

# ÖSSZENYOMÁSNAK ÉS HAJLÍTÁSNAK KITETT SZÁLTEKERCELT KOMPOZIT TÖMLŐ INSTABILITÁSI VIZSGÁLATA

## INSTABILITY ANALYSIS OF A FILAMENT-WOUND COMPOSITE TUBE SUBJECTED TO COMPRESSION/BENDING

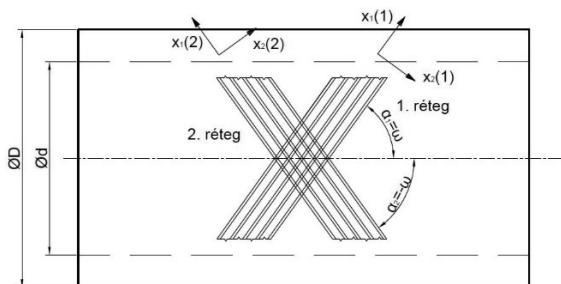
Szabó Gyula, MSc, doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, Dr. Váradi Károly, DSc, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

### ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the global buckling of a cord-rubber tube subjected to axial compression and its cross-section instability due to bending, by a nonlinear FE model. Force-displacement, equivalent strain, equivalent stress results along with oblateness and curvature results for the complete process have been presented. Strain states in reinforcement layers imply that the probable failure modes of the reinforcement layers are both delamination and yarn-matrix debonding. FE results have been validated by a compression/bending test experiment conducted on a tensile test machine.

### 1. BEVEZETÉS

Száltekerceselt gumimátrixú kompozit tömlőket elterjedten alkalmaznak különféle iparágakban (pl. közlekedésiparban, olajiparban) nagy fajlagos szilárdságuk, nagy fajlagos merevségük és korrózióállóságuk miatt. [1] Az 1. ábra a száltekerceselt tömlők felépítését mutatja be 2 erősítőréteg esetén. A szálak a tömlő tengelyével  $\alpha_1$ , illetve  $\alpha_2$  szöget zárnak be, melyek nagysága  $\omega$ , illetve  $-\omega$ , biztosítva a rétegfelépítés kiegyensúlyozottságát. Az egyes rétegekre  $x_1$  az anyagi főirányt,  $x_2$  az arra merőleges (rétegre eső) irányt jelöli.



1. ábra. A kompozit tömlő felépítése

A kompozit tömlők gyakori terhelési esetei: belső nyomás, egytengelyű húzás és biaxiális húzás (egytengelyű húzás és belső nyomás egyidejű jelenléte), illetve hajlítás. A leggyakrabban alkalmazott száltekerceselési szög  $\pm 55^\circ$ , amely a biaxiális húzás terhelési esetére optimális orientációs szög. A kompozit tömlők élettartamuk során számos alkalommal vannak

kitéve hajlító igénybevételnek, amely -jelentős deformáció mellett- stabilitásvesztéshez vezethet, szélsőséges esetben tönkremenetelt okozva. Fuchs és tsai [2] szerint lehetséges, hogy a hajlított tömlő rugalmasan horpad tönkremenetel nélkül, ha a horpadás során előforduló alakváltozások kellően kicsik. A tömlők keresztmetszete a hajlítás során ellaposodik, amely a hajlítás tengelyére vett másodrendű nyomaték csökkenéséhez, végül pedig keresztmetszeti instabilitáshoz vezet.

Először Lehnitskii [3] foglalkozott egyrétegű anizotróp csövek hajlításával, kiszámította a feszültségeloszlást a sugár mentén. Jolicoeur és Cardou [4] húzó, csavaró és hajlító igénybevételnek kitett egyrétegű ortotróp tömlőkre dolgozott ki analitikus megoldást.

