



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

MARTON GERGŐ ZSOLT

TDK DOLGOZAT

A TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK HATÁSA A PREPREG
SZERKEZETEK TULAJDONSÁGAIRA

Témavezető:

Dr. Mezey Zoltán Tamás

adjunktus

Konzulens:

Dr. Mezey Zoltán Tamás

adjunktus

BUDAPEST, 2021

NYILATKOZAT

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Marton Gergő Zsolt* (HU2JI8), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2021.11.06.

Marton Gergő Zsolt
hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Mezey Zoltán Tamásnak, aki témavezetőként tanácsaival, észrevételeivel, szakértelmével és ipari tapasztalatával segítette munkámat.

Köszönöm a Polimertechnika Tanszéknek, hogy a gyártások és mérések elvégzéséhez szükséges eszközöket biztosították számomra.

Szeretném kifejezni hálámat Igricz Tamásnak a reométeres vizsgálatokban nyújtott segítségéért és a Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Szerves Kémia és Technológia Tanszékének, hogy az említett berendezést rendelkezésemre bocsátották.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	iii
Jelölések jegyzéke	vi
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés.....	3
2.1. Polimer kompozitok	3
2.2. Polimer kompozitok erősítőanyagai.....	4
2.2.1. Üvegszál	5
2.2.2. Szénszál	5
2.2.3. Egyéb szálas erősítőanyagok	7
2.2.4. Erősítőanyagok csoportosítása szálhossz szerint	8
2.3. Polimer kompozitok mátrixanyagai	8
2.3.1. Telítetlen poliészter gyanták	9
2.3.2. Vinilészter gyanta.....	10
2.3.3. Epoxigyanta	10
2.4. Polimer kompozitok erősítőstruktúrái.....	10
2.5. Polimer kompozitok leggyakoribb feldolgozástechnológiái.....	11
2.6. Előgyártmányok	14
2.6.1. Prepregek.....	14
2.6.2. Prepregek gyártása	15
2.7. Prepregek feldolgozása	17
2.7.1. Prepregek tárolása, előkészítése, feldolgozási körülményei.....	17
2.7.2. Autoklávos feldolgozás.....	18
2.7.3. Out-of-autoclave technológiák.....	20
2.7.4. A feldolgozási paraméterek vizsgálata	21
2.8. Az irodalomkutatás kritikai elemzése	22
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	24
3.1. Felhasznált alapanyagok	24
3.1.1. Reológiai vizsgálatokhoz alkalmazott alapanyag	24
3.1.2. Próbagyártások alapanyaga	24
3.1.3. Egyéb segédanyagok	25
3.2. Alkalmazott berendezések	25
3.2.1. Reológiai vizsgálatoknál alkalmazott berendezések.....	25
3.2.2. Szakító- és hajlítóvizsgálatok berendezései	25
3.2.3. Egyéb berendezések	25
3.3. Vizsgálati módszerek	26
3.3.1. Reológiai vizsgálatok.....	26
3.3.2. Mechanikai vizsgálatok.....	28
3.3.3. Egyéb vizsgálatok.....	29

4. A technológiai paraméterek hatásának vizsgálata.....	31
4.1. Kísérletterv	31
4.2. Reológiai vizsgálatok.....	31
4.2.1. <i>Viszkozitásmérés</i>	32
4.2.2. <i>A gyanta vizsgálata saját mérési elrendezéssel</i>	35
4.3. Gyártási folyamat.....	36
4.3.1. <i>A gyártás előkészítése</i>	36
4.3.2. <i>Az alkalmazott autokláv ciklusok</i>	37
4.4. Prepreg lemezek vizsgálatai	39
4.4.1. <i>A sűrűség és száltartalom meghatározása</i>	39
4.4.2. <i>Szakítóvizsgálat</i>	42
4.4.3. <i>Hárompontos hajlítóvizsgálat</i>	43
4.4.4. <i>Ellenőrző mérések</i>	43
5. Összefoglalás.....	46
5.1. Az eredmények értékelése, következtetések.....	46
5.2. További megoldásra váró feladatok.....	47
6. Felhasznált források	48
7. Mellékletek.....	51

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
d	szálátmérő (fiber diameter)	μm
E	húzó rugalmassági modulusz (tensile modulus)	MPa
E_h	hajlító rugalmassági modulusz (flexural modulus)	MPa
h	lemezvastagság (thickness)	mm
l_c	kritikus szálhossz (critical length)	μm
p	nyomás (pressure)	Pa, bar
T	hőmérséklet (temperature)	$^{\circ}\text{C}$
t	idő (time)	s
V_f	szálhányad (volume fraction of the fibers)	V%
V_m	mátrixhányad (volume fraction of the matrix)	V%

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
η	dinamikai viszkozitás (dynamic viscosity)	Pa·s
ρ_f	szál sűrűsége (density of the fiber)	g/cm^3
ρ_k	kompozit sűrűsége (density of the composite material)	g/cm^3
ρ_m	mátrix sűrűsége (density of the matrix material)	g/cm^3
σ_h	hajlítószilárdság (flexural strength)	MPa
σ_m	húzószilárdság (tensile strength)	MPa
τ	nyírószilárdság (shear strength)	MPa

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
BMC	sajtolás előimpregnátummal (bulk moulding compound)
EP	epoxi (epoxy)
MEKP	metil-etil-keton-peroxid (methyl ethyl ketone peroxide)
OOA	autoklávon kívüli (out-of-autoclave)
PAN	poliakrilonitril (polyacrylonitrile)
RTM	gyantainjektálás (resin transfer moulding)
SMC	sajtolás előgyártmánnyal (sheet moulding compound)
UP	telítetlen poliészter (unsaturated polyester)
VE	vinilészter (vynil ester)

1. BEVEZETÉS

Manapság a szerkezeti anyagok között egyre nagyobb a polimer kompozitok jelentősége. Ezt elsősorban kiváló fajlagos jellemzőiknek és a tervezhető anizotróp tulajdonságaiknak köszönhetik. Sokszínűségüket mutatja, hogy a mindennapi életben használt eszközeink között is gyakran találkozhatunk kompozitokkal, de a legszigorúbb minőségi követelményekkel rendelkező területeken – motorsport, légiközlekedés, űrtechnika – is az egyik legfontosabb anyagsoportként vannak jelen.

A polimer kompozitok között a prepregből készült szerkezetek képviselik a legmagasabb minőséget. A prepreg elnevezés a „pre-impregnated” szóból ered, olyan kompozit előgyártmányokat jelent, amelyekben a szálak erősítőanyagot előre átimpregnálnak a mátrixanyaggal. A prepregekben a mátrix ún. B állapotban van, a térhálósodási reakció már megkezdődött. Ennek lelassítása érdekében a prepregek tárolása lefagyasztott állapotban történik. A prepregek számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, kiemelendő ezek közül, hogy szál tartalmuk rendkívül pontosan beállítható, az erősítőanyag jól átimpregnált és rendkívül kis mennyiségű légüreggel tartalmaznak. Előnyös tulajdonságaik realizálhatóságának feltétele azonban a megfelelő feldolgozás. A technológiákkal szembeni magas szintű elvárások miatt feldolgozásuk általában költséges, legjellemzőbb az autoklávus feldolgozástechnológia, de egyre elterjedtebbek az out-of-autoclave technológiák is. [1]

A prepregek térhálósítása szigorúan kontrollált folyamat, a gyártók az adatlapon megadják az ajánlott feldolgozási paramétereket. A technológiai paraméterek – elsősorban a különböző felfűtési és felterhelési rámpák megválasztása – alapjaiban határozzák meg a végtermék tulajdonságait, ezért helyes megválasztásuk elengedhetetlen feltétele a gyártás sikerességének. A felfűtési sebesség és a beiktatott hőntartási szakaszok hatással lehetnek a mátrix viszkozitásának alakulására, amely befolyásolhatja a térhálósítás során eltávolított gyanta mennyiségét, a légüregek számát és méretét, a kompozit termék tényleges szál tartalmát, illetve a felületi minőséget. Ezen jellemzők alakulásának függvényében a végtermék mechanikai, optikai és egyéb tulajdonságai is különbözőek lehetnek. [2, 3]

Előfordulhat azonban, hogy el kell térnünk a gyártó által ajánlott paraméterektől, ilyen lehet a vastag, gyenge hővezető-képességű szerszámokkal történő gyártás, de a feldolgozóberendezés korlátai miatt is szükséges lehet a paraméterek változtatása. Kérdés, az eltérésnek milyen következményei vannak, illetve hogyan érhetők el más paraméterek alkalmazásával az adatlapi ciklussal gyártott termékektől elvárt tulajdonságok.

Munkám során a technológiai paraméterek prepreg szerkezetek tulajdonságaira gyakorolt hatásait vizsgáltam, és kísérletet tettem arra, hogy megállapítsam az adatlapon előírt paraméterektől való eltérések következményeit.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Polimer kompozitok

A szerkezeti anyagok egyik csoportját alkotó kompozitok térhódítása egyre inkább megfigyelhető a műszaki és a mindennapi életben is. „A kompozit többfázisú (alkatrészeiben fázishatárokkal elválasztott), összetett: több anyagból álló szerkezeti anyag, amely erősítőanyagból (tipikusan szálerősítésből) és befoglaló (beágyazó) anyagból: mátrixból áll, és az jellemzi, hogy a nagy szilárdságú és rendszerint nagy rugalmassági modulusú (szálas) erősítőanyag és a rendszerint kisebb szilárdságú, de szívós (nagy ütésállóságú) mátrix között kitűnő kapcsolat (adhézió, tapadás) van, amely a deformáció, az igénybevétel magas szintjén is tartósan fennmarad.” [4] A kompozit anyagokra jellemző az egyes fázisok közti feladatmegosztás. Az erősítőanyag veszi fel a terhelést, biztosítja a szükséges merevséget, szilárdságot, míg a mátrix szerepe a szerkezet összetartása, a külső, környezeti hatásokkal szembeni védelem, továbbá a terhelésátadás megvalósítása a szálak között. [4-6]

