

# Hivatalos bírálói vélemény

Szekrényes András

Delamináció nem szinguláris modellezése ortotróp kompozit lemezekben

c. doktori munkájáról.

A kompozit anyagú szerkezeti elemek széles körben nyertek felhasználást az autóiparban, a repülőiparban, turbógép építésben, nyomástartó edények kialakításában és még számos a súlycsökkentést, rezgéscsillapítást növelő hatásokat megkövetelő gyártmányok előállításában.

Szekrényes András munkája, témaválasztása a kompozit többrétegű lemezekkel kapcsolatos, a rétegek közötti elválás, szétszakadás okozta mechanikai állapot tisztázásával, annak újfajta modellezésével foglalkozik. Témaválasztása indokolt.

Az értekezés angol nyelven íródott. 108 oldalas kifejtést még 21 oldalas függelék teszi teljessé. A doktori mű 8 fejezetre tagozódik.

A bevezetést, amely bő irodalmi áttekintést ad, az elváló rétegeket tartalmazó kompozit lemezek alapegyenletrendszerét ismertető fejezet következik. A lemez szerkezet nem tartalmaz lágy rétegeket, így a transzverzális elmozdulás mindegyik rétegnél azonosnak vehető. Megadja a szemi-rétegmodell definícióját. Az  $N_l$  számú rétegből felépített kompozit lemezt  $N_{ESL}$  számú egyenértékű réteggel helyettesíti. A lemezeknél 4 fajta elméletet vizsgál

1. Klasszikus Kirchhoff-féle hipotézisre alapuló CLPT elmélet,
2. Elsőrendű, Reissner-Mindlin –féle hipotézisre alapuló FSDT elmélet,
3. Másodrendű SSDT elméletet,
4. Harmadrendű (Reddy féle) TSDT elmélet.

Ezen elméleteknél a lemez síkjába eső elmozdulás a középfelülettől mért  $z$  koordináták lineáris, négyzetes, ill. köbös függvénye.

**Megjegyzés 1:** A szemi-rétegmodellnél az  $N_{ESL}$  egyenértékű rétegszám kiválasztásának mi a mechanikai alapja? Milyen megfontolásokkal állapítjuk meg annak számát? Van-e valamiféle energetikai alapja, hibabecslésre vonatkozó összefüggése?

A műben 2 ill. 4 egyenértékű rétegre vonatkozóan kerülnek bemutatásra az elméleti megfontolások, ill. az ezekre vonatkozó numerikus számítások.

A rétegszétválasztás estén a határoló felület szolgáltatja az oda befutó egyik szemi-réteg alsó ill. a másik réteg felső felületét.

Az egyenértékű rétegek között a jelölt által alkalmazott kinematikai feltételek az alábbiak:

- a síkbeli és transzverzális irányú elmozdulások folytonossága,
- a transzverzális fajlagos szögtorzulások, azok első, második deriváltjainak folytonossága (TSDT) esetben a kapcsolósíkon,
- a globális membrán elmozdulások megadás a referencia síkban,
- a transzverzális fajlagos szögtorzulások azonossága a lemez alsó és felső felületén.

**Megjegyzés 2:** Az összetett elemekből álló mechanikai rendszereknél (testeknél) a csatlakozási (érintkezési) felületen kétfajta illesztési feltétel írható fel, egyik kinematikai, másik dinamikai jellegű. A (2.2) alatti kinematikai, de a (2.4) már helytelenül fejezi ki a  $\sigma_{(i)} \cdot \mathbf{n}_i + \sigma_{(i+1)} \mathbf{n}_{i+1} = \mathbf{0}$  dinamikai illesztési feltételt, ahol  $\sigma_{(i)}$  az  $i$ -dik jelű test feszültségtenzora,  $\mathbf{n}_i$  az  $i$ -dik testből kifelé mutató normális. A csatlakozó felületen a  $\tau_{xz}$  és  $\tau_{yz}$  nyírófeszültségek azonosak, azaz  $\tau_{xz} = G\gamma_{xz}$ ,  $\tau_{yz} = G\gamma_{yz}$ , vagyis a  $\gamma_{xz(i)} = \gamma_{xz(i+1)}$  csak azonos anyagú felületeknél fog fennállni.

Ez a hiba végig vonul az értekezésen! Számos példa is terhelt ezzel az elvi hiba hatásával! A jelölt Reddy (2004) munkájára helyesen hivatkozik, de ezt az alapvető mechanikai ténytet nem alkalmazza. Miért?

**Megjegyzés 3:** A (2.5) és a (2.6) alatti összefüggéseknek mi a fizikai alapja? Milyen kontinuummechanikai tételből következik?

**Megjegyzés 4:** A terheletlen peremeken miért nem a feszültségmentességet írja elő a jelölt, mi a fizikai (mechanikai) tartalma a (2.7)-nek? Mennyivel lesz pontosabb a megoldás ha a (2.7)-et alkalmazzuk és nem a  $\tau_{pz} = G\gamma_{pz} = 0$ ,  $p = 1,2$  feltételt?

