

Mesterséges rétegelválás modellezése polimer kompozitokban

MODELLING OF ARTIFICIAL DELAMINATION IN POLYMER COMPOSITES

HLIVA Viktor^{1*}, dr. SZEBÉNYI Gábor¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., Tel.: +36-1-463-1489, e-mail: hlivav@pt.bme.hu

ABSTRACT

In this article, a FEM model of polymer composite specimens prepared with an artificial delamination were constructed in order to validate our results gathered during the measurement of such specimens with digital image correlation with the aim of the localization of the delamination. Two models with different parameters were prepared, both gave similar results, which will be very useful in the preparation of specimens to be measured with DIC in the future.

KIVONAT

Ebben a cikkben a rétegelválást tartalmazó végeelemes modell készítésének lehetőségeit vizsgáljuk, amely alkalmas, a rétegelválások kimutatása céljából végzett digitális képkorrelációs vizsgálataink validálására. Kétféleképpen hoztunk létre rétegelválást a modellben, amelyek hasonló eredményt adtak. A különböző paraméterek mellett elvégzett szimulációk segítségével meghatároztunk pár ökölszabályt arra, hogy hogyan érdemes kialakítani a validálni kívánt DIC-s vizsgálatokhoz a próbatesteket.

Kulcsszavak: polimer kompozit, végeelemes szimuláció, rétegelválás

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szálerősített polimer kompozit szerkezetek egyre elterjedtebbek az autó- és repülőiparban is, köszönhetően kiváló mechanikai tulajdonságaiknak. Ezek azonban kritikus területek biztonsági szempontból, ezért fontos a szerkezetek időszakos ellenőrzése valamilyen roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárás segítségével. Ehhez számos lehetőség áll rendelkezésre, ami főleg az utóbbi 30 év optikai és számítógépes feldolgozási technikák terén tapasztalt fejlődésének köszönhető [1-3].

A digitális képkorreláció (DIC) egy nagy pontosságú optikai módszer nyúlásmérésre, amelyet újabban, mint hibakereső anyagvizsgálati eljárást kezdtek el kutatni. A módszer lényege, hogy a vizsgált szerkezet felületének változása digitális kamerával kerül rögzítésre, különböző terhelési állapotok mellett. A megfelelő szoftver képes meghatározni a terhelés hatására bekövetkező deformáció- és nyúlásmezőket a digitális képkorreláció segítségével [4]. Referencia vagy végeelemes szimuláció alapján ismert, hogy hogyan deformálódik az ép szerkezet az adott terhelés hatására, ha attól eltérést tapasztalunk, az szerkezeti hiba jelenlétére utal.

Ilyen vizsgálatot hajtottak végre Chen és társai [5], akik kis energiájú becsapódások okozta, nehezen észrevehető sérülést tartalmazó kompozit lapok vizsgálatát végezték el a DIC módszerrel. A károsodott területeken kiugró értékeket tapasztaltak a nyúlásmezőben húzóigénybevétel hatására. Stefek és Olsson [6] kis energiájú ütessel rétegelválást hozott létre kompozit lapokban, amelyeket ezután egy speciális keretes befogóban helyeztek el. Nyomó igénybevétel mellett két-két kamerával vizsgálták a kompozit lap két oldalát. A vizsgálat során egyrészt a lokális kihajlásokat és horpadásokat rögzítették, amelyet a végeelemes szimuláció pontosításához használtak fel, másrészt a rétegelválás növekedését tudták követni a szemközi oldalak távolságának lokális növekedése miatt.

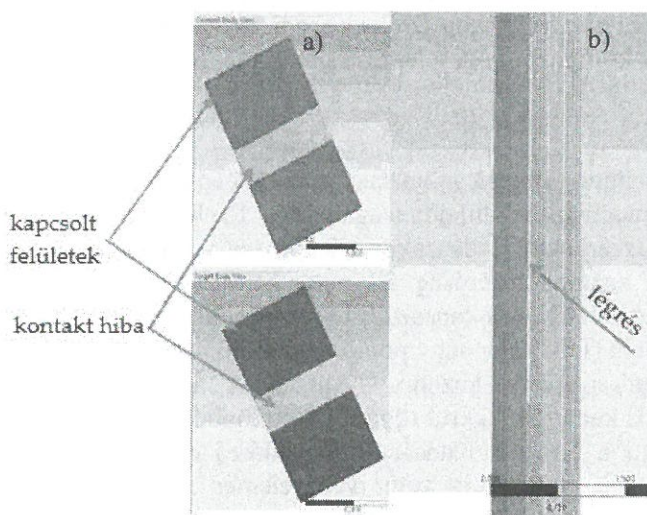
Kutatásunk során mi is a különböző szerkezeti hibák kimutathatóságát vizsgáljuk DIC segítségével polimer kompozitokban. Ennek validálására a már jól bevált roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek és végeelemes modell készítését tűztük ki célul. Ebben a cikkben a rétegelválást tartalmazó kompozit szerkezetek végeelemes modellalkotási lehetőségeit vizsgáljuk meg.

