

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék

_ - -----

Bazaltszövettel erősített polimer mátrixú kompozitok fejlesztése

PhD értekezés

Készítette:

Tamás Péter okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Czigány Tibor egyetemi tanár

Nyilatkozat

Alulírott Tamás Péter kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával jelöltem.

Budapest, 2013.december 23.

Tamás Péter

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik munkájukkal, valamint hasznos tanácsaikkal elősegítették dolgozatom elkészítését. Szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek, Dr. Czigány Tibornak, kutatásom koordinálásáért, és hogy kialakította a tudományos kutatómunka szemléletemet. Köszönettel tartozom minden tanszéki és MTA kutatócsoporti kollegámnak, doktorandusz társaimnak és barátaimnak az értekezésem elkészítéséhez nyújtott szakmai segítségükért. Köszönettel tartozom diplomázó, TDK-zó, illetve szakdolgozatíró hallgatóimnak, akik a szakmai és baráti légkör megteremtésével nagymértékben hozzájárultak munkám sikeréhez. Kiemelt köszönettel tartozom Dr. Vas László Mihálynak a matematikai modellezésben nyújtott segítségért, Dr. Gergely Szilveszternek (BME-VBK Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék), Szolnoki Beátának, Bordácsné Botz Katalinnak, valamint Sóti Péternek (BME-VBK Szerves Kémia és Technológia Tanszék) a termogravimetriás és spektroszkópiás mérésekben kapott segítségükért. Köszönet illeti Dr. Miroslava Marsalkovát (Technical University in Liberec) és Dr. Marosfői Béla Botondot (FETI) a villamos mérésekben nyújtott segítségért.

Legvégül, de nem utolsó sorban köszönöm családomnak a sok támogatást és megértést, amivel biztosították számomra a PhD értekezés elkészítéséhez szükséges nyugodt és kiegyensúlyozott légkört.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program támogatja.

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölés- és rövidítésjegyzék	6
1. Bevezetés	
2. Irodalmi áttekintés	
2.1. Polimer kompozitok	12
2.1.1. Polimer kompozitok jellemző mátrixanyagai	
2.1.2. Polimer kompozitok legelterjedtebb erősítőanyagai	15
2.2. Polimer kompozitok tipikus erősítőstruktúrái	
2.3. Bazaltszállal és bazaltszövettel erősített kompozitok	24
2.4. Hibrid polimer kompozitok	27
2.4.1. Szén/üvegszálas hibridek	
2.4.2. Szén/aramidszálas hibridek	
2.4.3. Természetes szálas hibridek	
2.4.4. Bazaltszálas hibridek	
2.4.5. Alkalmazási példák	
2.5. Hibridkompozitok használata a megújuló energiaforrások területén	34
2.6. Irodalomkutatás kritikai elemzése, az értekezés célja	
3. Alkalmazott anyagok, technológiák és vizsgálati módszerek	
3.1. Felhasznált anyagok	<i>3</i> 8
3.2. A kompozitok készítésének technológiája	
3.3. Alkalmazott anyagvizsgálati módszerek	
4. Kísérleti rész	
4.1. Előkísérletek	47
4.1.1. Erősítő- és töltőanyagok vizsgálata	
4.1.2. Unidirekcionális mono- és hibridkompozitok vizsgálata	
4.2. Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok vizsgálata	54
4.3. Környezeti tényezők hatásai a hibridkompozitokra	61
4.3.1. A hőmérséklet hatása	

4.3.2. Az UV sugárzás hatása	66
4.4. A sós-vizes kezelés hatása a hibridkompozitokra	69
4.5. Hibridkompozitok szigetelőképességének vizsgálata	78
4.6. Hibridkompozitok rétegközi nyírószilárdságának javítása	81
4.7. Az ismétlődő igénybevétel hatása a hibridkompozitokra	85
4.7.1. Ciklikus húzás modellezése	88
4.7.2. Ciklikus hajlítás modellezése	97
5. Összefoglalás	103
5.1. Eredmények hasznosulása	105
5.2. Tézisek	106
5.3. További megoldásra váró feladatok	108
6. Irodalomjegyzék	109
7. Mellékletek	118
7.1. A 4.2. fejezet mellékletei	118
7.2. A 4.3.1. fejezet mellékletei	119
7.3. A 4.3.2. fejezet mellékletei	120
7.4. A 4.4. fejezet mellékletei	122
7.5. A 4.5. fejezet mellékletei	126
7.6. A 4.6. fejezet mellékletei	126

Jelölés- és rövidítésjegyzék

Alkalmazott jelölések:

а	[mm]	repedéshossz fűrésszel és pengével hornyolt együttese			
А	[mm ²]	felület			
A_1	[mm]	generáló szorzótényező			
At	[mm]	anyagtényező			
В	[-]	generáló konstans			
b	[mm]	próbatestek szélessége			
b_v	[-]	vetülékirányú bedolgozódás			
bı	[-]	láncirányú bedolgozódás			
b _x	[-]	átlagos fonalbedolgozódás			
C _x	[mm]	kötéscella x-irányú méretei			
cy	[mm]	kötéscella y-irányú méretei			
d_{av}	[µm]	átlagos szálátmérő			
$d_{k}\left(t,t_{0} ight)$	[-]	ablakfüggvény			
d _x	[mm]	szövetet felépítő fonalak x-irányú átmérője			
d_y	[mm]	szövetet felépítő fonalak y-irányú átmérője			
E	[MPa]	húzó rugalmassági modulus			
E (x)	[-]	valószínűségi változó középértéke			
E (t)	[GPa]	relaxációs modulus függvénye			
E_{f}	[GPa]	hajlító rugalmassági modulus			
E_{fe}	[GPa]	elemi szál rugalmassági modulusa			
E_{fr}	[GPa]	roving rugalmassági modulusa			
$E_{fsz} \\$	[GPa]	erősítőszövet rugalmassági modulusa			
E_m	[GPa]	rugalmassági modulus			
E_{max}	[J]	teljes törési energia			
f	[mm]	lehajlás			
F _{max}	[N]	mért legnagyobb erő			
h	[mm]	próbatestek vastagsága			
Iz	[kgm ²]	keresztmetszet z-tengelyre számolt tehetetlenségi nyomatéka			
KICstatikus	$[kJ/m^2]$	törési szívósság			
1	[mm]	hossz			
l (t)	[-]	egységugrás-függvény			
L	[mm]	alátámasztási távolság			
L ₀	[mm]	próbatest videoextenzométerhez kijelölt mérőhossza			
le	[mm]	elektródák közti távolság			
M (x,t)	[Nm]	nyomaték			

n	[db]	ciklusszám
Ν	[db]	rugóágak száma
n _e	[db]	elemi szálak száma
n _r	[db]	rovingok száma
0	[mm]	elektróda kerülete
P ₁	[W]	minta jelenlétében mért teljesítmény
P_2	[W]	minta nélkül mért teljesítmény
P_{H}	[-]	hibridkompozit tetszőleges mechanikai tulajdonsága
PI	[-]	I típusú monokompozitok tulajdonsága
PII	[-]	II típusú monokompozitok tulajdonsága
Q	$[g/m^2]$	szövet struktúra területi sűrűsége
R	[mm]	sugár
Rs	$[\Omega/mm]$	felületi ellenállás
R_V	$[\Omega/mm]$	térfogati ellenállás
$S_{\rm E}$	[dB]	elektromágneses árnyékoló-képesség
Se	[mm ²]	elektróda területe
Si	[mm]	elmozdulás
t_0	[s]	félperiódusidő
t	[s]	idő
V	[m ³]	térfogat
VI	[-]	az I típusú erősítőszálak térfogathányada
\mathbf{V}_{II}	[-]	a II típusú erősítőszálak térfogathányada
Х	[%]	deformáció gerjesztés
X_0	[mm]	maximális deformáció
$X_{n}(t)$	[mm]	gerjesztés
$\dot{\mathrm{X}}_{\mathrm{0}}$	[mm/perc]	fel- és leterhelési sebesség abszolút értéke
Y	[-]	generáló érték
Y (t)	[MPa]	feszültségválasz
ΔL_0	[mm]	próbatest hosszúságának növekedése a mérési jelek között
α_{cU}	[kJ/m ²]	Charpy-féle ütőszilárdság (bemetszés nélkül próbatestek esetén)
Efe	[%]	elemi szál szakadási nyúlása
ε _{fi}	[%]	relatív nyúlás
ε _{fr}	[mm]	roving szakadási nyúlása
Efsz	[mm]	erősítőszövet szakadási nyúlása
ε _m	[mm]	szakadási nyúlás
η	[Pas]	dinamikai viszkozitás
ρ_v	[Ωcm]	fajlagos térfogati ellenállás
ρ_s	[Ωcm]	fajlagos felületi ellenállás
$\sigma_{\rm f}$	[MPa]	hajlítófeszültség
σ_{fe}	[MPa]	elemi szál szakítószilárdsága

σ_{fr}	[MPa]	roving szakítószilárdsága
σ_{fsz}	[MPa]	erősítőszövet szakítószilárdsága
σ_{fM}	[MPa]	hajlítószilárdság
σ_{f1}	[MPa]	s1 elmozduláshoz tartozó feszültség
σ_{f2}	[MPa]	s2 elmozduláshoz tartozó feszültség
σ_{m}	[MPa]	húzószilárdság
σ_1	[MPa]	$\epsilon_1 = 0,0005$ nyúlásértéknél mért húzófeszültség
σ_2	[MPa]	$\epsilon_2 = 0,0025$ nyúlásértéknél mért húzófeszültség
τ	[-]	időállandó
<u>03</u>	[mm]	nyúlások oszlopvektora
<u>K</u>	[mm]	görbületek oszlopvektora
<u>N</u>	[N]	élerők oszlopvektora
M	[Nm]	élnyomatékok oszlopvektora
A	[MPa]	húzómerevségek mátrixa
<u>B</u>	[GPa]	kapcsolómerevségi mátrix
<u>D</u>	[GPa]	hajlítómerevségek mátrixa

Alkalmazott rövidítések:

ACCC	vezetőképes kompozit mag alumíniumból (Aluminum Conductor Composite Core)
AE	akusztikus emisszió
BFCFEP	bazalt-szénszállal erősített epoxi gyanta
BFEP	bazaltszállal erősített epoxi gyanta
BFP	bazalt por
CFEP	szénszállal erősített epoxi gyanta
CNT	szén nanocső (Carbon Nano Tube)
CVD	kémiai gőzfázisú bevonatolás (Chemical Vapor Deposition)
EP	epoxi gyanta
FT-IR	Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia
GFCFEP	üveg-szénszállal erősített epoxi gyanta
GFEP	üvegszállal erősített epoxi gyanta
GpS	grafén (Graphene Sheet)
HMCF	nagy rugalmassági modulusú és kis nyúlású szénszál (High Modulus)
HTCF	nagy nyúlású és nagy szilárdságú szénszál (High Tension)
ILSS	rétegközi nyírószilárdság (Interlaminar Shear Strength)
IMCF	közepes modulusú és nyúlású szénszál (Intermediate Modulus)
IR	infravörös
NASA	Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (National Aeronautics and Space Administration)

PA	poliamid				
PAN	poli- akril- nitril				
PBT	poli(butilén-tereftalát)				
PE	polietilén				
PEEK	poliéter-éterketon				
PP	polipropilén				
RoHM	hibrid keverékszabály (Rule of hybride mixture)				
RTM	gyantainjektálás (Resin Transfer Molding)				
SEM	pásztázó elektronmikroszkópia (Scanning Electron Microscopy)				
SEN-T	egyoldalon bemetszett szakító próbatest vizsgálata (Single Edge Notched Tensile)				
UD	unidirekcionális erősítőstruktúra				
UP	telítetlen poliészter gyanta (Unsaturated Polyester)				
USD	amerikai dollár (United States Dollar)				
UV	ultraibolya				
VE	vinilészter gyanta				

1. Bevezetés

Életminőségünket jelentősen befolyásolják a bennünket körülvevő anyagok. Századunk a szintetikus anyagok korszaka, ahol fejlődő társadalmunk és iparunk egyre újabb és újabb anyagokat igényel. A korszerű műszaki anyagtudomány három alapvető csoportra, a fémek, a polimerek és a kerámiák családjára osztja a mérnöki anyagokat [1]. Ezek kombinált, társított rendszerei a kompozitok, amelyek egyesítik az egyes összetevők előnyös tulajdonságait. A kompozitok olyan szerkezeti anyagok, amelyekben a nagyszilárdságú erősítőanyag és a szívós mátrix között erős adhéziós kapcsolat van, amely a deformáció, az igénybevétel nagy szintjén is tartósan fennmarad [2]. A kompozitok nagy előnye, hogy alkalmazásukkal olyan tulajdonságok is elérhetők, amelyekkel a komponensek külön-külön nem rendelkeznek. A polimer kompozitok legelterjedtebb erősítőanyagai az üvegszál, a szénszál valamint az aramidszál, azonban egyre inkább teret hódítanak a természetes szálakkal erősített kompozitok is [3]. Mindössze az utóbbi két évtizedben került előtérbe a bazaltszál, mint a polimer kompozitok lehetséges erősítőanyaga [4, 5, 6]. A bazalt egy, a természetben sok helyütt megtalálható kőzetfajta, amely közvetlenül alkalmas szálgyártásra. Kémiai szerkezetét és tulajdonságait tekintve nagyon hasonló az üvegszálhoz. Régóta ismert, hogy a bazalt teljes egészében bioinert, nem káros az élő szervezetekre [7]. Kiváló mechanikai tulajdonságai, hő- és vegyszerállósága miatt, jó alternatívája lehet az azbesztnek és az üvegszálnak is. Folytonos bazaltszálak előállításával jellemzően Oroszországban, Ukrajnában és Izraelben foglalkoznak, azonban egyre inkább szaporodnak a különböző típusú bazaltszálak gyártásával foglakozó üzemek Kína területén és a nyugati országokban is [8].

A szálerősített kompozitok terén az erősítő struktúra jellemzően egy-, vagy kétdimenziós. Egydimenziós erősítő struktúrának tekinthető a szál vagy szálköteg (roving), kétdimenziósnak pedig a paplan és a szövet. A szál formájú bazalttal erősített kompozitokkal kiterjedt irodalom foglalkozik [9-10], azonban a bazaltszövet erősítésűekkel kapcsolatos szakirodalom csekély, holott a kompozitok gyakorlati alkalmazása során sokkal nagyobb szerepe van a különböző szöveteknek vagy egyéb kötött kelméknek, mivel ezek alkalmazásával az elkészítendő kompozit mechanikai tulajdonságait síkban vagy térben egyidejűleg több tetszőleges irányban is javítani tudjuk.

A polimer kompozitoknál is bizonyos esetben különleges igények merülhetnek fel, amelyeket az egyes előnyös tulajdonságok társításával érhetünk el. Ennek egyik legkézenfekvőbb módja az erősítőanyagok társítása, hibridizálása. Jelenleg a

PhD értekezés

szén/üvegszálas hibridkompozitok a legelterjedtebbek, mivel az üvegszál társításával egyrészt jelentősen csökkenthető a szénszálas kompozitok ára, másrészt nagymértékben javítható a szénszálas kompozit szívóssága és ütésállósága. A bazalt- és az üvegszál hasonlósága miatt könnyedén kiváltható lenne az üvegszál bazaltszállal. A bazaltszál az üvegszállal szemben sokkal ellenállóbb agresszívebb környezetben, köszönhetően a bazaltot felépítő kémiai elemeknek. Jobb hő- és időjárásállóságának köszönhetően a bazaltszál olyan speciális területeken is alkalmazható lenne, ahol az üvegszál - az extrém körülmények miatt - nem.

Az értekezésem célja a bazalt textíliával erősített polimer mátrixú kompozitok mechanikai, ciklikus terhelési és fizikai jellemzőinek meghatározása. További céljaim különböző multifunkciós bazaltszálas hibrid polimer kompozitok előállítása, vizsgálata és összehasonlítása egymással, valamint monoszálas kompozitokkal. A hibrid szálas kompozitok esetében az esetleges szinergetikus hatások feltárása és ezek kihasználása a kompozit termékekben, valamint a lehetséges alkalmazási területek szélesítése, kiváltképpen a megújuló energiaforrások területén (szél- és ár-apály erőművek).

2. Irodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben rövid áttekintést adok a polimer kompozitokról és előállítási technológiáikról, a leggyakrabban alkalmazott mátrix- és erősítőanyagokról, illetve erősítőstruktúrákról, kiemelve a különböző gyártástechnológiával készült bazaltszálakat. Ismertetem továbbá a mechanikai tulajdonságok összehasonlításához szükséges kompozit-mechanikai alapokat.

2.1. Polimer kompozitok

A polimer kompozitok definíciója szerint az erősítőszálak elsődleges feladata a teherviselés, a mátrixé a terhelés közvetítése, az erősítőszálak védelme és rögzítése [11]. A polimer kompozitok mechanikai tulajdonságai számításokkal előre meghatározhatók, figyelembe véve az anizotrópiát, a terhelés irányfüggését. Az erősítőanyagokat geometriájuk jellemzi a legáltalánosabban, ezért ezt felhasználva lehet őket csoportosítani. A különböző típusú anyagok geometriai jellemzésükben döntően az erősítőelemek hossza és átmérője, illetve ezek aránya játszik szerepet. Polimer kompozitok esetében a szál formájú erősítés a jellemző. A szál típusú erősítés esetében az anyagnak azt a tulajdonságát használjuk ki, hogy az anyag szilárdsága szál formájában jóval nagyobb, mint tömb formájában [2]. Ennek oka, hogy ha adott térfogatban adott számú hibahely található egyenletes eloszlásban, akkor a szál formájú anyagban kisebb az esélye, hogy egy kiválasztott keresztmetszet adott környezetében található hibahely. A kompozitok esetében a határfelületi adhéziónak kiemelkedő szerepe van, minősége jelentősen befolyásolja a kompozit mechanikai tulajdonságainak alakulását. A jó adhéziós kapcsolat két tényező nagy értéken tartásával érhető el. Az első a határfelületi nyírószilárdság, amely anyagpáronként meghatározott értéket vesz fel, és határfelületi kapcsolószerek alkalmazásával hatásosan javítható [12]. A másik tényező az erősítőanyag és a mátrix érintkezési felülete, amely az erősítő anyag megjelenési formájának helyes megválasztásával növelhető. Az egységnyi térfogatra vonatkoztatott felület – hengeres alapgeometria feltételezése mellett – az (1) szerint írható fel:

$$\frac{A}{V} = \frac{2R^2 \cdot \pi + 2R \cdot \pi \cdot l}{R^2 \cdot \pi \cdot l} = \frac{2}{l} + \frac{2}{R}$$
(1)

ahol *A* a hengeres erősítő anyag külső felülete, *V* a térfogata, *R* a sugara, *l* a hossza. Az így felírható térfogatra vonatkoztatott felület l >> R, amely egy kis átmérőjű szálnak, l << R esetében korongnak felel meg. A korong formájú erősítéssel kapcsolatban számos kutatás ismert, azonban technikailag a szálforma valósítható meg egyszerűbben, és egyéb előnyei miatt ez terjedt el kompozitok erősítő anyagaként. Napjainkban is számos kutatás folyik, például: a nanométeres egyedi rétegvastagságú szemcsés rétegszilikát anyagok eloszlatása kompozitokba [13-18]. Összefoglalva, erősítő hatásról csak akkor beszélhetünk, ha vagy a hosszméret jóval nagyobb az átmérőnél, vagy pedig az átmérő jóval nagyobb a hossznál. Abban az esetben, amikor az erősítőanyag hossz és átmérő aránya jellemzően egy nagyságrendbe tartozik ($l \approx R$), akkor inkább töltött rendszerekről beszélhetünk. A töltőanyag jótékonyan hathat például a lángállóságra [19, 20], csökkentheti a például fröccsöntéssel készülő termékek zsugorodását [21], sőt az önjavító polimerek estében is szerepet játszik a töltés (önjavító mikrokapszula, mint töltőanyag) [22], azonban a szilárdságot kevéssé javítja.

2.1.1. Polimer kompozitok jellemző mátrixanyagai

Az erősített polimereket olyan szerkezeti anyagként foghatjuk fel, amelyeknél az egyes alkotóelemek (mátrix, erősítőanyag) meghatározott feladatokat látnak el [23]. A különböző kompozitok mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolják a mátrixanyagok tulajdonságai is. Az alkalmazott mátrixanyagok lehetnek hőre lágyulóak és hőre nem lágyulók (térhálósak).

A kompozitok elkészítéséhez leggyakrabban alkalmazott hőre lágyuló műanyag a polipropilén (PP), a poliamid (PA), a polietilén (PE) és a poli(butilén-tereftalát) (PBT) [24], amelyek legfőbb tulajdonságait a 1. táblázat [2, 25] mutatja.

Anyag/Jellemző	Rugalmassági modulus	Szakító- szilárdság	Szakadási nyúlás	Sűrűség	Egységár 2013
	[GPa]	[MPa]	[%]	[g/cm ³]	[HUF/kg]
Polipropilén	1,5	30	150	0,91	~250
Poliamid	2,7	80	50	1,13	550-1000
Poli (butilén-tereftalát)	2,5	80	4	1,30	~400
Polietilén	0,5	20	500	0,93	~230

1. táblázat Legelterjedtebb hőre lágyuló kompozit mátrixanyagok főbb tulajdonságai [2,25]

PhD értekezés

A polipropilén (PP) térbelileg szabályozott (sztereoreguláris) szerkezetének köszönhetőn jó rugalmassági modulussal, kis szakadási nyúlással, valamint viszonylag nagy hőállósággal rendelkezik. Nagy hátránya a nagy üvegesedési átmeneti hőmérséklete (0°C), amely azonban PE kopolimerizációjával csökkenthető. Fő alkalmazási területei a gépkocsi műszerfal, lökhárító, valamint háztartási gépek burkolata. A poliamidok (PA) általános jellemzői a kedvező mechanikai tulajdonságok, a jó ütés- és kopásállóság, nagy hőállóság. Hátrányai a nedvességérzékenység, a viszonylag szűk olvadási hőmérséklet-tartomány, valamint a rossz savállóság. Mechanikai tulajdonságai jóval meghaladják a PP tulajdonságait, kivéve a szakadási nyúlást; ára többszöröse a PP árának. Fő alkalmazási területei siklóelemek, orsók, fogaskerekek, nagy mechanikai igénybevételű alkatrészek. A poliétilén (PE) is az úgynevezett "tömegműanyagok" közé sorolható, a legegyszerűbb és a legnagyobb mennyiségben előállított szintetikus polimercsalád. Nagy előnyei közé tartozik a könnyű feldolgozhatóság, a jó szigetelőképesség, a jó ütés- és vegyszerállóság, aminek következtében előszeretettel használják az élelmiszeriparban jellemzően is, csomagolóanyagok és különböző tároló eszközök elkészítéséhez. A poli(butilén-tereftalát) (PBT) nagy keménységgel, nagy ütőszilárdsággal és kopásállósággal rendelkezik, valamint jó hőállóság és villamos ellenálló-képesség jellemzi. Nagy minőségi színvonalú és mechanikai igénybevételnek kitett fröccsöntött darabokat gyártanak elsősorban a villamosés elektronikai ipar, a gépjárműipar, valamint háztartási készülékek céljára.

A térhálós mátrixanyagok közül a legelterjedtebb a poliészter (UP), a vinilészter (VE) és az epoxi gyanta (EP). A három legelterjedtebb térhálós gyantát és ezek legfontosabb tulajdonságait a 2. táblázat [2, 26] mutatja.

Anyag\Jellemző	Rugalmassági modulus	Szakító- szilárdság	Szakadási nyúlás	Sűrűség	Egységár 2013
	[GPa]	[MPa]	[%]	[g/cm ³]	[HUF/kg]
Poliészter gyanta	4,0	51	2	1,70	1400
Vinilészter gyanta	3,7	50	3	1,72	3700
Epoxi gyanta	3,9	48	25	1,14	4700

2. táblázat A legelterjedtebb térhálós mátrixanyagok főbb tulajdonságai [2, 26]

A telítetlen poliészter gyanták (UP) a polimer kompozitok korai térhálós mátrixanyagai, előnyei a jó mechanikai tulajdonságok, jó hőállóság, jó megmunkálhatóság,

PhD értekezés

időjárásállóság, hátránya a zsugorodási hajlama és nagy sztiroltartalma. A térhálós gyanták közül a legelterjedtebb alacsony ára miatt. A vinilészter gyanta (VE) mechanikai tulajdonságait tekintve az UP gyantához mérhető, ára valamivel az UP gyanta ára felett van, mivel vegyszerállóbb és kevésbé öregszik. Az epoxi gyanta (EP) jó tapadási, kitűnő mechanikai, vegyszerállósági és időjárás-állósági tulajdonságai miatt kiterjedt alkalmazási területtel bír (hajózás, autóipar, repülőgépipar, stb.). Az ára az UP gyanták többszöröse, ezért csak nagy minőségi követelményű helyeken használják. Ezek mellett még jelentős a különböző karbamid [27], furán [28], fenol [29] és melamin [30] gyanták alkalmazása és fejlesztése is.

2.1.2. Polimer kompozitok legelterjedtebb erősítőanyagai

A polimer kompozitokat felépítő erősítőanyagok közül a leggyakrabban alkalmazottak az üveg-, a szén- és az aramidszál, azonban a különböző természetes (kender-, len-, szizálszál), illetve természetes eredetű szálak (bazaltszál) felhasználása is növekvő tendenciát mutat.

Üvegszál

Az üveg, mint szerkezeti anyag, a szilikátok családjába tartozik, amely szervetlen, amorf szerkezetű. Fő építőeleme a szilícium-oxid (SiO₂), ez adja az üvegek 53-72%-át. Emellett tartalmaz egyéb fémoxidokat is, főleg CaO, Al₂O₃, MgO, Na₂O, B₂O₃ alkotókat, de ezek az oxidok együtt a szilícium dioxiddal lényegében egyetlen térhálós óriásmolekulává egyesülnek, elsődleges (primer), azaz nagy kohéziós energiát képviselő kovalens- és ionos kötésekkel [2]. Az üvegszálak jó termikus tulajdonságokkal rendelkeznek, mivel a polimereknél nagyobb hőmérsékleten, 650-850°C között lágyulnak [31]. A folytonos elemi szálak átmérője általában 8-14 μm közötti [32]. A felhasználási céloktól függően különböző kémiai összetételű üvegből készítenek szálakat (3. táblázat) [33, 34].

	E-üveg	S-üveg	C-üveg	D-üveg
Rug. modulus [GPa]	73	87	85	52
Szakítószilárdság [MPa]	3450	4900	4600	2450
Szakadási nyúlás [%]	4,8	5,4	5,0	4,6

3. táblázat Üvegszál típusok főbb mechanikai tulajdonságai [33, 34]

Az E-üveget jó elektromos szigetelőképesség, a D-üveget kis dielektromos állandó, az Süveget nagy szilárdság, a C-üveget jó korrózióállóság jellemzi. A műszaki üvegszálak közül a műanyagok erősítésére a viszonylag olcsó, E-üveg vált be a legjobban, az erősítő anyagok többsége ebből készül, de nagyobb szilárdsági igények esetén a drágább S-üveget használják.

Beletskii és társai [35] különböző gyártók üvegszálai esetében vizsgálták az egyes anyagok kémiai összetételét és viszkozitási tulajdonságait, valamint az adhéziós tulajdonságait a gyártási paraméterek függvényében. Azt tapasztalták, hogy az egyes üvegszál-típusok kémiai összetevői jelentősen befolyásolják a gyártás közbeni üveg-olvadék viszkozitását. Kimutatták, hogy a gyártás során fellépő – az elemi szálakat érő – erők aránya nagy hatással van a szálak folytonosságára és felületi jellemzőire. Feih és társai [36] Eüvegszálak mechanikai tulajdonságinak romlását vizsgálták a hőmérséklet hatására. Bebizonyították, hogy már viszonylag kis hőmérséklet mellett végzett rövid idejű hőkezelés is nagymértékben rontja az üvegszál mechanikai tulajdonságait. A mechanikai tulajdonságok romlása már 200°C hőmérsékleten megkezdődik. 650°C-on történő hőkezelés után az üvegszál szilárdsága az eredeti szilárdság mindössze néhány százalékára esik vissza. Stepanova és társai [37] akusztikus emissziós eljárással vizsgálták különböző üvegszálas kompozitok ismétlődő húzó-igénybevétellel szembeni viselkedését. Azt tapasztalták, hogy az állandó nagyságú ciklikus terhelés során a vizsgálati idővel együtt növekedett a próbatestek nyúlása. A vizsgálatok során az AE jelek száma is folyamatosan nőtt a fárasztási vizsgálat ciklusszámával. Naceri [38] üvegszálas epoxigyanta mátrixú kompozitok esetében vizsgálta a nedvesség szakítószilárdságra gyakorolt hatását. Három eltérő nedvességtartalmú közegben mérte a kompozitok lánc- és vetülékirányú szilárdságát, rugalmassági modulusát és nyúlását. A mérései kimutatták, hogy a páratartalom növekedésével folyamatosan romlottak a mechanikai tulajdonságok. A legdrasztikusabb változás 96%-os relatív páratartalom mellett volt megfigyelhető.

Szénszál

A szénszálak az 1970-es években jelentek meg, az űrkutatás és a repülőgép gyártás nagy szilárdságú alapanyagaként [39]. A szénszálak esetén a rendkívül nagy grafitszilárdságot és nagy rugalmassági modulust használjuk ki. Szénszálaknak nevezik azokat a szálas-anyagokat, amelyek szerves szénvegyületekből pirolitikus úton (úgy lehet elszenesíteni, hogy közben nem olvad meg és nem ég el) állítanak elő [31]. Előállításuk szerint a szénszálak lehetnek viszkóz-, akril- és kátrányalapúak. A szénszál leggyakrabban használt előterméke (prekurzora) a poli(-akril- nitril) (PAN) szál. A stabilizálás során az akrilszálakat feszítés közben 200-250°C-os hőhatásnak teszik ki. Ezt követően az elszenesítés (karbonizálás) során az oxidált szálat 250-1500°C-os kemencékben kezelik inert gázban, így a szál széntartalma megnövekszik. A folyamat utolsó lépcsőjében a karbonizált szálat 1500-2500°C-on inert gázban (argonban) grafitizálják. A karbonszál tipikusan 40000 darab 7-8 µm átmérőjű elemi szálat tartalmazó kötegben (tow) készül és kerül karbonizálásra. A kereskedelmi forgalomban kapható szénszálakat két nagy csoportba oszthatjuk: PAN és kátrány alapúakra [40]. A gyártás egyre növekvő mennyiségének köszönhetően [41] jelenleg a PAN alapú szénszálak nyújtják a legjobb ár/teljesítmény arányt. A különböző típusú szálak mechanikai tulajdonságait a 4. táblázat [40] mutatja. A szénszálak legelterjedtebb kiszerelési formája a szövet, amelyet egyaránt alkalmaznak dekorációs és szerkezeti erősítés céljára. Napjainkra, a gyártókapacitás növekedésének köszönhetően, a szénszál ára jelentősen lecsökkent a kezdeti 500 USD/kg körüli értékről (1980) kevesebb, mint a huszadára [41]. Az ár csökkenésének következtében egyre szélesebb körben alkalmazzák a sportszergyártástól az építőiparon át az autóiparig a mindennapi élet egyre több területén. A PAN szál alapú szénszálak modulusa kisebb, szakadási nyúlásuk azonban nagyobb, mint a kátrány alapúaké, a kevésbé rendezett grafitos struktúra miatt. A HM (High Modulus - nagy modulusú) típusú szénszálat nagy rugalmassági modulus és kis nyúlás, az IM (Intermediate Modulus - közepes modulusú) jelűt közepes modulus és közepes nyúlás, a HT (High Tension - nagy nyúlású) típusút nagy nyúlás és nagy szilárdság jellemzi. A kátrány alapú szénszálak jobban grafitizálhatók, ezért nagyobb rugalmassági modulust lehet velük elérni. A kátrány költséges tisztítása miatt azonban a kátrány alapú szálak ára magasabb, mint a PAN alapúaké.