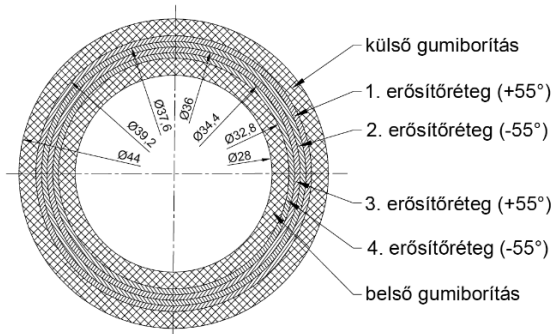
Chouchaoui és Ochoa [5] többrétegű kompozit tömlők hajlításának leíró egyenleteit határozta meg, Jolicoeur [4] megoldását alapul véve. Fuchs és Hyer [6] többrétegű kompozit tömlők hajlítására dolgozott ki egy elméletet, amelynek segítségével zárt alakú, lineáris megoldást adott a kialakuló elmozdulási és feszültségmezőre.

Ha a tömlőket nagy mértékű nyomóerő terhel, kihajlásra kerül sor. „A kihajlás egy olyan stabilitásvesztési mód, amikor a szerkezet akképpen deformálódik, hogy a keresztmetszetének alakjában elhanyagolhatóan kis deformációk fordulnak elő.” [7]

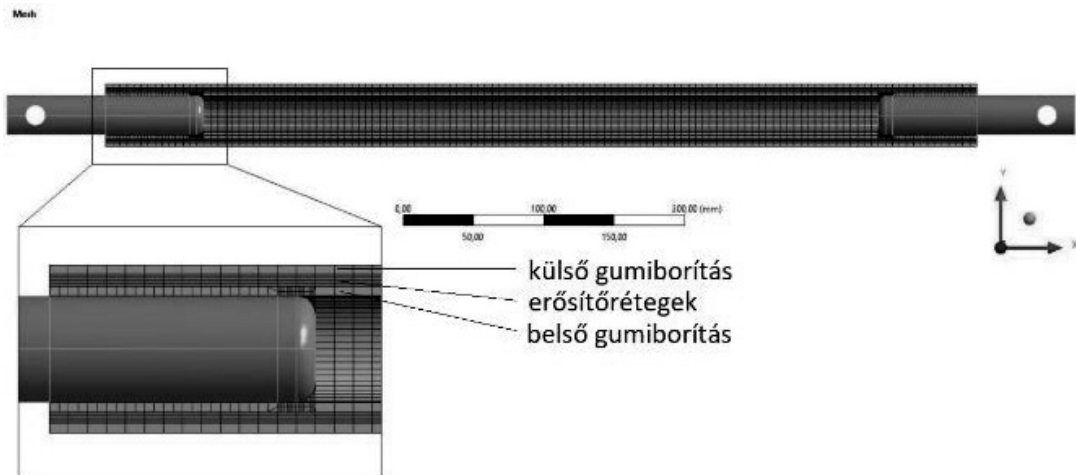
Ford és tsai [8] két rétegű húzott kompozit-gumi tömlő delaminációs tönkremenetelét vizsgálták. Bebizonyították, hogy a delamináció nagy  $\gamma_{13}$  rétegek közötti nyíró alakváltozáshoz, illetve nagy nyíró alakváltozás-hosszirányú alakváltozás ( $\gamma_{13}/\epsilon_1$ ) köthető. Lou és Walter [9] szintén a rétegek közötti nyíró alakváltozásokat mérték húzás esetén kompozit gumi próbatesteken. A vizsgálataik kimutatták, hogy a rétegek közötti nyíró alakváltozás-hosszirányú alakváltozás arány ( $\gamma_{13}/\epsilon_1$ ) nagyobb, ha a szál és a mátrix Young-modulusának aránya ( $E_f/E_m$ ) is nagyobb. Hutapea és Pizhong [10] kompozitok szál-mátrixa esetén határozták meg a rétegen belüli nyíró modulusokat, továbbá megállapították, hogy a rétegen belüli nyíró alakváltozások a szál-mátrix elváláshoz köthetők.

Jelen cikk célja a száltekeresztelt kompozit tömlő nyomó terhelés hatására kialakuló kihajlásának és a hajlítás hatására létrejövő keresztmetszeti instabilitás vizsgálata, nemlineáris elmozdulási, feszültségi és alakváltozási eredmények bemutatása, illetve a lehetséges tönkremenetel vizsgálata ANSYS szoftver segítségével létrehozott végelem modell felhasználásával.