2. MODELLALKOTÁS

Gyorsan összeállítható és lefuttatható szimulációs modelleket készítettünk, amelyekkel összehasonlíthatóvá váltak a különböző rétegelválás-létrehozási lehetőségek, továbbá a kiválasztott modellen kísérleti szimulációkat futtattunk különböző anyag és rétegrend beállításokkal, és megvizsgáltuk, milyen hatással vannak ezek a felületi nyúlásmezőre egy virtuális húzóvizsgálat során.

A kompozitlemez modelljét Autodesk Inventor Professional 2019 segítségével készítettük el, amelyet ezután az ANSYS Workbench 19.1-be importáltuk, amellyel a szimulációkat végeztük. Az 5 rétegből álló lemez geometriája $20 \times 10 \times 1$ mm volt, így egy réteg vastagsága 0,2 mm-re adódott. Egy valós húzóvizsgálathoz képest ez jelentős geometriai egyszerűsítés, amelyre azért volt szükség, mert a számítási időre az elemszám van a legnagyobb hatással, azonban ha a geometria felbontásához alkalmazott háló nem elég sűrű, akkor nem kapunk megfelelő pontosságú eredményt. Ezért az elemszám alacsonyan tartásához inkább a próbatetek méretét csökkentettük és sűrű hálót alkalmaztunk.

A rétegek kapcsolódó felületei között a végeelemes szoftver automatikusan kapcsolatot generált. A rétegelválás modellezéséhez két lehetőséget hasonlítottunk össze: az egyik esetben a két réteg között automatikusan definiált kapcsolatot szüntettük meg bizonyos területen (1. ábra, a)), a másik esetben adott alakú, 0,01 mm vastag lemezt vágunk ki az egyik rétegből (1. ábra, b)). Ez utóbbi egyben feszültséggyűjtő hely is, a beállított hiba az adott réteget gyengíti a keresztmetszet csökkenése miatt. A rétegelválás geometriája mindkét esetben a 2. és 3. réteg között, a próbatest közepén, annak teljes szélességben végigfutó, 8 mm széles téglalap, mivel ilyen próbatetek valós elkészítése is igen egyszerű. Azzal, hogy nem szimmetrikusan a rétegek között került elhelyezésre a hiba, a szimuláció eredményéből az is megfigyelhető, hogy milyen mértékben érződik a hiba hatása abban az esetben, ha csak 2, illetve ha már 3 réteg takarja azt.

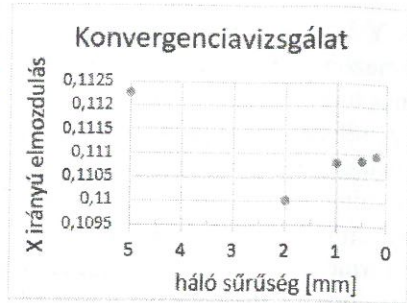


1. ábra

A rétegelválás kialakításának módszerei: kontakthiba a), légrés b)

A próbatetek hálózása is az ANSYS-ban történt. A felbontás megfelelőségének vizsgálatára konvergencia tesztet hajtottunk végre, azaz egyre növekvő elemszám mellett futtattunk szimulációkat az adott modellen, amely következtében azt tapasztaltuk, hogy a vizsgált paraméter (2. ábra) konvergál egy adott értékhez, ugyanis 1 mm vagy annál kisebb háló sűrűség esetén már nem változott szignifikánsan az eredmény. Ezek alapján a további szimulációk futtatásához 0,5 mm-es háló felbontást választottunk, így $0,5 \times 0,5 \times 0,2$ mm geometriájú elemek adódtak, ez megfelelő pontosságú eredményt biztosít, elfogadható számítási idő mellett.

