

OPTIMALIZÁLT BORDÁSLEMEZ PARAMÉTERVÁLTOZÁSAINAK HATÁSA A SAJÁTÉRTÉKEKRE

DEPENDENCE OF EIGENVALUES ON PARAMETER CHANGES OF OPTIMIZED STIFFENED PLATES

Dr. Virág Zoltán, Dr. Szirbik Sándor

ABSTRACT

This paper deals with the modal analysis and buckling stability of stiffened plates under longitudinal compression with simple supported conditions. The main objective of the finite element analysis is to investigate some behaviors of these thin-wall structures. The structure of stiffened plate is widespread, from which the version used in this paper has already been optimized for uniaxial compression, some design variables and the cost of welding, and the objective function to be minimized is defined as the material cost. The effect of stiffener damage caused by corrosion can be investigated in FE models of the optimized stiffed plate structure. The buckling shape modes for damaged structures can be compared with the damaged-free ones so that the changes in load capacity can be predicted. Furthermore, we have investigated that the various steel grades of the base plate and stiffeners are given thus assuming that the plate parts (the base plate and ribs) are described with different Young's modulus, while all other material properties in our simulations remain the same. The eigenfrequencies show noticeable differences when the modulus of elasticity is changed. Therefore, it is important that the structure is properly designed and made from proper materials.

1. BEVEZETÉS

A terhelést elszenvedő lemezekkel kapcsolatos problémák számos alkalmazási helyen így az építészeti, repülőgépipari, autóipari és tenger-hajózási szerkezeteken is megjelennek. Az egytengelyű vagy biaxiális nyomásnak, hajlításnak, nyírásnak, oldalirányú nyomásnak, hidrosztatikus nyomásnak, koncentrált vagy egyenletesen eloszló statikus, dinamikus terhelésnek kitett és élettartamuk során sokszor magas hőmérsékleten is használt lemezeket ezért célszerű megerősíteni különféle keresztmetszetű merevítőkkel, ami a teherbíróképesség megnövelésének legcélravezetőbb módja. Ezáltal – általában – a megerősített

lemezek rezgéstani tulajdonságai is kedvezőbbé válnak.

Modal analízis során előállított saját körfrekvenciák és vonatkozó rezgések alapján a szerkezeteken további, dinamikus hatásokat is figyelembe vevő vizsgálatok lehetségesek. A sajátértékfeladatok megoldását a numerikusan pontosabban elvégezhető sajátértékszámítással érdemes kezdeni, majd a sajátértékekhez (saját körfrekvenciákhoz) tartozó sajátvektorok (rezgések) előállításával folytatni. A szerkezetek sajátértékfeladatainak numerikus megoldására szolgáló bevett eljárás az alter iteráció és a Lánczos-módszer. Ezek közül, ha a rezgéstani feladat szabadságfoka nagy, vagy a feladat jellege ezt indokolja, akkor a numerikusan általában hatékonyabb Lánczos-módszer választása célravezetőbb szoftverek alkalmazásakor [1], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képi megjelenítésén a maximális elmozdulás helye a színskálán általában piros színnel jelölt, nagysága pedig egységnyinek választott.

E számítások közvetlen haszna a gerjesztésnek kitett szerkezetek esetén a sajátfrekvenciák valamelyikével egybeeső gerjesztési frekvencia okozta rezonanciakatasztrófa megelőzése, mivel az a valós szerkezet esetén a leggyengébb alkotórészének törésében jelentkezhet gátolva így azok üzemszerű működését. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vizsgálatokat, pl. bányákban alkalmazott kotrógépeknél is [2]. A lemezszerkezet károsodásai, vagy a tervezett paramétereiktől eltérő megvalósítása a szerkezetnek, a sajátértékek változását eredményezik, amely kedvezőtlen lehet.

2. BORDÁKKAL MEGERŐSÍTETT LEMEZ GEOMETRIÁJÁNAK OPTIMÁLÁSA

A feladat megoldása során figyelembe vettük a bordázott lemez horpadási feltételét (horpadási görbén a lemez gyártása során megmaradó hegesztési feszültséget és a szerkezet kezdeti alakpontatlanságának hatását), az alaplemez horpadási feltételét (alaplemez

*egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Intézet

**egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet

bordák közötti helyi horpadására felírva), a bordák helyi horpadását (a határkarcsúsággal történő változtatását) és az alakváltozási feltételt (lemez teljes hosszán végigfutó hegesztésekből származó alakváltozás nagyságának korlátozását a lemezhosszúságához viszonyítva).