## 2. VÉGESELEM MODELL



2. ábra. A vizsgált tömlő keresztmetszete [11]  
A vizsgált kompozit tömlő 620 mm



3. ábra. A tömlő hálózott geometriája hosszszelvényben

A Remote Displacement-left side  
B Remote Displacement-right side



4. ábra. A szimuláció előírt elmozdulás peremfeltételei

A tömlő hálózott geometriája a 3. ábrán látható hosszszelvényben, amely a tömlőből és a tömlő mozgatásához szükséges csapok modelljéből áll. A csapok palástfelületei és a tömlő belső borítása között ragasztott, illetve súrlódásos kapcsolat van (súrlódásos kapcsolat a csap lekerekítéseinél lett definiálva). Mivel az erősítőrétegekben a (borítások anyagával megegyező) gumi a szálak köré van vulkanizálva, az erősítőrétegek és a borítások kapcsolata ragasztott.

A tömlő mozgatása a csapok furatainak középpontjaiban elhelyezett „remote point”-ok

hosszú, keresztmetszeti felépítése a 2. ábrán látható. A tömlő belső átmérője  $d=28$  mm, külső átmérője  $D=44$  mm, szálerősítésű kompozitrétegekből és gumiborításokból áll. A borítások anyaga és az erősítőréteg mátrixanyaga EPDM-EVA gumi, az erősítőrétegek szálanyaga poliszter. Az erősítőrétegek rétegtrendje  $[+55^\circ/-55^\circ/+55^\circ/-55^\circ]$ .

Az erősítőrétegek anyagmodellje transzverzálisan izotróp, a független anyagi jellemzők:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $\nu_{12}$ . Az erősítőréteg anyagi jellemzői a szál és a mátrix rugalmassági modulusa, illetve Poisson-tényezői alapján, továbbá a száltérfogatarány felhasználásával lettek meghatározva, piskóta próbatesteken és tömlőszakaszokon végzett húzóvizsgálatok kísérleti eredményeivel alátámasztva.  $E_1=1338$  MPa,  $E_2=E_3=19$  MPa,  $G_{12}=G_{13}=6$  MPa,  $G_{23}\approx 6$  MPa,  $\nu_{12}=\nu_{13}=0,37$ ,  $\nu_{23}=0,498$ . [11]

A gumiborításokat hiperelasztikus 2 paraméteres Mooney-Rivlin modell írja le, melynek anyagi jellemzői:  $C_{10}=-0,4982$  MPa,  $C_{01}=1,523$  MPa,  $D=0$  [1/MPa].

előírt elmozdulása alapján történt. A csapoknak 70 mm hosszú szakasza esik a tömlőn belül, a csapfuratok tömlő végétől vett távolsága 50 mm. A „remote point”-ok elmozdulása a következő volt: a bal oldali furatközéppont 638 mm-t mozdul el pozitív X irányban 58 időlépés alatt (időlépésenként 11 mm-t), míg a jobb oldali remote point a szimuláció során X irányban nem mozdulhat el. Mindkét „remote point” elfordulhat a Z tengely körül, de nem megengedett az elmozdulása Y és Z irányban, illetve az X és Y tengely körüli elfordulásuk sem

megengedett. (4. ábra) A végeelem szimuláció nemlineáris stabilitásvizsgálat, amely nemlineáris statikus megoldó segítségével (Newton-Raphson módszer), Riks-módszer felhasználásával történt. A kezdeti globális (szerkezeti szintű) imperfekció nagysága  $L/200$  (ahol  $L$  a tömlő teljes hossza). A nemlineáris stabilitásvizsgálat leírja a tömlő mechanikai viselkedését mind az összenyomás fázisában (globális kihajlás), mind a hajlítás fázisában (keresztmetszeti instabilitás).

Ezen túl lineáris stabilitásvizsgálat készült (lineáris buckling analízis) a tengelyirányú összenyomás hatásának vizsgálatára a szerkezet elméleti terhelhetőségének meghatározásának céljából. A lineáris stabilitásvizsgálatban az anyagjellemzők és a kontaktfeltételek lineárisak. A kritikus erő a Lanczos-megoldó segítségével lett meghatározva.

