

Tervezhető tönkremenetelű kompozitok vizsgálata és modellezése

Investigation and modelling of composites with designed failure

MARTON Gergő Zsolt^{1,2,3}, Dr. MEZEY Zoltán Tamás^{1,3}, Dr. SZEBÉNYI Gábor^{1,2}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3

² MTA-BME Lendület Fenntartható Polimerek Kutatócsoport, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

³ Flaar Kft., H-2091 Etyek, 1506 Hrsz.

Abstract

In this study, we investigated the effects related to the local application of PCL interlayer material on the failure process of UD carbon fiber/epoxy composites under interlaminar shear loading. For this purpose, short-beam shear tests were performed alongside finite element simulations. The results of both the experiments and the modelling confirm that the local application of the PCL interlayer material can influence the mode and position of failure.

Keywords: composite, damage, interface, material testing, finite element modelling

Kivonat

Ebben a cikkben PCL rétegek közötti anyag lokális alkalmazásának hatásait vizsgáltuk UD szén-szál/epoxi kompozitok tönkremeneteli folyamatára rétegek közötti nyíró igénybevétel esetén. Ehhez rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatok mellett végelelemes szimulációkat is alkalmaztunk. A kísérletek és a modellezés eredményei egyaránt megerősítik, hogy a PCL rétegek közötti anyag lokális alkalmazásával befolyásolható a tönkremeneteli mód és pozíció.

Kulcsszavak: kompozit, károsodás, határfelület, anyagvizsgálat, végelelemes modellezés

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szálerősített polimer kompozitok egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek, elsősorban kiváló mechanikai tulajdonságaiknak és kis sűrűségüknek köszönhetően, így rendkívül elterjedtek a hétköznapi tömegtermékek mellett a jelentős igénybevételnek kitett, biztonságilag kritikus mérnöki szerkezetekben is. Ugyanakkor utóbbiak esetén a polimer kompozitok tönkremeneteli folyamata rendkívül kedvezőtlennek bizonyulhat [1, 2].

A kompozitok károsodási és tönkremeneteli mechanizmusai rendkívül összetett folyamatok. A kialakuló károsodások eltérőek lehetnek jellemző méreteik alapján, módjuk szerint – mátrixrepedés, szál-mátrix elválás, száلكihúzóadás, rétegelválás, szálszakadás stb. –, illetve forrásuk szerint – alapanyagban jelen lévő folytonossági hiány, gyártás vagy üzem közben keletkező károsodás – is. A kompozit alkatrész tönkremenetele több, egyidejűleg zajló, egymással versengő és kölcsönhatásba lépő károsodási mechanizmus eredményeként következik be, gyakran véletlenszerű pozícióban, egyszerre akár több keresztmetszetben, különösebb előjelek nélkül jelentkezik, és többnyire katasztrófászerűen, egyirányú szálrendezés esetén akár robbanásszerűen megy végbe [1, 2].

A kompozitok megbízhatóságának növeléséhez elengedhetetlen károsodási és tönkremeneteli folyamataik befolyásolása, ami leggyakrabban valamely fázis – mátrix [3], erősítőanyag [4], illetve ezek határfelülete [5] – vagy a rétegek között [6-9] módosításával történik. Ezen módszerek elsődleges célja általában a fokozatos tönkremenetellel járó, ún. pszeudoduktilis viselkedés elérése.

Kutatócsoportunk kidolgozott egy módszert, amelynek segítségével megfelelő tervezéssel, illetve a kompozit anyag kis mértékű módosításával a kompozitok tönkremeneteli viselkedése előnyünkre fordítható, hozzájárulva a polimer kompozit anyagok megbízhatóságának növeléséhez. A módszer alapja tervezett határfelületű kompozitok létrehozása, amely során polikaprolakton (PCL) rétegek közötti anyagból készült, meghatározott mintázatokat 3D nyomtatással közvetlenül az erősítőanyagra viszünk fel. A PCL oldódik az epoxigyantában, így epoxi mátrixú polimer kompozitok esetén nem hoz létre új fázist. A PCL képes lokálisan módosítani a határfelületi adhéziót és a mátrix anyagát, ennek köszönhetően alkalmazható a kompozitok tönkremenetelének befolyásolására, akár mód és pozíció tekintetében egyaránt [10-13].

