

Szállhullámosság hatása hosszú szálerősítésű unidirekcionális kompozit mechanikai tulajdonságaira

Kovács L., Romhány G.

Accepted for publication in Polimerek

Published in 2019

DOI:

SZÁLHULLÁMOSSÁG HATÁSA HOSSZÚ SZÁLERŐSÍTÉSŰ UNIDIREKCIONÁLIS KOMPOZIT MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA

KOVÁCS LÁSZLÓ^{1,2}
ROMHÁNY GÁBOR²

A hosszú szálerősítéses polimer kompozitok napjainkban egyre szélesebb körben használatosak teherviselő alkatrészként is azok egységnyi tömegre vetített kimagasló merevségük és szilárdságuk, valamint tulajdonságainak irányfüggő tervezhetősége okán. A gyorsabb térhódításukat a viszonylag hosszadalmas és drága gyártási módszerek mellett a kevésbé megbízható méretezési/számítási eljárások is gátolják. Még a legpontosabb automatizált gyártási megoldás esetén is különféle gyártási hibák léphetnek fel, amelyek esetenként jelentős mértékben befolyásolják a kompozit anyag merevségét és szilárdságát. Munkánk során az egyik legtipikusabb gyártási tökéletlenség, az erősítő szálak hullámossága által okozott merevség és szilárdság csökkenést számszerűsítettük unidirekcionális, művi hibával terhelt próbatetek mechanikai tesztszérei révén. A kézi laminálású próbatetekbe kézi módszerrel kíséreltük meg a hullámos zónák kontrollált beépítését. Ezek beépítése után roncsolásmentes, optikai képdigitalizációs módszert fejlesztettünk ki a próbatetek hullámosságának mennyiségi jellemzésére, majd szabványos mechanikai tesztek elvégzése után az egyes mechanikai jellemzők hullámosság mértékétől függő változását rekonstruáltuk. Az eredmények rámutatnak, hogy már kis mértékű névlegestől való orientáció eltérés is okozhat nagy merevség és szilárdság csökkenést, emiatt a gyártási pontosságra való érzékenység jelentősnek mondható. Konklúzióként elmondható, hogy a szálahullámosságra, mint gyártási hibára való érzékenység gyártási módszertől függ, valamint a hosszú szálerősítésű kompozitból készült alkatrészek nagyobb megbízhatóságú tervezése (pl. végeelem módszer segítségével végzett szimulációkon keresztül) csak akkor valósulhat meg, ha a szálahullámosság hatását már a tervezés virtuális modellek stádiumában becsüljük.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű polimerek (kompozitok) napjaink egyre széleskörűbben alkalmazott modern anyagai. Alkalmazásuk terjedése mellett szól azok rugalmasan tervezhető, irányfüggő mechanikai viselkedése és tömegre vagy sűrűségekre vetített kimagasló merevsége, valamint szilárdsága. Olyan iparágakban, ahol a tömegcsökkentés első számú prioritás (pl. járműipar), relevanciájuk elengedhetetlen [1]. A polimer kompozitok teherviselő elemként való megjelenése a járműiparban elsősorban gazdasági megfontolások függvénye. A kompozitok használhatóságának egy mérőszáma lehet az egységnyi tömegcsökkenéssel visszanyerhető összköltség (gyártás, üzemeltetés stb.) a jelenlegi alkalmazásokhoz képest. Ebben az úripar és a repülőgépipar magasan

az élen jár (>2000 euró), ezért a költségesebb és lassabb gyártási módszerek ellenére is érdemes a korábban tipikusan könnyűfém elemeket kompozitra cserélni. Az autóiiparban ez az összeg már jócskán 100 euró alatt mozog, ezért csakis akkor érdemes kompozit elemekre áttérni, ha az egyéb szempontok figyelembevétele ezt indokolja. Ha a recikálhatóságot nem tekintjük, egyértelműen kijelenthető, hogy az autóiiparban csak akkor indokolt kompozit elemekkel kiváltani a fém alkatrészeket, ha azok gyártástechnológiája a fémekkel összevethető a komplexitás, a minőség és ciklusidő tekintetében [2].

A fenti mérőszámok az egyes szegmensekre leginkább alkalmazható gyártástechnológiát is determinálják. A repülőgépipar a relatíve lassú, de nagy szilárdság kialakítására képes, autoklávban (vagy azon kívül) történő térhálósítású prepreg technológiát preferálja [3]. Az autóiiparban a gyártási sebesség növelése okán a vákuuminfúziós technológia [4] vagy az RTM (Resin Transfer Molding) terjedt el [5], amelyek térhálós mátrixú kompozit előállítására képesek. Ezt a reaktív gyártástechnológiát kombinálva a magasabb fokú recikálhatóságra képes, hőre lágyuló mátrixanyaggal juthatunk el a napjaink autóiipari fókuszában szereplő termoplasztikus RTM, azaz T-RTM technológiához [6].

