

MARTON GERGŐ ZSOLT^{1,2}, SZEBÉNYI GÁBOR^{1,2}

SZÉNSZÁL ERŐSÍTÉSŰ KOMPOZITOK TÖNKREMETETELI FOLYAMATÁNAK MÓDOSÍTÁSA HAJLÍTÓ IGÉNYBEVÉTEL ESETÉN

MODIFICATION OF THE FAILURE PROCESS OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES UNDER BENDING LOAD

Kutatásunk során unidirekcionális (UD) erősítésű szén-szál/epoxi kompozitok tönkremeneteli folyamatát befolyásoltuk polikaprolakton rétegek közötti anyag lokális alkalmazásával. Négyponthasznú hajlítási igénybevétel mellett végeztünk vizsgálatokat, a tönkremeneteli folyamatot pedig akusztikus emissziós módszerrel is elemeztük.

In our research, we influenced the failure process of carbon fiber/epoxy composites with unidirectional (UD) reinforcement through the localized application of polycaprolactone interlayer material. Tests were carried out under four-point bending load, and the failure process was also analyzed using the acoustic emission method.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre növekvő népszerűségnek örvendenek a polimer kompozitok, ami elsősorban kiváló tömegre vonatkoztatott, fajlagos mechanikai tulajdonságaiknak – szilárdság, merevség – köszönhető, amelyek eredményeként alkalmazásukkal tömegcsökkentés érhető el. További fontos előnyük az általuk megvalósítható, tervezhető anizotrópia. Ennek alapja, hogy a mérnöki szerkezetek igénybevételei többnyire eltérőek az egyes irányokban, ezért a szerkezeti anyag kiemelkedő mechanikai tulajdonságait elegendő kizárólag a terhelés szempontjából kitüntetett irányokban biztosítani, ami kompozitok esetében a szálak erősítőanyag megfelelő irányításával érhető el [1].

Bár a polimer kompozitok már a teherbíró mérnöki szerkezetekben is elterjedtek, további térnyerésük azonban egy jelentős akadályba ütközhet: tönkremeneteli folyamatuk – különösen a nagyon kis szakadási nyúlással rendelkező, szén-szál erősítésű kompozitok esetében – kifejezetten előnytelen. A kompozitok károsodásai és tönkremenetele egyaránt rendkívül komplex folyamatok. A tönkremenetel többnyire számos, párhuzamosan működő, különböző forrásból származó – az alapanyagban jelenlévő, gyártás során kialakuló, illetve üzem közben keletkező – és eltérő módú – mátrixrepedés, szál-mátrix elválás, szálkihúzószakadás, rétegelválás, szálszakadás stb. – egymással versengő károsodási mechanizmus és ezek kölcsönhatásainak eredményeként következik be. Mindezek eredményeként a tönkremenetel gyakran véletlenszerű pozícióban, egyszerre akár több keresztmetszetben,

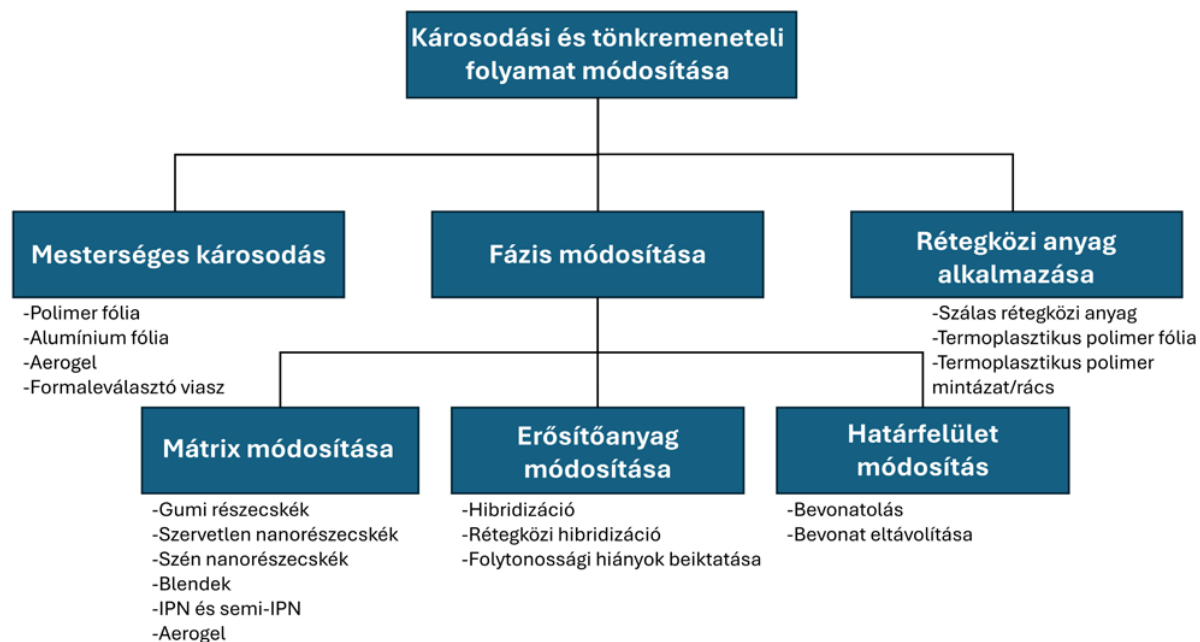
különbözőbb előjelek nélkül jelentkezik, és jellemzően katasztrófaszerűen, egyirányú szálrendezés esetén akár robbanásszerűen megy végbe [2-4].