Jelen kutatásunk során UD szénzál/epoxi kompozitok vizsgálatát, illetve numerikus szimulációját végeztük rétegek közötti nyíró igénybevétel esetén, hogy meghatározzuk a PCL rétegek közötti anyag lokális, kis területre kiterjedő alkalmazásának hatását a károsodások kialakulására, illetve a tönkremeneteli módra és pozícióra.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

2.1. Felhasznált anyagok

Kompozit próbatetek előállítása során erősítőanyagként 309 g/m^2 felületi sűrűségű PX35 FBUD300 unidirekcionális (UD) szénkémét (Zoltek Zrt. Nyergesújfalu, Magyarország) használtunk, amely 50k-s Panex 35 rovingokból áll, $8 \mu\text{m}$ átlagos szálátmérővel.

A kompozitok mátrixanyagaként IpoX MR3010 (ipox Chemicals Kft., Budapest, Magyarország) DGEBA bázisú epoxi gyantát alkalmaztunk ipox MH3124 (ipox Chemicals Kft., Budapest, Magyarország) módosított cikloalifás amin térhálósítószerrel. A komponenseket 100:33 tömegarányban kevertük össze. A keverék viszkozitása 25°C -on: $500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, fazékideje ~ 30 perc (25°C).

Rétegek közötti anyagként FFF (Fused Filament Fabrication) eljárással feldolgozható, eMate (eSun Industrial Co., Ltd., Shenzhen, Kína) $1,75 \text{ mm}$ átmérjű PCL filamentet használtunk, amely $0,5 \text{ kg}$ -os kiserelésben állt rendelkezésünkre.

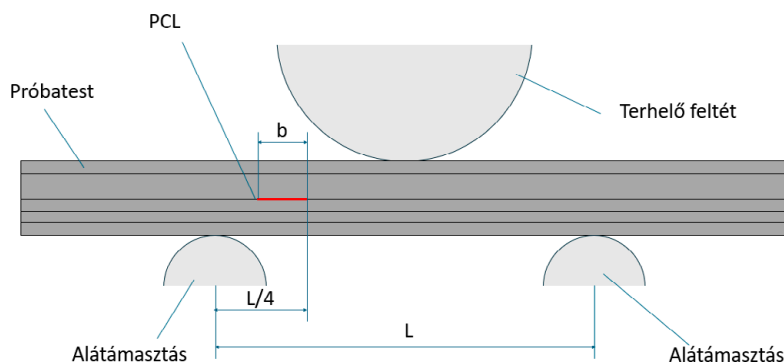
2.2. Próbatestek előállítása

A kísérletekhez a kompozit lemezeket állítottunk elő vákuuminfúziós eljárással, $200 \times 200 \text{ mm}$ -es méretben, $[0^\circ]_6$ rétegrenddel, majd a lemezekből vágtuk ki a vizsgálatokhoz szükséges méretű próbatesteket Mutronic Diadisc 5200 (MUTRONIC Präzisionsgerätebau GmbH, Rieden, Németország) asztali körfűrészsel.

A referencia minták mellett előállítottunk olyan lemezeket is, amelyek egy-egy kitüntetett rétegekben lokálisan PCL rétegek közötti anyagot tartalmaztak. A rétegek közötti anyagot a szálirányra merőlegesen vittük fel közvetlenül az erősítőanyagra FFF eljárással, CraftBot Plus (CraftUnique Kft., Budapest, Magyarország) berendezés alkalmazásával. Ehhez 40°C -os asztalhőmérséklet mellett 160°C -os nyomtatási hőmérsékletet állítottunk be, ami a PCL ömledékviszkozitásának jelentős csökkenését idézte elő, ezáltal lehetővé tette, hogy a PCL megfelelően nedvesítse a szálakat. Az összes előállított kompozit lemezt utótérhálósítottuk 70°C -on, 4 óra keresztül, ami lehetővé tette a PCL és az epoxi elegyedését a térhálósodás során. Az előállított próbatetek rétegek közötti anyagot kizárólag a középső rétegekben – 3. és 4. rétegek között, teljes szélességük mentén tartalmaztak. A rétegek közötti anyag geometriáját tekintve a vastagság ($0,2 \text{ mm}$) minden esetben állandó értéket vett fel. Korábbi eredményeink alapján ezzel a vastagsággal a PCL rétegek közötti anyag már képes befolyásolni a károsodási mechanizmusokat, ugyanakkor még nem okoz olyan mértékű szálhullámosságot, amely túlzott feszültségkoncentrációt és a mechanikai jellemzők szignifikáns mértékű romlását eredményezné [10]. A PCL rétegek közötti anyag szélességét (b , szálirányú kiterjedés) változtattuk – 1 , illetve 4 mm – az ezen paraméterhez kapcsolható hatások vizsgálata érdekében.