háló felbontás [mm]	max. X irányú elmozdulás [mm]	elem szám [db]	számítási idő [s]
5	0,11228	50	2
2	0,11002	250	3
1	0,11081	1000	4 3
0,5	0,11086	4000	7
0,2	0,11097	25000	171



2. ábra

A konvergenciavizsgálathoz kapcsolódó eredmények

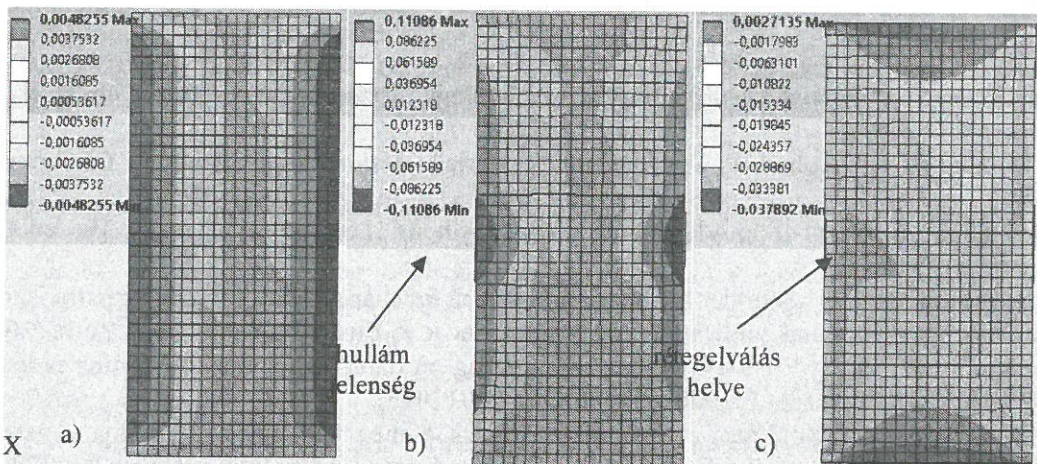
A következő egyszerűsítést a befogások és a terhelések megadásánál hajtottuk végre. A húzó és nyomó vizsgálatnál a kompozit lemez felső felületét 1 mm-es elmozdulással terheltük meg, amíg a lemez alsó felületét fixen rögzítettük. Úgy találtuk, hogy ez megfelelő és ilyen próbatest geometriai arányok mellett nincs hatással a befogás és terhelés helye a rétegelvált terület viselkedésére.

Anyagként az ANSYS anyagkönyvtárban megtalálható szén és üveg unidirekcionális (UD) anyagot, szén szövetet és epoxi gyantát használtuk. Három koordináta-rendszert definiáltunk a különböző rétegrendek kialakításához, amelyek közül az egyik a próbatest hosszanti oldalával párhuzamos, a másik kettő attól szimmetrikusan $\pm x$ fokkal tért el, ($x = 0$ és 45° között több különböző értéket is megvizsgáltam)

3. EREDMÉNYEK

Azonos paraméterek melletti futtatások során ugyan csekély mennyiségi eltérést tapasztaltunk a deformációkban és nyúlásokban a rétegelváltás modellezésének két típusa között, azonban jellegre, a kialakult mintázatokban hasonló eredményt adtak. A továbbiakban a kontakthibás modellek eredményeit mutatjuk be.

Azonos alapanyagot használva, réteg elforgatás nélkül (referencia) nem jelenik meg a próbatest szélessége mentén átmenő rétegelváltás jelenlétére utaló jelenség (3. ábra, a)). Azonban a rétegek elforgatásával, például UD $[+45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ]$ rétegrendet használva, ahol a „/” a rétegelváltás helyzetét jelzi, a vizsgált rétegelváltás kiválóan megfigyelhető, ugyanis az X tengely menti elmozdulás mezőben egy hullám jelenik meg (3. ábra, b)). Talán még szembetűnőbb a normál felületi megnyúlás (3. ábra, c)), amelyen jól látható a rétegelváltás helye.