További problémát jelent, hogy a károsodások rendkívül nehezen detektálhatók. A szálerősített polimer kompozitok megbízhatóságának és teljesítményének további fokozásához elengedhetetlen a megfelelő állapotfelügyelet biztosítása, amely magában foglalja többek között a károsodások kimutatását, a károsodási mechanizmusok azonosítását és elemzését, továbbá a szerkezet maradó mechanikai jellemzőinek meghatározását. A károsodások meghatározása és az állapotfelügyelet biztosítása többnyire roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek alkalmazásával történik [5, 6].

A kompozitok roncsolásmentes vizsgálatára számos, eltérő módszert alkalmaznak: rendkívül elterjedt a digitális képkorreláció (DIC) alapú módszer, az ultrahangos anyagvizsgálat (UT), az infravörös termográfia (IT), a komputertomográfia (CT), illetve az akusztikus emisszió (AE) alkalmazása. Az egyes módszerek előnyeit és hátrányait figyelembe kell venni a megfelelő

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

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



△ 1. ábra: A kompozitok károsodási folyamatainak és tönkremenetelének befolyásolására használt különböző módszerek osztályozása [3]

roncsolásmentes vizsgálati eljárás kiválasztásakor. A hátrányok kiküszöbölése érdekében a különböző módszereket gyakran kombinálják [5-7].

Az akusztikus emissziós (AE) módszer rendkívül hatékony a kompozitokban végbemenő károsodási folyamatok valós idejű elemzésére. Lényege, hogy a károsodási mechanizmusok során felszabaduló energia által keltett akusztikus hullámok vizsgálata lehetővé teszi a károsodás helyének meghatározását, valamint a károsodás elemzését, módjának, jellegének azonosítását a jel karakterisztikus tulajdonságai – többek között amplitúdó, energia és frekvencia – alapján [8, 9].

A roncsolásmentes anyagvizsgálat és állapotjellemzés fejlődése mellett is elengedhetetlen azonban olyan, a kompozit anyag valamilyen jellegű módosítására irányuló módszerek kifejlesztése, amelyek alkalmasak a tönkremeneteli folyamat befolyásolására, szabályozhatóbbá tételére. Ezen módszerek osztályozását az 1. ábra ismerteti [3, 10].

A tönkremenetel részben lokalizálható mesterséges károsodások létrehozásával, azonban ez általában jelentős szilárdságcsökkenéssel jár és nem teszi lehetővé a károsodás módjának befolyásolását [11]. A tönkremeneteli folyamat befolyásolása történhet valamely fázis – mátrix [12], erősítőanyag [13], illetve ezek határfelülete [14] – vagy akár a rétegek közötti [10] módosításával is. A legtöbb módszer célja a fokozatos tönkremenetellel járó, ún. pszeudoduktilis viselkedés elérése, amelynek leggyakoribb eszközei a rétegek között elhelyezett nanoszálal szövetedékek [15] vagy polimer fóliák [16].

Kutatócsoportunk az elmúlt években egy új módszert dolgozott ki tervezhető határfelülettel rendelkező kompozitok előállítására, amelynek során polikaprolakton (PCL) rétegek közötti anyag meghatározott mintázatait 3D nyomtatással, FFF (Fused Filament

Fabrication) eljárással közvetlenül az erősítő rendszerre visszük fel. A PCL oldódik az epoxiban, így epoxi mátrixú polimer kompozitok esetén nem hoz létre teljesen különálló fázist, hanem az epoxi és a PCL között kiváló kapcsolat, kettősfolytonos fázisszerkezet hozható létre. A PCL beiktatása egyrészt módosítja lokálisan magát a mátrixanyagot, másrészt a szál-mátrix határfelületi adhéziót is, ezáltal befolyásolja a károsodási módokat: szálszakadás helyett szál-mátrix elválást, majd ebből kialakuló mikrodelaaminációt idézhet elő. Ennek következtében alkalmazható a kompozitok tönkremenetelének befolyásolására: rétegek közötti rácsos mintázatok alkalmazásával növelhető a törési szívósság és pszeudoduktilis viselkedés érhető el [10, 17].

Jelenlegi kutatásunk fő célja, hogy PCL rétegek közötti anyag kizárólag lokális alkalmazásával kontrolláltan befolyásoljuk szén-szálal polimer kompozitok károsodási és tönkremeneteli folyamatait mód és pozíció tekintetében, illetve a tönkremeneteli folyamatról mélyebb ismereteket szerezzünk akusztikus emissziós vizsgálatokkal.

2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK

Az előállított kompozitokhoz erősítőanyagként 309 g/m² felületi sűrűségű PX35 FBUD300 unidirekcionális (UD) szénkalmét (Zoltek Zrt., Nyergesújfalú, Magyarország) használtunk fel, amely 50k-s Panex 35 rovingokból áll, 8 µm átlagos szálmérővel.

Mátrixanyagként Ipxox 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 mPa·s, fazékideje ~30 perc (25 °C).

3D nyomtatott rétegek közötti anyagként FFF (Fused Filament Fabrication) eljárással feldolgozható eMate (eSun Industrial Co., Ltd., Shenzhen, Kína) PCL filamentet használtunk, amely 0,5 kg-os kiszorításban állt rendelkezésünkre. A filament átmérője 1,75 mm, a gyártó által javasolt nyomtatási hőmérséklet 70–100 °C.