	PAN alapú HM	PAN alapú IM	PAN alapú HT	Kátrány alapú
Rug. modulus [GPa]	340-520	230-300	230-300	140-900
Szakítósziladság [MPa]	1700-2750	3100-4400	4150-5700	1400-2200
Szakadási nyúlás [%]	0,4-0,7	1,3-1,6	1,7-1,9	0,2-1,0

4. táblázat Szénszál típusok főbb mechanikai tulajdonságai [40]

HM (High Modulus) nagy modulusú szénszál, IM (Intermediate Modulus) közepes modulusú szénszál, HT (High Tension) nagy nyúlású szénszál

Szczypta és társai [42] a szénszál PAN prekurzorát szén nanocső töltéssel módosították. A módosított és normál előgyártmányból készült szénszálak tulajdonságait hasonlították össze. A nanocsövek hatására növekedetett a prekurzor szálak kristályossága és hőállósága oxidatív környezetben. A nanocsövek kis mértékben rontották a szénszálak szilárdságát, azonban növelték a rugalmassági modulust. Vieille és társai [43] a környezeti hatások szénszövettel erősített epoxigyanta mátrixú kompozitokra gyakorolt hatásaival foglalkoztak. Kétféle környezetben öregítették az anyagokat. A nedvesség és hőmérséklet együttes hatására javult a kompozitok ütésállósága, azonban romlott a szál-mátrix adhézió. A mechanikai tulajdonságok romlása hornyolt próbatest esetében tíz százalékkal nagyobb volt, mint hornyolatlan esetben. Gude és társai [44] szénszállal erősített epoxi gyanta mátrixú kompozitok többciklusú vizsgálatával foglalkoztak, ahol tanulmányozták a különböző tönkremeneteli módokat is. Vizsgálataik során kimutatták, hogy a felületkezelésnek nagy hatása van a minták élettartamára és szálirányú mechanikai tulajdonságaira is.

Aramidszál

Az aramidszálak, akárcsak az üvegszálak és a szénszálak a nagy teljesítményű szálak legrégebbi és legjelentősebb csoportját alkotják. Az aramidszál olyan műszál, amelyben a polimer olyan hosszú láncú aromás poliamid, ahol az amid csoportoknak legalább 85%-a közvetlenül két aromás gyűrűvel kapcsolódik [45]. Az aramid szálak lehetnek aromásak és alifásak. A két anyagcsalád között a legfontosabb különbségek, hogy az aromás poliamidok vegyszerállóbbak, hőállóbbak, nagyobb az üvegesedési átmeneti és olvadási hőmérsékletük, és mechanikai tulajdonságaik is jobbak, mint az alifás poliamidoknak.

A polimerek erősítő anyagaként, illetve gumiipari erősítő anyagként alkalmazott Kevlar[®] 29 és 49 típusú fonalak mechanikai tulajdonságait és üvegesedési átmeneti hőmérsékleteit az 5. táblázat [46-48] tartalmazza az alifás Nylon[®]-nal összevetve. Az aramid szálak viszonylag jól tűrik a ciklikus terhelést, bár a felületükön fibrillálódás léphet fel, főleg szövet szerkezet esetén, ahol a szálak elmozdulhatnak egymáson [49, 50]. Kúszási hajlamuk nem jelentős, azoban UV állóságuk igen gyenge.

	Kevlar® 29	Kevlar® 49	Nylon [®]
Rug. modulus [GPa]	62	124	5,5
Szakítószilárdság [MPa]	2760	2760	986
Szakadási nyúlás [%]	4	2,5	18,3

5. táblázat Az aromás poliamid szálak, valamint a Nylon[®] szál mechanikai tulajdonságai [46-48]

Bazaltszál

A bazalt igen gyakori, vulkanikus eredetű felszíni kőzet. Vegyi összetételét tekintve legfontosabb alkotóelemei a SiO₂, az Al₂O₃, a CaO, az MgO, a FeO és a Fe₂O₃. A bazaltokat SiO₂ tartalmuk alapján három csoportra osztjuk: 42 tömegszázalék (m%) SiO₂ alatt alkáli, 43 és 46 m% között közepesen savas, 46 m% fölött savas bazaltról beszélünk. A bazalt jobban ellenáll az erős lúgoknak, mint az üveg, de az erős savakkal szemben kevésbé ellenálló. A bazaltszál legfontosabb előnyei közé tartozik, hogy kiváló villamos szigetelő, csekély a nedvességfelvétele, természetes anyag, bioinert, nem irritatív és környezetkímélő. A bazaltszálak egészségügyi és környezetvédelmi szempontból gyakorlatilag veszélytelenek [51]. A bazaltot régóta alkalmazzák bazaltgyapotként, hő- és hangszigetelési célból, valamint kompozitokban is eredményesen alkalmazható erősítőanyagként [52]. A bazaltszál alkalmazás anak lehetősége először a volt Szovjetunióban merült fel az űrhajózással kapcsolatosan (az űrhajós szkafander egyik rétege). Ma is Oroszországban és Ukrajnában állítják elő a legnagyobb mennyiségben a kimondottan erősítőanyagnak szánt bazaltszálat. Napjainkra számos kísérleti és kereskedelmi forgalomban kapható kompozit terméket készítenek folytonos bazaltszál, vagy az abból készült szövet felhasználásával.

A bazaltszál előállítása általában egylépcsős technológiai folyamat, közvetlenül a zúzott bazaltkő felhasználásával történik. A Junkers eljárással (1. ábra) [3] egyszerűen és olcsón lehet rövid bazaltszálat előállítani, de ezek a szálak viszonylag gyengébb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Az ilyen típusú technológiák lényege, hogy a bazaltolvadékot egy forgó acélhengerekkel (ún. centrifugafejekkel) felszerelt szálazóberendezésre vezetik. A fejekre tapadt filmből a centrifugális erő hatására cseppek válnak le, és a fűvókákból rábocsátott nagysebességű levegőáramban a folyadékból szálat húznak. A szálgyártási művelet során képződő szálak fokozatosan lehűlnek és a szálhossztól függően a végeiken kisebb-nagyobb szálfejek maradnak, amelyek lokálisan növelik ugyan a szakítószilárdságot, azonban a letört szálfejek töltőanyagként (feszültségkoncentráló gyenge helyként) viselkedve a repedések kiindulási pontjaiként szolgálhatnak [53]. A kialakuló szálak mechanikai tulajdonságai jelentős mértékben függhetnek a technológia paramétereitől, amelynek köszönhetően a mai napig is kutatások folynak ezzel kapcsolatban [54]. Szálhúzással drágább, de jobb mechanikai jellemzőkkel bíró, folytonos szálat lehet gyártani. A technológia vázlatát a 2. ábra [55] szemlélteti.



1. ábra Junkers-féle szálgyártási technológia vázlata [3] (1-megolvasztott bazalt, 2-levegő fúvókák, 3-gyorsító henger, 4-szálazó hengerek, 5-cseppek, 6-8-szálképződés folyamata, 9- szál, 10-szálfej)

A bazaltkő megolvasztása két lépésben történik: az elsődleges kemencében (5) olvadékállapotba kerül a kőzet, innen egy gáton átfolyva kerül a kisebb méretű és pontos hőmérséklet-szabályozással ellátott másodlagos kemencébe (6), majd onnan közvetlenül a szálhúzó fejen (7) vezetik keresztül, a fejből kijövő szálakat kötegelik (8). Ezután a szálakat a megfelelő szálátmérő eléréséhez nyújtják (9), majd felületkezelő szerekkel vonják be (10), legvégül pedig feltekercselik (11) [56].



2. ábra A bazaltszál-gyártás egyszerűsített folyamata [54]

1. zúzottkő-tároló, 2. adagoló, 3. továbbító, 4. szakaszos adagoló, 5. elsődleges olvasztó szakasz, 6. másodlagos olvasztó szakasz pontos hőmérséklet-szabályozással, 7. szálképző fejek, 8. szálköteg képző, 9. szálak nyújtása, 10. felületkezelő felhordás, 11. automatikus csévélő A szálgyártási technológia jelentőségét jól szemléltetik Gur'ev-nek és munkatársainak [57] a kutatásai, akik különböző gyártási technológiáknak a szál mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálták. Három alapvető technológiát hasonlítottak össze: a gáztüzelésű kemencében olvasztott bazaltkőből történő szálhúzást, a duplex eljárást, valamint a fúvásos eljárást 400°C-os, illetve szobahőmérsékletű levegővel (6. táblázat) [57]. Az úgynevezett duplex eljárás annyiban különbözik a normál szálhúzásos eljárástól, hogy a szálak kialakítása után levegőt fújnak rájuk, amelynek hatására a szálak egyrészt megnyúlnak, másrészt gyorsabban lehűlnek.

Jellemző tulajdonság	Gyártástechnológia			
	Húzás	Duplex	Fúvás, a levegő hőmérséklete	
			400°C	25°C
Szálátmérő [µm]	12,2	10,1	6,3	14,8
Szakítószilárdság [MPa]	2880	731	840	656
Rugalmassági modulus [GPa]	91,9	66,8	71,9	34,9
Szakadási nyúlás [%]	3,29	1,12	1,17	1,90

6. táblázat A gyártástechnológiák összehasonlítása a száltulajdonságok alapján [57]

A bazaltszálak szakítószilárdságát a gyártástechnológia mellett számos további tényező befolyásolja, mint például a kémiai összetétel, a szálátmérő, a szálszerkezeti inhomogenitások. A bazaltszálak szakítószilárdsága és rugalmassági modulusa közvetlenül az előállítás után a legnagyobb, majd idővel fokozatosan csökken. Ez annak a következménye, hogy az előállítás során a gyors lehűléskor a szálban nem egyensúlyi szövetszerkezet alakul ki. Később a szövetszerkezet egyensúlyi állapotra törekszik, így egy lágyulási folyamaton megy át, amelyet a kompozit gyártása és feldolgozás során fellépő nagy hőmérséklet jelentős mértékben meggyorsít. Ezt a folyamatot szálöregedésnek nevezik. A bazaltszál azért őrzi meg nagyobb mértékben a kezdeti jellemzőit, mert a benne lévő vasoxidok gócképzőként viselkedve finom és viszonylag homogén kristályos szerkezet kialakulását segítik elő [58].

2.2. Polimer kompozitok tipikus erősítőstruktúrái

A szálerősítésű kompozit anyagok erősítőanyagait szabályos vagy szabálytalan szálas-rostos erősítő struktúrájú textilipari eljárásokkal alakítják ki. A szálakból felépülő textiltermékek legjobban a termékdimenzió alapján osztályozhatók [59].

Az egydimenziós erősítőanyagokról általánosan elmondhatóak, hogy a tér egyik irányában jóval nagyobb a szilárdságuk, mint a többiben. Ezek felépülhetnek közvetlenül szálakból, fonalból, illetve lehetnek összetett szalagok vagy kötelek. A tér egy kitüntetett irányban erősítőszálakat tartalmazó erősítőanyagot idegen szóval unidirekcionális struktúrának nevezzük. Kétdimenziós erősítőanyagokról beszélünk, ha a struktúra egy sík köré sűrűsödve épül fel erősítőszálakból. Az erősítőszalak lehetnek szabályos és szabálytalan elhelyezkedésűek is. Kétdimenziós erősítőszerkezet a szálpaplan, a szövet, a fonatolt lap és a különböző kötött kelmék. A háromdimenziós erősítőanyagok a tér minden irányában tartalmaznak erősítőszálakat. Ezek a textiltermékek készülhetnek lapok összekapcsolásával, fonatolással vagy szövéssel. Jelen értekezés a kétdimenziós, azok közül is a szövettel erősített kompozitokkal foglalkozik, ezért a továbbiakban ennek jellemzőit, valamint a kompozitra gyakorolt hatásait tárgyalom, a kötésminta, a rétegrend, valamint a rétegszám befolyását a szilárdságra.

Napjainkban a műszaki gyakorlatban legelterjedtebben alkalmazott egydimenziós erősítőanyagok a rovingok és a szalagok, kétdimenziósak a szálpaplanok és különböző szövetek (általában 0/90 típusú), háromdimenziósak a tűzött kelmék és az ún. PARABEAM[®]. Ez utóbbi egy háromdimenziós üvegszövet, amelyben az egyes rétegek között keresztkötések találhatóak. A gyantával történő átitatás hatására az egyes rétegek megemelkednek. A térhálósodási reakció lezajlását követően szilárd, merev és nagy hajlítómerevségű lemezt kapunk.

Az erősítő szövet a lánc- és vetülékfonalak egymást keresztező rendszere. A legegyszerűbb szövetszerkezet típus az úgynevezett vászon szövet, amelyben egyszer a lánc, egyszer a vetülékfonal van fent (3. ábra) [60]. Az ábrán a kereszttel jelölt pontok azokat a kötéspontokat mutatják, ahol a láncfonal a felső. A különböző szövetfelépítések más és más jellegzetességet kölcsönöznek a szöveteknek.



3. ábra A vászon szövet struktúrája [60]

A fonalakból előállított szabályos lap szerkezetét a kötéspontok, azaz a fonalak egymással vagy önmagukkal való kereszteződése és azok rendszere határozza meg. A kereszteződések törvényszerűségeit a szövetek kötéstana foglalja össze [61-64]. A mintaelem a kötésszerkezet olyan legkisebb része, amelynek két merőleges irányú eltolásával a teljes minta felépíthető. A vetületi mintaelem legkisebb része a kötéscella, amit szomszédos kötéspontok határolnak (4. ábra) [59]. A műszaki gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott szövetstruktúrákat az 5. ábra [65] mutatja.



4. ábra Szerkezeti mintázat vetületi rácsszerkezete és kötéscellája téglarács esetében [59] (cx, cy a kötéscella főirányú méretei; dx dy a szövetet felépítő fonalak átmérője)



5. ábra A legjellemzőbb szövetstruktúrák [65] a) vászonkötés b) panamakötés c) láncripsz d) vetülékripsz e) sávolykötés f) ékalakú sávoly g) láncatlasz h) vetülékatlasz

Ismeretes, hogy a textil szövetek mechanikai tulajdonságai általában nem-lineáris viselkedést mutatnak. Ezt a nemlinearitást a szövet deformáció hatására bekövetkező szerkezeti változása indukálja. A deformációs komponensek meghatározására különböző

elméleteket dolgoztak ki, amelyek közül a legismertebbek Kawabata és munkatársai nevéhez fűződnek [66-69].

Durva közelítéssel a szövet húzószilárdsága megegyezik a terhelés irányában álló egyes fonalak egyedi húzószilárdságainak összegével. A szövött szerkezetek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata során tapasztalható hiszterézis egyrészt a szálak, másrészt a fonalak közötti súrlódásból ered. A hiszterézishez kisebb mértékben a szálak viszkoelasztikus tulajdonságai is hozzájárulnak. A szövött szerkezet viszkoelasztikus viselkedése jelentősen függ a fonalakat és a szövetet felépítő elemi szálak tulajdonságaitól, amíg a szövet szövési struktúrájának kisebb a hatása. A szálak viszkoelasztikussága közvetlenül befolyásolja a szövet viszkoelasztikusságát, anélkül, hogy hatással lenne a szövet szerkezetére [64].

Bishop és Curtis [70] szénszálas epoxigyanta mátrixú kompozitok esetében vizsgálták a szőtt és nem-szőtt erősítőszerkezet, valamint a szálorientáció hatását, húzó, nyomó és ejtősúlyos vizsgálatokkal. Az ejtősúlyos mérések azt mutatták, hogy becsapódás után a károsodási zóna szövet erősítés esetén sokkal kisebb, mint a nem-szőtt esetben, mert a szövet gátolta a repedésterjedést és a delaminációt. Az adatok szerint a szövet jelentősen javította a nyomó- és a húzószilárdságot. A vizsgálatok alapján a legjobb fáradással szembeni ellenállással és ütésállósággal a $\pm 45^{\circ}$ rétegrendű laminátumok rendelkeztek.

Műszaki szempontból a különböző szövetekkel erősített kompozitok egyre nagyobb jelentőséggel bírnak. A mérnöki gyakorlatban elengedhetetlen az anyagok tulajdonságainak tudatos módosítása, amelyeket mechanikai tervezés után lehet elvégezni. A teherviselő kompozit elemek általában több rétegből épülnek fel, amelyeket mechanikai értelemben rétegelt lemezként lehet felfogni. A rétegelt lemezek klasszikus elmélete Kirchoff nevéhez fűződik [71].

2.3. Bazaltszállal és bazaltszövettel erősített kompozitok

A különböző szálerősítésű kompozitok térnyerésének köszönhetően a bazaltszállal és bazaltszövettel erősített kompozitok elterjedése jósolható. Előnyös tulajdonságai révén olyan helyeken is teret nyerhetnek, ahol eddig egyáltalán nem, vagy csak kis mértékben használtak polimer kompozitokat. A bazaltszál a drágább szálas anyagokat is kiválthatja, köszönhetően kiváló hőálló-képességének, ami a szilícium-oxid mellett megtalálható fémes elemek okoznak. Ebben a fejezetben a különböző bazaltszálas kompozitok alkalmazhatóságának elemzésével foglalkozom, illetve bemutatom a már gyakorlatban is használt bazaltszállal erősített anyagokat.

A bazaltszál kémiai összetétele nagyon hasonló az üvegszáléhoz, sűrűsége mindössze 5%-kal nagyobb, ennek ellenére mechanikai tulajdonságai mégis jobbak. Mindkét szálnak az alapját a SiO₂ képezi, azonban a bazaltszálban található sok más összetevő hatására a bazalt jobban ellenáll az erős lúgoknak, a nagy hőmérsékletnek, valamint a sós-víznek, mint az üvegszál, ennek köszönhetően az építészetben nagymértékű elterjedése várható. Újabban már betonba ágyazott üvegszálat is alkalmaznak, ahol azt beton burkolólemezek erősítésére használják. Ebben az esetben az üvegszál nem okoz szignifikáns szilárdságnövekedést, azonban előnyösen javítja a beton alakváltozó-képességét. Az üvegszálas beton a hagyományos betonhoz képest szívósabb, jobb az energiaelnyelő képessége, kisebb a repedésterjedési hajlama, nagyobb a kifáradási határa. Szövet formában általában nem ágyazzák betonba, sokkal inkább külső burkoló-, héjrétegként tekercseléssel vagy ragasztással rögzítik különböző szerkezeti elemekre, ezáltal akár földrengés-biztos épületek is készíthetőek. Mindkét esetben drágább – a lúgkorróziónak ellenálló – üvegszálat használnak, bazaltszál esetében az efajta agresszív közeg nem okozna problémát. Wei és társai [72, 73] az üveg- és a bazaltszál mechanikai tulajdonságainak változását vizsgálták sósavas és nátrium-hidroxidos kezelés hatására. Méréseik szerint a bazaltszál tömegcsökkenése kisebb volt, mint az üvegszálé, mind a savas, mind pedig a lúgos kezelés esetén. Mindkét erősítőanyag kevésbé állt ellen a nátrium-hidroxidos kezelésnek, amelyet a húzószilárdság változása is jól bizonyít. Az irodalmi adatok azt mutatják [74, 75], hogy a bazaltszál kopásállósága kivételesen jó, valamint teljes egészében bioinert, nem káros a környezetére, ezért fékbetétekben történő használatra is alkalmas [76].

Kiváló hőállósága és hőstabilitása okán alkalmas nagyobb hőmérséklettartományú működésre is [77]. Akár hőálló ajtószerkezetekben is használható, mint hő- és hangszigetelő réteg. Szintén felhasználható füstgázelvezető kéményekben, mint béléstest, hiszen ebben az esetben nem csak hőterhelésnek, de nagyfokú korróziónak is ki van téve az anyag. Mindezek mellett a szűréstechnikában is alkalmazható lenne nagy hőmérsékletű, agresszív környezetben [76].

A bazaltszál szálköteg és szövet formában is kiválóan alkalmazható erősítőanyagként polimer kompozitokban, mivel vegyi összetétele hasonló az üvegszáléhoz, ezáltal az üvegszálnál alkalmazott felületkezelés a bazaltszál esetében is célravezető [78]. A hajó- és az úgynevezett offshore szélerőművek gyártása területén is optimális erősítőanyag lehetne, mivel a tengeri levegő, valamint a különböző környezeti hatások (pl.: UV sugárzás) igencsak próbára teszik a polimer kompozitok erősítőszálait. Wei és társai [79] kutatásuk során állandó koncentrációjú sós vízben áztatták a próbatesteket, majd vizsgálták a környezet húzó- és hajlítószilárdságra gyakorolt hatását. Azt tapasztalták, hogy a bazaltszállal erősített epoxigyanta mátrixú kompozit sokkal jobban ellenáll a sós vizes környezet öregítő hatásának, mint az üvegszálas társa. Nagy szilícium-oxid tartalma [56] miatti szigetelőképessége alkalmassá teheti rádió- és radar-, valamint elektrotechnikai alkalmazásra is. Szigetelőképessége révén, olyan területeken is alkalmazható, ahol sugárzás veszélye is fennáll (röntgen). A bazaltszál felhasználásával hibrid erősítőszöveteket készítve (pl.: szén/bazalt) jelentősen csökkenteni lehet az erősítőanyag árát, a mechanikai tulajdonságok csekély romlása mellett. A felsorolt alkalmazási területeken kívül még számos más területen várható a bazaltszállal és bazaltszövettel erősített kompozitok elterjedése. Összességében kimondható, hogy a bazaltszál szinte teljes egészében képes lenne kiváltani az üvegszálat. Prognosztizálható, hogy az elkövetkező néhány évtizedben ugrásszerűen meg fognak szaporodni a bazaltszál gyártásával foglalkozó üzemek, ami a bazaltszál árának további csökkenéséhez vezethet.

A műszaki alkalmazások területén a bazaltszállal – a már felsorolt pozitív jellemzői miatt – egyre gyakrabban lehet találkozni. Az útépítésben bizonyos helyeken bazaltszálból készült hálókat helyeznek az aszfalt réteg alá és az aszfaltrétegbe, ezáltal javítva az útburkolat kis hőmérséklettel szembeni ellenállóságát [76, 80]. A kereskedelmi forgalomban tekercseléssel készülő bazaltszállal erősített epoxigyanta mátrixú nyomásálló gáztartályokat is találhatunk. Ezzel csökkentik a tartály gyártási költségeit, mivel korábban drágább Süvegszálat használtak erősítőanyagként [81]. Az autóiparban már közel 5 éve használnak bazaltszálat hő- és hangszigetelésre [74]. A kipufogórendszernél korábban üvegszálas kompozitokat alkalmaztak, azonban a nagy hőmérséklet és ciklikus igénybevétel tönkretette ezeket az alkatrészeket. Ekkor merült fel az igény a bazaltszál iránt, amelynek nagyobb a hőállósága és jobban tűri az ismétlődő igénybevételeket is. A nemzetközi, - Formula Student elnevezésű – egyetemek közti versenyautó konstrukciós versenyben is megjelent már a bazaltszál kísérleti jellegű alkalmazása [82, 83], ami újabb perspektívákat nyit meg a bazalt erősítőanyagként történő, szélesebb körű alkalmazása felé. A sportszergyártók is felfigyeltek a bazaltszál előnyös tulajdonságaira. A Wilson cég keresekedelmi forgalomban kapható BLX termékcsaládjában már megjelenik a bazaltszál alkalmazása, ahol arany szálakkal társítva kivételes rezgéscsillapító-képességű kompozitot voltak képesek létrehozni [84]. Már a bútoriparban is találhatunk példát bazaltszálas kompozitok alkalmazására, ahol egyedileg, kézzel készített környezetbarát kültéri bútorokat készítenek kis sorozatban bazaltszál és természetes alapú gyanták felhasználásával [85].

2.4. Hibrid polimer kompozitok

A hibridkompozitok fejlesztésére napjainkban nagy figyelem összpontosul. A kompozitok kétféle módon lehetnek hibridek, egyrészt az erősítőanyag, másrészt a mátrixanyag oldaláról. A kettő, vagy több különböző erősítőszál kombinálásának lehetősége polimer mátrixú kompozitokban, vagyis a hibridszálas kompozitok már régóta kutatott terület. A kutatások fő motivációja a szálakban rejlő előnyös tulajdonságok kombinálása (szinergetikus hatás elérése), az ár és a teljesítmény optimalizálása, valamint újabban az egyre szigorúbb környezetvédelmi követelményeknek való megfelelés.

Shalin megfogalmazása szerint [86] a hibridkompozitok öt nagy csoportra bonthatóak. A kevert (averaged) szálas hibridkompozitoknál a különböző típusú szálak a befoglaló mátrixanyag egészében keverten, mindenféle rendezettség nélkül helyezkednek el. A rétegen belüli (intralaminar) hibridkompozitok esetében a különböző szálak egy adott rétegen belül meghatározott rendezettségben helyezkednek el (az egyes rétegek önmagukban is hibridkompozitok). Az rétegközi (interlaminar) hibridkompozit annyiban különbözik ettől, hogy egy rétegben csak egyféle erősítőanyag kap helyet, de a különböző rétegek adott sorrendben követik egymást, így a kompozit szerkezet a különböző monokompozit rétegek egymásra helyezésével válik hibriddé. A negyedik csoportba a különálló erősítőelemek (separate reinforcing elements) tartoznak, ami magába foglalja a különálló erősítő sávokat, merevítő bordákat. Az utolsó, a szuperhibridek (superhybrids) esetében a polimer kompozit rétegek és fémlemezek vagy fóliák meghatározott minta szerint követik egymást.

Míg a polimer kompozitok tulajdonságainak meghatározására célra vezető lehet az egyszerű keverékszabály alkalmazása, addig ez az eljárás a hibridkompozitok esetében igen nagy eltéréseket eredményezhet a mért tulajdonságokhoz képest. Ennek kiküszöbölésére az ún. hibrid keverékszabály (RoHM - Rule of hybride mixture) (2) [87] ad lehetőséget:

$$P_{H} = P_{I} \cdot V_{1} + P_{II} \cdot V_{II} \tag{2}$$

ahol P_H a hibridkompozit tetszőleges mechanikai, P_I , P_{II} az I és a II monokompozitok tulajdonsága, V_I , V_{II} az I és a II erősítőszálak térfogathányada ($V_1 + V_{II} = 1$) [87]. Shan és Liao [88] kimutatták, hogy a hibrid keverékszabály csak közelítő eredményeket ad olyan esetekben, ahol az erősítőanyagok szakadási nyúlásai között jelentős különbség van, így a 6. ábra [88] segítségével pontosították azt. A 6. ábrán az A pont jelöli a nagy, míg a D pont a kis nyúlású erősítőszálas monokompozit szakítószilárdságát. Így az AD egyenes a hibrid keverékszabályt adja, a BD egyenes a kis, az AE egyenes pedig a nagy nyúlású szál tönkremeneteléhez tartozó szilárdságot mutatja a hibridkompozitban. Ezek alapján a 2-es görbén a C ponttól jobbra (CD egyenes) a kisebb nyúlású szál domináns, míg a C ponttól balra (AC egyenes) a nagyobb nyúlású szál a meghatározó.



6. ábra A szilárdság modellezése különböző szakadási nyúlású erősítőszálas hibridkompozitoknál [88]

Az új megközelítés szerint tehát, akkor beszélünk pozitív hibridhatásról, ha a mért érték az ACD szakasz fölé esik. Üveg/szén hibridszálas epoxi gyanta mátrixú kompozitok esetében a C pont 10% üveg/90% szén szálaránynál található [88].

A rétegközi (interlaminar) hibridkompozitok mechanikai tulajdonságainak meghatározására a Kirchoff nevéhez fűződő vékony rétegelt lemezek elmélete ad igazán pontos eredményt. Ebbe az elméletbe átültetve a rétegközi hibridkompozitok definícióját, az egyes monokompozit rétegek a rétegelt lemez egyes rétegeiként foghatóak fel (7. ábra) [11]. Ebben az esetben a rétegelt lemezek mátrixegyenletét (3) [89] használhatjuk:

$$\begin{bmatrix} \underline{N} \\ \underline{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{A}} & \underline{\underline{B}} \\ \underline{\underline{B}} & \underline{\underline{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\varepsilon}_0 \\ \underline{\kappa} \end{bmatrix}$$
(3)

ahol <u>N</u> az élerők, <u>M</u> az élnyomatékok, $\underline{\varepsilon}_0$ a nyúlások, <u>k</u> a görbületek oszlopvektora, <u>A</u> a húzómerevségek, <u>D</u> a hajlítómerevségek mátrixa, <u>B</u> a kapcsolómerevségi mátrix. A húzó-, a

hajlítómerevségek mátrixa és a kapcsolómerevségi mátrix a kompozitot felépítő rétegek, jelen esetben a monokompozit rétegek elrendezéséből számítható.



7. ábra Rétegközi (interlaminar) hibridkompozitok Kirchoff-féle modellje [11]

A rétegen belüli (intralaminar) hibridkompozitok jellemzésére az úgynevezett mozaik modellt lehet használni, amelyet Ishikawa és Chou [90] alkotott meg. A modell a szövetet keresztezett szögállású egységekre bontja [91]. Első lépésként a rovingokból álló szerkezetet (8. ábra a) egymásra merőleges rétegekre bontja, majd a rétegek kereszteződésénél két réteget alkot (0° és 90°-osat). Sávolykötésű szerkezettel erősített kompozit mintaelem mozaik modelljét a 8. ábra b) része mutatja.



a) rétegre bontás, b) sávolykötés mintaeleme

A rovingok folyamatosságát és egyenletlenségét a hullámossági modell vette elsőként figyelembe [92]. A szövet ismétlődő elemét három részegység írta le: az egymásra merőlegesen elhelyezkedő kétrétegű egység, a hullámos szögállású egység, illetve egy tisztán mátrixanyagot feltételező részegység. A mozaik és a hullámossági modell a kétdimenziós erősítőanyagot egydimenziósnak kezelhető csíkokra osztva, lényegében 1D-s modellt alkotott. A mozaik és hullámossági modellt együtt alkalmazva megalkotott kapcsolt modell alkalmas sávolykötésű rendszerek mechanikai tulajdonságainak pontosabb leírására [93]. A manapság kifejlesztett összetett, bonyolult modellek alkalmasak tönkremeneteli folyamatok és idő vagy hőmérsékletfüggő viselkedések leírására [94].

