



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

MAGYAR BALÁZS

*Okleveles gépészmérnök*

TERVEZHETŐ HATÁRFELÜLETI ADHÉZIÓJÚ POLIMER  
KOMPOZITOK FEJLESZTÉSE  
PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

Témavezető:

*Dr. Szabó Gábor*

Egyetemi Docens

BUDAPEST, 2023



## 1. BEVEZETÉS

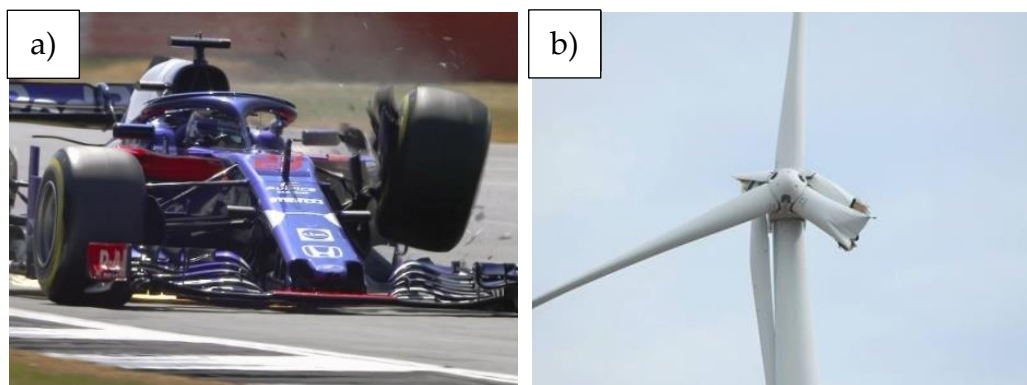
A kompozitokat az emberiség már az időszámítás kezdete előtt jól ismerte. Feljegyzések alapján az ókori Babilóniában, illetve Egyiptomban már megjelentek különböző kompozit termékek (vályogtéglá), amelyek követték azt az alap gondolatot, ami szerint egy-egy anyag számunkra kedvező tulajdonságát kombinálhatjuk, társíthatjuk [1]. Természetesen ezen korai kompozitok mechanikai tulajdonságai, élettartama nagyságrendekkel elmarad a ma használt nagyteljesítményű kompozit termékektől.

A polimer kompozitokat elsőként a hadiipar kezdte el alkalmazni a második világháború idején. A háború során megnövekedett az igény, hogy az eddigiektől eltérő új alapanyagokat is felhasználjanak különböző harcászati eszközök elkészítése során. Az Egyesült Királyságban a Spitfire repülőgépek törzsét alumíniumból készítették, viszont a csökkenő alumínium készletek miatt elkezdtek lenszál erősítésű polimer kompozitot is használni prototípusok gyártása során. A hadiipar után az autóiparban is megjelentek a polimer kompozit alkatrészek különböző sportautóknál, közvetlen a II. háborút követő években, sok esetben még ekkor üvegszál erősítést alkalmazva. A szénszál erősítésű polimer kompozit a motorsportban először a 1981-es idényben jelent meg, a McLaren Forma 1-es csapat fejlesztésének köszönhetően. A fő szempont a megfelelő biztonság elérése volt minimális tömeg mellett. A biztonság fejlődését jól mutatja, hogy a kompozitok használatával a halálos kimenetelű balesetek száma drasztikusan csökkent a sportban azok bevezetése után [2]. Napjainkban már a kompozit termékek, beleértve a nagyteljesítményű szénszál erősítésű anyagokat is, az élet legtöbb területén megtalálhatóak, repülőgépekben, személygépjárművekben, sportfelszerelésekben, gyógyászatban, valamint az építőiparban is [1, 3-5]. Ennek oka, hogy a szénszállal erősített kompozitok használatával a sűrűség tovább csökkenthető, ennek köszönhetően egyes területeken a szerkezeti acélok is kiváltásra kerültek kompozit alkatrészek által [6].

A szénszál erősítésű polimer kompozit anyagok használatát azonban korlátozza, hogy törékemenetelük során rideg viselkedést mutatnak, minimális szívós viselkedés mellett. Általában egy anyagot szívósabbnak nevezünk, ha az a törékemenetele elérése előtt jelentős deformációs képességet mutat, ezzel a rendszer energiaelnyelő képességét növelve. A mérnöki tudományokban az anyag, repedés terjedéssel szemben vett ellenállását, valamint annak energiaelnyelő képességét értjük szívósság alatt. A szívós tulajdonságokkal rendelkező anyagok nagyobb deformációra és ezáltal nagyobb energiaelnyelésre képesek, mint a ridegen viselkedő társaik. Amíg a fémeknél jellemzően egy fokozatos törékemenetel figyelhető meg (természetesen igénybevételtől függően rideg törés is megjelenhet), addig a szénszál polimer kompozitoknál előjelek nélküli, katasztrófális, rideg törékemenetel a jellemző.

Miért is fontos a szívósság? Az 1. ábra a) jelű részén a Formula 1 2018-as brit futamának szabad edzésén készült kép látható, amely során a versenyautó első

felfüggesztése eltört a hirtelen fellépő túlterhelésnek köszönhetően. Látható a nagy energiafelszabadulással járó tönkremenetel, a lengőkarok a hirtelen bekövetkezett nagy terhelésnek köszönhetően szinte azonnal szétrobbantak. Ennek eredményeképpen a pilótának a felmerülő hibára nem volt lehetősége reagálni. Ez a viselkedés az 1. ábra b) jelű képen is megfigyelhető, ahol egy szélturbina lapátjának tönkremenetele látható. Itt azonban már részben szívósabb törés figyelhető meg, az alkalmazott több komponensű erősítésnek köszönhetően, a szénszálal erősítés mellett üvegszálal erősítést is alkalmaztak. A szívósabb jellegű viselkedésnek köszönhetően a szerkezet strukturális integritása nagyobb deformációs szinten is megtartható, ezzel növelve a rendszer megbízhatóságát.



1. ábra a) Formula 1-es autó felfüggesztésének törése a túlterhelésnek köszönhetően; b) Szélturbina törött lapáttal [7, 8]

Az értekezésem célja egy olyan eljárás kutatása és vizsgálata, amely segítségével a kompozitok károsodási folyamata kedvezőbbé, szívósabbá tehető, a katasztrofális tönkremenetel elkerülésével, növelve a rendszer megbízhatóságát. A kutatás céljának azt tűztem ki, hogy egy újszerű szívósítási eljárást fejlesszek ki. A munka első lépése során egy általános irodalmi áttekintés segítségével ismerttettem az eddigiekben is alkalmazott módszereket kompozitok szívós viselkedésének elérésének témakörében, majd az eddigi eredmények alapján kijelöltem a kedvezőnek tűnő kutatási irányokat. A kutatómunka során megvizsgáltam az általam alkalmazott módszer létjogosultságát, az előzetesen felállított hipotéziseimet próbáltam igazolni. Az értekezésemet végül a kutatómunkám során felállított tézisekkel zártam.

## 2. SZAKIRODALOM ELEMZÉSE ÉS CÉLKITÚZÉS

A szakirodalmi áttekintésből is jól látszik, hogy a kompozitok szívós viselkedésének javításával, annak előidézésével már évtizedek óta foglalkoznak a kutatók, kezdve a hibrid erősítések alkalmazásával. A témában jelentős áttörést azóta sem sikerült elérni, annak ellenére, hogy a hibrid erősítés mellett már több módszert is mélyen kutattak az évek folyamán. Mindegyik esetben a szívós viselkedés elérésnek érdekében a kompozit mechanikai tulajdonságaiból áldozni kell. Ez legtöbb esetben annak szilárdsága, vagy modulusa.

A legtöbb esetben a kutatások átfogó szinten vizsgálják a termoplasztikus anyag és térhálós anyag között kialakuló kapcsolatot. A kialakuló szerkezetet pár esetben 3D nyomtatás segítségével akár strukturálni is lehet. Ennek lehetőségét és az ott kialakuló szerkezetet és annak határfelületre gyakorolt hatását ezért mindenféleképpen vizsgálni érdemes. A szívós viselkedést ebben az esetben a termoplasztikus réteg szívósabb jellegű viselkedése eredményezheti, illetve, ahogy több kutatás is bemutatta, annak határfelületi nyírószilárdságra gyakorolt hatása is segítheti.