A bordáslemez az előzőek tekintetbe vételével optimalizált, ahol a minimalizálandó célfüggvény az anyagköltség volt. A rögzített paraméterek: $B = 6000$ mm alaplemez szélesség, $L = 4000$ mm alaplemez hosszúság, $N = 1,2 \times 10^7$ N bordairányú axiális nyomóerő, $E = 2,1 \times 10^5$ MPa Young modulus, $\rho = 7,85 \times 10^{-9}$ t/mm³ sűrűség, $f_y = 235$ MPa folyáshatár. Magát az optimalizást Excel Solver NLP programmal végeztük, amely gradiens módszer alkalmaz. Az optimalizási eljárás során ismeretlenek tekintett az alaplemez t_f és a borda t_s vastagsága, h_s bordamagasság, illetve a bordák száma $\varphi - 1$, melyek értékei csak bizonyos határon belül mozoghatnak. A költségfüggvény a gyártási sorrendnek megfelelően került megállapításra, azaz először a 6 m x 4 m méretű alaplemez 3 m x 1,5 m méretű lemezekből tompavarrattal összehegesztett, majd ezután történik a merevítők alaplemezhez történő rögzítése sarokvarratokkal [3]. Az első fázis

$$T_{W1} = 2 (8 \rho B L t_f)^{0,5} + 1,3 C_W (a_W)^n L_{W1} \quad (1)$$

hegesztési ideje megadható, ahol a_W (mm) a hegesztési varrat méretét jelöli és $L_{W1} = 3L + B$. SAW tompavarratok esetén $t_f = 4 - 15$ mm méretnél $C_W(a_W)^n = 0,1346 \times 10^{-3} (t_f)^2$ és $t_f = 15 - 40$ mm esetén pedig $C_W(a_W)^n = 0,1033 \times 10^{-3} (t_f)^{1,904}$ módon számítható. Ezáltal ismertek a hegesztési idők az a_W varratméret függvényében a hosszirányú sarokvarrat lefelé állása esetén. A második fázis hegesztési ideje a következő:

$$T_{W2} = 3 [\varphi (\rho B L t_f + \rho (\varphi - 1) L A_S)]^{0,5} + 1,3 \cdot 0,3394 \times 10^{-3} (a_W)^2 L_{W2}, \quad (2)$$

ahol A_S jelöli a borda területét, $a_W = 0,5 t_s$, továbbá $a_{Wmin} = 4$ mm esetén $L_{W2} = 2(\varphi - 1) L$ érvényes. Az anyagköltség megadható a

$$K_M = k_M \rho [B L t_f + (\varphi - 1) L A_S] \quad (3)$$

számítási képlettel, a teljes költség pedig a

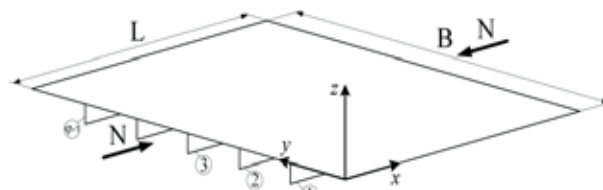
$$K_M / k_M = \rho [B L t_f + (\varphi - 1) L A_S] + k_F (T_{W1} + T_{W2}) / k_M \quad (4)$$

módon számítható ki.

Nemzetközileg is használható megoldások érdekében az anyagköltség-tényezőnél (acél) $k_M = 0,5 - 1,2$ \$/kg, gyártásnál rezsiköltséggel együtt $k_F = 15 - 45$ \$/munkaóra. Így k_F / k_M arány 0 - 1,5 kg/min tartományban változhat [4, 5].

3. BORDÁZOTT LEMEZ REZGÉSTANI VIZSGÁLATA VÉGESELEM-MÓDSZERREL

Optimalás után a választott bordáslemez kialakítást a kiszámított geometriai adatokkal és egyszerű (simple supported) megtámasztással ($t_f = 5$ mm, $t_s = 10$ mm, $h_s = 140$ mm és $\varphi = 29$) végeelemes vizsgálatokkal elemezzük. Először az optimalt kialakításhoz képest például korróziós károsodások [6] által kieső bordák elvételével modellezett eseteken keresztül a károsodás lemezterhelhetőség megváltozására gyakorolt hatását [7] vizsgáljuk.



1. ábra. A vizsgált bordázott lemez

Megnézzük továbbá azt a körülményt is, ha az alaplemez és borda acélminőségeiben eltérést mutatkozik [8]. A kitűzött feladat a sajátértékek numerikus meghatározásával oldható meg. Előfeszített esetekben az ilyen jellegű számítások két lépésben végezhető el. Első lépésben kerül sor az alkalmazott terhelés hatását nemlinearitás mellett figyelembe vevő terhelt alak kiszámításra, majd ezt a második lépésben felhasználva, a felterhelt eset geometriáján kerül sor a sajátérték kinyerésére. A terhelt alak átvitele okán ilyen feladatokban a lineáris végeelemek használata indokolt. A meghatározott és növekvő sorrendbe állított első néhány domináns sajátértékhez tartozó sajátvektor ezután kerül meghatározásra. A megoldások a bordáslemez geometriájától és az anyagminőségtől függenek, melyeket az alkalmazott alátámasztás döntően befolyásol. Az eljárás tetszőleges bordakeresztmetszet mellett használható [9]. Mivel a szerkezet előfeszített az előírt N bordairányú nyomás, amely értelemszerűen elhangolja a sajátfrekvenciákat az előfeszítés nélküli esettől, is figyelembe vett. A vizsgált szerkezet kialakítása az 1. ábrán látható. Az ábrán jelölt a bordák sorszámozása is.