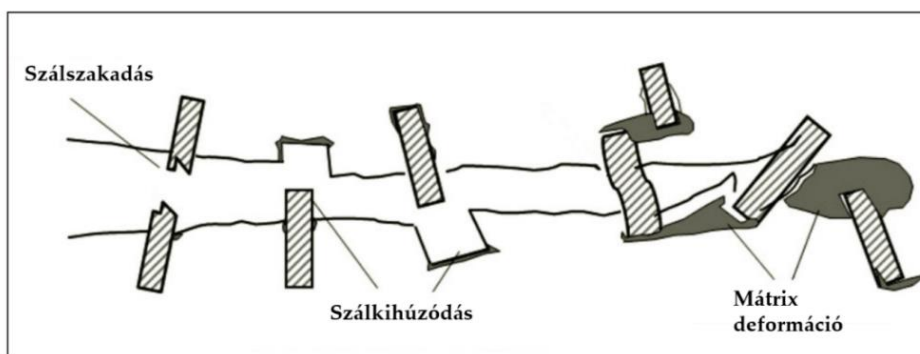
A fejlődés középpontjában elsősorban a polimer mátrixszal rendelkező kompozitok állnak, amelyeket polimer kompozitoknak nevezünk. Rohamos terjedésüket többek között kiváló mechanikai tulajdonságaiknak – elsősorban szilárdság és merevség –, illetve kis sűrűségüknek köszönhetik, amelyek együtt kiemelkedő fajlagos mechanikai tulajdonságokat eredményeznek. Előnyt jelent továbbá vegyszer-, korrózió- és időjárásállóságuk, a ciklikus, fárasztó jellegű igénybevétellel szembeni ellenállóképességük, ütésállóságuk is. A kompozitok alkalmazásával kombinálhatók a mátrix és az erősítőanyag kedvező jellemzői, továbbá részben kiküszöbölhetők az egyes komponensek hátrányos tulajdonságai. Mindemellett a kompozitok, elsősorban a szálerősített kompozitok legfontosabb előnye, illetve alkalmazásuk egyik fő motivációja a tervezhető anizotrópia. Ezen anyagok irányfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek összefüggésben vannak az erősítőstruktúra jellemzőivel. Mivel általában a mérnöki szerkezetek igénybevételei is eltérőek az egyes irányokban, így elegendő pusztán a terhelés szempontjából kitüntetett irányokban biztosítani a szerkezeti anyag kiemelkedő mechanikai tulajdonságait. Ennek megfelelően a mátrix és erősítőanyag kiválasztásával és az erősítőszerkezet irányításával adott alkalmazási célnak megfelelő, konkrét terhelési esetre szabott kompozitok tervezhetők. [4-8]

A polimer kompozitok természetesen hátrányos jellemzőkkel is bírnak, ilyen többek között a gyenge hőállóságuk, alacsony nyomószilárdságuk, illetve az, hogy tönkremenetelük gyakran hirtelen következik be, ami alkalmazhatóságukat is behatárolhatja. Emellett hőre nem lágyuló mátrix használata esetén nehézkesnek bizonyul újrahasznosításuk is. [5, 9]

A kompozitok tulajdonságait alapvetően a mátrix tulajdonságai, az erősítőanyag jellemzői, geometriája, orientációja, az erősítőanyag-tartalom, illetve az erősítőanyag és a mátrix közötti határfelületi adhézió minősége határozzák meg. [7, 9]

A szál-mátrix határfelület, illetve az itt fellépő határfelületi adhézió minősége fontos szerepet játszik a szerkezetek terhelhetőségében. A mátrix közvetíti a terhelést az egyes szálak között, amelynek során a terhelésátadás a mátrixról a szálra a kettő közti határfelületen történik. A kompozit szerkezet szilárdságára és merevségére gyakorolt hatása miatt fontos a megfelelő szál-mátrix határfelületi adhézió, amely általában nem áll fenn az erősítő- és a mátrixanyag között. Ennek javítására felületi adhéziót növelő, ún. kapcsolószerek, más néven tapadásközvetítő anyagok kerülnek felhasználásra, amelyeket vagy különböző felületkezelési eljárásokkal az erősítőanyag felületére visznek fel, vagy a mátrixba kevernek. [1, 4, 9]

A határfelületi adhézió a szálerősített kompozitok tönkremeneteli módjainak sokrétűségében is fontos szerepet játszik. A kompozitok jellegzetes tönkremeneteli formáit az 1. ábra szemlélteti. [1]



1. ábra A kompozitok jellegzetes tönkremenetelei, forrás: [1]

Ezek közül ideális esetben a szálszakadás jelentkezik először, így ez jelenti a szerkezet tönkremenetelét. Ekkor tudjuk kihasználni teljes mértékben a szál szilárdságát. Gyakran azonban ezt egyéb tönkremenetel előzi meg. Ilyen lehet a mátrix deformációja, illetve a szálk húzóadás okozta tönkremenetel. Utóbbi általában akkor lép fel, ha nem megfelelő az erősítőanyag és a mátrix közti határfelületi adhézió, vagy az erősítőszálak nem elég hosszúak, nem érik el az ún. kritikus szálhosszt. [1, 10]

2.2. Polimer kompozitok erősítőanyagai

A határfelületi adhézió minőségére az erősítőanyag geometriája jelentős hatást gyakorol. Az erősítőanyag és a mátrix közti tapadás javítja, ha az erősítőanyag fajlagos felülete, tehát a felszín és a térfogat hányadosa nagy értéket vesz fel. A fajlagos felület növelésének két alternatívája hengeres erősítőanyag esetén a szál és a korong, előbbi nagy, utóbbi kis l/d viszonytal rendelkezik. Korong alakú, lemezes adalékanyagokat gyakran használnak töltőanyagként a termoplasztikus polimerek esetében, ahol merevségnövelő hatásuk mellett csökkentik az alapanyag árát is, ilyen pl. a talkum. Emellett erősítőanyagként a korong geometriát nanokompozitoknál használják ki. [1, 4, 8, 9]

A szál erősítőanyagok használatát ezen kívül több tényező is alátámasztja. Ezek közé tartozik az, hogy szálirányban kiemelkedőek a mechanikai tulajdonságaik – míg keresztirányban gyengébbek –, így a kompozitok irányfüggő tulajdonságai tervezhetővé válnak. A szálerősítést indokolja továbbá a mérethatás jelensége, amelynek alapja, hogy kisebb átmérő esetén kisebb az anyagban lévő statisztikai hibahelyek száma, így jobb erősítőhatást eredményez. [4, 9]

Egy másik fontos tényező a szálhossz. Az ún. kritikus szálhossz alatt nem megfelelő a határfelületi adhézió, így nem tudjuk kihasználni a szál szilárdságát. Terhelés hatására az erősítőanyag szakítószilárdságának elérése előtt szálk húzóadás következik be. Ez a probléma leginkább a termoplasztikus polimerek rövid szál erősítéskor jelentkezhet. A kritikus szálhossz a Kelly-Tyson összefüggésből számolható, amely az 1. egyenletben szerepel. [1, 4]

$$\frac{l_c}{d} = \frac{\sigma_m}{2\tau} \quad (1)$$

ahol:

- l_c a kritikus szálhossz [mm],
- d a szálátmérő [mm],
- σ_m a szál húzószilárdsága [MPa],

– τ a határfelületi nyírószilárdság [MPa].

Manapság a polimer kompozitokban szálak erősítőanyagokat alkalmaznak. A leginkább elterjedt erősítő szálak közé tartozik az üvegszál, a szénszál, illetve a polimer alapú szálak közül az aramidszál. A leggyakrabban használt szálasanyagokat, illetve az erősítőszálak egyéb képviselőit mutatom be az alábbi alfejezetekben. [6]

2.2.1. Üvegszál

Az üveg a szilikátok közé tartozik. Felépítését tekintve nagyobb részben – 54-65 % – szilícium-oxidok alkotják, illetve jelentős mennyiségben találhatók benne fémek oxidjai, bór-oxid és egyéb oxidok. Pontos kémiai összetétele az adott alkalmazási célhoz kapcsolódó elvárások – szilárdság, merevség, vegyszerállóság, elektromos vezetőképesség – függvényében változhat. Ennek megfelelően az üvegszál alapanyagát jelentő üveget több osztályba sorolják. Kompozitok esetében ezek közül a legfontosabb az E- és az S-üveg. Előbbi nagy szilárdsága és merevsége mellett kiemelkedő hő- és elektromos szigetelő tulajdonságokkal rendelkezik, neve. Az üvegszálak polimer kompozitok esetében legtöbbször E üvegszálat alkalmaznak, ami alacsonyabb árfekvésűeknek is köszönhető. A több alumínium-oxidot tartalmazó S üveg ezzel szemben jobb mechanikai tulajdonságokkal bír. [1, 4, 8, 11]

Az üvegszál gyártásakor az üveget – kémiai összetételtől függően – 1260-1400 °C közti hőmérséklet-tartományban megömlesztik, majd a 30-100 Pa·s körüli viszkozitású ömledékből egy megfelelő szálképző fejen keresztül szálat húznak. Eközben az ömledéket víz és levegő segítségével gyorsan hűtik, így elkerülve a kristályos fázis kialakulását. Az elemi szálak átmérője erősítőanyagként történő felhasználás esetén általában 8-14 μm közötti értékeket vesz fel. Az átmérőn kívül üvegszálak jellemzésére szolgáló mennyiség a tex, amely a szál finomságát jellemzi. A tex 1000 m hosszúságú szál tömegét jelenti grammal kifejezve. Értelemszerűen minél alacsonyabb egy szál tex értéke, annál finomabb az adott üvegszál. [1, 4, 8, 11]

A szálhúzást követően a szálakat gyakran roving formájában egyesítik. A roving ezres nagyságrendű, párhuzamos elemi szálból álló szálköteg. Ez egydimenziós erősítőstruktúráként fogható fel. Az üvegszálból további feldolgozásával, textilipari és egyéb módszerek segítségével gyakran alakítanak ki bonyolultabb, komplexebb erősítőstruktúrákat, amelyeket a 2.4. alfejezetben ismertetek. [1, 4]

Az üvegszál esetében kiemelkedő szerepet játszik a szálak felületkezelése, amit írezésnek nevezünk. Ennek szerepe a szál védelme a feldolgozás közben fellépő külső hatásoktól. Továbbá rendkívül fontos a megfelelő szál-mátrix határfelületi adhézió biztosítása, ami üvegszál esetén nem lenne adott. Ezt különböző epoxi, fenolgyanta, illetve vinilszilán alapú kapcsolószerek alkalmazásával biztosítják. [4, 9]

A polimer kompozitok legelterjedtebb erősítőanyaga az üvegszál, ennek egyik oka alacsony ára, továbbá az, hogy ár-érték arányban kiváló tulajdonságokkal rendelkezik. Az üvegszál előnyös tulajdonságai közé tartozik nagy húzószilárdsága, kiváló hő- és vegyszerállósága, nedvességgel szembeni ellenálló-képessége, illetve fontos kiemelni még kiváló elektromos szigetelő tulajdonságait. Ezzel szemben hátrányt jelent a korábban említett rossz szál-mátrix határfelületi adhézió, illetve az üvegszál gyenge kopásállósága. [1, 9]

2.2.2. Szénszál

A szén az atomok különböző kapcsolódási módjainak köszönhetően számos, műszaki életben felhasználható formát ölthet. Ezek egyik fontos alkalmazási területét jelentik a töltő-

és erősítőanyagok. Ezek közé tartozik a számos tulajdonság javítására alkalmas grafit és korom, míg nanokompozitok tekintetében kiemelkedő jelentőségűek a szén nanocsövek, amelyek jelenleg is a kutatások középpontjában állnak. A legnagyobb jelentőséggel azonban a szén szálas erősítőanyagként történő alkalmazása bír. [4, 8]

A szénszálak a többi szálas erősítőanyaghoz képest is kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkeznek. Előnyös tulajdonságaik közé tartozik nagy merevségük és szilárdságuk, kiváló vegyszerállóságuk, jó termikus stabilitásuk, kis hőtágulásuk, az alkalmazási céltól függően hasznos lehet jó hő- és elektromos vezetőképességük. A szénszál viszonylag alacsony sűrűsége – $1,8\text{--}2,2\text{ g/cm}^3$ – miatt kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságok tekintetében is kiemelkedik, mind az egyéb szálakkal, mind a konvencionális anyagokkal, többek között a gyakori fém szerkezeti anyagokkal összehasonlítva. [8, 12]

