



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

BULMAN VENCEL PÁL

SZAKDOLGOZAT

SZÉNSZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZITOK KÁROSODÁSI
MÓDJAINAK MEGHATÁROZÁSA AKUSZTIKUS EMISSZIÓVAL

Témavezető:

Dr. Szabényi Gábor

Egyetemi docens

Konzulensek:

Dr. Romhányi Gábor

Egyetemi docens

Marton Gergő Zsolt

Doktorandusz

BUDAPEST, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	iv
1. Bevezetés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. A szálerősítésű polimer kompozitok szerkezete és tönkremenetele	3
2.1.1. Kompozitok szerkezete és anyagai.....	3
2.1.2. Kompozitok mechanikai alapjai.....	6
2.1.3. Kompozitok tönkremenetele	8
2.2. Kompozitok roncsolásmentes vizsgálata.....	10
2.2.1. Szemrevételezés.....	11
2.2.2. Optikai vizsgálatok	11
2.2.3. Akusztikus emisszió alapuló vizsgálatok.....	12
2.2.4. Radiográfia.....	13
2.2.5. Ultrahangos vizsgálat (UT).....	14
2.3. Kompozitok tönkremenetelének elemzése akusztikus emisszióval.....	14
2.3.1. Tönkremeneteli módok beazonosítása	16
2.4. Szakirodalom elemzése és célkitűzés	17
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	18
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	18
3.1.1. Szálanyag.....	18
3.1.2. Mátrixanyag	18
3.2. Próbatestek gyártása	18
3.2.1. Vákuuminfúzió.....	18
3.2.2. Gyanta öntés	18
3.2.3. Szálpreparálás és mátrixcsepp felvitele.....	18
3.3. Alkalmazott berendezések.....	19
3.3.1. AE berendezés	19
3.3.2. Optikai nyúlásmérés (DIC)	19
3.3.3. Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z250	19
3.3.4. Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z005	20
3.3.5. Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z020	20
3.3.6. Olympus mikroszkóp	20
4. Kísérleti/fejlesztési rész.....	21

4.1.	Tönkrementeli módok jeleinek vizsgálata	21
4.1.1.	Csepplehúzás	21
4.1.2.	Gyanta próbatest szakítóvizsgálata	22
4.1.3.	Kompozit próbatest szakítóvizsgálata.....	22
4.1.4.	Rövid támaszközű hajlítás	23
4.2.	Mérési eredmények kiértékelése	24
4.2.1.	Mátrixrepedés.....	25
4.2.2.	Szál-mátrix elválás	28
4.2.3.	Rétegelválás	31
4.3.	Kompozit próbatestek AE jeleinek károsodási módokhoz rendelése.....	35
4.3.1.	Mátrixrepedés.....	35
4.3.2.	Szál-mátrix elválás	36
4.3.3.	Rétegelválás	36
4.3.4.	Összegzés.....	37
5.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	38
5.1.	További megoldásra váró feladatok	38
6.	Felhasznált források.....	40

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
E	Rugalmassági modulusz	MPa
E _c	Kompozit rugalmassági modulusza	MPa
E _f	Szál rugalmassági modulusza	MPa
E _m	Mátrix rugalmassági modulusza	MPa
F _c	Kompozit által felvett terhelés	N
F _f	Szál által felvett terhelés	N
F _m	Mátrix által felvett terhelés	N
V _c	Kompozit térfogataránya	-
V _f	Szál térfogataránya	-
V _m	Mátrix térfogataránya	-

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	Szakadási nyúlás	-
ρ	sűrűség	g/cm ³
σ_c	Kompozit szakítószilárdsága	MPa
σ_f	Szál szakítószilárdsága	MPa
σ_m	Mátrix szakítószilárdsága	MPa

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
AE	Acoustic Emission (akusztikus emisszió)
DIC	Digital Image Correlation (digitális képkorreláció)
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry (foltos interferometria)
ESPSI	Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry (foltos nyíró interferometria)
IR	Infrared (infravörös)
NDT	Nondestructive Testing (roncsolásmentes vizsgálat)
UT	Ultrasonic Testing (ultrahangos vizsgálat)
SHM	Structural Health Monitoring (strukturális állapotvizsgálat)
VI	Visual Inspection (szemrevételezés)

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű kompozitok számos alkalmazási területen bírnak kiemelkedő jelentőséggel kiváló fajlagos tulajdonságaiknak köszönhetően. Használatuk fő okai többek között merevségük, szilárdságuk, alacsony tömegük és kifáradással szembeni ellenállásuk. Előnyeik közé sorolható a merevségi és szilárdsági tulajdonságok testreszabhatósága a rétegrend és a szálirány változtatásával. Népszerűségük főleg az ezeket a tulajdonságokat kihasználó területeken mutatkozik, erre példa az űripar, repülőgépipar és a motorsport.

Természetesen az előnyös tulajdonságok mellett a kompozitok használatának léteznek korlátai is. A legtöbb esetben a szálerősítésű alkatrészek előállítása költségesebb, mint a hagyományos fémmegmunkálási eljárásokkal gyártott daraboké. Többfázisú anyagként a tönkremenetel, és ezzel a méretezés is összetettebb probléma, amelyre a tervezés során fokozott figyelmet kell fordítani. A keletkezett hibák kimutatása szintén körülményes, ezt a célt szolgálják a különböző roncsolásos – és roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások. Esetenként szükség van az alkatrész in-situ állapotfelügyeletére, amire a roncsolásmentes anyagvizsgálatok (Nondestructive testing, vagy NDT) kiválóan alkalmasak. Az optikai eljárások mellett az akusztikus hullám alapú és ultrahangos vizsgálatok, valamint a radiográfia is a legfontosabb NDT eljárások közé tartozik [10].

Jelen dolgozat az akusztikus emissziós eljárás alkalmazhatóságának vizsgálatára helyezi a hangsúlyt. A kompozit anyagokra jellemző károsodási formák különböző tulajdonságokkal -energia, amplitúdó, frekvencia stb. – rendelkező jeleket bocsátanak ki, ami alapján lehetőségessé válik a szétválasztásuk. A többfázisú kompozit anyag elemzésének előfeltétele külön-külön a szál és mátrix tönkremeneteli jeleinek vizsgálata, ami a későbbi beazonosítást segíti elő. A hibák jellegének beazonosítása mellett az AE vizsgálat a károsodás helyének meghatározására is alkalmas. A dolgozat a területen eddig végrehajtott kutatásokat [16-18, 21, 22, 25] szolgáltatott kiegészíteni és tovább pontosítani az eddig meghatározott tönkremenetel jeleinek tulajdonságait. Erre azért van szükség, mert a különböző tönkremeneteli módok jeleire jelenleg nem léteznek általánosan elfogadott határok, a kutatások eredményei eltérnek.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következő szakirodalmi áttekintés a kompozitok általános jellemzésére, valamint a tönkremenetelük és károsodásuk vizsgálatára alkalmas módszerek bemutatására szolgál. Különös hangsúlyt fektetnek az akusztikus emisszió alapján történő károsodás-elemzésre és annak egyéb módszerekkel való összehasonlítására.

2.1. A szálerősítésű polimer kompozitok szerkezete és tönkremenetele

A kompozit a három fő anyagcsoport (fémek, polimerek és kerámiák) kombinációjából álló két- vagy többkomponensű anyag [1]. Ezen belül beszélünk szálerősítésről abban az esetben, amikor a kompozit erősítő szálakból és az ezeket magába foglaló mátrixanyagból áll. A polimer kompozitoknál a mátrix jellemzően egy szívósabb polimer, amely a terhelést továbbítja a szálak között. Ennek feltétele a két anyag közti kiváló adhézió [2]. A mérnöki szerkezetekben használt jellemző erősítőszál az üveg-, szén-, aramid, - illetve bazaltszál, míg a mátrixanyagokat a vinil- és poliészter, illetve az epoxi gyanták képviselik [1,2].

Széles körű elterjedtségüknek oka, hogy az alkatrészek terhelése ritkán azonos a tér minden irányában, így bizonyos esetekben nincsen szükség izotróp anyagokra. A szálerősítésű kompozitok (továbbiakban: kompozitok) előnye, hogy a jellemzően nagy szilárdságú és rugalmassági modulusú erősítőanyag orientációjával a terhelés irányában javíthatóak az anyagtulajdonságok. Különböző száliránnyal rendelkező kompozit rétegek használatával előállítható a kívánt tulajdonságú laminát, amely a jelentős tömegcsökkentés mellett ugyanúgy alkalmas a terhelés felvételére. Az erősítőanyag előfordulhat mind egy- (unidirectional, UD), illetve két-, vagy többirányban erősítő (biaxial, triaxial stb.) kelmékként, illetve szövetekként. Érdemes még megemlíteni a kompozit szendvicsszerkezeteket, amik egy adott struktúra hajlítómerevség javítása érdekében két kompozit héj között egy jellemzően kis sűrűségű és gyengébb mechanikai tulajdonságokkal rendelkező távtartó maganyagot tartalmaznak [3].

2.1.1. Kompozitok szerkezete és anyagai

A már említett erősítőanyag, - illetve gyantatípusok mind különböző alkalmazásra hivatottak. A terhelési és/vagy költségkereti követelményektől függően különböző anyagkombinációk nyújtanak megfelelő megoldást.

Mátrixanyagok

A leggyakrabban alkalmazott mátrixanyagok sűrűn térhálós (duromer) polimerek, emellett az additív eljárások térnyerésének köszönhetően a hőre lágyuló termoplasztikus polimereket is széles körben használják. A térhálós csoportról írok

részletesebben, mivel műszaki alkalmazási területeken túlnyomó többségben ezekből válogatnak.

Poliészter

A telítetlen poliészter gyanta mézsűrűségű, folyékony állagú, a keverék-oldat (35 % sztirolban oldott poliészter oligomer) szobahőmérsékleten térhálósodik. A végtermék térhálós, hőre nem lágyuló nagyszilárdságú anyag, mely iniciátorral gyorsított polimerizációs láncreakcióban keletkezik [2].

Vinilészter

A vinilészter gyanták a poliészterek epoxi gyantával, novolak gyantával, vagy epoxi-novolak gyantával modifikált változatai. A jobb mechanikai tulajdonságok, a magasabb hőállósága és vegyszerállósága különbözteti meg a poliészter gyantáktól [2].

Epoxi

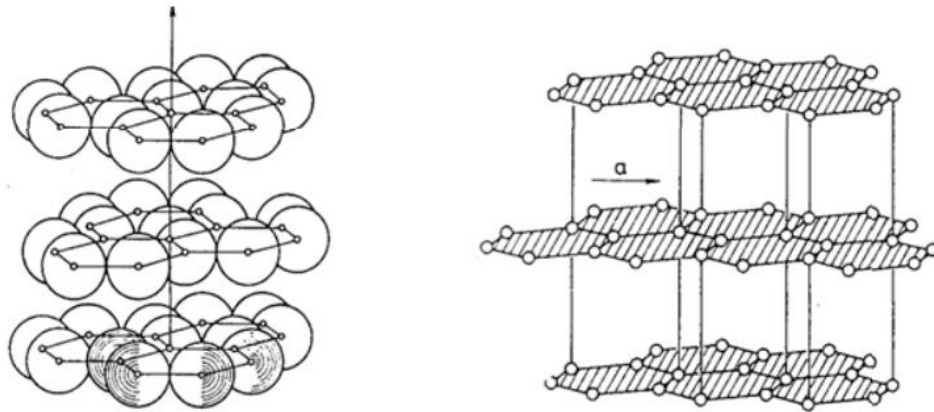
Az epoxigyanta a legkiválóbb tulajdonságokkal rendelkező gyantatípus, tapadóképessége miatt ragasztóként is széles körben elterjedt. Ellenálló a környezeti hatásokkal szemben, valamint jó mechanikai tulajdonságai, és kicsi zsugorodásának köszönhetően használata sokrétű (pl. repülőgépgyártás, motorsport) [2].

Erősítő szálak

A kompozitok esetében rendelkezésre állnak különböző tulajdonságú erősítőszálak, amikből az adott alkalmazásnak megfelelően válogathatunk. Az említett szálak tulajdonságainak összefoglalását tartalmazza a 2. ábra.

Szénszál

A szénből megalkotott erősítőszálban a szilárdságot és merevséget a szén grafitos szerkezete biztosítja (1. ábra). A grafit szerkezet a hatszögletű egységekből felépített síkjának irányában rendkívüli szilárdságot biztosít, míg transzverzális irányban a mechanikai tulajdonságok akár nagyságrendekkel is kisebbek [2].



1. ábra: A grafit szerkezete [2]

A karbonszálak többféle polimerszálból is előállíthatóak a megfelelő szenesítési körülmények megléte mellett (olvadás, égés elkerülése). Legelterjedtebbek a poliakrilnitril (PAN) és kátrányalapú szálak erre az alkalmazásra [2].

Aramidszál

A para-kapcsolódású aromás poliamid szálak alkalmazása kitűnő fajlagos tulajdonságaiknak köszönhetően széles körben elterjedt. A kiváló szilárdsági és merevségi tulajdonságok mellett sűrűségük a karbonszálnál is kisebb. Egyik fő alkalmazási területük ez energiaelnyelő struktúrák található szívósságuknak és ütésállóságuknak köszönhetően. A rideg szénszállal ellentétben az ütések és nagyobb nyíró igénybevétellel szemben is alkalmazható. A két anyag előnyeinek egyidejű kihasználásának érdekében lehetséges egy hibrid erősítőstruktúra előállítása [2].

Üvegszál

Az szerkezeti célra alkalmazott üvegszálak az S-üveg csoportba tartoznak. Legfőbb összetevője a szilícium-oxid (SiO_2), ami az üvegek 55–65 %-át adja. Az elemi szálak átmérője a szénszálnál nagyobb; 10 μm vagy aközeli (8–14 μm). Kapható üvegszál paplan, üvegfonal, roving és üvegszövet formájában is [2].

Az üvegszál egyik hátrányos tulajdonsága, hogy felületkezelést igényel. A szövés, fonás és egyéb feldolgozás során fellépő károsodások elleni védelem (írezés) mellett a határfelületi tapadást is biztosítani kell különböző vegyületekkel. Az utóbbi eljárás a többi eddig felsorolt száltípus esetén nem szükséges. [2]

Száltípus	Sűrűség (ρ) g/cm ³	Szakítószilárdság (σ) GPa	Rugalmassági modulus (E) GPa	Szakadási nyúlás (ϵ) %	Fajlagos szakadási hossz (σ/ρ) km
Üvegszál (E típus)	2,60	2,5	72	4,8	96
Grafitszál (HS)	1,78	3,4	240	1,4	190
Aramid (KEVLAR 49)	1,44	3,3	75	3,6	230
Polietilén(SK 66) (HOPE)	0,97	3,3	99	3,7	340
Acélhuzal	7,86	4,0	210	1,1	50

2. ábra: Különböző kompozit erősítőszálak jellemző mechanikai tulajdonságai [2]

2.1.2. Kompozitok mechanikai alapjai

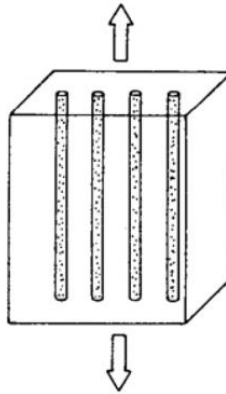
Mivel számos nagy terhelésű alkatrészben alkalmazzák a kompozitokat, elengedhetetlen a tönkremeneteli mechanizmusaik ismerete. Kompozitok esetén nem jellemző a képlékeny alakváltozás, ami a fémek esetében fontos szerepet játszik a végső tönkremenetel előrejelzésében. Ennek következményeként a tönkremenetel hirtelen, avagy katasztrofális, ami az előforduló gyártási hibákkal együtt jelentősen megnehezíti a kompozit struktúrák tervezését [9]. A több rétegből álló kompozit laminátokat progresszív tönkremenetel jellemzi [4].

