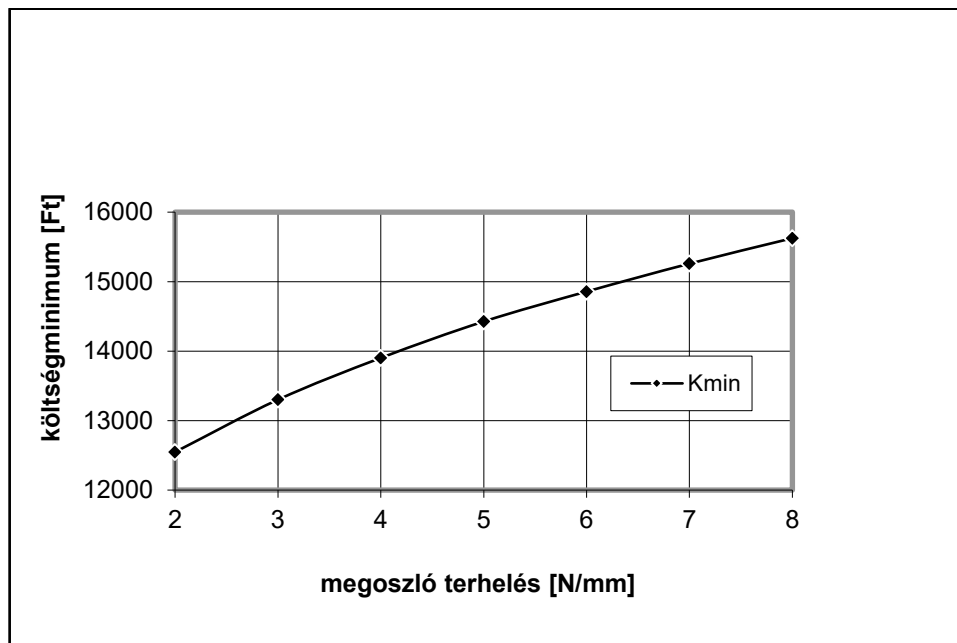
2. ábra. A profilos szendvicstartó felépítése

Adatok: $k_v=15$ Ft/m; $\kappa=0,3$; $k_m=40$ PE/min; $c_f=3,15$ min; $c_{e1}=1,25$ min; $c_{e2}=2,5$ min; $\beta=0,9$; $v_v=1,06$ m/min; $c=-0,25$; $t_{bi}=0,2$ min; $n_a=1$; $m_v=0,01$ m³/min; $k_{gk}=180$ PE/m³; $c_1=1$; $\alpha_n=1$; $n_h=8$; $\alpha=0,24$ kg/min; $f=0,35$; $k_{a1}=5$ PE/min; $k_e=28$ PE/kWh; $U_h=31$ V; $I=240$ A; $\eta=0,7$; $\alpha_{e1}=1$; $k_{e1}=710$ PE/kg; $t_n=6$ min; $\rho_v=\rho=7800$ kg/min; $k_t=50$ PE/m²; $t_e=15$ min; $V_h=0,1$ m³/min; $t_{ki}=8$ min; $k_{a2}=10$ PE/min; $k_{hab}=2600$ PE/m³; $k_{af}=250$ PE/m²; $k_e=140$ Ft/kg; $p=2, \dots, 8$ N/mm; $E=210$ GPa; $G_2=3,1$ MPa; $C_v=1/300$; $\sigma_{meg}=200$ MPa; $\tau_{2meg}=115$ MPa; $\eta_2=0,22$; $G_{2d}=690$ kPa; $C=2$; $\eta_e=0,001$; $t_{min}=3$ mm; $t_{max}=12$ mm; $s_{min}=3$ mm; $s_{max}=12$ mm; $h_{min}=60$ mm; $h_{max}=300$ mm; $h_{2min}=20$ mm; $h_{2max}=130$ mm; $b_{min}=60$ mm; $b_{max}=250$ mm; $\alpha_g=1$; $l=2, \dots, 5$ m.

A fenti értékek felhasználásával futtatásokat végeztünk egy 4 méter hosszú tartónál különböző megoszló terhelések esetén. A 4.3. ábra a tartó geometriai méreteinek változását mutatja a terhelés függvényében. Látható, hogy a gerinclemez magassága (h) erőteljesen növekszik, mert értéke szoros összefüggésben van a tartó merevségével. Vizsgálataink során mindig a lehajlás-korlátozási feltétel volt aktív. A lehajlás értékét úgy lehet csökkenteni, hogy merevebb tartót készítünk és ennek egyik lehetséges módja a gerinclemez magasságának növelése. Az eredmények alapján a csillapító réteg vastagsága (h_2) csupán kismértékben a vizsgált terhelési tartományban, de ez is hozzájárul a tartó merevségének növekedéséhez. Az I-tartó gerinclemezének minimális magasságát (h), valamint az övlemez minimális szélességét (b) a hegesztés helyszükséglete miatt korlátozni kell. Számításaink alapján bebizonyosodott, hogy kisebb övlemez szélesség is megfelelő, amit az is bizonyít, hogy az övlemez-korlátozási feltétel az előírt minimális értékre teljesül. Nagyobb terhelések és tartóhosszak esetén az övlemez szélessége szintén elkezd növekedni. Egy 3 m hosszú tartónál a b érték 15 N/mm terheléstől kezdve erőteljesen növekszik.