A szívós viselkedés elérésére több lehetőség is adott az irodalomban. A kutatások az alkalmazott módszereket tekintve osztályozhatók, aszerint, hogy a kompozit melyik fázisának módosításával érték el a szívósabb jellegű viselkedést. Az erősítő struktúra módosításának esetében a legtöbb irodalom hibridizáció segítségével érte el a szívósabb jellegű viselkedést (szénszálak mellé nagyobb deformációs képességgel rendelkező szálak társítása). Másik lehetőség a gyantarendszer szívósítása adalékokkal. Itt további két alcsoportra lehet bontani a módszert, gumi- és termoplasztikus adalékok alkalmazására. Az adalékok segítségével a repedésterjedés változtatható, valamint a mátrix deformációs képességét is növelni lehet. A másik lehetőség a köztes-rétegek alkalmazása a szívósabb viselkedés elérésének érdekében. A köztes-rétegek esetében több megoldás is megjelent, amelyek az alkalmazott anyagokat tekintve is sokszínűek voltak. Az erősítőrétegek közé elhelyezett rétegek geometriája is fontos szerepet játszott bizonyos kutatások során, amely nemcsak a köztes-rétegek esetében volt fontos paraméter (nyomtatott rétegek közti anyagok), hanem a szálak folytonosságának megszakításával élő eljárások esetében is. Továbbá számos kutatás foglalkozott egymásba hatoló polimer hálózatú mátrixokkal, amelyek segítségével érték el a kívánt szívósabb viselkedést. Ebben az esetben számos cikkben a megjelenő IPN rendszer valódi mivolta nem volt vizsgálva, feltehetően számos esetben csak blendek jelentek meg, ahol a fázisok képesek voltak jól együttműködni, ezzel a hibrid hatás minimálisan képes is volt megjelenni. A kettős folytonos fázisszerkezet azonban sok esetben már nem volt vizsgálva.

A károsodott kompozit elemek javítási lehetősége is különösen kutatott tématerületté vált az elmúlt évek során. Látható, hogy erre több megközelítés is létezik. Osztályozásukat tekintve beszélhetünk külső beavatkozást nem igénylő és beavatkozást igénylő módszerekről. Utóbbi esetében szükséges valamilyen aktiválási energia a javítás létrehozásához. Ez legtöbb esetben hő, amit bizonyos esetekben

nyomással társítottak a kutatók. A témában egy alapvető alapelv mindegyik kutatásnál azonos volt, ez az alkalmazott hőmérséklet, aminek a termoplasztikus réteg  $T_m$ -je felett kell lennie, de az alkalmazott gyantarendszer  $T_g$ -je alatt. Ezen kívül a tématerületben fontos lehet meghatározni a szükséges időt, illetve a javítás során alkalmazott nyomás hatását a gyógyítási időre. A gyógyulási folyamat modellezésével egy optimális idő meghatározható és hiánypótló lenne, ezért ennek a folyamatnak a leírását is célként tűztem ki

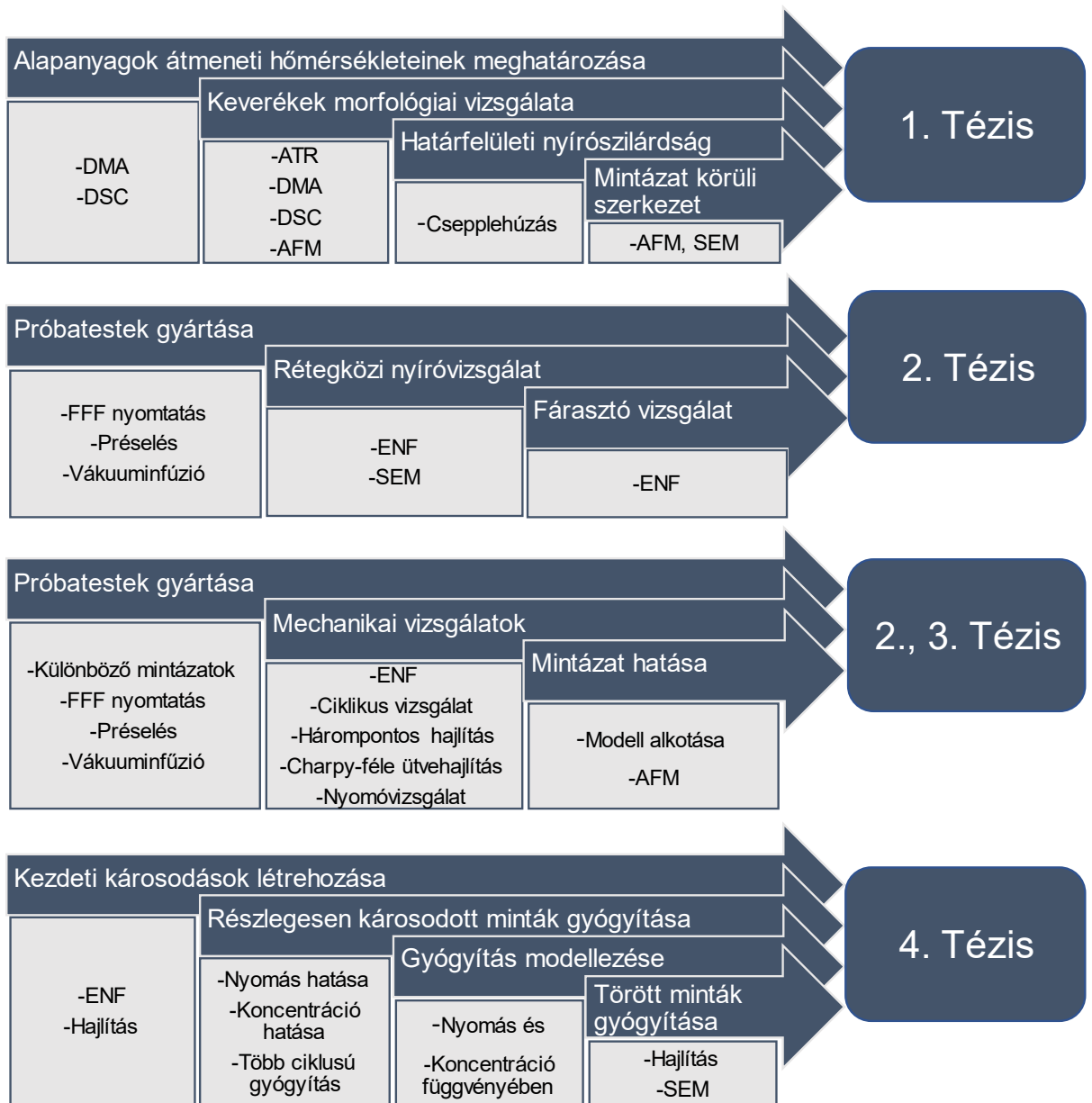
Termoplasztikus anyaggal ellátott szénszálas/epoxigyanta rendszerek esetében tehát egyidejűleg elérhető a szívósabb viselkedés, illetve a terhelések hatására bekövetkező károsodások javítása. Ezért kutatómunkám során termoplasztikus anyaggal társított rendszerek hatását vizsgáltam a kompozit rendszer viselkedésére több szempontot is figyelembe véve. A termoplasztikus anyag hozzáadásával azonban nem csak a szívós viselkedés változik meg, hanem a kialakuló fázisszerkezet, ezzel a határfelületen fellépő kapcsolat is, amelyek megismerése fontos alapot adott kutatásomban, illetve hiánypótló is az irodalomban.