A hosszú szállal erősített kompozit alkatrészek méretezéséhez legfontosabb a kompozit σ_c szakítószilárdságának és az E_c (húzó) rugalmassági modulusának ismerete. Ezek meghatározhatóak a szál és a mátrix megfelelő (σ_f , σ_m és E_f , E_m) adataiból [2].

Az idealizált kompozit modell két komponensből áll:

- nagy szilárdságú és modulusú szálak erősítőanyagból
- nagy engedékenységű, szívós mátrixból

Alapfeltételként szolgál a kompozit definíció legfontosabb kritériuma: a szál és a mátrix között ideálisnak tekinthető kapcsolat (adhézió). Amennyiben az adhézió tökéletes, akkor a két komponens egy egységként deformálódik, vagyis a szál és mátrix deformációja megegyezik [2].



3. ábra: UD kompozit száliránnyal párhuzamos terhelése [2]

A kompozitra ható terhelés (F_c) felbontható a szál (F_f), és a mátrix (F_m) által felvett terhelésre:

$$F_c = F_f + F_m$$

Mivel $F = \sigma \cdot A$, így

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

, ahol a „c” indexű tulajdonságok a kompozithoz, az „f” indexű tulajdonságok a szálhoz, az „m” indexűek pedig a mátrixhoz tartoznak

Továbbá az erőhatásra merőleges keresztmetszet felületarányai visszavezethetők a komponensek térfogatarányára:

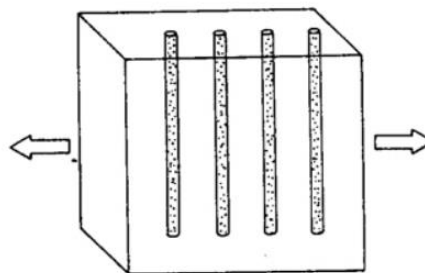
$$\sigma_c \cdot V_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

Az összefüggés érvényes a kompozit és komponenseinek rugalmassági modulusára is:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)$$

, ahol $V_f = 1 - V_m$ és $V_m = 1 - V_f$, amennyiben V_c -t egységnyinek tekintjük.

Ez an ún. Voigt-szabály, vagy keverékszabály, amely a kontrakciót, illetve Poisson-tényezőt elhanyagolja, viszont segítségével a tulajdonságok megfelelő pontossággal megbecsülhetők [2].



4. ábra: UD kompozit szálirányra merőleges terhelése [2]

A szálerősítés irányára merőlegesen ható erők (4. ábra) esetében a két komponens deformációja nem egyezik meg, viszont a bennük ébredő feszültségek igen. A szállal párhuzamos terheléssel analóg levezetés után a következő összefüggést kapjuk eredményül [2]:

$$E_c = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}$$

2.1.3. Kompozitok tönkremenetele

Egy kompozit réteg tulajdonságainak meghatározása a mezoszintű vizsgálatra jellemző. A tönkremenetel viszont mikromechanikai tulajdonságokból ered, az egyes alkotók tulajdonságaiból és kapcsolatából, valamint ezek kombinációjából [26].

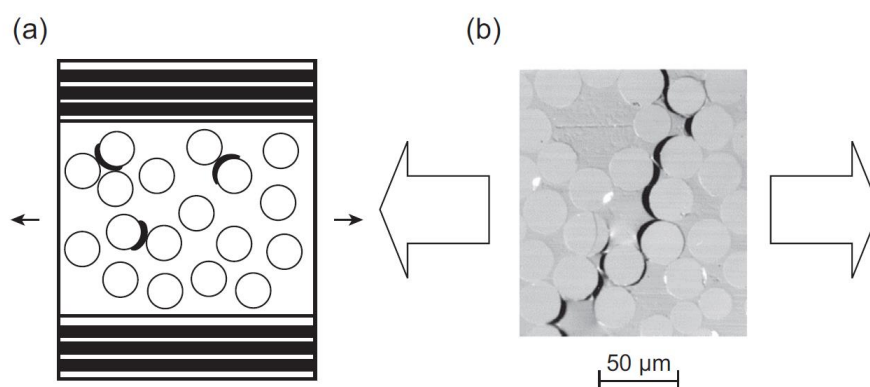
A fő tönkremeneteli formákat a következő alfejezetekben részletezem.

Mátrixtörés

A mátrixanyagban található mikrorepedések továbbfejlődése feszültség hatására. A mikrorepedéseket lokális szál-mátrix elválások, valamint gyártási hibák is okozhatják. A mechanikai tulajdonságokat jelentősen rontja, emellett egyéb károsodásokhoz is vezethet, mint a delamináció. Súlyosságát a repedések sűrűségével jellemzik, egyetlen repedés megjelenése nem okoz közvetlen tönkremenetelt [26].

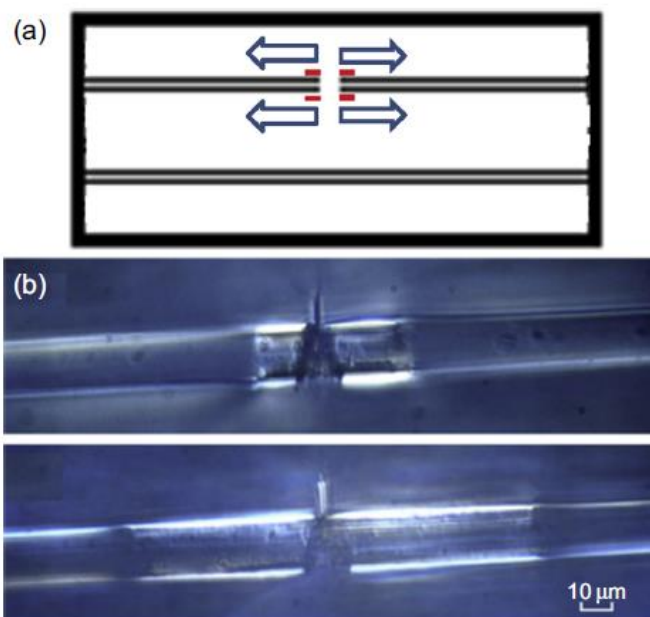
Szál-mátrix elválás

Az erősítő szálak és a mátrixanyag közötti adhézió megszűnése. Bekövetkezése után nem lehetséges a szálak közötti erőátvitel a mátrixon keresztül. Forrása lehet a gyártási folyamat tökéletlensége, valamint a terhelés jellege. Itt két fő esetet különböztetünk meg, a száliránnyal párhuzamos (6. ábra) és arra merőleges (5. ábra) terhelés által okozott elválás. Az előbbinél a két komponens merevségének jelentős különbségére vezethető vissza az elválás [26].



5. ábra: (a) Szál-mátrix elválás kialakulásának vázlata egy 0/90/0 rétegrendű laminátumban.
(b) Elválások repedéssé való továbbfejlődése [26]

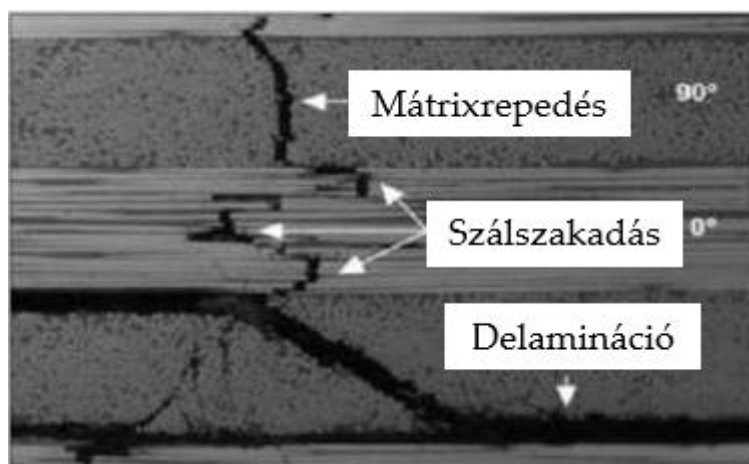
A szállal párhuzamos terhelés esetén egy szabad végű szál jelenlétére van szükség, ami folytonos szálerősítésű kompozitoknál szálszakadás következményeként jöhet létre. Az elválás terjedése a szál végénél fellépő nyíró igénybevételnek köszönhető [26].



6. ábra: (a) Szálszakadásból eredő elválás vázlata. (b) Szál-mátrix elválás terjedése a szálszakadás helyétől egy száltra nézve, fáradásos terhelés hatására [26]

Szálszakadás

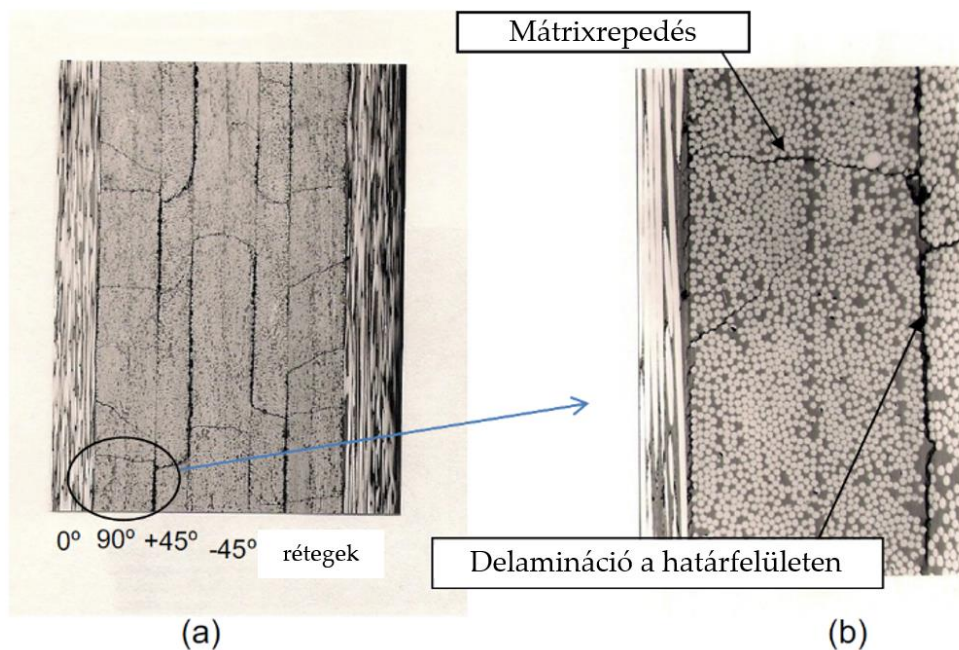
Az erősítő szálak tönkremenetele, jellemzően húzó igénybevétel eredménye. A gyártás közben keletkezett hibák, valamint a szénszálak közti szilárdsági tulajdonságok egyenetlen eloszlásának köszönhetően kialakulnak izolált szakadt szálak, ami feszültséggyűjtő helyekhez és további szálszakadásokhoz vezet (7. ábra) [26].



7. ábra: Szálszakadás, delamináció és mátrixrepedés egy kompozit laminátban [32]

Rétegelválás (delamináció)

Makroszintű hiba, a laminát rétegei közötti elválásra utal. Kiváltó oka lehet a szomszédos rétegek merevségi tulajdonságai közti különbség, ami terhelés közben az eltérő deformációk miatt feszültséghez vezet [26].



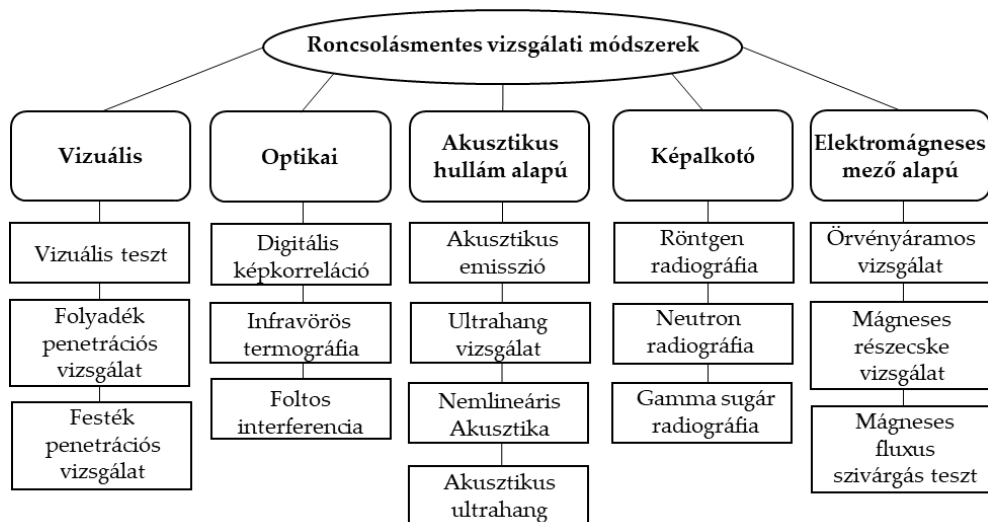
8. ábra: Különböző orientációjú rétegek közti delamináció [26]

A fenti tönkremeneteli mechanizmusok a kompozitok esetében előforduló folyamatok legáltalánosabb formái. Előfordulnak komplexebb terhelési esetek, amelyeknél az anyag válasza különbözik az eddigiektől, ez a jelen dolgozat szempontjából irreleváns.

2.2. Kompozitok roncsolásmentes vizsgálata

A tönkremeneteli, valamint gyártási hibák felderítésére alkalmazzuk az anyagvizsgálat eszközeit. A vizsgálat célja a hibák kimutatása mellett általában az adott anyag fizikai, kémiai és mechanikai tulajdonságainak meghatározása. A vizsgálati módszerek két csoportra bonthatóak aszerint, hogy a vizsgálat során roncsolódik-e az anyag vagy sem. A roncsolásos anyagvizsgálat egy – az adott anyagból készült – próbatesten végzett, a próbatest tönkremenetelével járó folyamat vizsgálatából áll (pl. szakító, - és hajlítóvizsgálat, Charpy ütővizsgálat). Ezzel ellentétben a roncsolásmentes anyagvizsgálat (Nondestructive testing, vagy NDT) során a vizsgált test fizikai és kémiai tulajdonságainak változtatása nélkül végrehajtott vizsgálatokról beszélünk [10].

Ebben a fejezetben a roncsolásmentes anyagvizsgálat eszközeit mutatom be, különös hangsúlyt fektetve a jelen szakdolgozat témájához szorosan kötődő akusztikus emisszió módszerre.



9. ábra A roncsolásmentes vizsgálati technikák egyik csoportosításának módja [10]

2.2.1. Szemrevételezés

Angol nevén Visual Inspection (VI), felületi hibák szabad szemmel történő felmérésére alkalmas. Gyorsan elvégezhető és gazdaságos, viszont kizárólag makroszkopikus hibák felderítésére alkalmazható és képzett szakembert igényel [11].

2.2.2. Optikai vizsgálatok

Az optikai eljárások során az emberi szem helyett különböző optikai rendszerekkel (lencsék, szenzorok) vizsgáljuk az anyagot. A kiértékelést számítógépek végzik, számszerű adatok alapján.