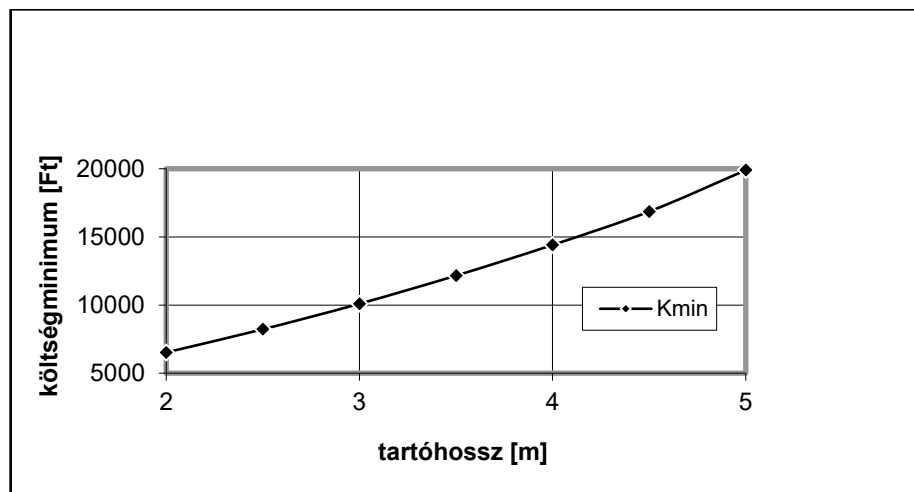


3. ábra. A rétegvastagságok változása a megoszló terhelés függvényében



4. ábra. A költségminimum változása a megoszló terhelés függvényében

A 4. ábra a célfüggvény (költségfüggvény) minimumának változását mutatja a megoszló terhelés függvényében. A függvény értéke a terhelés növelésekor degresszíve emelkedik. A 5. ábrán a geometriai méretek változása látható a tartóhossz függvényében. A hossz növelésekor szintén a lehajlás-korlátozási feltétel volt aktív. Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan a nagyobb tartómerevséget zömében a gerinclemez magasságának és kis mértékben a kitöltő réteg vastagságának növelésével lehetett elérni. A lemezvastagságok (s , t) alsó korlátját mindkét esetben abból a feltételből állapítottuk meg, hogy a varratot megbízhatóan lehessen elkészíteni.



5. ábra. A költségminimum változása a tartóhossz függvényében

Az 5. ábra a költségfüggvény változását mutatja a tartóhossz függvényében. Látható, hogy a költség a hossz függvényében progresszíven növekszik, mert a lehajlás értékében a hosszúság magasabb hatványon szerepel. A hajlításból származó lehajlás értékében a negyedik hatványon, míg a nyírási alakváltozásban a második hatványon. Az eredményekből látható, hogy a tartó méreteit alapvetően a lehajlás-korlátozási feltétel szabja meg.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Röviden bemutatjuk a szendvicsszerkezetek felépítést, valamint az optimalizációs lehetőségüket, Profilos szendvicstartók optimalizására példát mutatunk be: megfogalmazzuk a célfüggvényt és a korlátozási feltételeket.

A célfüggvény tartalmazza a lemezvágás költségét (K_v), a hegesztés költségét (K_h), a lemez tisztításának költségét (K_t), az alapozás és a festés költségét (K_{af}), a habosítás költségét (K_{hab}), valamint az anyagköltséget (K_a). A korlátozási feltételek a maximális lehajlásra, a héjakban ébredő maximális normál feszültségre, a magban ébredő nyírófeszültségre, a tartó csillapítási tényezőjére és a geometriai méretek korlátozására vonatkoznak. ismertetjük a kapott értékeket. Az írásban közölt eredményeket bőbben szeretnénk az előadásban részletesebben tárgyalni.

IRODALOM

- [1] Koschade, R.: Die Sandwichbauweise. Ernst&Sohn, Berlin, 2000.
- [2] Timár, I., Horváth, P., Borbély, T.: Optimierung von profilierten Sandwichbalken. Stahlbau, 72(2003), No.2, p.: 109-113.
- [3] Timár, I., Horváth, P., Borbély, T.: Profilos szendvicstartók optimális méretezése. Gép, 50(1999), No.1, p.: 35-40.
- [4] Plantema, F. J.: Sandwich construction. Wiley, New York, 1966.
- [5] Allen, H. G.: Analysis and design of sandwich panels. Pergamon Press, Oxford, 1969.
- [6] Stamm, K., Witte, H.: Sandwichkonstruktionen. Berechnung, Fertigung, Ausführung. Springer-Verlag, Wien, 1974.
- [7] Huang, S. N., Alspaugh, D. W.: Minimum weight sandwich beam design. AIAA Journal, Vol 12, No.12, p.: 1617-1618.
- [8] Kollek, W., Stricker, L.: Minimierung des Gewichts von Sandwichkonstruktionen. Konstruktion, 35(1983), No.11, p.: 449-453.
- [9] Glimm, G.: Früherkennung der Entwicklungs- und Konstruktionskosten. VDI-Berichte, Nr. 457, 1982, p.: 173-193.
- [10] Pahl, G., Beelich, K. H.: Kostenwachstumgesetze nach Ähnlichkeitsbeziehungen für Schweißverbindungen. VDI-Berichte, Nr. 457, 1982, p.: 129-141.