A numerikus mechanika végeelem-módszere a szerkezet pontos geometriai modelljének geometriailag egyszerű alakú, elegendő számú kicsiny elemre történő felosztásán alapul. A gyakorlatban jól használható végeelemes elemcsaládok adott számú oldalélelől és általában azokon elhelyezkedő csomópontokból álló elemeket tartalmaznak. A szerkezet modelljében az egyes végeelemek a valóságos kapcsolódásoknak megfelelően illeszkednek egymáshoz az elemek határain kijelölt csomópontokban tett, illetve az illeszkedő csomópontok elmozdulásaiban történő előírások felhasználásával. Héjmodellt alkalmazva a merevítők és az alaplemez középfelülete is végeelemek

re osztott az analízishez. A végeelemes eljárások alkalmazása rezgéstani feladatokban elméleti háttérrel tekintve jól kidolgozott és gyakorlati problémák megoldásában [1] is jól használható eszköz.

Az egyszerűség végett a bordáslemez végeelemes modellezéséhez egy széleskörben használatos, hagyományos elemcsaládot választottunk, egy lineáris, 4 csomópontú, S4R jelű héjelemet, mely a vizsgált feladatokban már megfelelő pontosságot biztosít 70 mm átlagos elemméret megválasztása mellett elérhető globális elemszám mellett. A végeelemes modellhez rendelt lineáris anyagtörvényeket, a borda, illetve alaplemez tulajdonságait a feladatkitűzésében rögzítetteknek megfelelően írtuk elő.

Elsőként a maximális terhelés (a kritikus kihajlási terhelés) került megbecsülésre a szerkezeti instabilitás vagy lemezhorpadás elkerülése érdekében. Az Abaqus szoftver [1] segítségével, héjelemek alkalmazása mellett, lineáris perturbációval történtek az előfeszített lemezszerkezet ezen vizsgálatai. Az 1. táblázatban az első oszlop mutatja a bordáslemez kieső bordáinak sorszáma a sorszámozás az 1. ábra alapján értelmezhető. Jól látszik a táblázatból, hogy a lemez teherviselőképességének csökkenése, az új stabil alakba történő átptattanás egyre kisebb kritikus erő mellett következik be.

1. táblázat. A károsodások miatt kieső bordák hatása a sajátértékekre.

No.	λ_1	λ_2	λ_3
	2739,2	2830,2	3064,8
1	1486,8	1508,5	1586,0
2	1868,5	1905,6	1965,9
3	1872,1	1907,0	1970,6
1-2	652,00	663,30	740,83
2-3	809,32	849,38	869,69
1-2-...-28	6,1876	22,891	29,452

A táblázat megmutatja egyszerű kézi számítások után, hogy két borda valamely okból történő elvesztése már a kritikus erőnek az előírt N alá csökkenését okozza. Az egyszerűség kedvéért a becsült kritikus kihajlási terhelést általában az első sajátértékből 2739,2 stb. adjuk meg, amely 1 N/mm léptéktényezővel számított. A szerkezetek érzékenységvizsgálatához azonban legtöbbször számos elemzést kell még elvégeznünk, ahol az első néhány sajátértékhez tartozó kihajlási alakot kell felhasználni geometriai imperfekcióként. Ez azt jelenti esetünkben, hogy a merevített lemez idealizált geometriáját egy bizonyos léptékkel a kihajlási alakokból származó elmozdulásokkal zavarjuk meg a stabilitásvesztés modellezése céljából.

Az optimált bordáslemez többféle lemezvastagságú acéllemezből kell elkészíteni, ezért elképzelhető, hogy azok anyagminőségükben eltérnek. Egyszerűsítve a feladatot kiindultunk abból, hogy az acélminőségek rugalmassági modulusa 190 - 210 GPa lehet, így szá-

mítási sorozatokat végeztünk 190, 200 és 210 GPa értékekre az alaplemez és bordák tekintetében.

2. táblázat. Sajátkörfrekvenciák változatlan borda (210 GPa) és változó alaplemez anyagminőség függvényében.