Digitális képkorreláció

A digitális képkorreláció (Digital Image Correlation) egy optikai elven működő, érintés nélküli nyúlásmérési eljárás, melynek létezik mind 2D, mind 3D elmozdulások érzékelésére kialakított típusa. A digitális formában tárolt felvételből számítógépes elemzés során kinyerhető a teljes deformációs mező, vagy a mozgás [13]. DIC segítségével végeztek kompozit próbatesteken vizsgálatokat Szabó G. és társai [25]. A gyantainfúzióval gyártott próbatestek szakítóvizsgálata során a képkorrelációs vizsgálat segítségével pontosan kimutatható volt a delamináció.

Az eljárás pontosságát bizonyítja, hogy a hibahelyek lokálisan nagyobb nyúlásait képes volt kimutatni. Levonták továbbá a következtetést, hogy vastagabb rétegrend esetén a próbatest mindkét irányból való megfigyelése szükséges.

Infravörös termográfia

Az infravörös termográfia egy érintés nélküli módszer, amely az anyagok által a károsodás hőfejlődési folyamata során kibocsátott infravörös (infrared, IR) hullámok érzékelésén alapszik. Célja egy hőkamera által érzékelt IR hullámok látható képpé való alakítása és hőmérsékletfüggő, színes pontokként való megjelenítése [14].

Foltos interferencia

A foltos interferencia (shearography) a vizsgálat során lézerrel megvilágított tárgyfelületről visszavert fény által kialakított foltos mintázatról kapta a nevét. Két vizsgált állapot mintázata közötti különbségekből meghatározhatóak az elmozdulások és azok deriváltjai. Két fő típusa az ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) és az ESPSI (Electronic Speckle Pattern Shearing Interferometry) [15].

2.2.3. Akusztikus emisszió alapuló vizsgálatok

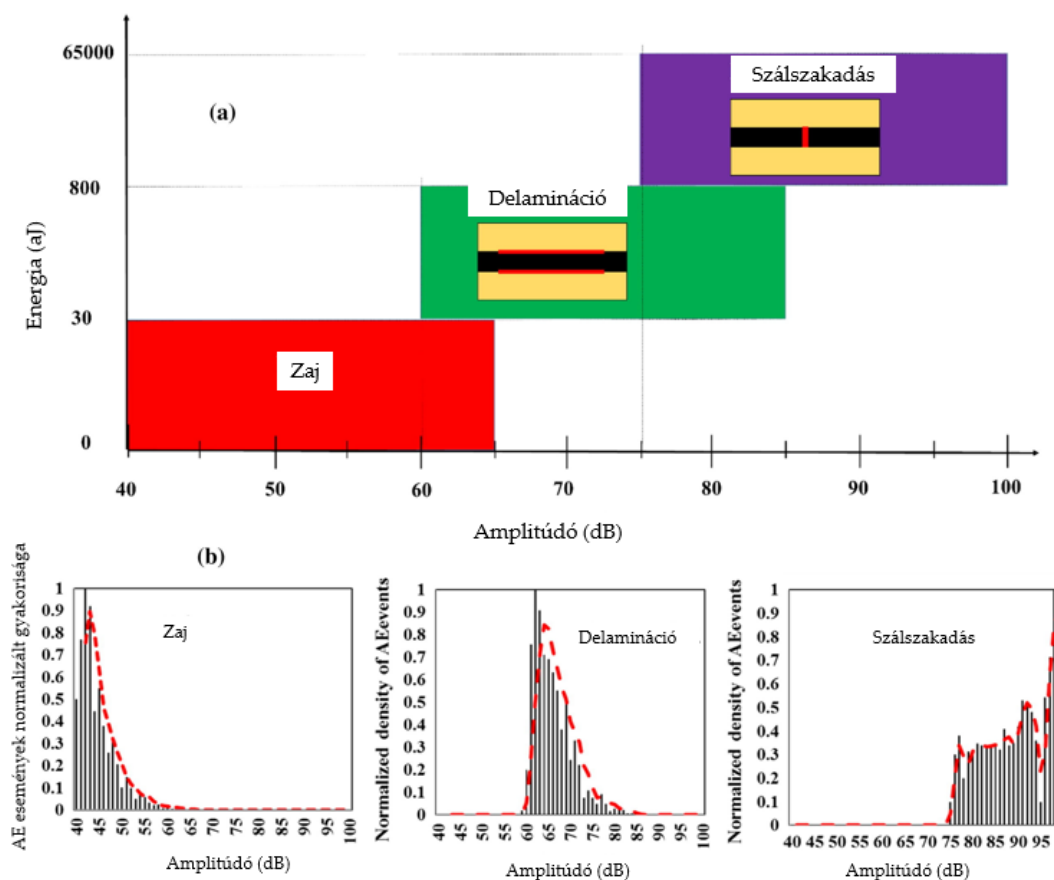
A roncsolásmentes vizsgálatok egy további kategóriája az akusztikus emissziós vizsgálat. Az eljárás során a tönkremeneteli folyamatok alatt felszabadult energia által keltett rugalmas hullámok amplitúdója, energiája és frekvenciája alapján meghatározható a károsodás jellege [27].

Előnye a terhelés alatti hosszabb távú, folyamatos vizsgálat, ami lehetővé teszi a károsodás terjedésének megfigyelését a tönkremenetelt megelőzően [19, 20].

Hátránya a sokszor nem reprodukálható eredmény, ami főként az inhomogenitásokkal rendelkező anyagokra, valamint a repedések hirtelen és véletlenszerű keletkezésére jellemző. Amennyiben a jel hullámhossza közel azonos az egyenlőtlenességekkel, nem várhatóak konzisztens eredmények [19]. A hátrányok közé sorolható még a keletkező jelek erőssége, amely nagyságrendekkel kisebb, mint ultrahangos módszerek esetén. Az érzékeléshez szükséges mikrofonok érzékenységre, valamint az jelerősítők megbízhatóságára emiatt kiemelt figyelmet kell fektetni. Fontos szempont még a környező zaj hatása, valamint az adatfeldolgozás és a jelek lokalizálása során alkalmazott módszerek. A lehetséges hibaforrások és pontatlanságok miatt érdemes összehasonlításokat végezni egyéb NDT módszerek eredményeivel [19].

Kompozitok esetében a vizsgálat célja a különböző tönkremeneteli mechanizmusok jeleinek azonosítása és szétválasztása. A szétválasztás határaitól eltekintve több kutatás is hasonló következtetéseket von le: a tönkremenetel módja a jel frekvenciájához, míg intenzitása az amplitúdóhoz köthető [21]. A szálszakadáshoz nagyobb, míg a mátrix tönkremenetelével, valamint delaminációval járó folyamatokhoz kisebb amplitúdójú jelek tartoznak [16-18, 20-22]. Mohamad és társai [16] UD karbon és S típusú üvegszálból készült hibrid próbatesteken végzett szakítómérések mérések alapján tettek különbséget a különböző tönkremeneteli

módok közben kibocsátott jelek között. A hibrid próbatetek használatát az indokolja, hogy az üveg – és szén-szálak kompozitok különböző tönkremeneteli tulajdonságokkal rendelkeznek, így a rétegrendet és az egyes alkotók arányát változtatva más tönkremeneteli folyamatok idézhetőek elő. Két fő tönkremeneteli módot figyeltek meg: egyrészt a szén-szálak töredezését, másrészt a szén/üveg határregegen végbemenő delaminációt. A delamináció belövetkezését a szén rétegben ejtett bevágással, valamint a próbatest megfelelően választott vastagságával biztosították. A keletkezett jeleket 3 osztályba sorolták: az 1. osztályú jelek 40-65 dB amplitúdóval és 0-30 aJ energiával a zajhoz tartoznak; a 2. osztályú, 60-85 dB amplitúdójú és 30-800 aJ energiájú jelek a delaminációhoz, míg a 3. osztályú, 75-100 dB amplitúdójú és 800-65000 aJ energiájú jelek a szálszakadáshoz tartoznak [16].



10. ábra: (a) különböző tönkremeneteli mechanizmusokhoz rendelt amplitúdó- és energiahatárok és (b) események gyakorisága az adott intervallumban [16]

2.2.4. Radiográfia

A radiográfia egy olyan képalkotó eljárás, melynek során a vizsgált tárgy szerkezetét röntgen, - gamma, - vagy egyéb sugárzással vizsgáljuk. A módszer azon alapszik, hogy a sugárforrás által kibocsátott sugárzás a tárgyra irányítva elnyelődik, szóródik vagy áthalad a tárgyon, majd nyomot hagy a detektoron. A kialakult képen megkülönböztethetőek a különböző csillapítással bíró idegen anyagok, valamint

sérülések. Átsugárzásos módszer esetében a detektor a tárgy mögött helyezkedik el, a visszaverődött sugárzást begyűjtő módszer esetén pedig a sugárforrás felőli oldalon [23].

2.2.5. Ultrahangos vizsgálat (UT)

Az ultrahangvizsgálat nyomáshullámok terjedését és a közeg határfelületeiről való visszaverődését használja fel belső folytonossági hiányok felderítésére. A vizsgált tárgyba juttatott ultrahanghullámok számára a darabban lévő folytonossági hiányok olyan nagy akadályt jelentenek, hogy azok felületéről részben vagy egészben visszaverődnek [11].

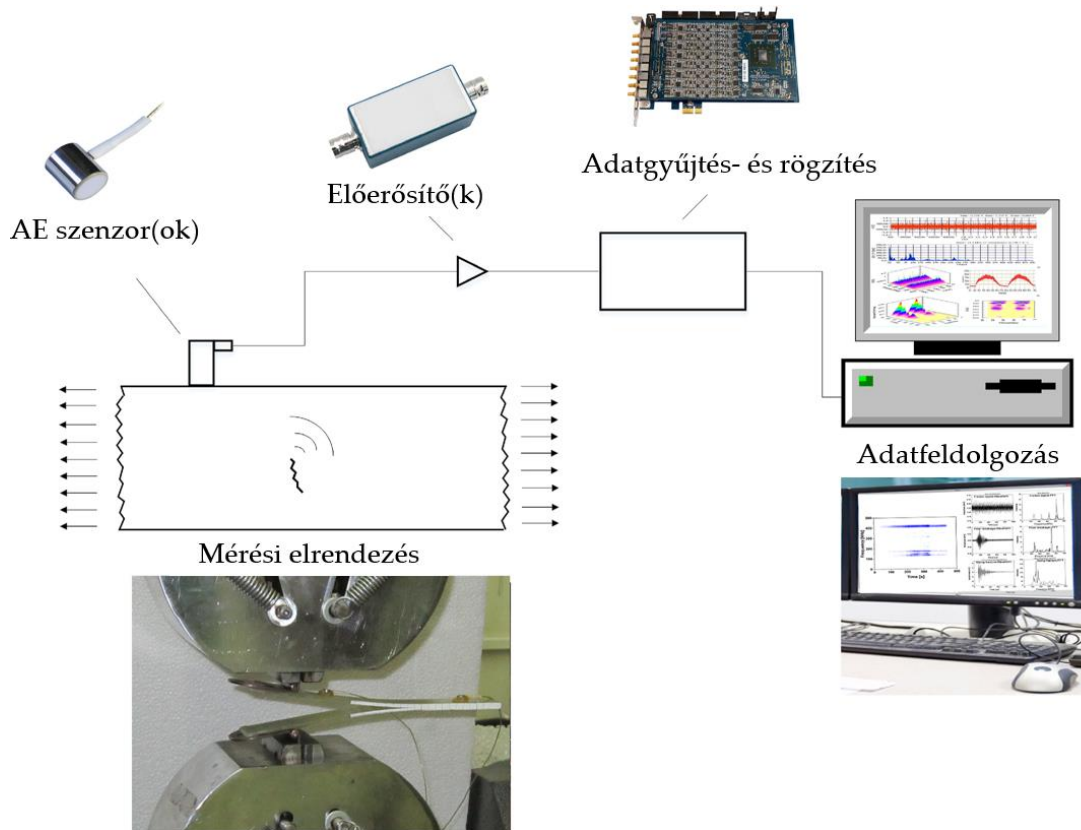
Az ultrahangok a mechanikai rezgések csoportjába tartoznak, frekvenciájuk a korszerű ultrahangos berendezéseknél 0.25 - 14 MHz között helyezkedik el. Az ultrahang keltésének különböző módszerei közül az anyagvizsgálatban leggyakrabban az ún. piezoelektromos és az elektrostrikiós rezgéskeltőket alkalmazzák [24].

2.3. Kompozitok tönkremenetelének elemzése akusztikus emisszióval

A 2.2.3 fejezetben kifejtett akusztikus emisszió segítségével történő hibaelemzésnek a kompozitok esetében egyre növekvő szerepe van. Néhány egyéb vizsgálati módszerrel szemben (pl. radiográfia, foltos interferencia) nem igényli a struktúra külső gerjesztését és az arra adott válasz vizsgálatát, ami alkalmassá teszi a struktúrák in-situ állapotvizsgálatára (SHM – Structural Health Monitoring) [27].

Egy AE mérés elvégzéséhez a következő berendezésekre van szükség, amelyeket a 11. ábra is szemléltet:

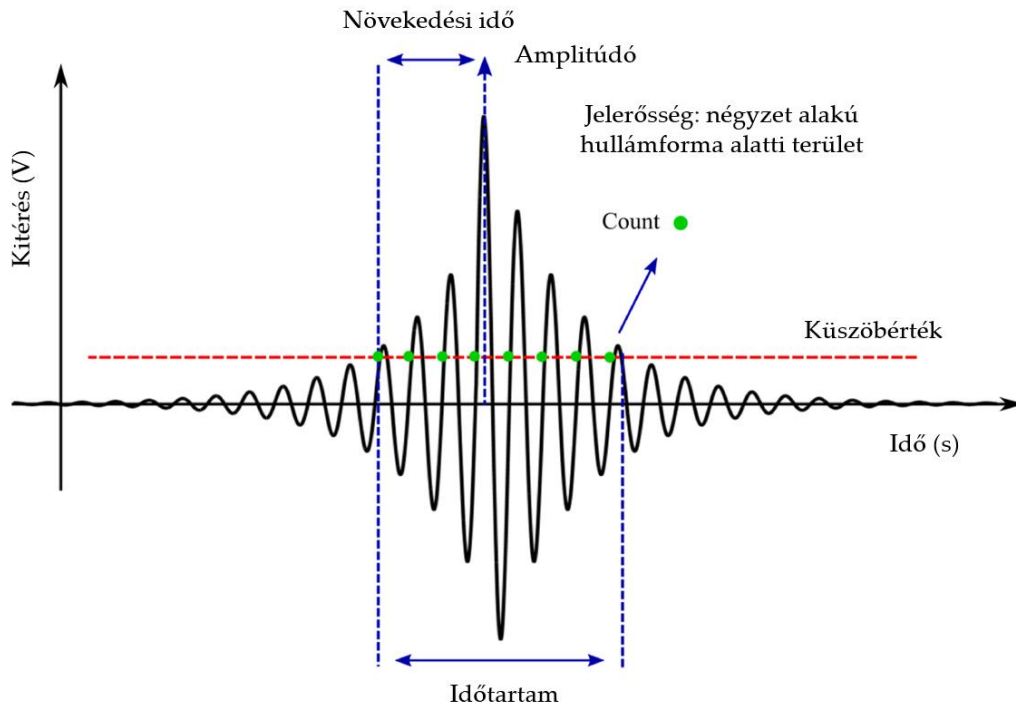
- Terhelt munkadarab
- AE szenzorok a rezgések érzékelésére
- Előerősítők, amelyek felerősítik a szenzorok analóg jeleit
- Adatgyűjtő- és rögzítő részegység, amely az analóg jelek digitális jellé való átalakításáért felelős
- Adatfeldolgozó részegység, a digitális AE jelek elemzéséhez [27].