A fent leírtak alapján az alábbi célokat határoztam meg a kutatásomhoz:

- Határfelületi nyírószilárdság tervezhető változtatása a határréteg változtatásával a szálak hosszának mentén termoplasztikus adalékanyag alkalmazásával, amely segítségével szál-mátrix és réteg-réteg közti tulajdonságmódosítás léphet fel.
- Különböző rétegek közti anyagkoncentrációk vizsgálata a törési szívósságra.
- Különböző mintázatú termoplasztikus rétegekkel létrehozott kompozitok vizsgálata.
- Gyógyítás/javítás paramétereinek mélyebb vizsgálata, amely során a gyógyítási hatékonyság változását vizsgálnám az alkalmazott nyomás és koncentráció függvényében.

Kutatómunkám hipotézise az volt, hogy 3D nyomtatás segítségével strukturált PCL és epoxigyanta között tervezhetően megjelenhet az IPN-eknél is előforduló hibridizációs hatás, amely segítségével a kompozitok szívós viselkedése javítható. Továbbá a termoplasztikus anyag segítségével a szívósítás mellett a károsodott kompozitok javítása is megvalósítható, ahol a javítási paramétereket optimalizálni lehet.

A kutatómunka során megfogalmazott téziseket és az ezekhez vezető utat a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra Az értekezés során elvégzett kutatómunka és a megfogalmazott tézisek kapcsolata

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK, ALKALMAZOTT STATISZTIKAI MÓDSZEREK

A fejezetben bemutatom a kutatás során a kompozitok gyártásához felhasznált alapanyagokat és a gyártás során alkalmazott berendezéseket. A második alfejezetben továbbá bemutatom azon berendezéseket, amelyeket a minták vizsgálatánál használtam fel.

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

##### **Erősítő struktúra**

- PX35 FBUD300 (Zoltek Zrt., Nyergesújfalu, Magyarország) unidirekcionális (UD) szénkelme (felületi sűrűség: 309 g/m<sup>2</sup>), Panex35 50k-s rovingokat tartalmaz, átlagos szálátmérő 8 μm.
- Sigratex KDK 8042 (SGL Technologies GmbH., Meitingen, Németország) biaxiális szénszövet (felületi sűrűség: 200 g/m<sup>2</sup>), epoxigyantához írezve, 3k-s rovingokat tartalmaz, átlagos szálátmérő 8μm.

##### **Mátrix anyagok**

- IPOX ER 1010 (IPOX Chemicals, Budapest, Magyarország) biszfenol-A-diglicidil-éter (DGEBA) gyanta (viszkozitás 25 °C-on 10000–14000 mPa·s) és IPOX MH 3111 (IPOX Chemicals, Budapest, Magyarország) (hexahidro-4-metilftálsav-anhidrid) anhidrid típusú térhálósító (2,4,6-trisz(dimetilaminometil)fenol katalizátorral), viszkozitás 25 °C-on: 80–120 mPa·s. Keverési tömegarány 100:75. A térhálósítást 90 °C-on 3 órán keresztül végeztem.
- IPOX MR 3012 (IPOX Chemicals, Budapest, Magyarország) alifás epoxigyanta (viszkozitás 25 °C-on 160–200 mPa·s) és IPOX MH 3122 amin-bázisú térhálósító komponens (viszkozitás 25 °C-on 80–120 mPa·s). Keverési tömegarány 100:35. A térhálósítást 90 °C-on 3 órán keresztül végeztem.

##### **Rétegeközi anyag – Köztes-réteg**

eMorph175N05 emorph filament (Esun Industrial Co., Ltd., Shenzhen, Kína), kiserelés 0,5 kg/tekerccs; filament átmérő: 1,75 mm, PCL. A filament nyomtatási hőmérséklete 180 °C (T<sub>m</sub>≈65 °C).

## 3.2. Alkalmazott berendezések

### FFF nyomtató

- CraftBot Plus (CraftUnique Kft., Budapest, Magyarország). Munkatér mérete 250x200x200 mm, nyomtatási sebessége 50-200 mm/s, fúvóka mérete 200  $\mu\text{m}$ . 100-300  $\mu\text{m}$  rétegvastagság nyomtatására, valamint 1,75 mm-es szálátmérő befogadására alkalmas berendezés.
- CraftBot 3 (CraftUnique Kft., Budapest, Magyarország). Munkatér mérete 374x250x250 mm, nyomtatási sebessége 50-200 mm/s, fúvóka mérete 200  $\mu\text{m}$ . 100-300  $\mu\text{m}$  rétegvastagság nyomtatására, valamint 1,75 mm-es szálátmérő befogadására alkalmas berendezés.

### Térhálósítás során alkalmazott szárítószekrény

- UT20 (Heraeus Holding GmbH, Hanau, Németország). Hőmérséklettartomány 25-250 °C, hőntartási pontossága  $\pm 2$  °C, belső tér mérete 580x670x500mm.
- Despatch LBB2-27-1CE (Despatch Industries, Lakeville, USA). Hőmérséklettartomány 25-100 °C, hőntartási pontossága  $\pm 4$  °C, belső tér mérete 940x890x940 mm.

### Univerzális anyagvizsgáló gép

- Zwick Z005 (Zwick, Ulm, Németország) anyagvizsgáló berendezés. Vizsgálati sebességtartománya 0,001-600 mm/perc. A vizsgálatok értékeléséhez Zwick TestXpert II 3.41 programot használtam. A vizsgálatok során hárompontos hajlító feltétet alkalmaztam.
- Zwick Z050 (Zwick, Ulm, Németország) anyagvizsgáló berendezés. Vizsgálati sebességtartománya 0,001-600 mm/perc. A vizsgálatok során becsapódás utáni nyomóvizsgálathoz kialakított feltétet alkalmaztam. A vizsgálatok értékeléséhez Zwick TestXpert 10.11 programot használtam.
- Zwick Z250 (Zwick, Ulm, Németország) anyagvizsgáló berendezés. Vizsgálati sebességtartománya 0,001-600 mm/perc. A próbatestek gyógyítása során hőkamrát alkalmaztam, mérési hőmérséklettartománya -70 – 250 °C. A vizsgálatok értékeléséhez Zwick TestXpert II 3.41 programot használtam.
- Instron 8872 (Instron, Norwood, USA) fásasztógép. Vizsgálati sebességtartománya 0,001-1000 mm/perc, maximális terhelőerő 25000 N. A vizsgálatok kiértékeléséhez Single Axis Max programot használtam.

### Optikai nyúlásmérés

Mercury Monet (Sobriety, Kurim, Csehország). A nyomóvizsgálatok során 2 db 5 megapixel (Mpixel) felbontású, 60 Hz képrögzítési frekvenciára alkalmas

kamerát alkalmaztam. Az eredmények értékeléséhez Mercury RTv2.6 programot használtam.

### Dinamikus vizsgálatok

- Resil Impactor Junior (Ceast, Torino, Olaszország). Charpy-féle ütve hajlító kialakítással, 15 J-os kalapácsot alkalmazva. A vizsgálatok során műszerezett mérést végeztem, amely segítségével az anyagok törési viselkedése mélyebben értelmezhető.
- Ceast Fractovis 9350 (Instron/Ceast, Torino, Olaszország). Műszerezett ejtődárdás ütőműves mérésekre. Terhelés változtatható tömege 2-70 kg; dárdaátmérő 10, 20 mm; ejtési magasság 1 m; vizsgálati hőmérséklet -70-150 °C.