2.2. PRÓBATESTEK ELŐÁLLÍTÁSA

A kísérletekhez vákuuminfúziós eljárással 200x200 mm-es, hat rétegű kompozit lemezeket állítottunk elő [0°]₆ rétegrenddel, ami 2,5 mm névleges vastagságot eredményezett, 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: egy lemeznél a középső rétegekben (hajlítás esetén semleges szál), egy lemeznél a legfelső rétegekben (hajlítás esetén nyomott oldalhoz legközelebb), egy lemez esetén pedig a legalsó rétegekben (hajlítás esetén húzott oldal) helyeztük el a PCL-t.

A rétegek közötti anyagot a szálirányra merőlegesen 200x4x0,2 mm-es sávban 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 ömledékvizkozitásának jelentős csökkenését idézte elő, ezáltal lehetővé tette, hogy a PCL megfelelően nedvesítse a szálakat. A rétegek közötti anyag geometriáját korábbi eredményeink alapján választottuk meg, ahol azt tapasztaltuk, hogy rétegek közötti nyíró igénybevétel esetén a 0,2 mm vastag, szálirányba 4 mm-es kiterjedésű (sáv szélessége) PCL rétegek közötti anyag már képes befolyásolni a rétegek közötti repedésterjedést, ugyanakkor még nem vezet a mechanikai tulajdonságok jelentős mértékű romlásához [18].

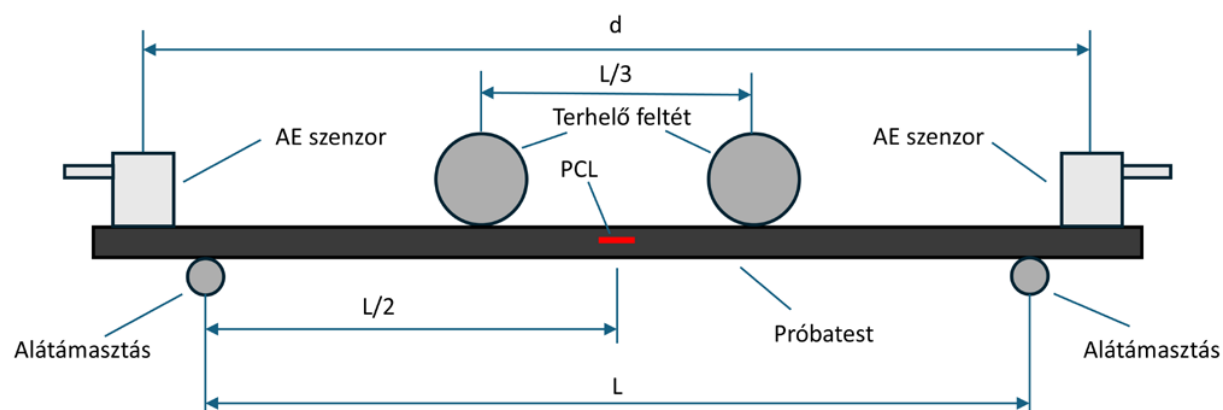
Az összes előállított kompozit lemezt utótérhálósítottuk 70 °C-on, 4 órán keresztül, ami lehetővé tette a PCL és az epoxi elegyedését a térhálósodás során.

2.3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

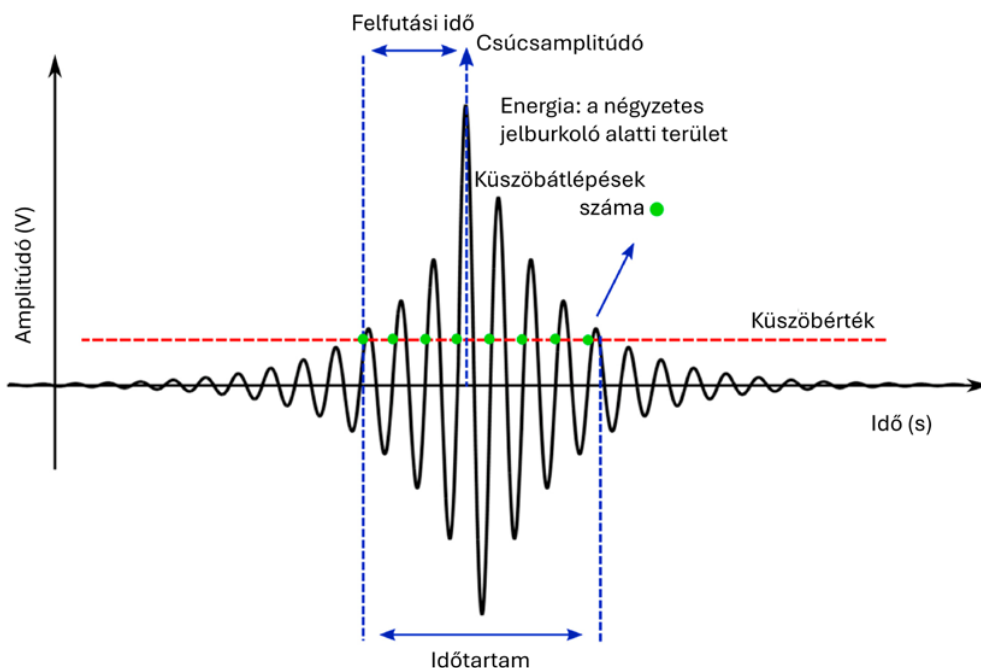
Elsőként Sartorius Quintix 125D precíziós mérleg (Sartorius Lab Instruments GmbH, Göttingen, Germany) segítségével sűrűségméréssel – levegőben és desztillált vízben végzett tömegméréssel – becsültük meg a kompozit lemezek száltartalmát a keverékszabály alkalmazásával. Ezzel célunk az egyes kompozit lemezek összehasonlíthatóságának biztosítása volt.