A (2.1) helyett a  $K_{ij}$  elmozdulási multiplikátor bevezetésével a (2.8) alatti tömörebb leírás kerül alkalmazásra. A virtuális munka tétele alkalmazásával a egyes alkotó rétegek ortotrop tulajdonságát hordozó anyagállandók mátrixának ismeretében levezetésre kerülnek a egyenértékű igénybevételek:  $N, Q, R$  erők és az  $M_{\alpha\beta}, L_{\alpha\beta}, P_{\alpha\beta}$  nyomatékok, illetve az ezekből

összeállított invariáns formációk révén az egyensúlyi egyenletek mind az el nem vált részre, mind az elvált lemezeket tartalmazó térrészre vonatkozóan.

A 3. fejezet két egyenértékű réteggel modellezett lemezt tárgyal. Meghatározza a különböző lemezelméleti hipotézisekhez tartozóan virtuális munka elve alapján az egyensúlyi egyenleteket, az egyenértékű nyíró erőket és természetesen a szögelfordulásokkal kapcsolatos  $\psi$  paramétereket.

A 4. fejezet négy egyenértékű réteggel modellezett lemezt tárgyalja hasonlóan az előző fejezethez, felírva a kinematikai illesztési feltételeket, tisztázva az elsődleges paramétereket, levezetve az egyensúlyi egyenleteket az első-, a második-, a harmadrendű lemezelméletekre vonatkozóan.

**Megjegyzés 5:** A 3. és a 4. fejezetben változatlanul a tényleges dinamikai illesztési feltétel helyett a fajlagos szögtorzulások azonosságát használja fel (Lásd. (3.3), (3.4)).

**Megjegyzés 6:** A (4.7)-ben  $u_{0i}, v_{0i}$  írandó.

**Megjegyzés 7:** A (4.20)-ban  $z^{(1)} = t_1/2, z^{(2)} = -t_2/2, z^{(3)} = t_3/2, z^{(4)} = -t_4/2$  írandó.

**Megjegyzés 8:** Az elvált részeken miért nem írjuk elő a  $\tau_{pz} = 0 \Big|_{z^{(3)} = -t_3/2}, p = 1,2,$   
 $\tau_{pz} = 0 \Big|_{z^{(2)} = t_2/2}, p = 1,2$  feltételt?

A 7. fejezetben az elvált rétegeket tartalmazó kompozit lemezeknél a repedési front vonalán értelmezhető J integrál meghatározásával foglalkozik. A 3D-s J integrál definíciójából kiindulva, az alakváltozási energiát a különböző lemezelméleti alakváltozásokkal kifejezve végezetül az igénybevételek felhasználásával az un. II és III típusú törési módosú tagokon keresztül határozza meg a szóbanforgó integrálási úttól független J integrált. Ezekre alapozva konkrétan a 2ESL és 4ESL felbontású lemezekre mutat be eredményeket 4 különböző magasságban észlelt rétegelválásnál. A lemezelméleti eredményeket összeveti a VCCT-féle technika alapján kapott  $G_I$  tényezők meghatározását biztosító végeeselemes számítással. A Reddy féle modell (TSDT) adja a legkisebb megoldási hibát a VEM-hez képest.

**Megjegyzés 9:** A kiszámolt eredményekből összeállított Table 7.1 és Table 7.2 összefoglalja a „jóság mértékét”, a megoldások sorrendiségét. Itt kulcsszerephez jut a VEM-es „alapmegoldás”, aminek, sajnos, a pontosságáról nincsenek információk.

A Mellékletek (Appendix) jól pótolják, kiegészítik az egyes fejezetekben leírtak jobb megértését. Az értekezést bő irodalomjegyzék teszi értékesebbé.

A tézisekkel kapcsolatban az alábbiakat nyilatkozom.

1. Tézis: A Megjegyzés 1-3 -ra adott választól függően tudom kialakítani álláspontomat a tézis elfogadásáról.
2. Tézis: Azzal a feltétellel fogadom el, hogy az ESL lemezek illesztésénél a két csatlakozó lemez anyagállandója azonos kell, hogy legyen.
3. Tézis: Itt is korlát a 2. Tézisnél említett feltétel teljesedése.
4. Tézis: Elfogadom.
5. Tézis: Alkalmazásnak tekintem. Az új eredmények rangsorolásának „technikája” rendben van, de a konkrét eredmény függ a numerikus (VEM) közelítés pontosságától, amiről a jelem doktori disszertáció nem közöl adatokat.

Összefoglalva, az értekezés sokrétű, értékes, igényes munkát takar, a bemutatott eredmények hitelesek.

Az eredményeket rangos folyóiratokban publikálta. A leírásból jól érzékelhető, hogy a jelölt birtokolja a kutatott témát, abból széleskörű ismeretekkel rendelkezik.

A doktori művet a nyilvános vitára alkalmasnak tartom.

Miskolc 2017. 02. 13.

Páczelt István

az MTA rendes tagja