### Mikroszkópia és morfológia

- DSC Q2000 (TA Instruments, New Castle, USA). Hőmérséklettartomány: -90-400 °C.
- DMA Q800 (TA Instruments, New Castle, USA). Hőmérséklettartomány: -145-550 °C, frekvenciatartomány 0,01-200 Hz, maximális terhelés: 18 N.
- FlexAFM 5 (Nanosurf, Liestal, Svájc) atomerő-mikroszkóp. Pásztaázható terület 100x100 µm; z-irányú maximális mélység 10 µm, Tap-190AI-G típusú tű, átmérője <10 nm. Rezonanciafrekvencia 190 kHz.
- Olympus BX51M (Olympus, Hamburg, Németország) optikai mikroszkóp. Nagyítás: 2,5-100x. A felvételeket OLYMPUS Stream Motion képfeldolgozó program segítségével értékeltem.
- GOM ATOS Core 5M (Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH, Braunschweig, Németország) 3D szkennerek.
- Keyence IM-7020 (Keyence Corporation, Oszaka, Japán) optikai mikroszkóp. Szenzor: 1" 6.6 Mpixel monochrome CMOS; mérési terület 200 mm×200 mm; ismétlési pontosság: ±2 µm; mérési pontosság: ±5 µm; XY síkban a mozgási tartomány: 100 mm x 100 mm; magasságirányú mozgás tartománya 75 mm.
- Bruker Tensor 37 (Bruker, Billerica, USA) Fourier-transzformációs infravörös spektroszkóp (FTIR) berendezés. 16-szoros mintavételezés, hullámhossztartomány 4000-600 cm<sup>-1</sup>, továbbá Specac ATR (többszörösen gyengített teljes reflexiós) IR fejeget is alkalmaztam (ATR).

### 3.3. Vizsgálati módszerek

#### Hárompontos hajlító vizsgálat

MSZ EN ISO 14125-ös szabvány szerint végeztem a méréseket. Szádirányra merőleges terhelés során 80 mm alátámasztási távolság és 5 mm/perc vizsgálati sebesség mellett vizsgáltam a kompozitok viselkedését. A vizsgálatok során a szabványnak megfelelő 120x15 mm-es kialakítású próbatesteket alkalmaztam. A vizsgálatokat Zwick Z005 univerzális anyagvizsgáló berendezésen végeztem hárompontos hajlító feltétellel.

#### Ütve hajlító vizsgálat

MSZ EN ISO 179-2-es szabvány szerint végeztem a méréseket. A műszerezett ütővizsgálat segítségével a kompozitok hirtelen ütésszerű behatás elleni ellenállóképességet vizsgáltam 62 mm-es távolságban alátámasztott próbatesteken, 15 J energiájú, 3,7 m/s becsapódási sebességű, lapirányú ütés mellett. Az ütésszilárdság vizsgálat folyamán az anyag energiaelnyelő képessége vizsgálható, vagyis az adott anyag szívóssága. Ez az ütés során felemészített energia segítségével állapítható meg. A Charpy-vizsgálathoz 80x10 mm-es próbatesteket alkalmaztam.

#### ENF vizsgálat

ASTM D7905-ös szabvány alapján végeztem el a vizsgálatokat 3 pontos hajlító elrendezésben. A mérés segítségével a termoplasztikus anyag rétegek közti tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltam meg. A kezdeti hiba létrehozásához teflon fóliát (PTFE-Poli(tetrafluor-etilén) alkalmaztam, amelynek vastagsága 2  $\mu\text{m}$  (Airtech International Ltd., California, USA). A vizsgálati sebesség 5 mm/perc, az alátámasztás távolsága 120 mm volt. A próbatestek szélessége 25,4 mm, hosszúsága 163 mm volt. A méréshez használt próbatestek oldalán 1 mm-es osztásközönként jelzések voltak felfestve a kiértékelést elősegítve. A mérésekről videófelvételt készítettem a tönkremenetel pontos nyomon követése érdekében Nikon 600D típusú digitális kamerával. A kamera másodpercenként 60 fotót készített.

#### Fárasztó vizsgálat

ENF vizsgálatnak megfelelő próbatesteken végeztem a fárasztó méréseket három pontos elrendezésben. A vizsgálat célja a kompozitok hosszútávú ellenállóképességének vizsgálata. A vizsgálati frekvencia 5 Hz volt.

### Differenciális pásztázó kalorimetria

A különböző tömegarányú epoxigyanta-PCL keverékeken DSC vizsgálatokat végeztem Q2000 típusú berendezéssel. A vizsgált minták tömege 3-6 mg között változott. A kiértékelést TA Universal Analysis 2000 szoftverrel értékeltem ki. A mérések hőmérséklettartománya -80-100 °C volt; 50 ml/perc térfogatáramú nitrogénöblítéssel, 20 °C/perc sebességű fűt/hűt/fűt ciklust alkalmazva.

### Dinamikus mechanikai analízis

A termomechanikai vizsgálatok során 5 Hz, 2 °C/perc, hárompontos hajlító elrendezéssel; -75 °C és 125 °C közötti hőmérséklettartományban végeztem vizsgálatokat. A próbatestek mérete 56x13x3 mm volt. A próbatestek gyártásához szilikonszerszámot készítettem, amelybe a különböző PCL-epoxigyanta keverékeket öntöttem.

### Becsapódás utáni nyomóvizsgálat

- A kezdeti hiba létrehozásához ejtődárdát alkalmaztam CEAST FRACTOVIS 9350 típusú berendezéssel, 1 méteres ejtési magassággal, valamint 25 kg össztömeg segítségével M3144 típusú, 22 kN méréshatárú dárdával.
- A nyomóvizsgálatokat Zwick Z050 univerzális anyagvizsgáló berendezésen végeztem becsapódás utáni nyomóvizsgálati (CAI – Compression after impact) feltét segítségével. A mérések során használt próbatestek szélessége és magassága 80 mm volt. A vizsgálati sebesség 2 mm/perc volt, a mérések során a szerszám kialakításából adódóan 10 mm volt a táv, amit maximálisan haladhatott a terhelőgép „z” irányban. A vizsgálat során kétkamerás 3D Digitális képkorrelációt (DIC) is használtam a térbeli deformáció pontos meghatározása érdekében (Mercury Monet).

### Csepplemez vizsgálata

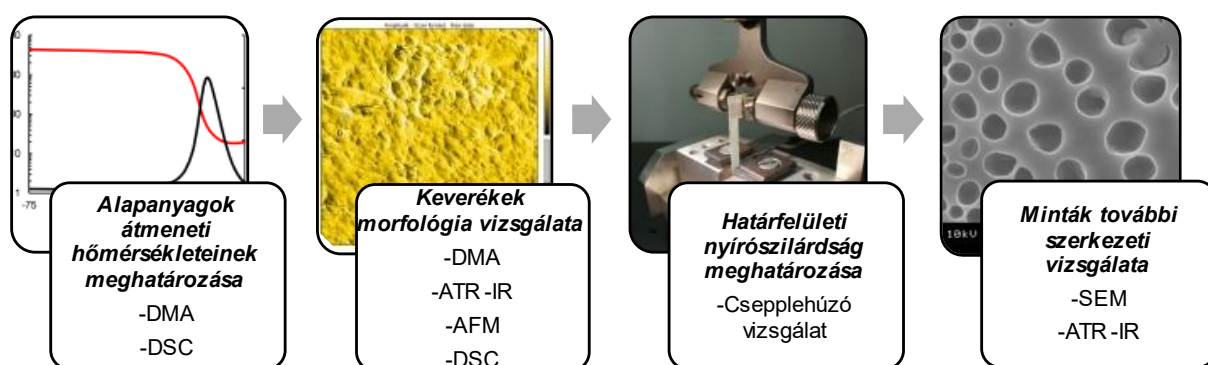
A vizsgálatokat Zwick Z005 univerzális anyagvizsgáló berendezésen végeztem 20 N-os méréshatárú erőmérőcellával. A vizsgálatok során csepplemezhez kifejlesztett feltéttel végeztem méréseket. A vizsgálati sebesség 2 mm/perc, a lemez távolsága 30 µm volt.

### Statisztikai módszerek

- Egytényezős varianciaanalízis (ANOVA – analysis of variance) segítségével határoztam meg, hogy adott mérési eredmények között van-e szignifikáns eltérés, nemcsak a szórások eredményezik-e az eltérést, hanem valós jelenség lép fel.
- Kétmintás T próba (Paired T test) segítségével határoztam meg, hogy a mérések során két adott adathalmaz között megjelenik-e szignifikáns változás.