A szakirodalmat tanulmányozva nagyszámú hibridkompozitokkal foglalkozó írás található, amelyeket négy nagy csoportba lehet osztani az anyagpárosítások szerint.

2.4.1. Szén/üvegszálas hibridek

A műszaki gyakorlatban a leggyakrabban alkalmazott erősítőanyag párosítás az üvegés a szénszál. A szénszál üvegszállal történő hibridizációjával nagymértékben csökkenthető a szénszálas kompozitok ára és javítható ütésállóságuk.

Tsai és társai [95] a nedvesség és hőmérséklet hatását vizsgálták rúdszerű unidirekcionális szén-üvegszál erősítésű epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok termikus és mechanikai tulajdonságaira. A próbatesteket 32 héten keresztül tartották ioncserélt vízben más-más hőmérsékleteken, megállapították, anyagonként majd hogy nagyobb hőmérsékleten az anyag sokkal több nedvességet vett fel. Vizsgálták a nedvességtartalom átmenet hőmérsékletre és nyírószilárdságra gyakorolt hatását. üvegesedési А nedvességtartalom növekedésével jelentősen csökkent mindkettő. Naik és társai [96] atlasz szén- és vászon üvegszövetből készített epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok, valamint epoxigyanta mátrixú atlasz szén-, vászon szén- és vászon üvegszövet monokompozitok nyomó igénybevétel hatására mutatott viselkedését tanulmányozták vastagság-, lánc- és vetülékirányban. A méréseik alapján a nyomószilárdság a deformációval arányosan alakváltozással hatására növekedett. Nagy járó terhelés a hibridkompozit nyomószilárdságára nagyobb értéket kaptak, mint a szénszövettel erősített monokompozitok esetében. A hibridizáció hatására a monokompozitokhoz képest megnövekedett a deformáció. Megállapították, hogy a nyomószilárdság vastagságirányban jelentősen nagyobb, mint lánc- és vetülékirányban. Sayer és társai [97] epoxigyanta mátrixú üveg/szénszálas hibridkompozitok ütésállóságának vizsgálatával foglalkoztak. Megállapították, hogy kisebb vizsgálati energia értékek mellett a kompozit jellemző tönkremeneteli forma a mátrix-deformáció és a delamináció, amíg nagyobb energiánál a szálszakadás volt. Kimutatták, hogy a különböző anyagú rétegek sorrendje is befolyásolja az anyag energiaelnyelő képességét. Abban az esetben, amikor a szénszálas réteg burkolta az üvegszálast, kisebb energiaelnyelő képességet mértek, mint fordított esetben. Burks és társai [98] pultrudált, hajlító igénybevételnek kitett, üveg-szénszál erősítésű epoxigyanta mátrixú hibridkompozit magos alumínium köpenyes (ACCC - Aluminum Conductor Composite Core) nagyfeszültségű távvezetéket vizsgálták. Az anyag viselkedését végeselemes módszerrel is modellezték. Kimutatták, hogy a távvezeték nyomószilárdsága sokkal kisebb, mint a húzószilárdsága. Megállapították, hogy a hibrid mag összetétele nagymértékben befolyásolja a szerkezetben ébredő feszültségeket. Abban az esetben, amikor a magban az üvegszál aránya nagyobb volt, sokkal kisebb axiális feszültség ébredt. Megfigyelték, hogy túlzottan kisméretű mag esetében az ébredő nyomófeszültség hatására nagy kiterjedésű rétegelválások keletkeztek.

Fu és társai [99] fröccsöntéssel gyártott különböző száltartalmú, rövid üveg- és szénszállal erősített polipropilén mátrixú hibridkompozitok vizsgálatával foglakoztak. A mérések során kapott adatok azt mutatták, hogy az anyaguk viselkedését kis szénszáltartalom mellett jól leírja a hibrid keverékszabály (2) [87]. A szénszál nagyobb aránya esetén a mérések nagyobb húzószilárdság értékeket mutattak, mint a RoHM használatával kapottak. Megfigyelték, hogy a szénszál-tartalom növekedésével arányosan növekedett a húzószilárdság és a rugalmassági modulus; a szakadási nyúlás fordítottan arányosan változott.

2.4.2. Szén/aramidszálas hibridek

A szén/aramid szálak párosítása nem az árak mérséklése miatt fontos. Az aramidszál – jól ismert szívóssága és kiváló ütésállósága révén – kiválóan kompenzálja a szénszálas kompozit ridegségét. Ennek köszönhetően a szénszálas kompozitok ütésállósága az eredeti értékének többszörösére is nőhet. Az ilyen típusú kompozitok alkalmazása éppen az áruk miatt korlátozott, ezért jellemzően high-tech területeken használják őket.

Kasano [100] epoxigyanta mátrixú szén/aramid szálakkal erősített kompozitok esetében vizsgálta a szénszál tartalom és rétegek elhelyezésének mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását. Mérései alapján a szénszál-tartalom növelésével mind a húzó-, mind pedig a hajlító modulus növekedett, csakúgy, mint a húzás során ébredő kritikus feszültség. Méréseiben a törési szívósság nagyobb értéket ért el, amikor az aramidszálas réteg burkolta a szénszálasat, mint fordított esetben. Khojin és társai [101] a hőmérséklet hatását vizsgálták kézi laminálással készített aramid-szén hibrid- és monoszálerősítésű epoxigyanta mátrixú kompozitok mechanikai tulajdonságaira. A vizsgálatokat -50, 20, 70, 120°C hőmérsékleteken végezték, mérték az elnyelt energia és a maradó szilárdság értékét

(15, 25, 45 J energiájú terhelés után). Minden hőmérsékleten a hibrid szálerősítésű rendszer mutatta a legjobb energiaelnyelő képességet és maradó szilárdságot. Kimutatták, hogy a hőmérséklet növekedésével csökkent a maradó szilárdság és növekedett az elnyelt energia.

2.4.3. Természetes szálas hibridek

De Rosa és társai [102] gyantainjektálásos technológiával (RTM – Resin Transfer Molding) készített juta-üvegszál erősítésű hibridszálas poliészter mátrixú kompozitok ütésszerű terhelés utáni mechanikai tulajdonságaival foglalkoztak. A próbatesteket két különböző rétegrenddel készítették és vizsgálták ezeknek hatását. Azt tapasztalták, hogy a szendvicsszerkezetű hibridkompozitoknál az ütésszerű terhelés után megmaradó szilárdság nagyobb volt, mint a másik típusú rétegrend esetén. Atiqua és társai [103] kutatásuk során kenaf- és üvegszállal erősített poliészter mátrixú hibridkompozit rendszereket vizsgáltak húzó-, hajlító- és Izod típusú ütővizsgálattal. Megállapították, hogy a legjobb ellenállóképességet a 15-15 V% arányú kenaf-üvegszál erősítés biztosította. Pásztázó elektronmikroszkópi (SEM) felvételekkel kimutatták, hogy a jellemző tönkrementeli forma a szálszakadás és a szál-mátrix elválás volt. Thwe és társai [104] bambusz- és üvegszállal erősített hibridkompozitok nedves környezetben történő öregítésével és fárasztó vizsgálatával foglalkoztak. Eredményeik szerint a nedves környezet minden esetben csökkentette az anyagaik húzószilárdságát és rugalmassági modulusát. Vizsgálatai alapján a bambusz hozzáadása javította az üvegszálas kompozitok fárasztó igénybevétellel szembeni ellenálló-képességét, valamint az üvegszál hatására javul a bambusszal erősített minta ellenálló-képessége a nedves környezettel szemben.

2.4.4. Bazaltszálas hibridek

Artemenko és Kadykova [105] szén-üveg és szén-bazalt hibridszálakkal erősített fenol-formaldehid gyanta mátrixú hibrid- és monokompozitok mechanikai tulajdonságait, keménységét és vízfelvételét vizsgálták. A bazaltszállal erősített rendszerek az üvegszállal erősítettekhez képest 58-60%-kal jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. Az anyagok 2 órán át tartó ioncserélt vízben történő áztatása nem változtatta meg a mechanikai tulajdonságokat. Kimutatták, hogy az üvegszállal történő hibridizáció, a szénszálas monokompozithoz képest, 44-50%-kal rontotta a szilárdságot, amíg a bazaltszál mindössze 14%-os szilárdságcsökkenést eredményezett. Wang és munkatársai [106] vákuuminfúziós

PhD értekezés

eljárással készítettek bazalt-aramidszállal erősített intralamináris interés hibridkompozitokat. Kis sebességű méréseik során vizsgálták ezek lánc- és vetülékirányú tulajdonságait. Eredményeik alapján kimondható, hogy mindkét irányban a duktilitási index, ütőszilárdság és az elnyelt teljes energia értékek az interlamináris hibridek esetében nagyobbak, mint intralamináris esetben. A károsodás utáni optikai vizsgálatokkal kimutatták, hogy az interlamináris kompozitok rétegről-rétegre mentek tönkre (nagyobb elnyelt energia), ezzel szemben az intralamináris hibridek ridegen viselkedtek (jelentősen kisebb elnyelt energia). Petrucci és társai [107] kutatásaik során bazalt-, valamint üvegszálat tartalmazó természetes szálas (len, kender) epoxi gyanta mátrixú hibridkompozitokat vizsgáltak. Az elkészített anyagok mechanikai tulajdonságait húzó, hajlító, valamint rétegközi nyíróvizsgálattal elemezték. Kimutatták, hogy a hibrid minták közül az üvegbazalt-lenszállal erősített kompozitok rendelkeznek a legkiemelkedőbb mechanikai tulajdonságokkal. A SEM vizsgálatok alapján a len szálak adhéziója megfelelő volt az epoxi gyantával, a kender szálak estén azonban az erősítőanyag és a mátrix anyag gyenge kapcsolatot alakítottak ki egymással. Sarasini és társai [108] munkájuk során bazalt és aramid szövettel erősített kompozitok vizsgálatát tűzték ki célul. Első lépésben az RTM technológiával készített kompozitokat különböző energiával ütésszerű igénybevételnek tették ki, majd hajlító vizsgálatokkal elemezték a különböző anyagok hatását a maradó szilárdságra. Vizsgálatai szerint a bazaltszövettel erősített minták gyengén álltak ellen az ütésszerű igénybevételeknek, amit a hibridizálás javított. Kimutatták, hogy a rétegrend jelentősen befolyásolja a maradó szilárdságot. Vizsgálataik szerint az általuk elkészített váltakozó rétegrendű minták sokkal jobban ellenálltak, mint a szendvics szerkezetűek.

2.4.5. Alkalmazási példák

A hibridkompozitok fejlesztésére és alkalmazására nem csak az anyagkutatás ad példákat, gyakorlati alkalmazásuk is jelentős. Használatuk nagyon széles körben elterjedt; a vízi járművektől a hidakon, tartályokon át egészen a szélerőművekig [109-114]. Zhu és társai [115] acél csövek és tartályok helyett alkalmaztak üveg/szén hibridszálas epoxi mátrixú kompozit csövet és tartályt. Vizsgálataikban kimutatták, hogy ezeknek a kompozit elemeknek a korrózióállóságuk és megfelelő szilárdsági tulajdonságuk mellett a kúszási viselkedésük is kiváló. Hagyományos fém alkatrészek helyett többen fonatolt aramid/szén/epoxi hibridkompozit anyagból gyártott csövek és profilok alkalmazását javasolják, mivel azok kiváló energiaelnyelő képességgel és nagy szakítószilárdságal

rendelkeznek [116, 117]. A hibridkompozitok nagyon ígéretesnek bizonyulnak az elektromos autók esetében is, ahol a gyorsan forgó (25000 1/perc) lendkerék külső peremén alkalmazzák [118]. A legújabb fejlesztések során pedig szén/üveg epoxi mátrixú hibridkompozitból készítenek gépjármű kardántengelyt, amelynek köszönhetően a kisebb tömeg mellett nagyobb a rezgéselnyelő képessége [119]. Az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Légügyi és Űrhajózási Hivatala (NASA - National Aeronautics and Space Administration) által az űrsikló kilövésénél használt folyékony hidrogént tartalmazó gyorsítórakéta üzemanyagtartálya is hibridkompozitból készül [120]. A korábbi készítésűek szénszálas epoxigyanta héjrétegű alumínium méhsejt maganyagot tartalmazó szendvicsszerkezetűek voltak, a különböző hőtágulási együttható azonban a mátrixanyagban mikrorepedéseket okozott, ami nyomáscsökkenéshez és a tüzelőanyag felmelegedéséhez vezetett. Ezt elkerülendő többrétegű, speciális anyagokból, bonyolult rétegrendű interlamináris hibridkompozitokat készítettek.

A szakirodalom alapján jól látható, hogy a hibridkompozitok alkalmazási területe nagyon széleskörű, ipari alkalmazásuk azonban nem mindig gazdaságos. Megfelelő technológiai tervezéssel, rétegrenddel és új anyagok használatával (pl.: bazaltszál) áruk jelentősen csökkenthető, ezáltal új alkalmazási területeken való térhódításuk várható.

2.5. Hibridkompozitok használata a megújuló energiaforrások területén

A fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenésével egyre inkább előtérbe kerül a megújuló, környezetbarát energiaforrások használata és az ezekkel foglalkozó kutatások is [121]. A megújuló energiaforrásokat hat csoportra lehet bontani, amelyeket a 7. táblázat [122] foglal össze.

Energiaforrás	Energia átalakítás és használat típusa		
Vízenergia	villamos áram termelés		
Biomassza	hő- és villamo sáram termelés		
Geotermikus energia	település fűtés, villamos áram termelés		
Napenergia	vízmelegítés, fűtés, villamos áram termelés		
Szélenergia	villamos áram termelés, mechanikus energia termelés		
Ár-apály energia	villamos energia termelés		

7. táblázat A megújuló energiaforrások csoportosítása [122]

A szakirodalomban található publikációk alapján a közeljövőben az úgynevezett "zöld energia" felhasználása a mainak háromszorosára fog emelkedni [123, 124]. A szálerősített

PhD értekezés

mono- és hibridkompozitok felhasználása tekintetében a legfrekventáltabb energiacsoport a szélenergia, amelynek kihasználása folyamatosan emelkedő tendenciát mutat (9. ábra) [125].2011-ben egyedül csak az Egyesült Királyságban 487 off-shore szélturbina működött, amelyek összesen 1524 MW villamos energiát termeltek és további 937 darab állt építés vagy tervezés alatt [126].



9. ábra Globális szélenergia kihasználás kapacitása [125]

A szélturbinák számának elterjedéséhez és teljesítményének növekedéséhez kulcsfontosságú az egyes mozgó elemek tömegének minimalizálása, a szilárdság jelentős romlása nélkül. A rotor anyagául szolgáló kompozitokat korábban üveg- és szénszállal erősített poliésztergyantából készítették [127], napjainkban azonban epoxigyantára cserélték a mátrixanyagot [128]. Egy – manapság is használatos – 3 MW teljesítményű szélturbina rotorjának teljes tömege megközelítőleg 40 tonna, amelyből a szálerősített alkatrészek 20 tonnát tesznek ki [129]. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldtől távolabb, a tengerben helyezik el egymással összekapcsolva, a tengerfenékhez horgonyozva (off-shore rendszer). Az off-shore szélerőművek jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérséklet-ingadozás, az erős szél, a villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütésszerű és a fárasztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek [130-134]. Thomsen és társai [134] vizsgálataikkal rámutattak, hogy átlagos szélsebesség mellett (10 m/s) a lapátokra ható legnagyobb terhelés 0,5 Hz frekvencia esetén mérhető.

2.6. Irodalomkutatás kritikai elemzése, az értekezés célja

A bazaltszál már ismertetett különleges tulajdonságai (kiváló hő- és vegyszerálló, jó mechanikai tulajdonságok, jó szigetelő- és csillapító-képesség, nagy kopásállóság, széles hőmérséklettartományú alkalmazhatóság) miatt az elmúlt másfél évtizedben világszerte megnőtt a folytonos bazaltszálak és az abból készült termékek iránti kereslet és érdeklődés. Több országban (elsősorban a volt Szovjetunió területén) egyre nagyobb szálgyártó kapacitások jönnek létre, Európában és Észak-Amerikában, valamint Kínában pedig a bazaltszál felhasználásával készült félkész termékeket, egyebek között szöveteket előállító feldolgozó üzemek létesülnek. A folytonos bazaltszálak kompozit erősítőanyagként való felhasználása sok esetben kísérleti fázisban tart, ugyanakkor néhány ilyen alapanyagú termék már jelen van a piacon.

A bazaltszál, mint lehetséges kompozit erősítőanyag 1980-ban került be a köztudatba Subramanian és Austin [135] révén. Cikkükben rámutattak, hogy az általuk alkalmazott bazaltszálak alkalmasak lehetnek az üvegszál helyettesítésére a polimer mátrixú kompozitokban. Ezt bizonyítandóan vizsgálták a szál-mátrix határfelületi adhéziót. A bazaltszálas kompozitok elterjedését tovább segítette Goldsworthy [136] 2000-ben megjelent cikke is, amelyben a bazaltszálas kompozitok széleskörű elterjedését vetíti előre. A szakirodalomban bazaltszálakkal erősített kompozitokkal sok kutató foglalkozik, ami ugyancsak azt mutatja, hogy a bazaltszálban, mint kompozit erősítőanyagban nagy lehetőségek rejlenek. Chen és társai [137] szén-, üveg- és bazaltszállal erősített vasbeton anyagok vizsgálatával foglalkoztak. Ez a cikk is azt mutatja, hogy a bazaltszál alkalmazási terület igen széles. A szakirodalom rengeteg példát mutat a bazaltszálas kompozitokkal foglalkozó kutatásra, azonban a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitokkal foglalkozó szakirodalom nagyon szegényes és a méretezési és gyártási elveik sem kidolgozottak. Wang és társai [106] 3 dimenziós bazalt/aramid hibridkompozitok viselkedését vizsgálták kis sebességű ejtősúlyos terhelés esetén. A mérésekhez inter- és intralamináris hibrid rendszereket készítettek és energiaelnyelő képességét hasonlították lánc- és vetülékirányban össze. Ebben az esetben a dinamikus igénybevételek közül csak az ejtősúlyos vizsgálatot végezték el. Érdemes lett volna Charpy méréseket is végezni, mivel az ejtősúlyos méréssel kapott mérési eredmények mindig nagy hibával terheltek. A Charpy mérés elvégzésével jobban összehasonlíthatóvá válnának a különböző anyagok. A szakirodalmi áttekintés alapján kijelenthető, hogy a hibrid bazaltszövettel erősített kompozitokkal foglalkozó szakirodalom még szegényes, azonban - a bazaltszövet az
üvegszövethez hasonló tulajdonságai miatt – a hibrid bazaltszálas kutatási témák térnyerése prognosztizálható.

Az értekezésem célja a bazalt textíliával erősített polimer mátrixú kompozitok mechanikai, ciklikus terhelési és fizikai jellemzőinek meghatározása, célom még különböző hibrid bazaltszálas polimer kompozitok előállítása, vizsgálata és összehasonlítása egymással, valamint monoszálas kompozitokkal, továbbá a hibridszálas kompozitok esetében az esetleges szinergetikus hatások feltárása és ezek elemzése, reprodukálása. A fentiek alapján a munkám célja:

- térhálós mátrixú bazalt-, üveg- és szénszálas mono- és hibridkompozitok előállítása, tulajdonságaik vizsgálata és összehasonlítása, valamint a rétegközi nyírószilárdság javítása töltőanyagokkal.
- a bazaltszál jó hőállóságát kihasználva vizsgálni a hőmérséklet hatását a bazaltszövetre, valamint a bazaltszövettel erősített polimer mátrixú mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságaira, fizikai jellemzőire, azok alkalmazási területének szélesítése érdekében.
- a bazaltszál stabilitását alapul véve feltérképezni a bazaltszövet mechanikai tulajdonságainak változását a környezeti hatások függvényében, különös tekintettel az UV sugárzás hatásaira.
- vizsgálni a sós-vizes környezetben a bazaltszövet, illetve a felhasználásával készült kompozit mechanikai tulajdonságainak változását a tartózkodási idő és az oldat koncentráció függvényében. Ennek feltérképezésével lehetővé válik az ilyen kompozitok felhasználása erősen agresszív környezetben.
- a bazaltszál szakirodalomban található szigetelőképességet az elektronika területére átültetve megvizsgálni a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok villamos szigetelő-, valamint elektromágneses árnyékoló-képességét.
- a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok viselkedésének elemzése ciklikus húzó, valamint hajlító igénybevételek hatására, kis ciklusszám és nagy elmozdulások mellett, majd az eredmények alapján összefüggések felállítása, amelyekkel meghatározható a kompozit anyagok minősítő anyagjellemző.

3. Alkalmazott anyagok, technológiák és vizsgálati módszerek

Ebben a részben ismertetem az értekezés során a kompozitok elkészítéséhez felhasznált alapanyagokat és technológiákat. Bemutatom az elkészített anyagok vizsgálata során alkalmazott anyagvizsgálati módszereket.

3.1. Felhasznált anyagok

Mátrixanyagok

Az értekezésem során az Ipox Chemicals Kft. által készített MH3009 típusú biszfenola típusú általános célú lamináló epoxi gyantát ("A" komponens) alkalmaztam MH3120 típusú aminos térhálósítóval ("B" komponens). A gyanta alapvető tulajdonságait a 8. táblázat tartalmazza.

Ipox Ipox	Gyanta típusa	Dinamikai viszkozitás [mPas]	Térhálósító típusa	Dinamikai viszkozitás [mPas]	Keverési tömegarány	Gélesedési idő [perc]
MH3009 2000 MH3120 300 100·20 45	Ipox MH3009	2000	Ipox MH 3120	300	100.20	45

8. táblázat A felhasznált epoxigyanta és térhálósítószerének tulajdonságai

A komponensek tökéletes elegyedését kétlépcsős keveréssel biztosítottam. Az első lépésben a két összetevőt 5000 fordulat/perc fordulatszámú elektromos keverővel 3 percig kevertem szobahőmérsékleten, majd 2 percig pihentettem a keveréket, ezután megismételtem az első lépést. A gyártás során minden esetben a gyártó által javasolt 4 órás, 60°C-on történő utótérhálósító hőkezelést alkalmaztam Heraeus UT20 típusú szárítószekrényben.

Erősítőanyagok

Értekezésem során különböző – üveg-, bazalt- és szénszálból készült – roving és szövet formájú erősítőanyagokat használtam fel. A különböző erősítőanyag-típusokat az indokolta, hogy így összehasonlítható az erősítőanyag struktúrák hatása a mechanikai tulajdonságokra. A rovingok kiválasztásánál a legfőbb szempont az azonos lineáris sűrűség, valamint előnyös felületkezelés (epoxi gyantához illeszkedő) volt. A szál formájú erősítőanyagok közül 3 különböző gyártó (üveg roving - Owens Corning, bazalt roving - Kamenny Vek, szén roving - Zoltek) 3600 tex lineáris sűrűségű anyagait választottam.

Az erősítőszövetek kiválasztásánál ugyancsak figyelembe vettem az erősítőszövetek felületkezelését (epoxi gyantához) és az anyagok területi sűrűségét (220 g/m²) és szövési formáját (vászon). A kiválasztott szövetek (üveg szövet - Saint-Gobain Vetrotex, bazalt szövet - Basaltex, szén szövet - SGL Group) mechanikai tulajdonságai lánc- és vetülékirányban is megegyeznek.

Töltőanyagok

Értekezésem során különböző töltőanyagokat használtam fel. A nanoméretű anyagoktól elsősorban a rétegközi nyírószilárdság javulását vártam. A kiválasztott töltőanyagokat és legfőbb tulajdonságaikat a 9. táblázat foglalja össze.

Részecske típusa	Részecske fajtája	Gyártási eljárás	Átmérő vagy vastagság [nm]	Hossz [µm]	Tisztaság [%]
Bayer Baytubes BT C150HP	Többfalú szén nanocső	CVD	5-20	1-10	>99
XG Science Inc. xGnP Grade M	Lemezes szerkezetű grafén	CVD	6-8	5-25	>99
BAS 1500 P*	Őrölt bazaltszál	golyós őrlés	2000-2500	2-5	>99

9. táblázat A vizsgálatok során felhasznált töltőanyagok főbb kereskedelmi jellemzői * kereskedelmi forgalomban nem kapható, egyedi készítésű töltőanyag; bővebben 4.1.1. fejezet

3.2. A kompozitok készítésének technológiája

A kompozit lemezek készítéséhez az erősítőstruktúrától függetlenül – az iparban leggyakrabban alkalmazott, legegyszerűbb technológiát – a kézi laminálást használtam (10. ábra). A laminálás során minden egyes réteg átimpregnálása után kigörgőztem a szövetből a légbuborékokat és ezzel eltávolítottam a felesleges gyantát is. A kompozit lemezeket váltakozó rétegrendű erősítőanyagok egymásra helyezésével készítettem el, minden esetben 6 réteg felhasználásával. Az elkészített anyagokat a könnyebb azonosíthatóság érdekében rövidített elnevezéssel láttam el, ahol a GFEP az üveg-, a BFEP a bazalt-, a CFEP a szén-, a GFCFEP az üveg-szén-, a BFCFEP a bazalt-szénszállal erősített epoxi gyanta alapú kompozitot jelenti.



10. ábra A kézi laminálás vázlata 1) szerszám, 2) gél-réteg, 3) erősítőanyag, 4) mátrixanyag, 5) görgő

3.3. Alkalmazott anyagvizsgálati módszerek

Ebben a fejezetben a kísérletek során alkalmazott vizsgálai módszereket, eszközöket és berendezéseket, valamint gépbeállítási paramétereket ismertetem.

Elemi szálak vizsgálata

A kísérletek során felhasznált szálak geometriai jellemzőit Olympus BX51 típusú szálvizsgáló képfeldolgozó rendszer segítségével határoztam meg. A szálakat a JIS R 7601 Japán szabvány szerint készítettem elő, amely 25 mm szabad befogási hosszt és a szálak 10x25 mm ablakméretű papírkeretre felragasztását írja elő. A szálátmérő-méréseket fajtánként 100 db elemi szálon, hosszuk mentén egyenletesen elosztva, minden szálon három helyen végeztem. A szálakat ZWICK Z005 típusú számítógép-vezérlésű univerzális szakítógéppel szakítottam el (11. ábra) [138]. Az erő-elmozdulás diagramból a közismert alapösszefüggések szerint szakítószilárdságot (σ_{fe}) és rugalmassági modulust (E_{fe}) számoltam [52].



11. ábra Papírkeretre ragasztott szálak geometriai- (a) és szakítóvizsgálata (b) [138]

Rovingok vizsgálata

A rovingok vizsgálatát ISO 9163 szabvány ajánlása szerint végeztem el egy Zwick Z020 típusú számítógép-vezérlésű univerzális szakítógéppel. A rovingok szilárdságát (σ_{fr}) és rugalmassági modulusát (E_{fr}) a szálkötegek szakító vizsgálatával határoztam meg a szakítóerő, valamint a teherviselő keresztmetszet ismeretében. A keresztmetszetet az elemi szálak száma és azok átmérője alapján számítottam ki. A rovingban található elemi szálak számát (n_e) a rovingok átmérője, valamint az elemi szálak átmérője ismeretében becsléssel állapítottam meg. A rovingok, valamint az elemi szálak átmérőjét Olympus BX-51 optikai mikroszkóppal határoztam meg. A méréseket anyagokként 10-10 mintán végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Erősítőszövetek vizsgálata

Az erősítőszövetek vizsgálatát MSZ EN ISO 13934-1:2000 szabvány szerint végeztem el, egy Zwick Z020 típusú számítógép-vezérlésű univerzális szakítógéppel, sávszakító vizsgálatokkal. A vizsgálathoz használt sávok hossza 250 mm, szélessége 50 mm volt. A szövetek szakítószilárdságát (σ_{fsz}) és rugalmassági modulusát (E_{fsz}) a sávot felépítő rovingok, valamint a rovingokat alkotó elemi szálak számának és átmérőjének, továbbá az erősítőszövet szakító erejének ismeretében számítottam ki, a rovingok vizsgálata során ismertetetteknek megfelelően [139]. A méréseket szövetenként 10-10 mintán végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Húzóvizsgálat

A kompozitok húzóvizsgálatát az MSZ EN ISO 527-4:1999 szabvány alapján, ZWICK Z020 típusú szakítógépen végeztem. A 250 mm hosszú és 2x25 mm keresztmetszetű próbatestek szakításakor felvett erő-elmozdulás görbéből húzószilárdságot (σ_m) (4), szakadási nyúlást (ε_m) (5) húzó rugalmassági modulust (E_m) (6) számoltam [140]:

$$\sigma_m = \frac{F_{\max}}{bh} \tag{4}$$

ahol F_{max} a mért legnagyobb erő, b a próbatest szélessége, h a próbatest vastagsága,

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L_0}{L_0} \tag{5}$$

ahol ΔL_0 a próbatest hosszúságának növekedése a mérési jelek között, L_0 a próbatest videoextenzométerhez kijelölt mérőhossza,

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{6}$$

ahol σ_1 az $\varepsilon_1 = 0,0005$ nyúlásértéknél mért húzófeszültség, σ_2 az $\varepsilon_2 = 0,0025$ nyúlásértéknél mért húzófeszültség.

