

AZ ELMOZDULÁSILLESZTÉSES TECHNIKA ALKALMAZÁSA SZÁLTEKERCELT KOMPOZIT TÖMLŐDARAB EGYTENGELYŰ HÚZÁSÁRA

APPLICATION OF THE DISPLACEMENT COUPLING TECHNIQUE FOR MODELLING OF UNIAXIAL TENSION OF A CORD-RUBBER COMPOSITE TUBE SAMPLE

Szabó Gyula, MSc, doktorjelölt, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék,
Dr. Váradi Károly, DSc, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

ABSTRACT

Displacements, strains and stresses of a railway composite cord-rubber air brake tube undergoing uniaxial tension have been examined by microscale FE modelling using the displacement coupling technique for obtaining boundary conditions.

Load transfer mechanism has been demonstrated and characterized numerically by strain and stress results inside and between reinforcement layers (implying that shear plays a dominant role in the load-transfer mechanism). The microscale nature of the FE model ensures that the strain and stress results are representative for the reinforcement layers.

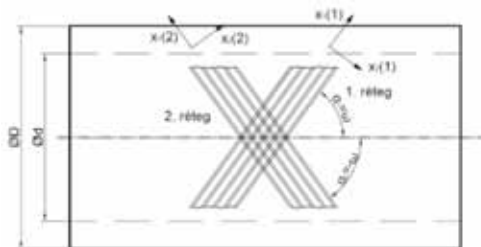
1. BEVEZETÉS

Száltekerceselt gumimátrixú kompozit tömlőket elterjedten alkalmaznak különféle iparágakban (pl. replégéiparban, űrkutatásban, olajiparban) nagy szilárdság-tömeg és merevség-tömeg arányuk, illetve korrózióállóságuk miatt [1]. Az 1. ábra a száltekerceselt tömlők felépítését mutatja be 2 erősítőréteg esetén. A szálkötegek a tömlő tengelyével α_1 , illetve α_2 szöget zárnak be, melyek nagysága ω , illetve $-\omega$, kiegyensúlyozott rétegfelépítést biztosítva. Az egyes rétegekre x_1 az 1. anyagi főirányt, x_2 az arra merőleges (rétegbe eső) 2. anyagi főirányt jelöli.

A kompozit tömlők leggyakoribb terhelési esetei: belső nyomás, egytengelyű húzás és biaxiális húzás (egytengelyű húzás és belső nyomás egyidejű jelenléte) [2], illetve vasúti féktömlőként és az olajiparban való alkalmazás esetén a hajlítás [3]. A leggyakrabban alkalmazott száltekerceselési szög $\pm 55^\circ$, amely a biaxiális húzás terhelési esetre vet optimális orientációs szög. [4]

Kompozit erősítőrétegek anyagjellemzőit leggyakrabban a keverési szabályok [5] felhasználásával határozzák meg a szálkötegek és a mátrix mechanikai jellemzői alapján, a száltérfogatarány felhasználásával számított súlyozott átlagokként. A műszaki gyakorlatban előforduló végeleemes modellekben a kompozit rétegeket

legtöbbször homogénnek tekintik, átlagolt anyagjellemzőkkel. Ezek a makromodellek az adott mechanikai problémákra szerkezeti szinten többnyire pontos eredményeket nyújtanak, pl. elmozdulás; az erősítőrétegen belüli alakváltozási és feszültségi eredmények viszont nem valóságshűek [6].



1. ábra. A kompozit tömlő felépítése [7]

Ennek a hiányosságnak a kiküszöbölésére mikromodelleket hoznak létre, ezekben az erősítőrétegeknek csak egy kisebb szeletét vizsgálják. A szálkötegek és a mátrix elkülönítve szerepelnek, a valós geometriával (a szálkötegek sodrott jellegét legtöbbször elhanyagolják), eltérő anyagmodellekkel (a szálkötegek legtöbbször lineárisan rugalmas, transzverzális izotróp anyagtvörénnyel vannak modellezve, a mátrix lineárisan rugalmas, izotróp). A végeleemes modellalkotás során az elmozdulás illesztésen alapuló ún. almodellelés („submodelling”) technikát használják fel, amellyel egy végeleemes makromodellről vetítik át a mikromodell peremén fellépő elmozdulásokat, így pontosabb eredmények nyerhetők az egyes erősítőrétegekben belül [8,9].