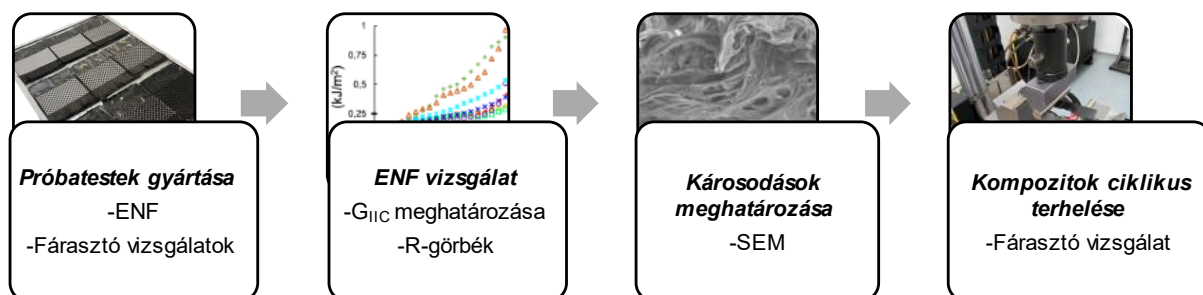
#### 4. KUTATÓ MUNKA FELÉPÍTÉSE

A kutatás első része során kompozitok mikromechanikai viselkedését vettem górcső alá, amely során a termoplasztikus anyagként alkalmazott PCL és az epoxigyanta között kialakuló kapcsolatot vizsgáltam és annak hatását a szál-mátrix határfelületen ébredő határfelületi nyírószilárdság értékére. A következő lépésben a kialakuló fázisokat vizsgáltam, ahol 3D nyomtatás segítségével hoztam létre PCL dús szerkezetet, amelyet epoxigyantával öntöttem körül. A kutatás első részében elvégzett munkát mutatja szemantikusan a 3. ábra (I. tézishez végzett munka).



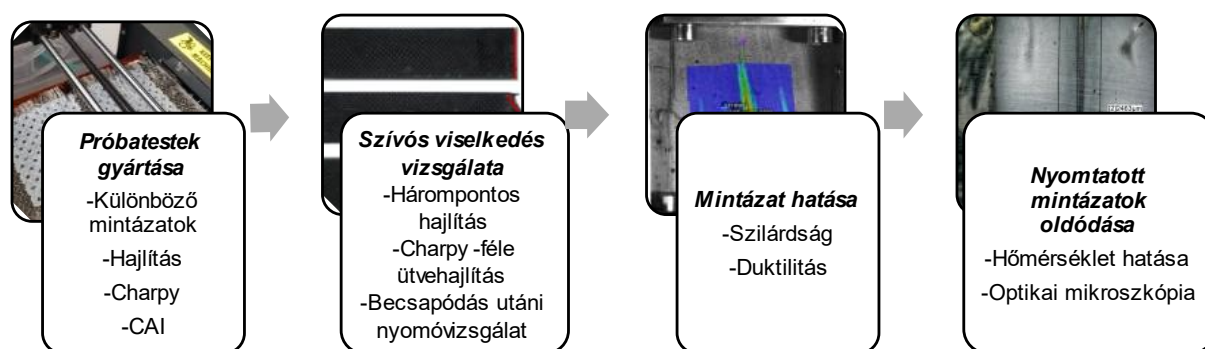
3. ábra Kísérletsorozat szemantikusan áttekintése a rétegek közötti anyag kompozitok tulajdonságaira mikroszinten gyakorolt hatásaival kapcsolatban

Kompozitok rétegek közötti szívós tulajdonságainak javítását legtöbb esetben az erősítő rétegek között elhelyezett köztes rétegek segítségével lehet elérni. Az ún. köztes rétegek (inter-layerek) segítségével az erősítő rétegek közti nyírószilárdság javítható. Ennek köszönhetően a katasztrofális tönkremenetek megjelenésének valószínűsége csökkenthető. Erre legtöbb esetben termoplasztikus anyagot alkalmaztak az irodalomban. Erre lehetőséget biztosít a PCL is, amelyet különböző kialakításokban nyomtattam fel a szénkermékre, vizsgálva a PCL felületi koncentrációjának hatását a repedésterjedéséhez szükséges energiát tekintve (4. ábra) (II. tézishez végzett munka).



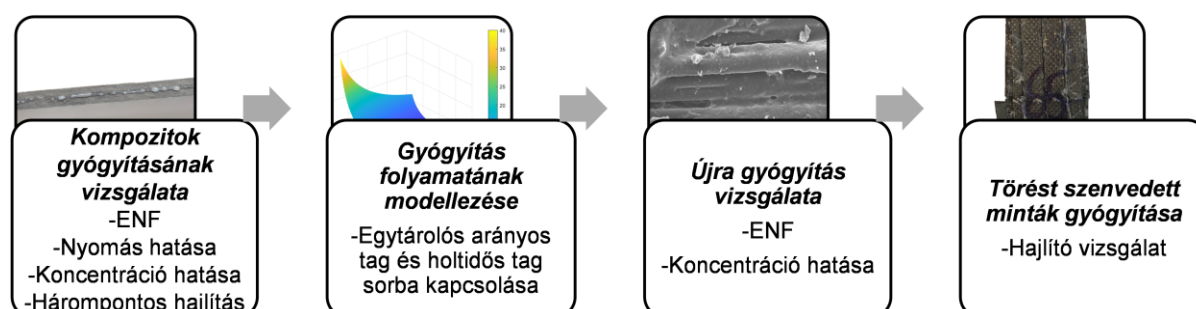
4. ábra Kísérletsorozat szemantikusan áttekintése a rétegek közötti anyag rétegek közötti tulajdonságokra gyakorolt hatásaival kapcsolatban

Az ENF-, valamint fárasztó vizsgálatoknál a rétegek közötti adhézió módosító anyag kitöltésével a rétegek közötti szívós viselkedés is változott. Ennek oka a repedésterjedés lassítása, annak lefolyásának fokozatos tétele. Ennek köszönhetően a végső tönkremenetel egy nagyobb deformációs szinten jelentkezett, amely alatt a rendszer további jelentős energiát volt képes elnyelni, növelve a szívós viselkedés mértékét. Az előző mérések a rétegek közötti tulajdonságokkal foglalkoztak elsősorban, azonban már az itt megjelenő viselkedés is a komplexebb szívósabb jellegű viselkedés megjelenésére utalhat. A mélyebb értelmezéshez kvázistatikus, valamint dinamikus méréseket végeztem, ezek segítségével a felületkitöltés további hatását vizsgáltam a kompozitok mechanikai viselkedésére (5. ábra) (II-III. tézishez végzett munka).



5. ábra Kísérletsorozat sematikus áttekintése, amely során a rétegek közötti anyag mintázatának hatását vizsgáltam kompozitok mechanikai tulajdonságaira

Kompozitok intelligens viselkedésével számos szakcikk foglalkozott már, különösen az elmúlt évek során. A fókusz legtöbb esetben a gyógyítások után kialakuló szilárdsági tulajdonságokon volt, azonban a gyógyítás, javítás optimalizálásával, vagy annak modellezésével kapcsolatban az irodalom már hiányos. A legtöbb esetben a termoplasztikus réteggel rendelkező vagy részleges-IPN mátrixú kompozitok gyógyítása nincsen pontosan definiálva. Ennek beállítása legtöbb esetben csak a termoplaszt réteg  $T_m$  hőmérsékletéhez van kötve, azaz a gyógyításhoz elegendő csak a rétegek közötti anyag olvadási hőmérséklete felett kezelni a kompozitokat. Ennek időtartama vagy nyomásfüggése azonban feltáratlan. Ennek modellezéséhez ENF vizsgálatokat alkalmaztam különböző nyomásokon (megfelelő technológiákra alapozva), valamint különböző felületi koncentráció mellett (6. ábra) (IV. tézis).