Bármennyire automatizált a gyártási eljárás, a gyártási tökéletlenségek létrejötte elkerülhetetlen. Az emberi tényező kiküszöbölése ugyan ezek mértékét jelentősen csökkenteni képes, de akár a precizitás csúcsát képező prepreg technológia is eredményezhet szálahullámosságot szimplán az előgyártmány hullámossága miatt [7], vagy a rosszul megtervezett szerszám kiválthat olyan erősítő struktúra gyűrődést, amely szintén hullámos szálakhoz vezethet [8].

Kompozit gyártási módszerektől függetlenül az elkészült termék hibákkal rendelkezik, amelyeket több szempont szerint csoportosíthatjuk. Az automatizált gyártási módszerek esetén az alkotók és az előgyártmány több „készültségi szinten” keresztül jutnak el a teljes készülttség állapotába. Ezek között a kapcsolatot különböző technológiai lépések jelentik. Az egyes lépések nem ideális megvalósulása esetén gyártástechnológiai hiba jöhet létre. A gyártási hiba nem csak „születési folyamatának” szemszögéből elemezhető, hanem abból a perspektívából is, hogy az inhomogén struktúra mely alkotói és azok milyen módon érintettek a hiba létrejöttében. Az említett két szempont természetesen nem független egymástól, ezért érdemes ezeket együtt kezelni. Az 1. táblázat ennek a két vizsgálati szempontnak a függvényében csoportosítja a lehetséges gyártási hibákat.

¹ eCon Engineering Kft., 1116 Budapest, Kondorosí út 3.

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

1. táblázat. Tipikus kompozit gyártási hibák osztályozása

Technológiai lépés/ hiba mechanizmus	Szál és szálköteg gyártás	Kelme készítés, preform	Gyanta impregnálás, térhálósítás	Utókezelés
Szálköteg képzési hiba	Szűrődés, hurkosodás			
Szövési hiba		Szálszakadás, sorösszeolvadás		
Szálstruktúra-torzulás		Szálhullámosság, gyűrődés, ply drop		
Nem egyenletes gyantaeloszlás			Gyanta fészek, gyanta zseb, szálfelúszás	
Gyantafolytonossági hiba			Porozítás, száraz területek, hólyagosodás	
Idegen anyag		Szilárd zárvány, víz zárvány, szennyeződés		
Impregnációs probléma			Részleges térhálósodás	
Külső behatás			Szerszám okozta sérülés	Vágási hiba, felületi sérülés

Az 1. táblázatban a szürkével jelölt mezők a legkritikusabbak a kompozit viselkedésére való hatásuk tekintetében, valamint ezek a legérzékenyebbek a használt gyártási technológiára. Jelen munka a szál hullámosság problémájára koncentrálna.

Erősítő szál hullámosság alatt a szálerősítő struktúra teljes vagy részleges geometria torzulását értjük, amely a névleges szálirányhoz képest periodikus orientáció eltérést eredményez. Alapvető különbséget jelent a kompozit alkatrész tönkremeneteli viselkedése szempontjából, hogy a kompozit rétegek síkján belüli vagy kívüli hullámosságról beszélünk. Síkon kívüli hullámosság esetén a hullámosság a kompozit vastagsága mentén mérhető, valamint domináns tönkremeneteli forma szálirányú terhelés esetén a magas rétegek közötti nyíró feszültség okozta rétegelválás [9], míg a síkon belül a rétegelt lemez síkjában tapasztalható orientáció fluktuáció és a domináns tönkremeneteli mód mátrix nyíródás (húzás) vagy a réteg nyírási stabilitás vesztese, és ezáltal a szálak elasztó-plasztikus kihajlása [10].

Folytonos szálerősítésű kompozitok esetén, hullámosság felépésekor a mátrix anyag a tervezettnél erősebb kihasználtságnak lesz kitéve, amely annak a szálhoz képest rendkívül kicsi merevsége miatt nagymértékű globális merevség csökkenéshez vezethet. Emellett a korábban említett, elsősorban nyírás vezérelt tönkremeneteli módok aktiválódnak, amelyek névleges esetben nem is léteznek, ezért a szálhullámosság hatását már a tervezés fázisában szükséges megbecsülni. Számos próbálkozás létezik ennek becslésére [11, 12], azonban általánosságban elmondható, hogy a mérések eredményeivel ezek ritkán találkoznak [13, 14].

Az itt bemutatott munka célja tehát annak kísérleti vizsgálata, hogy a polimer kompozit lemez síkjában értelmezett szálhullámosság, mint gyártási hiba milyen mértékben befolyásolja annak mechanikai teljesítményét. Jelen eredmények bemeneti adatként szolgálhatnak olyan mechanikai modell kifejlesztéséhez, amely ennek a hibának a merevség és szilárdság csökkentő hatását már a tervezés fázisában képes figyelembe venni, ezáltal jelentős idő- és költségmegtakarítás mellett, az alkatrész elkészülte előtt, a fejlesztés, illetve a koncepció fázisában megmondható, mely területek lehetnek kritikusak a gyártási hiba szempontjából, ezért hol érdemes lokális megerősítést, esetlegesen szigorúbb kontrollt alkalmazni a gyártási eljárás felett.