Bojtár [10] egységcella (‘unit cell’, amely a legkisebb olyan térfogatelem –legtöbbször négyzet vagy hatszög keresztmetszettel-, amelyen a számítások a teljes kompozitra jellemző eredményeket adnak) segítségével határozta meg egy textil kompozit makroszkopikus anyagjellemzőit, vizsgálva a száltérfogatarány, a

szálköteg rugalmassági modulusának és a szövési módok hatását.

Goda [11] szálerősített PEEK (poliéter-éterketon)-acél csúszópárok tönkremeneteli folyamatait vizsgálta különböző szálorientációk esetén elmozdulás-illesztésen alapuló szálelválási mikromodell felhasználásával, melyben határréteg-elemek segítségével azonosította a húzó és nyíró típusú szálelválásra utaló folyamatokat húzás és nyomás esetén.

Jelen cikk szerzői korábban végeeselemes makromodellt dolgoztak ki száltekerceszt kompozit tömlődarab egytengelyű húzásának vizsgálatára [12]. Jelen cikk erre a vizsgálatra építve kívánja bemutatni az erősítőrétegek mechanikai viselkedését.

2. EGYTENGELYŰ HÚZÓKÍSÉRLET



2. ábra. A kompozit tömlőszakasz egytengelyű húzóvizsgálatának kísérleti elrendezése

Egytengelyű húzókísérletet végeztünk 150 mm hosszú tömlődarabokon (2. ábra) Zwick Z250 típusú szakítógépen. Az előírt elmozdulás 30 mm, a húzási sebesség 5 mm/min volt, így az időfüggő mechanikai viselkedés elhanyagolhatóan tekinthető.

3. VÉGESELEMES MODELLEK

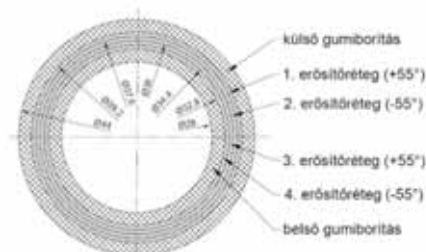
3.1 Végeeselemes makromodell

A kompozit tömlő keresztmetszete a 3. ábrán látható. A belső átmérő 28 mm, a külső átmérő 44 mm, a gumiborítások 2,4 mm vastagok. Az erősítőrétegek hengerkoordináta-rendszerrel jellemezhetők, a rétegrend [+55°/-55°/+55°/-55°]. A tömlődarabok hossza a kísérletnek megfelelően 150 mm.

A makromodellben az erősítőrétegek transzverzálisan izotróp modellel szerepelnek, az anyagjellemzők a keverési szabályok [5] szerint lettek meghatározva (a szálköteg $E_f=2961$ MPa

rugalmassági modulusa, $\nu_f=0,2$ Poisson-tényezője és a mátrix $E_m=6$ MPa felhasználásával): $E_1=1338$ MPa, $E_2=E_3=16$ MPa, $\nu_{12}=\nu_{13}=0,37$, $\nu_{23}=0,498$, $G_{12}=G_{13}=5,6$ MPa, $G_{23}=5,4$ MPa [13].

A fenti anyagjellemzők az anyagi koordináta-rendszerben értendők, melyben "1" jelöli a szádirányt, "2" jelöli a szára merőleges irányt a rétegen belül, míg "3" jelöli a rétegre merőleges irányt.