### 3. ÖSSZENYOMÁSI/HAJLÍTÁSI KÍSÉRLET

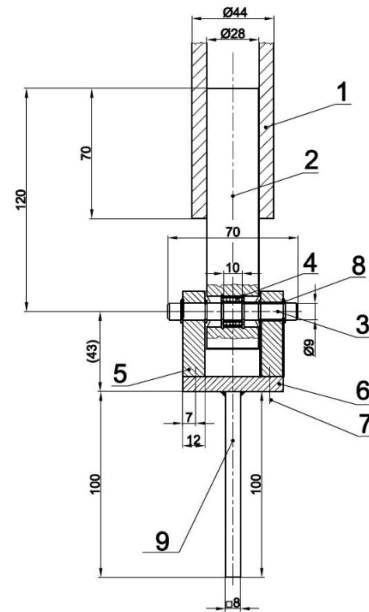
Összenyomási/hajlítási mérést végeztünk Zwick Z 250 szakítógépen a kísérleti igazolás céljából. Az összenyomás sebessége 100 mm/min, az előterhelés 1 N. A kísérlet során a felső befogópofák 635 mm-t mozdultak el, míg az alsó befogópofák helyben maradtak (5. ábra).



5. ábra. Kompozit tömlő 350 mm-es elmozdulásnál

A tömlőt a szakítógéppel összekapcsoló csatlakozószerkezet a 6. ábrán látható. Egy csap (2) van beragasztva a tömlőbe (1). A csap furatába egy kis méretű tengely (3) került. A tengely csapágyai (4) biztosítják, hogy a tengely-csap kapcsolatban a súrlódás elhanyagolható. A tengely egy befogóvilla-hoz kapcsolódik biztosítólemezek (8) segítségével. A befogóvilla

2db fülből (5), egy keresztartóból (6) és az azokat összeszorító csavarokból áll. Az alsó keresztartóhoz (6) hozzá van hegesztve egy négyzet keresztmetszetű rúd, amely a befogópofák közé van szorítva.



6. ábra. A csatlakozószerkezet keresztmetszete (a méretek mm-ben)

### 4. EREDMÉNYEK

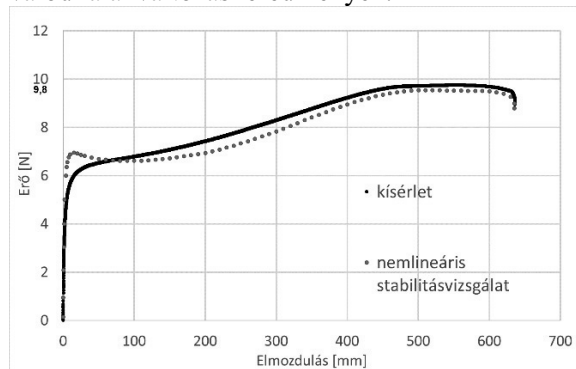
A 7. ábra a kísérlet során mért, és a szimulációs erő-elmozdulás görbéket mutatja. A kritikus erő (9,8 N) a függőleges skálán van kiemelten jelölve, amely jelentősen meghaladja a mérési és a szimulációs görbéket, az elméleti terhelhetőségről ad információt. A kihajlás szakaszát (kb. 10 mm elmozdulásig) leszámítva a nemlineáris stabilitásvizsgálat (szürke) eredményei jól közelítik a mérési eredményeket (fekete). A nemlineáris stabilitásvizsgálattal meghatározott kritikus erő 6,9 N (7. ábra).

A gumimátrixú kompozit tömlők hajlékonysága miatt a tengelyirányú elmozdulás növekedésével a tömlő hajlítása kezdődik el, amely növekvő erőket eredményez. Ezután egy plató figyelhető meg az erő-elmozdulás görbében. Ahogy a keresztmetszet lapultsága nő, a tömlő elveszíti a keresztmetszeti instabilitással szembeni ellenállóképességét. A keresztmetszeti instabilitásra hozzávetőlegesen 635 mm-es elmozdulásnál kerül sor, ekkor az erő drasztikusan csökken.

A kísérleti és a szimulációs adatok jó egyezést mutatnak a kezdeti szakaszt leszámítva, az eltérés kevesebb, mint a mérési adatok 5%-a.

A tömlő horpadásával a kezdeti, 28 mm-es átmérővel jellemezhető kör keresztmetszet ellipszissé alakul át, 36 mm-es nagyteneggellyel és körülbelül 10 mm-es kistengellyel.

