

SZÁLTEKERCELT KOMPOZIT TÖMLŐ HORPADÁSA

BUCKLING OF FILAMENT-WOUND COMPOSITE TUBE

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
Dr. Felhős Dávid, PhD, csoportvezető, Műszaki Számítások, Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungária Kft.

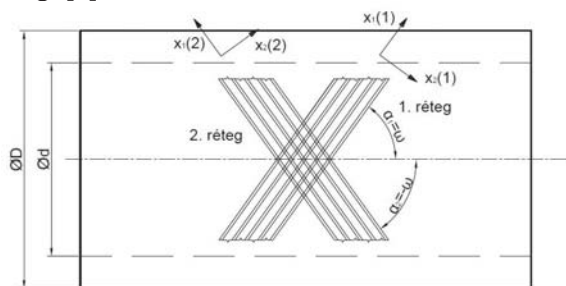
ABSTRACT

In this paper, finite element analysis of buckling of filament-wound composite hose subjected to bending has been carried out. Buckling resistance force has been evaluated based on FE simulation results. Buckling results in significant normal stresses in material direction 1 and 2 having opposite signs.

1. BEVEZETÉS

Kompozit tömlőket az ipar számos területén alkalmaznak, főként a járműiparban, a repülőgépiparban, illetve az űrkutatásban. Előnyösebb tulajdonságaik közül kiemelendő a kedvező szilártság-tömeg, illetve merevség-tömeg arány, illetve a korrózióállóság [1]. A kompozit tömlők esetében legelterjedtebben alkalmazott gyártási folyamat a száltekerceselés, amely kellő pontosságú szálpozicionálást és magas száltartalmat biztosít, továbbá jól automatizálható [2].

A kompozit tömlők felépítése az 1. ábrán látható. A szálak α_1 , illetve α_2 szöget zárnak be. Általánosan $\pm\omega$ orientációs szöget alkalmaznak a szomszédos erősítőrétegekben, a leggyakrabban ez az érték $\pm 55^\circ$, amely a biaxiális terhelés (belső nyomás és húzó igénybevétel együttes jelenléte) szempontjából legkedvezőbb kialakításnak felel meg. [3]



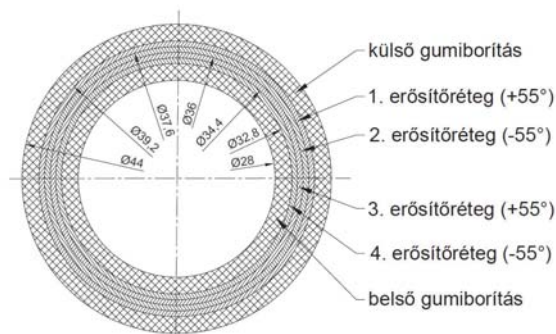
1. ábra. A kompozit tömlők felépítése [3]

A kompozit tömlők élettartamuk során számos alkalommal vannak kitéve hajlító igénybevételnek, melynek során sor kerülhet - jelentős deformáció mellett - a tömlők stabilitásvesztésére, horpadására, amely szélsőséges esetekben tönkremenetelhez vezethet. Jelen vizsgálat célja az említett horpadási jelenség részletes bemutatása

végelem modell segítségével, amely ANSYS Academic Research 17.2 programban készült.

2. GEOMETRIA, ANYAGMODELL

A vizsgált tömlő gumiborítású száltekerceselt kompozit tömlő, amely vasúti szerelvények légellátó rendszerében is megtalálható. A tömlő kompozit jellegének megfelelően az igénybevételek során a kompozit erősítőrétegek veszik fel a terheléseket, biztosítják a szükséges szilárdságot, a gumiborítás pedig biztosítja a cső hajlékonyságát, illetve védi a szálerejteket a külső mechanikai sérülésektől, kémiai és időjárás hatásoktól; és biztosítja a légtömörséget.



