



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Gépészmérnöki Kar

Polimertechnika Tanszék

PhD értekezés

# ÜREGES ÜVEGSZÁL ERŐSÍTÉSŰ POLIMER KOMPOZITOK

TÉZISFÜZET

**Készítette: Kling Sándor**  
okleveles gépészmérnök

**Témavezető: Dr. Czigány Tibor**  
egyetemi tanár

Budapest, 2014

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetők

# 1. Bevezetés

Fejlődő világunkban az erőforrások hatékony felhasználása elengedhetetlen követelmény, hiszen a fosszilis energiakészletek végesek. Úgy tudunk jól gazdálkodni az erőforrásokkal, ha például a közlekedésben könnyű járműveket építünk, így helyváltoztatásuk kevesebb energiát igényel, ami egyben a káros anyag kibocsátást is jelentősen csökkenti.

A polimer kompozitok jól tervezhető és optimálható anizotrop tulajdonságaik miatt különösen alkalmasak a könnyű szerkezetes építésre. Ha ismert a jellemző igénybevétel nagysága és iránya, az anizotrópiát tudatosan kihasználva előnyösen alakítható az alkatrészek anyagtulajdonsága. A kompozitok használata ebből következően egyre szélesebb körű: pl. repülőgépek szárnya és teste, szélkerekek lapátjai, repülőgép-szállító anyaghajó vezérlő épülete, sportszerek stb. készülnek belőle. A kompozit tipikusan erősítőszálakból és az erőt közvetítő mátrixból épül fel, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van. Az erősítőszál rendkívül vékony (átmérője néhány mikrométer), és a szakítószilárdsága nagy. A leggyakrabban alkalmazott erősítőszál az üvegszál, a szénszál és az aramidyszál, de jelentősen növekszik a bazalt-, a len-, a kender- és a hőre lágyuló mesterséges szálak használata is. Az erősítőszálak anyagának fejlesztése mellett számos kutatás foglalkozik azok alakjának optimalizálásával. A mátrix szívós anyag, elsődleges feladata a terhelés közvetítése a szálakhoz, valamint a szálak védelme. A leggyakrabban használt mátrix anyagok a poliészter, az epoxi és a vinilészter gyanta a hőre keményedő, amíg a poliamid (PA) és a polipropilén (PP) a hőre lágyuló polimerek közül.

Mint minden anyagnál, a kompozitoknál is az anyag tönkremenetelét, azaz törését repedéskeletkezés és -terjedés előzi meg, amelyet okozhat külső környezeti terhelés, mechanikai igénybevétel, esetleg kémiai vagy hőhatás. A homogén belső szerkezetű anyagokhoz viszonyítva a kompozit nagy előnye, hogy nem hirtelen, katasztrófaszerűen, hanem lassan törik el, sokszor már szemmel látható jelek figyelmeztetnek a tönkremenetelre, így van idő beavatkozni, a terhelést csökkenteni, vagy megszüntetni. A kompozit tönkremenetele úgy kezdődik, hogy a mátrixban mikro repedések jelennek meg, amelyek közül némelyik terjedni kezd. A repedésterjedést okozhatja ciklikus és változó terhelés, valamint a polimerek degradációja (pl. ultraibolya sugárzás okozta öregedés). A repedés egészen addig gyorsan terjed, amíg egy száalba nem ütközik, itt megáll, és úgy terjed tovább, hogy megkerüli a szálat, vagy a szál is eltörik.

Jó lenne, ha a repedés terjedését külső beavatkozás nélkül meg lehetne állítani, és így meg lehetne akadályozni, vagy legalábbis késleltetni a szerkezet tönkremenetelét. A

kompozitban például üreges erősítőszálak alkalmazása adhat megoldást erre a problémára. Az üreges szálak lehetőséget adnak egyszerű állapotfelmérésre, illetve öngyógyuló hatás elérésére is. Az állapotfelügyelet például úgy lehetséges, hogy a szálakat fel lehetne tölteni ultraibolya (UV) fényre érzékeny folyadékkal, amely a repedés keletkezésénél, a szál törésénél kifolyna, így egy UV lámpával végigvilágítva a szerkezetet gyorsan és egyszerűen ellenőrizhető lenne a szerkezet állapota és beazonosítható lenne a sérült rész helye.