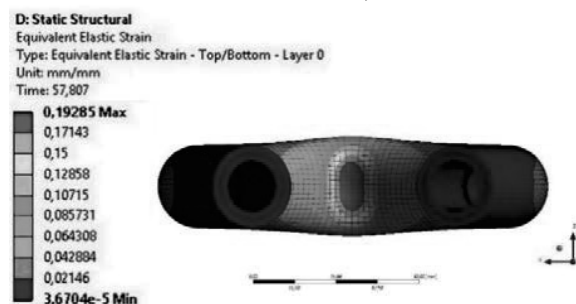
A következőkben bemutatott feszültségi és alakváltozási eredmények valódi feszültségi és valódi alakváltozási eredmények.



7. ábra. Mérési és szimulációs erő-elmozdulás görbék



8. ábra. Egyenértékű HMM-alakváltozások a keresztmetszeti instabilitáskor, hosszszelvényben

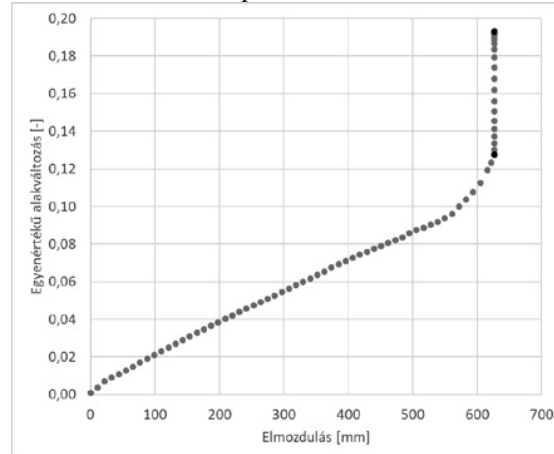


9. ábra Egyenértékű von HMM-alakváltozások a keresztmetszeti instabilitáskor, felületén

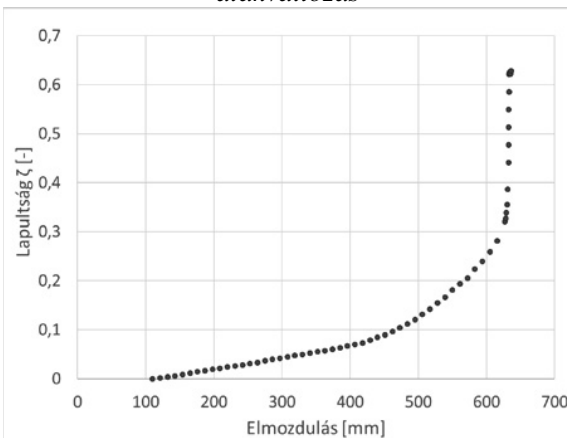
A 8. és a 9. ábrán a HMM-egyenértékű alakváltozások láthatók a keresztmetszeti instabilitás pillanatában. A keresztmetszeti instabilitás miatt nagy alakváltozások alakulnak ki, a nagy alakváltozások egy kis zónában helyezkednek el az YZ sík környezetében.

A 10. ábrán ábrázolt maximális egyenértékű HMM-alakváltozás egyenletesen növekszik hozzávetőlegesen 560 mm-ig. Ezután a növekedési ütem kissé nagyobb az 57. időlépésig. Az 57. időlépésben az egyenértékű alakváltozás erőteljes növekedést mutat, amely a keresztmetszeti instabilitást jelzi, a

keresztmetszeti instabilitás előtti, illetve az instabilitás utáni állapot feketével van kiemelve.