A befogási hossz 150 mm, a szakítási sebesség 2 mm/perc volt. Az eredmények pontosabbá tételéhez a mérés során a nyúlás méréséhez videoextenzométert is használtam. A méréseket mintánként 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Hajlítóvizsgálat

A kompozitok hárompontos hajlítóvizsgálatait az MSZ EN ISO 14125:1999 szabvány szerint ZWICK Z020 típusú szakítógépen végeztem. A mérésekhez alkalmazott próbatestek mérete 2x10 mm keresztmetszetű, az alátámasztási távolság pedig 64 mm, a terhelési sebesség 5 mm/perc volt. A próbatesteket 6,4 mm határlehajlásig terheltem. Az erő-lehajlás görbékből hajlító feszültséget (σ_{fM}) (7) és hajlító rugalmassági modulust (E_f) (9) számoltam:

$$\sigma_{fM} = \frac{3F_{\max}L}{2bh^2} \tag{7}$$

ahol F_{max} a mért maximális erő, L az alátámasztási távolság, b a próbatest szélessége, h a próbatest vastagsága. A maximális hajlító feszültség, ha a próbatest nem törik el a határlehajlásig, akkor a 6,4 mm nagyságú lehajláshoz tartozó feszültség, amennyiben eltörik, akkor a töréshez tartozó maximális feszültség. A hajlító rugalmassági modulus meghatározásához ki kell számítani az $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ és $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ relatív nyúlás érték mellett az elmozdulásokat (s_i) (8):

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi}L^2}{6h}, i = 1,2 \tag{8}$$

ahol ε_{fi} a relatív nyúlás, *L* az alátámasztási távolság, *h* a próbatest vastagsága. A hajlító rugalmassági modulus (*E_f*) a (9) összefüggéssel számítható:

$$E_{f} = 500(\sigma_{f1} - \sigma_{f2})$$
(9)

Tamás Péter

ahol σ_{f1} az s_1 lehajláshoz tartozó feszültség, σ_{f2} az s_2 lehajláshoz tartozó feszültség [141]. A méréseket mintánként legalább 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Rétegközi nyíróvizsgálat

A húzó elrendezésű rétegközi nyíróvizsgálatokat (Interlaminar Shear Strength - ILSS) a kompozitokon Zwick Z020 típusú univerzális szakítógéppel hajtottam végre ASTM D3846-94 szabvány szerint. A vizsgálatokhoz 120 mm hosszúságú, 12,5 mm széles és 2 mm vastag két oldallapon bemetszett próbatesteket használtam. A befogási hossz 60 mm, a vizsgálati sebesség 1,3 mm/perc volt. A méréseket mintánként 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Ütvehajlító vizsgálat

A Charpy-féle ütvehajító vizsgálatot az MSZ EN ISO 179 szabvány alapján végeztem el, CEAST Resil Impactor Junior típusú gép alkalmazásával, hornyolatlan 2x10 mm keresztmetszetű próbatesten. Az alkalmazott ütőenergia 25 J, a becsapódás sebessége 3,3 m/s, az alátámasztási távolság 80 mm volt. A mérés során a próbatest által elnyelt energiát regisztráltam, és ebből határoztam meg a Charpy-féle ütőszilárdságot (α_{cU} bemetszés nélkül próbatestek esetén) a (10) alapján [142, 143]:

$$\alpha_{cU} = \frac{E_{\max}}{h \cdot b} \tag{10}$$

ahol *h* a próbatest vastagsága, *b* a próbatest szélessége, E_{max} a teljes törési energia. A méréseket mintánként legalább 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

SEN-T vizsgálat

A kvázi statikus törésmechanikai vizsgálatokhoz 110 mm hosszú és 30 mm széles, egy oldalon bemetszett (a bemetszés hossza: 10 mm) SEN-T próbatesteket alkalmaztam (mérés előtt a bevágásokat borotvapengével történő, 0,5-1 mm mély bemetszéssel tettem élessé) [144]. A próbatestek monoton növekvő terhelésekor felvett (ZWICK Z020-as szakítógéppel) erő-elmozdulás görbe alapján határoztam meg a kritikus feszültségintenzitási tényezőt, más néven a törési szívósságot ($K_{ICstatikus}$) (11) [145]:

$$\mathbf{K}_{\mathrm{ICstatikus}} = \frac{\mathbf{F}_{\mathrm{max}}}{\mathbf{h} \cdot \mathbf{b}} \cdot \mathbf{a}^{1/2} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{a}/\mathbf{b}) \tag{11}$$

ahol F_{max} a maximális erőérték, h a próbatest vastagsága, b a próbatest szélessége, a a repedéshossz fűrésszel és pengével hornyolt együttese, f geometriai korrekciós tényező, amelynek értéke (12):

$$f(a/b) = 1,99 - 0,41(a/b) + 18,7(a/b)^{2} - 38,48(a/b)^{3} + 53,85(a/b)^{4}$$
(12)

A dinamikus mechanikai vizsgálatokat a statikushoz hasonlóan 5-5 próbatesten, szobahőmérsékleten végeztem el.

Akusztikus emisszió (AE) vizsgálat

A károsodási formák meghatározásához akusztikus emissziós (AE) mérési módszert alkalmaztam. Lényege az, hogy a mechanikai igénybevételnek kitett szerkezet hanghullámokat bocsát ki azokról a területekről, ahol valamilyen fizikai változás lép fel (pl. mátrix deformáció, szálkihúzódás stb.). A keletkezett hanghullámokat megfelelő mikrofonnal detektálva, a hullámok fizikai paramétereiből meghatározható a tönkremenetel formája [146].

Méréseimhez egy négycsatornás, SENSOPHONE AED-40/12 típusú berendezést használtam. A hanghullámok detektálásához piezoelektromos elven működő, A-11 típusú mikrofont erősítettem a SEN-T próbatestekre. Az erő-elmozdulás görbe, valamint a hanghullámok fizikai paraméterei (amplitúdó, a jel felfutási ideje, eseményen belüli oszcillációk száma, a jel szélessége) alapján az egyes jelszintekhez különböző tönkremeneteli formákat rendeltem. A méréseket mintánként legalább 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Elektromos vezetőképesség vizsgálatok

A minták elektromos jellemzőit többféle módszerrel határoztam meg, anyagonként 5-5 darab 300x300 mm méretű próbatestet megvizsgálva. Az általam készített kompozit anyagok vezetőképességének (felületi és térfogati ellenállásának) vizsgálatát MSZ EN ISO 1149-1 szabvány alapján végeztem Hewlett Packard High Resistance Meter 4339B típusú multiméter segítségével egy három elektródát tartalmazó gyűrű alakú mérőfej felhasználásával, egyenárammal. A felületi ellenállás meghatározása során a feszültségmérő a belső kör elektródára és a gyűrűelektródára volt kapcsolva, illetve a térfogati ellenállás mérésénél a belső kör elektródára és a segédelektródára. A fajlagos felületi ellenállást (ρ_s) a (13), a fajlagos térfogati ellenállást (ρ_v) a (14) összefüggéssel határoztam meg:

$$\rho_{\rm s} = R_{\rm S} \frac{\rm o}{\rm l_e}, \tag{13}$$

$$\rho_{\rm v} = R_{\rm v} \frac{s_e}{\rm h} \,, \tag{14}$$

ahol R_S a felületi ellenállás, *o* az elektróda kerülete, l_e az elektródák közti távolság, R_V térfogati ellenállás, *h* minta vastagsága, S_e elektróda területe. A méréseket 100 V állandó feszültségen, 23°C hőmérsékletű és 45% páratartalmú mérőtérben hajtottam végre.

A villamos átütési szilárdság meghatározásához felhasznált feszültség elektróda átmérője 25 mm, amíg a földelő elektródáé 75 mm volt. A mérés során a feszültséget folyamatosan emeltem (1 kV/másodperc lépésközzel) mindaddig, ameddig a próbatesten az áram át nem folyt.

Az elektromágneses árnyékoló-képesség (S_E) meghatározását ASTM D4935 szabvány alapján hajtottam végre, 2,4 GHz frekvencián, 23°C hőmérsékletű és 45% páratartalmú mérőtérben, az (15) összefüggés alapján:

$$S_E = 20\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right),\tag{15}$$

ahol P_1 a minta jelenlétében mért teljesítmény, P_2 a minta nélkül mért teljesítmény. A szakirodalom az anyagokat a mért elektromágneses hatékonyság-tartományok alapján több csoportba osztja és minősíti (10. táblázat). A méréseket mintánként 5-5 próbatesten végeztem el, majd ezek alapján számítottam ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását.

Esherri	5	4	3	2	1
FOKOZAŤ	Kiváló	Nagyon jó	Jó	Mérsékelt	Gyenge
Elektromágneses hatékonyság tartományok [dB]	SE≥30	30>SE≥20	20>SE ≥10	10>SE≥7	7>SE

10. táblázat Elektromágneses árnyékoló-képesség osztályozása

Termogravimetriai vizsgálatok

A termogravimetriai vizsgálatok SETARAM Labsys TG DTA/DSC típusú készülékkel történtek. A - mintegy 10-20 mg tömegű - mintákat egy 400 µl-es kerámia tégelybe mértem be, majd a mérés során inert (nitrogén), illetve oxidatív (levegő)

PhD értekezés

atmoszférában vizsgáltam a tömegük változását az idő és a hőmérséklet függvényében, aminek köszönhetően megállapíthatóak az anyagra átmeneti változást gyakorló hőmérsékletek. A vizsgálatok során alkalmazott öblítő gáz térfogatárama 60 ml/perc volt. A hőmérsékletprogramot úgy állítottam be, hogy a berendezés az első 1 percben szobahőmérsékleten izoterm állapotot tartson fenn, majd a következő szakaszban egyenletes, 20°C/perc felfűtési sebességgel érje el a maximum (1200°C) hőmérsékletet.

Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai (FT-IR) vizsgálatok

Az FT-IR méréseket egy Perkin Elmer Spectrum 400 típusú berendezésen hajtottam végre reflexiós üzemmódban. A berendezésben található fényforrás egy közép és távoli IR tartományban sugárzó, hosszú életű fényforrás, amely lehetővé teszi a vizsgálatokat a 4000-650 cm-1 (2500-15385 nm) hullámhossz tartományban.

Ultraibolya (UV) spektroszkópiai vizsgálatok

Az UV spektroszkópiai vizsgálatokat egy Hewlett Pakard 8452A típusú diódasoros detektorral ellátott spektrométerrel végeztem el abszorpciós üzemmódban. A berendezés 190-820 nm hullámhossz-tartományban üzemelő látható UV fényforrást használ, 2 nm-es felbontással.

Mikroszerkezet vizsgálatok

Az elkészített próbatestek mikroszerkezet vizsgálatát JEOL JSM-6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal hajtottam végre. A vizsgálatok során a roncsolt próbatestek töretfelületéről készítettem felvételeket, amelyek alapján megállapítható a határfelületi adhézió minősége [147]. A vizsgált felületeket a mérés előtt Au/Pd ötvözettel vontam be az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése érdekében.

4. Kísérleti rész

Ebben a fejezetben ismertetem a vizsgálatok során kapott eredményeket és magyarázatot adok az eredmények alakulására.

4.1. Előkísérletek

Ebben a fejezetben áttekintem az általam készített kompozitok alapanyagainak vizsgálata során meghatározott jellemzőket, valamint összefoglalom az unidirekcionális erősítőstruktúrájú mintáim mechanikai tulajdonságait.

4.1.1. Erősítő- és töltőanyagok vizsgálata

A vizsgálatok első lépéseként az erősítőanyagok tulajdonságainak meghatározásával foglalkoztam. A vizsgálatokat két csoportra bontottam aszerint, hogy azok a rovingokra vagy az erősítőszövetekre vonatkoztak.

Elemi szálak vizsgálata

A szál formájú erősítőanyagok egyik legjellemzőbb tulajdonsága a szálkötegeket (rovingokat) felépítő elemi szálak geometriai jellemzője (szálátmérő) és mechanikai tulajdonságai. Ebben a részben bemutatom a három különböző erősítőanyag (üveg-, bazaltés szénszövet), valamint erősítő-struktúra (elemi szál, roving és szövet) szakító vizsgálat során kapott eredményeket (11. táblázat).

Amag	d_{av}	σ_{fe}	Efe	E_{fe}
Inyug	[µm]	[MPa]	[%]	[GPa]
CF	8,1±1,8	3362±472	1,80±0,22	182±15
GF	18,6±2,4	1677±436	2,98±0,69	55±8
BF	14,2±1,4	2016±434	3,56±0,89	61±3

11. táblázat Elemi szálak jellemzői

```
(d_{av}\text{-} \acute{a}tlagos \ szálátmérő, \sigma_{fe} - szakítószilárdság, \epsilon_{fe} - szakadási \ nyúlás, E_{fe} - rugalmassági \ modulus)
```

Az optikai mérések azt mutatják, hogy szén rovingban található elemi szálak átmérője a legkisebb a mértek közül. A szálszakító vizsgálatok szerint az elemi szénszálak rendelkeznek a legnagyobb szakítószilárdsággal és rugalmassági modulussal, valamint a legkisebb szakadási nyúlással. Az üveg- és a bazaltszálak mechanikai tulajdonságai

hasonlóak, amelyet a hasonló gyártástechnológiájuk és kémiai felépítésük magyaráz, a tapasztalható eltérések oka a kémiai összetevők közti különbségekre vezethető vissza.

Rovingok vizsgálata

Az elemi szálak egymás mellé rendezett kötegét rovingnak nevezzük, amelynek alkalmazása jellemzően az egy-irányban erősített kompozitok készítéséhez használatos. A rovingok jellemzőit a különböző szálkötegek szakító vizsgálata alapján határoztam meg, az eredményeket a 12. táblázat foglalja össze.

Amaga	n _e	σ _{fr}	Efr	E_{fr}
Апуид	[db]	[MPa]	[%]	[GPa]
CF	1000±40	3146±115	3,49±0,14	221±20
GF	460±23	1971±106	5,94±0,23	82±6
BF	570±31	1841±73	4,17±0,23	95±7

12. táblázat A rovingok jellemzői

 $(n_e-elemi \ szálak \ száma, \sigma_{fr}-szakítószilárdság, \epsilon_{fr}-szakadási \ nyúlás, E_{fr}-rugalmassági \ modulus)$

Erősítőszövetek vizsgálata

A műszaki gyakorlatban csak ritkán fordul elő, hogy az alkatrészeket kizárólag egy irányban terheljük, ennek következtében a kompozitokat felépítő erősítőanyagokat is igyekszünk több irányba elhelyezni. A különböző erősítőszövetek használatával könnyen létrehozhatjuk a többirányú erősítést, illetve az anizotrópia kívánt mértékét. Az általam felhasznált erősítőszövetek mechanikai tulajdonságainak meghatározására sávszakító vizsgálatokat végeztem el, amelyből kiszámítottam az erősítőanyagok húzószilárdságát és rugalmassági modulusát (13. táblázat).

Amag	n_r	σ_{fsz}	Efsz	E_{fsz}
Imyag	[db]	[MPa]	[%]	[GPa]
CF	30±1	3521±220	$10,38\pm0,14$	84±7
GF	30±1	2174±105	13,03±1,24	51±5
BF	30±1	1897±95	16,59±1,33	53±6

^{13.} táblázat Az erősítőszövetek jellemzői

 $(n_r - rovingok \ száma, \ \sigma_{fsz} - \ szakítószilárdság, \ \epsilon_{fsz} - \ szakadási \ nyúlás, \ E_{fsz} - \ rugalmassági \ modulus)$

Az erősítőszövetek közül a legnagyobb húzószilárdsággal és ehhez rendelhető rugalmassági modulussal a szénszövet rendelkezett. Az üveg- és bazaltszövet sávszakító vizsgálattal mért

jellemzői között a különbség húzószilárdság tekintetében 10%, a szakadási nyúlás esetén 30%, amíg a rugalmassági modulusnál mindössze 4%.

A bazaltpor vizsgálata

A bazaltpor előállításához kerámia golyós őrlőmalmot (golyóátmérő 30 mm) alkalmaztam. Az őrlés során az őrlőtégelybe 40 gramm vágott bazaltszálat töltöttem, amelyet különböző időtartamokig (1, 2, 4 óra) őröltem állandó fordulatszámon (20 1/perc), hogy megállapítsam az őrlési idő hatását a bazaltpor szemcseméretére. A por átlagos szemcseméretét Olympus BX-51 típusú optikai mikroszkóppal határoztam meg, mintánként 100 részecske méretét megmérve. A kialakult szemcseméret és őrlési idő összefüggését a 12. ábra mutatja. Az eredmények szerint az őrlési idő növelésével csökken a szemcsék mérete. Az eredmények alapján 1 órás őrlési idő után már nem változik jelentős mértékben a részecskék mérete, így további őrlésük nem szükséges.



12. ábra Az őrlési idő hatása a bazaltpor átlagos szemcseméretére

A bazaltpor alkalmazhatóságához megvizsgáltam az elkészített por elegyíthetőségét különböző közegekben, ami kulcsfontosságú a feldolgozás során, mivel egy előre bekevert elegyben a bazalt por esetleges ülepedése és rossz eloszlathatósága egyenetlen tulajdonságokat eredményezhet. A port IPOX FM-20 epoxi gyantába, IPOX MH-3120 aminos térhálósítóba, acetonba, desztillált vízbe kevertem el és vizsgáltam az anyagok ülepedését az idő függvényében (13. ábra). A vizsgálat során azt tapasztaltam, hogy a por acetonban és desztillált vízben spontán elkeveredett, amíg a két másik esetben intenzív keverés hatására sikerült csak az eloszlatás. 1 óra elteltével az acetonba és desztillált vízbe

kevert por elkülönült és leülepedett, míg a másik két keverékben nem volt tapasztalható semmiféle változás, még 6 óra elteltével sem, amelynek oka a gyantakomponensek acetontól és desztillált víztől való eltérő viszkozitása.



13. ábra A bazaltpor ülepedésének vizsgálata

4.1.2. Unidirekcionális mono- és hibridkompozitok vizsgálata

Vizsgálataim során a rendelkezésemre álló rovingokból egy saját tervezésű és készítésű szálfektető segítségével (14. ábra) alakítottam ki a mono- és hibridkompozitok unidirekcionális (UD) erősítőstruktúráját. Első lépésként manuálisan az állítható szegsorra (1) rögzítettem a rovingokat, előre meghatározott mennyiségben és sorrendben. A szálkötegek elhelyezését követően kézi úton impregnáltam az erősítőszálakat a munkafelületen (3). Az impregnált szálakat ezt követően eltávolítottam a szálfektető berendezésről, majd térhálósítottam és 4 órán át 60°C hőmérsékletű szárítószekrényben utótérhálósítottam. Az így készített kompozit lemezekből Mutronic Diadisc 4200 típusú gyémánttárcsás vágógép segítségével munkáltam ki a szükséges próbatesteket, amelyeket a 3.3. fejezetben ismertett módon vizsgáltam meg.

Az UD kompozitok húzóvizsgálata eredményeit a 15. ábra mutatja. Az elkészített minták erősítőanyag tartalmát kiégetéses módszerrel határoztam meg, amelyek alapján a száltartalom 39±6 m%-ra adódott.



14. ábra Az UD kompozitok készítéséhez alkalmazott saját tervezésű szálfektető berendezés (1 állítható szegsorok, 2 szorító lapok, 3 munka felület, 4 alaplap)

Az elkészített anyagaim vizsgálati eredményei szerint a legjobb mechanikai tulajdonságokkal a szénszálas monokompozitok rendelkeztek. A bazalt- és üvegszálas mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságai nagyon hasonlóak, a különbség mind a szilárdság, mind pedig a modulus tekintetében 5%. A húzóvizsgálatoknál nem figyelhető meg a különböző szálak együttműködése (szinergetikus hatás), a terhelést minden esetben főleg a kisebb szakadási nyúlást mutató anyag viselte.



15. ábra A vizsgált epoxigyanta mátrixú UD kompozitok húzószilárdsága és rugalmassági modulusa (GFEP - üvegszállal erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszállal erősített epoxi gyanta, CFEP szénszállal erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszállal erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazaltszénszállal erősített epoxi gyanta)

A hajlító vizsgálat eredményeit a 16. ábra foglalja össze. A hajlító vizsgálat során kapott értékek ugyanazt a trendet mutatják, mint a húzóvizsgálat eredményei, nevezetesen, a szénszálas kompozit mutatta a legjobb tulajdonságokat és a bazalt-, üvegszálas kompozitok jellemzői csak kis mértékben különböznek. A hibridkompozitok vizsgálata során minden esetben a szénszálas réteg helyezkedett el alul. Ezt a mérési elrendezést az indokolta, hogy a hajlító vizsgálat során az alkalmazott terhelő erővel szembeni alsó réteg húzott, így a szénszál magasabb mechanikai tulajdonságai kerülnek előtérbe (húzó igénybevétel esetén mutatott tulajdonságok), ami a kompozit magasabb szilárdságát eredményezi. A kompozitok pásztázó elektronmikroszkópos (SEM - Scanning Electron Microscope) vizsgálata felvételeit a 17. ábra mutatja.



16. ábra A vizsgált epoxigyanta mátrixú UD kompozitok hajlítószilárdsága és hajlító modulusa (GFEP - üvegszállal erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszállal erősített epoxi gyanta, CFEP szénszállal erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszállal erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazaltszénszállal erősített epoxi gyanta)

A hibridkompozitokról készült töretfelületi (SEM) képek a különböző kompozit rétegek határát mutatják. A szálátmérő nagyságából beazonosíthatóak a különböző erősítőanyagokat felépítő elemi szálak, a kisebb átmérőjű szálak a szénszálak, a nagyobb átmérőjűek az üveg, illetve a bazaltszálak. A felvételek szerint az adhézió minősége tovább javítható, ami további vizsgálatokat igényel. Az unidirekcionális kompozitok vizsgálata során kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy a bazaltszál alkalmas az üvegszál teljes egészében történő kiváltására, mert mechanikai tulajdonságait tekintve mindössze néhány százalék a különbség a két anyag között, ráadásul a bazaltszál teljes egészében bioinert, ennek köszönhetően a feldolgozása és újrahasznosítása is kedvezőbb, így alkalmazása még inkább ajánlott.





15kV X500 50мm ВМЕ-РТ ВFCFEP



Az ipari gyakorlatban az unidirekcionális erősítőanyaggal erősített kompozitok felhasználása nem elterjedt olyan mértékben, mint a szövet erősítésűeké, ezért értekezésem további részében a különböző anyagú erősítőszövetekkel, valamint az ezek felhasználásával készülő kompozitok vizsgálatával foglalkozom.

4.2. Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok vizsgálata

A műszaki gyakorlatban a hibridkompozitok alkalmazása egyre növekvő jelentőségű, mivel a hibridkompozitok egyesíthetik a monokompozitok előnyös tulajdonságait, emellett felhasználásukkal jelentős költségcsökkenés is elérhető. A megújuló energiaforrások – különösképp a szélerőművek – esetében az igénybevételek miatt a kizárólag szénszövettel erősített kompozitok túlságosan ridegek, tehát hosszú távon nem alkalmazhatóak eredményesen. A szénszövet szívósabb erősítőanyaggal történő társításával jelentős szívósság-növekedés érhető el. Ebben a fejezetben üveg-szénszövettel, valamint bazaltszénszövettel erősített epoxi gyanta mátrixú hibridkompozitok vizsgálatával és elemzésével foglalkoztam. A mono- és hibridkompozitokat 6 erősítőszövet (hibridok esetén váltakozó rétegrend) felhasználásával készítettem el, kézi laminálással, az UD struktúránál használt térhálósítási eljárással. Az elkészített anyagok felépítését a 18. ábra mutatja.



18. ábra Az elkészített mono- és hibridkompozit anyagok felépítése

Az elkészített lemezekből Mutronic Diadisc 4200 típusú gyémáttárcsás vágógéppel lánc irányban alakítottam ki a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges próbatesteket, mert a szövetek vizsgálata során bizonyítást nyert, hogy lánc és vetülék irányban nincs szignifikáns különbség.

A kompozitok mechanikai tulajdonságainak meghatározásához húzó, hajlító, Charpy és SEN-T vizsgálatokat hajtottam végre a 3.3. fejezetben ismertett módon. A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok húzó vizsgálata során mért adatokból számított húzószilárdságot és rugalmassági modulust a 19. ábra, a számszerű adatokat a 7.1. fejezet foglalja össze.



19. ábra A mono- és hibridkompozitok húzószilárdsága és rugalmassági modulusa (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A monokompozitok közül a szénszövettel erősített kompozitok rendelkeztek a legnagyobb húzószilárdsággal és rugalmassági modulussal. A hibridkompozitok közül egyértelműen a bazalt/szén kombinációjú kompozitok húzószilárdsága volt a legnagyobb, kimutatható hibrid hatást azonban nem tapasztaltam. A modulus tekintetében azonban már megfigyelhető a hibrid rendszerek üveg-, bazaltszövettel erősített monokompozitokkal szembeni nagyobb modulusa, mind az üveg/szénszövet, mind pedig a bazalt/szénszövettel erősített rendszer esetében, amit a pozitív hibrid hatás jelenléte magyaráz, amelyet a hibrid keverékszabály (HK szabály) szerinti számítás alapján készített diagram (20. ábra) is alátámaszt.





PhD értekezés

A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos hajlító vizsgálata során mért adatokból számított hajlítószilárdságot és hajlító rugalmassági modulust a 21. ábra mutatja. A monokompozitok közül a szénszövettel erősítettek mutatták a legnagyobb hajlítószilárdságot és hajlító modulust. A hibridek hajlító vizsgálat során meghatározott jellemzők (a hajlítószilárdság több mint 30%, a hajlító modulus 20%-kal) kisebbek a szénszövettel erősített kompozitokétól. Ennek oka a hibrid rendszereket felépítő rétegek elrendezése. A többrétegű kompozitok hajlító igénybevételét gyakorlatilag két igénybevételre lehet bontani a mérés elrendezése alapján; a semleges száltól felfelé nyomott oldalra, illetve a semleges száltól lefelé húzott oldalra. A 6 – váltakozó elrendezésben elhelyezett – rétegből felépülő kompozitok esetén a semleges szál a 3-3 réteget magába foglaló nyomott, illetve húzott oldal közti mátrixanyagból álló rétegben található. A hibridek esetén a húzásra igénybevett rétegben az üveg-, illetve bazaltszövet volt túlsúlyban, amelynek hatására a mechanikai tulajdonságok jóval kisebbek, mintha a próbatestet megfordítva helyezném be, mivel ekkor a szénszövet mennyisége dominálna.



21. ábra A mono- és hibridkompozitok hajlítószilárdsága és hajlító rugalmassági modulusa (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A mérés során az összes próbatestnél figyelembe vettem a rétegrendi sajátosságot és következetesen ennek megfelelően hajtottam végre a vizsgálatokat, amelyet a mérések kis mértékű szórása is alátámaszt. A szén/üvegszövettel és szén/bazaltszövettel erősített hibridkompozitok hajlító vizsgálattal meghatározott jellemzői közti különbség a hajlítószilárdság tekintetében 3%, a modulusnál pedig mindössze 6%. A hajlítószilárdságok tekintetében nem tapasztaltam hibrid hatást, a modulusok tekintetében azonban már felfedezhető szinergikus hatás (22. ábra).



22. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos ütvehajlító vizsgálata (Charpy vizsgálat) során mért adatokból számított ütőszilárdságokat a 23. ábra mutatja. A monokompozitok közül az üvegszálas kompozitok álltak ellen a legnagyobb mértékben a dinamikus igénybevételnek. A szénszövettel erősített kompozitok – a szénszövet törékenysége miatt – ridegen törtek, amit a kis ütőszilárdságuk is mutat. A hibrid rendszerek esetében pozitív hibrid hatást (24. ábra) tapasztaltam, az ütőszilárdság tekintetében.







24. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

Az elvégzett SEN-T vizsgálatokból számított törési szívósságot a 25. ábra szemlélteti. Az adatok szerint az üveg- és bazaltszövettel erősített monokompozitok hasonlóan viselkedtek, kettejük közül a bazaltszálas kompozit azonban jobban gátolta a repedés terjedését, amelynek oka a bazaltszál szívósabb viselkedése. A monokompozitok közül a szénszövettel erősített minta kritikus feszültségintenzitási tényezője a legnagyobb.





⁽GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A hibridkompozitok vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy a hibridizáció javította az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenálló-képességét, amely hibridhatás jelenlétére utal (26. ábra). A mérések szerint a bazalt- és az üvegszál hatása nagyon hasonló, a hibridkompozitok közül a bazalt-szénszövettel erősített hibrid rendszernek a legnagyobb a törési szívóssága, ami a bazaltszál szívósságának köszönhető.



26. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

A bazaltszálas hibridkompozitok viselkedését akusztikus emisszióval (AE) is vizsgáltam, amit a SEN-T méréshez használt próbatestre helyezett mikrofonnal hajtottam végre. A SEN-T vizsgálathoz használt Zwick Z020 típusú berendezés hangjának, valamint a háttérzaj kiszűréséhez az AE vizsgálat során a jelvételi küszöböt 30 dB értékre állítottam. A mérés alapján készített eltelt idő-eseményszám és eltelt idő-ébredő erő diagramok közül egy-egy jellegzetes görbét a 27. ábra mutat. Minden egyes anyag esetében megfigyelhető, hogy a vizsgálati idővel párhuzamosan a tönkremenetel bekövetkeztéig folyamatosan növekszik az akusztikus jelek száma, valamint az anyagot terhelő erő is, ami arra utal, hogy a vizsgálati idővel párhuzamosan folyamatosan mennek tönkre a kompozit erősítőanyagát felépítő elemi szálak. Ez a növekvő eseményszám az adéhézió megfelelő minőségét is bizonyítja. A kompozitok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata felvételeit a 28. ábra foglalja össze. A hibridkompozitokról készült képek a különböző kompozit rétegek határát mutatják. A szálátmérő nagyságából be lehet azonosítani a szálakat, a kisebb átmérőjű szálak a szénszálak, a nagyobb átmérőjűek az üveg-, illetve a bazaltszálak. A felvételek alapján az adhézió minősége tovább javítható.

Kijelenthető, hogy a bazaltszál eredményesen alkalmazható az üvegszál helyett, amelynek következtében széleskörű elterjedése várható a szélerőművek anyagaként is, főleg hibrid szálerősítésű kompozitokban.



27. ábra Az AE mérés alapján készített eltelt idő-eseményszám, eltelt idő-ébredő erő diagramok (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)



28. ábra A különböző mono- és hibridkompozitok töretfelületeiről készített SEM felvételek (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

4.3. Környezeti tényezők hatásai a hibridkompozitokra

A polimer mátrixú kompozit anyagok felhasználási területei nagyon széles skálán mozognak, amelynek következtében a környezeti tényezők jelentős hatással vannak tulajdonságaik változására. A bazaltszövettel erősített kompozitok tengeri (off-shore) szélturbina lapátokban történő felhasználása szempontjából nagyon fontos ismerni a környezeti hatásokkal szembeni ellenálló-képességét. A legfontosabb környezeti tényezők a hőmérséklet és az UV sugárzás, továbbá az erősen korrodáló sós-víz. Ebben a fejezetben

bemutatom a környezeti tényezők mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását és magyarázatát.

4.3.1. A hőmérséklet hatása

A szakirodalmi adatok alapján a bazaltszövet alkalmazhatósági tartománya nagyon széles, amelynek köszönhetően széles körben alkalmazható a mechanikai tulajdonságok jelentős változása nélkül. Ennek bizonyítására sávszakító vizsgálatokat hajtottam végre a különböző hőmérsékletnek kitett rendelkezésemre álló erősítőszöveteken. A vizsgálatok során a szöveteket 10 percen keresztül meghatározott hőmérsékleten tartottam az egyenletes hőmérséklet-eloszlás kialakítása céljából. A vizsgálatok során kapott húzószilárdságokat a hőmérséklet függvényében a 29. ábra mutatja



29. ábra A vizsgálati hőmérséklet hatása az erősítőszövetek húzószilárdságára GF - üvegszövet, BF - bazaltszövet, CF - szénszövet

Az eredmények alapján a bazaltszövet kisebb hőmérséklettartományban nagyobb húzószilárdsággal rendelkezik, amely egyrészt annak köszönhető, hogy a szövetet felépítő elemi szálak ridegebbé válnak, másrészt pedig az elemi szálak közötti súrlódás megnő, így azok kihasználtsága jobbá válik. A nagy vizsgálati hőmérséklet hatására a bazaltszövet húzószilárdsága már 300°C hőmérsékleten is csökken, mindössze a kezdeti érték 67%-a. A szövet szerkezeti integritása 500°C hőmérsékleten jelentősen csökken, majd 700°C-on szinte teljesen meg is szűnik, amit a húzószilárdság változása is tükröz. Ennek oka a szövetet alkotó elemi szálak intenzív oxidálódása, amely a szövet mechanikai tulajdonságainak gyors és intenzív romlásához vezet, amelyet a 30. ábra SEM felvételei is alátámasztanak. A felvételek alapján a 300°C hőmérsékletű kezelés esetén a szálak felületén még

PhD értekezés

megtalálhatóak a felületkezelő szer maradványai, ami az 500°C-os esetben már teljesen eltűnt, helyette pontszerű károsodások jelentek meg, ami a hőmérséklet emelésével (700°C) sűrűsödött. Itt már megfigyelhető bizonyos pontokon az elemi szálak károsodása, ami a 900°C-os minta esetében már megfigyelhető. Ebben az esetben már erősen hullámos az elemi szálak felülete, valamint a szálak átmérője is változásokat és egyenletlenségeket mutat. A vizsgálati hőmérséklet emelésének hatása az üveg-, valamint a szénszövet esetében is megfigyelhető, a szénszál esetében azonban sokkal csekélyebb a hatása.