2. ábra. A vizsgált tömlő keresztmetszete [3]

A vizsgált tömlő 4 rétegű kompozit erősítőbetétből és egy külső, illetve egy belső gumiborításból áll (2. ábra), külső átmérője 44 mm, belső átmérője 28 mm, hosszúsága 620 mm. A vizsgált összeállításban a cső mindkét vége 70-70 mm hosszban benyúló fém csapokkal van ellátva (lásd 3. ábra). A külső és a belső gumiborítás vastagsága 2,4 mm, az erősítőrétegek vastagsága egyenként 0,8 mm, a rétegrend: $[+55^\circ/-55^\circ/+55^\circ/-55^\circ]$ (2. ábra). Az erősítőrétegek mátrixanyaga a gumiborítás anyagával megegyezik.

Az erősítőbetét anyagmodellje lineárisan rugalmas, ortotróp; anyagjellemzői az egyes főirányokban: $E_1=1338$ [MPa], $E_2=E_3=19$ [MPa]; $\nu_{12}=\nu_{13}=0,37$; $\nu_{23}=0,498$; továbbá $G_{12}=G_{23}=G_{13}=6$ [MPa] (E : rugalmassági modulus, ν : Poisson-tényező, G : nyíró modulus). Az erősítőrétegek anyagjellemzői a szál rugalmassági modulusa: $E_f=2946$ [MPa], Poisson-tényezője: $\nu_f=0,2$; illetve a mátrix

rugalmassági modulusa: $E_m=6,15$ [MPa], Poisson-tényezője: $\nu_m=0,5$; továbbá száltérfogatarány: $V_f=45\%$. [3]. A gumi anyag törvénye hiperelasztikus 2 paraméteres Mooney-Rivlin törvény, melynek paraméterei: $C_{10}=-0,4982$ [MPa]; $C_{01}=1,523$ [MPa]; $D=0$ [1/MPa]. Az anyagparamétereket laboratóriumi mérések során határoztuk meg [3].

3. ÉRINTKEZÉSI FELTÉTELEK, TERHELÉSEK, PEREMFELTÉTELEK

A végeelem modell háromdimenziós teljes modell, a 3. ábra a kompozit tömlőt, illetve a hajlításhoz használt, tömlőbe helyezett csapokat mutatja hosszszelvényben. Az erősítőbetét és a gumiborítások kapcsolata ragasztott, Multi Point Contact képzési móddal. A csapok a belső gumiborításhoz ragasztott módon kapcsolódnak, a csapok tömlőn belül eső hossza 70 mm, a hajlításhoz felhasznált furatközéppontok távolsága a tömlő véglapjától 50 mm. A csapok merev testek.



3. ábra. A tömlő hálózott geometriája hosszszelvényben

A hajlítás a csapok furatközéppontjában elhelyezett „remote point”-ok előírt elmozduláspályája alapján történt. A két csap „remote point”-jainak elmozduláspályája a függőleges YZ síkra szimmetrikus, mindvégig a $Z=0$ síkban halad, a jobb oldali csap elmozdulása a 4. ábrán látható. Az elmozduláspályát biztosítja a tömlő fokozatos hajlítását.

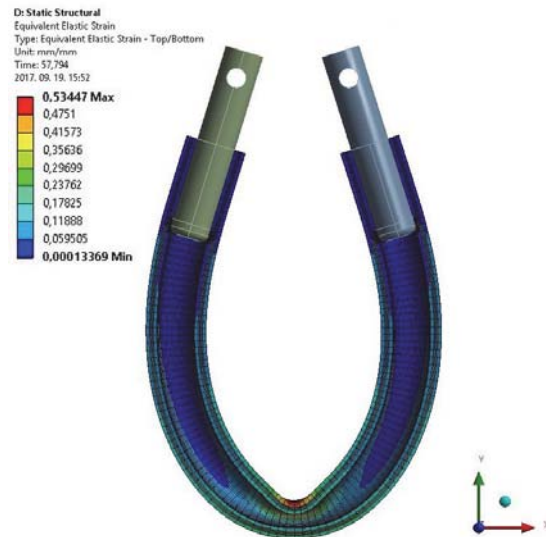


4. ábra. A jobb oldali csap furatközéppontjának elmozduláspályája

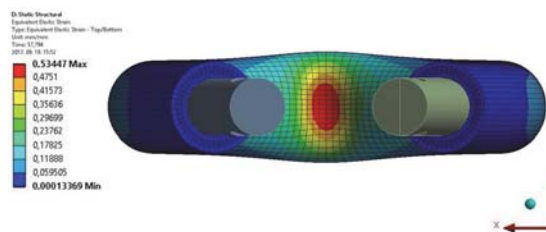
4. EREDMÉNYEK

A tömlő horpadására a hajlítás 58. időlépésében kerül sor. A deformált alakkal ábrázolt HMH-