10. ábra. Maximális egyenértékű HMM-alakváltozás



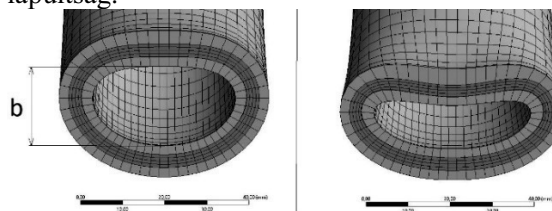
11. ábra. Lapultság a hajlítási folyamat során

A 11. ábra a lapultságot mutatja az elmozdulás függvényében a hajlítási folyamat során. A lapultság a keresztmetszet belső átmérő változásának és a kezdeti átmérő hányadosa.

$$\zeta = \frac{d-b}{d} \quad (1)$$

ahol  $d$  a kezdeti belső átmérő  
 $b$  a keresztmetszet kistengelye

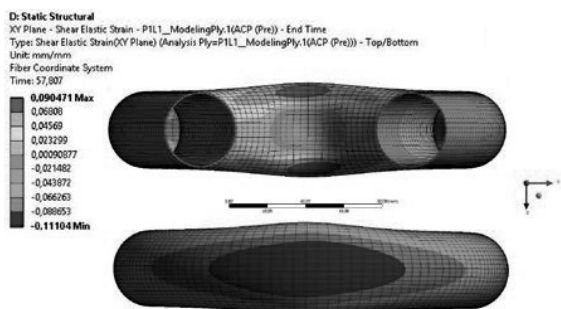
Az ovalizáció 110 mm-es elmozdulásnál kezdődik. Az egyenértékű alakváltozás növekedéséhez hasonlóan a lapultság a hajlítás folyamata során kezdetben kisebb, majd 450 mm elmozdulás után kissé nagyobb meredekséggel növekszik, a keresztmetszeti instabilitás megjelenésével rohamosan növekszik a lapultság.



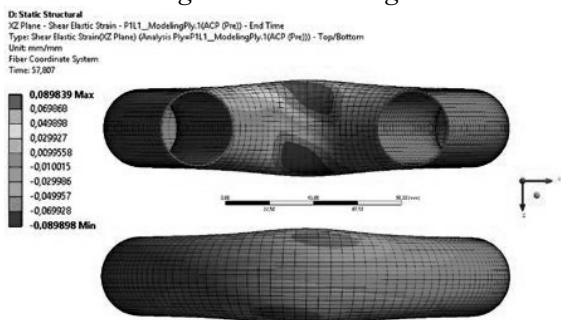
12. ábra. Lapult keresztmetszet a keresztmetszeti instabilitás elején (bal oldalon) és végén (jobb oldalon)

A 13. ábrán a rétegen belüli nyíró alakváltozás ( $\gamma_{12}$ ) látható, míg a 14. ábrán a rétegek közötti nyíró alakváltozás ( $\gamma_{13}$ ) szemléltethető a legkülső erősítőrétegben. A rétegek közötti nyíró alakváltozás a delaminációhoz köthető [8], míg a rétegen belüli nyíró alakváltozás a szál-mátrix elválással van összefüggésben [10]. Mind a  $\gamma_{12}$ , mind a  $\gamma_{13}$  alakváltozási komponens jelentősnek mondhatók, és jelentősen meghaladják az  $\varepsilon_1$  és az  $\varepsilon_2$  alakváltozási komponenseket, mind a keresztmetszeti instabilitás kezdetén (1. és 2. táblázat), mind a keresztmetszeti instabilitás kialakulása után (3. és 4. táblázat), ezért a tömlő valószínűsített tönkremeneteli módja a delamináció és a szál-mátrix elválás együttes jelenléte.

A valószínűsített tönkremenetel szempontjából kritikus zónák a tömlő két oldalán helyezkednek el az YZ sík közelében, ahol mind a rétegen belüli, mind a rétegek közötti feszültségek nagyok (13. ábra, 14. ábra).



13. ábra. Rétegen belüli nyíró alakváltozás ( $\gamma_{12}$ ) a legkülső erősítőrétegben



14. ábra. Rétegek közötti nyíró alakváltozás ( $\gamma_{13}$ ) a legkülső erősítőrétegben

1. táblázat. Maximális alakváltozási komponensek a keresztmetszeti instabilitás előtt

réteg	$\varepsilon_{1max}$	$\varepsilon_{2max}$	$\gamma_{12max}$	$\gamma_{13max}$
1	0,0018	0,0339	0,0698	0,048
2	0,0014	0,0352	0,0952	0,056
3	0,0017	0,0328	0,0714	0,057
4	0,002	0,0344	0,0823	0,051