A szénszálgártás alapját egy polimerszál előtermék jelenti, amelyet prekurzornak neveznek, ezt szenesítik el anélkül, hogy az elégne vagy megolvadna, így kialakítva a kívánt szénszerkezetet. Anyaga alapján háromféle prekurzort különböztetünk meg. Eleinte cellulóz-, többnyire regenerált cellulózszál – pl. viszkóz, műselyem – szolgáltat prekurzorként. Ezekkel kapcsolatban több probléma is felmerült, az egyik fő hátrányuk a cellulóz alacsony széntartalma. Jelentőségük az erősítő célra gyártott szénszálak gyártásában alacsony, fő előnyük azonban, hogy természetes erőforrásból előállíthatóak, így több kutatás alapját képezi ezek fejlesztése. Manapság többnyire poliakrilonitril (PAN) szálakat alkalmaznak prekurzorként, ezek világszerkezeti részesedése közel 90%, de különböző kátrány alapú szálakat is használnak. [1, 4, 12, 13]

A PAN alapú szénszálgártás első lépéseként elő kell állítani magát a PAN szálakat. Ez többnyire nem poliakrilonitril homopolimerből történik, hanem kopolimerből, ahol a 90-94 % akrilonitril mellett néhány százalékban komonomerként metakrilát vagy metil-metakrilát fordul elő. Ezek jelenléte javítja a feldolgozhatóságot. Mivel a PAN nem megömleszthető, így a szálakat oldószeres szálképzéssel hozzák létre. Az oldatból egy szálképző fejen keresztül szálakat húznak, amelyeket ezután letisztítanak, így eltávolítva az oldószert. Ezt követi a nyújtószakasz, ahol megfelelően orientálják a szálakat, illetve beállítják a szükséges átmérőt, majd szárítják és tekerceslik a kész prekurzor szálakat. Ezt követi maga a szénszál létrehozása a prekurzorból, amely egy idő- és energiaigényes folyamat. A szálakat általában több ezer, 5-10 μm átmérőjű elemi szálból álló kötegekben állítják elő. Minél kevesebb szálból áll egy köteg, annál jobb minőségű szálak előállítását teszi lehetővé, viszont természetesen nagyobb kötegek használatával olcsóbb a szálgártás. [1, 4, 8, 12]

Első lépésként stabilizálják a prekurzor szálakat. Ez egy 200-300 °C-ra történő hevítést, majd hőntartást jelent 30-120 percig, oxidáló közegben, amely gyakran levegő. Ebben a szakaszban komplex kémiai reakciók játszódnak le. A stabilizálás eredményeként megkezdődik a szál elszénese anélkül, hogy az megolvadna. Az ezt követő két szakasz a karbonizálás és a grafitosítás. A karbonizálás folyamán tovább hevítik a szálakat, általában legfeljebb 1500-1800 °C-ig, ennek hatására 90%-ban szén alakul a szál. Grafitosítás során tovább emelik a hőmérsékletet, akár 3000 °C-ig, majd a megfelelő ideig történő izzítással alakítható ki a kívánt grafitos szerkezet. Előbbi inert, általában nitrogén atmoszférában történik. Utóbbi esetében pedig a rendkívül magas hőmérséklet miatt különösen fontos, hogy a folyamat oxigénmentes atmoszférában menjen végbe, ezt általában nitrogén vagy argon gáz segítségével biztosítják. Mivel nincs jelen oxigén, így a magas hőmérséklet ellenére sem indul be a szálak égési folyamata. [1, 4, 12]

A szálakat ezt követően különböző felületkezelési eljárásoknak vetik alá, a kompozitok erősítőanyagaiként használt szálak esetében ezzel teremtik meg a megfelelő szál-mátrix határfelületi adhézió kialakíthatóságának feltételeit. Elsőként a szálak felületét módosítják különböző oxidatív vagy nem oxidatív eljárásokkal, majd a felületkezelés a szál

bevonatolásával folytatódik, ezt azt eljárást nevezi az angol szakirodalom sizingnek. Itt a szálakat az adhéziót növelő kapcsolószerekkel látják el. Fontos követelménnyel a bevonattal szemben a mátrixszal való kompatibilitás, ezért az eljárás során mindig figyelembe veszik, hogy a szálát milyen mátrixanyaggal fogják alkalmazni. A sizing célja azonban nem kizárólag a határfelületi adhézió és ezáltal a kompozit tulajdonságainak javítása, a bevonatnak fontos feladata a szál további feldolgozhatóságának biztosítása, illetve védelme a feldolgozási lépések folyamán. A felületkezelést követően az elkészült szénszálakat roving formájában tekercselik, majd ezt vagy közvetlenül használják fel, vagy különböző eljárásokkal erősítőstruktúrákat, előgyártmányokat készítenek belőle. [1, 12]

A PAN mellett viszonylag elterjedt még a kátrány alapú prekursor használata. Itt a prekursor előállításának legfontosabb lépése a kátrány megfelelő tisztítása, ami leggyakrabban a kiindulási alapanyag vákuum alatti hevítésével történik, ennek hatására kiválnak az alacsony forráspontú komponensek. Ezt követi az anyagban található szilárd részecskék kiszűrése. Ezután alkalmazhatnak még különböző kémiai eljárásokat az alapanyag tulajdonságainak módosítására, amikkel befolyásolhatók a későbbi végtermék, a szénszál tulajdonságai. Ezt követően a prekursor szálból a PAN alapú szénszálgártáshoz hasonló módon hozzák létre a szénszálát. Kátrány alapú prekurozból főként nagy moduluszú, kisebb szilárdságú szénszálát állítanak elő. Elterjedésének gátat szab, hogy a kátrány tisztítása viszonylag magas költségekkel jár. [1, 4, 12]

2.2.3. Egyéb szálak erősítőanyagok

Az iparban gyakran alkalmazott erősítőanyagok közé tartoznak még az aramid szálak. Azokat az aromás poliamidokat nevezzük aramidnak, amelyeknél az amid-csoportok legalább 85 %-a közvetlenül két aromás gyűrűhöz kapcsolódik. Az aramid szálakat nagymértékű orientációval, azaz nyújtással hozzák létre. A szálak általánosságban kiváló húzószilárdsággal és húzó rugalmassági moduluszal rendelkeznek, szakadási nyúlásuk nagy, kis sűrűségüknek köszönhetően pedig fajlagos jellemzőik is kiválóak. Emellett az aramid szálakat leginkább szívós viselkedésük, nagymértékű ütésállóságuk teszi vonzóvá. Utóbbi tulajdonságaik, illetve az ezekhez társuló kiváló energiaelnyelő képességük miatt például golyóálló mellények, sisakok alapanyagaiként is szolgálnak. Gyakran alkalmazzák az alapanyagot lángállósága, illetve önkiejtő égési tulajdonsága miatt védőruházatok anyagaként is. Az aramid szálakat hibrid kompozitokban gyakran használják fel szénszál erősítés mellett a szívósság, ütésállóság fokozására. [1, 4, 8]

A polimer szálak közül jelentősnek tekinthetők még a polietilén szálak. Kiemelkedő – akár 3000 MPa fölötti - húzószilárdsággal rendelkeznek az ultranagy molekulatömegű polietilénből (UHMWPE) készült szálak. Ezek alkalmazásának azonban gátat szab alacsony hőállóságuk, illetve a nem megfelelő szál-mátrix határfelületi adhézió. [4]

Az üvegszál egyik alternatívájaként felmerülhet a bazaltszálak használata. Mechanikai tulajdonságait tekintve nagy rugalmassági moduluszal rendelkezik, húzószilárdsága pedig akár a 4800 MPa-t is elérheti. Emellett kiváló a hőállósága, illetve a lúgoknak rendkívül jól ellenáll. Szélesebb körű elterjedésük legnagyobb akadálya az üvegszálnál lényegesen magasabb piaci árakban rejlik. [1]

Az eddig ismertetett mesterséges szálak mellett említést érdemelnek még a természetes szálak, amelyek az üvegszállal összevetve bár gyengébb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, sűrűségük lényegesen alacsonyabb, így fajlagos mechanikai tulajdonságok tekintetében már kisebb a különbség. A természetes szálak közül elsősorban növényi szálakat alkalmaznak kompozit szerkezetekben, ilyen pl. a len, kender, juta, sisal. Fontos, hogy a

növényi szálak mindig véges szálak, így hosszúszálas erősítéshez elkerülhetetlen a szálak valamilyen textilipari eljárással történő feldolgozása, ezáltal az alkalmazási célnak megfelelő erősítőstruktúra létrehozása. A természetes szálak biopolimer mátrixszal kombinálva biokompozitokat alkotnak, amik fontos lépést jelenthetnek a fenntarthatóság felé vezető úton. [1]

2.2.4. Erősítőanyagok csoportosítása szálhossz szerint

Polimer kompozitok szálerősítésekor a termék tulajdonságait nagy mértékben befolyásolja az alkalmazott erősítőszálak hossza. Erősítőanyagként használhatnak vágott szálakat, illetve végtelen hosszúságúnak tekinthető szálerősítést is. Az erősítőszálakat hosszúságuk alapján az alábbi módon csoportosíthatjuk: [14]

- Rövid szál: $l < 1 \text{ [mm]}$,
- Hosszú szál: $1 \text{ [mm]} < l < 50 \text{ [mm]}$,
- Végtelen szál (folytonos szál): $l > 50 \text{ [mm]}$ (általában $l/d \rightarrow \infty$).

A szálak által befolyásolt tulajdonságok tekintetében a leglényegesebb különbség, hogy míg a rövid szálas erősítés leginkább a merevségre gyakorol pozitív hatást, az ütésállóságot gyakran még csökkenti is, addig a hosszú szálak esetében már jelentős a merevség mellett a szilárdság növekedése is, végtelen szálak esetében pedig előbbi két tulajdonság nagyobb mértékű javulása mellett gyakran az ütésállóság is nő. Ezen csoportosítás nem csupán az elemi szálaknál, hanem a komplex erősítőstruktúráknál, illetve az előgyártmányoknál is nagy jelentőséggel bír. [14]

2.3. Polimer kompozitok mátrixanyagai

Ahhoz, hogy a kompozit anyag mechanikai tulajdonságai megfelelőek legyenek, nem elegendő nagy szilárdságú és merevségű erősítőanyagot választani, a mátrixnak is olyan – többek között mechanikai – tulajdonságokkal kell rendelkeznie, hogy betölthesse funkcióját, így biztosítsa a kompozit szilárdságát, merevségét, terhelhetőségét. Ennek megfelelően megfogalmazhatók a kompozitok mátrixanyagaival szemben támasztott, általános követelmények. Az elvárások közé tartozik: [8, 9]

- Alacsony nedvességfelvétel,
- Kis zsugorodás,
- Megfelelő impregnáló- és folyóképesség, ezzel biztosítva az erősítőstruktúra átnedvesítését, illetve a légzárványoktól való mentességet,
- Megfelelő szilárdság, merevség, és deformációképesség,
- A terheléstovábbítás megvalósításához szükséges szintű rugalmasság,
- Méretstabilitás,
- Egyszerű technológiával való feldolgozhatóság.