A négyponthoz hajlítóvizsgálatot az MSZ EN ISO 14125 szabvány szerint végeztük. A próbatestek névleges vastagsága 2,5 mm, szélessége 15 mm, hosszúsága 125 mm volt. A szabványnak megfelelően a támaszok között 101,25 mm-re, míg a terhelő hengerek távolságát 33,75 mm-re vettük fel. A hajlító vizsgálatokhoz Zwick Z250 (Zwick, Ulm, Németország) univerzális anyagvizsgáló berendezést alkalmaztunk 20 kN mérőhatárú erőmérő cellával. A vizsgálatokat 5 mm/min sebességgel végeztük. A próbatesteket úgy alakítottuk ki és helyeztük el, hogy a PCL-lel módosított zóna középvonala a két terhelő henger között, azoktól egyenlő távolságra helyezkedjen el. Próbatest típusonként 10-10 mérést végeztünk el.

Az akusztikus emissziós vizsgálatokat egy Mistras PCI-2 (MISTRAS Group, Princeton Junction, USA) AE rendszerrel végeztük, amihez IL40S előerősítőket (Physical Acoustic Corporation, Princeton Junction, USA) alkalmaztunk 40 dB erősítéssel. Az adatokat Micro30s (Physical Acoustic Corporation, Princeton Junction, USA) szenzorokkal (mikrofonokkal) gyűjtöttük, amelyek működési frekvenciatartománya 150–400 kHz. A mérési küszöbértéket 30 dB-re állítottuk be. Kétmikrofonos elrendezést alkalmaztunk, az AE szenzorokat Oxett (T-silox Ltd., Budapest, Magyarország) szilikonszírral csatoltuk a próbatestekhez az optimális jelátvitel biztosítása érdekében. Az AE adatokat NOESIS 9.0 és MATLAB R2024b szoftverekkel dolgoztuk fel. Az AE szenzorokat d=110 mm-re helyeztük el egymástól. A hullámterjedési sebesség átlagértéke a vizsgált próbatestekben 5225 m/s volt.



△ 2. ábra: Akusztikus emisszióval támogatott, négyponthoz hajlítóvizsgálat elrendezése



△ 3. ábra: Jellegzetes AE hullámforma és a legfontosabb paraméterek [8]

Az akusztikus emisszióval támogatott 4 pontos hajlítóvizsgálatok mérési elrendezése a 2. ábrán látható.

Az akusztikus emissziós adatok értékelése szempontjából elengedhetetlen a különböző jelparaméterek elemzése, amelyek számos információval szolgálhatnak a károsodási és tönkremeneteli mechanizmusok jellegéről, valamint betekintést nyújtanak az anyag szerkezeti integritásába [8, 9]. A 3. ábrán látható egy általános AE jel a legfontosabb jelparaméterek értelmezésével.

Az amplitúdó az egyik kulcsparaméter, amely az AE jel csúcsfeszültségét jelenti és jellemzően decibelben (dB) mérik. Az eltérő károsodási mechanizmusok eltérő amplitúdójú jeleket eredményeznek, ezért az amplitúdó utalhat a károsodások jellegére. Fontos a károsodások elemzése szempontjából a jelerősség, illetve a jel abszolút energiájának elemzése is. Előbbit a feszültségjel abszolút értékének, míg utóbbit a feszültségjel négyzetének idő szerinti integráljaként határozhatjuk meg. Ezek további információt nyújtanak a károsodás súlyosságáról. Az akusztikus hullám, mint a jel küszöbátlépéseinek száma az esemény összetettségére utalhat. Az időtartam az első és az utolsó küszöbátlépés

közötti időintervallumot jelenti; általában a hosszabb időtartam fokozatosabb károsodást jelent. A felfutási idő, vagyis az első küszöbátlépés és a csúcserték elérése közötti idő szintén fontos paraméter. A rövidebb felfutási idő hirtelen bekövetkező károsodási eseményekre utalhat, míg a hosszabb felfutási idő stabilabb károsodási mechanizmust jelezhet. Emellett a jel frekvenciájának elemzése további információt szolgáltat a károsodás jellegéről és akár a különböző károsodástípusok elkülönítését is segítheti [8, 9].

3. EREDMÉNYEK

Az előállított kompozit lemezek átlagos száltartalma a sűrűségmérés eredményei alapján $40,75 \pm 1,01$ V/V%, ami arra enged következtetni, hogy a száltartalom tekintetében tapasztalt eltérések vélhetően nem befolyásolják szignifikáns mértékben a kompozitok mechanikai tulajdonságait és tönkremeneteli viselkedését.

3.1. NÉGYPONTOS HAJLÍTÓVIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A négyponthoz hajlítóvizsgálatok lefutását egy-egy jellemző görbén keresztül mutatja be a 4. ábra, míg a vizsgálatok alapján meghatározott mechanikai jellemzőiket az 1. táblázat tartalmazza.