2. táblázat. Minimális alakváltozási komponensek a keresztmetszeti instabilitás előtt

réteg	$\varepsilon_{1min}$	$\varepsilon_{2min}$	$\gamma_{12min}$	$\gamma_{13min}$
1	-0,0017	-0,0224	-0,105	-0,048
2	-0,0013	-0,0207	-0,0558	-0,056
3	-0,0017	-0,031	-0,091	-0,057
4	-0,0015	-0,0224	-0,082	-0,051

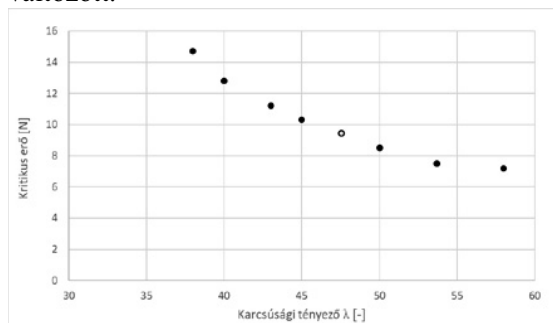
3. táblázat. Maximális alakváltozási komponensek a keresztmetszeti instabilitás során

réteg	$\varepsilon_{1max}$	$\varepsilon_{2max}$	$\gamma_{12max}$	$\gamma_{13max}$
1	0,0024	0,0344	0,0904	0,089
2	0,0019	0,0371	0,0981	0,117
3	0,0027	0,0339	0,0726	0,125
4	0,0028	0,0356	0,081	0,106

4. táblázat. Minimális alakváltozási komponensek a keresztmetszeti instabilitás során

réteg	$\varepsilon_{1min}$	$\varepsilon_{2min}$	$\gamma_{12min}$	$\gamma_{13min}$
1	-0,003	-0,002	-0,1109	-0,089
2	-0,002	-0,023	-0,1128	-0,117
3	-0,002	-0,029	-0,091	-0,125
4	-0,002	-0,025	-0,0868	-0,106

Paramétervizsgálatot végeztünk a tömlő karcsúságának megváltoztatására. A tömlő keresztmetszete állandó volt, a tömlő hossza változott.



15. ábra. Kritikus erő a karcsúsági tényező függvényében ( $L=620$  mm,  $\lambda=47,55$  szürkével)

A 15. ábrán a kritikus erő (állandósult erő a keresztmetszeti instabilitás bekövetkezése előtt) látható a karcsúság függvényében, ahol a  $\lambda$  karcsúsági tényezőt a tömlő hossza és az inerciasugár hányadosaként értelmeztük:

$$\lambda = \frac{L}{i} \quad (2)$$

ahol

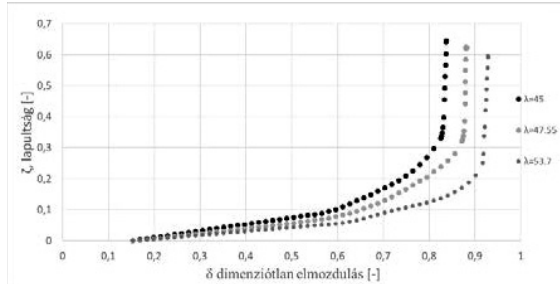
$$i = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (3)$$

ahol  $A$  a keresztmetszet nagysága

$I_z$  a keresztmetszet másodrendű nyomatéka a Z tengelyre

A paramétervizsgálat kimutatta, hogy az instabilitási erő a tömlő karcsúságával fordítottan

arányosan változik, a karcsúság növelésével az instabilitási erő csökken.



16. ábra. Lapultság-dimenzióatlan elmozdulás

A 16. ábra a lapultságot ábrázolja a dimenzióatlan elmozdulás ( $\delta$ ) függvényében különböző karcsúsági tényezőkre. A dimenzióatlan elmozdulás az  $e$  elmozdulás és a „remote point”-ok kezdeti távolságának ( $D_0$ ) hányadosa.