6. ábra Kísérletsorozat sematikus ábrázolása, amely során a kompozit rendszer gyógyítását vizsgáltam

## 5. Összefoglalás

Napjainkban a szénszál erősítésű polimer kompozitok térhódítása megkérdőjelezhetetlen. Elterjedésükben továbbra is gátat szab azok magas költsége, illetve túlterhelés hatására bekövetkező hirtelen, robbanásszerű, katasztrofális tönkremenetelük, utóbbi javítására számos lehetőség ismert. Értekezésemben 3D nyomtatott termoplasztikus rétegek hatását vizsgáltam a kompozitok mechanikai tulajdonságaira. Továbbá, megvizsgáltam az alkalmazott gyanta és termoplasztikus anyag között létrejövő kapcsolatot és annak hatását a határfelületi nyírószilárdságra. Majd a nyomtatott minták segítségével köztes-réteggel módosított kompozitok mechanikai és duktilis viselkedésének változását figyeltem meg, amit kiegészítettem a kompozit rendszerek javításának modellezésével.

A feldolgozott irodalmak alapján látható, hogy a szívós jellegű viselkedés elérésére számos megközelítés létezik (2.1 fejezet). A legelterjedtebb módszer a szénszálak mellé társított nagyobb energiaeinyelő képességgel rendelkező szálak alkalmazása, azaz a hibridizáció. Az eljárásokat osztályoztam aszerint, hogy a kompozit mely alkotóelemének módosításával érték el a kutatók a szívósabb jellegű viselkedést. Így három osztályba soroltam az eljárásokat: erősítő struktúra módosítása (2.2.1 fejezet), mátrix szívósítása (2.2.2 fejezet), rétegek közötti tulajdonságok módosítása (2.2.3 fejezet). Mindegyik módszerben közös pont, hogy a szívósabb viselkedés érdekében a kompozit rendszerek más előnyös tulajdonságából kellett áldozni, legtöbb esetben azok terhelhetősége gyengült a szívósabb jellegű viselkedés elérése során.

A szakirodalmi áttekintés második felében térhálós mátrixú kompozitok gyógyíthatóságát vizsgáltam (2.3 fejezet). Alapvetően a kompozit rendszerek javítását/gyógyítását két osztályba lehet sorolni: külső beavatkozást nem igénylő és külső beavatkozást igénylő módszerek. Utóbbi esetében (2.3.1 fejezet) három ismert módszer jelent meg: mikrokapszulás, üreges szálás és vaszkuláris módszerek. A külső beavatkozást nem igénylő módszerek esetében közös, hogy a kialakuló repedésekre, inhomogenitásokra a rendszer reagál és a folytonossági hibát legtöbb esetben a térhálós rendszerrel azonos gyantával tölti fel, majd annak térhálósodásával következik be a gyógyítás. A beavatkozást igénylő esetekben (2.3.2 fejezet) a gyógyító anyagot aktiválni kell, energiát kell befektetni. Legtöbb esetben ehhez hőt alkalmaztak, amely során csakúgy, mint az előbbi esetben, a kialakult repedéseket kitöltötte a gyógyító anyag. Közös ezekben, hogy a gyógyító anyag gyakran termoplasztikus anyag, amit akár a kompozitok szívósítására is fel lehet használni.

A szívós jellegű viselkedés változtatásával foglalkozó publikációk jelentős részében egy módszer emelkedik ki a többi közül, gyakoriságot és eredményeket tekintve, amely a köztes-rétegeket használta fel. A tématerületen jelentős kutatási potenciált láttam. A szakirodalmi áttekintés második felében megjelenő külső beavatkozást igénylő gyógyítási módszerek témájában közölt publikációkban közös volt, hogy a gyógyítás folyamatát a kutatók nem vizsgálták. A folyamat számos megválaszolatlan kérdést vet fel, amelyek megvizsgálását tűztem ki célul.

Kutatómunkám első lépése során (4.1 fejezet) tervezhető részleges-IPN rendszerek megvalósíthatóságát vizsgáltam meg. Ehhez először a kialakuló fázisokat elemeztem különböző epoxigyanta és termoplasztikus anyagkeverékeken. A vizsgálatok során 3D nyomtatás segítségével strukturáltan hoztam létre IPN zónákat a gyantán belül, amely által lokálisan megváltoztattam a létrejövő határfelületi nyírószilárdságot a gyanta és erősítőszálak között, valamint a rétegek közötti kapcsolatokat is módosítottam a nyomtatott köztes-rétegek segítségével. Ennek köszönhetően egyidejűleg megvalósítottam a mátrix szívósítását termoplasztikus anyaggal, a 3D nyomtatás segítségével a rétegek közötti technológiát alkalmaztam, valamint a határfelületi nyírószilárdság megváltoztatásával a szálszakadások valószínűségét is csökkentettem.

A kutatómunka második részében (4.2 fejezet) a rétegek közötti tulajdonságokat vizsgáltam meg II. módú tönkremenetelt követő mérések segítségével. A termoplasztikus anyag koncentrációjának növelésével a II. módú törési szívósság értéke szignifikánsan növekedett, továbbá, egy fokozatos jellegű tönkremenetel jelent meg a repedések stabil terjedése mellett. Ez megjelent a fárasztó vizsgálatok során is, ahol szintén a koncentráció növelésével a kompozitok élettartama jelentősen hosszabbodott.

A kutatómunka harmadik szakaszában (4.3 fejezet) a 3D nyomtatás segítségével létrehozott rétegek közötti anyag mintázatának hatását vizsgáltam a rendszerek szilárdságára és duktilitására. Megállapítottam egy kritikus zónatávolságot a mintázatokat tekintve, amely alatt a szilárdsági értékek szignifikánsan csökkennek, közelítve a PCL mátrixú kompozitok tulajdonságát. Ez azért jelent meg, mert a térhálósodás során az IPN zónák a mintázatok között elkezdtek összeérni, ami fázis inverziót eredményezett. A fejezet során ezen felül a térhálósítás hőmérsékletének hatását is vizsgáltam a kritikus zónatávolságra, megállapítottam, hogy annak növelésével a PCL minták gyorsabban olvadnak össze, azaz nagyobb kezdeti távolságban jelenik meg a kritikus zónatávolság.

A kutatómunka negyedik (4.4 fejezet) szakaszában kompozitok gyógyítási folyamatát vizsgáltam meg részlegesen károsodott és törést szenvedett kompozitokon. Előbbi esetben különböző rétegek közötti anyagkoncentráció és különböző gyógyítási folyamatok során alkalmazott nyomás mellett vizsgáltam a folyamatot. A nyomás és termoplasztikus anyag koncentrációjának növelésével a gyógyítási folyamat gyorsul, a kialakuló inhomogenitások hamarabb kerültek feltöltésre. A folyamatot modelleztem egy egytárolós arányos tag és egy holtidős tag sorba kapcsolásával. A kutatómunka harmadik szakaszában vizsgált törést szenvedett mintáinak koncentrációfüggő gyógyíthatóságát elemeztem. Elmondható, hogy a PCL koncentrációjának növelésével egy határérték jelent meg a hajlítószilárdságot tekintve, amely a csak PCL mátrixanyagot tartalmazó kompozit tulajdonságait közelítette. Ennek oka, hogy a törést szenvedett szálakat, valamint az epoxigyantában létrejövő károsodásokat a termoplasztikus anyag nem tudta gyógyítani, az inhomogenitások

kitöltésével ott a termoplasztikus anyagú kompozitok tulajdonságai jelentek meg. Természetesen a második terhelő ciklus során ezen pontok jelentették a veszélyes helyeket, így az ott megjelenő anyagtulajdonságok domináltak.