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a referencia próbatestek gyors erővisszaeséssel járó (4. ábra), hirtelen tönkremenetelt szenvedtek, ami több eltérő módon és pozícióban is bekövetkezhetett. Leggyakrabban a terhelő feltéten belüli szakaszon, a nyomott oldali rétegben, illetve a terhelő feltétellel érintkező

1. táblázat: A hajlító vizsgálatok alapján meghatározott mechanikai jellemzők

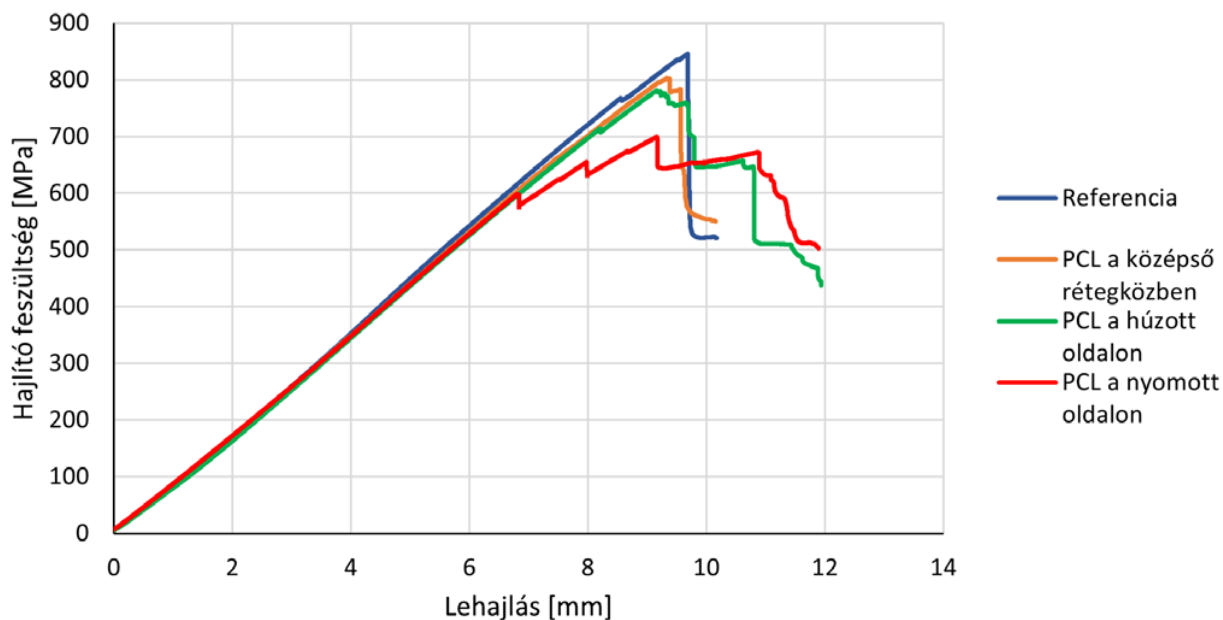
	Hajlító szilárdság MPa	Hajlító rugalmassági modulusz GPa
Referencia	$828,3 \pm 38,2$	$68,1 \pm 3,8$
PCL a húzott oldalon	$765,8 \pm 25,4$	$65,27 \pm 1,1$
PCL a semleges számban	$798,5 \pm 36,7$	$68,1 \pm 3,1$
PCL a nyomott oldalon	$705,7 \pm 15,6$	$64,8 \pm 2,8$

felületeken kialakuló lokális károsodásokból kiindulva következett be a tönkremenetel. Előfordult még húzott oldali tönkremenetel is a terhelő feltéten belüli szakaszon.

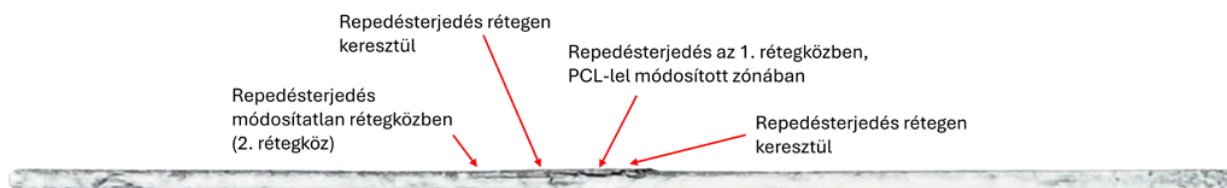
A semleges szálban, vagyis a középső rétegekben lévő PCL lokális rétegek közötti anyag a várakozásoknak megfelelően nem befolyásolta jelentős mértékben a tönkremeneteli folyamatot, a hajlító görbék lefutása (4. ábra), a tönkremenetel jellege, illetve a mechanikai tulajdonságok is a referencia próbatestekhez hasonlóan alakultak.

Ezzel szemben a húzott oldalon elhelyezett minta esetén a PCL-lel módosított zónában szál-mátrix elválások, illetve mikro-delaminációk eredményeként stabil repedésterjedéssel járó, makroszkopikus delamináció alakult ki, ez látható a 4. ábrán is, ahol a görbén fokozatosabb, lassabb erővisszaesés mellett egy kisebb plató alakul ki. Ezt követően azonban ezen próbatestek esetén is jelentkezett a viszonylag hirtelen tönkremenetel, többnyire a kritikus nyomott oldali szélső, ritkábban a húzott oldali szélső rétegben. Ebben az esetben a mechanikai jellemzők csak kis mértékben, kevesebb mint 10%-kal estek vissza.