3. ábra

a), X irányú deformáció a referencia, illetve b), a 45° -os rétegeket is tartalmazó próbatesteknél, c) a normál feszültség a 45° -os rétegeket is tartalmazó próbatestnél

Azt tapasztaltuk, hogy $0-45^\circ$ -os tartományon belül, minél nagyobb szögben fordítjuk el a rétegek főirányát, annál hangsúlyosabb a megjelenő hullám jelenség a referenciához képest. Ez egyrészt azzal magyarázható, hogy kevesebb szál áll a terhelés irányába, másrészt a rétegek deformáció során egymásra gyakorolt hatása is növekszik. UD rétegek használata esetén nagyobb mértékű változás jelenik meg, mint szövetnél, hiszen UD erősítés esetén nagyobb mértékű különbség van a réteg fő irányában értelmezett rugalmassági modulusok között, amíg szöveteknél ez a két érték egyenlő vagy összemérhető nagyságú. 1

mm-es Y irányú elméleti megnyújtásnál, a szén UD-nál nagyobb változást mutatott a modell az X irányú nyúlásmezőben, mint üveg UD-nál, ám ezek jellegre megegyeznek, ezért ez csak az erősítőanyagok eltérő rugalmas tulajdonságainak köszönhető.

A rétegek elforgatása helyett eltérő anyagok párosításával, azaz hibridizálással is elérhető a hullám megjelenése az X irányú deformációban a referencia próbatesthez képest, azonban ez egy nagyságrenddel kisebb változást eredményezett a nyúlásmezőben. Vizsgált esetek: 4 db szén UD közé egy másik típusú, nagyteljesítményű szén UD-t építettünk, illetve 4 db szén UD közé egy üveg UD-t építettünk.

Természetesen az egyre nagyobb mértékű, az X irányú deformációval összemérhető nagyságú Z irányú deformáció is jelentkezik, amely a kétdimenziós DIC berendezés számára nem értelmezhető, így némi hibát is okoz az X irányú deformáció meghatározásában. Amennyiben a kamera mélységélességén belül marad a Z irányú kitérés, a mérés hibaészlelésére alkalmas marad, azonban a még pontosabb eredmények érdekében érdemesebb a valós vizsgálatokat a kétkamerás háromdimenziós DIC módszerrel elvégezni.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelentős egyszerűsítéseket és egy mesterséges hibát tartalmazó végeelemes modelleket hoztunk létre, amelyeket aztán virtuális, számítógépes környezetben húzóvizsgálatnak vetettünk alá. A kapott szimulációs eredmények felületi nyúlásmezőjében megjelent a rétegelválásra utaló jelenség. Vizsgáltuk különböző módon létrehozott rétegelváltások, eltérő anyagok és különböző rétegrendek alkalmazásának hatását a felületi nyúlásmezőre. A virtuális előkísérletek tanulságai alapján egyrészt olyan valós próbatestek készíthetők majd, amelyek a képkorrelációs vizsgálat során hangsúlyosabb eltéréseket mutatnak a nyúlásmezőben a referencia darabokhoz képest, másrészt rámutatnak arra, hogy milyen jellegű változásokat keressünk majd a valós mérések során.

A továbbiakban a modell fejlesztésén fogunk dolgozni. Amellett, hogy a vizsgálatokhoz kiválasztott anyag szimulációhoz szükséges anyagjellemzőit meghatározzuk, a geometriát és peremfeltételeket is pontosítjuk majd. A mostanihoz hasonló módon különböző geometriájú rétegelváltást tartalmazó próbatesteket és különböző igénybevételek felületi nyúlásmezőre gyakorolt hatását is vizsgáljuk majd a szimulációk során. A végcél egy olyan modell megalkotása, amely alkalmas a valós DIC mérések validálására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megjelenését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal NKFIH FK 124352 és NVKP 16-1-2016-0046 számú pályázatai támogatták.

IRODALOM

- [1] Breuer U. P.: Commercial aircraft composite technology. Springer International Publishing, Germany (2016).
- [2] Gay D., Hoa S. V., Stephen W. T.: Composite materials: design and applications. CRC press, Florida (2007).
- [3] Gholizadeh S.: A review of non-destructive testing methods of composite materials. Procedia Structural Integrity, 1, 50-57 (2016).
- [4] Sutton M. A., Ortu J. J., Schreier H.: Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer Science & Business Media, New York, (2009).
- [5] Chen X., Yu Z., Wang H., Bil C.: Strain monitoring on damaged composite laminates using digital image correlation. Procedia Engineering, 99, 353-360 (2015).
- [6] Sztefek P., Olsson R.: Nonlinear compressive stiffness in impacted composite laminates determined by an inverse method. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40(3), 260-272 (2009).