Az adott kompozit felhasználási területétől függően fontos lehet továbbá, hogy a mátrix megfelelő hő- és vegyszerállósággal rendelkezzen, hiszen leggyakrabban a mátrix által behatárolt intervallum jelenti a kompozit alkalmazhatósági hőmérséklet-tartományát, továbbá ez felelős a környezeti hatásokkal szembeni védelemért is. [15]

A polimer kompozitok mátrixanyagait alapvetően két csoportba sorolhatjuk, ezek a hőre nem lágyuló, más néven hőre keményedő, illetve a hőre lágyuló mátrixanyagok. Előbbi csoport képviselői közül általában a sűrű térhálós duromereket alkalmazzák, ezen belül is a szintetikus gyanták terjedtek el leginkább. Ezek legalább két komponens reakciójával jönnek

létre, ahol a gyantához térhálósítószer, más néven iniciátort kevernek, amelynek hatására megindul a térhálósodással járó kémiai reakció. A reakció befejeződésével létrejön a térhálós polimer. Ez a hőmérséklet növelésével nem hozható ömledék állapotba, melegítés hatására a bomlási hőmérséklet elérésével termikus bomlás megy végbe. A hőre nem lágyuló mátrixanyagok a legelterjedtebbek, mellettük szól, hogy rugalmassági moduluszuk viszonylag nagy, általában néhány GPa értékű, illetve jó hő- és időjárás- és vegyszerállósággal bírnak. Emellett fontos tulajdonságuk, hogy térhálósodás előtt alacsony viszkozitásuknak és jó folyóképességüknek köszönhetően hatékonyabban képesek átimpregnálni az erősítőstruktúrát, mint a termoplasztikus mátrixanyagok. Hátrányuk viszont, hogy többnyire ridegebben viselkednek, továbbá újrahasonosításukra jelenleg még nem született valós megoldás. [4, 6, 8, 9, 15]

A hőre lágyuló polimereket leginkább rövidszálas erősítés esetén alkalmazzák kompozitok előállítására, jellemző feldolgozástechnológiák az extrúzió és a fröccsöntés, amelyeknél egyszerűen belekeverhető az erősítőanyag a polimer granulátumba. Léteznek azonban termoplasztikus mátrix esetén is hosszúszálas feldolgozástechnológiák. A hőre lágyuló anyagok mátrixként való alkalmazásának előnyei közé tartozik nagyobb szívósságuk, deformációképességük, egyszerűbb kezelhetőségük, javíthatóságuk. Emellett hegeszthetők, utómunkálatokkal könnyen alakíthatók, illetve anyagukban újrahasonosíthatók. Hátrányos viszont gyengébb nedvesítőképességük, amely magasabb viszkozitásukból és rosszabb folyóképességükből fakad. [6, 9, 15]

Dolgozatom keretében hőre nem lágyuló mátrixanyagokkal foglalkozom, ezek legfontosabb képviselőit mutatom be a következő alfejezetekben.

2.3.1. Telítetlen poliészter gyanták

A telítetlen poliészter gyanták, röviden UP gyanták a kompozitipar leggyakoribb mátrixanyagai közé tartoznak. A piaci forgalomban kapható UP gyanták telítetlen poliészter oligemerek és vinil-monomerek – jellemzően sztirol – keverék-oldatából állnak. Térhálósodásukat iniciátor hozzáadásával idézik elő, erre a célra általában valamilyen peroxid katalizátort, leggyakrabban metil-etil-keton-peroxidot (MEKP) használnak. A peroxid reaktív szabad gyökeinek segítségével megindul a polimerizációs láncreakció, létrejönnek az anyagon belüli keresztkötések, kialakul a térhálós szerkezet. Ez a reakció egy bizonyos idő, a fazékidő – más néven gélesedési idő – elteltével indul be, az alapanyag eddig alakítható, így a fazékidő végéig lehet dolgozni vele. A fazékidő hossza inhibítorok adagolásával szabályozható. Ezen idő elteltével a gyanta géles állapotba kerül, majd kikeményedik. A rendszer hőmérséklete közben gyors ütemben megnő, általában 80 °C, azaz a peroxidok bomlási hőmérséklete fölé, majd a képződő hő fel is szabadul. A poliészter térhálósodása alapvetően exoterm reakció. Fontos megemlíteni, hogy gyorsítók adagolásával a reakció alacsonyabb hőmérsékleten, 20-50 °C között is végbemehet, bekövetkezhet „hideg térhálósodás”. A térhálósodási reakció előrehaladtával a gyanta sztiroltartalma folyamatosan csökken. A gyors polimerizációs láncreakció folyamán az anyag kb. 90%-ban térhálósodik, a reakció teljes végmenetele napokat, heteket vehet igénybe, ennek ideje utótérhálósító hőkezelés beiktatásával redukálható. [1, 4, 6, 8]

A poliészter gyanták népszerűségüket elsősorban alacsony áruknak, kis sűrűségüknek – kb. 1,20-1,25 g/cm³ –, korrózióállóságuknak és jó mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetik. Legnagyobb hátrányuk, hogy térhálósodásuk közben nagy, akár 8%-os zsugorodást szenvednek. [1, 6]

A telítetlen poliészter gyanták önmagukban is felhasználhatók, ekkor alakadásuk gyantaöntéssel történik. Az előállított UP gyanták több mint 80%-át azonban polimer kompozit szerkezetekhez használják fel, leginkább üvegszál erősítéssel. Legnagyobb felhasználói a járműipar, építőipar, de készítenek belőle többek között sporteszközöket, tartályokat, csöveket is. [1, 8]

2.3.2. Vinilészter gyanta

A vinilészter gyanták (VE) szintén elterjedt mátrixanyagok. A vinilészter gyanták felfoghatók akár poliészter gyanta epoxival módosított változataiként, de a szerkezeti eltérések miatt érdemes külön kezelni őket, egyfajta átmenetet jelentenek a két gyanta között. A VE gyantákat jobb mechanikai tulajdonságaik, nagyobb hő-, vegyszer- és korrózióállóságuk különbözteti meg az UP gyantáktól, azonban áruk is meghaladja a poliészter gyantáét. Tulajdonságaikban a poliészter és az epoxigyanták közé tehetők. Legtöbbször olyan területeken alkalmazzák őket, ahol a poliészter gyantákkal elérhető tulajdonságok nem elegendőek, de nem szükséges még előnyösebb tulajdonságokkal rendelkező és egyben még drágább gyanták használata. [1, 4, 8, 16]

2.3.3. Epoxigyanta

Az epoxigyanták (EP) gyanták kereskedelmi forgalomban oligomer formájában kaphatók. A térhálósodási folyamat térhálósítószer hozzáadásával indítható meg, ennek hatására az epoxigyanta molekuláinak jellegzetessége, az epoxigyűrű felszakad, és az alapanyag addíciós polimerizációval térhálósodik. Fontos, hogy a térhálósítószer nem iniciátorként hat, hanem a gyanta reakciópartnereként van jelen, így kifejezetten fontos a gyanta és a térhálósítószer összekeverésekor a megfelelő sztöchiometriai arányok betartása a kívánt reakció és az elvárt tulajdonságok eléréséhez, ezért a nagyobb pontosság biztosítása érdekében tömegarányos keverést alkalmaznak. [1, 4, 16]

Az epoxigyanták alapvetően kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek a poliészter és vinilészter gyantákkal összehasonlítva, húzószilárdságuk és rugalmassági moduluszuk meghaladja az UP és VE gyantáét. Emellett sűrűségük a másik két gyantához hasonlóan kicsi – $1,2-1,3 \text{ g/cm}^3$ –, ami kiváló fajlagos mechanikai tulajdonságokat eredményez. Egyik legfontosabb előnyük az UP és VE gyantákkal szemben, hogy térhálósodáskor csak kis mértékben zsugorodnak, ami feldolgozásukkor nagyobb méretpontosságot eredményez. Az EP gyanták továbbá kiváló korrózió- és vegyszerállósággal és termikus tulajdonságokkal rendelkeznek, elektromos szigetelőképességük is kiemelkedő. Hátrányt jelent azonban, hogy áruk meghaladja az UP és VE gyantáét. [6, 16]

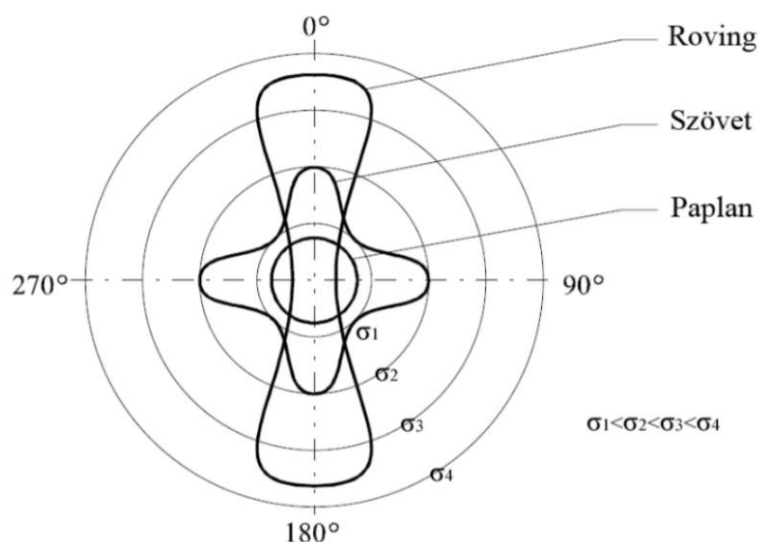
Az epoxigyantákat alkalmazzák önmagukban is – elektronikai alkatrészek impregnálása, bevonatok készítése – az egyik legnagyobb jelentőséggel azonban mátrixanyagként való használatuk bír. Az epoxigyanta poláris természete kiváló szál-mátrix adhéziót biztosít a legtöbb szálal erősítőanyag alkalmazásakor. Számtalan területen előfordul kompozit szerkezetekben a mindennapokban – pl. sporteszközök –, illetve a mérnöki szerkezetekben, elsősorban a járműiparban – pl. légi- és víziközlekedés –, űrparban. [8, 16]

2.4. Polimer kompozitok erősítőstruktúrái

Az erősítőszálak felhasználása többnyire nem elemi szálak formájában történik, hanem azokat tovább feldolgozva, komplex erősítőstruktúrákat alakítanak ki.