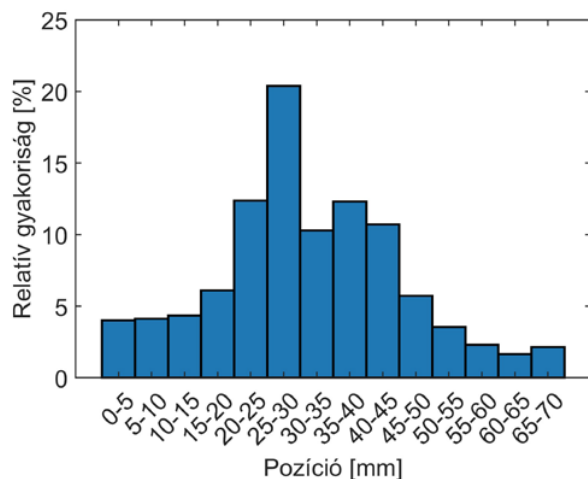
Amennyiben a nyomott oldalon helyeztük el a lokális rétegek közötti anyagot, a görbe lefutása még erőteljesebb eltérést mutat a referencia mintáétól. A hajlítófeszültség maximumát követően a hirtelen visszaesés helyett egy hosszabb plató alakul ki, ami a PCL-lel módosított zónában a szál-mátrix elválásokból és mikro-delaminációkból kialakuló, stabil rétegek közötti repedésterjedés eredménye. Ebben a folyamatban megmutatkozik, hogy a PCL-lel módosított zóna repedésterjedéssel szembeni ellenállóképessége, vagyis törési szívóssága jelentősen meghaladja egy normál, módosítatlan rétegek közötti törési szívósságát. Ennek megfelelően a tönkremenetel akkor következik be, amikor a repedés elhagyja a PCL-lel módosított zónát. A módszer sikerességét tovább igazolja, hogy amint az 5. ábrán bemutatott, nyomott oldalon PCL-t tartalmazó próbatesten látható, a repedés nem feltétlenül a rétegekben terjedve hagyja el a módosított zónát, hanem rétegek között is terjedhet, amihez jelentős energia szükséges, mindez pedig hozzájárul a stabil, kiszámítható tönkremeneteli folyamathoz.



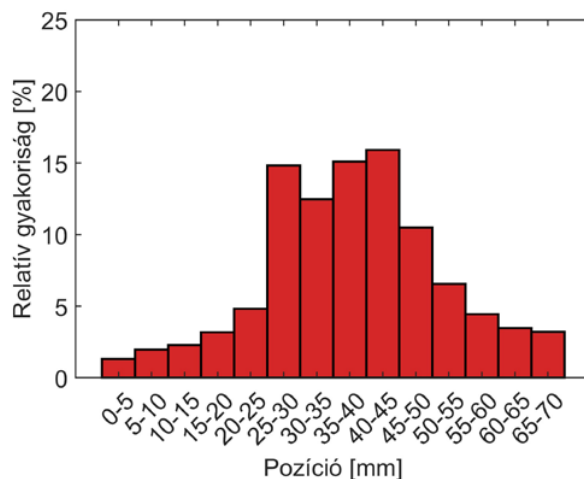
△ 4. ábra: Jellemző hajlító görbék próbatest típusonként



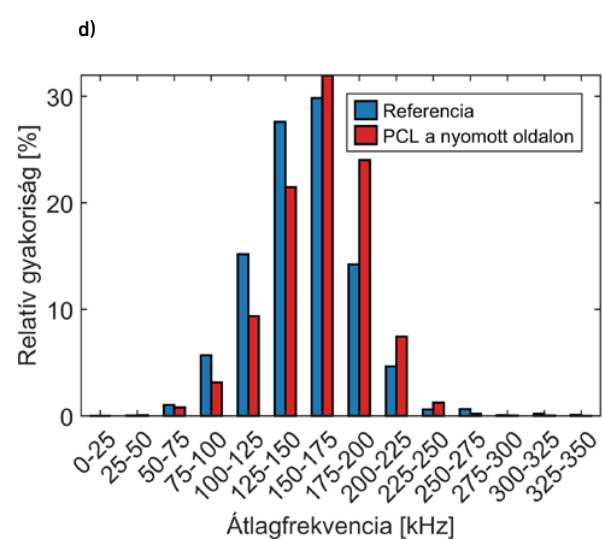
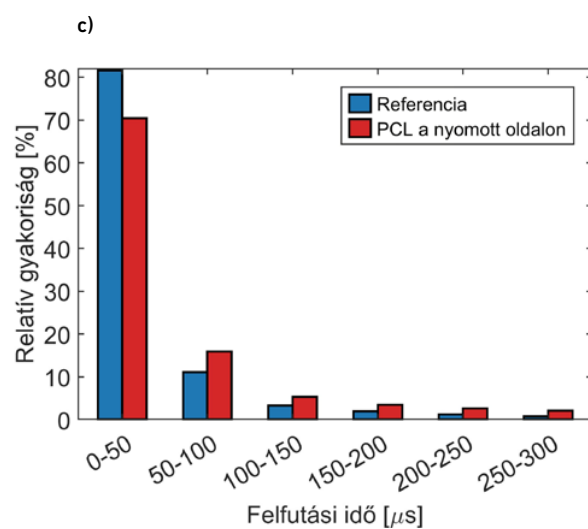
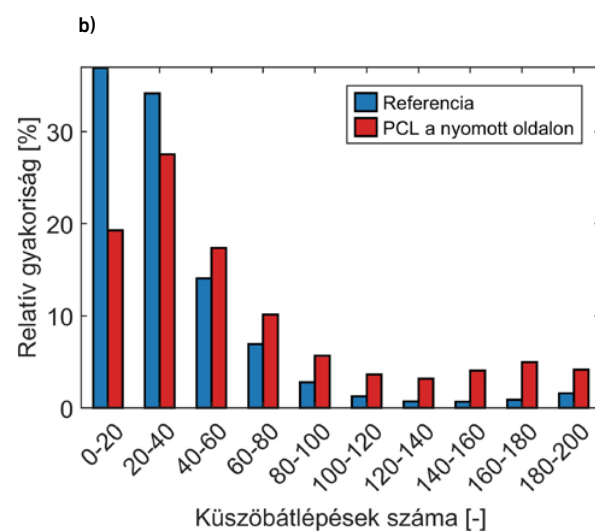
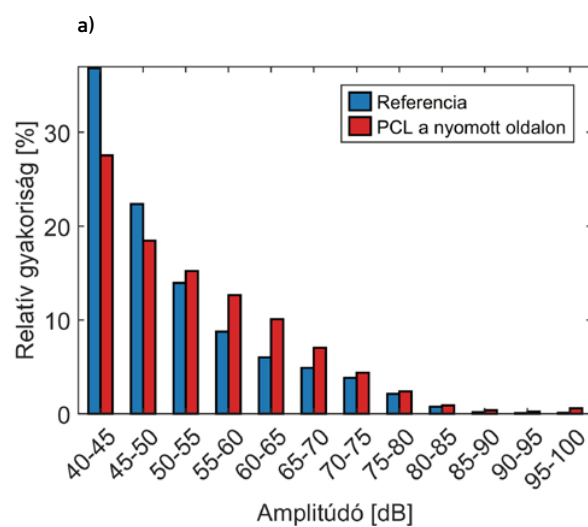
△ 5. ábra: Nyomott oldali rétegekben PCL-t tartalmazó, tönkremenetelt szenvedett próbatest