Feltevésem bizonyításához termogravimetriai méréséket hajtottam végre a különböző erősítőanyagokon oxigénben és inert közegben (nitrogén gázban) is. Az eredményeket a 31. ábra foglalja össze. Az üvegszövetből vett minta esetében a mérés során kis mértékű tömegnövekedést tapasztaltam, amit a felmelegedő meleg levegő felhajtóerejének csökkenése okoz. Ez alapján az üvegszálas minta esetében egy kvázi alapvonal figyelhető meg, mind oxigénben, mind pedig inert gázban. A bazaltszálas minta esetében már jelentős eltérés figyelhető meg a két ábrázolt átlaggörbe között. Az oxigén jelenlétében nagy

mértékben növekszik a minta tömege, amit a vizsgáló környezetben jelen lévő oxigén megkötése okoz. Ez alátámasztja a sávszakító vizsgálatok alapján felállított hipotézisemet, miszerint a bazaltszövet szilárdságcsökkenését egy – a fémes elemek (vas és alumínium), valamint az oxigén között – gyorsan lezajló termooxidatív degradáció okozza. Ezzel szemben inert gázban a tömegnövekedés sokkal csekélyebb, mint oxigénben, ami szintén az oxidáció tényét erősíti meg. Az inert gázban történő csekély mértékű oxidációnak az oka, hogy a szálak felületén található felületkezelő szer bomlás során oxigén szabadul fel, ami képes a szálakat oxidálni. A szénszálas minta esetében jelentős tömegcsökkenés figyelhető meg, ami 600°C közelében indul meg, amikor elkezd a szén-szén kötés felbomlani az anyagban, amit a szakirodalom is alátámaszt [148].



31. ábra A 3-3 párhuzamos termogravimetriai mérés átlagolt görbéi GF - üvegszál, BF - bazaltszál, CF - szénszál

A szövetek vizsgálata után áttértem a mono- és hibridkompozitok vizsgálatára. A hőmérséklet mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását húzó, hárompontos hajlító és Charpy vizsgálatok elvégzésével vizsgáltam. Az erősítőszövetek vizsgálata esetén alkalmazott hőmérsékletek a polimer kompozitoknál már nem alkalmazhatók, mert a felhasznált mátrixanyag nem képes elviselni ilyen nagy hőmérsékletet, így a vizsgálati hőmérséklet-tartomány megváltoztatása mellett döntöttem, ami jobban reprezentálja a valós működési környezetet, ami fennáll például az off-shore szélerőművek működése esetében (32-34. ábra).



32. ábra A vizsgálati hőmérséklet hatása a mono- és a hibridkompozitok húzószilárdságára, valamint rugalmassági modulusára





33. ábra A vizsgálati hőmérséklet hatása a mono- és a hibridkompozitok hajlítószilárdságára, valamint hajlító modulusára



A húzó vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a vizsgálati hőmérséklet növelésével mindegyik anyag húzószilárdsága és rugalmassági modulusa jelentősen csökkent, csakúgy, mint a hajlítószilárdsága és a hajlító modulusa, amit egyértelműen a mátrixanyag lágyulása okoz. A monokompozitok közül a szénszállal

PhD értekezés

erősített rendszer rendelkezett a legnagyobb húzó- és hajítószilárdsággal, valamint modulussal, amíg a hibridkompozitoknál a bazalt-szénszövettel erősített minta. A vizsgált anyagok esetében elmondható, hogy a bazalt- és az üvegszövet erősítés hasonlóan befolyásolja a húzó és a hajlító vizsgálatokkal meghatározott jellemzőket, hatásukra a hibrid minták hőmérséklet-érzékenysége csökkent. A Charpy vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a hőmérséklet növelésével folyamatosan növekedett az ütőszilárdság, ami annak a következménye, hogy a kompozit anyagaim a hőmérséklet növelésével lágyultak, ezáltal szívósabban viselkedtek. A legszívósabb anyag a vizsgáltak közül az üvegszövettel erősített kompozit volt. A bazalt-, illetve szénszövettel erősített minták – az elemi szálak miatt – ehhez képest ridegebben viselkedtek.



34. ábra A vizsgálati hőmérséklet hatása a mono- és a hibridkompozitok ütőszilárdságára ((GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Összességében kijelenthető, hogy a hőmérséklet növelésével a kompozit minták húzó és hajlító vizsgálattal meghatározott szilárdsága és modulusa folyamatosan romlottak, ami elsősorban a mátrixanyag lágyulásából adódik. Ezzel összhangban az ütőszilárdság éppen ellentétesen változik, amit a mátrixanyag – lágyulás hatásra bekövetkező – szívósságnövekedése okoz.

4.3.2. Az UV sugárzás hatása

Az UV sugárázás időtartamának hatását a bazaltszövetre állandó intenzitású és páratartalmú MM Climacell típusú UV kamrában vizsgáltam. A fénycsövek teljesítménye 75 W volt, amelyet a 325...410 nm hullámhossz tartományban adott le. A szöveteket

különböző időtartamú (1, 2, 4 hetes) kezeléseknek vetettem alá, majd ezt követően sávszakító vizsgálatokkal határoztam meg a sugárzás húzószilárdságra gyakorolt hatását (35. ábra). A mintákat a kezelési idő felénél megfordítottam, hogy a felületüket egyenletesen érje a sugárzás. Az eredmények szerint az UV sugárázás hatására jelentősen romlott a bazaltszövet húzószilárdsága, amelyet az elemi szálak sugárzás hatására bekövetkező roncsolódása okoz. Összességében azonban a bazaltszövet szilárdságcsökkenése sokkal kisebb volt, mint az üvegszöveté.



35. ábra Az UV sugárzás hatása az üveg-, a bazalt- és a szénszövet húzószilárdságára GF - üvegszövet, BF - bazaltszövet, CF - szénszövet

A szövetek vizsgálata után azonos feltételek mellett kezelt kompozitok mechanikai tulajdonságainak elemzését hajtottam végre, amelyek eredményeit a 36-38. ábra foglalja össze.



36. ábra Az UV sugárzás hatása a mono- és a hibridkompozitok húzószilárdságára, valamint rugalmassági modulusára

(GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A vizsgált minták húzószilárdsága és a rugalmassági modulusa minden anyag esetében folyamatosan csökkent a kezelési idő növelésével, függetlenül az erősítőanyag típusától, amit a mátrixanyag degradációja okoz. A hárompontos hajlító vizsgálattal meghatározott hajlítószilárdság és hajlító modulus értékek trendje is hasonló, mint a húzóvizsgálattal meghatározottaké.



37. ábra Az UV sugárzás hatása a mono- és a hibridkompozitok hajlítószilárdságra, valamint hajlító modulusára (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A hárompontos hajlító vizsgálatok alapján a minták hajlítószilárdsága a kezelési idővel arányosan csökkent, amit az UV sugárzás hatására bekövetkező mátrixanyag degradáció eredményez. A 4 hetes kezelés után a bazaltszövettel erősített minták húzószilárdsága 53%-kal, amíg hajlítószilárdsága 35%-kal kisebb a kiindulási értékhez képest.



38. ábra Az UV sugárzás hatása a mono- és a hibridkompozitok ütőszilárdságára (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A mátrixanyag degradációjára vonatkozó hipotézisemet a Charpy vizsgálatok is alátámasztják, mivel a minták ütőszilárdsága a kezelési idővel arányosan csökkent. A csökkenés mértéke a 4 hetes kezelés végére a bazaltszövettel erősített kompozit esetében 13% nagyságú.

4.4. A sós-vizes kezelés hatása a hibridkompozitokra

A sós-víz a kompozitok szempontjából reális veszélyt jelenthet, mivel a napjainkban használatos úgynevezett tengeri (off-shore) szélerőművek lapátjai szálerősítésű polimer kompozitokból készülnek. Egy esetleges sérülés esetén az erősítőszövet közvetlenül is érintkezhet a tenger vizével, ami károsíthatja az erősítőszövetet. Ennek a hatásnak a vizsgálatához viszonyításul desztillált vizet (0 m%) és tengervizet szimuláló különböző koncentrációjú (10, 20, 30, 38 m%) kezelő oldatokat készítettem, majd eltérő időtartamokig (1, 2, 4 hét) belehelyeztem az erősítőszöveteket, valamint a kompozitokat. A telítési oldatkoncentrációjú oldattal (38 m%) történő kezelést az indokolta, hogy a szélerőművek lapátjain lokálisan megemelkedhet a koncentráció. A kezelés szövetekre gyakorolt hatását sávszakító vizsgálatokkal elemeztem, amelynek eredményeit a 39. ábra foglalja össze. Az eredmények alapján a minden egyes erősítőszövet húzószilárdsága folyamatosan csökkent az oldatkoncentráció és a kezelési idő növelésével. A bazaltszövet esetében tapasztalható szilárdságromlást a sós-víz és a bazaltszövet elemi szálai közötti kölcsönhatás okozza, amelynek során a bazaltszövetet alkotó elemi szálak károsodnak, felületükön repedések, kimaródások figyelhetőek meg (40. ábra). Mindezek mellett a bazaltszövet húzószilárdsága legnagyobb károsodásának mértéke sokkal kisebb (32%), mint az üvegszöveté (65%) és a szénszöveté (76%). Hipotézisem szerint a kezelő oldat hatására a bazaltszálakból különböző elemek oldódtak ki, amelyek azonosításához spektroszkópiai vizsgálatokat hajtottam végre. Első lépésben Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálatokat végeztem, amelyek eredményeit a 41. ábra foglalja össze, ahol az egyes görbék három párhuzamos mérés átlag-görbéjét mutatják. Az eredmények alapján a különbség mindössze csak a referenciaként használt desztillált víz és 38 m% oldatkoncentrációjú sós-vizes oldat között figyelhető meg, ami mindössze transzmittancia-változás és nem hullámhossz-eltérésben nyilvánul meg. A két jellegzetes csúcs a vizes oldatokat jellemző karakterisztikus csúcsok. Sem az FT-IR vizsgálattal, sem Raman spektroszkópiával nem mutathatóak ki kioldódó elemek.



39. ábra A sós-víz hatása az erősítőszövetek húzószilárdságára GF - üvegszövet, BF - bazaltszövet, CF – szénszövet



40. ábra Az elemi bazaltszálak károsodása a sós-vizes kezelés hatására



41. ábra A bazaltszövetből történő kioldódást vizsgáló FT-IR mérések eredményei

Ezt követően UV spektroszkópiát alkalmaztam, amely kisebb hullámhossz tartományban üzemel. A rögzített ultraibolya spektrumokat a 42. ábra mutatja, ahol minden görbét három párhuzamos mérés átlag-görbéje ad.



42. ábra A bazaltszövetből történő kioldódást vizsgáló UV spektroszkópiás mérések eredményei

A referenciaként rögzített desztillált víz abszorbanciája elhanyagolható a referencia és a használt 38 m%-os sós-vizes oldathoz képest. A sós-vizes oldatok esetében meghatározott jellemző hullámhosszokat a 14. táblázat foglalja össze.

A	Hullámhossz csúcs [nm]				
Anyag	1	2	3		
38 m%-os sós-víz referencia	173,57	218,10	-		
38 m%-os sós-víz használt	178,81	199,76	262,62		

14. táblázat A bazaltszövet degradációját vizsgáló UV spektrumok karakterisztikus csúcsai

A szakirodalomban található adatok szerint az anyagok UV spektrum alapján történő azonosítása nem olyan egyértelmű, mint az IR spektrumok alapján történő, mivel a jellemző csúcstartományok átlapolódhatnak. A szakirodalom alapján azonban a használt sós-vizes oldat esetében látható 190-220 nm közötti értékek (199,76; 218,10) a nátrium és a kálium, amíg a nagyobb csúcsérték (262,62 nm) a vas és a vas-oxidra jellemző karakterisztikus csúcs-tartományba esnek [149-151]. A spektroszkópiai vizsgálatok alátámasztották a feltevésemet, miszerint a bazaltszövet mechanikai tulajdonságai a sós-vizes kezelés hatására történő kioldódás miatt csökkentek, amit a bazaltot felépítő vas, illetve vas-oxid sós-vízzel történő kölcsönhatása okozott. Az erősítőszövetek után húzó, hárompontos hajlító és Charpy vizsgálatokkal elemeztem a sós-víz hatását a bazaltszálas mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságaira. A vágással kialakított próbatestek széleit viasszal zártam le, elkerülendő a sós-víz közvetlen bejutását a kompozit anyagba. A húzóvizsgálatok alapján (15-16. táblázat, 43-44. ábra) a sós-víz legkevésbé a bazaltszövettel erősített anyagokat (BFEP, BFCFEP) károsította, ami annak köszönhető, hogy a bazaltszövet jobban ellenáll a mátrixanyag mikropórusain és mikrorepedésein keresztül áthatoló sós-víznek, ami a bazaltot felépítő fémes elemeknek következménye. Az üvegszövettel összehasonlítva a monokompozitokban a bazaltszövet 30%-kal ellenállóbb, aminek hatása a hibrid rendszerek esetében is megfigyelhető. Az eredmények szerint a bazalt- és a szénszövet tekintetében nincs jelentős eltérés. A vizsgálatok alapján az üvegszövet bazaltszövettel történő helyettesítése sós-vizes környezetben jelentős élettartam-növekedést okozhat, ami egyben költségcsökkenést is, tehát a bazaltszövet felhasználása tengeri szélerőművekben pozitív hatással lehet a turbina lapátok élettartamára.
	Húzószilárdság-csökkenés									
Anyag	Koncentráció	Referencia	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%			
	Kezelési idő	$\sigma_m [MPa]$	$\sigma_m[\%]$							
	1 hét		22	30	39	52	56			
GFEP	2 hét	2174±105	26	37	51	55	60			
	4 hét		30	44	64	58	63			
BFEP	1 hét		5	8	11	12	21			
	2 hét	1897±95	7	11	15	17	26			
	4 hét		17	19	20	27	30			
	1 hét		3	9	12	19	23			
CFEP	2 hét	3521±110	6	11	14	20	27			
	4 hét		10	13	16	20	30			

15. táblázat A monokompozitok húzószilárdságának változása a sós-víz hatására

	Rugalmassági modulus-csökkenés									
Anyag	Koncentráció	Referencia	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%			
	Kezelési idő	E_m [GPa]			$E_m[\%]$					
	1 hét		1	6	15	36	43			
GFEP	2 hét	8,00±0,31	4	7	35	43	54			
	4 hét		6	11	52	69	86			
BFEP	1 hét		3	6	7	12	19			
	2 hét	9,65±0,29	4	7	8	17	31			
	4 hét		6	11	13	27	47			
	1 hét		0	9	14	16	18			
CFEP	2 hét	14,97±0,55	8	11	16	17	21			
	4 hét		11	18	25	28	35			

16. táblázat A monokompozitok rugalmassági modulusának változása a sós-víz hatására



43. ábra A sós-víz hatása az üveg-szénszövettel erősített hibridkompozit húzószilárdságára (a) és rugalmassági modulusára (b)



rugalmassági modulusára (b)

A húzóvizsgálat alapján meghatározott trend a hajlító vizsgálat eredményeivel (17-18. táblázat, 45-46. ábra) összhangban áll, nevezetesen a bazaltszövettel erősített kompozitok – az üvegszövettel erősítettekkel szemben – kevésbé bizonyultak érzékenynek a sós-vizes kezeléssel szemben. A bazaltszövet – az üvegszövethez képest – 36%-kal ellenállóbbnak bizonyult, a hajlítószilárdság és 26%-kal a hajlító modulus tekintetében 28 nap elteltével. A bazaltszövet – üvegszövethez viszonyított – jótékony hatását mutatják a hibridkompozitok vizsgálata során meghatározott eredmények is, habár a 4. hét végére az üveg és a bazaltszövettel erősített hibridek hajlítószilárdság-változása már megegyezett, a modulus tekintetében a nagyobb oldatkoncentráció már éppen ellentétes értéket eredményezett. A hajlítóvizsgálatok eredményei alapján a bazaltszövet eredményesen alkalmazható, abban az esetben is, amikor a szerkezeti elemek hajlító igénybevételnek

	Hajlítószilárdság-csökkenés									
Anyag	Koncentráció	Referencia	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%			
	Kezelési idő	$\sigma_{f}[MPa]$	$\sigma_f[\%]$							
	1 hét		14	24	27	30	57			
GFEP	2 hét	169±6	24	25	27	31	63			
	4 hét		36	42	45	51	68			
	1 hét		9	16	16	23	26			
BFEP	2 hét	198±4	16	20	21	26	29			
	4 hét		25	25	27	28	31			
	1 hét		0	2	6	15	16			
CFEP	2 hét	466±8	1	5	9	16	19			
	4 hét		1	7	14	26	30			

vannak kitéve. Összegezve, az üvegszövet alkalmazása kiváltható bazaltszövettel, ami – méréseim szerint – jobban ellenáll a sós-vizes környezetnek.

17. táblázat A	monokompozitok	hajlítószilárdság	ának változása :	a sós-víz hatására
----------------	----------------	-------------------	------------------	--------------------

	Hajlítómodulus-csökkenés									
Anyag	Koncentráció	Referencia	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%			
	Kezelési idő	$E_f[GPa]$			$E_f[\%]$					
GFEP	1 hét		0	22	25	33	36			
	2 hét	11,19±1,01	2	24	27	34	37			
	4 hét		3	40	44	56	62			
	1 hét	13,48±0,76	0	8	10	10	13			
BFEP	2 hét		1	9	12	12	15			
	4 hét		1	20	24	28	36			
CFEP	1 hét		0	1	3	5	6			
	2 hét	31,07±2,66	0	1	3	5	12			
	4 hét		1	3	7	9	19			

18. táblázat A monokompozitok hajlítómodulusának változása a sós-víz hatására



45. ábra A sós-víz hatása az üveg-szénszövettel erősített hibridkompozit hajlítószilárdságára (a) és hajlító modulusára (b)



46. ábra A sós-víz hatása a bazalt-szénszövettel erősített hibridkompozit hajlítószilárdságára (a) és hajlító modulusára (b)

A Charpy vizsgálat eredményei (19. táblázat, 47. ábra) is alátámasztják a szakító és a hajlító vizsgálatok eredményeit. A sós-vizes kezelés hatására a mátrixanyag is degradálódott, valamint az erősítőanyagokat felépítő elemi szálak is, amit az üvegszövettel erősített kompozit 4 hétig 38 m%-os oldatban történő 50%-os ütőszilárdság csökkenése is bizonyít. A bazaltszövet a hibrid rendszerek esetében szívósabb viselkedést, ezáltal nagyobb ütőszilárdságot eredményezett, mint az üvegszövet, ami a sós-vízzel szembeni jobb ellenálló-képességét bizonyítja.

		Ütőszilárdság-csökkenés									
Anyag	Koncentráció	Referencia	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%				
	Kezelési idő	$\alpha_{cU} [kJ/m^2]$	$\alpha_{cU}[\%]$								
	1 hét		1	13	21	23	29				
GFEP	2 hét	135±2	12	21	21	23	40				
	4 hét		24	22	23	23	50				
	1 hét		1	4	5	12	23				
BFEP	2 hét	112±2	8	16	21	24	29				
	4 hét		25	29	34	36	41				
	1 hét		22	26	37	42	44				
CFEP	2 hét	83±5	24	28	41	43	49				
	4 hét		25	31	44	43	54				

19. táblázat A monokompozitok ütőszilárdságának változása a sós-víz hatására



47. ábra A sós-víz hatása a hibridkompozitok ütőszilárdságára (GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Összességében kijelenthető, hogy a sós-vízzel történő kezelés hatására mind az erősítőszövetek, mind pedig a kompozitok jelentős mértékben degradálódnak, függetlenül az erősítőanyagtól. A károsodás mértékét azonban már jelentősen befolyásolja az erősítőanyag típusa. A húzó, hajlító és Charpy mérések alapján a bazaltszövettel erősített minták a legellenállóbbak mind közül, amit a felépítő fémes elemek és oxidjai okoznak. Ennek a viselkedésnek és ellenálló-képességnek köszönhetően a bazaltszövet az off-shore szélerőművel kedvező polimer kompozit alapanyagává válhat, ezáltal további elterjedése jósolható.

4.5. Hibridkompozitok szigetelőképességének vizsgálata

A szélerőművek és egyáltalán a polimer kompozitból készülő – különböző időjárási viszonyoknak kitett – tárgyak esetében a villámcsapás reális veszélye teljesen tönkreteheti azokat a polimerek elektromos szigetelő-képessége miatt. A kompozit alkatrészek vezető-képességét javítandó jó villamos vezető anyagot helyeznek a mátrixanyagba (repülőgépek esetében fém-háló).

A bazaltszövettel erősített kompozitok villamos vezető-képességét feltérképezendő, meghatároztam az üveg-, bazalt- és a szénszövettel erősített mono- és hibridkompozitok felületi, fajlagos felületi, térfogati, fajlagos térfogati ellenállását, villamos átütési szilárdságát, valamint elektromágneses árnyékolási csillapítását, amelyet a 48-49. ábra foglal össze. A felületi ellenállás vizsgálata során bizonyítást nyert, hogy a szénszövettel erősített monokompozit vezetőképessége a legnagyobb, az összes minta közül. Az is megfigyelhető, hogy a bazaltszövettel erősített monokompozitok felületi és fajlagos felületi ellenállása is kisebb, mint az üvegszövettel erősítetté, annak ellenére, hogy a fő felépítő elemeik azonosak. Ennek magyarázata, hogy a bazalt a fő alkotója (szilícium, illetve szilícium-oxid) mellett vezetőképes fémes elemeket (vas, alumínium) is tartalmaz [9, 152], amelynek hatására megvalósulhat az elektronok stabil áramlása. A térfogati ellenállás meghatározása során kapott eredmények szórása jelentős, fajlagosan azonban a bazaltszövettel erősített minták fajlagos térfogati ellenállása a legnagyobb az összes közül, ami azt mutatja, hogy a keresztmetszeten áthaladó elektronok áramlása gátoltabb, mint a többi anyagnál, amit a villamos átütési szilárdság változás is megerősít. A szénszövetet tartalmazó minták esetében nem volt lehetséges az átütési szilárdság meghatározása, mert a szénszövet hatására a minták szinte azonnal vezetővé váltak.







Az eredmények alapján a szénszövettel erősített mintáknál a térfogati ellenállás nagyobb, mint a felületi, amit a kompozit szerkezetéből adódik, a minta szálirányban jobban vezeti elektromosságot, mint rá merőlegesen. A szénszövet bazaltszövettel történő társításával elkészítettem egy olyan multifunkciós szerkezeti anyagot, amelynek villamos átütési szilárdsága kellően nagy ahhoz, hogy elviseljen egy villámcsapást, valamint a felhasznált szénszövetnek köszönhetően a vezetőképessége kellően nagy ahhoz, hogy a villám elektromos feszültségét (10⁶ V) elvezesse a szerkezeti anyag károsodása nélkül. A kompozit anyagok alkalmazási területének szélesítéséhez bizonyos esetekben kívánatos, ha képes árnyékolni az elektromágneses sugárzást. Az árnyékolás megvalósításához szükséges az elektronok stabil áramlása, ami éppen ellentétes a szigetelőképességgel. Az eredmények alapján a bazaltszövet alkalmazásával növelhető a szénszövettel erősített kompozit térfogati ellenállása (48. ábra c, d) és a villamos átütési szilárdsága (48. ábra e), valamint ezzel

párhuzamosan az elektromágneses árnyékolási képessége is (49. ábra), ami a hibridizációnak köszönhető, ahol a szénszövet az árnyékolást, amíg a bazaltszövet az elektromos szigetelést valósítja meg.



49. ábra A mono- és a hibridkompozitok elektromágneses árnyékolási csillapító-képessége (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A különböző erősítőszövetek szigetelő- és/vagy árnyékoló-anyagként történő alkalmazása során problémákat jelenthet az erősítőszövet formája, mivel a kötéspontoknál gyenge helyeket tartalmaz. Ennek kiküszöbölésére a mátrixanyaghoz kevert őrölt bazaltot használtam és elemeztem a bazaltpor hatását. A bazaltpor hatását az epoxi gyanta villamos vezető-képességére különböző töltöttségű (0; 1; 2,5; 5 m%) mintákon elemeztem. A felületi ellenállás meghatározása során kapott eredmények alapján (50. ábra) a töltőanyag tartalom növekedésével arányosan csökkent a minták villamos ellenállása, tehát nőtt a vezetőképességük. Ennek oka a bazaltporban található különböző fémes összetevők (Fe, Mg, Al) vezetőképessége. Az őrölt bazalt apró részecskéi egy olyan réteget alkotnak, ahol az egyes részecskék annyira közel vannak egymáshoz, hogy megvalósulhat az elektronok stabil áramlása. A bazaltpor hatása a villamos vezetőképességre hasonló, mint a bazaltszövetnek, tehát közvetve a többi villamos, valamint elektromágneses jellemzőre is hasonló hatással lehet. Összefoglalva, a bazaltporral sikeresen kiküszöbölhetőek és kijavíthatóak a szövet struktúrájából adódó gyenge helyek, a bazaltport homogén rétegben eloszlatva.



50. ábra A bazaltpor-tartalom hatása a felületi ellenállásra

4.6. Hibridkompozitok rétegközi nyírószilárdságának javítása

A rétegközi adhézió minősége, valamint a szál-mátrix megfelelő kapcsolata a kompozitok szilárdságának szempontjából kulcsfontosságú, ezért magas szinten tartása és javítása mindig is kiemelkedő szerepet tölt be [153]. Értekezésem során szabványos, húzó elrendezésű rétegközi nyíróvizsgálatokkal vizsgáltam a különböző töltőanyagok (9. táblázat) hatását a szál-mátrix adhézióra. Első lépésben a különböző típusú és mennyiségű töltőanyagokat nagy fordulatszámú elektromos keverő segítségével oszlattam el a mátrixanyagban, majd kézi laminálással impregnáltam át a bazaltszövetet. Az elkészített kompozit lemezeket 24 órán át szobahőmérsékleten térhálósítottam, majd 4 órán keresztül 60°C hőmérsékleten utótérhálósítottam. Az utókezelést követően Mutronic Diadisc 4200 típusú gyémánttárcsás vágógéppel munkáltam ki a próbatesteket és készítettem el a bevágásokat a próbatestekre.

A mérések során megvizsgáltam a különböző töltőanyagok típusának és mennyiségének hatását a bazaltszövettel erősített epoxigyanta rétegközi nyírószilárdságra (ILSS). A vizsgálatok alapján meghatározott rétegközi nyírószilárdságokat az 51. ábra foglalja össze. Az eredmények azt mutatják, hogy a leghatásosabbnak a bazaltpor (BFP) bizonyult, amelynek hatására a nyírószilárdság 1 m% töltöttség esetén 18%-kal javult. Ennek oka, hogy a bazaltport alkotó részecskék egymással összekapcsolódva körülölelik a bazaltszálakat, így javítva a rétegközi nyírószilárdságot. A 0,5 m% mennyiségű többfalú szén nanocső (CNT) hozzáadása 9%-os javulást eredményezett, amíg az 1 m%-os töltöttségű minta nyírószilárdsága a referenciához képest 30%-kal kisebb, amit a relatív nagy

mennyiségű szén nanocső agglomerálódása okoz, ami feszültséggyűjtő helyeket hoz létre a keresztmetszetben.



51. ábra A töltőanyagok hatása a bazaltszövettel erősített epoxi gyanta mátrixú kompozit rétegközi nyírószilárdságára (ILSS – Interlaminar Shear Strength)
 (BFP - őrölt bazalt por, CNT - többfalú szén nanocső, GpS - lemezes szerkezetű grafén)

A grafén esetében a legjobb hatást az 0,1 m%-os töltés adta, e fölött megtörtént – a szén nanocsövek esetében is megfigyelhető – agglomerálódás (52. ábra), amikor is a grafén részecskék egységes rétegekké álltak össze, amelyek egymáson könnyedén elcsúszhatnak, így jelentősen csökkentve a nyírószilárdságot.



52. ábra A nanoméretű részecskék agglomerálódása a) szén nanocső agglomerátumok az erősítetlen mátrixanyagban, b) grafén agglomerátumok a bazaltszövettel erősített mintában

A vizsgálatok alapján az 1 m% mennyiségű bazaltporral való töltés eredményezte a legnagyobb rétegközi nyírószilárdság javulást, ezért további vizsgálataimat ezzel hajtottam végre. A töltőanyag típusának és mennyiségének kiválasztása után megvizsgáltam a

kiválasztott hatását a hibridkompozitok mechanikai tulajdonságaira is. A töltőanyag hatását az elkészített anyagok mechanikai tulajdonságaira húzó, hárompontos hajlító, Charpy és rétegközi nyíróvizsgálatokkal elemeztem, amelyek eredményeit az 52-55. ábra mutatja. A bazaltpor hatására a bazaltszövetet tartalmazó minták (BFEP, BFCFEP) húzószilárdsága növekedett, a rugalmassági modulusuk pedig csökkent. A szakirodalmi adatok szerint [154], a töltőanyagok hatására a kompozitok általában ridegebbé válnak, ami a bazaltszövetet nem tartalmazó minták esetében meg is figyelhető. A bazaltszövetet tartalmazó minták esetén tapasztalható javulás annak köszönhető, hogy a bazaltpor és a bazaltszövet között szinergikus hatás lépett fel, ami annak köszönhető, hogy a bazaltpor felületén ugyanúgy megtalálható a kiváló adhéziós kapcsolatot kialakító felületkezelő szer.



53. ábra A kiválasztott töltőanyag hatása hatása a mono- és a hibridkompozitok húzószilárdságára (a), valamint rugalmassági modulusára (b) (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A hárompontos hajlító vizsgálatok eredményei alapján számított hajlítószilárdság és hajlító modulus követi a húzóvizsgálat során tapasztalt tendenciát, a bazaltszövettel erősített minták szilárdsága nagyobb, amíg modulusa kisebb, mint a többi mintáé.