Az erősítőstruktúrákat feloszthatjuk térbeli kiterjedésük szerint 1D-s, 2D-s és 3D-s csoportokra. Az egydimenziós erősítőstruktúrák közé tartoznak a roving, fonal és szalag formájában megjelenő erősítőanyagok. 2D-s erősítőstruktúráknak nevezzük a különböző textilipari eljárásokkal készült erősítőanyagokat, amelyek csak síkban futó szálakból, szálkötegekből épülnek fel. Ezek lehetnek szőtt vagy nem szőtt, illetve kötött kelmék. A harmadik csoportot, a 3D-s erősítőstruktúrákat pedig az jellemzi, hogy a tér mindhárom irányában tartalmaznak erősítőszálakat. [14, 17]

A különböző erősítőstruktúrák alkalmazásával kialakítható a kívánt orientáció, tervezhető a kompozit szerkezet anizotrópiája. A 2. ábrán látható polárdiagram három lényegesen eltérő tulajdonságokkal rendelkező erősítőstruktúra húzószilárdságának alakulását szemlélteti a terhelési szög függvényében. Látható, hogy a roving szilárdsága szálirányban kiemelkedő, míg keresztirányban alacsony. A 0 és 90°-os erősítésű szövet a kitüntetett irányokban nagy, de a rovingnál tapasztalható szálirányú értéknél alacsonyabb húzószilárdsággal rendelkezik. A véletlenszerűen orientált, vágott szálakat tartalmazó paplan szilárdsági értékei egyik irányban sem kiemelkedők, viszont ez kváziizotróp tulajdonságokkal bír. [17, 18]



2. ábra Erősítőanyag kiserelési formák polárdiagramja, forrás: [17]

Kevés kompozitgyártási technológia teszi lehetővé, hogy közvetlenül rovingok felhasználásával, azokat megfelelően orientálva hozzunk létre nagy teljesítményű kompozit késztermékeket, ezért általában ezeknél bonyolultabb kiserelésű erősítőanyagokat alkalmaznak, amelyek használatával leegyszerűsíthető a gyártási folyamat, illetve ezáltal sokszor csökkenthető a ciklusidő. Nagyobb igénybevételnek kitett alkatrészek esetében ritkán alkalmaznak vágott szálak paplanokat, ilyenkor többnyire végtelen szálaknak tekinthető erősítőanyagok kerülnek felhasználásra. [14]

2.5. Polimer kompozitok leggyakoribb feldolgozástechnológiái

Az alábbi fejezetben a hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok legjellemzőbb feldolgozástechnológiáit foglalom össze.

A legegyszerűbb és legrégebb óta alkalmazott eljárás a kézi laminálás. Ennek lényege, hogy az erősítőanyagot rétegenként egy szerszámba helyezik, és átitatják megfelelő viszkozitású mátrixanyaggal, ehhez laminálóhengereket, görgőket használnak, ezekkel valósítható meg a rétegek közé szorult levegő eltávolítása is. A technológia előnyei közé

tartozik, hogy olcsó, nem igényel költséges berendezéseket, továbbá komplex erősítőstruktúrák is felhasználhatók az eljárás során, hátránya viszont a nagy élőmunka-igény, illetve a nem túl jó reprodukálhatóság, ezért leginkább nem túl komplex geometriájú termékek egyedi és kisszériás gyártására alkalmas. [4, 9]

A kézi laminálás részben gépesített változata a szórás. Ennek alapja, hogy a mátrixot és az erősítőanyagot egy szórópisztoly segítségével egyszerre juttatjuk a szerszámfelületre. Az eljárás talán legnagyobb hátránya, hogy kizárólag 1D-s erősítőanyag kerülhet felhasználásra, méghozzá vágott szál formájában. Az erősítőszálak statisztikus elrendeződésüknek köszönhetően kváziizotróp tulajdonságú terméket eredményeznek, így nem érhető el tetszőleges orientáció. A szálakat a szórópisztolyra szerelt vágóberendezés darabolja fel a kívánt hosszúságra. Az alkalmazott szálhossz leggyakrabban 12 és 25 mm közé tehető. Fontos, hogy a szerszám felületére felvitt anyagból görgők, hengerek segítségével el kell távolítani a légbuborékokat, így ezen eljárás élőmunka-igénye is nagynak tekinthető. A technológia legfontosabb előnye a kézi laminálással szemben a jobb reprodukálhatóság. [1, 4, 9]

Léteznek bizonyos termékspecifikus eljárások. Ilyenek a hengerszimmetrikus termékek előállítására alkalmas technológiák. Ezek egyik képviselője a centrifugálszórás, amely nagy mértékben hasonlít a korábban bemutatott szórás technológiájához. Egy szórófejből juttatják vágott szál és mátrixanyag keverékét a szerszám falára. Lényeges azonban, hogy itt a szerszám egy forgó dob, amelynek belső falára szórják a szál-mátrix keveréket, a szórófej pedig axiálisan mozog a hengeres szerszámon belül. Centrifugálszórás során a forgó szerszámban fellépő jelentős centrifugális erők az anyagot a szerszám falára kényszerítik, ezáltal létrejön egy egyenletes falvastagságú, légbuborékoktól mentes, mindkét oldalán sima felületű, csöves termék. Az eljárás nagy előnye, hogy a térhálósodás befejeztével, a szerszámból való eltávolítást követően a termék nem igényel utómunkálatokat. Az eljárás legnagyobb hátránya a szóráshoz hasonlóan, hogy kizárólag vágott szálak alkalmazhatók, így nem alakíthatók ki tervezetten anizotróp tulajdonságok. A centrifugál szórást leginkább olyan csövek gyártásakor alkalmazzák, amelyeknél kiemelt szereppel bír, hogy a termék felületi minősége mindkét oldalán kiváló legyen. [1, 9]

Szintén hengeres termékek hozhatók létre tekercselés segítségével. Itt is csak 1D-s erősítés alkalmazható, viszont lényeges különbség, hogy a centrifugál szórással ellentétben nem vágott szálak, hanem folytonos szálkötegek kerülnek felhasználásra. Ezeket egy gyantafürdőn átvezetve előre meghatározott mintázatnak megfelelően egy magra tekercselnek fel. A mag forgó, illetve hossz tengelyével párhuzamos irányú, alternáló mozgást végez. Megfelelő számú réteg kialakításával hozható létre a kívánt, több irányban erősített kompozit termék. A gyanta térhálósodása a magon történik, ezért a mag általában enyhén kúpos kialakítású vagy összeomló, ez megkönnyíti a termékeltávolítást. Ezzel az eljárással jellemzően csöveket, tartályokat, illetve nagyméretű termékeket pl. vasúti kocsikat állítanak elő. [4, 9]

A pultrúzió kompozit profilok előállítására szolgáló folytonos eljárás. Az alkalmazott erősítőanyag általában roving. A folytonosan adagolt erősítőanyagot előbb gyantafürdőn, majd egy fűtött szerszámon húzzák keresztül. Utóbbiban történik a kívánt profil kialakítása, illetve a mátrix térhálósítása. A rovinggal erősített profilok szálirányú szilárdsági tulajdonságai kiemelkedőek, keresztirányban azonban viszonylag alacsony szilárdsággal rendelkeznek. Ennek kiküszöbölésére alkalmazhatnak valamilyen 2D-s erősítőanyagot, ezek közül leggyakrabban a paplan és a szövet fordul elő. Az eljárás nagy termelékenységű, a pultrúziós profilgyártósorok esetében nem ritka a 60 m/h-s kihozatal sem. A technológia jellegzetessége, hogy az átitatott erősítőanyag végig kifeszített állapotban van a folyamatos húzás hatására. Ebből kifolyólag a német szakirodalom az eljárást profilhúzásnak – „Profiliziehverfahren” – nevezi. [1, 4, 9]

A pultrúzióhoz hasonló, folyamatos üzemű eljárás a lemezgyártás. Ennek alapja, hogy a mátrixot és az erősítőanyagot formaleválasztó fóliára vezetik rá, majd a másik oldalról is fóliával vonják be. Ezt általában ráhengerelik, így biztosítható, hogy a kompozit lemez ne tartalmazzon légbuborékokat. Ezt követően – amennyiben szükséges – megtörténik a lemez kívánt alakjának kialakítása, illetve hőalagútban vagy kemencében lezajlik a térhálósítási folyamat is. Ezzel a technológiával készülnek az építőiparban használatos kompozit hullámlemezek. [4]

A vákuuminfúzió egy rendkívül gyakran alkalmazott, viszonylag egyszerű technológia, az injektálásos eljárások közé tartozik. Első lépésként az erősítőanyagot szárazon a szerszámba helyezik. Ezt követően a vákuumzsák szerszámra történő felépítését követően a vákuumszivattyú segítségével vákuumot alakítanak ki a szerszámüregben. A gyanta kizárólag a vákuum miatt fennálló nyomáskülönbség hatására jut a szerszámüregbe, és itatja át az erősítőanyagot. Az eljárás leginkább kisszerűs gyártásra alkalmas, előnye a kézi laminálással szemben a nagyobb elérhető szálhányad, illetve a jobb reprodukálhatóság, különösen a termékminőség és a száltartalom tekintetében. Fontos előnye a bonyolultabb, túlnyomáson alapuló eljárásokkal szemben, hogy itt elegendő egyoldali merev szerszám használata. [4, 20]

A gyantainjektálás, ismertebb nevén Resin Transfer Molding (RTM) esetében a vákuuminfúzióhoz hasonlóan a mátrix és az erősítőanyag csak a szerszámban találkozik egymással. Az erősítőanyagot először szárazon a nyitott szerszámba fektetik. Az erősítőanyag általában 2D-s kiserelésű, leggyakrabban szövet, de alkalmazhatnak bonyolultabb, az erősítőszálakból komplex textilipari eljárásokkal készült, mátrixanyagot nem tartalmazó előgyártmányokat, preformokat is. Az erősítőanyag behelyezését a szerszám zárása követi, majd a mátrixanyagot túlnyomás alkalmazásával a szerszámüregbe injektálják. A reaktív mátrixanyag a szerszámüreget kitöltve átimpregnálja az erősítőanyagot, majd a gyantafelesleg az erre a célra szolgáló furatokon keresztül távozik. A mátrix térhálósodása a zárt, fűthető szerszámban történik meg, ezt a folyamatot segítheti levegővel kifejtett utónyomás is. A technológia ciklusideje viszonylag rövid, a termék térhálósodása pár perc, esetleg néhány tíz perc alatt végbemegy. Az eljárásnak léteznek különböző változatai, ezek közé tartozik a Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) technológia is, amelynél a gyanta szerszámüregbe injektálását vákuum létrehozásával segítik elő. RTM technológiával kiváló minőségű termékek állíthatók elő, az eljárás alkalmas teherviselő kompozit szerkezetek létrehozására. [1, 9, 21]

Az eddig bemutatott technológiáknál folyékony gyantát alkalmaznak, ezért ezeket nedves gyártástechnológiáknak nevezik. [4]

A Sheet Molding Compound (SMC) és Bulk Molding Compound (BMC) eljárások lényege, hogy alapanyagként a szálerősítést és a mátrixot is tartalmazó előgyártmányt alkalmaznak, amelyből az alakadást fűtött szerszámban történő préseléssel valósítják meg, majd itt megy végbe a termék térhálósodása is. Általában acélszerszámokat alkalmaznak, amelyeket 120 °C fölé fűtenek. A két eljárás között a fő különbség az előgyártmányban rejlik. BMC esetén „alakatlan” előimpregnátumot használnak, míg SMC eljárásnál a lemez alakú előgyártmányt, amely tekercs formájában kerül piaci forgalomba. Ezek az előgyártmányok vágott, hosszú szálal erősítőanyagot tartalmaznak. [1, 4, 9]

A kompozitok között a legmagasabb minőséget az előre impregnált előgyártmányokból, tehát a prepregekből készült termékek képviselik. Dolgozatom témáját ezen anyagok jelentik. A prepregekhez kapcsolódó alapfogalmakat, illetve előállításuk módjait a 2.6., míg feldolgozástechnológiáikat a 2.7. fejezetben mutatom be részletesen. Az előimpregnált előgyártmányokat használó technológiákat – SMC, BMC, prepreg technológiák – száraz technológiáknak nevezzük, mert ezeknél a gyártás során folyékony állapotú gyanta nem kerül felhasználásra. A prepregek definícióját, illetve a klasszikus értelemben vett prepregek, illetve

az SMC és BMC esetén alkalmazott, tágabb értelemben vett prepregek közti különbségeket a 2.6. fejezetben ismertetem. [21]

2.6. Előgyártmányok

Az erősítőszálakat és mátrixot is tartalmazó előgyártmányok alkalmazásának két egymástól eltérő célja lehet: [14]

- A technológiaspecifikus előgyártmányok segítségével egyszerűsíthető az adott technológiai folyamat, ezáltal csökkenthetők a gyártási költségek, és növelhető a termelékenység, ilyenek a BMC-hez és SMC-hez használt előgyártmányok,
- Más esetekben azonban az előgyártmányok használata elsősorban a termék minőségének fokozásához járul hozzá. Ide tartoznak a klasszikus értelemben vett prepregek. Használatuk számos előnnyel jár: a hagyományos technológiákhoz képest lényegesen kisebb a kompozitban található légbuborékok mennyisége és mérete, egyenletes a száeloszlás, illetve pontosan beállítható a szálhányad.