3. ábra. A kompozit tömlő keresztmetszete [13]

A gumiborítások EPDM-EVA kopolimer anyagúak, 2 paraméteres Mooney-Rivlin modellel írtuk le az anyagi viselkedésüket, melynek paraméterei: $C_{10}=-0,4982$ MPa, $C_{01}=1,523$ MPa, $D=0$ [13].

A fenti anyagjellemzők kísérleti igazolására kompozit próbatesteken és tömlődarabokon végeztünk húzókísérleteket [14].

Az erősítőrétegek és a gumiborítások között ragasztott kapcsolat van a makromodellben, mert a gumiborítások a szálkötegek köré vannak vulkanizálva.

A makromodell végeeselem szimulációja két lépésből áll (4. ábra), az elsőben 1,5 MPa nyomást adtunk a piros színnel jelölt felületekre, a tömlő külső palástfelületén a kísérlethez használt csőbilincsekkel modellezve. Ez a nyomásérték elegendően nagy ahhoz, hogy a csőbilincsek és a tömlődarabok közötti csúszás elkerülhető legyen.

■ Remote Displacement:3
■ Remote Displacement:4
■ Pressure: 1.5 MPa



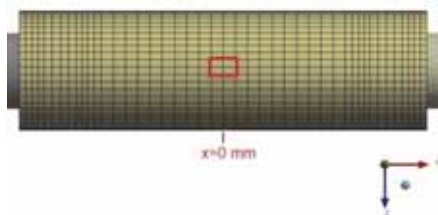
4. ábra. A kompozit tömlődarab terhelései és peremfeltételei a végeeselemes makromodellben

Az elmozdulási peremfeltételeket a tömlőbe dugott csapok végein adtuk meg, a csapok és a tömlődarab között ragasztott/súrlódásos kapcsolatot definiáltunk a tömlődarab belső palástfelületén (a súrlódási tényező 0,8 volt). A csapok acélból vannak, a rugalmassági modulusuk

$E = 200\,000$ MPa, Poisson-tényezőjük $\nu = 0,3$. A jobb oldali csap jobb oldali végén 30 mm-es elmozdulás működik X irányban, míg a bal oldali csap bal oldali vége rögzített [13].

3.2 Végeselemes mikromodell

A végeselemes mikromodell a keresztmetszetet a teljes vastagságban (az erősítőrétegeket és a gumiborításokat is beleértve) tartalmazza, hosszirányban $-5 < x < 5$ [mm] koordináták között helyezkedik el (5. ábra), középponti szöge $14,4^\circ$, az 1. erősítőréteg tetején 4,91 mm széles (7. ábra), érintőirányban a modell egyhúszötödét tartalmazza. A mikromodellben a száلكötegek és a mátrix külön testekként vannak modellezve, a száلكötegek csavarvonalban helyezkednek el, a száltekerceselésnek megfelelően. A száلكötegek átmérője 0,7 mm, a mikromodell hozzávetőleges száltérfogat-aránya 45%, hasonlóan a makromodellhez [13]. A rétegek ketté vannak osztva a rétegek közepe mentén az eredmények megfelelő ábrázolása érdekében (7. ábra). A végeselemes mikromodellben a gumiborítások anyagmodellje megegyezik a 3.1 fejezetben részletezett anyagmodellel, így a mikromechanikai modellezés csak a modell “magjára”, azaz az erősítőrétegekre terjed ki (7. ábra).



5. ábra. A mikromodell elhelyezkedése a tömlő makromodelljében

A száلكötegek lineáris, transzverzálisan izotróp anyag törvénnyel vannak modellezve a következő anyagjellemzőkkel:

$E_1 = 2961$ MPa, $E_2 = E_3 = 80$ MPa, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,2$; $\nu_{23} = 0,4$; $G_{12} = G_{13} = 33,3$ MPa; $G_{23} = 26,85$ MPa. Az 1-es anyagi főirányú modulus megegyezik a száلكöteg számított rugalmassági modulusával [13], míg E_2 és E_3 becslött értéke 80 MPa, hiszen a száلكötegek keresztirányban sokkal kisebb merevségűek. A keresztirányú modulus validálását szobahőmérsékleti és -40°C -os húzóvizsgálatok segítségével végeztem el [14].