A probléma jelentősége nagy, hiszen a polimer kompozitok gyors térhódításának mérnöki oldalról egyik nagy gátja a megfelelő pontosságú (többnyire végeselem módszer alapú) számítási eljárások hiánya az alkatrész deformációs és tönkremeneteli viselkedése tekintetében, mivel ezek bizonytalansága a gyártási eljárás minősége és az esetleges hibák fellépése következtében jelentős is lehet.

2. A VIZSGÁLATOKHOZ FELHASZNÁLT ANYAGOK, GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK

A kísérlethez szénszál erősítésű, víztiszta epoxi rendszert használtunk. Annak érdekében, hogy minél egyértelműbben a szálirányultság torzulásából bekövetkező hatásokat vizsgálhassuk, minden egyéb, a struktúrából vagy gyártási módszerből eredő befolyás minimalizálása volt célszerű. A struktúra szempontjából ez unidirekcionális (UD) kelme használatát jelentette. UD típusú erősítő struktúra esetén az egymásra épülő rétegek kölcsönhatása nem befolyásolja a mechanikai viselkedést, hiszen mindegyik réteg azonosan orientált, ezért homogén anyagként deformálódnak együtt. További előnye az UD kelmének, hogy a kelmét felépítő rovingokat összekötő poliamid, esetlegesen poliészter szálak fehérek, míg a szénszálak feketék, így az optikai hullámosságot vizsgáló eljárás számára szükséges kontraszt rendelkezésre állt.

A további, kézi laminálásnál előforduló gyártási hibák (pl. száraz területek, egyenlőtlen vastagság, illetve száltartalom eloszlás, porozítások a mátrixban stb.) kiszűrése nem volt lehetséges, azonban a referencia és a hullámos próbadarabok jobb összehasonlíthatósága érdekében az eltérő átlagos lemez vastagságokból eredő száltartalom különbségek kiegyenlítésére száltartalom korrekció bevezetésére került sor.

A felhasznált alapanyagok a következők:

- erősítő szerkezet: SGL Carbon szénszál UD kelme (200 g/m² felületi tömeg),
- mátrixanyag:
 - epoxi típusú, közepes viszkozitású öntő- és lamináló rendszer,
 - „A” komponens: MR309,
 - „B” komponens: MH3124,
 - keverési arány A:B=100:35.

A releváns mechanikai tesztek szabványaival való jobb megfelelés érdekében a rétegszám úgy lett megválasztva, hogy a rétegelt lemez vastagság kb. 2 mm legyen. Ezt az előzetes becslések alapján 4 réteg megvalósítja, tehát a vizsgált próbatestek rétegrendjeként a [0]₄ felépítést választottuk.

Az előgyártmányként használt rétegelt lemez kézi módszerrel lett üveglapok közé laminálva. Ennek legfőbb előnye – az emberi tényezőtől fakadó nagyobb mennyiségű gyártási hiba és gyenge reprodukálhatóság ellenére –, hogy a még folyékony gyantával átítatott kelme szálirányra merőleges görgőzéssel könnyen és

a gyártási módszer pontatlanságához képest jól kontrollálható módon hullámosítható a réteg síkjában.

A hibával terhelt próbatestek esetében ez a görgőzési technika a hiba előállításának lényegi mozzanata. Ennek érdekében hibával terhelt esetben a görgő használata szálirányra merőlegesen történt, míg a referencia próbatestek esetében szálirányban.

A térhálósítás első fázisaként a lemezt szobahőmérsékleten üveglapok között lesúlyozva tartottuk. Ennek az időtartama 24 óra. A kompozit teljes térhálósítása szárítószekrényben történt, a gyártói ajánlásoknak megfelelően 4 órán át 80 °C-on. Az előgyártmány lapok elkészülte után a húzó és hajlító teszteknek alávetett próbatestek mechanikus úton lettek kivágvá.

3. ALKALMAZOTT VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A legyártott próbatestek teljeskörű mechanikai vizsgálatához a következő mennyiségek kísérleti megállapítására volt szükség:

- az egyes próbadarabok hullámosságának mértéke,
- a próbatestek anyagát jellemző szálirányú rugalmassági modulus (E_{11}),
- a próbatestek domináns tönkremeneteli módja és az azt jellemző szilárdság.

3.1. PRÓBADARABOK HULLÁMOSSÁGÁNAK MÉRÉSE

A hullámosság mechanikai jellemzőkre tett hatásának megismeréséhez elengedhetetlen a hullámosság mértékét számszerűsíteni. Ehhez egy több lépcsős, részben automatizált rendszert építettünk fel, melynek működése a következő.