egyenértékű alakváltozás az 5. ábrán, illetve a 6. ábrán látható. A hajlítás hatására jelentős mértékű horpadás következett be, a keresztmetszet 28 mm átmérőjű belső köréből egy megközelítően 36 mm nagytengelyű, 10 mm kistengelyű ellipszis alakult ki a tömlő középsíkjában (globális YZ sík) A 6. ábra szerint a horpadás egy kis területen alakul ki, ahol nagy alakváltozások figyelhetők meg. A horpadástól a csapok felé távolodva az egyenértékű feszültség rohamosan csökken.

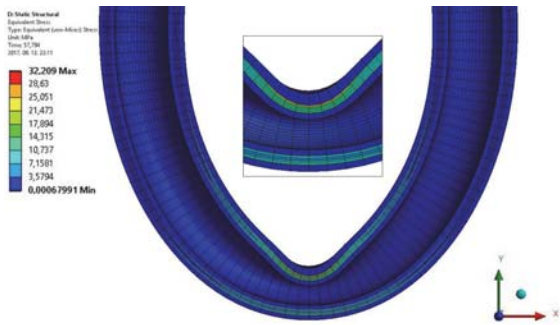


5. ábra. HMH-egyenértékű alakváltozás a horpadás bekövetkeztekor, deformált alakkal



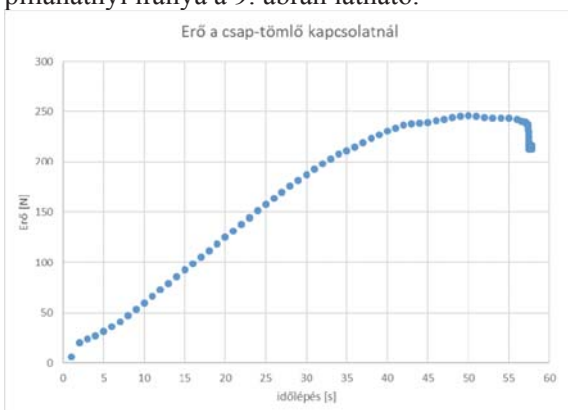
6. ábra. HMH-egyenértékű alakváltozás, a horpadási mező kiterjedése

A HMH-egyenértékű feszültségek (7. ábra) tekintetében hasonlóképpen megállapítható, hogy a horpadás környezetében a legmagasabbak. A 7. ábra tanúsága szerint a horpadásból származó terhelést főként az erősítőbetét veszi fel, a maximális HMH-egyenértékű feszültségek a legkülső erősítőrétegben ébrednek.

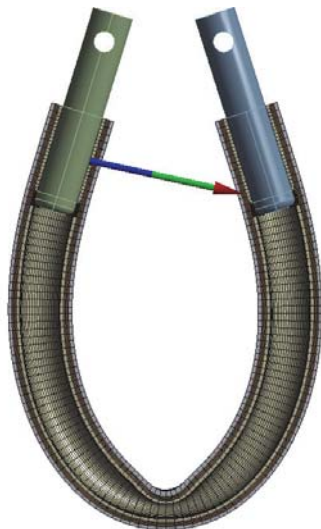


7. ábra. HMH-egyenértékű feszültség, a horpadási mező kiterjedése, kinagyított részlettel

A bal oldali csap-belső borítás ragasztott kapcsolatnál az egyes időlépésekben ébredő erő abszolútértékeit ábrázolja a 8. ábra, az erő pillanatnyi iránya a 9. ábrán látható.