$$\delta = \frac{e}{D_0} \quad (4)$$

ahol  $D_0 = L + 2 \cdot 50 \text{ mm}$

A 16. ábra alapján megállapítható, hogy a referencia karcsúságnál kisebb karcsúság (47,55) esetén a nagyobb lapultságok fordulnak elő ugyanakkora dimenzióatlan elmozdulásoknál. Ezen kívül a keresztmetszeti instabilitásra kisebb dimenzióatlan elmozdulásoknál kerül sor kisebb karcsúság ( $\lambda$ ) esetén. Az ovalizációs folyamat a karcsúsági tényezőtől függetlenül 0,15-ös dimenzióatlan elmozdulásnál kezdődik.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott végeelem modell alkalmas a tömlő összenyomásának hatására kialakuló kihajlás és a keresztmetszeti instabilitás leírására. A keresztmetszeti instabilitás az erő-elmozdulás görbe hosszú állandósult szakasza után következik be, körülbelül 9,7 N-nál, amely az alakváltozási komponensek és a lapultság növekedésével jár együtt. A végeelem modell eredményeinek kísérleti igazolására összenyomási/hajlítási kísérletet végeztünk el. A kísérleti és szimulációs eredmények között jó egyezés figyelhető meg.

Az erősítőrétegek alakváltozási állapotát a nyírás dominálja, a rétegen belüli és a rétegek közötti alakváltozások a legnagyobb alakváltozási komponensek, amelyek jelentősen meghaladják az 1 és 2 főirányokban érvényes alakváltozásokat, amiből következően a tömlő valószínűsített tönkremeneteli módja delamináció és szál-mátrix elválás. A keresztmetszeti instabilitás hatására jelentősen növekednek az alakváltozások, 100%-os növekedés figyelhető meg a rétegek közötti, míg 50%-os a növekedés a rétegen belüli nyíró alakváltozások tekintetében; amely igazolja,

hogy a keresztmetszeti instabilitásnak jelentős a tönkremenetelre vonatkozó hatása.

A tömlő karcsúságára vonatkozó paramétervizsgálat kimutatta, hogy az instabilitási erő fordítottan arányos a karcsúsági tényezővel, továbbá, hogy kisebb karcsúsági tényezők esetén ugyanakkora dimenzióatlan elmozdulásokhoz nagyobb lapultságok tartoznak. Ezen kívül megállapítható, hogy a keresztmetszeti instabilitás kisebb dimenzióatlan elmozdulásoknál fordul elő kisebb karcsúság esetén.

## 13. 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*, 2017, 172, pp. 297–310.
- [2] Fuchs, JP és tsai. Numerical and experimental investigation of the bending response of thin walled composite tubes. NASA-CR-195370. Blacksburg, Virginia. 1993.
- [3] Lekhnitskii, SG. Theory of elasticity of an anisotropic body. Moszkva: MirPublishers. 1981.
- [4] Jolicoeur C, Cardou A. Analytical Solution for Bending of Coaxial Orthotropic Cylinders. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE* 1994; vol. 120, 12, pp. 2556–2574.
- [5] Chouchaoui CS., Ochoa OO. Similitude study for a laminated cylindrical tube under tensile, torsion, bending, internal and external pressure. Part I: governing equations. *Composite Structures* 1999; vol. 44, 4, pp. 221–229.
- [6] Fuchs HP, Hyer MW. Bending response of thin-walled laminated composite cylinders. *Composite Structures*, 1992; vol. 22, 2, pp. 87–107.
- [7] Ádány Sándor Modális dekompozíció vékonyfalú rúdelemek stabilitásvizsgálatában, MTA doktora, 2017 (DSc thesis)
- [8] Ford és tsai Interlaminar shear effects in cord-rubber composites, *Fibre Science and Technology*, 1982, vol. 17 4, pp. 255-271,
- [9] Lou AYC, Walter, JD Interlaminar-shear-strain measurements in cord-rubber composites, *Experimental Mechanics* 1978, vol. 18, 12, pp. 457-463.
- [10] Hutapea, P, Pizhong, Q Micropolar In-Plane Shear and Rotation Moduli of Unidirectional Fiber Composites with Fiber–Matrix Interfacial Debonding, *Journal of Composite Materials*, 2002, vol. 36, 11, pp. 1381-1399
- [11] Szabó Gy., Váradi K., Felhős D.: Finite element model of a composite tube subjected to uniaxial tension, *Modern Mechanical Engineering*, 2018, vol. 8, 1, pp. 66-77.