11. ábra: AE mérés részei [27]

A vizsgálandó jelek szétválasztásához elengedhetetlen a hullámalak paramétereinek ismerete (12. ábra). Ezek (mértékegységekkel együtt) a következők:

- Küszöbérték (dB): A küszöbérték alatti intenzitással rendelkező jelek kiszűrésre kerülnek
- Amplitúdó (dB): A jel kitérésének legnagyobb értéke
- Időtartam (μs): Az első és utolsó küszöbérték átlépés között eltelt idő
- Növekedési idő (μs): Az első küszöbérték átlépése és az amplitúdó közötti időtartam
- Rezgésszám (counts): A küszöbérték hullámalak által való átlépésének száma (pozitív irányban).
- Jelerősség (aJ): A négyzet alakú hullámforma alatti terület a hullámforma időtartama alatt.
- Csúcsfrekvencia (kHz): A gyors Fourier-transzformáció segítségével előállított frekvencia eloszlás legnagyobb értékéhez tartozó frekvencia [27].



12. ábra: Általános hullámalak és paramétere [27]

2.3.1. Tönkremeneteli módok beazonosítása

A leggyakrabban előforduló kompozit károsodási módok a 2.1.3 fejezetben már említett szálszakadás, mátrixtörés, szál-mátrix elválás és a delamináció. A belőlük származó AE jelek többféle szempont alapján csoportosíthatóak, melyek közül a két legfontosabb a csúcsfrekvencia és az amplitúdó. A mátrixtörést kis amplitúdójú, alacsony frekvenciájú, hosszú időtartamú és növekedési idejű jelek jellemzik. Ezzel szemben a delaminációra közepes amplitúdójú, alacsony frekvenciájú és hosszú időtartamú jelek jellemzőek. A szálszakadás nagy amplitúdójú, magasfrekvenciájú és nagy emelkedési idővel rendelkező jeleket bocsát ki [27].

Habár általánosságban kimondható, hogy pl. a mátrixtöréshez kis amplitúdójú és frekvenciájú jelek tartoznak, a mérési eredmények ettől eltérhetnek. Mindezért érdemes az AE vizsgálattal egyidejűleg egyéb módszereket (DIC, termográfia) is alkalmazni a károsodás módjának és helyének pontosabb meghatározásának érdekében [27].

- Csúcsfrekvencia alapú besorolás

De Groot és társai [31] UD epoxy-karbon kompozitokon végzett szakító, lap shear és DCB vizsgálatok alapján különböztetett meg 4 tönkremeneteli módot. A mátrixtörés 90-180 kHz, a szálszakadás 300 kHz felett, a szál-mátrix elválás 240-310 kHz, és a száلكihúzás jelei 180-240 kHz közé estek.

- Amplitúdó alapú besorolás

Liu és társai [29] különböző rétegrendű, módosított geometriájú epoxy-karbon kompozit próbatestek szakítóvizsgálata alapján határoztak meg jellemző amplitúdótartományokat a tönkremeneteli módok szétválasztására. Az eredmények alapján a mátrixtörés 40-60 dB, a szál-mátrix elválás 50-70 dB, a delamináció 60-80 dB, a száلكihúzó- és szakadás 80-100 dB értékeknek felel meg.

2.4. Szakirodalom elemzése és célkitűzés

Az irodalomkutatás célja a kompozitok tönkremenetelét és az AE vizsgálati módszer hatékonyságát volt hivatott felderíteni szálerősített kompozitok vizsgálata esetében. Egyéb NDT módszerek is elemzésre kerültek, egyrészt az AE módszerekkel való összehasonlításhoz, másrészt pedig használatuk egyszerűségének és hasznosságának felmérésére [10].

A 2.2 fejezetben elemzett vizsgálati módszerek közül az AE mellett DIC-t is alkalmazok az anyagvizsgálatok során. A DIC egy két kamerát igénylő és több kalibrációs feladattal járó vizsgálati módszer, amely segítségével pontosan elemezhető a próbatest elmozdulásmezője az adott területen [13]. Ebben az esetben a próbatest nyúlásértékeit továbbította a szakítógéppel.

Az AE egy rendkívül hatékony eszköz a tönkremeneteli módok meghatározására egy rétegelt laminátum esetében, amennyiben az egyes károsodási módok jeleit előzőleg meghatároztuk. A jelen dolgozatban foglalt vizsgálatok sorrendje és összetétele is eszerint épül fel: egy összetett próbatest elemzése és tönkremeneteli módjainak meghatározása a fő cél, amelyhez különböző alcélok tartoznak. Az egyes károsodási módok meghatározására külön vizsgálatra kerül a mátrixrepedés, szál-mátrix elválás és a rétegelválás is. A mátrixrepedés egy szabványos próbatesten végzett húzópróba, a szál-mátrix elválás egy elemi szénszálról való cseppléghúzó mérés, a rétegelválás egy kompozit próbatest rövid támaszközű 3-pontos hajlítása során került meghatározására.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

3.1. Felhasznált alapanyagok

3.1.1. Szálanyag

Az erősítő szálak típusa a Zoltek PX35 309 g/m² száraz UD szénszál.

3.1.2. Mátrixanyag

A szálakhoz használt mátrix az IpoX MR 3010 lamináló gyanta és IpoX MH 3124 edző keverékéből állt, 100:33 arányban keverve.

3.2. Próbatetek gyártása

3.2.1. Vákuuminfúzió

A vákuuminfúzió során 6 db egyirányú réteget fektettem egymásra, majd az adott gyantarendszerrel alacsony nyomás alatt átítattam.

A próbatetek darabolása körfűrésszel történt, két méretben:

- Szakító: 250x20 mm
- Hajlító: 40x12 mm

3.2.2. Gyanta öntés

Az epoxy gyantából készült húzó próbatetek gyártása a lamináló gyanta és edző keveréséből, szilikon formába való öntéséből és itteni térhálósodásából állt.

3.2.3. Szálpreparálás és mátrixcsepp felvitele

Az elemi szál próbatetek egy papír keretben kerültek rögzítésre, majd majd mátrixcseppeket vittem fel a szál felületére. A térhálósodási reakció lezajlását követően a próbatetek mérésre kész állapotban voltak.

3.3. Alkalmazott berendezések

3.3.1. AE berendezés

Adatfeldolgozó egység

Az adatok feldolgozásáért és elemzésre való tovább küldéséért a Mistras PCI-2 2 csatornájú digitális adatfeldolgozó 32-bites PCI kártya felelt. Az adatgyűjtés 18 bit A/D átalakítással és legfeljebb 40 MSample/s sebességgel folyt. Az eszköz sáv szélessége a 1 kHz – 3 MHz tartományt fedi le.

Előerősítő

A mikrofon és adatfeldolgozó egység között egy IL40S típusú 30-1100kHz sáv szélességű, 40dB erősítésű előerősítő helyezkedik el.

Mikrofon

Az adatokat méréstől függően egy- illetve két Micro30s (Physical Acoustic Corporation, Princeton Junction, USA) típusú mikrofonnal gyűjtöttem, amelyek működési frekvenciatartománya 150-400 kHz, csúcs érzékenysége 40 dB.

3.3.2. Optikai nyúlásmérés (DIC)

Az optikai nyúlásméréshez a Mercury Monet 3D típusú (Sobriety, Kurim, Csehország) optikai nyúlásmérő berendezést használtam. A berendezés 2 db 5 megapixel (Mpx) felbontású, maximálisan 60 Hz képrögzítési frekvenciára képes ipari kamerát, 2 db 25 mm-es objektívet, 2 db nagyteljesítményű fényt kibocsátó dióda (light-emitting diode, LED) fényforrást és egy számítógépet (Intel Core i7-7700K processzor, 16 GB RAM, Patriot Hellfire 480 GB M.2 SSD) foglalt magába, amelyen a Mercury RT-v2.6 szoftver futott. A mérési összeállításhoz felhasználtam továbbá 2 db háromlábú kameraállványt. A DIC berendezést kettébontva, 2 db 2D DIC egységként használtam, azaz egy háromlábú állványra egy objektívvel felszerelt kamerát és egy LED fényforrást szereltem fel.

Ezt követően kalibráltam a kamerákat egy szabványos kalibráló lemez és a szoftver utasításainak segítségével. A használt kalibráló lemez osztása 5 mm volt. A kalibrálás során elkészült képsorozatból a szoftver automatikusan korrigálja a lencsék torzítását és kiszámítja az elrendezés felbontását a vizsgálati síkban.

3.3.3. Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z250

A kompozit próbatestek mechanikai vizsgálatait a Zwick Z250 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Németország) típusú szakítógépen végeztem, amelynek

sebességtartománya 0,001 – 600 mm/perc, terhelhetősége pedig 250 kN. A szakítóvizsgálatokhoz 250 kN-os mérőcellát és 100 kN terhelhetőségű ékes befogópofát használtam. A húzó vizsgálatokat nyúlásvezérelt módon végeztem a DIC által mért próbatest megnyúlás alapján. Az eredményeket a berendezéshez tartozó Zwick TestXpert II 3.41 szoftverrel rögzítettem és MS Excelben értékeltem ki.

3.3.4. *Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z005*

A csepplehúzás egy Zwick Z005 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Németország) típusú szakítógépen végeztem, amelynek mérési sebességtartománya 0,0005-3000 mm/perc, maxiális terhelhetősége 5 kN. A mérések során alkalmazott erőmérő cella 20 N terhelhetőséggel rendelkezett. Az eredmények rögzítését a Zwick TestXpert 11.0 programmal, kiértékelésüket MS Excel segítségével végeztem.

3.3.5. *Univerzális anyagvizsgáló gép - Zwick Z020*

Az epoxi próbatestek szakítását és a rövid támaszközű hajlítás próbát a Zwick Z005 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Németország) típusú anyagvizsgáló gépen végeztem. A gép mérési sebességtartománya 0,001-750 mm/perc, terhelhetősége 20 kN. Az alkalmazott erőmérő cella 20 kN méréshatárral, a befogópofák 10 kN terhelhetőséggel rendelkeztek. A mérési eredmények rögzítéséhez a Zwick TestXpert 11.0 programot használtam, az eredmények kiértékelését MS Excelben végeztem.

3.3.6. *Olympus mikroszkóp*

Az elemi szénszálak tönkremenetelének vizsgálatára egy Olympus BX51M (Olympus Corporation, Tokió, Japán) mikroszkópot használtam, amely 2,5x-100x nagyításra képes. A kiértékeléshez használt program az Olympus Stream Motion.

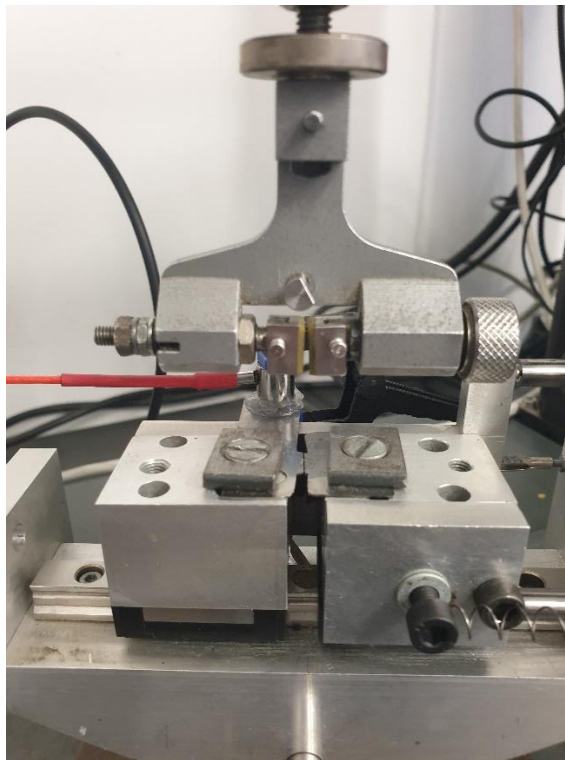
4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

4.1. Tönkremeneteli módok jeleinek vizsgálata

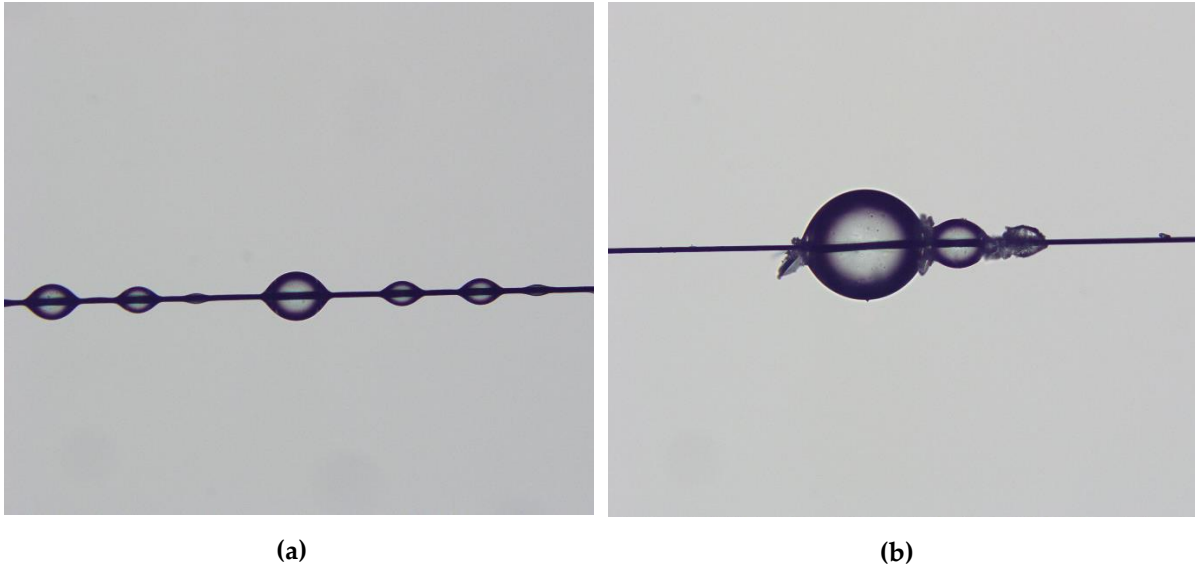
4.1.1. Csepplehúzás

A csepplehúzás során egy elemi szálra helyezett gyantacsepp került lehúzásra két penge segítségével. A terhelési sebesség $0,5 \text{ mm/s}$, ez a sebesség bizonyult a legmegbízhatóbbnak a szál-mátrix elválás előidézésére. Ezen kívül 5 mm/s és 2 mm/s sebességekkel kísérleteztem, viszont ezek az esetek túlnyomó többségében a szál szakadásához vezettek. A pengék távolságának beállítása a gyantacsepp méretének megfelelően történt: mikroszkópos mérés után a pengék a cseppátmérő $1/3$ -nak megfelelő távolságba kerültek beállításra. Egy az eljárással lehúzott csepp látható a 14. ábrán mérés előtti és utáni állapotban.

Az AE jelek érzékelését szolgáló mikrofont az egyik pengén található nyúlványhoz rögzítettem, csatolóközegként szilikonsírt használva. A mérési berendezést a 13. ábra mutatja be.



13. ábra: Csepplehúzás mérési elrendezése



14. ábra: Gyantacseppek mérés előtti (a) és utáni (b) állapota

4.1.2. Gyanta próbatest szakítóvizsgálata

A 6 darab epoxi próbatest szakítása az MS EN ISO 527-2 szabvány alapján folyt. A mérési sebesség értéke mm/s. A próbatestre két mikrofont rögzítettem egymástól 60 mm távolságban, szilikonszír csatolóközeggel (15. ábra).