2.3. Vizsgálati módszerek

Rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatokat (short-beam shear, SBS) végeztünk az MSZ EN ISO 14130 szabványt követve Zwick Z020 (Zwick, Ulm, Németország) típusú berendezésen, 20 kN mérés határú erőmérő cellával. A méréseket típusonként 20 - 20 db próbatesten hajtottuk végre, amelyek névleges vastagsága 3 mm , szélessége 15 mm , hosszúsága 30 mm volt. A vizsgálatokhoz 15 mm alátámasztási távolságot (L) alkalmaztunk. A vizsgálati elrendezés az 1. ábrán látható.



1. ábra. SBS vizsgálat elrendezése

2.4. Modellalkotás

A delamináció modellezéséhez végelelemes analízist végeztünk az SBS vizsgálat terhelési és peremfeltételeire Ansys Workbench 2024 R1 VEM szoftverrel, kohéziós zóna modellezés (CZM) alkalmazásával. A modellparamétereket a vonatkozó szakirodalom [13] alapján határoztuk meg. A végelelemes hálót – konvergencia vizsgálat alapján meghatározott – 0,3 mm elemmérettel, másodrendű elemekből építettük fel.

A delaminációs folyamat, vagyis a kontaktok szétválásának modellezésére minden rétegekben definiáltunk kohéziós zónát, amihez a szoftverben elérhető, törési energián alapuló modellt (fracture energies based debonding) alkalmaztuk. A modellezés során tisztán II. módú igénybevételt feltételeztünk, amely az SBS vizsgálat során domináns, nyírásvezérelt delaminációs mechanizmust tükrözi.

A szimulációk során a lokálisan PCL rétegek közötti anyagot tartalmazó zónát a módosíthatatlan rétegek közötti eltérő kohéziós zóna paraméterekkel modelleztük. A CZM-modell paramétereinek meghatározásához az SBS vizsgálatokból származó, a referencia és a PCL-t tartalmazó rétegek közötti jellemző rétegek közötti nyírószilárdság értékeket is felhasználtuk. A további CZM-paramétereket és anyagjellemzőket az 1. táblázat mutatja be.

CZM paraméterek és anyagjellemzők

1. táblázat

Paraméter	Mértékegység	Érték
E_1	[GPa]	123.3
E_2 és E_3	[GPa]	7.78
ν_{12} és ν_{13}	–	0.27
ν_{23}	–	0.42
G_{12} és G_{13}	[GPa]	5.00
G_{23}	[GPa]	3.08
G_{IIC}	[J/m ²]	234.1
$G_{IIC,PCL}$	[J/m ²]	334.1

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

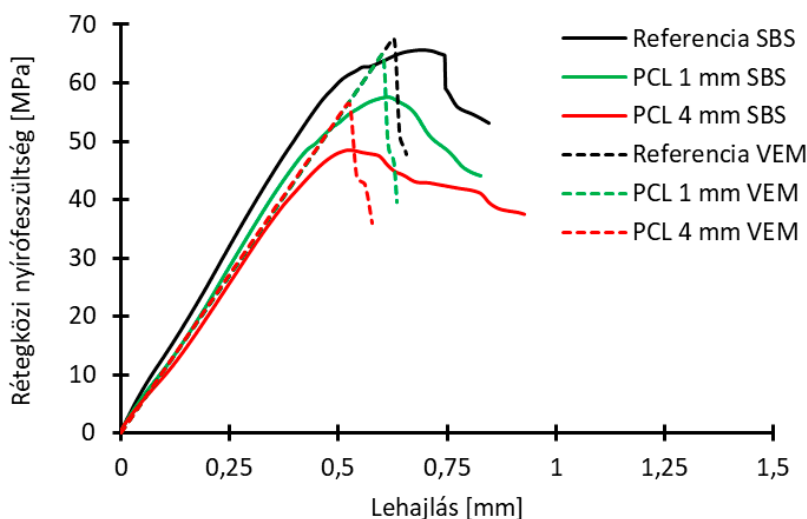
A rétegek közötti nyíró igénybevétel a kompozitok gyakori terhelése, így a rétegek közötti viselkedés kiemelten fontos a kompozit alkatrész teljesítménye szempontjából, hiszen az interlamináris károsodások kialakulása és azok terjedése jelentős hatást gyakorolhat nemcsak a mechanikai tulajdonságokra, hanem a kompozit élettartamára is. A vizsgált konstrukcióban a PCL rétegek közötti anyag a középső rétegek között kapott helyet, mivel itt a legmagasabb a nyírófeszültség értéke a keresztmetszetben, ezáltal itt várható a rétegelválás kialakulása, ami mellett, hogy a rétegek közötti anyag várhatóan lokalizálja felület mentén a rétegelválás kialakulását, lehetővé teszi a PCL repedésterjedésre gyakorolt hatásának elemzését.