Első lépésként a próbatestek alsó és felső felületéről digitális felvételt készítettünk. Erre a legjobb és leginkább fényszennyezéstől mentes eredményt a sík szkennelés szolgáltatta. A digitalizálás után képszerkesztő szoftverben következett a kép minőségének javítása, kontrasztosabbá tétele (pl. küszöbölés által), majd, mivel a világos roving határok szolgáltatták ezúttal az információt a hullámosságról, a kép invertálása is szükségessé vált. Ezáltal a fekete szénszálakkal kitöltött, áttetsző mátrixanyag fehér színben, a hullámosság megállapítására szolgáló roving határok feketében tűntek fel.

Az eljárás következő lépése a képszerkesztő szoftverben multilineáris útvonalak fektetését jelentette a fekete roving határokra. Ezeknek az útvonalaknak az X-Y koordinátái már szöveges formátumban kimenthetőek voltak. A referencia és hullámos

próbatestekre fektetett útvonalakra mutat példát az 1. ábra.

A fektetett útvonalak koordinátái mm-ben értelmezett értékek az egyes próbatestek éleihez rendelt X-Y koordináta rendszerbe való beforgatását követően azokra szinuszos hullámot illesztünk. Az illesztett szinuszos függvény egyenletét a következőképpen választottuk meg:

$$Y_{i-III} = a \cdot \cos\left(2\pi \frac{x+x_0}{L}\right) \quad (1)$$

ahol Y_{i-III} az adott X koordinátájú útvonal ponthoz tartozó illesztett szinuszos hullám Y koordinátája, a az illesztett hullám amplitúdója, L a hullámhossz és x_0 a hullám fázisetolása X koordinátában kifejezve.

Mivel a hullámosság mértékét célszerűbb egyetlen értékkel számszerűsíteni, az illesztett idealizált szinuszos hullám jellemzésére a következő értékeket vezettük be:

- amplitúdó-hullámhossz viszony:

$$R_{a/L} = a/L \quad (2)$$

- maximális orientáció eltérés:

$$[\Theta]_{x-kezdő}^{x-vég} = \max\left\{\arctan\left[\frac{-2\pi a}{L} \cdot \sin\left(2\pi \frac{x+x_0}{L}\right)\right]\right\}_{x-kezdő}^{x-vég} \quad (3)$$

ahol $x-vég$ és $x-kezdő$ a vizsgált hullámos szakasz végső és kezdő x koordinátája,

- átlagos orientáció eltérés a hullám kezdeti és végkoordinátái között:

$$[\bar{\Theta}]_{x-kezdő}^{x-vég} = \left| \frac{\int_{x-kezdő}^{x-vég} \arctan\left[\frac{-2\pi a}{L} \cdot \sin\left(2\pi \frac{x+x_0}{L}\right)\right] dx}{x_{vég} - x_{kezdő}} \right| \quad (4)$$

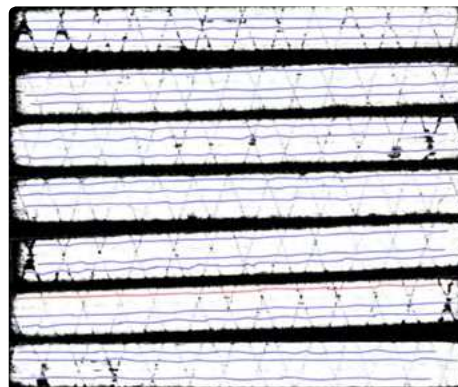
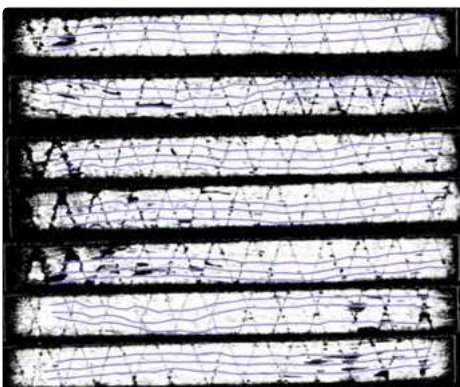
A fenti értékeket minden illesztett hullámra kiszámítottuk. Mivel egy próbatest esetében a darab mindkét oldalára több hullámot illesztettünk, az adott próbatestre érvényes hullámosság paraméterek ezek átlagaként lettek definiálva.