## 5.1. Tézisek

### I. Tézis:

*Bebizonyítottam, hogy a DGEBA típusú epoxigyanta mátrix és az erősítőszövet 3D nyomtatással történő lokális felületkezelésére használt PCL között gradiens fázisszerkezet jön létre a térhálósodás során, amely lokálisan módosítja a határfelületi nyírószilárdságot. A felületkezelés strukturált módosítása lehetőséget biztosít a határfelületi nyírószilárdság strukturálható kialakítására a mátrix és az erősítőanyag között.*

*Állításomat Zoltek PX35 FBUD0300 típusú UD szénszálakból, Ipox ER 1010; MH 3111-es epoxigyanta mátrixból, valamint eMorph175N05 típusú polikaprolakton anyagból felépülő kompozitokon igazoltam.*

### Tézishez kapcsolódó publikációk:

- **B. Magyar**, T. Temesi, G. Szabó: Szénszál erősítésű kompozitok szívósságnövelése a határfelületi adhézió módosításával 'XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2017). Kolozsvár, Románia', 25, 263-266 (2017)
- Szabó G., Czigány T., **Magyar B.**, Karger-Kocsis J.: 3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility. *Express Polymer Letters*, 11, 525-530 (2017) [10.3144/expresspolymlett.2017.50](https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.50) IF:3,064 Q1
- G. Szabó, **B. Magyar**, T. Czigány: Comparison of different interfacial engineering methods to achieve pseudo-ductile behaviour of carbon fibre reinforced polymer composites 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM 22). Melbourne, Ausztrália (2019), Mouritz, A - *Proceeding of International Conference on Composite Materials (ICCM22)* (2019) pp. 1-9. Paper: 1209-1, 9p., 1209-1
- Szabó 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 (2021) [10.1002/adem.202000822](https://doi.org/10.1002/adem.202000822) IF:3,217 Q2
- **Magyar B.**, Szabó G., Hliva V.: Decomposition and thermal properties of inter-layer modified polymer composites, *Flame Meeting on Fire Retardant Polymeric Materials, FRPM21, Budapest*, 2021. augusztus 29-szeptember 1

**II. Tézis:**

Szénuszál-erősítésű unidirekcionális kompozitokon bebizonyítottam, hogy a lokálisan elhelyezett köztes-réteg csökkenti a szál-mátrix között fellépő határfelületi nyírószilárdságot, ezáltal a szál-mátrix elválásoknak köszönhetően nagyobb energiaelnyelő képességű zónák hozhatók létre, amikkel a szálak szakadásának valószínűsége csökkenthető, ezzel a katasztrofális tönkremenetel bekövetkezése nagyobb deformációs szinten jelenik meg. A lokálisan elhelyezett mintázat másrészt a plasztikus deformációjának köszönhetően tovább lassítja a repedés terjedését.

A megjelenő viselkedésnek köszönhetően,

- a) a termoplasztikus anyag koncentrációjának növelésével egyenesen arányosan a kritikus rétegek közötti törési szívósság növekedik,
- b) a látszólagos duktilitás arányosan növekedik a termoplasztikus anyag koncentrációjának növelésével, ami telítést mutat 1,8 mm-es zónatávolságnál, elérve a termoplasztikus mátrixú referencia minták értékeit. Ennek oka, hogy a lokálisan elhelyezett köztes-réteg zónák a térhálósodás során összeolvadtak.

Állításomat Zoltek PX35 FBUD0300 típusú UD szénszálakból, Ipxox ER 1010; MH 3111-es epoxigyanta mátrixból, valamint eMorph175N05 típusú polikaprolakton rétegek közötti anyagból felépülő kompozitokon igazoltam, ahol a nyomtatás során 0,2 mm-es volt a nyomtatott mintázat magassága. A térhálósítás időtartama 3 óra volt 90 °C-os kemencében.

**Tézishez kapcsolódó publikációk:**

- Szabéni G., Magyar B., Iványicki T.: Comparison of static and fatigue interlaminar testing methods for continuous fiber reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, 63, 307-313 (2017) [10.1016/j.polymertesting.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.033) **IF:2,247 Q2**
- Magyar B., Szabéni G., Czigány T.: Metal-alike polymer composites: the effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials. *Composite Science and Technology*. 2021;215:109002 (2021), [10.1016/j.compscitech.2021.109002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109002) **IF:7,094 D1**
- Szabéni G., Hliva V., Magyar B.: Development of interphase engineering techniques for the ductility improvement in CF/EP composites - Comparison of NDT methods for delamination localization. *Materials Today: Proceedings*, 34, 113-116 (2020) [10.1016/j.matpr.2020.01.403](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.403)
- Magyar B., Szabéni G.: Szénuszál erősítésű kompozitok szívósságnövelése módosított határfelületi adhézió segítségével, Erősített műanyagok 2018 Nemzetközi BALATON Konferencia, Balatonkenese, 2018. május 15-27.

**III. Tézis:**

Bebizonyítottam, hogy 3D nyomtatás segítségével polikaprolaktonnal módosított köztes-rétegű szénszál erősítésű epoxigyanta (DGEBA) kompozitok maximális szilárdsága függ a nyomtatott zónatávolságtól, illetve leírható a 1)a)i)(1) és 1)a)i)(2) egyenlet segítségével,

$$\sigma_{norm} = \frac{z^{b_n}}{K_{0,5(T)}^{b_n + z^{b_n}}} \quad (1)$$

$$\sigma_{(z)} = \sigma_{norm}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) + \sigma_{min} \quad (2)$$

ahol  $\sigma_{norm}$  a normalizált szilárdság (-),  $z$  a zónatávolság (mm),  $b_n$  a rendszer állandója (-) (legkisebb négyzetek módszerével meghatározva),  $K_{0,5}$  megjelenő kritikus zónatávolság (mm) (legkisebb négyzetek módszerével meghatározva),  $\sigma_{(z)}$  a zónatávolság függő maximális szilárdság (MPa),  $\sigma_{max}$  az EP/CF kompozit maximális szilárdsága (MPa), amíg  $\sigma_{min}$  a PCL/CF kompozit maximális szilárdsága (MPa). A  $K_{0,5}$  értéke megadja azt a kritikus kezdeti zónatávolságot, ami esetén a normalizált szilárdságban szignifikáns csökkenés jelenik meg, a térhálósodás során a nyomtatott zónák körül kialakuló gradiens fázisok találkozásának hatására. A megjelenő kritikus zónatávolság függ a térhálósítás hőmérsékletétől, amely növelésével a termoplasztikus anyag jobban keveredik az epoxigyantával, így a térhálósodás során nagyobb kezdeti távolságok között is összeérnek a nyomtatott mintázatok körül kialakuló fázisok.

Állításomat Zoltek PX35 FBUD0300 típusú UD szénszálakból, Ipxox ER 1010; MH 3111-es epoxigyanta mátrixból, valamint eMorph175N05 típusú polikaprolakton rétegek közötti anyagból felépülő kompozitokon igazoltam, különböző PCL tömeg%-ot tartalmazó mintákon, ahol a nyomtatás során 0,2 mm-es volt a nyomtatott mintázat magassága. A minták térhálósítási időtartama 3 óra volt, 85, 90, 95, 100 °C-os kemencében.

**Tézishez kapcsolódó publikációk:**

- G. Szabényyi, **B. Magyar**, T. Czigány: Comparison of different interfacial engineering methods to achieve pseudo-ductile behaviour of carbon fibre reinforced polymer composites 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM 22). Melbourne, Ausztrália (2019), Mouritz, A - Proceeding of International Conference on Composite Materials (ICCM22) (2019) pp. 1-9. Paper: 1209-1, 9p., 1209-1
- Szabényyi 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 (2021) [10.1002/adem.202000822](https://doi.org/10.1002/adem.202000822) **IF:3,217 Q2**
- **Magyar B.**, G. Szabényyi: Polimer kompozitok károsodásának meghatározása újszerű módszerrel. *Anyagvizsgálók lapja*, III., pp. 71-74 (2021) ISSN: 1215-8410
- **Magyar B.**, Szabényyi G., Czigány T.: Metal-alike polymer composites: the effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials. *Composite Science and Technology*. 2021;215:109002 (2021), [10.1016/j.compscitech.2021.109002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109002) **IF:7,094 D1**
- Szabényyi G., Hliva V., **Magyar B.**: Non-destructive evaluation of interfacially engineered composites In: 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20). Lausanne, Svájc (2022), *Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20) - Composites Meet Sustainability* (Vol 1-6) p. 62011

**IV. Tézis:**

Egy új minősítési módszert fejlesztettem ki, amely alkalmas polikaprolakton köztes-réteggel ellátott szénszállal erősített epoxigyanta kompozitok rétegeközi törési szívóssági vizsgálatok során károsodott minták gyógyulási folyamatának jellemzésére. A mérési eljárás a kritikus rétegeközi törési szívósság értékváltozásának megfigyelésén alapszik. A törési szívósság értékváltozásának megfigyelésével a gyógyulási folyamat változása és annak határfoka követhető.