2.6.1. Prepregek

A prepreg elnevezés az angol preimpregnated szóból származik, ennek megfelelően mátrixanyaggal előre átimpregnált szálak erősítőszerveket nevezünk prepregeknek. Ennek a definíciónak az összes előre impregnált, szálerősítésű előgyártmány megfelel, így ezen tágabb értelmezés szerint többek között az SMC és BMC eljárásoknál alkalmazott előgyártmányok is prepregek tekinthetők. Az utóbbi eljárásoknál használt előgyártmányok általában 50 mm-nél rövidebb, tehát nem végtelen szálakból álló erősítőanyagot tartalmaznak. A klasszikus értelemben vett prepregek azonban kizárólag az előre átimpregnált, végtelen szálak erősítést tartalmazó előgyártmányok, dolgozatomban ezen szűkebb definíciót tekintem mérvadónak. A prepregek mátrixanyaga lehet hőre lágyuló, illetve hőre nem lágyuló polimer is, a műszaki gyakorlatban utóbbiak szerepe kiemelkedő, dolgozatomban ezekkel foglalkozom részletesen. [14, 19]

Erősítőanyag tekintetében a prepregeknél leginkább a szén- és üvegszál, illetve esetenként az aramidyszál fordul elő, ezektől eltérő szálak erősítőanyagokat ritkán alkalmaznak. A leggyakoribb az unidirekcionális erősítés, használnak azonban szöveteket, vagy akár multidirekcionális erősítést is. A prepregek mátrixanyaga többnyire epoxi, ritkábban használnak vinilészter, fenol vagy poliimid alapú prepregeket, de elérhetőek ezektől eltérő gyantákkal készült prepregek is, ám viszonylag szűk választékban, többnyire speciális alkalmazásokhoz. A konkrét prepreg tulajdonságait adalékanyagok segítségével állítják be. [15, 19, 22, 23]

A prepregekben a mátrix ún. B állapotban van. Míg A állapotnak azt nevezzük, amikor az anyag nem térhálós, C állapotúnak pedig a térhálósodás befejeződése után tekintjük a mátrixot, addig B állapotban már megkezdődött a térhálósodás, az anyag gyengén térhálós, üveges átmeneti hőmérséklete megemelkedett. Az anyag viszkozitása ekkor viszonylag nagy értéket vesz fel, felülete kimondottan ragadós. Fontos, hogy az anyag B állapotban még megömlészthető. Ez azonban nem egy stabil állapot, a prepreg mátrixanyaga B állapotban reaktív, ezért a prepregek tárolhatósága, tárolási ideje korlátozott. Elmondható, hogy a hőmérséklet csökkenése jelentősen lassítja a további térhálósodási reakciót, így míg szobahőmérsékleten kb. 1 hónapig tárolhatók a prepregek, addig mélyhűtve, -18 °C-on tárolva akár egy évet is meghaladhat „szavatossági idejük”. A kémiai reakció azonban hűtéssel is csak lassítható, ezáltal a tárolás alatt is kis mértékben változhatnak a prepreg tulajdonságai,

majd a meghatározott maximális tárolási idő lejártával a mátrix térhálósági foka megnő, folyóképessége és a prepreg alakíthatósága pedig lecsökken, ennek eredményeként a prepreg már nem lesz megfelelően feldolgozható. A prepreg eltárolhatóságának ideje függ a mátrix típusától és pontos kémiai összetételétől. A prepregek tekercs formájában kerülnek forgalomba. Mivel felületük ragad, így az egyes rétegek egymással való összetapadásának elkerülése érdekében a prepregeket mindkét oldalukon leválasztó fóliával és/vagy papírral vonják be. Ezeknek is meg kell felelniük bizonyos követelményeknek, megfelelő szilárdsági tulajdonságokkal és méretstabilitással kell rendelkezniük, jól kell tapadniuk a prepreghez, fontos azonban, hogy annak sérülése nélkül leválaszthatók legyenek a prepregről. [9, 14, 22, 23]

A prepregek számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, a kompozit termékek viszonylatában használatukkal érhető el a legjobb minőség, ez az alábbiakban nyilvánul meg: [14, 22]

- Egyenletes száeloszlás,
- Pontosan beállítható száltartalom és szálorientáció,
- Az erősítőanyag jól átimpregnált,
- Légbuborékokat nem –, vagy csak nagyon kis mennyiségben és méretben – tartalmaz,
- Jó felületi minőség.

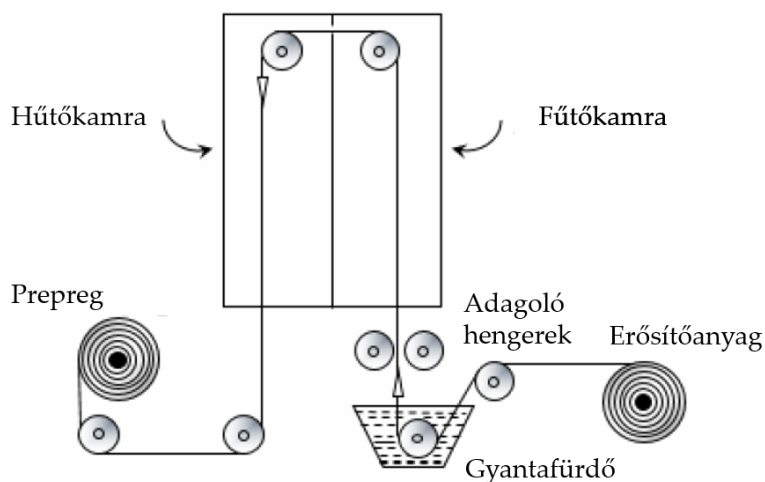
Fontos, hogy a prepregből készült termékek rendkívül jól reprodukálhatók. Kiemelendő még, hogy – a prepreg előállításának módjától függően – nagy viszkozitású gyanták is alkalmazhatók, illetve a prepregek feldolgozásakor viszonylag hosszú idő áll rendelkezésre az alakadáshoz. Természetesen azonban a prepregeket több hátrányos tulajdonság is jellemzi, ezek közül a legfontosabbak a következők: [14]

- Magas ár,
- Feldolgozástechnológiák szakképzett munkaerőt igényelnek,
- Költségigényes berendezések szükségesek a feldolgozási eljárásokhoz, pl.: autokláv,
- A prepregek tárolásuk során hűtést, gyakran mélyhűtést – kb. $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ – igényelnek.

2.6.2. Prepregok gyártása

A prepregok előállítása több módszerrel is lehetséges. Ezeket alapvetően két csoportra oszthatjuk: ömledékes és oldószeres eljárásokra. [23]

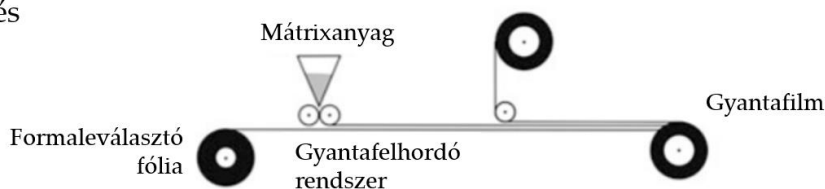
Az oldószeres eljárásokat régebb óta alkalmazzák, ezek alapelve, hogy a mátrixanyagként szolgáló gyanta komponenseihez alacsony forráspontú oldószert adnak, így a mátrixot megfelelő koncentrációértékig hígítják. Ezáltal elérhető az erősítőanyag impregnálásához szükséges, megfelelően alacsony viszkozitás. Az erősítőanyagot a hígított mátrixfürdőn adott sebességgel átvezetve impregnálják gyantával, majd egy kemencébe juttatják, ahol emelt hőmérséklet hatására megtörténik az oldószer eltávolítása, majd megindul a mátrix (elő)térhálósodása, viszkozitása nő, a prepreg mátrixanyaga B állapotba kerül, majd az anyagot lehűtik. A prepregeket hengerek segítségével leválasztó fóliák közé vezetik, majd szélezik és tekercselik. Az eljárás segítségével folytonosan állíthatók elő prepreg előgyártmányok. Ezek gyantatartalma elsősorban a mátrixfürdő koncentrációjával szabályozható, emellett az erősítőanyag adagolási sebességének és az elhúzó hengerek közti távolságnak is szerepe van a gyantatartalom alakulásában. Az eljárás elvi vázlata a 3. ábrán látható. [22, 23]



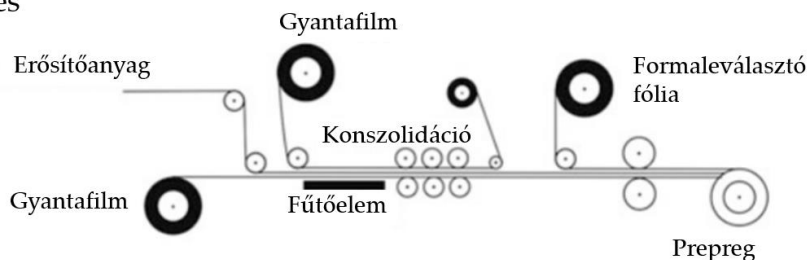
3. ábra Függőleges elrendezésű oldószeres eljárás elvi vázlata, forrás: [24]

Az oldószeres eljárástól eltérő elven működő, ömledékes eljárások alapvetően két csoportra bonthatók, egylépéses, direkt ömledékes eljárásokra, illetve kétlépéses eljárásokra, ezek az ún. filmtranszfer eljárások. Előbbieknél a mátrixanyagot felhevítik és megömlesztik, az erősítőanyag átimpregnálást pedig fűtött kalanderhengerekkel segítik. Utóbbi eljárások esetében az első lépésben a mátrixból emelt hőmérsékleten – általában 60-90 °C – gyantafilmet képeznek hordozófóliára, majd feltekerceslik. Ilyen állapotban a gyantafilm hűtve tárolható felhasználásig. A második lépésben a korábban elkészített gyantafilmet használják fel, ezt felfűtik, majd temperált kalanderhengerek segítségével egyrészt biztosítják a mátrix kívánt viszkozitáshoz szükséges hőmérsékletét, illetve átimpregnálják a bevezetett erősítőanyagot. A filmtranszfer eljárás elvi vázlatát a 4. ábra szemlélteti. Az elkészült prepreget fóliával vonják be, majd tekerceslik. [1, 22, 23]