Az öngyógyuló hatást például az élővilág analógiája alapján lehet megvalósítani. A fa kérge sérülése után rögtön a sérülés kijavításába, annak meggyógyításába kezd úgy, hogy a sérült területre gyantát bocsájt, amely a sérülés teljes gyógyulásáig véd a további sérülésektől, korhadástól. Az emberi bőrreteg sérülését követően a szervezet vérzéssel, majd abból kialakuló varral pótolja a hiányzó hámréteget. Ez az analógiája az üregükben gyantát tartalmazó szálakkal erősített kompozitnak is. Ezeknél a kompozitoknál egyes szálakban gyanta, míg a megfelelő arányban más szálakban térhálósító van. Amint repedés keletkezik a kompoziton, a szál is eltörik, és a szálakból kifolyik a gyanta és a térhálósító, majd a két komponens összekeveredve feltölti a repedést, és ott kitérhálósodik. Ezzel helyreáll az anyag folytonossága és a „javított” rész szilárdsága akár az eredetit is megközelítheti. Ez az anyag reakciója a külső környezet károsító hatására. Az olyan anyagokat, amelyek a környezet hatásaira gyors és egyértelmű válaszokkal reagálnak minden külső emberi beavatkozás nélkül, intelligens anyagoknak nevezzük. Az üreges szálakkal erősített kompozitok is egyértelmű és gyors választ adhatnak a repedés megjelenésére azzal, hogy az üreges szálakban tárolt és a repedés miatt azokból kifolyó gyanta a repedést feltöltve és ott kitérhálósodva újra szerkezeti kapcsolatot teremt a repedés által kettéválasztott részek között.

Az értekezésem célja ezeknek az intelligens anyagoknak, az üreges szálakkal erősített polimer mátrixú kompozitoknak a kutatása, üreges szállal erősített kompozit létrehozása, valamint az állapotjelzés és öngyógyítás hatásmechanizmusának feltérképezése.

## 2. A szakirodalom rövid áttekintése, az értekezés célja

Az irodalom áttekintése alapján megállapítottam, hogy már az 1980-as évek elején megjelentek cikkek üreges szálakkal kapcsolatos kutatásokról. Néhány forrás szerint már a 60-as években is foglalkoztak ilyenfajta szálakkal, de a nagy előállítási költség és a rossz kihasználtság miatt leálltak a gyártásukkal. A felhasználásnak alapvetően mindig is két célja

volt: először a szálak jobb mechanikai tulajdonságainak elérésére, majd később az öngyógyuló kompozitokhoz való alkalmazás megvalósítása.

Az üreges szálak alkalmazásának korlátja még a mai napig is a magas előállítási költség, így elég nehéz hozzájutni ezekhez a szálakhoz. Különböző szabadalmak születtek az előállításukra vonatkozóan, de ezek a megoldások is még mindig jóval drágábbak a hagyományos tömör szál gyártásánál. Néhány kutató magának állított elő üreges üvegszálakat vastagabb üvegszál felhevítésével és nyújtásával. Ezzel a módszerrel különböző üregességi hányadú szálakat tudtak előállítani, amelyek eredményeként lehetővé vált azok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. Természetesen a szálak külső átmérője és az üregességi hányad is befolyásolta a szálak, így az azokból készített kompozit lemezek mechanikai tulajdonságait. Habár az egyes kutatók ugyanolyan anyagú üvegszálakat használták fel azok összehasonlításához, az eredményekben mégis nagy különbségek adódtak, ami a falvastagság csökkenésének hatására növekvő molekulaorientációval magyarázható, amely minden anyagnál jelentkezik.

Az üreges szálakkal erősített öngyógyuló kompozitok fejlesztésével kapcsolatban nem lelhető fel sok irodalom. Születtek ezen a területen is szabadalmak és néhány tanulmány, de a témával a legrészletesebben a Bristol Egyetemen, a Repülésmérnöki Tanszéken foglalkoztak, ahol két hetes szakmai utam során saját kezűleg gyárthattam magamnak vastag üreges üvegszálakat (75  $\mu\text{m}$  külső, 50  $\mu\text{m}$  belső átmérő). Az öngyógyulással foglalkozó tanulmányokban próbálták minden esetben azonos mértékben roncsolni a próbatesteket, majd vizsgálták a gyógyulási fokot, és emellett az állapotjelző funkciókat, hogy a sérülések könnyen azonosíthatóak legyenek. Találkoztam olyan tanulmánnyal is, amikor az üreges szálakat a lemez elkészítése után a már előre bekevert gyógyító eleggyel töltötték fel, és még annak térhálósodása előtt elvégezték a roncsolást.