15. ábra: Gyanta próbatest szakítóvizsgálatának mérési elrendezése

4.1.3. Kompozit próbatest szakítóvizsgálata

A 6 db kompozit szakító próbatest mérése az MS EN ISO 527-4 szabvány alapján folyt. A Zwick Z250 anyagvizsgáló gépen végzett mérés támogatására szolgált a Mercury Monet 3D optikai nyúlásmérő kamera (17. ábra). A nyúlási adatokat a DIC

kamera szolgáltatja a szakítógépnél. A próbatestre két mikrofont rögzítettem egymástól 100 mm távolságban, szilikonszír csatolóközeg alkalmazásával (17. ábra).



16. ábra: Kompozit próbatest szakítóvizsgálatának mérési elrendezése

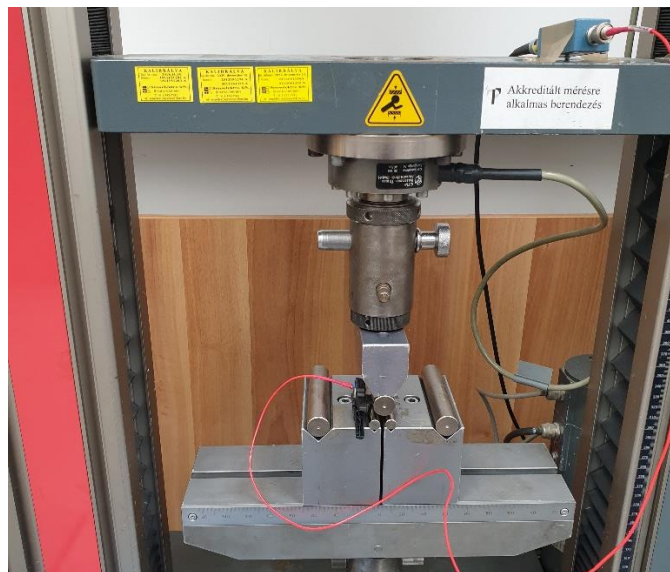


17. ábra: Mikrofonok elrendezése a befogott kompozit próbatesten

4.1.4. Rövid támaszközű hajlítás

A 3 pontos rövid támaszközű hajlítást az ISO 14130 szabvány alapján végeztem. A mérést a szabványban meghatározott terhelő hengerfej helyett egy nagyobb átmérőjűvel helyettesítettem a terhelés eloszlata érdekében, amely a lokális tönkremenetel elkerülését segítette elő. Ezt a módszert sikeresen alkalmazták Marton és társai [33], miután a nagyobb átmérőjű hengerekkel kiküszöbölték a lokális tönkremenetelt és emellett jobb szilárdsági értékeket mértek. A terhelési sebesség 5 mm/s, ami megbízhatónak bizonyult a rétegelválás előidézésére.

A próbatest hosszmeretének meghatározásánál a mikrofon elhelyezését is figyelembe kellett venni. A mérés során 1 db mikrofont rögzítettem a próbatesthez, a 18. ábrán látható módon.



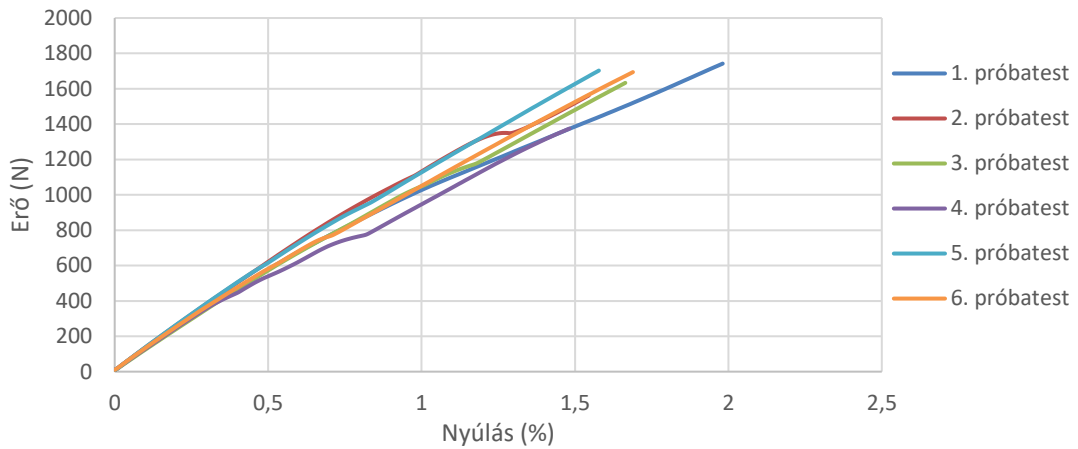
18. ábra: Rövid támaszközű hajlítás mérési elrendezése

4.2. Mérési eredmények kiértékelése

A mérések során rögzített jelek kiértékelését a következő tulajdonságok vizsgálatával végeztem: amplitúdó, frekvencia és jelerősség. A tönkremeneteli módok jellemzése az említett paraméterek értékeinek tartományokba való sorolásával történt, szemléltetésükre a mérési sorozatból kiemeltem egy példát mindhárom károsodási módhoz. Az összes mért próbatest adatai a melléklet M1.-M4. táblázataiban megtalálhatóak.

A zaj kiszűrésének érdekében a kiértékelés során a 40 dB alatti amplitúdójú jeleket nem vettem figyelembe, hasonlóan a területen végzett kutatásokhoz [29].

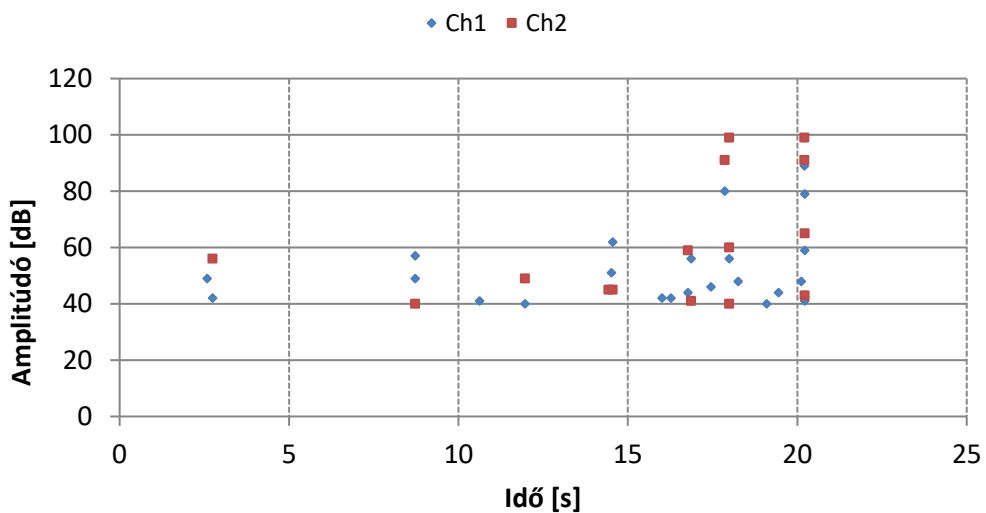
4.2.1. Mátrixrepedés



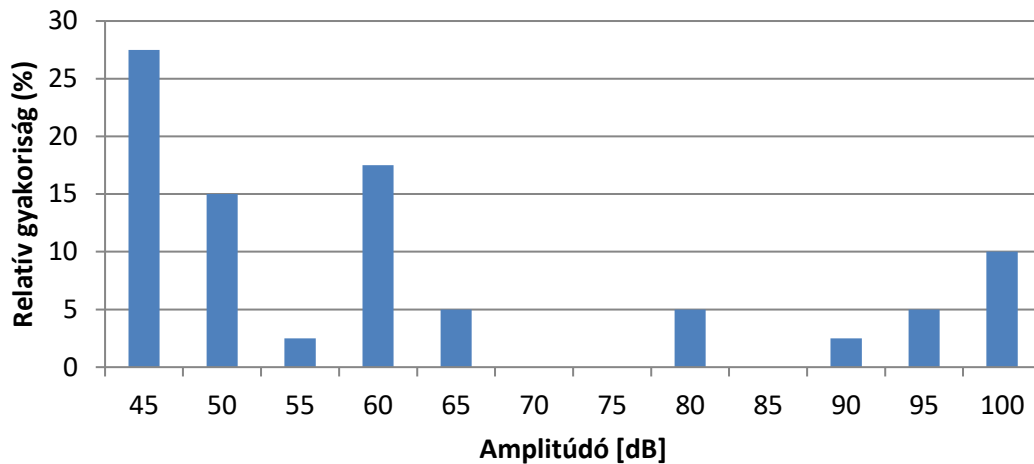
19. ábra: Gyanta próbatestek szakítóvizsgálatának eredménye

A mátrixrepedés jeleinek rögzítése a 4.1.2 fejezetben részletezett szakítóvizsgálat közben kerültek rögzítésre, a szakítógörbéket a 19. ábrán tüntettem fel. A fejezetben feltüntetett adatsorok a mérési sorozat egyik tagjának eredményei közül származnak.

A következő diagramon (20. ábra) a jelek amplitúdóját ábrázoltam az idő függvényében. A tönkremenetel során az amplitúdó mértéke 40-100 dB-ig terjedt, viszont túlnyomó többségük a 40-60 dB tartományba esett, ami a relatív eloszlást ábrázoló diagramon (21. ábra) is látható. A relatív gyakoriságot jelző oszlopok az adott 5 dB-es intervallumokhoz tartoznak (pl. 45-50 dB). A nagyobb amplitúdójú jeleket a próbatest globális tönkremenetelének közelében rögzítették a mikrofonok. A „Ch1” és „Ch2” a két mikrofon csatornáit jelölik.

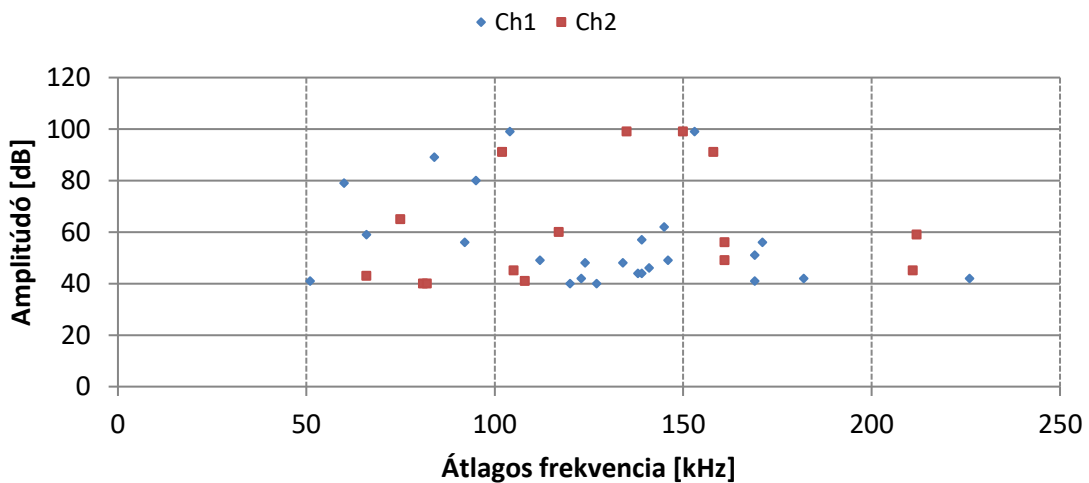


20. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának időbeli eloszlása

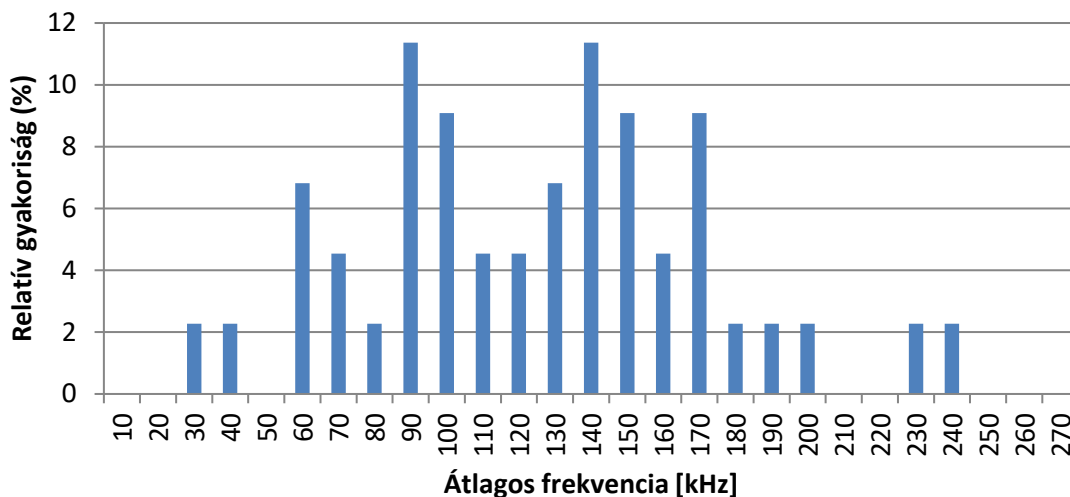


21. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának relatív eloszlása

Az amplitúdó mellett a frekvenciát is ábrázolom, ezt viszont egy más jellegű diagramon (22. ábra). Az amplitúdó ismeretében meghatározható, hogy a jelek milyen frekvenciatartományba esnek; ebben az esetben a jelek a 100-150/175 tartományba esnek, ezt a 23. ábrán látható relatív frekvencia eloszlás szemlélteti (a gyakoriságot jelző oszlopok 10 kHz-es intervallumokhoz tartoznak).

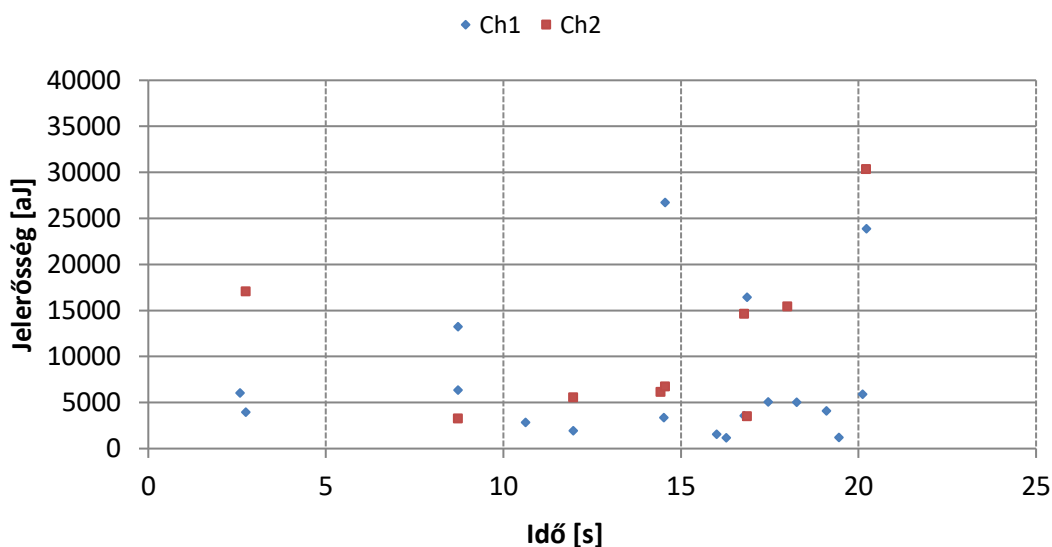


22. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdója a frekvencia függvényében

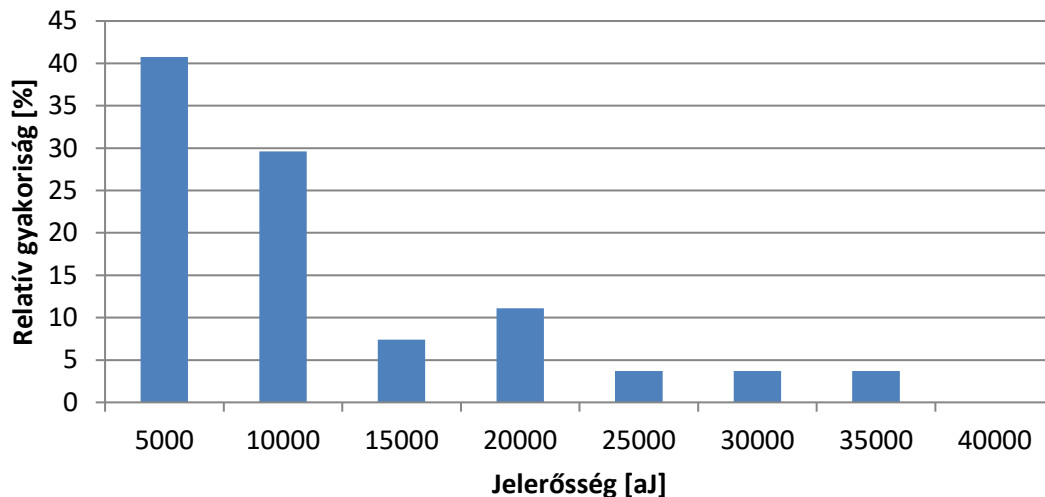


23. ábra: Mérés során rögzített jelek frekvenciájának relatív eloszlása

A jelerősséget az amplitúdóhoz hasonlóan egy időbeli (24. ábra) és egy relatív eloszlás (25. ábra) diagram szemlélteti. A relatív eloszlás diagramon a gyakoriságot jelző oszlopok 5000 aJ-os intervallumokhoz tartoznak. Látható az aránylag nagy szórás, 0-tól egészen 30000 aJ-ig terjed a jelek erőssége, több mint 70%-a 0 és 10000 aJ közé esik.



24. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének időbeli eloszlása



25. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének relatív eloszlása

A 6 db próbatest mérése során rögzített adatok alapján meghatározhatóak a mátrixrepedést jellemző jelek tulajdonságai:

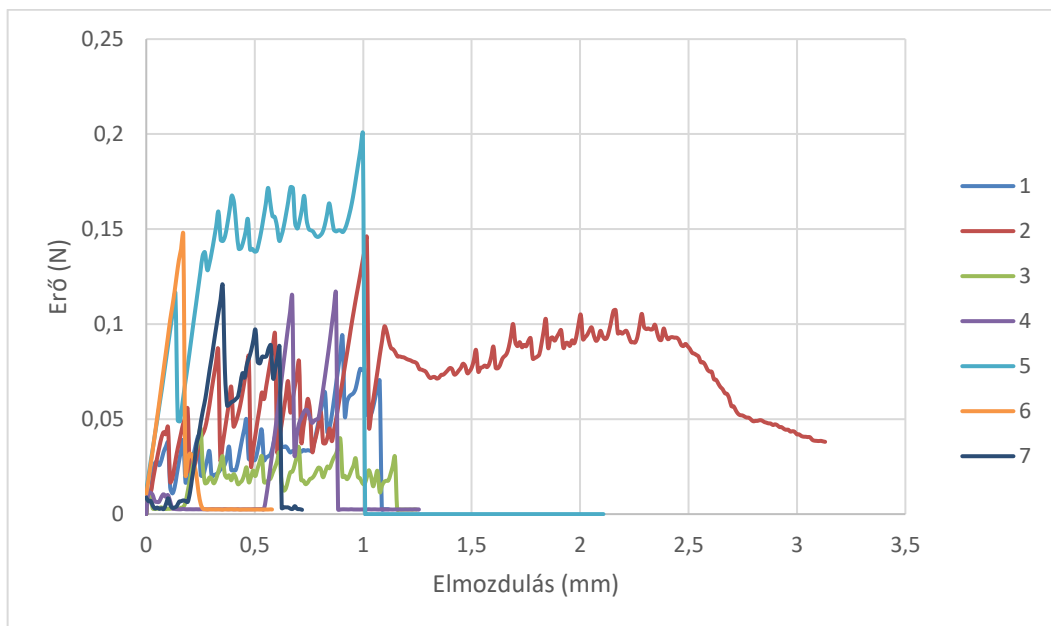
- Amplitúdó: 40-60 dB
- Frekvencia: 100-150 kHz
- Jelerősség: 0-30000 aJ

4.2.2. Szál-mátrix elválás

A szál-mátrix elválás AE jeleit a 4.1.1 fejezetben kifejtett csepplézés során rögzítettem. A mérés típusából adódik, hogy nagyságrendekkel kevesebb adat kerül feldolgozásra, mint a többi említett vizsgálat során.

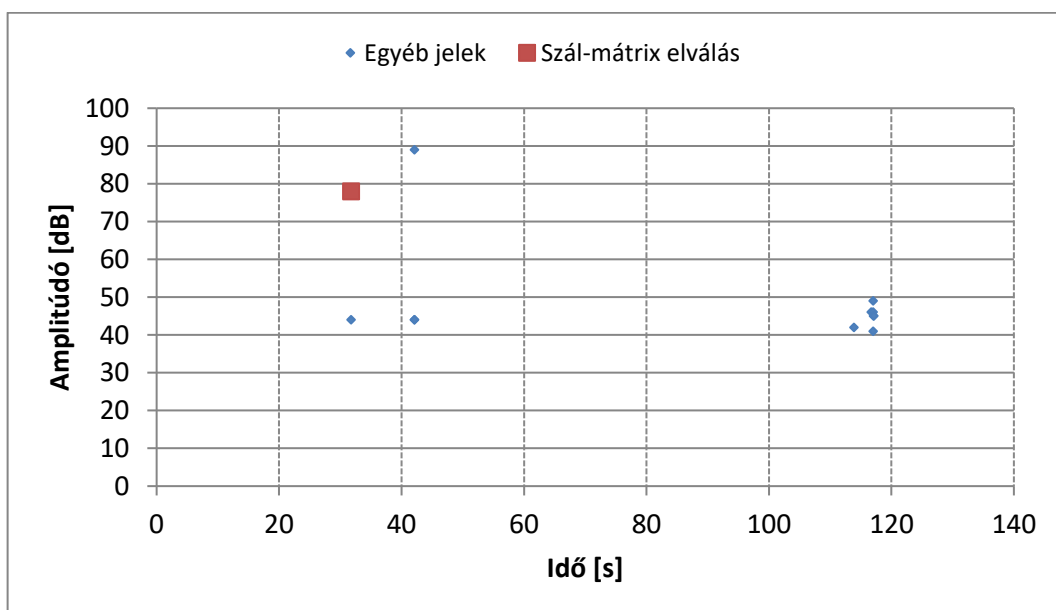
A kiértékelés során a mátrixelváláshoz tartozó jelet egy adott eseménynél az első rögzített pontnak vettem, a következő alacsonyabb amplitúdójú jeleket a súrlódásnak tulajdonítottam. Hasonló módon járt el Morlin [34] egy ugyancsak csepplézés vizsgálat kiértékelésében.

A kiértékelés azonos szempontok alapján folyt mindhárom tönkremeneteli mód esetében, a diagramok értelmezését a 4.2.1 fejezetben részletezem a mátrixrepedés példáján. A szál-mátrix elválás és rétegelválás esetében 1 mikrofonnal végeztem, ennek megfelelően az összes adat egy forrásból származik. A mérések erő-elmozdulás görbéi a 26. ábrán láthatóak.



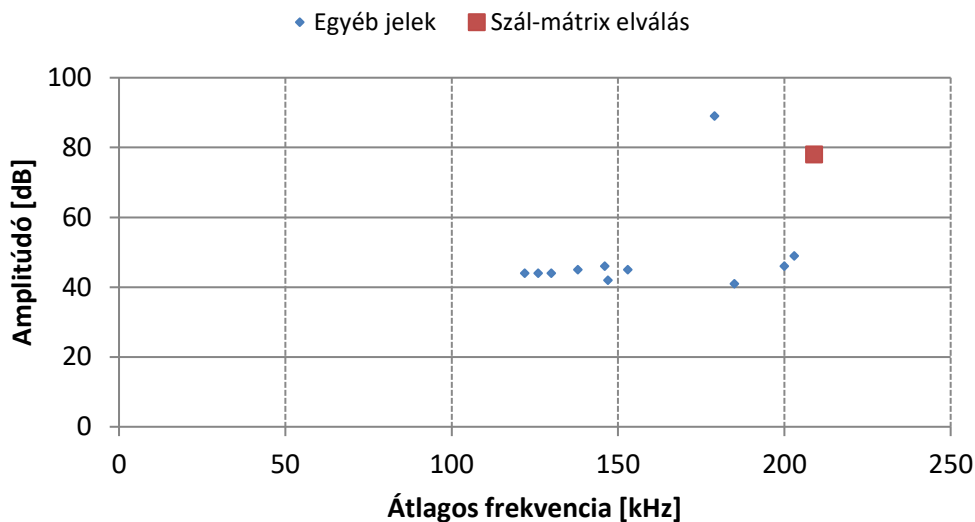
26. ábra: A csepplehúzás mérések erő-elmozdulás diagramjai

A mátrixrepedés vizsgálatával ellentétben a csepplehúzó méréseknél nem tartozik az összes jel azonos tönkremeneteli módhoz. A 26. ábrán látható erő elmozdulás görbéken az erő hirtelen beesését megelőzően szálszakadás következik be, valamint nem kizárt a pengék súrlódásából származó adatok jelenléte sem. A csepplehúzás sikerességét optikai mikroszkópos vizsgálattal igazoltam. A 27. ábrán két külön eseményt tudunk megkülönböztetni, 40 s és 120 s körül. Utóbbi a szálszakadáshoz tartozik, így az előbbi tekintjük szál-mátrix elválásnak, ezen belül az első rögzített jelet.



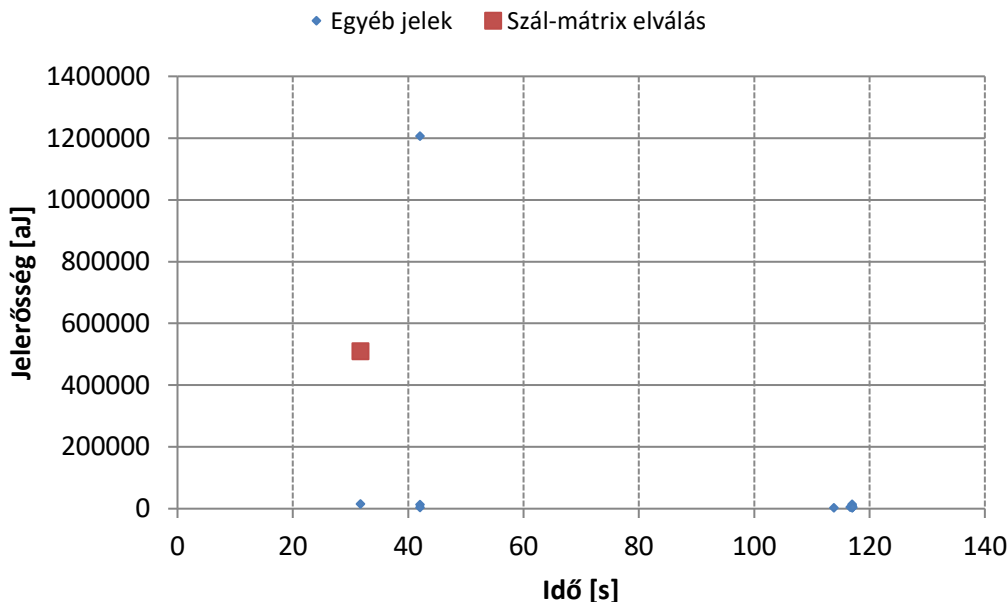
27. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának időbeli eloszlása

A jel amplitúdójának ismeretében a frekvencia is meghatározható. A 28. ábra szemlélteti a jelek amplitúdóját a frekvencia függvényében, ami alapján a hozzárendelés elvégezhető.



28. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdója a frekvencia függvényében

A jelek erőssége a 29. ábra alapján határozható meg. A szál-mátrix elválásnak tulajdonított jelek között rendkívül nagy szórást tapasztaltam, a határok a kiugró értékek elhanyagolásával születtek.



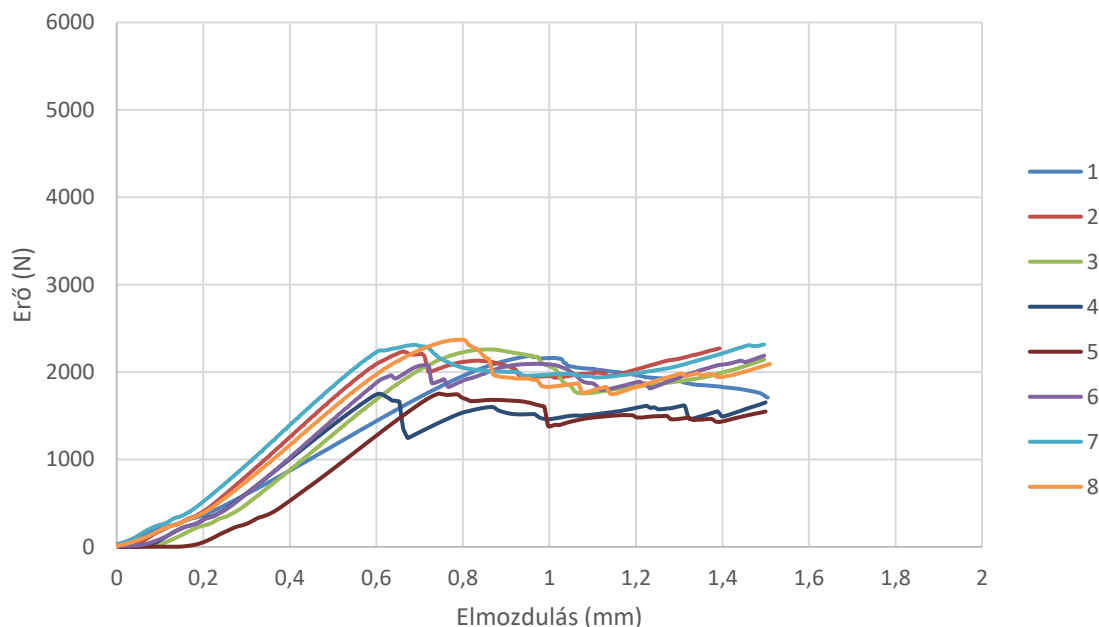
29. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének időbeli eloszlása

A rögzített adatok alapján meghatározhatóak a szál-mátrix elválást jellemző jelek tulajdonságai:

- Amplitúdó: 70-80 dB
- Frekvencia: 160-200 kHz
- Jelerősség: 200000-600000 aJ

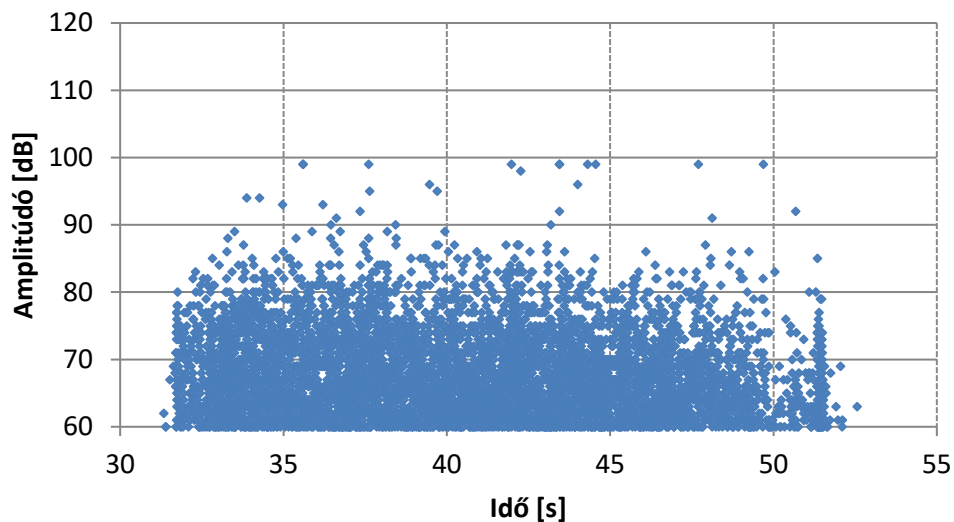
4.2.3. Rétegelválás

A rétegelválás eredményeit az eddigiekhez képest más szűrővel vizsgáltam. A kompozit próbatestben előfordul többek között a mátrixrepedés is, ami a rétegelválás vizsgálata során nem a vizsgálat tárgya. Ennek megfelelően a 40-60 dB közötti jeleket, nem vettem figyelembe a kiértékelés során. Emellett a kiértékelést leszűkítette a mérési diagram (30. ábra) alapján arra a tartományra, ahol az erő esése jelezte a rétegelválás jelenlétét.