8. ábra. Az aktív erő nagysága a csap-tömlő kapcsolatnál a hajlítás folyamata során



9. ábra. Az aktív erő iránya a csap-tömlő kapcsolatnál a horpadás bekövetkeztekor

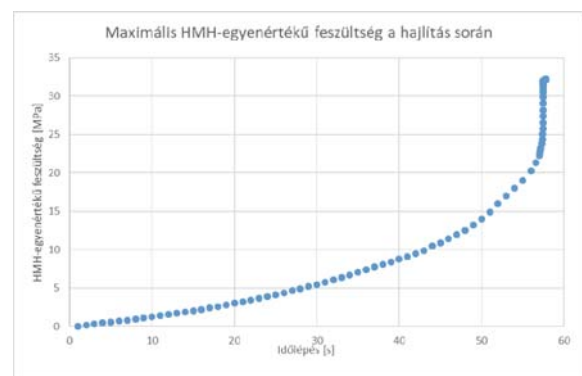
A 8. ábra szerint a szimuláció előrehaladtával az erő folyamatosan, kis mértékben csökkenő meredekséggel növekszik az 50. időlépésig. Ezután a mozgás fenntartása ellenére sem nő meg a tömlő-csap kapcsolatban vett erő, mert a keresztmetszet laposodásával

fokozatosan csökken a keresztmetszet Z tengelyre értelmezett másodrendű nyomatéka, ezáltal csökken a tömlő horpadással szembeni ellenállása is. Az 58. időlépés során jelentős csökkenés figyelhető meg a vizsgált erőben, az ekkor bekövetkező horpadás során a keresztmetszet-csökkenés folyamata felgyorsul, a tömlő elveszíti a stabilitásvesztéssel szembeni ellenállóképességét.

A jelenség az egyes időlépésekben érvényes HMH-egyenértékű nyúlás (10. ábra) és HMH-egyenértékű feszültség (11. ábra) ismeretében is nyomon követhető. Mind a maximális HMH-egyenértékű alakváltozás, mind a HMH-egyenértékű feszültség közel egyenletesen növekszik az 50. időlépésig, majd az alakváltozás, illetve a feszültség növekedési üteme felgyorsul, végül közel egy időlépés alatt a maximális alakváltozás, illetve a maximális feszültség mintegy kétszeresére nő.

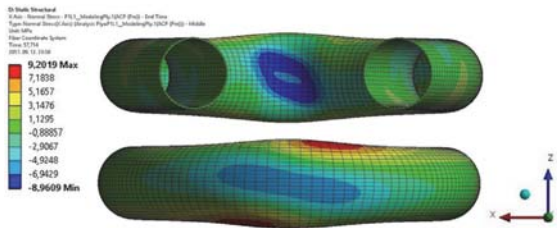


10. ábra. Maximális HMH-egyenértékű nyúlás a hajlítás során, az YZ szimmetriasíokban



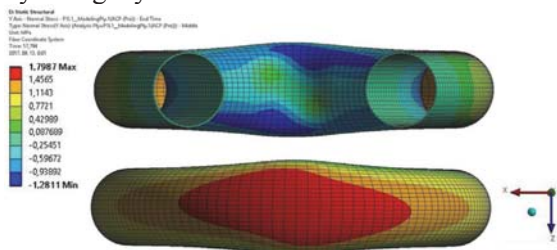
11. ábra. Maximális HMH-egyenértékű feszültség a hajlítás során, az YZ szimmetriasíokban

Az erősítőrétegben ébredő, anyagi koordináta-rendszerben értelmezett feszültségek és alakváltozások azonos eloszlásúak, ezért a következőkben csak a feszültségeket közöljük. A terhelés hatására kialakuló legnagyobb feszültségkomponens az 1 anyagi főiránybeli normál-feszültség (12. ábra).



12. ábra. Normálfeszültség az 1. anyagi főirányban, a legkülső erősítőrétegben

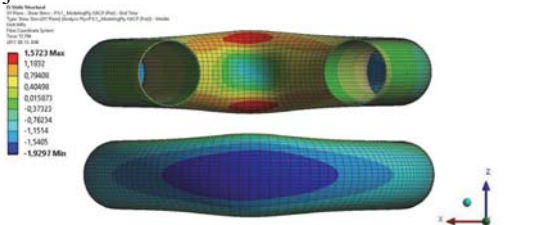
A legkülső erősítőrétegben a tömlő vízszintes középsíkjának (XZ sík) környezetében szálirányú húzó-, míg az attól távolabbi környezetekben (minimális és maximális Y koordinátáknál) nyomófeszültségek ébrednek. A réteg szálorientációja is kimutatható az ábrán, a keresztmetszet csökkenéséből származó nyomóigénybevételt főként a szálak veszik fel.