54. ábra A kiválasztott töltőanyag hatása hatása a mono- és a hibridkompozitok hajlítószilárdságára (a), valamint hajlító modulusára (b)

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálattal meghatározott ütőszilárdságok változását alátámasztják a szakirodalmi adatok is [154], miszerint a töltőanyagok hatására a töltött anyagok ridegebbé válnak, ezáltal jelentősen csökken az ütőszilárdságuk. A bazaltporral töltött mono- és hibridkompozitok rétegközi nyírószilárdsága minden esetben növekedett, a legjelentősebb növekményt (48%) a bazalt-szénszövettel (BFCFEP) erősített minták esetében tapasztaltam, ami ugyancsak a bazaltszövet és a bazaltpor közti szinergikus hatásnak köszönhető.





(GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

⁽GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Az eredmények azt bizonyítják, hogy a bazaltpor sikeresen alkalmazható a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok rétegközi nyírószilárdságának javítására, anélkül, hogy húzó- és hajlítószilárdságuk csökkenne.

4.7. Az ismétlődő igénybevétel hatása a hibridkompozitokra

A kompozitok mechanikai tulajdonságaira – csakúgy, mint minden anyagéra – jelentős hatást gyakorolnak az ismétlődő, fárasztó jellegű igénybevételek. A szélerőművek lapátjait ismétlődő jellegű húzó és hajlító terhelések veszik igénybe. Értekezésem jelen fejezetében az általam készített mono- és hibridkompozitok kis ciklusszámú (10 ismétlés) viszonylag nagy elmozdulások (a szakadási nyúlás, illetve a határlehajlás 80%-ig) hatására történő szilárdság-változást vizsgáltam, húzó és hajlító vizsgálatokon keresztül. A mérések eredményeit az 56. ábra foglalja össze, ahol minden egyes diagram 5-5 párhuzamos mérés átlagát mutatja.



56. ábra Az ismétlődő igénybevétel hatása a mono- és a hibridkompozitok húzó (a) -, valamint hajlítószilárdságára (b), (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP - szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Az eredmények szerint a ciklusszámok növekedésével folyamatosan csökkent az általam vizsgált kompozitok húzó-, a hajlító- és az ütőszilárdsága. Ennek magyarázata, hogy a ciklusszám emelkedésével folyamatosan károsodik a mátrix anyag, kompozitot felépítő erősítőanyag, valamint romlik a szál-mátrix közötti kapcsolat is. A húzószilárdság tekintetében a bazaltszövettel erősített monokompozit (BFEP) minták vesztettek a legtöbbet a szilárdságukból (16%), amíg a hibrid esetben (BFCFEP) a csökkenés mindössze 9% volt. Ez az eredmény a bazalt- és a szénszövet között létrejött szinergikus hatásra utal. Ez a

PhD értekezés

szinergia magyarázza a hajlítószilárdságnál tapasztalt jelenségeket is, miszerint a szénszövettel erősített monokompozit (CFEP) hajlítószilárdság-csökkenése átlagosan 46%, ezzel szemben a bazalt-szénszövettel erősített mintáé (BFCFEP) átlagosan 8%. Az eredmények és ezek trendje alapján megalkotható egy matematikai leírás, aminek segítségével jól megbecsülhető a vizsgált kompozitokat minősítő anyagjellemző, a lineáris viszkoelasztikus (LVE) modell felhasználásával.

Ciklikus deformációgerjesztés

A ciklikus kvázistatikus húzó- és hajlítóvizsgálatok deformációgerjesztéssel történtek, amelynél a fel- és leterhelési sebesség abszolút értéke (\dot{X}_o) azonos (57. ábra):



57. ábra Ciklikus deformációgerjesztés és deriváltja

ahol t_o a félperiódusidő és X_o a maximális deformáció (17):

$$X_o = \dot{X}_o t_o , \qquad (17)$$

valamint az n-edik ciklusban a gerjesztés (n=1,2,...) (18):

$$X_{n}(t) = \begin{cases} \dot{X}_{o}t - 2(n-1)X_{o}, & (2n-2)t_{o} \le t < (2n-1)t_{o} \\ 2nX_{o} - \dot{X}_{o}t, & (2n-1)t_{o} \le t < 2nt_{o} \end{cases}$$
(18)

és a teljes gerjesztési folyamat a gerjesztés-ciklusok összege (19):

$$X(t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(t)$$
. (19)

A gerjesztés derivált folyamata egy váltakozó előjelű négyszögjel-sorozat, amelynek az nedik ciklusa (n=1,2,...) (20):

$$\dot{X}_{n}(t) = \begin{cases} \dot{X}_{o}, & (2n-2)t_{o} \le t < (2n-1)t_{o} \\ -\dot{X}_{o}, & (2n-1)t_{o} \le t < 2nt_{o} \end{cases}$$
(20)

Ezek összege a teljes derivált folyamat (21):

$$\begin{split} \dot{X}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \dot{X}_{n}(t) = \\ &= \dot{X}_{o} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[1 \left(1 - (2n-2)t_{o} \right) - 1 \left(1 - (2n-1)t_{o} \right) \right] - \left[1 \left(1 - (2n-1)t_{o} \right) - 1 \left(1 - 2nt_{o} \right) \right] \right\} = \end{split}$$

$$\begin{aligned} &= \dot{X}_{o} \sum_{n=1}^{\infty} \left[d_{2n-1}(t,t_{o}) - d_{2n}(t,t_{o}) \right], \end{aligned}$$

$$(21)$$

ahol 1(t) az ún. egységugrás-függvény (22):

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t \le 0\\ 1, & 0 < t \end{cases}$$
(22)

és különbségük az úgynevezett ablakfüggvény (k=1,2,...) (23):

$$d_{k}(t,t_{o}) = 1(t - (k-1)t_{o}) - 1(t - kt_{o}).$$
⁽²³⁾

Amennyiben a próbatest viselkedése lineárisan viszkoelasztikus típusú, és ismert az E(t) relaxációs modulus függvénye, úgy a Boltzmann-féle szuperpozíciós elvnek megfelelően az Y(t) feszültségválasz konvolúciós integrállal adható meg [155] (24):

$$Y(t) = \sigma(t) = \int_{0}^{t} E(t-u)\dot{X}(u)du .$$
 (24)

Továbbá, ha félciklusokat tekintünk és t a k-adik félciklusba esik ((k-1) $t_0 \le t < kt_0$), úgy az (21) szerint – a különböző előjeleket is figyelembe véve – a két ciklusfél azonos módon kezelhető, és a feszültségválasz a k-adik félciklusban (25):

$$Y(t) = \sigma(t) = \dot{X}_o \sum_{i=1}^{k} (-1)^{i-1} d_k(t, t_o) \int_{(i-1)t_o}^{t} E(t-u) du, \qquad (25)$$

ahol feltettük, hogy az integrálás és az összegzés felcserélhető. A kísérleti úton vizsgált anyagok üveg-, bazalt-, és/vagy szénszál erősítésű, epoxi mátrixú kompozitok, amelyek esetében a maradó alakváltozás általában elhanyagolható a pillanatnyi rugalmas és késleltetett rugalmas komponensek mellett, ezért feltehető, hogy a ciklikus deformációterheléses húzó-, illetve hajlítóvizsgálatok eredményei leírhatók többtagú Maxwell modellt tartalmazó, általánosított Standard Solid viszkoelasztikus anyagmodellel (58. ábra).



58. ábra Általánosított Standard-Solid modell

E modell általában véges sok Maxwell ág és egy rugó párhuzamos kapcsolása, így minden ág azonos deformációgerjesztést kap és az eredő erő vagy feszültség az ágfeszültségek összege, tehát az egyes ágak külön is vizsgálhatók. A szükséges Maxwell ágak számát a leírás pontossága szabja meg. A megfelelő modell kidolgozásához ezért először tekintsük egy Maxwell ág viselkedését az 57. ábra szerinti ciklikus deformációterhelés esetén.

4.7.1. Ciklikus húzás modellezése

A Maxwell modell (58. ábra) rugóelemeire a Hooke törvény, míg viszkózus elemeire a Newton törvény érvényes, ennek megfelelően két paramétere az E húzórugalmassági modulus és az η dinamikus viszkozitási tényező [155]. A Maxwell modell differenciálegyenlete a modell két vége között mérhető ε relatív nyúlás, mint gerjesztés, és a σ (műszaki) feszültség – mint válasz – közötti kapcsolatot írja le [155], amelynek Bodeféle alakja (26):

$$\tau \dot{\sigma} + \sigma = E \tau \dot{\varepsilon} \,, \tag{26}$$

ahol a változók feletti pontok az idő szerinti deriváltakat jelölik, valamint τ a modell időállandója (27):

$$\tau = \frac{\eta}{E}.$$
(27)

A t=0 időpillanatban belépő X=ε nyúlásgerjesztés esetén a modell Y=σ feszültségválaszát az k-adik félciklusban a (20) elsőrendű, inhomogén differenciálegyenlet általános megoldása adja [155] (28):

$$\sigma_k(t) = \sigma_{k-1} \left((k-1)t_o \right) e^{-\frac{t-(k-1)t_o}{\tau}} + E \int_{(k-1)t_o}^t \dot{\varepsilon}(u) e^{-\frac{t-u}{\tau}} du, \quad (k-1)t_o \le t \le kt_o, \ k=1,2,\dots,$$

(28)

ahol az 57. ábra szerint (k-1)t₀≤t≤kt₀ esetén (29):

$$\dot{\varepsilon}(t) = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_o = \varepsilon_o / t_o, & k \ p \acute{a} ratlan \\ -\dot{\varepsilon}_o = -\varepsilon_o / t_o, & k \ p \acute{a} ros \end{cases}$$
(29)

Az első félciklus kezdetén a rendszer deformáció és feszültségmentes, azaz $\sigma(0)=0$, a deformációterhelés növekvő, ennek megfelelően a feszültségválasz is az [155] (30):

$$\sigma_1(t) = E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad 0 \le t \le t_o$$
(30)

amelynek a félciklusvégi értéke a második félciklusbeli feszültség kezdeti értékét adja (31):

$$\sigma_1(t_o) = E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} \right).$$
(31)

A második félciklusban $\varepsilon_0 < 0$ és a deformációterhelés csökken ($t_o \le t \le 2t_o$) (32):

$$\sigma_2(t) = \sigma_1(t_o)e^{\frac{t-t_o}{\tau}} - E\dot{\varepsilon}_o \int_{t_o}^t e^{\frac{t-u}{\tau}} du = E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}}\right)e^{-\frac{t-t_o}{\tau}} - E\frac{\varepsilon_o}{t_o}\tau \left(1 - e^{-\frac{t-t_o}{\tau}}\right), \quad (32)$$

és a félciklusvégi feszültség (33):

Tamás Péter

$$\sigma_2(2t_o) = -E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} \right) = -\sigma_1(t_o) \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} \right), \tag{33}$$

A feszültség a harmadik félciklusban ($2t_o \le t \le 3t_o$) (34):

$$\sigma_{3}(t) = \sigma_{2}(t_{o})e^{\frac{-t-2t_{o}}{\tau}} + E\dot{\varepsilon}_{o}\int_{2t_{o}}^{t}e^{-\frac{t-u}{\tau}}du = -\sigma_{2}(t_{o})e^{-\frac{t-2t_{o}}{\tau}} + E\varepsilon_{o}\frac{\tau}{t_{o}}\left(1 - e^{-\frac{t-2t_{o}}{\tau}}\right), \quad (34)$$

míg a félciklus végén (35):

$$\sigma_3(3t_o) = -E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}}\right)^2 e^{-\frac{t_o}{\tau}} + E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}}\right) = \sigma_1(t_o) \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} + e^{-\frac{2t_o}{\tau}}\right). \tag{35}$$

Ennek alapján a k-adik ciklus végén fellépő feszültségérték általános alakja (k=1,2,...) (36):

$$\sigma_k(kt_o) = (-1)^{k-1} \sigma_1(t_o) \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} + e^{-\frac{2t_o}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k-1} e^{-\frac{(k-1)t_o}{\tau}} \right)$$
(36)

Ennek bizonyítása teljes indukcióval végezhető, amelynek első és második lépése a fentiekben már meg is történt. Tegyük fel tehát, hogy a (43) összefüggés k-ra igaz, határozzuk meg a (28) segítségével a feszültséget (k+1)-re ($kt_o \le t \le (k+1)t_o$) (37):

$$\sigma_{k+1}(t) = \sigma_k (kt_o) e^{-\frac{t-kt_o}{\tau}} + E \int_{kt_o}^t \dot{\varepsilon}(u) e^{-\frac{t-u}{\tau}} du =$$

$$= (-1)^{k-1} \sigma_1(t_o) \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} + e^{-\frac{2t_o}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k-1} e^{-\frac{(k-1)t_o}{\tau}} \right) e^{-\frac{t-kt_o}{\tau}} + (-1)^k E\varepsilon_o \frac{\tau}{t_o} \left(1 - e^{-\frac{t-kt_o}{\tau}} \right)$$
(37)

Ennek alapján a feszültség a (k+1)-edik félciklus végén (38):

$$\begin{aligned} \sigma_{k+1}((k+1)t_{o}) &= \\ &= (-1)^{k-1}\sigma_{1}(t_{o}) \Biggl(1 - e^{\frac{t_{o}}{\tau}} + e^{\frac{2t_{o}}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k-1}e^{\frac{-(k-1)t_{o}}{\tau}} \Biggr) e^{\frac{t_{o}}{\tau}} + (-1)^{k} E\varepsilon_{o} \frac{\tau}{t_{o}} \Biggl(1 - e^{\frac{t_{o}}{\tau}} \Biggr) = \\ &= (-1)^{k}\sigma_{1}(t_{o}) \Biggl[(-1) \Biggl(e^{\frac{t_{o}}{\tau}} - e^{\frac{2t_{o}}{\tau}} + e^{\frac{3t_{o}}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k-1}e^{\frac{-kt_{o}}{\tau}} \Biggr) + 1 \Biggr] = \\ &= (-1)^{k}\sigma_{1}(t_{o}) \Biggl(1 - e^{\frac{t_{o}}{\tau}} + e^{\frac{2t_{o}}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k}e^{\frac{-kt_{o}}{\tau}} \Biggr), \end{aligned}$$

$$(38)$$

ami teljesen megfelel a (30)-nek, így az állítást bizonyítottuk.

A (38) egyszerűbb alakba is írható, ha figyelembe vesszük, hogy a zárójeles részben egy negatív kvóciensű geometriai sor egy k-tagú részletösszege található (39):

$$1 - e^{\frac{-t_o}{\tau}} + e^{\frac{-2t_o}{\tau}} - + \dots + (-1)^{k-1} e^{\frac{-(k-1)t_o}{\tau}} = 1 + \left(-e^{\frac{-t_o}{\tau}}\right) + \left(-e^{\frac{-t_o}{\tau}}\right)^2 - + \dots + \left(-e^{\frac{-t_o}{\tau}}\right)^{k-1} = \frac{1 - \left(-e^{\frac{-t_o}{\tau}}\right)^k}{1 - \left(-e^{\frac{-t_o}{\tau}}\right)} = \frac{1 - (-1)^k e^{\frac{-t_o}{\tau}}}{1 + e^{\frac{-t_o}{\tau}}}.$$
(39)

A (39)-at a (36)-ba helyettesítve kapjuk a félciklusvégi feszültségértékek tömörebb kifejezését (k=1,2,...) (40):

$$\sigma_{k}(kt_{o}) = (-1)^{k-1} \sigma_{1}(t_{o}) \frac{1 - (-1)^{k} e^{-\frac{kt_{o}}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{t_{o}}{\tau}}} = (-1)^{k-1} E \varepsilon_{o} \frac{1 - e^{-\frac{t_{o}}{\tau}}}{\frac{t_{o}}{\tau}} \frac{1 - (-1)^{k} e^{-\frac{kt_{o}}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{t_{o}}{\tau}}}.$$
(40)

A ciklusszám növekedésével a félciklusvégi feszültség véges értékhez tart, amely a pozitív csúcsok esetén pozitív, míg a negatívaknál negatív (41):

$$\sigma_k(kt_o) \xrightarrow{k \to \infty} \frac{\sigma_1(t_o)}{1 + e^{-\frac{t_o}{\tau}}} \cdot \begin{cases} +1, & k \text{ páratlan} \\ -1, & k \text{ páros} \end{cases}$$
(41)

Tamás Péter

Mindezek alapján szétválaszthatók a pozitív és negatív feszültségcsúcsok. A monoton csökkenő pozitív feszültségcsúcsokat tehát a páratlan k értékeknél kapjuk, azaz, ha k=2n-1 (n=1,2,...) (42):

$$\sigma_{2n-1}((2n-1)t_o) = \sigma_1(t_o) \frac{1+e^{-\frac{(2n-1)t_o}{\tau}}}{1+e^{-\frac{t_o}{\tau}}} = E\varepsilon_o \frac{1-e^{-\frac{t_o}{\tau}}}{\frac{t_o}{\tau}} \frac{1+e^{-\frac{(2n-1)t_o}{\tau}}}{1+e^{-\frac{t_o}{\tau}}} .$$
(42)

Rögzített n-nél, ha a t_0 kicsi, vagy tart a 0-hoz, akkor a deformációsebesség a végtelenhez tart, s ekkor a pozitív feszültségcsúcsok ciklustól függetlenül állandók (43):

$$\sigma_{2n-1}((2n-1)t_o) = E\varepsilon_o \frac{1-e^{-\frac{t_o}{\tau}}}{\frac{t_o}{\tau}} \frac{1+e^{-\frac{(2n-1)t_o}{\tau}}}{1+e^{-\frac{t_o}{\tau}}} \xrightarrow{t_o \to 0} E\varepsilon_o.$$
(43)

Ha viszont a t_o nagy, vagy tart a ∞ -hez, akkor a deformációsebesség a 0-hoz tart, s ekkor a pozitív feszültségcsúcsok hiperbolikusan csökkennek, szintén a 0-hoz tartanak (44):

$$\sigma_{2n-1}((2n-1)t_o) = E\varepsilon_o \frac{1-e^{-\frac{t_o}{\tau}}}{\frac{t_o}{\tau}} \frac{1+e^{-\frac{(2n-1)t_o}{\tau}}}{1+e^{-\frac{t_o}{\tau}}} \sim \frac{E\varepsilon_o}{\frac{t_o}{\tau}} \xrightarrow{t_o \to \infty} 0.$$
(44)

Példaképpen az 59. ábra a (44) szerint számított feszültségcsúcsok alakulását szemlélteti a méréseknek megfelelő deformációgerjesztés (L₀=100 mm, Δ L= 5 mm, v=10 mm/min \rightarrow t₀=30 s, $\dot{\varepsilon}_o = 0,0017/s$, $\varepsilon_0=0,051$) és választott modelladatok (E=1000 MPa, $\eta=10000$ MPas $\rightarrow \tau=50$ s, t₀/ $\tau=0,6$) esetén.



59. ábra Pozitív feszültségcsúcsok a ciklusszám függvényében

Látható, hogy noha a pozitív feszültségcsúcsok szigorúan monoton csökkennek, az adott paraméterek mellett lényegében már az ötödik csúcstól kezdve a csökkenés olyan kismértékű, hogy a sorozat állandósultnak tekinthető. A csökkenés sebességét az exponenciális tag, illetve a t_0/τ hányados szabja meg, ahogy azt a 60. ábra is jól szemlélteti, ahol a (42) szerinti csúcsértékeket az $E\epsilon_0$ -lal normálva ábrázoltam.



60. ábra A normált Maxwell feszültségcsúcsok változása

Általánosított Standard-Solid modell alkalmazása húzásnál

Egy rugó és N rugóág alkotta általánosított Standard Solid modell esetén (58. ábra) az eredő feszültség (45):

$$\sigma(t) = \sigma_o(t) + \sigma_1(t) + \sigma_2(t) + \dots + \sigma_N(t)$$
(45)

ahol $\sigma_1(t),...,\sigma_N(t)$ a Maxwell ágakban ébredő – az előzőekben elemzett – feszültség, míg (46):

$$\sigma_o(t) = E_o \varepsilon(t) \tag{46}$$

a gerjesztéssel arányos rugóágbeli feszültség.

A pozitív feszültségcsúcs minden ágban a pozitív deformációcsúcs pillanatában jön létre, ezért az eredő pozitív feszültségcsúcsokat is az ágcsúcsok összege adja. Ennek értéke a (2n-1)-edik félciklusban (47, 48):

$$\sigma_{2n-1}((2n-1)t_o) = E_o\varepsilon_o + \sum_{k=1}^N E_k\varepsilon_o g_{2n-1}\left(\frac{t_{ok}}{\tau_k}\right),\tag{47}$$

ahol

$$g_{2n-1}\left(\frac{t_{ok}}{\tau_k}\right) = \frac{1 - e^{-\frac{t_{ok}}{\tau_k}}}{\frac{t_{ok}}{\tau_k}} \frac{1 + e^{-\frac{(2n-1)t_{ok}}{\tau_k}}}{1 + e^{-\frac{\tau_{ok}}{\tau_k}}}.$$
(48)

Az (47) és (48) alapján meghatározható, a kompozit anyagokat feltehetőleg e tekintetben minősítő erejű, aszimptotikus pozitív csúcsértéket is (49, 50):

$$\sigma_{\infty} = E_o \varepsilon_o + \sum_{k=1}^{N} E_k \varepsilon_o g_{\infty} \left(\frac{t_{ok}}{\tau_k} \right), \tag{49}$$

ahol

$$g_{\infty}\left(\frac{t_{ok}}{\tau_k}\right) = \frac{1 - e^{-\frac{t_{ok}}{\tau_k}}}{\frac{t_{ok}}{\tau_k}} \frac{1}{1 + e^{-\frac{t_{ok}}{\tau_k}}}.$$
(50)

A feszültségcsúcsok egy t_o szélességű intervallum végén jelentkeznek, ahol a nyúlás értéke éppen ε_0 . Ezzel osztva a feszültségcsúcsok értékét, húrmodulus jellegű mennyiséghez jutunk, amelynek az E_{∞} aszimptotikus értéke az adott anyag aszimptotikus fajlagos ellenállását jellemzi a ciklikus nyúlásgerjesztéssel szemben, így fontos anyagjellemzőnek tekinthető (51):

$$E_{\infty} = E_o + \sum_{k=1}^{N} E_k g_{\infty} \left(\frac{t_{o_k}}{\tau_k} \right).$$
(51)

A mért feszültségcsúcsok modellezése általánosított Standard-Solid modellel húzásnál

A 61. ábra a ciklikus húzóvizsgálattal mért feszültségcsúcsok alakulását mutatja különböző kompozit anyagok esetén. Az esetek többségében a csúcsértékek kezdetben meredeken csökkennek, azonban nem "állandósulnak", hanem a csökkenés, ugyan jóval kisebb, de véges, jól észlelhető meredekséggel folytatódik. Ez arra utal, hogy ezt legalább két, időállandóval rendelkező, tehát Maxwell ágfolyamat összege alkotja.



61. ábra A mért húzófeszültség csúcsok

A 62. ábra a mért csúcsérték folyamatok kezdeti értékkel normált alakulását mutatja. Megállapítható, hogy a kezdeti eséstől eltekintve, a normált csúcsértékek csökkenése hasonló, közel párhuzamos görbék mentén haladnak, ami arra utal, hogy hasonló modellek alkalmazhatók minden vizsgált anyag esetén.



62. ábra A normált mért húzófeszültség csúcsok

Mindezek alapján a csúcsértékek leírásához egy, két Maxwell ágat tartalmazó, általánosított Standard Solid modellt választunk (58. ábra), így az (45) szerinti eredő feszültség (52):

$$\sigma(t) = \sigma_o(t) + \sigma_1(t) + \sigma_2(t).$$
(52)

Az eredő pozitív feszültségcsúcsokat (53), mint az ágcsúcsok összege a (2n-1)-edik félciklusban az (47) adja:

$$\sigma_{2n-1}((2n-1)t_o) = E_o \varepsilon_o + E_1 \varepsilon_o g_{2n-1}(t_{o1}/\tau_1) + E_2 \varepsilon_o g_{2n-1}(t_{o2}/\tau_2).$$
(53)

Az (49) alapján a kompozit anyagokat minősítő aszimptotikus pozitív feszültségcsúcs értékek (54):

$$\sigma_{\infty} = E_o \varepsilon_o + E_1 \varepsilon_o g_{\infty} (t_{o1} / \tau_1) + E_2 \varepsilon_o g_{\infty} (t_{o2} / \tau_2), \qquad (54)$$

illetve a (51) és (54)-al az aszimptotikus ciklikus húzó modulus (55):

$$E_{\infty} = E_o + E_1 g_{\infty} (t_{o1} / \tau_1) + E_2 g_{\infty} (t_{o2} / \tau_2).$$
(55)

A különböző kompozit anyagokon mért pozitív csúcsértékekre való illesztés eredményeit a 63. ábra szemlélteti. Az illeszkedés jóságát jól jellemzi az, hogy az átlagos négyzetes hiba minden esetben kisebb volt 0,61%-nál, míg a determinációs együtthatók értéke nagyobb volt 98%-nál. A kapott modell-paramétereket a 20. táblázat foglalja össze.





63. ábra A pozitív csúcsértékekre való illesztés eredményei

(a) üvegszövettel erősített epoxi gyanta, (b) bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, (c) szénszövettel erősített epoxi gyanta, (d) üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, (e) bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Húzó igénybevétel											
		modellparaméterek									
Anyagok	E_o	E_1	E_2	η_1	η_2	$(t_0/\tau)_1$	$(t_0/\tau)_2$				
GFEP	4000	1700	900	93840	532286	0,75	0,07				
BFEP	4400	3700	900	175612	408857	0,67	0,07				
CFEP	7000	3800	900	180358	260182	0,67	0,11				
GFCFEP	6850	1300	900	104000	342857	0,30	0,06				
BFCFEP	8000	1380	900	150545	154286	0,22	0,14				

20. táblázat A ciklikus húzóigénybevétel modell-paraméterei

(GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

4.7.2. Ciklikus hajlítás modellezése

A hárompontos ciklikus hajlítóvizsgálat is az 57. ábra szerinti gerjesztéslefutást követte, ahol a vezérelt deformáció a támaszközépen kialakuló f lehajlás volt, azaz $X(t)=f(t)=y_o(l/2,t)$ (*l* a támaszköz, $y_o(x,t)$ a lehajlás a $0 \le x \le l$ keresztmetszetben).

A hárompontos hajlítás ideális esetben az úgynevezett egyenes hajlítást valósítja meg [156], amelynél kvázistatikus, azaz időben "lassan" változó terhelés esetén a tehetetlenségi erők elhanyagolhatók [157], így a statikus terheléshez hasonló összefüggések határozhatók meg. Amennyiben a próbatest téglalap-keresztmetszetű prizmatikus rúdnak tekinthető (h – magasság, b – szélesség, A=bh keresztmetszet), és a derékszögű koordinátarendszer x tengelye a terheletlen rúd középvonala, míg az y és z a rúd magassága és szélessége irányába mutat, úgy a terhelt rúd x keresztmetszetében, semleges szálának $\rho(x,t)$ görbületi sugara és a tőle y távolságban lévő réteg rúdirányú $\varepsilon_x(x,y,t)$ nyúlása között lineárisan viszkoelasztikus anyag esetében is érvényes az alábbi összefüggés (-h/2≤y≤h/2) (56):

$$\varepsilon_{x}(x, y, t) = \frac{y}{\rho(x, t)},$$
(56)

továbbá a nyomaték a válaszként mérhető F(t) erőből számítható (57):

$$M(x,t) = \frac{F(t)x}{2}.$$
(57)

A rúdirányú normálfeszültség a nyomatékból kapható, ugyanakkor figyelembe véve, hogy itt az E modulus és a deformáció is időfüggő, a (24) feszültséget és az (56) deformációt kifejező egyenletek felhasználásával is számítható (58):

$$\sigma_{x}(x, y, t) = \frac{M(x, t)}{I_{z}} y = \int_{0}^{t} \dot{E}(t - u) \varepsilon_{x}(x, y, u) du = y \int_{0}^{t} \frac{\dot{E}(t - u)}{\rho(x, u)} du , \quad (58)$$

ahol I_Z a kereszmetszet z-tengelyre számolt tehetetlenségi nyomatéka. Ebből a hajlítónyomaték és a deformáció összefüggése (59):

$$M(x,t) = \frac{I_z}{y} \sigma_x(x, y, t) = I_z \int_0^t \frac{\dot{E}(t-u)}{\rho(x,u)} du .$$
 (59)

Ebből a rúdirányú feszültség az y rétegben, 0,1*l*-nél kisebb lehajlás esetén (1/p≈y₀") (60):

$$\sigma_x(x,y,t) = \frac{M(x,t)}{I_z} y = \frac{F(t)x}{2I_z} y = y \int_0^t \frac{\dot{E}(t-u)}{\rho(x,u)} du \approx y \int_0^t \dot{E}(t-u) \frac{\partial^2 y(x,u)}{\partial x^2} du .$$
(60)

Kétszeri x-szerinti integrálással és a peremfeltételek ($y_0(0,t)=0$, $y_{0,x}(l/2,t)=0$) figyelembe vételével – a lineárisan rugalmas anyag esetéhez hasonlóan, figyelembe véve, hogy hárompontos hajlításnál ébredő normálfeszültség maximuma a támaszköz közepén (x=l/2) és a szélső szál(ak)ban (y=h/2) valósul meg – kapjuk a maximális hajlítófeszültség és a középlehajlás kapcsolatát (61):

$$\sigma(t) = \sigma_x(l/2, h/2, t) = \frac{F(t)lh}{8I_z} \approx \frac{6h}{l^2} \int_0^t \dot{E}(t-u)f(u)du.$$
(61)

Lineárisan viszkoelasztikus hárompontos hajlítás esetén tehát a (61) felel meg a húzásra vonatkozó (24) egyenletnek, amelyek matematikai alakja megegyezik, ami különösen akkor szembetűnő, ha bevezetjük a deformáció alábbi fajlagos középlehajlás értelmezésű definícióját (62):

$$X(t) = \frac{6h}{l} \frac{f(t)}{l}.$$
(62)

Ennek alapján a húzás és a hajlítás a (24)-nek megfelelően azonos módon kezelhető (63):

$$X(t) = \begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{\Delta l}{l_0}, húzásra\\ \frac{6h}{l} \frac{f(t)}{l}, hajlításra \end{cases}.$$
(63)

Ennek alapján ciklikus húzás- és hajlítás esetén a deformáció csúcsértékének a következők feleltethetőek meg (57. ábra) (64):

$$X(t) = \begin{cases} \varepsilon_0, húzásra\\ \frac{6h}{l} \frac{f(t)}{l}, hajlításra \end{cases}$$
(64)

ahol tehát ε_0 a rúdirányú relatív nyúlás, amíg f₀ a középlehajlás maximális értéke. Következésképpen a fentiekben tárgyalt modellek, eljárások és eredmények megfelelő értelmezés mellett hajlításra is használhatók. A kompozit anyagokat minősítő aszimptotikus pozitív feszültségcsúcs értékek tehát hajlítás esetén is a (49) és (64) formulákkal határozhatóak meg (65):

$$\sigma_{\infty} = (E_o + E_1 g_{\infty} (t_{o1} / \tau_1) + E_2 g_{\infty} (t_{o2} / \tau_2)) X_0,$$
(65)

illetve az aszimptotikus ciklikus hajlítómodulus, mint a ciklikus hajlítóterheléssel szembeni ellenállást minősítő jellemző (66):

$$E_{\infty} = E_o + E_1 g_{\infty} (t_{o1} / \tau_1) + E_2 g_{\infty} (t_{o2} / \tau_2), \tag{66}$$

ahol (67):

$$g_{\infty}(w_k) = \frac{1 - e^{-w_k}}{w_k} \frac{1}{1 + e^{-w_k}}, \ w_k = \frac{t_{0k}}{\tau_k}.$$
 (67)

Ezt erősíti meg a ciklikus hajlítás során mért feszültségcsúcsok, illetve azok normált értékeinek - a különbségek ellenére is - hasonlóan csökkenő alakulása (64. ábra). A különböző kompozit anyagokon mért pozitív csúcsértékekre való illesztés eredményeit a szemlélteti. Az illeszkedés jóságát jól jellemzi az, hogy az átlagos négyzetes hiba minden esetben kisebb volt 0,61%-nál, míg a determinációs együtthatók értéke nagyobb volt 98%-nál. A kapott modell-paramétereket a 21. táblázat foglalja össze.