A referencia (tervezetten hullámosság mentes), valamint a hullámos próbatestek esetén a fenti paraméterek tartományait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Mért próbatestek hullámossága

Próbatest	Ra/L	Θ_{max} [°]	$\bar{\Theta}$ [°]
Referencia - húzás	0.0007-0.0019	0.23-0.67	0.14-0.31
Hullámos - húzás	0.0065-0.0181	2.34-6.45	1.45-4.20
Referencia - hajlítás	0.0009-0.0216	0.31-7.35	0.27-2.99
Hullámos - hajlítás	0.0056-0.0181	2.01-6.45	1.88-5.92

A fenti táblázatból látható, hogy a referencia próbatestek maximális és átlagos orientáció eltérése is többnyire 1° alatt



1. ábra. Referencia (balra) és hullámos (jobbra) próbatestek digitális képére fektetett útvonalak

marad. Ez alól kivétel néhány hajlító próbatest, ahol vélhetően a görgőzés lokálisan felgyűrte a rovinghatárokon található összefogó szálakat, és ennek az orientáció eltérést láthatjuk az illesztett eredményeken. A maximális orientáció eltérés a hullámos esetben sem lépi át a 7°-ot, ezért a jelenlegi vizsgálat kis mértékű hullámosság hatásának feltérképezésére szolgálhat.

3.2. MÉRÉSHEZ DEFINIÁLT MECHANIKAI TESZTEK

A keresett mechanikai jellemzők mérése a vizsgált UD kompozitok esetében húzó, illetve hajlító tesztek segítségével történt. A 3. táblázat a definiált teszt típusokat, valamint a hozzárendelt próbatest jelöléseket és mennyiségeket mutatja.

A húzáshoz használt próbatestek a befogásnál fellépő törési hajlam csökkentése érdekében végfülekkel lettek ellátva.

3. táblázat. Mérésekhez definiált mechanikai tesztek

Teszt típus	Szabvány	Vezérlés	Nyúlásmérés	Próbatest	Próba test db szám (ref./hullámos)
Húzó	ISO527-5	Elmozd.	DIC*	Type B	12/12
Hajlító	ISO14125	Elmozd.	-	Class IV	19/15

* Digitális képkolleráció (Digital Image Correlation)

A modulusz és a szakítószilárdság hullámosságtól való függésének vizsgálatához ISO 527-5 szabvány szerinti húzó tesztek elvégzésére került sor. A méréseket Zwick Z050 univerzális szakítógépen végeztük 2 mm/perc keresztfej sebesség mellett szobahőmérsékleten. A próbatestek aktuális fajlagos nyúlása Mercury típusú DIC rendszerrel volt mérve, melyhez a próbatesteket a felületi mintázat azonosításához szükséges mérőjelekkel láttuk el. A DIC rendszer lehetővé tette a hossz- és keresztirányú nyúlás egyidejű regisztrálását.

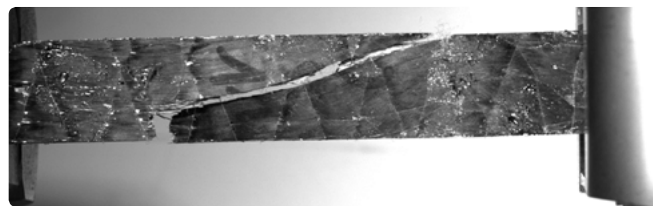
A modulusz és a szilárdság hullámosságtól való függésének vizsgálatára másik alapvető teszt típus a hajlítás. Ez a mérés a húzásnál annyival komplexebb, hogy többféle tönkremeneteli mechanizmust képes aktiválni, így ezek hullámosságtól való függése is felderíthető. A mérést az ISO 14125 szabványban definiált 4 pontos hajlító konfigurációban végeztük Zwick Z005 egytengelyes univerzális szakítógépen, 5 mm/perc keresztfej sebesség mellett szobahőmérsékleten. A teszt során a próbatest nyúlása közvetlenül nem volt mérve, ugyanis a tapasztalat szerint ilyen típusú hajlító teszteknel a határlehlajlásig a próbatest közepének lehajlásából és a geometriai adatokból analitikus módon az megbízhatóan számítható.

4. MECHANIKAI TESZTEK KIÉRTÉKELÉSE

4.1. TÖNKREMETELI MÓDOK

A húzó referencia teszteknel több esetben nem releváns tönkremenetel következett be (pl. végfűl leszakadás). Ezek nem lettek felhasználva a szilárdság kiértékelése során. A releváns tönkremenetel a referencia húzó tesztek esetén a végfűl közelében bekövetkező szálszakadás, esetenként a próbatest hosszanti repedésével kombinálva. A hullámos esetben a tönkremeneteli minta sokkal egységesebb képet mutat. Szinte mindegyik esetben a roving határokon, egy relatíve nagy orientáció eltérésű

zónában indul el a repedés, amely a roving határ mentén terjed, végül a próbatest teljes szeparációját okozza. Valószínűleg ebben az esetben az ideálistól eltérő orientáció olyan mértékű nyíró terhelést generál globális húzás mellett, amely a mátrix nyírószilárdságát meghaladja. Erre mutat példát a 2. ábra.