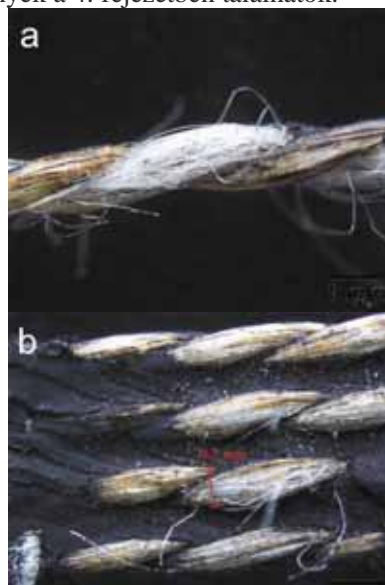
G_{12} , G_{13} és G_{23} csúsztató modulusokat (1) és (2) alapján számítottuk ki:

$$G_{12} = G_{13} = \frac{E_2}{2 \cdot (1 + \nu_{12})} \quad (1)$$

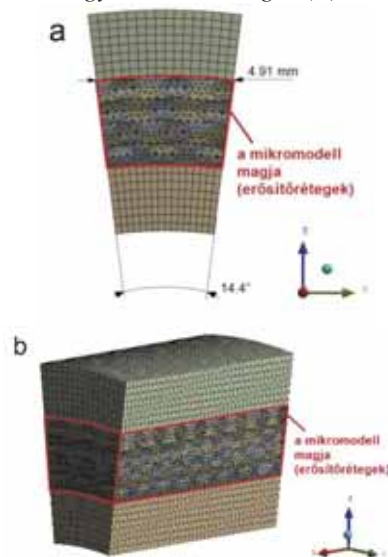
$$G_{23} = \frac{E_2}{2 \cdot (1 + \nu_{23})} \quad (2)$$

Ahogy az a 6. ábrán is látható, a száلكöteg számos elemi szálból áll, részben a sodort jellegéből adódóan a nyíró viselkedés szempontjából az elemi szálak jelentősége kisebb, a mátrix szerepe pedig jelentősebb [15].

Az anyagjellemzők becslési pontosságának ellenőrzése érdekében magasabb keresztirányú modulus esetét is megvizsgáltuk ($E_2 = E_3 = 200$ MPa), ebben az esetben az anyagjellemzők a következők voltak: $E_2 = E_3 = 200$ MPa, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0,2$; $\nu_{23} = 0,4$; $G_{12} = G_{13} = 83$ MPa, $G_{23} = 67$ MPa. Az erre vonatkozó eredmények a 4. fejezetben találhatóak.



6. ábra. A száلكötegekről készített mikroszkopikus képek: egy száلكöteg képe (a), gumimátrixba ágyazott száلكötegek (b)

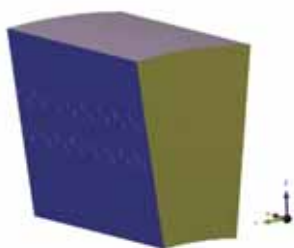


7. ábra. A tömlődarab mikromodelljének hálózott geometriája: előlnézetből (a), axonometrikus nézetből (b), a mikromodell “magja” (erősítőrétegek) piros színnel jelölve

A mikromodell peremfeltételei az almodellezésnek megfelelően, a jobb és bal oldali peremeken vett átlagos elmozdulások különbségei alapján lettek meghatározva. X irányban a jobb oldali peremen 15,15 mm-es elmozdulás volt a makromodellben, míg a bal oldali peremen ez az érték 12,36 mm, így a mikromodell jobb oldali pereme 2,79 mm-t mozdul el X irányban, míg Y és Z irányban nem voltak megkötve a szabadságfokok (8. ábra), a jobb oldali peremen pedig 0 mm az X irányú elmozdulás (9. ábra). Az Y- és az Y+ oldalak (8., illetve 9. ábra) nem mozdulhattak el érintőirányban, így a tömlő érintőirányú folytonosságát modelleztük. A merevtest-szerű mozgásokat gyenge rugókkal akadályoztuk meg.