Az irodalomban fellelhető üreges szálakkal erősített öngyógyuló kompozitokban minden esetben az átlagos tömör üvegszálnál ( $\sim 15 \mu\text{m}$ ) jóval vastagabb üreges szálakban ( $>30 \mu\text{m}$ ) tárolták a gyógyító elegyet. A vastag szálak azonban gyenge mechanikai tulajdonságaik miatt nagyban lerontották a kompozit tulajdonságait, és ezzel sok hibahelyet vittek be a kompozit lemezekbe. Sokkal eredményesebb lehet vékonyabb üreges szálak alkalmazása, amelyek ténylegesen erősítő funkciót látnak el emellett, hogy még valamilyen jelző vagy gyógyító folyadékkal fel is tölthetőek.

Az irodalomkutatás során megismert eredmények alapján a kutatómunkám célkitűzései:

1. A piacon jelen lévő üreges üvegszálak elemzése, geometriai, mechanikai tulajdonságaik tanulmányozása és azok mérésének pontosítása, kémiai összetevőik meghatározása, és az egyes tulajdonságok közötti összefüggések megállapítása.
2. A szálak feltöltését befolyásoló körülmények meghatározása, valamint a töltési sebesség és az egyes befolyásoló tényezők közötti összefüggések megállapítása.
3. Módszer kidolgozása a szálak kompozit lemezbe építés előtti töltésére, hogy a gyógyító eleggyel töltött üreges szálak, szövetek valós szerkezetekben is alkalmazhatók legyenek.
4. Üreges szállal és hagyományos tömör szállal erősített kompozit lemezek összehasonlítása különböző mechanikai vizsgálatok segítségével.
5. Az üreges szállal erősített kompozitokban a szálak jelzőfolyadékkal való feltöltése, és az állapotellenőrző funkciók vizsgálata.
6. Kompozit lemez gyártása  $0/90^\circ$ -os elrendezésű üreges szálakkal, a szálak utólagos feltöltése a gyógyító elegy két komponensével, majd különböző körülmények között az öngyógyuló képesség vizsgálata.
7. Egykomponensű gyógyító eleggyel töltött öngyógyító kompozit lemezek vizsgálata.

### 3. Alkalmazott anyagok, technológiák és vizsgálati módszerek

#### 3.1. Gyanták és vizsgálatuk

##### ***Gyanta típusok***

A méréseim során különböző típusú és tulajdonságú, lamináló- és injektáló gyantákat használtam fel. A gyantarendszereket úgy választottam ki, hogy a viszkozitásuk minél szélesebb skálát fedjen le, hogy vizsgálni tudjam a viszkozitás befolyásoló hatását. A kiválasztott gyanták tulajdonságait a 1. táblázatban foglaltam össze.

A jobb láthatóság érdekében a gyanták színező anyagaként Eporezit SZPM fekete és fehér színezőanyagot (IpoX), vas-oxid alapú por pigmentet, valamint Keystone Rhodamine B Base UV fényre fluoreszkáló anyagot használtam.

Gyanta (A)	Gyanta dinamikai viszkozitása 25°C-on [mPa·s]	Térhálósító (B)	Térhálósító dinamikai viszkozitása 25°C-on [mPa·s]	Keverési arány A:B	Fazékidő [min]
Ipox MS90 A	660-790	Ipox MS90 B	10-30	100:33	570
Ciba Araldit LY5082	1700-2200	Ciba Araldit HY5083	10-25	100:23	100
Eporezit AH12	100-200	Eporezit T58	80-120	100:40	100
Polimal 1058	150-200	Butanox M50	20-25	100:1-100:4	5-20

1. táblázat Felhasznált gyanták névleges tulajdonságai

A kétkomponensű javító folyadék választásánál fontos szempont volt, hogy a gyanta a keverési arányra kevésbé legyen érzékeny, és az elégtelen keveredési folyamat se jelentsen problémát a repedésben. Amennyiben csak részleges polimerizáció jön létre, úgy az egyes molekulák nem kapcsolódnak tökéletesen egymáshoz, és így a mechanikai tulajdonságok romlanak, amelyek befolyásolják a húzó, nyomó, hajlító tulajdonságát, illetve az energia elnyelő képességét a kompozitoknak. Ezek alapján Polimal 1058 típusú injektáló poliészter gyantát választottam, térhálósítóként pedig dimetil ftalátban oldott metil etil keton peroxidot (Butanox M-50). Egykomponensű javító elegyként Loctite 493 típusú metil-cianoakrilátot használtam.

### ***Viszkozitás mérés***

A dinamikai viszkozitást TA Instruments AR2000ex típusú rotációs reométerrel mértem. A mérés állandó 23°C-os hőmérsékleten zajlott, a nyírási sebességet pedig 65 másodpercenként léptettem 0,01-10 1/s között 13 fokozatban.