2. ábra. Hullámos próbatest jellemző tönkremenetele húzásnál

Hajlítás esetén az elsőként fellépő tönkremeneteli mód megállapítása utólagos szemrevételezéssel nagyon nehezen volt megvalósítható, ugyanis szinte minden esetben a tönkremenetel első megjelenését követte rétegelválás, illetve sok esetben a töret vizsgálatából az volt megállapítható, hogy több mechanizmus is egyszerre jelen volt. Az egyes törési mechanizmusok elkülönítésében az ISO 14125 szabvány segített, amely listázza a hajlító teszt során esetlegesen fellépő törési módokat. Ezek a következők: szálerősítés vagy egész réteg törése a húzott oldalon; nyomott oldali törés; húzott vagy nyomott oldali repedés rétegelválással kombinálva; tiszta rétegelválás.

A teszt eredmények között mindegyikre találunk példát, ahogy azt a 3-4. ábrák mutatják. Annak eldöntésében, hogy húzott vagy nyomott oldali törés dominált, a vizuális vizsgálatok mellett a kiszámított törési feszültség is segített, ugyanis a törési feszültségek két jól elkülöníthető csoportot alkottak. A nagyobb feszültséget adó csoport a húzott oldalhoz tartozó, a kisebb feszültségű eredmények a nyomott oldalhoz tartozó hajlító szilárdságként lettek definiálva.



3. ábra. Tipikus húzott oldali törés, 4 pontos hajlítás



4. ábra. Tipikus nyomott oldali törés, 4 pontos hajlítás

4.2. MODULUSZ ÉS SZILÁRDSÁG SZÁMÍTÁS

A tesztekéből kapott feszültség–relatív nyúlás görbékből határoztuk meg a modulusz és szilárdság értékeit. A modulusz az egyes rekonstruált görbék lineáris szakaszának meredeksége, a szilárdság a szakadásig tapasztalt maximális feszültség. Húzó vizsgálat esetén a számított feszültség értéke a következő:

$$\sigma_{11-i} = \frac{F_i}{bt} \quad (5)$$

ahol σ_{11-i} az adott mérés „i-edik” adatpontjához tartozó húzó feszültség, F_i az adott mérés „i-edik” adatpontjához tartozó erő, b és t pedig az adott próbatest átlagos szélessége és vastagsága.

A húzó tesztek esetén az elvárásoknak megfelelően a mért görbék szakadásig közel lineárisak voltak.

Hajlításnál a szélső szálban értelmezett húzó/nyomó feszültséget az ISO 14125 szabvány által javasolt módosított Navier-féle összefüggéssel számítjuk:

$$\sigma_{mf} = \frac{3F_{hajl}(L-L')}{2bt^2} \cdot \left\{ 1 + 8.78 \left(\frac{s}{L} \right)^2 - 7.04 \left(\frac{st}{L^2} \right) \right\} \quad (6)$$

ahol F_{hajl} a hajlítást előidéző függőleges nyomóerő, L és L' a külső és belső támaszköz a támasztó, illetve terhelő görgők között, s pedig a próbatest felezősíkjában mért lehajlás. Az s értékét a (7) egyenletben alkalmazott korrekció segítségével kaptuk meg a ténylegesen mért keresztfej elmozdulásból. Hajlító teszt esetén a modulusz számításához a nyomóerő-lehajlás görbe határle-hajlásig vett szakaszát használtuk fel, mert ebben a tartományban még anyagi és geometriai linearitás is fennáll. A határle-hajlás az alátámasztási távolság 10%-a definíció szerint. Mivel hajlító tesztek esetén a nyúlást közvetlenül nem mértük, annak meghatározása a következő összefüggés segítségével történt:

$$\varepsilon_{hajl} = \frac{4.7t \cdot \delta \cdot \frac{4a^2 - 3L^2}{4a(3L - 4a)}}{L^2} \quad (7)$$

ahol δ a próbatestek görgőknél mért lehajlása (ami maga a keresztfej elmozdulás). Az a jelű geometriai paraméter ebben az esetben az alátámasztási távolságokból számítható:

$$a = (L - L')/2 \quad (8)$$

A fenti képlet figyelembe veszi, hogy a kritikus keresztmet-szet valójában a próbatest szimmetria síkja, de ott közvetlenül a 4 pontos konfigurációban nem mérünk lehajlást. A mért görbék a határle-hajlásig valóban lineáris viselkedést mutattak, valamint ebben a tartományban a maximális mért nyúlás nem haladta meg az 1,2%-ot.