1. lépés



2. lépés



4. ábra Filmtranszfer eljárás, forrás: [25]

Ezeknek az eltérő alapelvű eljárásoknak léteznek különféle változataik, a két eljárás csoportot összehasonlítva azonban mindkettő rendelkezik jelentős előnyökkel és hátrányokkal is. Az oldószeres eljárás esetében előnyös, hogy az alacsony viszkozitású gyantafürdőnek köszönhetően az erősítőanyag kiválóan átimpregnálható, akár viszonylag vastag, komplex erősítőstruktúrák esetében is, amelyek ömledékes eljárással nem, vagy csak nagyon magas nyomás és hőmérséklet hatására nedvesíthetők megfelelően. Emellett az ezzel az eljárástípussal készült prepregek általában hosszabb ideig tárolhatók, illetve jobban

alakíthatók. Negatívumként megemlíthető azonban, hogy az eljárástípust az oldószer eltávolításának, majd kezelésének szükségessége viszonylag költségessé teszi, továbbá gyakori a visszamaradó oldószer, ami termékminőségi és környezeti szempontból problémás lehet. Ezen hátrányai miatt az oldószeres prepreggyártást egyre kevésbé használják az ipari gyakorlatban. A visszamaradó oldószer emellett több légüregzet eredményezhet a prepregben, illetve a gyártandó alkatészben. [1, 22, 23]

Az ömledékes eljárással kiküszöbölhetők az oldószeres módszer fent említett hátrányai, éppen ezért a modern prepreggyártók leggyakrabban ezt alkalmazzák, különösen szerkezeti célokra szánt termékeknél. Az eljárás legfőbb előnyei között említhető a nagy termelékenység, az egyszerűen szabályozható gyantatartalom és a kiváló felületi minőség. Előnyös még, hogy mivel nem kerül felhasználásra oldószer, amit utána külön kezelni kell, így az eljárás többnyire kisebb környezeti terheléssel jár. A pozitívumok közé sorolható, hogy a film transzferes eljárásváltozat esetén a gyártási folyamat két részre bontható, a gyantafilm előkészítése és az impregnáló műveletek egymástól elkülöníthetőek, ezáltal csökkenthető az egyes szakaszok folyamán fellépő anyagvesztés. Az ömledékes eljárás legfőbb hátránya, hogy az erősítőanyag ezzel nehezebben impregnálható át, mint az oldószeres elven működő eljárásoknál, ezért csak korlátozottan használhatók vastagabb erősítőstruktúrák, illetve nagyobb viszkozitású mátrixanyagok. [22, 23]

Alapvetően kijelenthető, hogy bár az ömledékes eljárások manapság jobban elterjedtek, a két egymástól jelentősen eltérő alapelvű eljárás csoport egymás mellett létezik, kiegészítik egymást és különböző felhasználási célú előgyártmányok esetén kerülhetnek előtérbe. A legmodernebb prepreggyártósoroknál multifunkciós berendezéseket alkalmaznak, amelyek mind oldószeres, mind ömledékes elven történő működésre is képesek. [23]

2.7. Prepregek feldolgozása

A prepregek feldolgozástechnológiai alapvetően két csoportra bonthatók: autoklávus feldolgozásra, illetve az autoklávot nem alkalmazó, ún. out-of-autoclave technológiákra. Alapvetően az autoklávus eljárás számít a csúcstechnológiának, de természetesen az out-of-autoclave technológiáknak is megvannak az előnyeik. A különböző technológiákat, illetve a prepregek tárolásának, előkészítésének, feldolgozásának körülményeit mutatom be az alábbi fejezetben. [21]

2.7.1. *Prepregek tárolása, előkészítése, feldolgozási körülményei*

Prepregek alkalmazásakor az előgyártmány kezelésének, előkészítésének módja, tárolási és feldolgozási körülményei jelentős hatást gyakorolnak a végtermék tulajdonságaira is. Ezeket az előgyártmányokat hosszú távon hűtve kell tárolni, amihez mindenféleképpen $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérséklet szükséges, az ideális tárolási hőmérséklet a 2.5. fejezetben is szereplő $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, így a prepreg szavatossági ideje (shelf life) akár az egy évet is elérheti, mivel az alacsony hőmérséklet késlelteti a térhálósodást. Ezt a szavatossági időt (shelf life) feltüntetik a prepreg csomagolásán, az itt szereplő dátum nedvességálló, tömített csomagolásban, folytonosan $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleten történő tárolás esetén adja meg az előgyártmány lejáratát. A feldolgozás előtt a prepreg kiolvasztásra kerül. Itt fontos szem előtt tartani, hogy a tömített, nedvességálló csomagolás kizárólag akkor távolítható el, amikor a benne lévő előgyártmány teljes egészében kiolvadt, és elérte a kívánt hőmérsékletet. Ezen szempontok figyelembevételével elkerülhető a nagyobb mértékű nedvességeképződés és -lecsapódás a prepregben, amely szennyeződéseket, tulajdonságromlást okozhatna. A teljes kiolvadáshoz

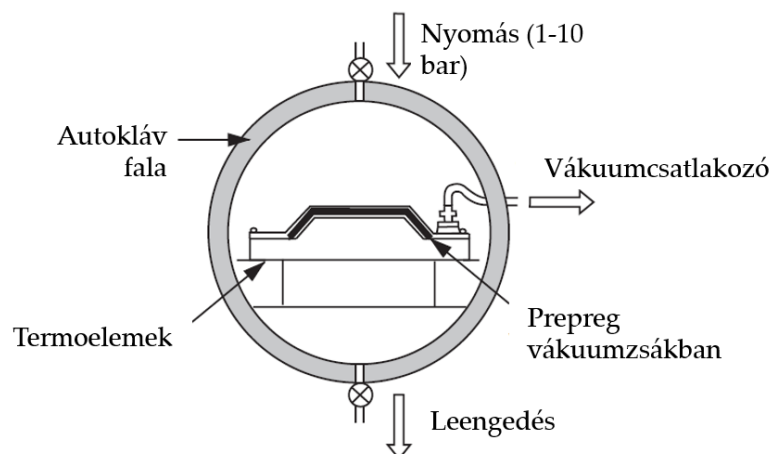
többnyire a feldolgozás előtti éjszaka is elegendő, de nagyobb tekercsek esetén akár 48 órát is igénybe vehet. A kiolvasztott prepregben a kémiai reakciók gyorsabban mennek végbe, mint lefagyasztott állapotban, így ajánlott rögzíteni azt az időt, amit az előgyártmány szobahőmérsékleten tölt. A prepregek eltarthatósága szobahőmérsékleten a konkrét gyantarendszer függvényében általában 4-8 hét. [21, 26]

A kiolvasztást követően megkezdődhet a prepreg feldolgozása. Nem elhanyagolhatóak azonban a feldolgozás során a külső körülmények. A térhálósítást megelőző prepregekkel kapcsolatos műveleteket általában „tisztá térben” (clean room) végzik, ezzel biztosítható, hogy az előgyártmányt ne ériék szennyeződések. A nedvesség lecsapódásának megelőzése érdekében fontos az alacsony páratartalom, az erre vonatkozó gyártói ajánlás szerint a levegő nedvességtartalmát 70% alatt kell tartani. Lényeges még a hőmérsékletre vonatkozó előírás: 15-20 °C-os hőmérséklettartományban ajánlott prepregekkel dolgozni. A termék alakjának kialakítása szempontjából nagy jelentőséggel bír a hőmérséklet. Minél alacsonyabb a hőmérséklet, annál kevésbé tapad a prepreg felülete. Ennek megfelelően alacsonyabb hőmérsékleten egyszerűbb az egymásra rétegezett prepregek esetleges újrapozicionálása, míg magasabb hőmérsékleten a prepreg ragadósabb, nehezebben kezelhető a rétegrend kialakításakor, illetve légbuborékok maradhatnak az egyes rétegek között. A prepregekkel azon a legalacsonyabb hőmérsékleten érdemes dolgozni, ahol már megfelelő az anyag tapadásra való hajlama. Szükség esetén a kéz melegével, vagy meleg levegő ráfúvatásával „ragacsosabbá”, illetve alakíthatóbbá tehető a prepreg. [26]

2.7.2. Autoklávós feldolgozás

Az elvárt körülmények megteremtését követően a tekercs formájú előgyártmányból kivágják a megfelelő szabásmintát. Ezután kialakítják a kívánt rétegrendet a szerszámban. Ez többnyire kézi laminálással történik, de alkalmazhatnak valamilyen gépesített módszert is. Eközben is végig törekedni kell arra, hogy minél kevesebb légüreg maradjon az egyes rétegek között. Néhány rétegenként ajánlott megszakítani a laminálási folyamatot, és levákuumozni a rétegeket legfeljebb néhány órára. Ezt a lépést konszolidációnak nevezik, célja a laminálás során keletkezett légüregek eltávolítása. A következő lépés a vákuumzsák felépítése. Ennek legfontosabb elemei a formaleválasztó fólia, a különböző technológiai rétegek – vákuumelosztó paplan, gyantafelszívó réteg stb. -, illetve a vákuumfólia. Ezen kívül használnak bekötő csonkokat, csöveket, vákuumtömítő szalagot, illetve számos egyéb segédanyagot és -eszközt. [21, 26]

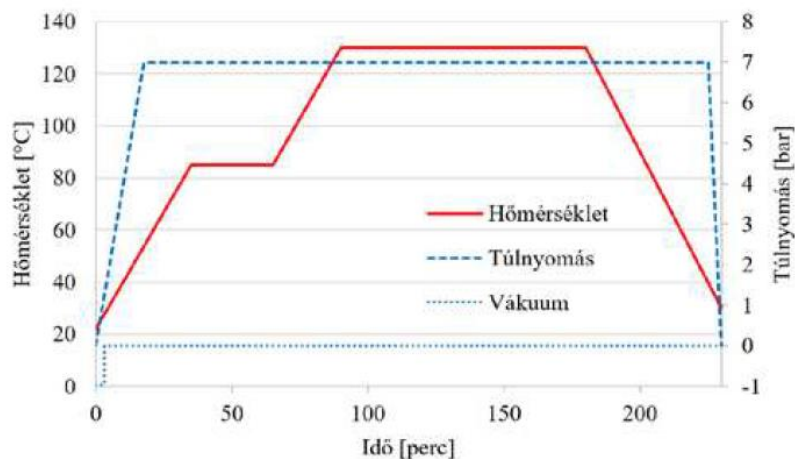
A terméket a térhálósítás előtt újabb konszolidációnak vetik alá, ezt követően kerülhet sor az autokláv alkalmazására. Az autokláv egy fűthető nyomástartó edény. Autoklávokat a kompozit szerkezetek előállításán kívül is számos területen alkalmaznak, ezek közé tartozik az orvostechika is, ahol sterilizálására használják a berendezést. A kompozittechnikában alkalmazott ipari autoklávokban a maximális létrehozható nyomás általában 10 bar, illetve legfeljebb 400 °C-ig fűthetők fel. Emellett az autoklávban található vákuumcsatlakozókkal összekapcsolva a behelyezett vákuumzsákban létrehozható vákuum. Az autoklávós feldolgozásmód elrendezésének vázlata látható az 5. ábrán. [21, 26-28]



5. ábra Autoklávos gyártás vázlata, forrás: [21]