13. ábra. Normálfeszültség a 2. anyagi főirányban, a legkülső erősítőrétegben

A 2 főirányú, szálirányra merőleges normálfeszültség eloszlása a 13. ábrán látható. A tömlő vízszintes középsíkján (XZ sík) a 2 irányban nyomófeszültségek, ezzel szemben az attól távolabbi környezetekben (minimális és maximális Y koordináták) húzófeszültségek ébrednek.

A 13. ábrát a 12. ábrával összevetve felismerhető, hogy az egyes zónákban az 1 és 2 főirányban ellentétes előjelű feszültségek vannak jelen.



14. ábra. Csúsztatófeszültség az 12 síkban, a legkülső erősítőrétegben

Az 12 síkbeli csúsztatófeszültség eloszlása (14. ábra) a horpadási zóna középpontjára közel középpontosan szimmetrikus, az 1 és 2 iránybeli normálfeszültség-eloszlással összhangban van (vízszintes középsíkban pozitív, alsó, és felső lapon negatív előjelű).

A maximális feszültségkomponensek rétegek menti alakulását mutatja az 1. táblázat. Az egyes rétegekben rendre közel azonos értékek fordulnak elő mindhárom összetevőre, a csúsztatófeszültségek esetében a szomszédos rétegekben a legnagyobb abszolútértékű szélsőértékek ellentétes előjelűek, ez a rétegrend szimmetrikus felépítésével magyarázható. A második rétegben a nyomott zóna viszonylagosan kisebb kiterjedése miatt szálirányban nagyobb nyomófeszültség adódik, mint húzófeszültség.

1. táblázat. Maximális feszültségek az anyagi főirányokban, az egyes rétegekben [MPa]

réteg	σ_{1max}	σ_{1min}	σ_{2max}	σ_{2min}	τ_{12max}	τ_{12min}
1.	9,2	-8,96	1,8	-1,28	1,57	-1,93
2.	7,26	-8,56	2	-1,5	1,7	-0,89
3.	10,81	-6,55	1,95	-1,47	1,26	-1,58
4.	11,45	-7,13	1,99	-1,29	1,41	-1,5

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A kidolgozott modell alkalmas a vizsgált kompozit tömlő rugalmas alakváltozásának, majd pedig horpadásának elemzésére. A horpadás a határterhelést követően hirtelen következik be, miközben az ébredő hajlító erő egyre kisebb lesz.

A HMM-egyenértékű alakváltozás és a HMM-egyenértékű feszültség a horpadás környezetében jelentősen megnő.

A legkülső erősítőrétegben az 1 és 2 anyagi főirányban a szálak összenyomódását, illetve meghúzódnását a mátrixban ébredő húzó-, illetve nyomófeszültség kíséri.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen vizsgálat és publikáció a Knorr-Bremse Ösztöndíjprogram segítségével jöhetett létre, a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungária Kft. támogatásával.

9. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1]: Braiek, S., Zitoune, R., Ben Khalifa, A. and Zidi, M.: Experimental and numerical study of adhesively bonded $\pm 55^\circ$ filament wound tubular specimens under uniaxial tensile loading, Composite Structures, Vol-172, pp. 297-310, 2017
- [2]: Almeida Jr., J. H. S., Ribeiro, M., Volnei, T. and Amico, S. C.: Damage modeling for carbon fiber/epoxy filament wound composite tubes under radial compression, Composite Structures, Vol. 160, pp. 204-210, 2017
- [3]: Szabó Gy., Váradi K., Felhős D.: Finite element model of a composite tube subjected to uniaxial tension, Modern Mechanical Engineering, Vol. 7, No. 3, betűszedés alatt