△ 6. ábra: Referencia próbatest AE jeleinek pozíció szerinti eloszlása



△ 7. ábra: Nyomott oldali rétegek között PCL-t tartalmazó próbatest AE jeleinek pozíció szerinti eloszlása



△ 8. ábra: A tönkremenetel pozíciójának környezetéből érkező AE jelek tulajdonságainak eloszlása, a) Amplitúdó, b) Küszöbátlépések száma, c) Felfutási idő, d) Átlagfrekvencia

A nyomott oldalon módosított próbatestek esetén hajlító rugalmassági modulusz tekintetében szintén nincs jelentős visszaesés, ez főként azzal magyarázható, hogy a száltartalom közel megegyezik a referencia próbatestekével, a kis mértékű visszaesésben szerepe lehet a PCL rétegek közötti anyagnak, ami lágyabb viselkedést eredményezhet. A hajlítószilárdság esetén ugyanakkor már tapasztalhatunk egy jelentősebb, 10%-ot meghaladó visszaesést.

3.2. AKUSZTIKUS EMISSZIÓS EREDMÉNYEK

Ezt követően elvégeztük az akusztikus emissziós elemzést, elsőként a beérkező akusztikus jelek pozíciójára fókuszálva (6. és 7. ábra). A kiértékelés során a 40 dB fölötti amplitúdójú jeleket vetjük figyelembe, mivel a szakirodalom szerint ez a tartomány foglalja magába a kompozitok jellegzetes károsodási mechanizmusait. A pozíció szerinti elemzésnél a próbatest középső 70 mm-es szakaszát vettük figyelembe, mivel ez a tönkremenetel szempontjából releváns szakasz, emellett így kiszűrhetjük az alátámasztások környékéről érkező esetleges zajokat is. Ahogy a 6. és 7. ábrán látható, az AE adatok megfeleltethetők a hajlítóvizsgálat eredményeiből levont következtetéseknek. Míg a referencia próbatest esetén láthatunk egy nagyobb, kiugró értéket, ahol a tönkremenetel egy adott, véletlenszerű pozícióban következett be, addig a PCL-lel módosított próbatest esetén viszonylag egyenletes a jelek eloszlása a középső 20 mm-en, ami alátámasztja a stabil repedésterjedéssel járó, fokozatosabb tönkremeneteli folyamatot.

Ezt követően a tönkremenetel pozíciójának környezetéből érkező jelek tulajdonságainak eloszlását elemeztük. Ahogy a 8. ábrán látható, a referenciához képest a nyomott oldalon módosított próbatest esetén jelentős eltérés tapasztalható a jeltulajdonságok tekintetében is, ami magyarázható a tönkremeneteli folyamatban tapasztalt különbségekkel. A módosított próbatestnél szignifikáns mértékben nőtt az 55-80 dB közti tartományba eső jelek aránya, amelyek a releváns szakirodalmat is figyelembe véve a PCL-t tartalmazó zóna környezetében végmenő, stabil delaminációs repedésterjedéshez köthetők [8, 9]. Mindezt alátámasztja, hogy az AE jelhez tartozó károsodási mechanizmus fokozatosságához köthető felfutási idő, illetve a jelek komplexitását jellemző, küszöbátlépések száma tekintetében is eltolódás tapasztalható a magasabb értékek felé. Emellett az is látható, hogy átlagfrekvencia tekintetében is tapasztalhatunk eltérést a két próbatest típus között.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során tervezhető tönkremenetelű kompozitok előállításával és vizsgálatával foglalkoztunk. Ehhez unidirekcionális szénszál erősítésű, epoxi mátrixú kompozit lemezeket állítottunk elő. A referencia mintáktól eltekintve az egyes lemezekbe a mintagyártás közben kitüntetett rétegek közé FFF additív eljárással PCL lokális rétegek közötti anyagot helyeztünk. A próbatesteken négy pontos hajlító vizsgálatot végeztünk, emellett a tönkremenetelt szemrevételezéssel és akusztikus emissziós vizsgálattal is elemeztük.