64. ábra A normált feszültségcsúcsok változása





Az általam megalkotott matematikai leírásnak köszönhetően megjósolható egy meghatározott anyagú polimer mátrixú kompozit szilárdság-csökkenése, valamint meghatározható egy anyagot a ciklusszám függvényében jellemző aszimptotikus modulus, ezáltal becsülhető az élettartama is, ami a szerkezeti anyag tervezéséhez ad hathatós segítséget, továbbá jó alapul szolgál véges-elemes szoftverekhez is szimulációk elkészítéséhez és végrehajtásához.

Hajlító igénybevétel										
	modellparaméterek									
Anyagok	E_o	E_1	E_2	η_1	η_2	$(t_0/\tau)_1$	$(t_0/\tau)_2$			
GFEP	1450	285	400	872100	136000	0,01	0,09			
BFEP	930	165	1398	252450	4277880	0,02	0,01			
CFEP	496	6380	8	488070	24480	0,40	0,01			
GFCFEP	2800	1100	3	561000	153	0,06	0,60			
BFCFEP	2670	775	630	2371500	96390	0,01	0,20			

21. táblázat A ciklikus hajlító igénybevétel modell-paraméterei

5. Összefoglalás

A fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenésével egyre inkább előtérbe kerül a megújuló energiaforrások használata és az ezekhez szükséges anyagok fejlesztése is. Az egyes mozgó energiatermelő egységek hatásfokának növelése legegyszerűbben tömegcsökkentéssel érhető el, amelyre a polimer mátrixú kompozitok kiválóan alkalmasak. A szakirodalom szerint a szálerősített kompozitok felhasználása tekintetében a legfrekventáltabb energiacsoport a szélenergia, amelynek kihasználása folyamatosan emelkedő tendenciát mutat. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldtől távolabb – egymással összekapcsolva – a tengerben helyezik el úgy, hogy az egyes erőművek a tengerfenékhez vannak horgonyozva (off-shore rendszer). Az off-shore szélerőművek jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérsékletingadozás, az erős szél, a villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütésszerű és fárasztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek. Ezeknek az igénybevételeknek az egyes erősítőanyagok a legritkább esetben képesek ellenállni, egymással társítva, hibridizálva azonban már az összetett igénybevételekkel szemben is eredményesen alkalmazhatóak. A legfrissebb kutatásokban jellemzően térhálós mátrixanyagú kompozitok szélerőművekben történő alkalmazhatóságát vizsgálják, ahol az egyik erősítőanyag általában szénszövet. A bazaltszövet kompozitokban történő használata viszonylag rövid történeti múltra tekint vissza, azonban egyre inkább előtérbe kerül előnyös tulajdonságainak köszönhetően. Kutatásom során bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok fejlesztését tűztem ki célul.

Egy általam megtervezett és elkészített szálfektető berendezés segítségével megvizsgáltam az unidirekcionális üveg-, bazalt- és szénszövettel erősített kompozitok mechanikai tulajdonságait és a hibridizáció hatását. Ezt követően az ipari gyakorlatban szélesebb körben alkalmazott szövet formájú erősítőanyagokkal erősített mono- és hibridkompozitok vizsgálatával foglalkoztam.

A bazaltszövet, valamint a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok alkalmazási területeit szélesítendő, illetve megvizsgálandó, hogy alkalmazható-e szélerőművek anyagaként a legjelentősebb környezeti igénybevételek (hőmérséklet és UV sugárzás) hatásának vizsgálatával foglalkoztam. Kimutattam, hogy a bazaltszövet a nagy hőmérsékletű oxigéndús termikus igénybevétel hatására már viszonylag kis hőmérsékleten degradálódik, amit intenzív termo-oxidatív degradáció okoz. Kompozitok erősítőanyagaként a bazaltszövet hatása az üvegszövetéhez hasonló, aminek alapján eredményesen használható

az üvegszövet helyett. Az UV sugárzás hatásának vizsgálata során kimutattam, hogy a bazaltszövet jobban ellenáll a sugárzásnak, mint az üveg- és a szénszövet, a felépítő kémiai elemeknek köszönhetően. A kompozitok tekintetében az üveg- és a bazaltszövet hatása hasonló, az eredmények szerint a bazaltszövet teljes egészében kiválthatja az üvegszálat.

A tengeri (off-shore) szélerőművek, illetve az ár-apály erőműveket érő sós-víz erősen korrodálhatja a lapátokat, aminek hatására az alkalmazott anyagok élettartama jelentősen lecsökkenhet. Vizsgálatokkal elemeztem a sós-víz hatását a bazaltszövetre és kimutattam, hogy a sós-víz reakcióba lép a bazaltszövettel és abból vas, illetve vas-oxidot old ki, ami a szövet jelentős degradációját okozza. Ennek ellenére a húzóvizsgálatok alapján a sós-víz legkevésbé a bazaltszövettel erősített anyagokat károsította, ami annak köszönhető, hogy a bazaltszövet jobban ellenáll a mátrixanyag mikropórusain és mikro repedésein keresztül áthatoló sós-víznek, ami a bazaltot felépítő fémes elemeknek köszönhető. A vizsgálataimat alapul véve a bazaltszövettel erősített kompozitok eredményesen használhatóak sós-vizes környezetben is.

Az ipari gyakorlatban a kompozit alkatrészeket az alkalmazásuk során gyakran éri ismétlődő, fárasztó jellegű igénybevételek, ezért ezen hatások vizsgálata kulcsfontosságú a tervezésükhöz. Ismétlődő húzó- és hajlítóigénybevételekkel elemeztem a ciklikus igénybevételek hatását az általam készített mono- és hibridkompozitok húzó-, hajlítószilárdságra. Megalkottam egy matematikai összefüggést, amelynek segítségével megbecsülhető egy az anyagot jellemző aszimptotikus modulus. Továbbá végeselemes programokba intergrálva használható szimulációk készítésére is.

A bazaltszövet elektrotechnikai alkalmazhatóságát megvizsgálva kimutattam, hogy a hibrid rendszer esetében a bazaltszövet alkalmazásával növelhető a szénszövettel erősített kompozit térfogati ellenállása és villamos átütési szilárdsága, valamint ezzel párhuzamosan az elektromágneses árnyékolási képessége is, ami a hibridizációnak köszönhető, ahol a szénszövet az árnyékoláshoz szükséges stabil elektronáramlást, amíg a bazaltszövet az elektromos szigetelést valósítja meg. Vizsgálataimmal alátámasztottam, hogy a kompozitokban az erősítőszövet struktúrájából adódó elektromos, valamint elektromágneses gyenge helyek bazaltpor alkalmazásával megszüntethetőek. Ennek következtében egy esetleges villámcsapás esetén a hibridkompozitban található szénszövet el tudja vezetni a villamos feszültséget, amelynek hatására a szerkezet károsodás nélkül képes elviselni a fellépő jelentős töltéstöbbletet. Mindezek mellett a bazaltpor eredményesen használható a különböző szövetekkel erősített mono- és hibridkompozitok rétegközi nyírószilárdságának javítására is, ami közvetlen szilárdság-növekedést okoz.

5.1. Eredmények hasznosulása

Doktori disszertációm eredményei a gyakorlatban is hasznosíthatóak:

- Mérésekkel kimutattam, hogy a bazaltszövet mechanikai tulajdonságainak és viselkedésének köszönhetően kiválthatja az üvegszövet alkalmazását. Ennek köszönhetően olyan területeken is elterjedhet a bazaltszövet alkalmazása a hibrid rendszerekben, ahol eddig dominánsan az üvegszövetet használták, elsődlegesen az offshore szélerőművek lapátjai anyagaként.
- Vizsgáltaim jó kiinduló alapul szolgálnak a bazaltszövettel erősített epoxigyanta mátrixú kompozitok tervezéséhez és élettartamának becsléséhez az erősen korrodáló sós-vizes környezetben történő működés esetében, mivel vizsgáltaim során feltérképeztem a kezelési idő és az oldatkoncetráció hatását a mechanikai tulajdonságok változására.
- Szabványos vezető- és árnyékoló-képesség vizsgálatokon keresztül megállapítottam, hogy a bazaltszövet kiválóan alkalmazható az elektronika számos területén is monokompozitként, mint szigetelőanyag, amíg szénszövettel társítva elektromágnesesen árnyékoló és egyben elektromosan szigetelőanyagként.
- Az általam elkészített és felhasznált őrölt bazalt egyenletesen eloszlatva az ipari gyakorlatban is alkalmazható az epoxigyanta mátrixú bazaltszövettel erősített kompozitok esetén a rétegközi nyírószilárdság javítására, egyenletesen eloszlatva (folytonos réteget alkotva) pedig az erősítőszövet struktúrájából adódó gyenge pontok kiküszöbölésére is.
- Az általam meghatározott összefüggés segítségével viszonylag nagy elmozdulások (0,8*σ_f) és viszonylag kis ciklusszám (<1000) mellett megbecsülhető a húzó- és a hajlítószilárdság változása a cikluszám növelésével.

5.2. Tézisek

1. tézis

Kimutattam pozitív hibrid hatások jelenlétét a bazalt/szén-, valamint az üveg/szénszövettel erősített hibridkompozitok esetében. A bazalt-, valamint az üvegszövetnek köszönhetően a húzó rugalmassági modulus 16±1%-kal, a hajlító rugalmassági modulus 9±1%-kal, amíg a Charpy-féle ütőszilárdság 6±3%-kal, a kritikus feszültségintenzitási tényező pedig 20±3%-kal növekedett a hibrid keverék szabállyal számított értékekhez képest. A növekmény az üveg-, valamint a bazaltszövet szívós viselkedésének és a szénszövettel történő szinergetikus együttműködésének köszönhető [6, 142, 146, 158-163].

2. tézis

Kimutattam, hogy a bazaltszövet szilárdság csökkenésének megindulása 70-80°C tartományban a szövetet felépítő elemi szálak termo-oxidatív degradációjára vezethető vissza, amelyet pásztázó elektronmikroszkópi felvételekkel támasztottam alá. A termikus degradációja oxigén jelenlétében már 70-80°C hőmérséklet-tartományban megkezdődik, amelyet termogravimetriai (TGA) mérésekkel bizonyítottam. Az erősítőszövet húzószilárdsága a hőmérséklet növelésével folyamatosan csökken, a csökkenés mértéke 100°C-on 19 \pm 2%, 300°C-on 71 \pm 4% 500°C-on 98 \pm 2%, amelyet sávszakító vizsgálatokkal határoztam meg. Inert atmoszférában a degradáció mértéke – amit a felületkezelő szer által megkötött oxigén okoz – 700°C-on 66 \pm 5%-kal kisebb az oxigéndús környezethez képest [153, 164].

3. tézis

A bazaltszövet húzószilárdsága sós-vízben az oldatkoncentráció (10, 20, 30, 38 m%), valamint a tartózkodási idő (1, 2, 4 hét) növelésével folyamatosan csökken, amelyet sávszakító vizsgálatokkal határoztam meg. A degradáció oka elsődlegesen a bazaltszövetet alkotó elemi szálakat felépítő vas és vas-oxid, valamint a sós-víz közötti kémiai korróziós reakció, amit pásztázó elektronmikroszkópi felvételekkel és UV spektroszkópiás mérésekkel bizonyítottam [164, 165].

4. tézis

A szénszövettel erősített epoxi gyanta mátrixú kompozitok térfogati ellenállása és villamos átütési szilárdsága bazaltszövet alkalmazásával növelhető – az elektromágneses árnyékoló képesség javulásával egyetemben – hibridizációval, ahol a szénszövet – a stabil elektronáramlásnak köszönhetően – az elektromágneses árnyékolást, amíg a bazaltszövet – az elektronok gátlásának következtében – az elektromos szigetelést valósítja meg. A bazaltszövet hatására a szénszövettel erősített hibridkompozit felületi ellenállása $14\pm2\%$ -kal, a térfogati ellenállása $5\pm1\%$ -kal emelkedett, amellett, hogy nem romlott a minták elektromágneses árnyékoló-képessége [164].

5. tézis

Igazoltam, hogy az őrölt bazaltpor eredményesen alkalmazható bazaltszövettel erősített epoxigyanta mátrixú kompozitok rétegközi nyírószilárdságának javítására. Az 1,72±0,30 μ m átlagos szemcseméretű bazaltpor 1 m%-os koncentrációban 18±2%-kal javította a rétegközi nyírószilárdságot, amíg azonos koncentrációjú többfalú szén nanocső 29±2%-kal, grafén pedig 49±4%-kal csökkentette. Ennek oka, hogy a nagy fajlagos felületű nano-méretű részecskék összetapadtak, ezáltal agglomerátumokat hoztak létre, amelyek feszültséggyűjtő helyként viselkedtek [52, 153, 164].

6. tézis

Meghatároztam egy, az üveg-, a bazalt-, valamint a szénszövettel erősített epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok kisciklusú húzó, valamint hajlító igénybevétel hatására történő tönkremenetelét leíró összefüggést (T1), amely alkalmazásával becsülhető az általam vizsgált hibridkompozitok – anyagot jellemző – aszimptotikus modulusa a ciklusszám függvényében:

$$E_{\infty} = E_o + \sum_{k=1}^{N} E_k g_{\infty} \left(\frac{t_{ok}}{\tau_k} \right)$$
(T1)

ahol E_0 , E_k , modulus paraméterek, g időtényező, t_{0k} , τ_k időállandók. Kimutattam, hogy a bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságai folyamatosan csökkentek a ciklusszámmal arányosan, amit a szál és a mátrix elválása okozott. A húzószilárdság a 10. ciklus végére a bazaltszövettel erősített epoxigyanta mátrixú kompozit esetén 8±1%-kal, amíg a szén-bazaltszövettel erősített rendszernél 9±1%-kal csökkent [165].

5.3. További megoldásra váró feladatok

Értekezésem során a legteljesebb munkára törekedtem, azonban természetesen maradtak további vizsgálatok alapját képző, megoldandó feladatok:

- A vizsgálataim szerint a bazaltpor ígéretesnek tűnik adhéziójavításra, érdemes további vizsgálatokat végezni a mikro (bazaltpor) és a nano-méretű (szén nanocső, grafén) töltőanyagok egymással történő társításának hatásának vizsgálatára, mivel véleményem szerint a bazaltpor hozzájárulhat a nanoméretű részecskék hatékonyabb diszpergálásához.
- A bazaltpor adhéziójavító képességét megvizsgálandó javasolt csepplehúzó vizsgálatokat végrehajtani, ami által feltérképezhető az adhéziójavító mechanizmusa.
- A bazaltszövet jó hőállóságát kihasználva érdemes az epoxigyanta mellett nagyobb hőállóságú gyantával (fenol-formaldehid, furán, 3P-4P gyanták) párosítva megvizsgálni a kompozitok hőállóságát többféle módszerrel.
6. Irodalomjegyzék

- [1] Ginsztler J., Hidasi B., Dévényi L.: Alkalmazott anyagtudomány. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2002.
- [2] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [3] Czigány T.: Bazaltszálas hibridkompozitok. MTA doktori értekezés. Budapest, 2005.
- [4] Artemenko S.E., Kadykova Yu.A., Goncharova T.P.: Basalt plastics as roll sealing composites. Polymer Science, 1, 122-127, (2008)
- [5] Pakharenko V. V., Yanchar I., Pakharenko V. A., Efanova V. V.: Polymer composite materials with fibrous and disperse basalt fillers. Fibre Chemistry, 40, 246-252, (2008)
- [6] Tábi T., **Tamás P**., Kovács J.G.: Chopped basalt fibres: A new perspective in reinforcing poly(lactic acid) to produce injection moulded engineering composites from renewable and natural resources. Express Polymer Letters, 7, 107-119, (2013)
- [7] Pott F., Roller M., Kamino K., Bellmann B.: Significance of durability of mineral fibers for their toxicity and carcinogenic potency in the abdominal cavity of rats in comparison with the low sensitivity of inhalation studies. Environmental Health Perspectives, 102, 145-150, (1994)
- [8] Gushchin S. N., Kazyaev M. D., Arseev B. N., Kazyaev D. M.: A plant for highspeed melting of basalt rocks. Refractories and Industrial Ceramics, 50, 112-113, (2009)
- [9] Deák T., Czigány T.: Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison. Textile Research Journal, 79, 645-651, (2009)
- [10] Wittek T., Tanimoto T.: Mechanical properties and fire retardancy of bidirectional reinforced composite based on biodegradable starch resin and basalt fibres. Express Polymer Letters, 2, 810-822, (2008)
- [11] Kollár L.P., Springer G.S.: Mechanics of composites structures. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [12] Morlin B., Czigány T.: Adhéziómérő berendezés fejlesztése és alkalmazása. Gép, 57, 118-121, (2006)
- [13] Czvikovszky T., Mészáros L.: Polyamide-6 nanocomposites with electron-beam treated clay. Radiation Physics and Chemistry, 76, 1329-1332, (2007)
- [14] Mészáros L., Ronkay F., Oláh L.: Influence of extrusion temperature on thermal properties of polyamide 6/MMT nanocomposites. Plastics Rubber and Composites, 37, 219-222, (2008)
- [15] Kátai B., Mészáros L., Bárány T.: Polietilén társítása újrahasznosított gumiőrleménnyel és rétegszilikáttal. Építőanyag, 60, 8-11, (2008)
- [16] Balogh G., Deák T., Mészáros L.: Production and examination of montmorillonite and basaltfibre reinforced hybridcomposite. 6. Országos Gépészeti Konferencia: Gépészet 2008. Budapest (2008.05.29-30.)
- [17] Mészáros L., Oláh L., Ronkay F., Dogossy G., Czigány T.: The Effect of the extrusion temperature on the mechanical properties of MMT filled PA6. Eurofillers. Zalakaros, 74 (2007.08.26-30.)
- [18] Mészáros L., Czigány T., Czvikovszky T.: Mechanical properties of poliamide 6/layer silicate composites. 5. Országos Gépészeti Konferencia: Gépészet 2006. Budapest, 1-5 (2006.05.25-26.)

- [19] Köytepe S., Vural S., Seçkin T.: Molecular design of nanometric zinc boratecontaining polyimide as a route to flame retardant materials. Materials Research Bulletin, 44, 369-376, (2009)
- [20] Fontaine G., Bourbigot S., Duquesne S.: Neutralized flame retardant phosphorus agent: Facile synthesis, reaction to fire in PP and synergy with zinc borate. Polymer Degradation and Stability, 93, 68-76, (2008)
- [21] Dogossy G., Kovács J.G., Czigány T.: Kukoricamaghéj alkalmazhatóságának vizsgálata polimerek töltő- és erősítőanyagaként. Anyagvizsgálók Lapja, 3, 101-104, (2003)
- [22] Czigány T., Kiss Z., Oroszlány Á., Szebényi G.: Önjavító polimerek és polimer kompozitok-áttekintés. Műanyag és Gumi, 46, 206-213, (2009)
- [23] Czigány T.: Szálerősítéses polimer mátrixú kompozitok (Jövőnk anyagai, technológiái sorozat). Kohászat, 134, 359-365, (2001)
- [24] Lehoczki L.: Méretre szabott megoldások műszaki műanyagokkal: VI. Poli(butiléntereftalát)ok alkalmazása. Műanyag és Gumi, 48, 19-23, (2011)
- [25] <u>www.plasticker.de</u> Materials and prices (2013.09.10.)
- [26] <u>www.matweb.com</u> Overview of materials (2013.09.10.)
- [27] Balogh T., Balázs F., Bánhegyi Gy.: Melegen szórható direkt polikarbamid rendszerek általános jellemzése. Műanyag és Gumi, 46, 305-308, (2009)
- [28] Teranishi Y., Tanabe Y., Kobayashi T., Nakamura K., Fukushima M., Ishizuka M., Mitsuo A., Uematsu T., Isao N., Shimizu K., Yasuda E.: Graphitization behavior of the implanted furan-resin-derived carbon. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 267, 1259-1263, (2009)
- [29] Fan D.B., Li J.Z., Chang J.M.: On the structure and cure acceleration of phenol-ureaformaldehyde resins with different catalysts. European Polymer Journal, 45, 2849-2857, (2009)
- [30] Cyr P.L., Riedl B., Wang X.M.: Investigation of Urea-Melamine-Formaldehyde (UMF) resin penetration in Medium-Density Fiberboard (MDF) by High Resolution Confocal Laser Scanning Microscopy. European Polymer Journal, 66, 129-134, (2008)
- [31] Fenyvesi É.: Újszerű műszaki és textilipari szálasanyagok IX. Műanyag és Gumi, 30, 230-240, (1993)
- [32] Gasparik R.: JM Spray up roving & chopped strand mat applicability in reinforcement industry. Johns Manville. Moscow, 1-16 (2005.)
- [33] Velkei Á.: Az erősített műanyaggyártás helyzete Magyarországon. Műanyag és Gumi, 41, 161, (2004)
- [34] Gupta P. K.: Fibre reinfocements for composite materials. Elsevier, Amszterdam 1988.
- [35] Beletskii B. I., Trofimov N. N., Sventskaya N. V., Pilipenko O. S.: Glass quality and adhesion evaluation in glass fiber production. Glass and Ceramics 66, 202-205, (2009)
- [36] Feih S., Manatpon K., Mathys Z., Gibson A. G., Mouritz A. P. : Strength degradation of glass fibers at high temperatures. Journal of Materials Science, 44, 392-400, (2009)
- [37] Stepanova L. N., Lebedev E. Yu., Kabanov S. I., Chaplygin V. N., Katarushkin S. A., Ramazanov I. S., Kanifadin K. V.: Study of fracture of specimens made of fiberglassplastic using acoustic-emission and strain measurements. Russian Journal of Nondestructive Testing, 45, 103–108, (2009)

- [38] Naceri A.: An analysis of moisture diffusion according to Fick's law and the tensile mechanical behavior of a glass-fabric-reinforced composite. Mechanics of Composite Materials, 45, 331-336, (2009)
- [39] Fitzer E., Heine M.: Fibre reinfocements for composite materials. Elsevier, Amszterdam 1988.
- [40] Chung D.D.L.: Carbon fiber composites. Butterworth-Heinemann, Newton 1994.
- [41] Fitzer E., Kunkele F.: Today's carbon fibers- a new energy-saving and environmentally-friendly all-round material (Review). High Temperatures - High Pressures, 22, 239-266, (1990)
- [42] Szczypta A.F., Bogun M., Blazewicz S.: Carbon fibers modified with carbon nanotubes. Journal of Materials Science, 44, 4721–4727, (2009)
- [43] Vieille B., Aucher J., Taleb L. : A comparative study about the influence of severe environmental conditions on the behavior of carbon fiber fabrics reinforced thermoplastic or thermosetting laminates 14TH European Conference on Composite Materials. Budapest, 1-10 (2010.)
- [44] Gude M., Hufenbach W., Koch I., Koschichow R., Schulte K., Knoll J.: Fatigue testing of carbon fibre reinforced polymers under VHCF loading. Procedia Materials Science, 2, 18-24, (2013)
- [45] Fenyvesi É.: Újszerű műszaki és textilipari szálasanyagok III. Műanyag és Gumi, 30, 65-72, (1993)
- [46] E.I. DuPont de Nemours & Co. I.: Bulletin K-4. DuPont, 1979.
- [47] E.I. DuPont de Nemours & Co. I.: Bulletin K-5. DuPont, 1981.
- [48] Tashiro K., Kobayashi M., Tadokoro H.: Elastic moduli and molecular structures of several crystalline polymers, including aromatic polyamides. Macromolecules, 10, 413-420, (1977)
- [49] Bunsell A. R.: The tensile and fatigue behaviour of Kevlar-49 (PRD-49) fibre. Journal of Materials Science, 10, 1300-1308, (1975)
- [50] Lafitte M.H., Bunsell A. R.: The fatigue behaviour of Kevlar-29 fibres. Journal of Materials Science, 17, 2391-2397, (1982)
- [51] Kogan F. M., Nikitina O.V. : Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action. Environmental Health Perspectives, 102, 205-206, (1994)
- [52] Czigány T., Deák T., **Tamás P.**: Discontinuous basalt and glass fiber reinforced PP composites from textile prefabricates: effects of interfacial modification on the mechanical performance. Composite Interfaces, 15, 697-707, (2008)
- [53] Pölöskei K., Czigány T.: Bazaltszál-halmazban jelenlévő szálfejek hatásának vizsgálata. Anyagvizsgálók Lapja, 15, 57-60, (2005)
- [54] Širok B., Bizjan B., Orbanić A., Bajcar T.: Mineral wool melt fiberization on a spinner wheel. Chemical Engineering Research and Design, 13, 1-48, (2013)
- [55] <u>www.onix.info.am</u> Continous basalt fiber (CBF) Manufacturing process (2013.10.07.)
- [56] Deák T., Czigány T.: Investigation of mechanical properties and chemical composition of basalt fibers. 3rd China-Europe Symposiumon on Processing and Properties of Reinforced Polymers. Budapest, 16-17 (2007. június 11-15.)
- [57] Gur'ev V. V., Neproshin E. I., Mostovoi G. E.: The effect of basalt fiber production technology on mechanical properties of fiber. Journal of Glass and Ceramics, 58, 62-65, (2001)
- [58] Wojnárovits I., Rendessy E.: A szilikátszálak mechanikai tulajdonságait befolyásoló tényezők. Építőanyag, 45, 50-55, (1993)
- [59] Vas L. M.: Textiltermékek tervezése. BME, Budapest 2000.

- [60] Labarthe J.: Textiles: Origins to Usage. MacMillan, New York, 1965.
- [61] Vékássy D., Dániel L., Feleki L.: A kelmeszerkezettan alapjai. Könnyűipari Kiadó, Budapest, 1954.
- [62] Vékássy D.: Kötött-hurkolt kelmék geometriai elemzése. Kézirat. Budapest, 1973.
- [63] Jederán M., Való G.: Szövetek tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [64] Chou T.W., Ko F.: Textile Structural Composites. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1991.
- [65] Emery I.: The primary structures of fabrics: an illustrated classification. Whitney Library of Design, New York, 1995.
- [66] Kawabata S., Masako N., Kawai H.: The finite-deformation theory of plain-weave fabrics part I.: The biaxial-deformation theory. Journal of the Textile Institute, 64, 21 46, (1973)
- [67] Sasai T., Kawabata S.: Biaxial tensile properties of textured yarn fabrics. Journal of the Textile Machinery Society of Japan, 31, 29-34, (1985)
- [68] Kawabata S., Masako N.: A finite-deformation theory of the 2/2 twill weave under biaxial extension. Journal of the Textile Institute, 70, 417-426, (1979)
- [69] Kawabata S., Masako N., Kawai H.: The finete-deformation theory of plain-weave fabrics. Part II.: The shear-deformation theory. Journal of the Textile Institute, 64, 62-85, (1973)
- [70] Curtis P. T., Bishop S. M.: An assessment of the potential of woven carbon fibrereinforced plastics for high performance applications. Composites, 15, 259-265, (1984)
- [71] Szekrényes A., Uj J.: Energy release rates for delaminated composite specimens using higher order beam theories. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 40, 1621-1631, (2009)
- [72] Wei B., Cao H., Song S.: Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. Materials & Design, 31, 4244-4250, (2010)
- [73] Wei B., Cao H., Song S.: Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. Materials Science and Engineering: A, 527, 4708-4715, (2010)
- [74] Wang Q. H., Zhang X. H., Pei X. Q.: Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂. Materials & Design, 31, 1403-1409, (2010)
- [75] Todic A., Nedeljkovic B., Cikara D. Ristovic I.: Particulate basalt-polymer composites characteristics investigation. Materials & Design, 32, 1677-1683, (2011)
- [76] <u>www.technobasalt.com</u> Applications (2013.09.11.)
- [77] Militký J., Kovačič V., Rubnerová J.: Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. Engineering Fracture Mechanics, 69, 1025-1033, (2002)
- [78] Pölöskei K. M. S., Czigány T., Marosi Gy: Szál-mátrix határfelületi adhézió vizsgálata bazaltszál-erősítésű polipropilén kompozit rendszerekben. Műanyag és Gumi, 40, 145-149, (2003)
- [79] Wei B., Cao H., Song S.: Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. Corrosion Science, 53, 426-431, (2011)
- [80] Morova N.: Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete. Construction and Building Materials, 47, 175-180, (2013)
- [81] <u>www.reinforcedplastics.com</u> CNG cylinder manufacturers test basalt fibre (2013.09.11.)
- [82] <u>www.racecar-engineering.com</u> Iceland (2013.09.12.)
- [83] <u>www.basaltfiberworld.blogspot.hu</u> Formula Student Electric (2013.09.12.)
- [84] <u>www.wilson.com</u> BLX (2013.09.13.)