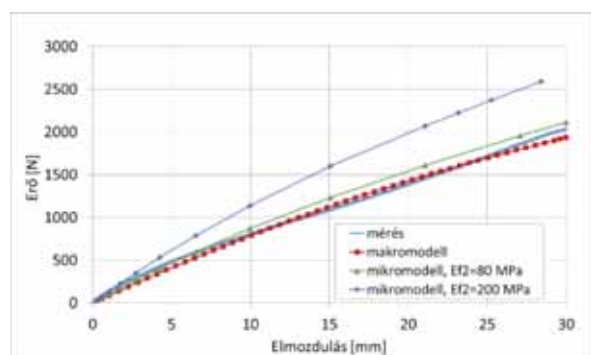


8. ábra. Előírt elmozdulások a jobb oldali (piros) és az Y- oldali (kék) peremeken



9. ábra. Előírt elmozdulások a bal oldali (sárga) és az Y+ oldali (kék) peremeken

4. EREDMÉNYEK

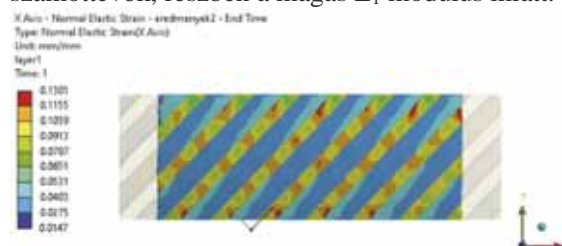


10. ábra. A tömlődarab egytengelyű húzásának erő-elmozdulás görbéi: kísérlet, végeeselemes makromodell; végeeselemes mikromodell

A 10. ábrán láthatók az erő-elmozdulás görbék: a kísérleti eredmények, továbbá a makromodell és a mikromodell eredményei $E_2=80$ MPa és $E_2=200$ MPa esetén. A mikromodell eredményei $E_2=80$ MPa esetén jól közelítik a mérési eredményeket, $E_2=200$ MPa esetén viszont igen jelentős az eltérés a modell és a kísérlet eredményei között.

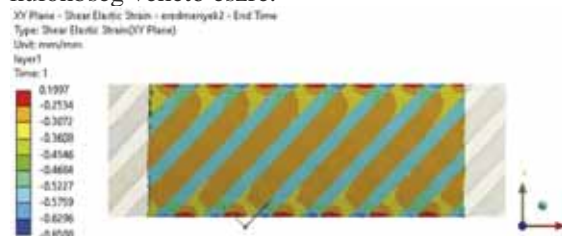
A következő ábrákon az alakváltozási és feszültségi eredmények az 1. erősítőréteg (legkülső erősítőréteg) közepére vonatkozóan lesznek bemutatva 2,79 mm-es elmozdulásnál 1:1-es deformált alakkal, az anyagi koordináta-rendszer 1, 2 és 3 iránya X, Y és Z-vel (piros, zöld és kék színnel) jelölve.

A 11. és 12. ábrán a szálirányú, illetve nyíró alakváltozás látható $x=-4$ mm $x=4$ mm között, elhagyva a peremzavarral terhelt környezeteket. A mátrixban szálirányban magasabb alakváltozások alakulnak ki, a mátrix jelentős húzásnak van kitéve szálirányban, míg a szálkötegekben ezek nem számottevők, részben a magas E_1 modulus miatt.