5. EREDMÉNYEK

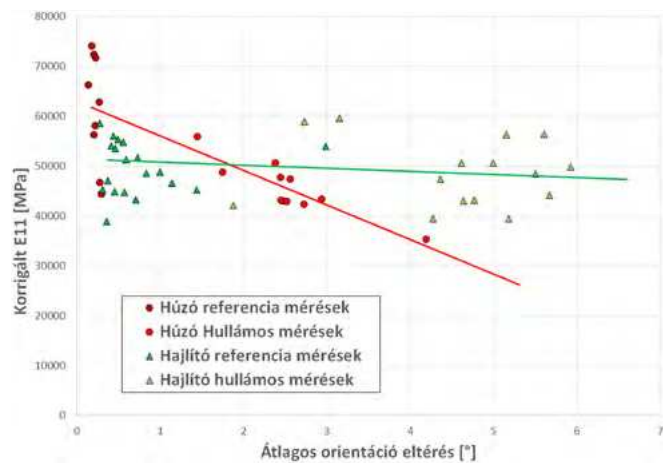
A referencia mérésekből számított modulusz, valamint szilárdság értékeket a 4. táblázat listázza. Látható, hogy a számított modulusz jelentős, 10% feletti szórást mutat. A hajlításnál tapasztalható, húzáshoz képesti mintegy 20% modulusz csökkenés annak tudható be, hogy a polimer kompozitok húzó és nyomó modulusza eltér, valójában nyomásra ezek az anyagok lágyabban viselkednek. Így homogén moduluszt feltételezve a hajlításból a valós moduluszt alábecsüljük a lágyabb nyomott zóna miatt. A modulusz eredményekből a Voigt-Reuss keverékszabállyal becsülhető száltartalom 25-30%, amely megfelel a kézi laminálás technológiájának. A hajlításra kapott, húzott oldalra jellemző referencia szilárdság átlagosan 33%-kal magasabb a húzó referencia tesztekől kapott átlagos szilárdságnál. Ez a tendencia jó egyezést mutat a tapasztalattal. Whitney [15]

szerint az általánosságban használatos szénszál, illetve üveg-szál erősítésű, térhálós mátrixú kompozitok esetén a hajlító és húzó szilárdságok aránya 4 pontos hajlítás esetén 1,20-1,31 között mozog. Ennek oka a szilárdság eloszlásfüggvényének feszültség eloszlástól való függése.

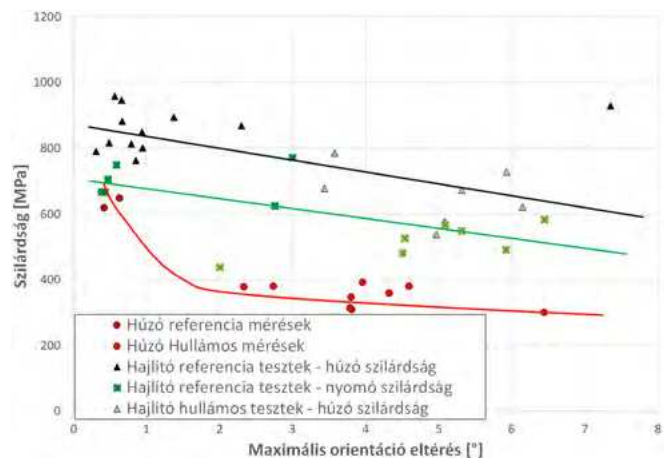
4. táblázat. A referencia mérések eredménye

	E11 modulusz [GPa] húzás/hajlítás	Húzószilárdság [MPa]	Hajlító szilárdság [MPa]	
			Húzott oldali tönkremenetel	Nyomott oldali tönkremenetel
Átlag	61/50	643	859	697
Rel. szórás [%]	18/11	3.8	7.49	8.03

Az egyes próbatestek átlagos hullámossági jellemzőinek ismeretében lehetőségessé vált a merevségi/szilárdsági jellemzők hullámosságtól való függését diagramban ábrázolni. Az egyes eredményeket, illetve az azokra fektetett tapasztalati trendgörbéket láthatjuk az 5. és 6. ábrákon.



5. ábra. Szálirányú modulusz változása az átlagos orientáció torzulás függvényében



6. ábra. A húzó és hajlító szilárdság változása a maximális orientáció eltérés függvényében

Az eredményekből egyértelműen kiderül, hogy a hullámosság mértékének növekedésével a vizsgált sávban a modulusz csökkenés mértéke lineáris trendvonalal közelíthető. A piros trendvonal a húzó tesztek eredményét, a zöld a hajlító eredményeket mutatja. A változás lineárisnak tűnő volta egybecseng Chan és Wang [12] eredményeivel, a húzó tesztekéből kapott modulusz csökkenés jelentős mértéke azonban meglepő.

A hajlításra becsült, sokkal kisebb mértékű modulusz változás több okra is visszavezethető. Ezek lehetnek pl. a hajlító próbatestekre illesztett szinusz hullám pontossága vagy UD kompozitok esetén a húzó és nyomó moduluszok eltérése, amely azt eredményezi hajlításnál, hogy a keresztmetszet kisebb részét befolyásolja csak az orientáció torzulás (a húzott oldal). Ez a feltetelezés csak akkor igaz, ha a nyomott oldal nem érzékeny a szálkihajlásra, ami hajlításnál nem jellemző. Ezt a hatást tovább erősítheti a semleges szál eltolódása a húzott oldal irányába. Szilárdság tekintetében a fenti megállapítások szintén érvényesek: a trendek a szakirodalmival megegyeznek, azonban a szilárdság csökkenés mértéke meglepően nagy.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban kézi laminálással előállított, unidirekcionális szén-szál erősítésű, epoxi mátrixú próbatesteken végzett mechanikai tesztek segítségével vizsgáltuk az erősítőszál sikon belüli hullámosságának, mint tipikus gyártási hibának a kompozit merevségére és szilárdságára gyakorolt hatását. A vizsgált próbatestek egy részét hagyományos módon állítottuk elő, törekedve a hibátlan erősítő struktúra létrehozására. Ezek adták a referencia méréseket. A próbatestek másik csoportja művi módon – szálirányra merőleges görgőzéssel – előállított szálhullámossággal terhelt volt. A hullámosság mértékének számszerűsítéséhez egy roncsolásmentes, digitális képfeldolgozáson alapuló módszert dolgoztunk ki.