Tamás Péter

- [85] <u>www.ifitshipitshere.blogspot.hu</u> Modern Furniture Made From Volcanic Rock (2013.09.13.)
- [86] Shalin R. E.: Polymer matrix composites. Chapman & Hall, London, 1995.
- [87] Czigány T.: Hibrid szálerősítésű polimer kompozitok. Anyagvizsgálók Lapja, 2, (2004)
- [88] Shan Y., Liao K.: Environmental fatigue behaviour and life prediction of unidirectional glass-carbon/epoxy hybrid composites. International Journal of Fatigue, 24, 847-859, (2002)
- [89] Phillips L.N.: Design with Advanced Composite Materials. The Design Council. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [90] Ishikawa T.: Anti-symmetric elastic properties of composite plates of satin weave cloth. Fibre Science and Technology, 15, 127-145, (1981)
- [91] Yang J.-M., Ma C.-L. Chou T.-W.: Fiber Inclination Model of Three-Dimensional Textile Structural Composites. Journal of Composite Materials, 20, 472-484, (1986)
- [92] Ishikawa T., Chou T.W.: One-dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites. American Institute of Aeronautics and Astronautics, J21, 1714-1721, (1983)
- [93] Ishikawa T., Chou T. W.: Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites. Journal of Materials Science, 17, 3211-3220, (1982)
- [94] Shrotriya P., Sottos N. R.: Viscoelastic response of woven composite substrates. Composites Science and Technology, 65, 621-634, (2005)
- [95] Tsai Y.I., Bosze E.J., Barjasteh E., Nutt S.R.: Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites. Composites Science and Technology, 69, 432-437, (2009)
- [96] Naik N. K., Veerraju Ch., Kavala V.R.: Hybrid composites under high strain rate compressive loading. Materials Science and Engineering: A, 498, 87-99, (2008)
- [97] Sayer M., Bektas N. B., Sayman O: An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates. Composite Structures, 92, 1256-1262, (2010)
- [98] Burks B.M., Armentrout D.L., Baldwin M., Buckley J., Kumosa M.: Hybrid composite rods subjected to excessive bending loads. Composites Science and Technology, 69, 2625-2632, (2009)
- [99] Fu S. Y., Lauke B., Mäder E., Yue C.Y., Hu X., Mai Y.W.: Hybrid effects on tensile properties of hybrid short-glass-fiber-and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. Journal of Materials Science, 36, 1243-1251, (2001)
- [100] Kasano H.: Mechanical property characterization of carbon/aramid interply hybrid laminates. 14TH European Conference on Composite Materials. Budapest, 1-8 (2010.)
- [101] Khojin S.A., Mahinfalah M., Bashirzadeh R., Freeman B.: Temperature effects on Kevlar/hybrid and carbon fiber composite sandwiches under impact loading. Composite Structures, 78, 197-206, (2007)
- [102] De Rosa I. M., Santulli C., Sarasini F., Valente M.: Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography. Composites Science and Technology, 69, 1142-1150, (2009)
- [103] Atiqah A., Maleque M. A., Jawaid M., Iqbal M.: Development of kenaf-glass reinforced unsaturated polyester hybrid composite for structural applications. Composites Part B: Engineering, In Press, (2013)
- [104] Thwe M. M., Liao K.: Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. Composites Science and Technology, 63, 375-387, (2003)

- [105] Artemenko S., Kadykova Y.A.: Hybrid composite materials. Fibre Chemistry, 40, 490-492, (2008)
- [106] Wang X., Hu B., Feng Y., Liang F., Mo J., Xiong J. Qiu Y.: Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. Composites Science and Technology, 68, 444-450, (2008)
- [107] Petrucci R., Santulli C., Puglia D., Sarasini F., Torre L. Kenny J. M.: Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. Materials & Design, 49, 728-735, (2013)
- [108] Sarasini F., Tirillò J., Valente M., Ferrante L., Cioffi S., Iannace S. Sorrentino L.: Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties. Materials & Design, 49, 290-302, (2013)
- [109] Peters S.T.: Handbook of composites. Chapman&Hall, London, 1998.
- [110] Miller B.: Hybrid Process Launches New Wave in Boat-Building. Plastics World, 40-42, (1989)
- [111] Greene E.: Marine Composites. Eric Greene Associates Incorporation, Annapolis, 1999.
- [112] Harper C.A.: Modern Plastics Handbook. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [113] Sharma S., Wetzel K.: Process development issues of glass-carbon hybrid-reinforced polymer composite wind turbine blades. Journal of Composite Materials, 44, 437-456, (2010)
- [114] Mansour H.M., Wetzel K.K.: 3D woven carbon/glass hybrid spar cap for wind turbine rotor blade. Journal of Solar Energy Engineering, 128, 562-573, (2006)
- [115] Zhu X., Li Z., Jin Y.: Creep behavoiur of hybrid fibre (glass/carbon)-reinforced composite and its application. Composites Science and Technology, 50, 431-439 (1994)
- [116] Chiu. C. H., Tsai K.-H., Huang W. J.: Crush failure modes of 2D triaxially braided hybrid composite tube. Composites Science and Technology, 59, 1713-1723, (1999)
- [117] Kostar T. D., Chou T. W., Popper P.: Characterization and comperative study of three-dimensional braided hybrid composites. Journal of Materials Science, 35, 2175-2183, (2000)
- [118] Freger G. E., Kestelman V. N., Freger D. G.: Spirally anisotropic composites. Springer Verlag, Heidelberg, 2004.
- [119] Abu T. A. R., Ali A., Badie M. A., Che L. N. A., Golestaneh A. F.: Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. Materials & Design, 31, 514-521, (2010)
- [120] Roberto B.G., Cano R.J., Johnston N.J., Loos A.C., Mcmahon W.M.: Hybrid composites for Lh2 fuel tank structure - Report. Langley Research Center, Marshall Space Flight Center, Hampton 2001.
- Banos R., Manzano-Agugliarob F., Montoyab F.G., Gila C., Alcaydeb A., Gómezc J.: Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1753-1766, (2011)
- [122] Demirbas A.: Global renewable energy resources. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 28, 779-792, (2006)
- [123] Kralova I., Sjöblom J.: Biofuels-renewable energy sources: a review. Journal of Dispersion Science and Technology, 31, 409-425, (2010)
- [124] Panwar N. L., Kaushik S. C., Kothari S.: Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1513-1524, (2011)
- [125] Half-year Report. World Wind Energy Association Bonn, Germany 2013.

- [126] Tait J.: Offshore wind opportunities for UK composites. Reinforced Plastics, 54, 26-30, (2010)
- [127] Corbet D.C.: Investigation of materials and manufacturing methods for wind turbine blades Report. Energy Technology Support Unit, Harwell, United Kingdom 1991.
- [128] Ghasemnejad H., Occhineri L., Swift-Hook D. T.: Post-buckling failure in multidelaminated composite wind turbine blade materials. Materials & Design, 32, 5106-5112, (2011)
- [129] Crawford R.H.: Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2653-2660, (2009)
- [130] Andersons J., Korsgaard J.: Residual strength of GFRP at high-cycle fatigue. Mechanics of Composite Materials, 35, 395-402, (1999)
- [131] Grujicic M., Arakere G., Subramanian E., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M.: Structural-Response Analysis, Fatigue-Life Prediction, and Material Selection for 1 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. Journal of Materials Engineering and Performance, 19, 790-801, (2010)
- [132] Grujicic M., Arakere G., Pandurangan B., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M.: Multidisciplinary Design Optimization for Glass-Fiber Epoxy-Matrix Composite 5 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. Journal of Materials Engineering and Performance, 19, 1116-1127, (2010)
- [133] Wu W.H., Young W.B.: Structural Analysis and Design of the Composite Wind Turbine Blade. Applied Composite Materials, 1-11, (2011)
- [134] Thomsen K., Sorensen P.: Fatigue loads for wind turbines operating in wakes. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80, 121-136, (1999)
- [135] Subramanian R.V., Austin H.F.: Silane coupling agents in basalt-reinforced polyester composites. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1, 50-54, (1980)
- [136] Goldsworthy W.B.: New basalt fiber increases composite potential. Composite Technology, 8, 15, (2000)
- [137] Chen Z.F., Wan L.L., Lee S., Ng M., Tang J.M., Liu M., Lee L.: Evaluation of CFRP, GFRP and BFRP Material Systems for the Strengthening of RC Slabs. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27, 1233-1243, (2008)
- [138] Vas L. M., Halász G.: Textilszálak és fonalak lokális vizsgálata képfeldolgozással és a kötegszilárdság becslése. Magyar Textiltechnika, 46, 29-34, (1993)
- [139] MSZ EN ISO 13934-1:2000 szabvány: Textíliák. Kelmék szakítási tulajdonságai
- [140] MSZ EN ISO 527-4:1999 szabvány: Műanyagok. A húzási tulajdonságok meghatározása
- [141] MSZ EN ISO 14125:1999 szabvány: Műanyagok. A hajlítási tulajdonságok meghatározása
- [142] Tamás P., Czigány T.: Static and dynamical behaviour of mineral fiber reinforced composites with polypropylene matrix. Gépészet 2008. Konferencia. Budapest, 9-18 (2008. május 29-30.)
- [143] MSZ EN ISO 179:2000 szabvány Műanyagok. A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása.
- [144] Bodor G.: A polimerek törésmechanikai vizsgálatának alapjai. Műanyag és Gumi, 28, 187-189, (1991)
- [145] Blumenauer H., Push G.: Műszaki törésmechanika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [146] Czigány T., Deák T., **Tamás P**.: Investigation of mineral fiber reinforced polypropylene matrix composites. 13th European Conference on Composite Materials. Stockholm, 1-9 (2008. június 2-5.)

- [147] Szabó J.S.: Ásványiszál-erősítésű polimer kompozitok előállítása és tulajdonságaik elemzése. PhD értekezés. BME, Budapest 2005.
- [148] Lantor C.: Core material for wind blade manufacture. Reinforced Plastics, 55, 17-17, (2011)
- [149] Machado L. C., Marins A. A. L., Muri E. J. B., Biondo A., Matos J. doR, Mazali I. O.,: Complexation of the Fe(III) and Fe(II) sulphates with diphenyl-4-amine barium sulphonate (DAS) Synthesis, thermogravimetric and spectroscopic studies. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 97, 289-296, (2009)
- [150] Mielczarski J. A., Atenas G. M., Mielczarski E.: Role of iron surface oxidation layers in decomposition of azo-dye water pollutants in weak acidic solutions. Applied Catalysis B: Environmental, 56, 289-303, (2005)
- [151] Diallo H., Rabiller-Baudry M., Khaless K., Chaufer B.: On the electrostatic interactions in the transfer mechanisms of iron during nanofiltration in high concentrated phosphoric acid. Journal of Membrane Science, 427, 37-47, (2013)
- [152] Czigány T., Marosi Gy., Macskási L., Holczbauer T, Somos B., Kriskóné Szabó E., Zubonyai F.: Bazaltszál-erősítésű polimer kompozit szerkezeti anyag kifejlesztése. Műanyag és Gumi, 40, 139-144, (2003)
- [153] Deák T., Czigány T., Tamás P., Németh Cs.: Enhancement of interfacial properties of basalt fiber reinforced nylon 6 matrix composites with silane coupling agents. Express Polymer Letters, 4, 590-598, (2010)
- [154] Akinci A., Ercenk E., Yilmaz S., Sen U.: Slurry erosion behaviors of basalt filled low density polyethylene composites. Materials and Design, 32, 3106-3111, (2011)
- [155] Bodor G., Vas L.M.: Polimer anyagszerkezettan. Műegyetemi Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [156] Béda Gy.: Szilárdságtan. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2007.
- [157] Williams J.G.: Stress analysis of polymers. Longman Group Limited, London, 1973.
- [158] Tamás P., Czigány T.: Investigation of mechanical properties and crack propagation behaviour of hybrid composites with epoxy resin matrix. Materials Science Forum, 729, 284-289, (2013)
- [159] Tamás P., Czigány T.: Üveg/szén és bazalt/szén hibridszálas epoxigyanta mátrixú unidirekcionális kompozitok összehasonlítása. Műanyag és Gumi, 47, 187-191., (2010)
- [160] **Tamás P.,** Czigány T,: Polimer mátrixú hibridkompozitok. Erősített Műanyagok 2010 Nemzetközi Balaton Konferencia. Keszthely, 1-9 (2010. május 18-20.)
- [161] Czigány T., Tamás P. : Comparison of the mechanical properties and the damage progression of basalt, glass and carbon fiber reinforced composites with epoxy resin matrix. 5th Asia-Europe Symposium on Processing and Properties of Reinforced Polymers. Drezda, Németország, 1 (2011. május 29 - június 1.)
- [162] Tamás P.: Characterization of mono- and hybrid composites by the investigation of the mechanical properties of basalt, glass and carbon fiber reinforced composites. ISSP 2011 International Summer School on Polymers. Szmolensz, Szlovákia, 1 (2011. augusztus 22-26.)
- [163] Tamás P., Czigány T.: Epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok mechanikai tulajdonságainak és repedésterjedésének vizsgálata VIII. Országos Anyagtudományi Konferencia. Balatonkenese, 1 (2011. október 9-11.)
- [164] Tamás P., Czigány T.: Basalt fiber A promising reinforcement for wind turbine blades. Sixth Asia-Europe Symposium on Processing and Properties of Reinforced Polymers. Wuhan, China, 62-63. (2013.július 2-5.)

[165] Tamás P.: Development of basalt fabric reinforced hybrid composites for wind turbine blades. Sao Carlos Advanced School on Materials Science and Engineering. Sao Carlos, Brazília, 1 (2012. március 25-31.)

7. Mellékletek

7.1. A 4.2. fejezet mellékletei

Húzóvizsgálatok eredményei

Anyagok Húzószilárdság		Hibrid hatás	Rugalmassági modulus	Hibrid hatás
,	MPa	%	% GPa	
GFEP	421±11		8,00±0,31	
BFEP	423±12	-	9,65±0,29	-
CFEP	565±18		14,97±0,55	
GFCFEP	352±13	-40	13,64±0,34	16
BFCFEP	402±5	-23	14,41±0,11	15

22. táblázat A mérési eredmények táblázata

Hajlítóvizsgálatok eredményei

Anvagok	Hajlítószilárdság	Hibrid hatás	Hajlító modulus	Hibrid hatás
J - 6 -	MPa	%	% GPa	
GFEP	169±6		11,19±1,01	
BFEP	198±4	-	13,84±0,76	-
CFEP	466±8		31,07±2,66	
GFCFEP	308±9	-3	23,31±1,13	9
BFCFEP	319±7	-4	24,78±1,03	9

23. táblázat A mérési eredmények táblázata

Charpy és SEN-T vizsgálatok eredményei

Anyagok	Ütőszilárdság	Hibrid hatás	Kritikus feszültségintenzitási tényező	Hibrid hatás
	kJ/m ²	%	MPa m ^{1/2}	%
GFEP	135±2		25±1	
BFEP	112±2	-	27±2	-
CFEP	83±5		38±1	
GFCFEP	116±3	6	39±3	20
BFCFEP	103±3	5	39±1	18

7.2. A 4.3.1. fejezet mellékletei

Szövetek sávszakító vizsgálatának eredményei

Hőmérséklet	Húzószilárdság [MPa]			
[°C]	GF	BF	CF	
25	2174±105	1897±95	3521±110	
100	1561±28	1458±19	2333±12	
300	1366±22	1143±30	2225±14	
500	471±30	431±27	1516±13	
700	81±11	34±16	253±11	

25. táblázat A mérési eredmények táblázata

Húzóvizsgálatok eredményei

Hőmérséklet	Húzószilárdság [MPa]					
[°C]	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP	
-25	472±2	452±0	587±5	381±8	456±15	
0	441±3	430±4	573±5	366±8	422±10	
25	421±11	423±12	565±18	352±13	402±5	
50	384±3	359±2	478±3	333±6	326±10	

Hőmérséklet	Rugalmassági modulus [GPa]					
[°C]	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP	
-25	9,06±0,20	10,06±0,36	18,24±0,53	15,15±0,49	16,74±0,66	
0	8,70±0,17	9,86±0,21	15,78±1,01	14,85±0,35	15,85±0,87	
25	8,00±0,31	9,65±0,29	14,97±0,55	13,64±0,34	14,41±0,11	
50	2,56±0,41	2,72±0,59	12,68±0,27	10,97±0,77	11,49±0,31	

26. táblázat A mérési eredmények táblázata

Hajlítóvizsgálatok eredményei

Hőmérséklet	Hajlítószilárdság [MPa]					
[°C]	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP	
-25	299±2	293±12	816±47	359±4	388±7	
0	244±4	255±6	635±21	344±2	360±8	
25	169±6	198±4	466±8	308±9	319±7	
50	147±26	171±4	236±30	227±12	256±4	

Hőmérséklet	Hajlítómodulus [GPa]					
[°C]	GFEP	BFEP	CFEP	CFGFEP	BFCFEP	
-25	18,00±0,26	24,20±2,23	42,00±4,93	24,50±0,57	28,70±0,79	
0	15,10±1,65	19,43±1,31	35,78±3,55	24,43±0,60	26,62±0,64	
25	11,19±1,01	13,84±0,76	31,07±2,66	23,31±0,57	24,78±0,52	
50	10,10±1,57	11,84±0,76	23,23±1,53	12,20±0,59	16,48±0,55	

Charpy vizsgálatok eredményei

Hőmérséklet	Ütőszilárdság [kJ/m²]					
[°C]	GFEP	BFEP	CFEP	CFGFEP	BFCFEP	
-25	87±7	99±5	69±5	94±5	91±6	
0	101±8	101±4	68±1	113±4	100±4	
25	135±2	112±2	83±5	116±3	103±3	
50	150±4	126±8	113±6	121±3	107±5	

28. táblázat A mérési eredmények táblázata

7.3. A 4.3.2. fejezet mellékletei

Szövetek sávszakító vizsgálatának eredményei

Kezelési idő	Húzószilárdság [MPa]				
[hét]	GF	BF	CF		
0	2174±105	1897±95	3521±110		
1	1638±110	1826±51	3472±110		
2	1362±114	1672±90	3283±45		
4	1245±19	1580±53	2831±184		

29. táblázat A mérési eredmények táblázata

Húzóvizsgálatok eredményei

Kezelési idő	Húzószilárdság [MPa]					
[hét]	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP	
0	421±11	423±12	565±18	352±13	402±5	
1	340±9	351±6	448±15	282±10	331±4	
2	271±7	260±9	370±12	232±8	267±3	
4	221±6	199±4	300±9	187±7	208±3	

Kezelési idő [hét]	Rugalmassági modulus [GPa]					
	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP	
0	8,00±0,31	9,65±0,29	14,97±0,55	13,64±0,34	14,41±0,11	
1	6,25±0,25	7,98±0,10	11,97±0,44	10,40±0,27	11,62±0,09	
2	5,20±0,20	5,89±0,16	9,83±0,36	8,97±0,22	9,67±0,07	
4	4,09±0,16	3,86±0,35	7,75±0,29	7,05±0,18	7,35±0,06	

Hajlítóvizsgálatok eredményei

Kezelési idő	Hajlítószilárdság [MPa]						
[hét]	GFEP	BFEP	CFEP	GFCFEP	BFCFEP		
0	169±6	198±4	466±8	308±9	319±7		
1	133±5	160±7	366±7	245±7	251±6		
2	108±4	151±3	300±5	200±6	208±5		
4	88±3	129±10	244±4	163±5	163±4		

Kezelési idő	Hajlítómodulus [GPa]						
[hét]	GFEP	BFEP	CFEP	CFGFEP	BFCFEP		
0	11,19±1,01	13,84±0,76	31,07±2,66	23,31±1,13	24,78±1,03		
1	9,25±0,83	11,80±0,16	25,98±2,20	19,07±0,93	20,68±0,85		
2	7,65±0,69	11,07±0,77	21,43±1,82	16,13±0,77	17,23±0,70		
4	6,72±0,57	9,07±1,11	18,75±1,50	13,96±0,64	13,99±0,58		

31. táblázat A mérési eredmények táblázata

Charpy vizsgálatok eredményei

Kezelési idő		Ütőszilárdság [kJ/m²]						
[hét]	GFEP	BFEP	CFEP	CFGFEP	BFCFEP			
0	135±2	112±2	83±5	116±3	103±3			
1	128±2	108±2	80±5	108±3	96±3			
2	121±2	100±2	76±5	105±3	93±3			
4	115±2	98±7	72±5	98±2	85±3			

7.4. A 4.4. fejezet mellékletei Szövetek sávszakító vizsgálatának eredményei

Kezelési idő [hét]	Húzószilárdság [MPa]					
GF	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%	
0	2174±105	2174±105	2174±105	2174±105	2174±105	
1	2167±138	1935±40	1793±37	1442±180	1223±121	
2	2104±177	1892±92	1555±158	1366±127	867±90	
4	1986±234	1882±151	1545±77	1341±65	759±86	

Kezelési idő [hét]	Húzószilárdság [MPa]					
BF	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%	
0	1897±95	1897±95	1897±95	1897±95	1897±95	
1	1738±87	1722±86	1700±85	1652±83	1592±80	
2	1655±83	1631±82	1594±80	1527±76	1421±71	
4	1571±79	1555±78	1520±76	1453±73	1294±65	

Kezelési idő [hét]	Húzószilárdság [MPa]					
CF	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%	
0	3521±110	3521±110	3521±110	3521±110	3521±110	
1	3350±103	2776±74	1964±69	1760±113	1389±66	
2	3247±96	2349±123	1832±25	1730±131	1343±137	
4	2926±74	1997±137	1782±92	1449±59	856±101	

33. táblázat A mérési eredmények táblázata

Húzóvizsgálatok eredményei

	Kazaláci idő [bát]		Húzós	szilárdság [[MPa]	
	Kezelesi ido [ilet]	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%
	0	421±11	421±11	421±11	421±11	421±11
EP	1	327±0	295±7	258±15	202±8	185±3
GF	2	310±4	266±26	206±5	191±9	170±14
	4	294±7	237±16	153±6	179±10	155±15
	0	423±12	423±12	423±12	423±12	423±12
EP	1	404±23	388±7	377±7	373±26	336±25
BF	2	395±13	377±21	360±17	352±21	312±15
	4	350±21	341±27	338±2	310±16	297±16
	0	565±18	565±18	565±18	565±18	565±18
EP	1	550±5	515±8	498±13	458±22	432±32
CF	2	529±9	503±11	486±11	454±11	414±34
	4	508±13	491±14	475±9	450±11	396±35

	0	352±13	352±13	352±13	352±13	352±13
FEF	1	348±8	345±10	340±11	323±3	312±14
GFC	2	342±8	342±10	337±5	313±6	255±22
0	4	338±7	328±10	324±2	302±9	198±19
•	0	402±5	402±5	402±5	402±5	402±5
FEI	1	399±6	365±47	364±10	360±10	358±26
3FC	2	392±7	364±4	360±24	359±11	354±20
H	4	385±7	364±19	358±13	354±20	350±15

34. táblázat A mérési eredmények táblázata

	Kozoláci idő [bát]		Rugalma	assági moduli	us [GPa]	
	Rezelesi luo [liet]	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%
	0	8,00±0,31	8,00±0,31	8,00±0,31	8,00±0,31	8,00±0,31
EP	1	7,90±0,09	7,51±0,21	6,82±0,16	5,16±0,17	4,53±0,12
GF	2	7,64±0,08	7,48±0,09	5,20±0,04	4,58±0,15	3,69±0,84
	4	7,49±0,07	7,14±0,16	3,87±0,10	2,50±0,05	1,09±0,75
	0	9,65±0,29	9,65±0,29	9,65±0,29	9,65±0,29	9,65±0,29
EP	1	9,37±0,46	9,04±0,53	8,95±0,48	8,48±0,12	7,83±0,46
BF	2	9,29±0,70	9,01±0,06	8,90±0,45	8,00±0,71	6,67±0,75
	4	9,08±0,90	8,59±0,06	8,42±0,56	7,07±0,79	5,07±0,97
	0	14,97±0,55	14,97±0,55	14,97±0,55	14,97±0,55	14,97±0,55
EP	1	14,90±0,44	13,60±0,40	12,87±0,15	12,53±0,67	12,27±0,39
CF	2	13,80±0,25	13,33±0,18	12,63±0,15	12,43±0,29	11,77±0,16
	4	13,39±0,11	12,33±0,00	11,15±0,11	10,78±0,25	9,80±0,23
	0	13,64±0,34	13,64±0,34	13,64±0,34	13,64±0,34	13,64±0,34
FEF	1	11,50±0,25	10,59±0,39	10,08±0,48	9,80±0,31	9,47±0,22
GFC	2	11,37±0,42	10,23±0,16	9,93±0,06	9,50±0,18	9,10±0,75
0	4	9,90±0,41	8,08±0,12	7,51±0,01	6,84±0,11	6,20±0,85
•	0	14,41±0,11	14,41±0,11	14,41±0,11	14,41±0,11	14,41±0,11
FEF	1	12,53±0,03	11,73±0,48	11,27±0,53	10,85±0,45	10,41±0,44
BFC	2	11,93±0,30	11,63±0,33	10,97±0,81	10,73±0,97	10,21±0,83
I	4	10,48±0,34	9,82±0,53	8,78±1,18	8,31±1,37	7,47±1,17

	Kozoláci idő [bát]		Hajlít	ószilárdság	[MPa]	
	Rezelesi ido [ilet]	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%
	0	169±6	169±6	169±6	169±6	169±6
EP	1	146±12	128±9	124±9	118±14	73±2
GF	2	129±28	126±10	123±11	117±8	63±22
	4	108±37	98±13	92±14	83±11	54±26
	0	198±4	198±4	198±4	198±4	198±4
EP	1	181±1	167±26	166±24	153±14	147±15
BF	2	167±2	159±1	156±4	146±7	141±12
	4	149±8	148±4	145±7	144±1	138±12
	0	466±8	466±8	466±8	466±8	466±8
EP	1	466±38	455±20	436±14	394±19	390±12
CF	2	464±5	443±7	424±16	392±28	380±11
	4	463±14	432±10	401±20	343±39	325±13
	0	308±9	308±9	308±9	308±9	308±9
FEF	1	298±10	273±15	174±11	161±7	159±11
GFC	2	290±13	179±25	172±16	160±9	154±5
	4	280±15	125±32	82±20	62±8	53±5
0.	0	319±7	319±7	319±7	319±7	319±7
FEI	1	300±37	281±20	191±8	168±7	164±18
BFC	2	290±35	264±61	170±15	166±3	161±18
	4	274±24	234±23	78±18	65±1	57±25

Hajlítóvizsgálatok eredményei

	Kazalási idő [bát]		Hajlítómodulus [GPa]					
	Rezelesi luo [liet]	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%		
	0	11,19±1,01	11,19±1,01	11,19±1,01	11,19±1,01	11,19±1,01		
EP	1	11,11±1,91	8,67±0,37	8,35±3,20	7,50±0,80	7,13±1,31		
GF	2	10,91±1,22	8,40±2,57	8,15±2,38	7,35±1,87	7,00±1,33		
	4	10,79±1,59	6,63±2,88	6,19±3,56	4,84±2,09	4,25±1,53		
	0	13,84±0,76	13,84±0,76	13,84±0,76	13,84±0,76	13,84±0,76		
EP	1	13,28±1,02	12,28±0,49	11,97±0,60	11,92±0,36	11,52±0,66		
BF	2	13,14±0,76	12,03±1,71	11,73±0,83	11,69±1,66	11,24±0,94		
	4	11,98±1,52	10,63±1,87	10,08±1,45	9,62±0,73	8,56±1,14		
	0	31,07±2,66	31,07±2,66	31,07±2,66	31,07±2,66	31,07±2,66		
EP	1	30,66±0,04	30,50±1,23	29,70±1,15	29,21±0,56	28,90±2,47		
CF	2	30,60±2,85	30,30±1,20	29,60±0,69	29,10±1,22	26,90±1,29		
	4	30,31±2,04	29,85±0,24	28,65±0,50	27,82±0,05	24,72±0,77		

	0	23,31±1,13	23,31±1,13	23,31±1,13	23,31±1,13	23,31±1,13
FEF	1	23,10±2,15	22,97±0,81	22,70±1,55	20,86±0,52	19,90±0,25
GFC	2	23,00±1,66	22,79±1,38	22,00±1,05	20,20±1,22	19,20±1,49
)	4	22,83±3,18	22,50±1,36	21,36±1,17	18,35±1,04	16,69±1,32
0	0	24,78±1,03	24,78±1,03	24,78±1,03	24,78±1,03	24,78±1,03
FEI	1	24,47±1,10	23,00±2,59	15,35±0,93	14,30±1,48	13,10±1,85
3FC	2	24,44±1,29	19,50±1,67	14,40±0,47	13,80±1,10	12,85±2,53
I	4	24,22±1,40	17,15±2,40	12,85±0,25	11,30±1,28	10,60±3,31

Charpy vizsgálatok eredményei

	Kezelési idő [hét]	Ütőszilárdság [kJ/m²]				
	Rezelesi luo [net]	0 m%	10 m%	20 m%	30 m%	38 m%
	0	135±2	135±2	135±2	135±2	135±2
EP	1	134±18	118±13	106±9	105±11	96±5
GF	2	119±16	107±23	106±24	104±2	82±3
	4	103±13	106±16	104±20	104±7	68±2
	0	112±2	112±2	112±2	112±2	112±2
EP	1	111±0	108±1	107±3	99±0	86±2
BF	2	103±1	94±1	88±1	85±2	79±1
	4	84±3	79±2	74±5	72±4	66±5
	0	83±5	83±5	83±5	83±5	83±5
EP	1	64±9	62±10	52±7	48±1	47±4
CF	2	64±8	60±11	49±4	48±2	42±2
	4	63±7	58±4	46±9	47±2	38±1
•	0	116±3	116±3	116±3	116±3	116±3
FEF	1	111±3	100±5	87±5	84±6	76±2
ЗFС	2	103±17	93±3	84±9	81±9	73±3
\cup	4	95±10	86±1	82±9	79±11	70±4
FEP	0	103±3	103±3	103±3	103±3	103±3
	1	102±4	101±9	99±9	94±7	91±8
BFC	2	102±8	101±10	95±9	93±7	89±12
	4	102±7	1011±10	93±10	91±6	87±10

7.5. A 4.5. fejezet mellékletei

Az elektromos mérések eredményei

Anyag	Felületi ellenállás [Ω]	Fajlagos térfogati ellenállás [Ωcm]	Térfogati ellenállás [Ω]	Fajlagos térfogati ellenállás [Ωcm]
GFEP	2,76E+09±3,02E+08	3,30E+11±1,84E+10	2,51E+09±1,37E+08	3,30E+11±1,84E+10
BFEP	2,48E+09±1,92E+08	3,91E+11±1,11E+10	2,69E+09±2,74E+08	3,91E+11±1,11E+10
CFEP	2,38E+09±6,65E+07	3,10E+11±3,02E+10	2,70E+09±2,38E+08	3,10E+11±3,02E+10
GFCFEP	2,76E+09±1,14E+08	3,28E+11±2,87E+10	2,78E+09±2,21E+08	3,28E+11±2,87E+10
BFCFEP	2,78E+09±1,53E+08	3,05E+11±3,84E+10	2,77E+09±3,01E+08	3,05E+11±3,84E+10

39. táblázat A mérési eredmények táblázata

Anyag	Elektromágneses árnyékolási csillapítás [dB]	Villamos átütési szilárdság [kV/mm]	
GFEP	1,30±0,11	23,09±0,99	
BFEP	1,41±0,02	25,14±0,82	
CFEP	32,93±0,67	n/a	
GFCFEP	33,10±0,26	n/a	
BFCFEP	33,07±0,81	n/a	

40. táblázat A mérési eredmények táblázata

Villamos ellenállás mérések eredményei

Töltőanyag tartalom [m%]	Villamos ellenállás [Ω]
0	1,30E+10±1,33E+09
1	3,04E+05±4,16E+04
2,5	5,15E+04±4,92E+03
5	9,93E-04±9,77E-05

41. táblázat A mérési eredmények táblázata

7.6. A 4.6. fejezet mellékletei A töltőanyag típusának meghatározása

Töltőanyag	ILSS [N/mm ²]				
Tontounyug	0 m%	0,1 m%	0,5 m%	1 m%	
BFP	24,01±1,76	22,90±4,35	22,32±2,13	28,30±3,63	
CNT	24,01±1,76	22,28±3,47	26,28±4,14	16,99±1,18	
GpS	24,01±1,76	25,93±4,08	22,91±5,94	12,17±1,21	
42. táblázat A mérési eredmények táblázata					