Az eredményekből megállapítható, hogy várakozásainknak megfelelően a rétegek közötti anyagot nem tartalmazó, referencia próbatestek esetén gyors erőeséssel járó hirtelen tönkremenetel jelentkezett, amely viszonylag kiszámíthatatlanul, többféle módon és pozícióban is bekövetkezhetett. Középen, a semleges szálban elhelyezett PCL lokális rétegek közötti anyag a várakozásoknak megfelelően nem eredményezett számottevő változást a tönkremenetelben és a mechanikai tulajdonságokban.

A húzott és a nyomott oldalon lévő PCL lokális rétegek közötti anyag viszont jelentős mértékben befolyásolta a tönkremeneteli folyamatot. Bár ezzel együtt mindkét esetben a mechanikai jellemzők kis mértékű romlását tapasztaltuk, a módszerrel elérhető stabilabb, kiszámíthatóbb tönkremenetel előnyös lehet a gyakorlatban.

Akusztikus emissziós vizsgálattal elemeztük a kompozit próbatestekben végbemenő károsodási folyamatokat. A kiértékelés során a jelek pozíció szerinti eloszlása, valamint karakterisztikus jeltulajdonságok eloszlása alapján minősítettük a tönkremeneteli folyamatát. Az akusztikus emissziós adatok kiértékelése igazolta a PCL lokális rétegek közötti anyag károsodási és tönkremeneteli folyamatokra gyakorolt hatását.

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.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Pruncu C. I., Gürgen S., Hoque M. E.: Fiber-reinforced polymers: Processes and applications. Nova Science Publishers, Hauppauge (2021).
- [2] Robinson P., Robinson P., Greenhalgh E., Pinho S.: Failure mechanisms in polymer matrix composites criteria, testing and industrial applications. Woodhead Publishing, Cambridge (2012).
- [3] Marton G. Zs., Szebényi G.: Influencing the damage process and failure behaviour of polymer composites - A short review. Express Polymer Letters, 19, 140-160 (2025).
- [4] Heslehurst R. B.: Defects and Damage in Composite Materials and Structures. CRC Press, Boca Raton (2014).
- [5] Towsyfy H., Biguri A., Boardman R., Blumensath T.: Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. Chin. J. Aeronaut, 33(3), 771-791 (2020).
- [6] Hliva V., Szebényi G.: Non-Destructive Evaluation and Damage Determination of Fiber-Reinforced Composites

- by Digital Image Correlation. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42: 43/1-43/15 (2023).
- [7] Wang B., Zhong S. C., Lee T. L., Fancey K. S., Mi J. W.: Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*, 12, (2020).
 - [8] Saeedifar M., Zarouchas D.: Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review. *Composites Part B: Engineering*, 195: 108039 (2020).
 - [9] Marton G. Zs., Balogh F., Szebényi G.: Acoustic emission analysis and signal classification for damage modes in UD carbon/epoxy composites. *Express Polymer Letters*, 19, 809-821 (2025).
 - [10] 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*, 215, 109002/1-109002/8 (2021).
 - [11] Melaibari A., Wagih A., Basha M., Kabeel A. M., Lubineau G., Eltaher M. A.: Bio-inspired composite laminate design with improved out-of-plane strength and ductility. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 144, 106362 (2021).
 - [12] 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*, 57, 2388-2410 (2022).
 - [13] Henry J., Pimenta S.: Bio-inspired non-self-similar hierarchical microstructures for damage tolerance. *Composites Science and Technology*, 201, 108374 (2021).
 - [14] 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, 9, 472-480 (2019).
 - [15] 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*, 202, 112086 (2024).
 - [16] Marino S. G., Czél G.: Improving the performance of pseudo-ductile hybrid composites by film-interleaving. *Composites Part A*. 142: 106233/1-106233/16 (2021).
 - [17] Szebényi G., Magyar B., Czigány T.: Achieving Pseudo-Ductile Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites via Interfacial Engineering. *Advanced Engineering Materials*, 23: 2000822/1-2000822/7 (2020).
 - [18] Marton G. Zs., Szebényi G.: Development and modeling of interfacially engineered composites with designed failure. in '24th International Conference on Composite Materials Baltimore, USA. 2025.08.04-2025.08.08. (2025).

A POLIMEREK szakmai folyóiratot a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya hazai, lektorált tudományos folyóiratnak fogadja el, a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT) is magyar nyelvű, lektorált folyóiratként van nyilvántartva.

Ezt jelzi Lektorált tudományos közlemények rovatunk, amelyben az egyetemektől és tudományos kutatóintézetektől kapott tudományos cikkeket a nemzetközi elvárásoknak megfelelően, a Tudományos Szerkesztőbizottságunk (egyetemi tanárok, MTA doktorok) lektorálása után közöljük.

A tudományos cikkeknek külön jelölve van a rovatcímében, hogy *Lektorált tudományos közlemény*, ezek felépítése megfelel a szigorú nemzetközi normáknak, a magyar mellett angol nyelvű absztrakt foglalja össze az eredményeket, a cikk bevezetése tartalmazza a tudomány jelenlegi állását megfelelően alátámasztva hivatkozásokkal. A következő részben modern eszközökkel és módszerekkel elért eredményeket mutatják be a szerzők, az összefoglalás pedig rendszerezi a cikk eredményeit. A cikkek végén a köszönetnyilvánítás és az egyéges irodalmi hivatkozás szerepel. Mindezek alapján valósulhatott meg, hogy a POLIMEREK az MTMT-ben lektoráltként szerepel mind a PhD, mind az MTA doktori eljárásokban – elismert és elfogadott folyóiratként.