A vizsgálati és szimulációs eredményeket tekintve kiemelt fontosságú a nyírófeszültség-lehajlás görbék lefutása. A szimulációkból meghatározott görbéket, illetve próbatest típusonként egy-egy jellemző görbét mutat be a 2. ábra. A 2. táblázat tartalmazza a rétegek közötti nyírószilárdság numerikusan, illetve kísérleti úton meghatározott értékeit.

Rétegek közötti nyírószilárdság értéke az egyes próbatest típusok esetén

2. táblázat

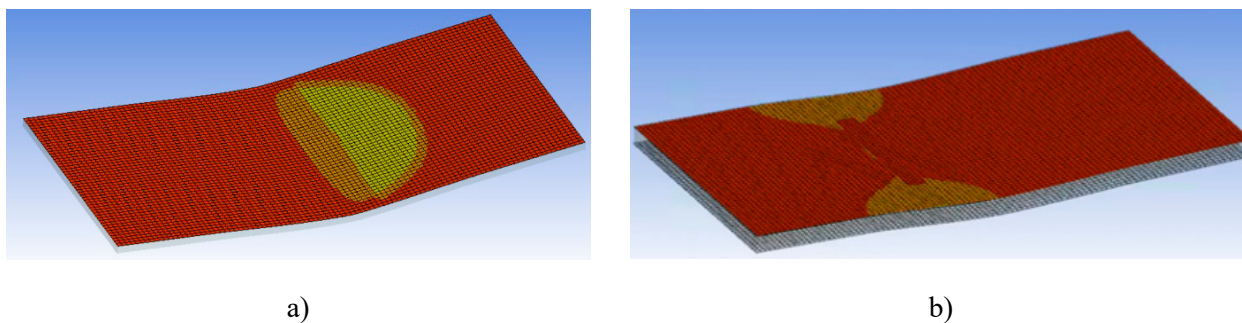
Típus	Rétegek közötti nyírószilárdság [MPa]	
	SBS	VEM
Referencia	66,2±11,0	67,9
PCL 1 mm	59,4±7,2	65,0
PCL 4 mm	52,5±4,6	56,3



2. ábra. Rétegekőzi nyírófeszültség-lehajlás görbék

Az eredmények azt mutatják, hogy a PCL rétegekőzi anyag alkalmazása csökkenti a rétegekőzi nyírószilárdságot, ugyanakkor fokozatosabb tönkremenetelt, lassabb rétegekőzi repedésterjedést idéz elő. Rétegekőzi nyírószilárdság tekintetében a vizsgálati és a szimulációs eredmények közti eltérések elfogadhatóak, ugyanakkor a PCL repedésterjedésre gyakorolt hatása a kísérletekhez képest a véges elemes modellezés esetén kisebb mértékben tapasztalható. A fokozatos tönkremenetel pontosabb modellezéséhez a kohéziós zóna, illetve a kontakt paramétereinek – pl. kontakt merevség – további finomhangolása szükséges.

Fontos szempont még a PCL-nek a rétegelválás kialakulásának pozíciójára gyakorolt hatása. A kísérletek során azt tapasztaltuk, hogy a PCL minden esetben előre definiálja a rétegelválás kialakulásának helyzetét, amelyet a szimulációs eredmények is alátámasztottak. Ahogy a 3. ábrán, a középső rétegekőzt jelentő kontakt állapotának elemzésekor látható, a referencia mintához képest, ahol a rétegelválás középről indulva jelentkezik, PCL rétegekőzi anyag alkalmazása esetén a rétegelválás a módosított zóna közvetlen környezetéből indul.