### ***Peremszög mérés***

A peremszög mérési vizsgálatot egy Ramé-Hart NRL C.A. 100 típusú goniométer segítségével végeztem. A méréseket 23°C-on végeztem.

## 3.2. Szálak és vizsgálatuk

### ***Száltípusok***

Az előkísérleteimhez felhasznált üreges és tömör szénuszálakat a Zoltek Zrt.-től szereztem be. A PAN alapú szálakat roving formájában kaptam.

Az üreges üvegszálat a R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH-től szereztem be atlaszszövésű szövet formájában. Az üvegszálak alkáli-mentes alumínium-borszilikát szabadalmazott keverékéből készültek egy (szabadalmazott gyártási eljárással) és a szövet felületi tömege  $216 \text{ g/m}^2$ . Amikor roving formában volt szükségem az üreges szálakra, akkor a szövet vetülék irányú rovingjait fejtettem le a szövetből. Az üreges szövetet  $150 \text{ sodrat/m}$  sodrású rovingokból szőtték. A tömör szálakat a 3b fiberglass gyártotta, és roving formájában jutottam hozzá. A szálak E-üvegből készültek és a rovingok lineáris sűrűsége  $134 \text{ tex}$  volt.

Bristoli tanulmányutam során vastag üreges üvegszálat gyártottam üvegső előgyártmányból (Glass 8252) a Bond és társai által fejlesztett berendezéssel. Az előgyártmányt az egyik végén befogtam, és egy csökemencében közel  $1000^\circ\text{C}$ -ig hevítettem. A szál szabad végét egyenletes sebességgel húztam. Az értekezésben felhasznált szálak adatai az 2. táblázatban láthatóak.

Szál típusa	Névleges külső átmérő [ $\mu\text{m}$ ]	Névleges belső átmérő [ $\mu\text{m}$ ]
R&G üreges üvegszál	10-13	5-8
3b Advantex 608 tömör üvegszál	10	-
Általam gyártott bristoli üreges üvegszál	75	50
Zoltek szénszál	7	-
Zoltek üreges szénszál	22	11

2. táblázat Felhasznált száltípusok

### ***A szálak kémiai elemzése***

A szálak felületi elemösszetételét energiadiszipatív röntgenspektroszkópia (EDS) segítségével határoztam meg. Így ellenőrizni tudtam a szálak felületén az írezőanyagok összetételét.

A szálak pontos elemi összetételét inductívan csatolt plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES - Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) módszerrel határoztam meg.



### ***Szálak átmérőjének és szakítószilárdságának meghatározása***

A szálak átmérőjét Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóp segítségével mértem 50x-es nagyítással, alsó megvilágítással. A szálszakító vizsgálatokat a MSZ EN ISO 5079 szabvány alapján végeztem. A próbatesteket Zwick Z005 típusú szakítógéppel, 2 mm/perc sebességgel szakítottam.

### ***Szálhajlékonysági vizsgálatok***

Az üreges és tömör szálak hajlékonysági tulajdonságait összehasonlítva az eredményeket a szálmérőre, valamint a szálkeresztmetszetre fajlagosítva összegeztem. Az egyik végén befogott 50 mm hosszú szál másik végének függőleges irányú elmozdulását mértem mérőskála segítségével. Ezzel a módszerrel sok mérési hibát viszek a szálak hajlító rugalmassági modulusának meghatározásába, ezért továbbfejlesztettem a mérési módszert.

### ***Üreges szálak folyadékkal töltése***

A szálakat különböző gyantakomponensekkel és térhálósítókkal töltöttem, és vizsgáltam a felszívás folyamatát vízszintes helyzetben. Különböző átmérőjű üreges szálakat töltöttem folyadékkal a kapillaris hatás segítségével, és vizsgáltam a kapillaris hossz alakulását a szögállások függvényében. Elsőként függőleges állapotban töltöttem a szálakat, majd a vízszintes irány felé forgattam, amikor egyensúlyi állapotot ért el a töltődés.

## **3.3. Kompozit lemezek vizsgálata**

Üreges és tömör szállal erősített kompozit lemezek mechanikai tulajdonságait hasonlítottam össze. A száraz rovingokat tekercseltem megfelelő vastagságban, majd ezeket vákuum infúziós módszerrel impregnáltam.