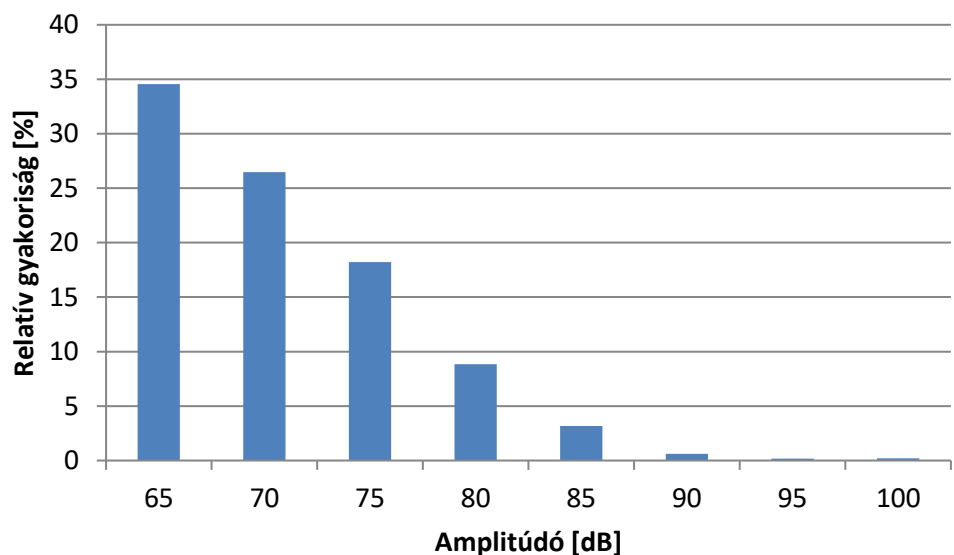


30. ábra: A rövid támaszközű 3-pontos hajlítás mérések erő-elmozdulás görbéi

A rétegelválás vizsgálata során rögzítettem a legtöbb jelet a három tönkremeneteli mód közül. A 31. ábrán látható adatsorból kiderül, hogy a 60-100 dB amplitúdójú jelek több mint 80%-a a 60-80 dB tartományban helyezkedik el (32. ábra). A relatív gyakoriságot jelző oszlopok 5 dB-es intervallumokhoz tartoznak.

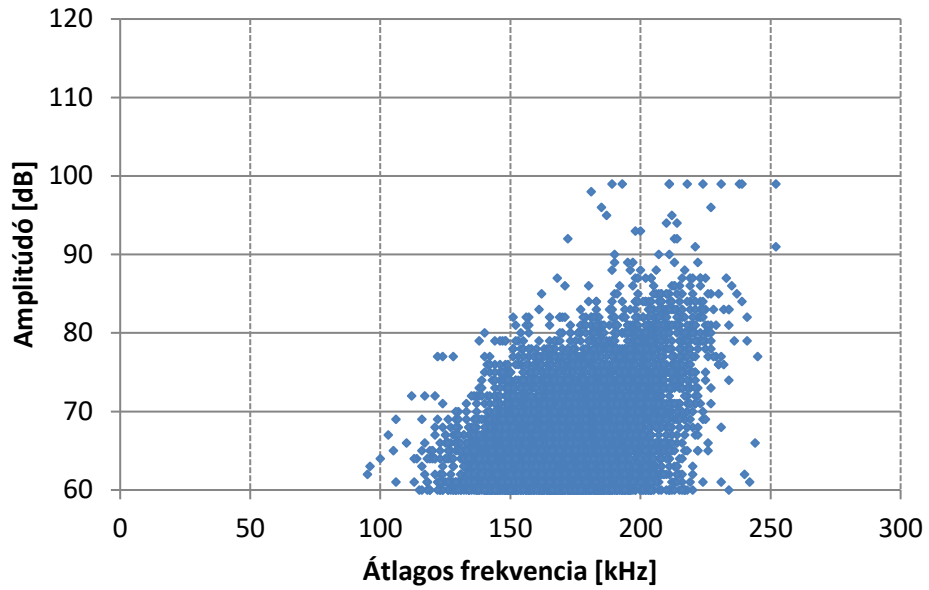


31. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának időbeli eloszlása

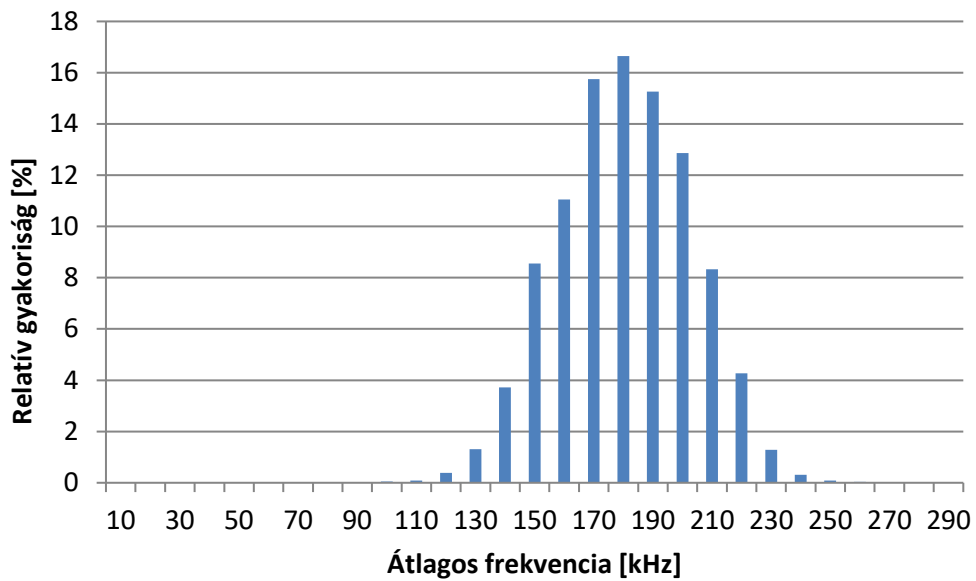


32. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának relatív eloszlása

A meghatározott amplitúdóhoz a 33. ábra alapján rendeltem frekvenciaértéket. A 60-80 dB amplitúdójú jelek a 125-225 kHz frekvenciatartományban mozogtak, ezt a 34. ábra szemlélteti. A gyakoriságot szemléltető oszlopok 10 kHz-es intervallumokhoz tartoznak.

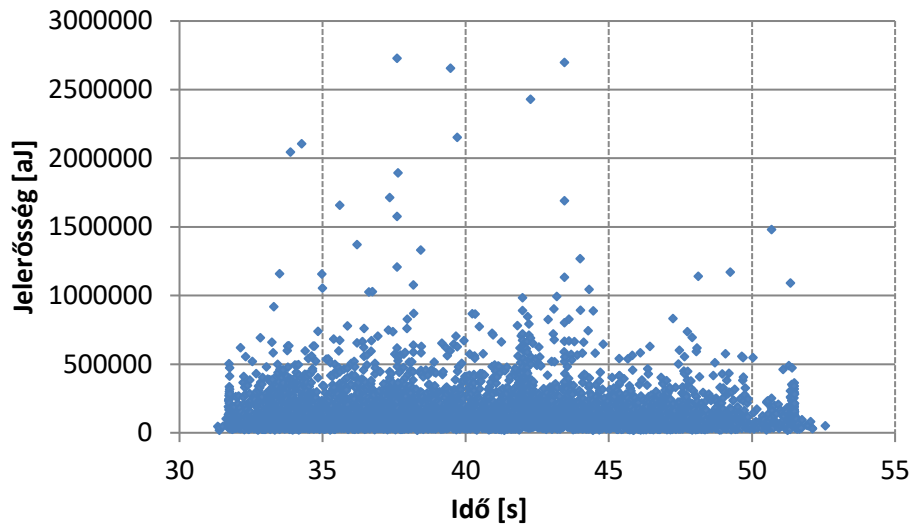


33. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdója a frekvencia függvényében

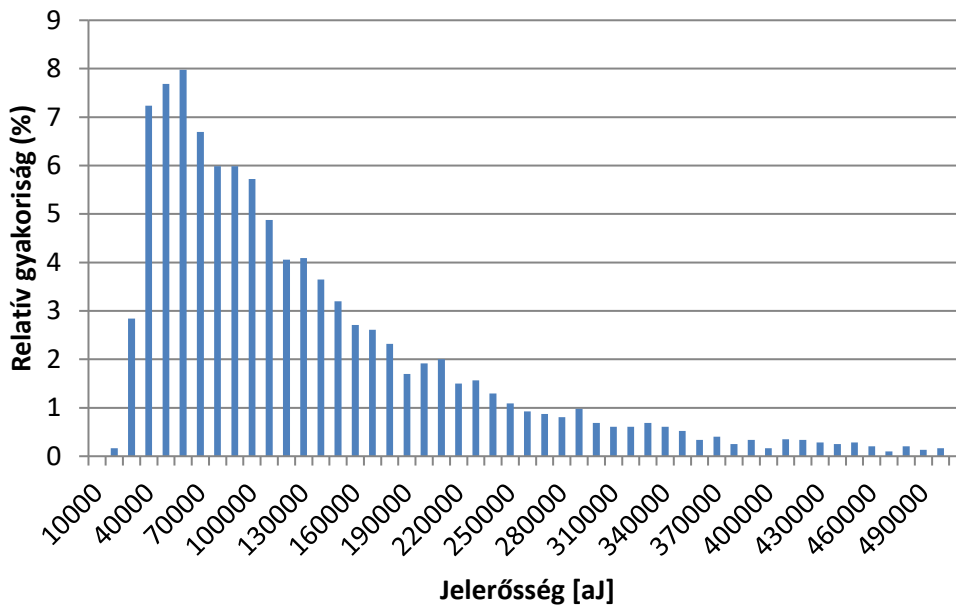


34. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének időbeli eloszlása

A 35. ábrán feltüntetett jelerősség diagramon és a hozzá tartozó relatív eloszlás diagramon (36. ábra) látszik, hogy a jelek több mint kétharmada 40000 és 200000 aJ erősségű. A gyakoriságot jelző oszlopok 10000 aJ-os intervallumokhoz tartoznak.



35. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének időbeli eloszlása



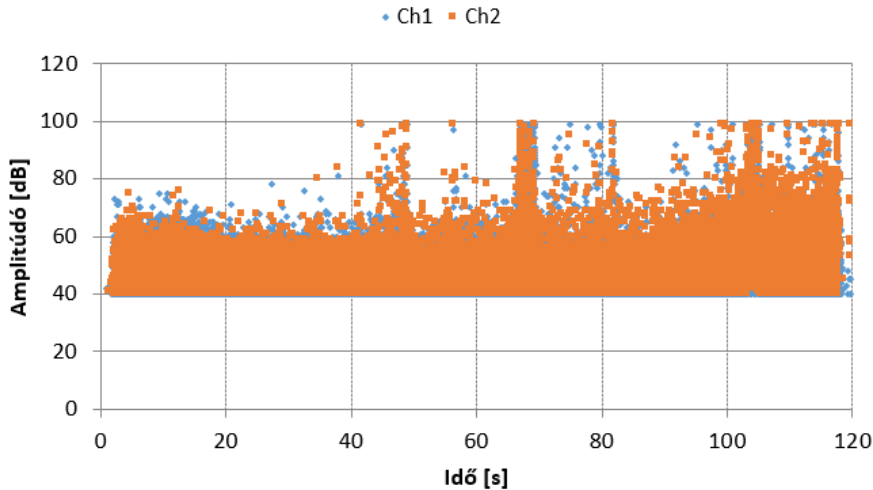
36. ábra: Mérés során rögzített jelek erősségének relatív eloszlása

A rövid támaszközű hajlítás mérések során rögzített rétegelválást jelző jelek tulajdonságai:

- Amplitúdó: 60-80 dB
- Frekvencia: 125-225 kHz
- Energia: 35000-200000 aJ

4.3. Kompozit próbatestek AE jeleinek károsodási módokhoz rendelése

A kompozit próbatest szakítóvizsgálata során több kompozitokhoz tartozó tönkremeneteli folyamat zajlik egyszerre, emiatt a szűrés nélkül, a nyers jeleket ábrázoló diagram (37. ábra) alapján önmagában nem tudunk következtetéseket levonni. Ami megállapítható, hogy 70 s és 105 s környékén a nagyobb amplitúdójú jelek gyakrabban jelennek meg.

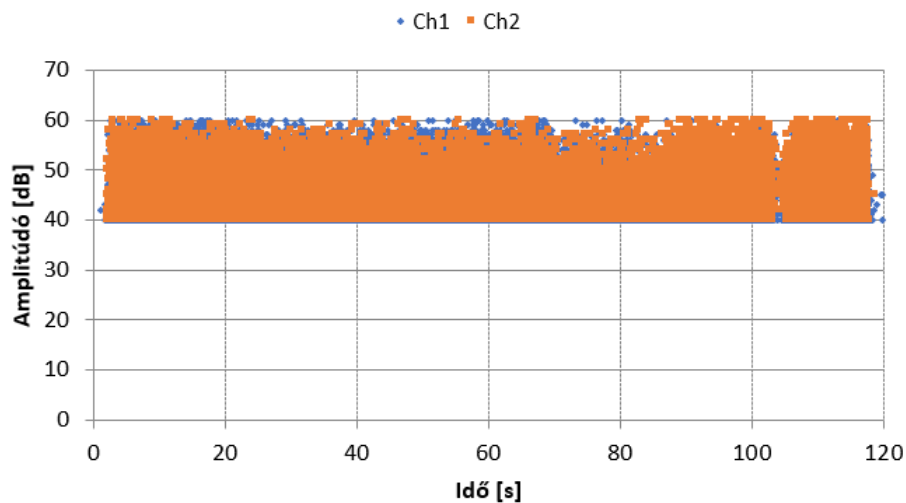


37. ábra: Mérés során rögzített jelek amplitúdójának időbeli eloszlása

Az adatsor szűrése után kiderül a tönkremeneteli módok bekövetkezésének ideje, valamint időtartama is. A következő fejezetek (4.3.1 - 4.3.3) a 4.2.1 - 4.2.3 fejezetekben meghatározott tulajdonságok alapján szűrt adatsor eredményeit mutatják.