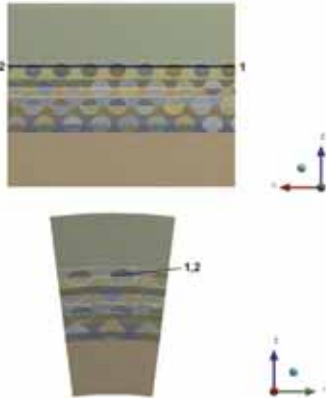
11. ábra. Szálirányú alakváltozás az 1. erősítőrétegben $x=-4$ mm és $x=4$ mm között

A nyíró alakváltozásokban jelentős különbség figyelhető meg a mátrix és a szálkötegek között, részben az eltérő csúsztató rugalmassági modulusoknak köszönhetően. Ez a jelentős különbség a hosszirányú nyomvonalon (13. ábra) is megfigyelhető, amely számszerűsítve 0,28:0,55 arányú (14. ábra). A tömlődarab esetén a terhelésátadás domináns módja a nyírás, a nyíró alakváltozások sokkal jelentékenyebbek az 1 és 2 főirányú alakváltozásoknál, továbbá a szálkötegek és a mátrix nyíró alakváltozásában jelentős különbség vehető észre.

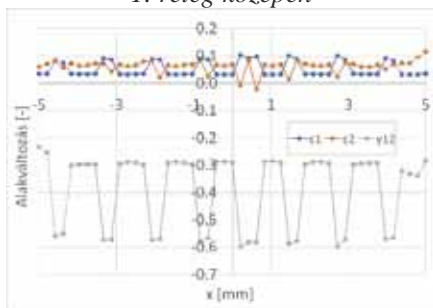


12. ábra. 12 síkbeli alakváltozás az 1. erősítőrétegben, $x=-4$ mm és $x=4$ mm között

A 16. ábrán a 15. ábrán jelölt, az egyik szálköteg közepén futó nyomvonalon, anyagi koordinátarendszerben értelmezett alakváltozások láthatók. Ezek az alakváltozási komponensek jóval alacsonyabbak, mint a hosszirányú nyomvonalon előforduló értékek. ϵ_1 közel állandó értékű, ϵ_2 kissé magasabb a nyomvonalon, míg γ_{12} a legnagyobb, jelentős mértékben meghaladva a másik két alakváltozási komponenst, alátámasztva a nyírás jelentőségét a terhelésátadási folyamatban.



13. ábra. Az alakváltozások megjelenítéséhez használt, globális X irányú nyomvonal helyzete az 1. réteg közepén



14. ábra. Alakváltozások a 13. ábra nyomvonalán, anyagi koordinátarendszerben értelmezve

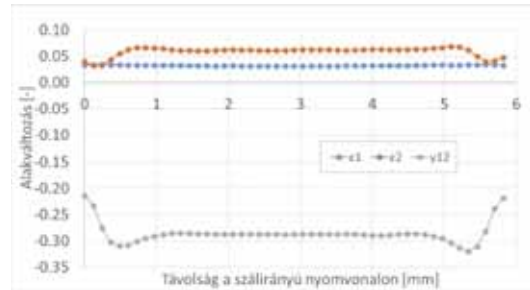


15. ábra. Az egyik szálköteg közepén értelmezett nyomvonal

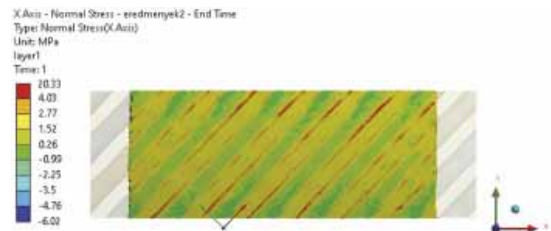
A 17. ábrán az 1 anyagi főirányú alakváltozások láthatók. A húzófeszültségek egyenletesen oszlanak el a mátrix és a szálkötegek között, ennek főként az az oka, hogy a tömlő folytonos a meridiánmetszetre merőleges értelemben, az ott érvényes peremfeltételek megakadályozzák az elmozdulást érintőirányban.