### ***Az üreges és tömör szállal erősített kompozit lemezek gyártása***

Alapanyagként 3b Advantex 608 tömör üvegszálat, R&G által forgalmazott üreges üvegszálat és ipox MS 90 epoxi gyantarendszert használtam fel. A szálak impregnálását vákuum infúziós módszerrel végeztem, az azonos vastagságú lemezeket egy fázisban injektálva, hogy minden körülmény megegyezzen. Az állapotjelző funkciók jobb láthatósága érdekében a mátrixanyagba 5%-os arányban Eporezit SZPM fehér színezőanyagot is kevertem ennek a funkciónak a vizsgálatokor. Az öngyógyulás vizsgálatoknál az impregnálást kétféle módszerrel végeztem (kézi laminálás, vákuum infúzió).

### ***Üreges üvegszállal erősített kompozit lemezek töltése folyadékkal***

Az üreges szállal erősített lemezek folyadékkal való feltöltése a következők szerint történt: szárítás után a próbatestek egyik végét vákuumzsákba zártam úgy, hogy a próbatest két oldalára gyantavezető hálót helyeztem, hogy a zsák ne tudja eltömíteni a szálak végeit. A próbatestek másik végét a feltöltendő folyadékba merítettem.

### ***Üreges üvegszálak töltése folyadékkal kompozitba építés előtt***

Üreges üvegszálakat töltöttem annak érdekében, hogy az állapotjelzés, illetve az öngyógyítás lehetséges legyen tetszőleges geometriájú termékeknél is. Ennél a módszernél is vákuumzsákos technológiát alkalmaztam.

### ***Kompozit vizsgálati módszerek***

*Hamutartalom vizsgálat.* A száltartalmat hamutartalom vizsgálattal lehet meghatározni, amelyet az MSZ EN ISO 3451 számú szabvány alapján végeztem.

*Húzó vizsgálat.* A húzó vizsgálatok segítségével határoztam meg a próbatestek szakítószilárdságát és rugalmassági modulusát. A húzó tulajdonságok mérését az MSZ EN ISO 527 szabvány alapján végeztem. A próbatesteket Zwick Z050 típusú számítógép vezérlésű terhelőgéppel szakítottam el 2 mm/perc sebességgel.

*Nyomóvizsgálat.* A próbatestek nyomószilárdságát és nyomó rugalmassági modulusát az EN ISO 14126 szabványos nyomóvizsgálat alapján végeztem. A próbatesteket Zwick Z050 típusú terhelőgéppel nyomtam össze 1 mm/ perc sebességgel.

*Hárompontos hajlítóvizsgálat.* A próbatestek hajlítószilárdságát és hajlító rugalmassági modulusát az MSZ ISO EN 14125 számú szabvány szerint végeztem Zwick Z020 típusú szakítógépen 2 mm/perc sebességgel.

*Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat.* Az ütvehajlító vizsgálatok segítségével határoztam meg a próbatestek ütőszilárdságát az élükön megütve őket. A méréseket az MSZ EN ISO 179 számú szabvány útmutatásai alapján végeztem Ceast Resil Impact Junior típusú ingás ütőművel, amelyre 25 J-os kalapácsot szereltem. Az adatokat DAS 8000 típusú berendezés rögzítette.

*Ejtődárdás vizsgálat.* Az ejtődárdás vizsgálatokat Ceast Fractovis típusú ütőművel végeztem. A roncsolás adatait DAS 8000 adatgyűjtő rögzítette.

### ***A próbatestek roncsolása és öngyógyulásának mértékét ellenőrző módszerek***

Töltetlen és töltött üreges üvegszál szövetrel erősített kompozit lemezekből próbatesteket munkáltam ki. A próbatesteket Ceast Fractovis típusú ütőművel roncsoltam, majd hárompontos hajlítással ellenőriztem a maradó szilárdságot minden próbatest típuson az EN ISO 14125 szabvány szerint.

### ***Próbatestek töretfelületeinek mikroszkópos vizsgálata***

Az öngyógyuló vizsgálatok elvégzése után a töretfelületeket és a repedéseket Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóppal illetve JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam, és kerestem a gyógyításra utaló jeleket. Elsőként gyantaágyba helyeztem a próbatesteket, majd Struers automata polírozó segítségével készítettem el a vizsgálandó felületet.

### ***Végeselemes modellezés***

A végeselemes modellezéseket HyperWorks 12.0 program segítségével végeztem el. Az anyagmodelleket a méréseim alapján állítottam fel. A vizsgálatitípustól függően alkalmaztam 2D-s háromszög és négyszög elemeket valamint 3D-s tetraéder és kocka elemeket a hálózáshoz. A modelleket lineáris anyagmodellekkkel és statikus terhelési módban vizsgáltam.