Az eredmények bizonyították a szálhullámosság mind moduluszra, mind szilárdságra gyakorolt negatív hatását. A tapasztalt trendek a szakirodalomnak megfelelnek, azonban a húzó tesztek során rögzített merevség és szilárdság csökkenés a vártnál többnek bizonyult. A vizsgálat relatíve szűk orientáció eltérés tartományt vizsgált ($<7^\circ$), de már itt is jelentős romlás volt tapasztalható a mechanikai jellemzők tekintetében. Húzás esetén már 4° orientáció eltérés 43% modulusz, illetve 54% szilárdság csökkenést eredményezett.

Az eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy a kompozit érzékenysége nagy a vizsgálat tárgyát képező hibatípusra, és ez az érzékenység a gyártási módszer minőségétől is függhet, ezért ennek a hatásnak az ismerete már a tervezés fázisában segítheti ellenállóbb, robusztusabb és célirányosabb felépítésű, kis selejtszámú kompozit termékek előállítását.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Munkánkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta az NKFIH Alapból, a „Polimer kompozit termékek előállítása rövid ciklusidejű, automatizált gyártástechnológia

segítségével, gépjárműipari alkalmazásokra, különös tekintettel a kompozit elemek komplexitására és újrafeldolgozhatóságára” (NVKP_16-1-2016-0046) című projekt keretében.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Czigány, T.; Izer, A.; Tábi, T.: Polimer kompozitok – áttekintés, Műanyag és Gumi, 44, 185-191 (2007).
- [2] Takács, L.; Molnár, P.: Polimer kompozit termékek előállítása rövid ciklusidejű automatizált gyártástechnológia segítségével, XVII. eCon Konferencia és ANSYS Felhasználói Találkozó (2018).
- [3] Upadhyaya, A. R.; Dayananda, G. N.; Kamalakannan, G. M.; Setty, J. R.; Daniel, J. C.: Autoclaves for aerospace applications: Issues and challenges, International Journal of Aerospace Engineering, 11, 1-11 (2011).
- [4] Summerscales, J.; Searle, T. J.: Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, 219, 45-58 (2005).
- [5] Fais, C.: Lightweight automotive design with HP-RTM, Reinforced Plastics, 55, 29-31 (2011).
- [6] Semperger, O. V.; Óri, Z.; Hegedűs, G.; Molnár, P.: Gyártástechnológiai fejlesztés nagy komplexitású, hőre lágyuló mátrixú kompozit előállítására, Polimerek, 4, 123-128 (2018).
- [7] Sutcliffe, M. P. F.; Lemanski, S. L.; Scott, A. E.: Measurement of fibre waviness in industrial composite components, Composite Science and Technology, 72, 2016-2023 (2012).
- [8] Potter, K.; Khan, B.; Wisnom, M.; Bell, T.; Stevens, J.: Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures, Composites: Part A, 39, 1343-1354 (2008).
- [9] Bogetti, T. A.; Gillespie, J. W.; Lamontia, M. A.: The influence of ply waviness with nonlinear shear on the stiffness and strength reduction of composite laminates, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 7, 76-90 (1994).
- [10] Wisnom, M. R.: The effect of fiber misalignment on the compressive strength of unidirectional carbon fiber/epoxy, Composites, 21, 403-409 (1990).
- [11] Lemanski, S. L.; Sutcliffe, M. P. F.: Compressive failure of finite size unidirectional composite laminates with a region of fibre waviness, Composites: Part A, 43, 435-444 (2012).
- [12] Chan, W. S.; Wang, J. S.: Influence of fiber waviness on the structural response of composite laminates, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 7, 243-260 (1994).
- [13] Budiansky, B.; Fleck, N. A.: Compressive failure of fibre composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 41, 183-211 (1993).
- [14] Wisnom, M. R.; Atkinson, J. W.: Fibre Waviness Generation and Measurement and its Effect on Compressive Strength, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 19, 96-110 (2000).
- [15] Whitney, J. M.; Knight, M.: The relationship between tensile strength and flexure strength in fiber-reinforced composites, Experimental Mechanics, 20, 211-216 (1980).