A 18. ábra a nyírófeszültségeket mutatja az 1. rétegben, kis különbség figyelhető meg a szálkötegek és a mátrix között.

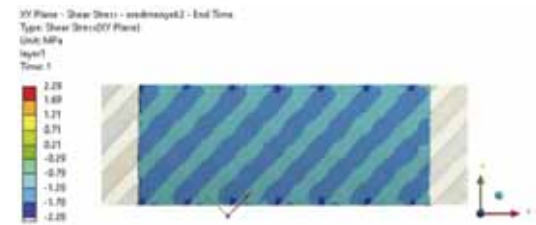
Az erősítőrétegen belül, a mátrixban a mechanikai viselkedést a nyírás dominálja (12. ábra), míg a szálkötegek erőteljes húzásnak vannak kitéve (17. ábra).



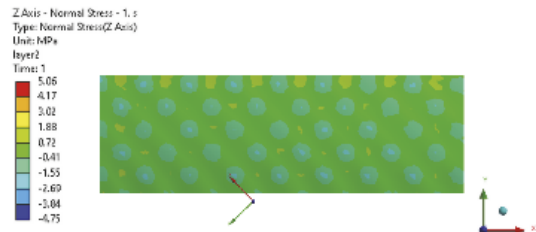
16. ábra. Alakváltozási komponensek a 15. ábrán értelmezett nyomvonalon, anyagi koordinátarendszerben értelmezve



17. ábra. Szállirányú (1 anyagi főirányú) feszültség $x=-4$ és $x=4$ mm között az 1. réteg közepén



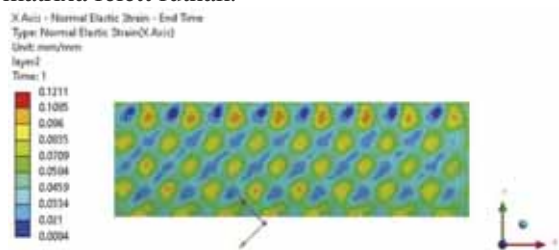
18. ábra. Nyírófeszültség az 1. rétegben $x=-4$ és $x=4$ mm között



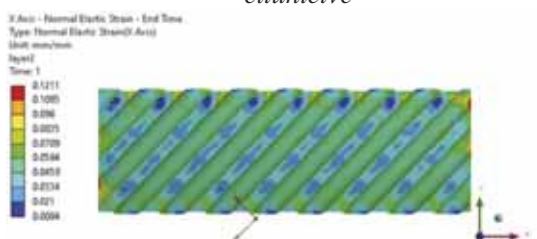
19. ábra. 3 irányú (rétegre merőleges) feszültség az 1. és a 2. réteg között, a 2. réteg tetején

A szomszédos rétegek szálkötegei az átfedések helyén erős nyomó igénybevételt kapnak

(19. ábra). A terhelés átadása az 1. rétegről a 2. réteg mátrixára jelentős 1 irányú (szádirányú) nyúlás előfordulása mellett történik (20. ábra, 21. ábra). A 20. ábrán az 1. réteg szálkötegei el vannak tüntetve, míg a 21. ábrán látszanak az 1. réteg szálkötegei. Ott fordulnak elő jelentős 1 irányú alakváltozások, ahol az 1. réteg szálkötegei a 2. réteg mátrixa felett futnak.



20. ábra. 1 irányú alakváltozás az 1. és a 2. réteg között, a 2. réteg tetején, az 1. réteg szálkötegei eltüntetve



21. ábra. 1 irányú alakváltozás az 1. és a 2. réteg között, a 2. réteg tetején, az 1. réteg szálkötegei látszanak (felülnézetben)

KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott végeelem modell növekményes technikával, az almodellzés (submodellíng) felhasználásával készült. A szálkötegek lineárisan rugalmas, transzverzálisan izotróp modellel vannak leírva, a keresztirányú rugalmassági modulusok becsült volta némi pontatlanságot eredményezhet.