## **4. Eredmények rövid összefoglalása**

Disszertációm üreges szálakkal erősített polimer kompozitok fejlesztésével foglalkozik. A nemzetközi szakirodalmat tanulmányozva megállapítottam, hogy az üreges szállal erősített öngyógyuló kompozitok számos előnnyel rendelkeznek a többi öngyógyuló mechanizmussal szemben, ugyanis az üreges szálak a tároló funkció mellett erősítő funkciót is ellátnak. Tanulmányoztam a két legfontosabb polimer kompozit erősítő száltípus, az üveg és a szénszál gyártási módszereit és kitértem az üreges szálgyártás jelenleg ismert lehetőségeire is. Tanulmányoztam továbbá a kutatásokat, amelyek az üreges szálak geometriájával foglalkoznak és azok alkalmasságával öngyógyuló kompozitokhoz. Az öngyógyuló és állapotjelző funkció működési képességét bemutatták, de a legkisebb üreges szál külső átmérő, ami a szakirodalomban megtalálható 30  $\mu\text{m}$  volt, ami a kompozit szerkezeteket gyengíti a vékony (~15  $\mu\text{m}$ ), tömör szálerősítéshez képest. Kutattam a szakirodalomban a szálak feltöltését befolyásoló tényezőket, és áttekintést készítettem annak fizikai hátteréről.

A kísérletek során vizsgáltam üreges és tömör üvegszálak szakítószilárdságát és kimutattam, hogy a szakítószilárdság és a száleresztmetszet kitöltési tényező fordított arányban változik. Meghatároztam a szálak hajlító modulusát és kimutattam, hogy az üreges szálak hajlítómerevsége nagyobb a tömör szálakénál, ami a keresztmetszetre vonatkoztatott kisebb tömegnek és a nagyobb tömeg/másodrendű nyomaték hányadosnak köszönhető. A szakirodalomban fellelhető szálhajlékonysági vizsgálatok módszere pontatlannak bizonyult, ezért kidolgoztam egy pontosított eljárást. Korábban a függőleges irányú szálvég lehajlás méréséből lehetett meghatározni a szálak hajlító rugalmassági modulusát, az új mérés technikával azonban a lehajlott szálvég vízszintes irányú elmozdulását is figyelembe vettem és a modulus meghatározásához kidolgoztam a számításokat. Így jelentősen javítottam a mérés pontosságát. Vizsgáltam az üreges szálak folyadékkal való tölthetőségét és kimutattam, hogy kapcsolat van a peremszög valamint a viszkozitás és a kapilláris-elv hatású töltődési sebesség között.

Összehasonlítottam az azonos elemi összetételű üreges, tömör és az ezek keverékével erősített kompozit lemezek mechanikai és energiaelnyelő tulajdonságait. Kimutattam, hogy az üreges szállal erősített kompozitok tömegre viszonyított szilárdsága és rugalmassági modulusa jobbak a hagyományos tömör szállal erősített kompozitoknál és a hibrid szálerősítésű kompozitok sűrűséggel fajlagosított húzó és nyomótulajdonságaiknál hibrid hatás tapasztalható. Az energiaelnyelő képesség kisebb volt az üreges szállal erősített kompozitok esetében, ami növelhető lenne, amennyiben az üreges szálak valamilyen gyógyító, illetve jelző folyadékkal vannak töltve. Az üreges szállal erősített kompozitok energiaelnyelő képessége szintén nagyobb lehetne, ha a szálak falvastagsága megfelelően kicsi lenne ahhoz, hogy az szálra merőleges ütés hatására energiát elnyelve szilánkosan törnének. Végelemes módszerrel vizsgáltam tömör és üreges szállal erősített kompozit mikromechanikai modelleket. A számítások alapján alátámasztottam az üreges szálerősítés előnyét.

Üreges szállal erősített kompozit lemezek szálüregeit töltöttem jelzőfolyadékkal valamint telítetlen-poliészter gyantával és térhálósítójával. Így vizsgáltam a jelző funkciót és a próbatestek öngyógyuló képességét. A jelző folyadék hatására az állapotellenőrzés gyorsan elvégezhető egy UV lámpa segítségével, amivel egyértelműen látszik a repedés, amelyek az üreges szálakat is eltörte. Az üreges szálak töltése javította a próbatestek hajlítási tulajdonságait és ütésállóságát. Ejtősúlyos berendezéssel roncsoltam a kézi laminálással és VARTM módszerrel gyártott próbatesteket, majd 60 és 23°C-os hőmérsékleten 12 és 120

órán keresztül hagytam térhálósodni a gyógyító folyadékot, és bebizonyítottam, hogy a poliészter gyantával töltött szálak segítségével az öngyógyulás megoldható abban a hőmérséklettartományban, ahol a gyanta térhálósodni képes. Pásztázó elektronmikroszkóp segítségével vizsgáltam a roncsolás során kialakult repedéseket, és megállapítottam, hogy a poliészter gyanta a repedésekben térhálósodva visszaállította a szerkezet integritását, így javítva a kompozit hajlító tulajdonságait.