Kimutattam, hogy polikaprolakton köztes-réteggel ellátott szénszállal erősített epoxigyanta kompozitok rétegeközi törési szívóssági vizsgálatok során károsodott mintáinak gyógyulási folyamata leírható egy arányos taggal párhuzamosan kapcsolt összetett elemmel, amely összetett el egy sorosan kapcsolt holtidős és egytárolós arányos tagból épül fel. A jellemző válaszfüggvény az alábbi módon alakul (3):

$$X_{ki(t)} = A_{1(t)} + A_{2(t-T_h)} \left( 1 - e^{-\frac{t-T_h}{\tau}} \right) \quad (3)$$

ahol  $X_{ki}(t)$  a válasz, azaz a gyógyulási határfok (%),  $A_1$  arányossági tényező, amely értéke állandó a folyamat során, a károsodott, gyógyíthatatlan minták  $G_{nc}$  értéke arányosítva az eredeti  $G_{nc}$  értékkel (%),  $A_2$  arányossági tényező, amely megadja a maximálisan elérhető gyógyulási hatékonyság értékét (%),  $T_h$  holtidő, a tranziens rész késleltetésének időtartama (s),  $\tau$  az időállandó (s). Az egyenlet segítségével a hatás fellépésének időszükséglete meghatározható, azonban nem alkalmas a termoplasztikus anyag kiolvadásával megjelenő gyógyítási hatékonyság csökkenésének modellezésére.

Állításomat Zoltek PX35 FBUD0300 típusú UD szénszálakból, IpoX ER 1010 - MH 3111-es epoxigyanta mátrixból, valamint eMorph175N05 típusú polikaprolakton rétegeközi anyagból felépülő kompozitokon igazoltam, ahol a nyomtatás során 0,2 mm-es volt a nyomtatott mintázat magassága. A kezdeti hiba kialakítása során ENF vizsgálatokat végeztem 2,5 %-os erőseségig, a gyógyítást 65 °C-on végeztem.

**Tézishez kapcsolódó publikációk:**

- Szabéni G., Czigány T., **Magyar B.**, Karger-Kocsis J.: 3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility. *Express Polymer Letters*, 11, 525-530 (2017) [10.3144/expresspolymlett.2017.50](https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.50) **IF:3,064 Q1**
- **Magyar B.**, Szabéni G.: Development of pseudo-ductile composites via hybrid methods, *Polymer Composites International Conference*, Csehország, Tábor, 2019. május 14-16.
- **Magyar B.**, Szabéni G., Czigány T.: Metal-alike polymer composites: the effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials. *Composite Science and Technology*. 2021;215:109002 (2021), [10.1016/j.compscitech.2021.109002](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109002) **IF:7,094 D1**

---

## 6. FORRÁSOK

- [1] Sapuan S. M.: Introduction. in 'Composite materials' (eds.: Sapuan S. M.) Butterworth-Heinemann, Boston, Vol. 1-27 (2017).
- [2] Youson M.: Imola '94 and the lasting safety legacy. Formula 1, (2019).
- [3] Chung D. D. L.: 3 - polymer-matrix composites: Structure and processing. in 'Carbon composites (second edition)' (eds.: Chung D. D. L.) Butterworth-Heinemann, Vol. 161-217 (2017).
- [4] Hollaway L.: Polymer composites in construction: A brief history. Proceedings of The Ice - Engineering and Computational Mechanics, **162**, 107-118 (2009).
- [5] Sapuan S. M.: Composite materials. in 'Composite materials' (eds.: Sapuan S. M.) Butterworth-Heinemann, Boston, Vol. 57-93 (2017).
- [6] Matabola K. P., De Vries A. R., Moolman F. S., Luyt A. S.: Single polymer composites: A review. Journal of Materials Science, **44**, 6213-6222 (2009).
- [7] J. D.: Brendon hartley suffers horror 200mph crash after suspension failure as lewis hamilton goes fastest in final practice for the british grand prix. Daily Mail, (2018).
- [8] B. L.: Mechanical failure led to turbine collapse. Times Herald. Washington, (2016).

---

## 7. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

1. *Szebényi G., Czigány T., Magyar B., Karger-Kocsis J.*: 3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility. *Express Polymer Letters*, 11, 525-530 (2017) 10.3144/expresspolymlett.2017.50
2. *Szebényi G., Magyar B., Iványicki T.*: Comparison of static and fatigue interlaminar testing methods for continuous fiber reinforced polymer composites. *Polymer Testing*, 63, 307-313 (2017) 10.1016/j.polymertesting.2017.08.033
3. *Toldy A., Szebényi G., Molnár K., Tóth L. F., Magyar B., Hliva V., Czigány T., Szolnoki B.*: The effect of multilevel carbon reinforcements on the fire performance, conductivity, and mechanical properties of epoxy composites. *Polymers*, 11(2), 303/1-303/13 (2019) 10.3390/polym11020303
4. *Szebényi G., Magyar B.*: Effect of fibre sizing on the interlaminar properties of polyamide matrix composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 426, 012044/1-012044/7 (2018) 10.1088/1757-899X/426/1/012044
5. *G. Szebényi, V. Hliva, B. Magyar*: Development of interphase engineering techniques for the ductility improvement in cf/ep composites. *Materials Today: Proceedings* (2020) ISSN 2214-7853, 10.1016/j.matpr.2020.01.403.
6. *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 (2021) 10.1002/adem.202000822
7. *Magyar B., Szebényi G., Czigány T.*: Metal-alike polymer composites: the effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials. *Composite Science and Technology*. 2021;215:109002 (2021), 10.1016/j.compscitech.2021.109002
8. *G. Szebényi, B. Magyar, T. Czigány*: Comparison of different interfacial engineering methods to achieve pseudo-ductile behaviour of carbon fibre reinforced polymer composites 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM 22). Melbourne, Ausztrália (2019), Mouritz, A - Proceeding of International Conference on Composite Materials (ICCM22) (2019) pp. 1-9. Paper: 1209-1, 9 p., 1209-1
9. *B. Magyar, T. Temesi, G. Szebényi*: Szénszál erősítésű kompozitok szívósságnövelése a határfelületi adhézió módosításával 'XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2017). Kolozsvár, Románia', 25, 263-266 (2017)
10. *B. Magyar, G. Szebényi*: Polimer kompozitok károsodásának meghatározása újszerű módszerrel. *Anyagvizsgálók lapja*, 2021, Vol. 3, pp. 71-74
11. *Szebényi G., Hliva V., Magyar B.*: Non-destructive evaluation of interfacially engineered composites In: 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20). Lausanne, Svájc (2022), Proceedings of the 20th European

- Conference on Composite Materials (ECCM20) - Composites Meet Sustainability (Vol 1-6) p. 62011
12. **Magyar B.**, *Szebényi G.*: Szénszál erősítésű kompozitok szívósságnövelése módosított határfelületi adhézió segítségével, Erősített műanyagok 2018 Nemzetközi BALATON Konferencia, Balatonkenese, 2018. május 15-27.
  13. **Magyar B.**, *Szebényi G.*: Developement of pseudo-ductile composites via hybrid methods, Polymer Composites International Conference, Csehország, Tábor, 2019. május 14-16.
  14. **Magyar B.**, *Szebényi G.*: CO2 LASER-es felületkezelés hatása kompozitok duktilis tulajdonságaira, Erősített műanyagok 2020 Nemzetközi BALATON Konferencia, Balatonkenese, 2020. szeptember 28-30.
  15. **Magyar B.**, *Szebényi G.*, *Hliva V.*: Decomposition and thermal properties of inter-layer modified polymer composites, Flame Meeting on Fire Retardant Polymeric Materials, FRPM21, Budapest, 2021. augusztus 29-szeptember 1.