Modus sorszáma	Alaplemez Young modulusa [GPa]		
	210	200	190
1.	89,083	87,041	84,833
2.	93,016	91,303	89,676
3.	102,44	101,81	101,42
4.	116,23	116,67	117,51
5.	130,19	131,31	132,97

Az első számítási sorozatban csak az alaplemez Young modulusának módosítása történt meg miközben a merevítőbordák anyagát változatlan, azaz 210 GPa nagyságú modulussal számoltuk. A második számítási sorozatban az alaplemez Young-modulusát változtatlanul, 210 GPa értékűnek hagyva a bordák anyagát leíró modulust változtattuk meg. A Poisson-szám értéke pedig minden vizsgált esetben 0,25 értékben változatlan maradt. Az első öt saját körfrekvenciát a 2. és 3. táblázat tartalmazza.

A 2. táblázatban látható módon az összetartozó sorszámú saját körfrekvenciák csökkenése arányos és összhangban van az alaplemez anyagát leíró rugalmassági modulus csökkenésével a merevítőbordák változatlan értékű modulusa mellett.

3. táblázat. Sajátkörfrekvenciák változatlan alaplemez (210 GPa) és változó borda anyagminőség függvényében.

Modus sorszáma	Borda Young modulusa [GPa]		
	190	200	210
1.	80,866	85,156	89,083
2.	84,779	89,005	93,016
3.	92,366	97,493	102,44
4.	103,85	110,24	116,23
5.	116,27	123,48	130,19

A 3. jelű táblázatban az összetartozó sorszámú saját körfrekvenciák csökkenése a 2. táblázatban látott módon arányos és összhangban van a bordák anyagát leíró rugalmassági modulus csökkenésével az alaplemez változatlan rugalmassági modulusa mellett, de szerkezeti kialakítás okán a csökkenés mértéke jóval nagyobb mértékű lesz.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Optimalizált axiális erőhatásnak kitett bordáslemez vizsgálatát mutattuk be, amely során első feltevésünk a lemezkialakítás üzemszerű működése során fellépő károsodások hatásának stabilitásvesztési vizsgálataihoz kapcsolódott. Leegyszerűsítve a problémát a numerikus modellezés során bordákat vettünk ki a végeelemes modellből és így határoztunk meg a stabili-

tásvesztéshez tartozó sajátértékeket, amelyekhez tartozó kihajlási alakok az érzékenységvizsgálatokban használatosak. Ehhez hasonló sajátértékproblémára vezet annak modellezése is, ha a szerkezet két fő alkotóeleme (az alaplemez és a merevítőbordák) különböző acélminőségű lemezből készülnek, amelyeket a legegyszerűbb módon különböző Young modulussal írunk le. A számítási eredmények nagyobb, de arányos eltéréseket mutatnak, ha a merevítők modulusában történik e változtatás. A lemezszerkezet megfelelő tervezésén túlmenően tehát a megfelelő anyagminőség is fontos. A dinamikus terhelések merevített lemezekre gyakorolt hatása a modal analízis eredményeit használó szuperpozíciós technikával tovább vizsgálható.

5. IRODALOM

- [1] Abaqus 6.13 online documentation. Dassault Systems 2015.
- [2] Popescu F. D., Radu S. M., Andras A., Kertesz (Brînaş) I.: Simulation of the frequency response of the ERC 1400 Bucket Wheel Excavator boom, during the excavation process, *New Trends in Production Engineering*, Vol. 2, Issue 1, (2019) pp. 153-167.
- [3] Farkas József, Jármái Károly: *Fémszerkezetek innovatív tervezése*, Gazdász-Elasztik Kiadó és Nyomda, 2015, 592 old.
- [4] Károly Jármái: Newer manufacturing technologies and their costs in automotive structures; a review, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_41, pp. 478-485.
- [5] Alaa Al-Fatlawi, Károly Jármái and György Kovács, Optimization of a Totally Fiber-Reinforced Plastic Composite Sandwich Construction of Helicopter Floor for Weight Saving, Fuel Saving and Higher Safety, *Polymers*, 2021, 13(16), 2735. 20 p. <https://doi.org/10.3390/polym13162735>
- [6] Rahbar-Ranji A., Niamir N., Zarookian A.: Ultimate strength of stiffened plates with pitting corrosion, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 7, 2015. pp. 509-525.
- [7] Szirbik S., Virág Z.: Numerical investigation of optimized stiffened plates with damaged stiffeners, *Annals of the University of Petrosani: Mechanical Engineering* 22, 2020. pp. 55-62.
- [8] Szirbik S., Virág, Z.: Finite element analysis of an optimized hybrid stiffened plate, *MATEC Web Conf* 342, 2021. pp. 06003.
- [9] Virág Z., Szirbik S.: Modal Analysis of Optimized Trapezoidal Stiffened Plates under Lateral Pressure and Uniaxial Compression, *Applied Mechanics* 2(4), 2021. pp. 681-693.