Az általam fejlesztett anyagok gyakorlati alkalmazását a BME Formula Racing Team versenyautójának kormányán mutattam be. Üreges szálakat töltöttem jelzőfolyadékkal a kompozitba építés előtt, és a végeselemes vizsgálatokkal meghatározott kritikus területeket erősítettem velük. Fárasztóvizsgálatokkal mikrorepedéseket hoztam létre, amelyek szabad szemmel láthatatlanok voltak, viszont UV fény alatt egyértelműen kirajzolódtak a repedések a jelzőfolyadék hatására. A BME Formula Racing Team-mel indultunk a Formula Student Hungary keretein belül meghirdetett „Győr city’s special award for innovation” pályázaton az általam fejlesztett állapotjelző funkcióval ellátott kormányral, és sikeresen megnyertük az elismerést a nemzetközi porondon.

## 5. Új tudományos eredmények – tézisek

A kísérleti és modellezési eredményeim alapján az alábbi téziseket fogalmaztam meg.

**1. Tézis.** Továbbfejlesztettem a szálak hajlítómerevségének vizsgálatára meglévő mérési eljárást és ehhez új kiértékelési módszert dolgoztam ki. A Holden által levezetett nagy alakváltozású lehajlás összefüggést pontosítottam azzal, hogy a szálvégek függőleges irányú elmozdulásán felül a vízszintes irányú elmozdulását is mértem. Bebizonyítottam, hogy a modulus számításához szükséges  $\Omega$  paraméter értéke számítható, ami pontosabb a korábban alkalmazott görbéről való leolvasásnál. Korlát függvényeket vezettem be, amivel kiszűrhetőek a mérési hibákból adódó pontatlan eredmények. A statisztikus módszereket összehasonlítva megállapítottam, hogy az egyedi koordináták módszere a legelőnyösebb a mérések kiértékelésére [2, 9].

**2. Tézis.** Mérésekkel kimutattam és vége-selemes modellezéssel igazoltam az üreges szálerősítés előnyeit a tömör szálhoz képest, miszerint kompozitba építve azonos száltérfogat százalék esetén az üregesség miatt 20%-kal kisebb tömeg érhető el (13  $\mu\text{m}$  külső átmérő, 8  $\mu\text{m}$  belső átmérő esetében), amely 150%-kal nagyobb sűrűségre vonatkoztatott szilárdságot és 22%-kal nagyobb sűrűségre vonatkoztatott moduluszt jelent [2, 5, 7, 8].

**3. Tézis.** Üreges szálak feltöltésére új, vákuumzsákot alkalmazó technikákat fejlesztettem ki: egyrészt többkomponensű gyógyító folyadék kompozit lemez üreges szálaiba töltésére, amellyel az eddigi módszerekkel ellentétben egy oldalról több komponens is feltölthető a különböző szálakba, másrészt egy olyan vákuumzsákos módszert, amellyel az üreges szálak már a kompozitba építés előtt feltölthetők folyadékkal úgy, hogy azok tetszőleges elrendezésben beépíthetők akár rövid, akár hosszú vágott szálak formában.

**a.** Kísérletileg igazoltam az üreges szállal erősített kompozit lemezek töltésénél, hogy az új módszerrel szabályozható a gyógyító folyadék két-, vagy több komponensének aránya a feltöltött szálak elválasztásával még 100:5-ös tömegarány esetén is, amelyet az üreges szálak több lépésben való töltésével lehet elérni [3].

**b.** Megállapítottam, hogy kompozitba építés előtt különböző folyadékkal töltött üreges szálak arányát pontosan be lehet állítani a tömeg alapján, és a megfelelő arányú

töltött szálakkal a tetszőleges alakú, méretű kompozit termék öngyógyulóvá alakítható. Egy konkrét kompozit termék (Formula Student versenyautó kormány) példáján bebizonyítottam, hogy a szálakba töltött folyadék a repedést feltölti [9].