A mikromodell erő-elmozdulás görbéi jól közelítik a kísérleti eredményeket $E_2=E_3=80$ MPa esetén, viszont jelentősen magasabb rugalmassági modulusok esetén ($E_2=E_3=200$ MPa) a mikromodell eredményei jelentősen eltérnek a kísérleti eredményektől.

Az erősítőrétegek mechanikai viselkedését alapvetően a nyírás határozza meg. A szálkötegek húzó igénybevétele mellett a mátrixban a szálkötegek teljes környezetében jelentős rétegen belüli, azaz 12 síkbeli nyíró alakváltozások és feszültségek fordulnak elő, ez a nyírás dominanciájára és a szál-mátrix elválásra való hajlam elsődlegességére utal.

A szomszédos rétegek szálkötegei az átfedések helyén erős nyomó igénybevételt kapnak.

A terhelés átadása az 1. rétegről a 2. réteg mátrixára jelentős 1 irányú (szádirányú) nyúlás előfordulása mellett történik.

IRODALOM

- [1] Braiek, S. és tsai.: Experimental and Numerical Study of Adhesively Bonded $\pm 55^\circ$ Filament Wound Tubular Specimens under Uniaxial Tensile Loading. *Composite Structures*. 172, pp. 297-310, (2017)
- [2] Kaddour, A. S. és tsai.: Behaviour of 45° glass/epoxy filament wound composite tubes under quasi-static equal biaxial tension-compression loading: experimental results, *Composites, Engineering*, 34 (8), pp. 689-704, (2003)
- [3] Gao, P. és tsai.: Analytical modeling for offshore composite rubber hose with spiral stiffeners under internal pressure, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. (2020)
- [4] Soden PD, és tsai.: Experimental failure stresses for $\pm 55^\circ$ filament wound glass fibre reinforced plastic tubes under biaxial loads. *Composites*; 20 (2), pp. 125-135, (1989)
- [5] Chawla, K.K. Composite Materials Science and Engineering. 3rd Edition, Springer, New York, London. (2009)
- [6] Xia, Z., és tsai.: A meso/micro-mechanical model for damage progression in glass-fiber/epoxy cross-ply laminates by finite-element analysis, *Composites Science and Technology*, 60 (8), pp. 1171-1179, (2000)
- [7] Szabó G. és Váradi K.: Összenyomásnak és hajlításnak kitett kompozit tömlő instabilitási vizsgálata GÉP, 70 (4), pp. 25-30., (2019)
- [8] Rosso, P. és Váradi, K.: FE macro/micro analysis of thermal residual stresses and failure behaviour under transverse tensile load of VE/CF – fibre bundle composites *Composites Science and Technology*, 66 (16), pp. 3241-3253, (2006)
- [9] ANSYS Mechanical User's Guide, Advanced Analysis Guide, Chapter 8: Submodeling
- [10] Bojtár, G.: Textil kompozitok anyagtulajdonságainak numerikus modellezése, doktori (PhD) értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, (2019)
- [11] Goda, T.: Kompozit-acél csúszópárok kopási tulajdonságai, doktori (PhD) értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest-Kaiserslautern, (2002)
- [12] Szabó, G., és Váradi, K.: Uniaxial Tension of a Filament-wound Composite Tube at Low Temperature. *Acta Technica Jaurinensis*, 11(2), pp. 84-103., (2018)
- [13] Szabó, G, Váradi K és Felhős D. Finite element model of a filament-wound composite tube subjected to uniaxial tension. *Modern Mechanical Engineering*; 7 (4): 91-112, (2017)
- [14] Szabó, G.: Numerical modeling of filament-wound cord-rubber composite tubes, doktori (PhD) értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2022