4.3.1. Mátrixrepedés

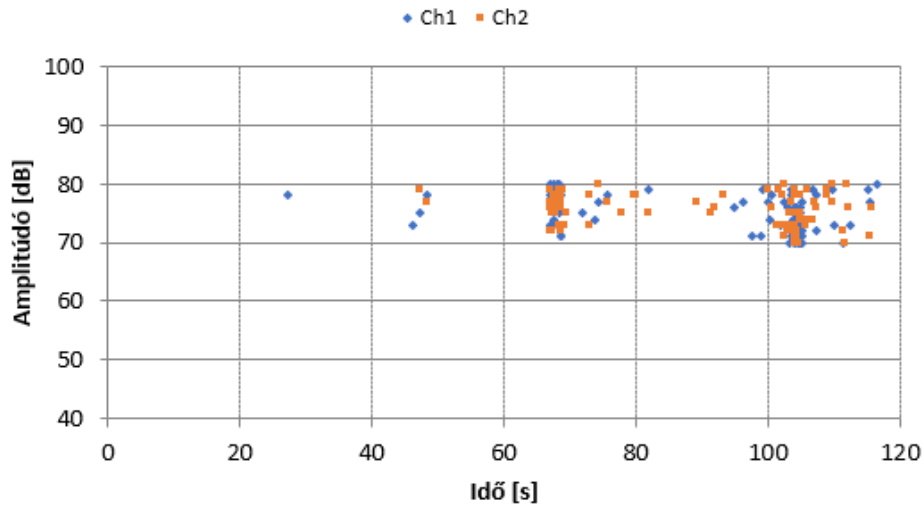
Az eredmények (38. ábra) alapján kimondható, hogy mátrixrepedés a folyamat során végig jelen van, a jelek sűrűsége a mérés során állandónak mondható.



38. ábra: Mátrixrepedés tulajdonságai alapján szűrt amplitúdó-idő diagram

4.3.2. Szál-mátrix elválás

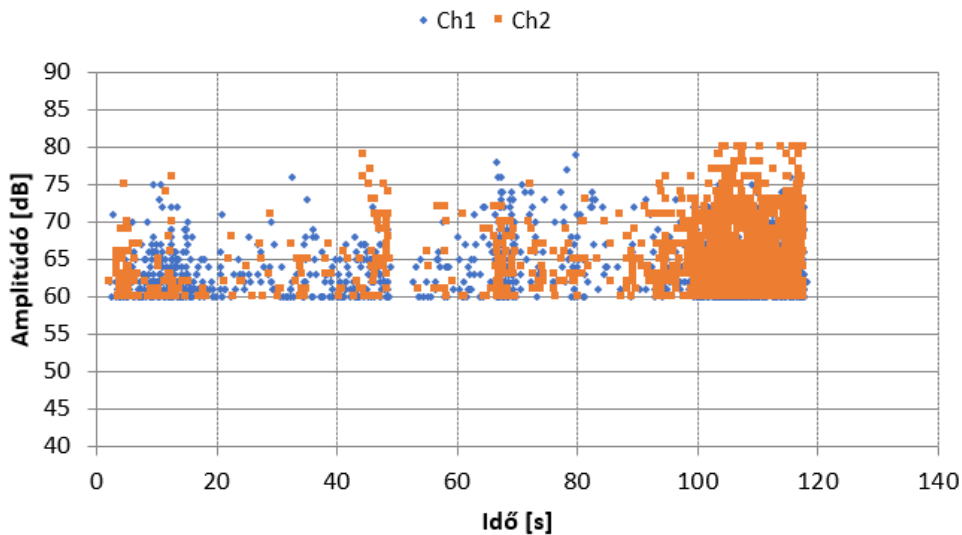
A 39. ábrán látható szűrt adatsor alapján megállapítható, hogy a szál-mátrix elválásra utaló jelek két helyen jelentek meg sűrűbben, 70 s és 105 s környékén. Ezt mutatja a szüretlen adatokat tartalmazó diagram (38. ábra) is.



39. ábra: Szál-mátrix elválás tulajdonságai alapján szűrt amplitúdó-idő diagram

4.3.3. Rétegelválás

A szűrt adatsor (40. ábra) alapján a rétegelválás tulajdonságaival rendelkező jelek a legnagyobb mennyiségben a mérés végén, 90 s és 120 s között jelennek meg.



40. ábra: Rétegelválás tulajdonságai alapján szűrt amplitúdó-idő diagram

4.3.4. Összegzés

A kiértékelések eredményeként kiderül, hogy a kompozit próbatest mérése során melyik károsodási mód mikor, illetve milyen mértékben fordul elő. A mátrixrepedés jelenléte adott mérés teljes időtartama alatt, míg a szál-mátrix elválás és a rétegelválás diszkrét időtartamokban jelennek meg nagyobb mértékben.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szálerősítésű kompozitok számos alkalmazási területen bírnak jelentőséggel kiváló fajlagos tulajdonságaiknak köszönhetően. Használatuk fő okai többek között merevségük, szilárdságuk, alacsony tömegük és kifáradással szembeni ellenállásuk. Népszerűségük főleg az ezeket a tulajdonságokat kihasználó területeken mutatkozik, erre példa az űripár, repülőgépipar és a motorsport.

Az eddig felsorolt tulajdonságok mellett a kompozitok használatának léteznek korlátjai, hátrányai is. A többfázisú anyagok esetében a tönkremenetel (és ezzel a méretezés) is összetettebb probléma, amelyre a tervezés során fokozott figyelmet kell fordítani. A keletkezett hibák kimutatása szintén körülményes, ezt a célt szolgálják a különböző roncsolásos – és roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások. Esetenként szükség van az alkatrész károsodás nélküli in-situ állapotfelügyeletére, amire a roncsolásmentes anyagvizsgálatok (Nondestructive testing, vagy NDT) kiválóan alkalmasak a roncsolásos anyagvizsgálati módszerekkel szemben. Az NDT vizsgálatok csoportján belül az optikai eljárások mellett az akusztikus hullám alapú és ultrahangos vizsgálatok, valamint a radiográfia a legnépszerűbbek.

Jelen dolgozat az akusztikus emissziós eljárás (Acoustic Emission, röviden AE) alkalmazhatóságának vizsgálatára helyezi a hangsúlyt. A kompozit anyagokra jellemző károsodási formák különböző energiájú és amplitúdójú jeleket bocsátanak ki, ami alapján egy AE eljárással lehetségessé válik a beazonosításuk, valamint a károsodás helyének meghatározása. A többfázisú kompozit anyag elemzésének előfeltétele külön-külön a szál és mátrix tönkremeneteli jeleinek vizsgálata, ami a szétválasztást segíti elő az összetett anyag vizsgálata során. A dolgozat keretein belül elvégzett mérések a területen eddig végrehajtott kutatásokat szolgálnak kiegészíteni, valamint tovább pontosítani a már meghatározott tönkremeneteli módokhoz kapcsolható jelek tulajdonságait. Ezeket a kutatási célokat az indokolja, hogy a tönkremeneteli módokhoz köthető jelekre jelenleg nem léteznek általánosan elfogadott határok, a különböző szakirodalmak eredményei eltérnek.

A kutatás során három különböző károsodási mód – mátrixrepedés, szál-mátrix elválás, rétegelválás – jeleinek vizsgálatával meghatároztam a rájuk jellemző tulajdonságokat és eszerint kerültek csoportosításra. A besorolás a jelek amplitúdója, frekvenciája és energiája alapján folyt. Végezetül egy kompozit próbatest terhelése közben kibocsátott jelek alapján beazonosítottam az említett károsodási módokat és megjelenésük pillanatát.

5.1. További megoldásra váró feladatok

A dolgozat folytatásaként szükséges az elemzett tönkremeneteli módokon kívül többek között a szálszakadás vizsgálata is. A kompozitok esetében jelentős szerepet játszik ez a jelenség, vizsgálatát elemi szálak szakításával lehet végezni. A jelek

tulajdonságainak pontosabb behatárolását segítené a jelek több paraméter alapján történő szűrése.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Czigány T.: Kompozit szerkezeti anyagok tönkremenetele, avagy a hal(l)hatatlan hangja. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest (2013).
- [2] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi, Budapest (2000).
- [3] Révész T.: Egyes kompozitok és a belőlük készült szendvicsszerkezetek tönkremeneteli formái. Repüléstudományi Közlemények, Budapest (2010).
- [4] Buragohain M. K.: Composite structures: Design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. CRC Press, Boca Raton (2017).
- [5] Breuer U. P.: Commercial aircraft composite technology. Springer Nature, Cham (2016).
- [6] Grellmann W., Seidler S. (Eds.): Polymer testing. Hanser, Munich (2013).
- [7] Raheem Z.: Composite materials handbook. Polymer matrix composites. Materials properties. CRC Press, Boca Raton (1999).
- [8] Bodor G., Vas L. M.: Polimer anyagtudomány. Műegyetemi, Budapest (1999).
- [9] Mathavan J. J., Hasan M. H., Franz G.: Modeling of Damage Evaluation and Failure of Laminated Composite Materials. in 'Structural Integrity and Monitoring for Composite Materials' (szerk.: Ariffin A. H.) Springer Nature, Singapore, 27-38 (2023).
- [10] Gholizadeh S.: A review of non-destructive testing methods of composite materials. Procedia Structural Integrity, **1**, 50-57 (2016).
- [11] Wang B., Zhong S., Lee T.-L., Fancey K. S., Mi J.: Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. Advances in Mechanical Engineering, **12**, 1-28 (2020).
- [12] Duchene P., Chaki S., Ayadi A., Krawczak P.: A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. Journal of Materials Science, **53**, 7915-7938 (2018).
- [13] Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier W.H.: Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications. Springer, Berlin (2009).
- [14] Melo C., Boccardi S., Carlomango G. M.: Infrared thermography in the evaluation of aerospace composite materials: Infrared thermography to composites. Woodhead Publishing, Cambridge (2015).
- [15] Francis D., Tatam R. P., Groves R. M.: Shearography technology and applications: A review. Measurement Science and Technology, **21**, 102001 (2010).
- [16] Fotouhi M., Suwarta P., Jalalvand M., Czel G., Wisnom R.M.: Detection of fibre fracture and ply fragmentation in thin-ply UD carbon/glass hybrid laminates using acoustic emission. Composites: Part A, **86**, 66-76 (2016).

- [17] Szebényi G., Czigány T., Vermes B., Ye X. J., Rong M. Z., Zhang M. Q.: Acoustic emission study of the TDCB test of microcapsules filled self-healing polymer. *Polymer Testing*, **54**, 134-138 (2016).
- [18] Aggelis D. G., Barkoula N. M., Matikas T. E., Paipetis A. S.: Acoustic structural health monitoring of composite materials: Damage identification and evaluation in cross ply laminates using acoustic emission and ultrasonics. *Composites Science and Technology*, **72**, 1127-1133 (2012).
- [19] Grosse C., Ohtsu M.: *Acoustic emission testing*. Springer, Berlin (2008).
- [20] Ronnie KM. *Handbook of nondestructive testing, Vol. 5. Acoustic emission*. 2nd ed. American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [21] Li L., Lomov S. V., Yan X.: Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading. *Composite Structures*, **123**, 45-53 (2015).
- [22] Huguet S., Godin N., Gaertner R., Salmon L., Villard D.: Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. *Composites Science and Technology*, **62**, 1433-1444 (2002).
- [23] Seeram E.: *Digital radiography physical principles and quality control*. Springer, Singapore (2019).
- [24] Mészáros I.: *Roncsolásmentes hibakereső anyagvizsgálati eljárások*. BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, 2017.
- [25] Szebényi G., Hliva V., Tamás-Bényei P.: Investigation of delaminated composites by DIC and AE methods. *Twenty-second International Conference on Composite Materials (ICCM22)*, Australia (2019).
- [26] Taljera R., Varna J.: *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*. Woodhead Publishing, Cambridge (2016).
- [27] Saeedifar M., Zarouchas D.: Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review. *Composites Part B*, **195** (2020).
- [28] Giordano M., Calabró A., Esposito C., D'Amore A., Nicolais L.: An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials. *Composites Science and Technology*, **58**, 1923-1928 (1998).
- [29] Liu P. F., Chu J. K., Liu Y. L., Zheng J. Y.: A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission. *Materials and Design*, **37**, 228-235 (2012).
- [30] Maillet E., Baker C., Morscher G. N., Pujar V. V., Lemanski J. R.: Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission. *Composites: Part A*, **75**, 77-83 (2015).
- [31] De Groot P. J., Wijnen P. A. M., Janssen R. B. F.: Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, **55**, 405-412 (1995).

- [32] Gholizadeh S.: A review of impact behaviour in composite materials. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 7, 2321-2071 (2019).
- [33] Marton G. Zs., Mezey Z. T., Czél G.: Prepregből autoklávban gyártott kompozit lemezek rétegeközi tulajdonságainak alakulása a térhálósítás során alkalmazott technológiai paraméterek függvényében. XXXI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, 354-359 (2023).
- [34] Morlin B., Czigány T.: Új módszer kifejlesztése a szál/matrix adhézió meghatározásához. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék, Budapest (2013).

7. MELLÉKLETEK

Sorszám	Szakítószilárdság (Mpa)	Szakadási nyúlás (%)	Rugalmassági modulus (Mpa)
1	38,7	1,98	27,1
2	31,6	1,55	25,5
3	38,9	1,66	27,6
4	30,5	1,48	26,0
5	35,7	1,58	26,6
6	34,5	1,69	24,4
Átlag	35,0	1,66	26,2
Szórás	3,5	0,18	1,2

M1. táblázat: Epoxi próbatetek mechanikai tulajdonságai

Sorszám	Palástátmérő1 (μm)	Palástátmérő2 (μm)	Csepphossz (μm)	Cseppátmérő (μm)	Max. erő (N)	Nyírófeszültség (Mpa)
1	9,66	10,35	82	66	0,05	19,40
2	6,56	6,56	80	63	0,095	57,62
3	9	9	51	37	0,045	31,21
4	9,68	10,03	111	93	0,115	33,46
5	9,66	11,05	166	137	0,168	31,11
6	10,7	10,1	140	115	0,147	32,14
7	8,63	8,63	129	108	0,12	34,31
Átlag	9,13	9,39	108,43	88,43	0,11	34,18
Szórás	1,30	1,49	39,89	34,79	0,05	11,48

M2. táblázat: Csepplehúzás próbatetek mechanikai tulajdonságai

Sorszám	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Max. erő (N)	Rétegek közötti szakítószilárdság (Mpa)
1	12,32	2,68	1708	38,8
2	11,98	2,83	2271	50,2
3	12,34	2,6	2319	54,2
4	12,18	2,3	1650	44,2
5	12,15	2,31	1550	41,4
6	12,1	2,73	2170	49,3
7	12,33	2,77	2315	50,8
8	12,37	2,87	2093	44,2
Átlag	12,2	2,6	2009,5	46,6
Szórás	0,1	0,2	321,1	5,3

M3. táblázat: Rövid támaszközű hajlító próbatetek mechanikai tulajdonságai

Sorszám	Szakítószilárdság (Mpa)	Szakadási nyúlás (%)	Rugalmassági modulus (Mpa)
1	1155	1,27	84561
2	854	0,95	80431
3	929	0,91	91025
4	957	1,11	75350
5	803	0,81	91278
6	978	1,09	81584
Átlag	946	1,03	84038
Szórás	122	0,17	6261

M4. táblázat: Kompozit próbatetek mechanikai tulajdonságai