**4. Tézis.** Kimutattam, hogy vékony üreges üvegszállal (13  $\mu\text{m}$  külső átmérő, 8  $\mu\text{m}$  belső átmérő) erősített epoxi gyanta mátrixú kompozit lemezek hajlítoszilárdságát és hajlító rugalmassági modulusát a szálak üregeinek folyékony poliészter gyantakomponenssel való megtöltése az alkalmazott gyártástechnológiáktól függően 3-15%-kal javítja, amely a folyadék összenyomhatatlanságából fakad. A töltés hatására az ütésállóság is 28-250%-kal javul az alkalmazott gyártástechnológiától (kézi laminálás, VARTM) függően, amely annak köszönhető, hogy a folyékony poliésztergyanta belső-, és szál falával való súrlódása csillapító hatású [3, 5].

**5. Tézis.** Bebizonyítottam, hogy üreges üvegszál erősítésű epoxi gyanta mátrixú kompozitoknál az öngyógyulás nem csak a mátrix anyagával érhető el, hanem attól különböző pl. poliészter gyantával is, amelynek gyantakomponense és iniciátora külön-külön üreges szálakba van feltöltve. A töltött üreges üvegszál erősítésű kompozit próbatestek részleges ejtdárdás roncsolásával és azt követő hajlítóvizsgálatával kimutattam, hogy a gyógyulást követően a hajlítoszilárdság és a hajlító rugalmassági modulus is több mint 20%-ot javult a roncsolt állapothoz képest [1, 3, 7].

**6. Tézis.** A nemzetközi szakirodalomban található korábbi fejlesztésekben bemutatott vastag üreges szállal (külső átmérő:  $30 < d_k < 1150 \mu\text{m}$ ) erősített öngyógyuló kompozitokkal szemben bebizonyítottam, hogy vékony üreges szálak (13  $\mu\text{m}$  külső átmérő, 8  $\mu\text{m}$  belső átmérő) esetén, kevesebb jelző vagy gyógyító folyadékkal is lehetséges az öngyógyulás és az állapotjelzés. A vékony szálak nagy előnye, hogy a szálak szilárdsága nagyobb a vastag szálhoz képest, így tényleges erősítő szerepet tölt be [3, 9].

## 6. Saját közlemények jegyzéke

### *Idegen nyelvű lektorált cikkek*

- [1] **Kling S.**, Czigány T.: Analysis of applicability of the hollow carbon fibres for self-repairing composites. *Materials Science Forum*, 729, 246-251 (2013).
- [2] **Kling S.**, Czigány T.: A comparative analysis of hollow and solid glass fibers. *Textile Research Journal*, 83, 1764-1772 (2013). **IF=1,332**
- [3] **Kling S.**, Czigány T.: Damage detection and self-repair in hollow glass fiber fabric-reinforced epoxy composites via fiber filling. *Composites Science and Technology*, 99, 82-88 (2014). **IF<sub>2013</sub>=3,633**

### *Magyar nyelvű folyóiratcikk*

- [4] **Kling S.**: Kompozit ülés tervezése és gyártása a BME Formula Student 2012-es versenyaútójába. *Műanyag és Gumi*, 49, 453-458 (2012).
- [5] **Kling S.**, Czigány T.: Üreges, tömör és hibrid szálakkal erősített kompozit lemezek mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása. *Műanyag és Gumi*, 50, 222-226 (2013).

### *Konferenciatickek és előadások*

- [6] **Kling S.**: Designing and manufacturing the steering wheel of the BME formula student race car. *Gépészet 2010*. 612-617 (2010).
- [7] **Kling S.**, Czigány T.: Üreges üvegszálak vizsgálata, és öngyógyuló kompozitokhoz való használatának elemzése. *Erősített Műanyagok 2012. Nemzetközi Balaton Konferencia, Proceeding p5* (2012).
- [8] Czigány T., **Kling S.**: A comparative analysis of hollow and solid glass fiber reinforced composites. *ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials, Proceeding p7* (2012).
- [9] **Kling S.**: Üreges szálerősítésű kompozitok: a szálak mechanikai tulajdonságai, valamint öngyógyuló és állapotjelző kompozitokhoz való alkalmazása. *Erősített Műanyagok 2014. Nemzetközi Balatoni Konferencia, Proceeding p14* (2014).
- [10] **Kling S.**, Czigány T.: Üreges szénszálak alkalmazhatóságának elemzése öngyógyuló kompozitokhoz. *VIII. Országos Anyagtudományi Konferencia, 2011. október 9-11., Balatonkenese, Magyarország* (2011).