3. ábra. Középső rétegekőzt jellemző kontakt állapota, a) Referencia, b) PCL 1 mm; ahol a színnel jelzett kontaktállapotok: piros - tapadó kontakt (sticking), narancssárga - csúszó kontakt (sliding), citromsárga - közeli állapot (near)

Mindezek alapján kijelenthető, hogy a kísérleti és a szimulációs eredmények egyaránt alátámasztják, hogy PCL rétegekőzi anyag lokális alkalmazásával módosítható, irányítható a polimer kompozitok károsodási és tönkremeneteli folyamata.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során PCL rétegekőzi anyag lokális alkalmazásával módosítottuk szénszál erősítésű, epoxi mátrixú kompozitok károsodási és tönkremeneteli folyamatait. A PCL alkalmazásához és geometriájához kapcsolódó hatások megállapítására rövid támaszközű hajlítóvizsgálatokat és véges elemes szimulációkat végeztünk. A kísérleti és szimulációs eredmények egyaránt azt mutatják, hogy a PCL hatást gyakorol a rétegekőzi nyíró igénybevétel mellett fellépő rétegelválás kialakulására és terjedésére, ezáltal befolyásolja a

tönkremenetel pozícióját és módját. A kísérletek alapján a PCL szélességének növekedésével a módosított zóna képes lehet lassítani a repedés terjedését is. Ennek véges elemes szimulációkkal történő pontosabb igazolásához a modell további finomhangolása szükséges. Erre lehetőséget adhat többek között egy átmeneti zóna bevezetése a PCL rétegek közötti anyaggal módosított felületrész határain, amellyel modellezhetővé válik az a határfázis, ami a PCL epoxigyanta-rendszerben történő részleges oldódása során alakul ki.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KDP-IKT-2023-900-I1-00000957/0000003 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kutatás a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA FK 142540 és 2022-2.1.1-NL-2022-00012 pályázatainak támogatásával készült. Szebényi Gábor kutatása a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Heslehurst R.B. *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*, CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [2] Marton G.Z., Szebényi G. *Influencing the damage process and failure behaviour of polymer composites - A short review*. Express Polymer Letters, 2025, 19(2), 140-160.
- [3] Zhang C., Zhang G., Shi X., Wang X. *Effects of carbon nanotubes on the interlaminar shear strength and fracture toughness of carbon fiber composite laminates: A review*. Journal of Materials Science, 2022, 57 2388-2410.
- [4] Henry J., Pimenta S. *Bio-inspired non-self-similar hierarchical microstructures for damage tolerance*. Composites Science and Technology, 2021, 201, 108374.
- [5] Magyar B., Szebényi G., Czigány T. *Comparison of different interfacial engineering methods to achieve pseudo-ductile behaviour of carbon fibre reinforced polymer composites*. in 'International Conference on Composite Materials (ICCM22) Melbourne, Australia. 2019.08.11-2019.08.16, 2019, 9, 472-480.
- [6] Wang H., Lin Y., Jiang H., Liu Z. *Inter-layer failure and toughening mechanisms of carbon/aramid hybrid fiber composites interleaved with micro/nano pulps under low-velocity impact load*, Thin-Walled Structures, 2024, 202, 112086.
- [7] Marino S.G., Czél G. *Development and characterisation of reparable, film-interleaved, pseudo-ductile hybrid composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 169, 107496.
- [8] Melaibari A., Wagih A., Basha M., Kabeel A.M., Lubineau G., Eltahir M.A. *Bio-inspired composite laminate design with improved out-of-plane strength and ductility*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 144, 106362.
- [9] Molnár K., Košťáková E., Mészáros L. *The effect of needleless electrospun nanofibrous interleaves on mechanical properties of carbon fabrics/epoxy laminates*. Express Polymer Letters, 2024, 8, 62-72.
- [10] Marton G.Z., Fendrik Á., Szebényi G. *Manufacturing of composites with designed failure*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2024, 1313, 012014
- [11] Szebényi G., Czigány T., Magyar B., Karger-Kocsis J. *3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility*. Express Polymer Letters, 2017, 11, 525-530.
- [12] Szebényi G., Magyar B., Czigány T. *Achieving Pseudo-Ductile Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites via Interfacial Engineering*. Advanced Engineering Materials, 2020, 23, 2000822.
- [13] Magyar B., Czigány T., Szebényi G. *Metal-alike polymer composites: The effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials*. Composites Science and Technology, 2021, 215, 109002.