Az autoklávos gyártás legfontosabb eleme a térhálósítási ciklus. Autoklávos térhálósítás során vákuummal, túlnyomással, illetve a hőmérséklettel tudjuk szabályozni a prepreg szerkezet térhálósodását. A vákuum szerepe a légüregek eltávolítása a prepreg lemezből. Vákuumot leggyakrabban csak a ciklus elején alkalmaznak, amint felépült az autokláv belsejében az 1 bar túlnyomás, a vákuum kikapcsolásra kerül. Az autoklávban uralkodó belső nyomás a termékre külső túlnyomásként hat. Ezt a túlnyomást leggyakrabban 6-7 bar értékig növelik, majd fenntartják akár a hűtési szakasz végéig. A túlnyomás elősegíti egy minél kompaktabb termék előállítását, a légüregek méretének csökkenését, illetve a megfelelő térhálósodást. [21, 29]

A hőmérséklet alakulása a ciklus folyamán jelentős hatást gyakorol a termék tulajdonságaira. Fontos, hogy a felfűtés megfelelően kontrollált legyen. Gyakran a ciklus részét képezi egy a felfűtést ideiglenesen megszakító, a végső térhálósítási hőmérséklet elérése előtt beiktatott hőtartási szakasz, ezt nevezik platónak. Alkalmazása két okra vezethető vissza. Egyrészt a B állapotú gyanta térhálósági foka alacsony, ezért a felfűtés hatására lecsökken a viszkozitás, ami a prepregből eltávozó gyanta mennyiségének növekedését eredményezheti. A plató ideje alatt nő a térhálósági fok, amely ellensúlyozza a viszkozitáscsökkenést. Főként nagy felfűtési sebességek okozhatnak az optimálisnál nagyobb viszkozitáscsökkenést. Emellett gyors felfűtés esetén előfordulhat, hogy az exoterm térhálósodási reakció során képződő hő nem tud megfelelően eltávozni, így a termék túlhevülését, és akár degradációját is okozhatja. Az említett problémák azonban leginkább csak a nagyobb méretű – elsősorban nagyobb falvastagságú – termékekben fordulnak elő, így kisebb, vékonyabb termékek esetén az említett plató akár el is hagyható. Nagy falvastagságú termékeknel előforduló probléma még, hogy a falvastagság mentén nem egyenletesen melegszik fel az anyag, a plató ezen hőmérséklet-különbségek kiegyenlítését is elősegíti. A másik végletet a túl alacsony felfűtési sebesség jelenti. Ekkor előfordulhat, hogy a mátrix viszkozitása nem csökken le kellő mértékben, az elégtelen folyóképeség pedig a tulajdonságok romlását, a gyártás sikertelenségét idézheti elő. A felfűtési sebességet tehát egy meghatározott technológiai ablakon belül kell megválasztani, a konkrét értékeket a gyantarendszer és a termékgeometria határozza meg. A prepreg technikai adatlapja tartalmazza a gyártó erre vonatkozó javaslatait. A plató követően a felfűtés tovább folytatódik a térhálósítási hőmérsékletre, majd a térhálósodáshoz szükséges idő elteltével lehűtik a terméket. Ez is egy kontrollált folyamat, kerülendő a túl gyors hűtés. Egy jellegzetes autokláv ciklus látható a 6. ábrán. [21, 26, 29]



6. ábra Lépcsős, autoklávós térhálósítási ciklus, forrás: [29]

Az autoklávós gyártás rendkívül magas száltartalmú, kevés és kis méretű légüregeket tartalmazó, nagyon jó felületi minőségű termékek előállítását teszi lehetővé. Kiemelkedő továbbá a technológia reprodukálhatósága is. A vele elérhető kimagasló termékminőség miatt a legmagasabb minőségi követelményeket támaztó területeken – repülőgépipar, motorsport, űripar – is autoklávval készült prepreg szerkezeteket alkalmaznak. Jelentős hátránya azonban, hogy drága a berendezés és annak üzemeltetése is. [21]

2.7.3. Out-of-autoclave technológiák

Folyamatos fejlődésen mennek keresztül az ún. out-of-autoclave technológiák. Ezek legfontosabb képviselője a vákuumzsákos technológia. Itt a vákuumzsák felépítése az autoklávós technológiánál bemutatottakhoz hasonlóan történik, majd a terméket vákuum alatt, kemencében térhálósítják, tehát itt hiányzik az autoklávnál alkalmazott túlnyomás, a légüregek eltávolítását, illetve méretének csökkentését kizárólag a vákuum végzi. [21]

A vákuumzsákos eljárás kevésbé költséges mind a berendezésekhez szükséges beruházásokat, mind azok működtetését – pl. energiaigény – tekintve, mint az autoklávós technológia, termékminőség és reprodukálhatóság tekintetében azonban jelentősen elmarad tőle. [21]

Egy másik out-of-autoclave technológia a prepreg préselés. Ez egy leginkább az autóiparban elterjedt feldolgozástechnológia, amellyel kiváló felületi minőségű termékek állíthatók elő, viszonylag rövid ciklusidővel. Az eljárás leginkább nagy sorozatszámok esetén gazdaságos, jól automatizálható, főként karosszériaelemek gyártására használják. Első lépésként megtörténik a megfelelő szabásminta kivágása a prepregből, majd a rétegrend kialakítása. Ezt követi az előformázás. A prepreg lemezt felmelegítik az előformázási hőmérsékletre, ezalatt a mátrix viszkozitása csökken, a lemez alakíthatóvá válik. A lemezt egy szerszámba helyezik, majd egy rugalmas membrán segítségével, mélyhúzással alakítják ki a háromdimenziós előformát. Az előformázott lemezt a szerszámban hagyják lehűlni, így megőrzi alakját. Ezután a háromdimenziós kontúrnak megfelelően szélezzik az előformázott lemezt, majd egy fűtött prészszámba fektetik, ahol préseléssel alakítják ki a kívánt geometriát. A hőmérséklet és a nyomás hatására a szerszámban beindul a térhálósodás, amelynek befejeztével eltávolítják a terméket a szerszámból. Préselés után a termék nem igényel nagy volumenű utómunkálatokat, ezeket a harmadik lépésként beiktatott szélezéssel váltották ki. A terméket utolsó lépésként általában lakkozzák. A technológia másik fő előnye, hogy az előformázásnak köszönhetően a terméket a prészszámban már csak kis mértékben

kell alakítani, a préselés elsődleges feladata a nagy nyomás alatt történő térhálósítás. Ennek megfelelően a prészerszám temperálható, nem szükséges minden alkalommal felfűteni-lehűteni, ezáltal az eljárás ciklusideje kb. 3-5 perc, ami lényegesen rövidebb a konkurens technológiáknál tapasztalt ciklusidőknél. [30]

Természetesen a két bemutatott OOA technológia mellett létezik számos ezekről kisebb-nagyobb mértékben eltérő eljárás. A prepregok autoklávon kívüli feldolgozástechnológiai dinamikus fejlődésen mennek keresztül. A fejlesztések célja elsősorban a ciklusidő csökkentése, illetve a termékminőség és a reprodukálhatóság javítása a térhálósítási ciklus optimalizálásán keresztül. [2]

2.7.4. A feldolgozási paraméterek vizsgálata

A prepregok térhálósítása egy szigorúan kontrollált folyamat, az egyes technológiai paraméterek jelentős hatást gyakorolhatnak a térhálósodásra, ezáltal pedig a végtermék tulajdonságaira is.

Dong és társai kutatásuk keretein belül egy repülőgépgyártásban alkalmazott, szívósított fenol-epoxi mátrixú, szénszál erősítésű UD prepreg térhálósítási ciklusát kívánták optimalizálni. Céljaik között szerepelt a ciklusidő csökkentése, illetve az optimális technológiai paraméterek meghatározása. Vizsgálatuk tárgyát képezte többek között a felfűtési sebesség hatása, ahol a gyártó által javasolt 1,5 °C/min és 5 °C/min sebességekkel foglalkoztak, a kísérletek során a hőciklusba beiktattak egy 1 órás platót 120 °C-nál, majd a térhálósítás 180 °C-on történt. A felfűtési sebesség hatására a mátrix térhálósági fokának és viszkozitásának alakulásából következtek. A megfelelő térhálósodás nélkülözhetetlen az elvárt anyagtulajdonságok eléréséhez. Kísérletük elvégzésekor azt tapasztalták, hogy lassabb felfűtés esetén az első plató elérésekor nagyobb volt a térhálósági fok, ennek magyarázata az lehet, hogy a plató eléréséhez ebben az esetben hosszabb ideig melegítették az anyagot. Ezt követően azonban hasonló jelleget mutatott a térhálósági fok változása, majd a ciklus végére mindkét minta teljes mértékben térhálósodott. Ez alapján kijelenthető tehát, hogy a gyorsabb felfűtés sem okoz problémát, annak alkalmazásával is létrejön a szükséges mértékű térhálóság, emellett pedig 35 %-kal rövidebb ciklusidő érhető el a nagyobb sebesség használatával. A felfűtési sebesség hatással van a mátrix viszkozitásának alakulására is. Bár az erősítőanyagot a prepregokban előre átimpregnálják a mátrixszal, az esetlegesen szárazon maradt tartományok nedvesítéséhez, és a jó minőségű szál-mátrix határfelületi adhézióhoz elengedhetetlen a gyanta megfelelő folyóképessége. Dong és társainak vizsgálatai során a mátrix viszkozitásának változása gyors és lassú felfűtés esetén hasonló jelleget mutatott. A várakozásoknak megfelelően a gyorsabb felfűtésnél a viszkozitás minimumértéke alacsonyabbnak bizonyult – 6,9 Pa·s –, mint a lassabb felfűtésnél – 10,5 Pa·s –, ugyanakkor arra a következtetésre jutottak, hogy ez nem okoz szignifikáns különbséget az erősítőanyag átimpregnáltságában. [2]

Costa és társai a felfűtési sebesség, illetve a beiktatott hőntartási szakasz (plató) hőmérsékletének hatását vizsgálták a mátrix reológiai tulajdonságaira. Ehhez szénszállal erősített, epoxi mátrixú prepreget használtak. 2,5, 5 és 10 °C/min felfűtési sebességek mellett végeztek vizsgálatokat. Azt tapasztalták, hogy lassabb felfűtés esetén lassabban megy végbe a gyanta térhálósodása, ami előnyös a prepreg szerkezetek tulajdonságaira nézve, mivel így több idő jut a térhálósodások kialakulására, ami jobban kontrollálhatóvá teszi a reakciót. Vizsgálataik során a felfűtést megszakító plató hőmérsékletét előbb 100, majd 110 és 120 °C-nak választották. Ezek közül a legalacsonyabb hőmérsékleten érték el a legjobb eredményeket, ahol a gélesedési idő a leghosszabbnak bizonyult. Arra a következtetésre

jutottak, hogy a lassabb felfűtés és az alacsonyabb hőmérsékletű plató hatására a termék kevesebb légüregot tartalmaz, ami jobb mechanikai tulajdonságokat eredményez. [3]

Takács vizsgálta a felfűtési sebesség hatását a prepreg szerkezet tulajdonságaira. Alapanyagként szénszövettel erősített, epoxi mátrixú prepreget használt. A próbagyártásokat a technikai adatlapon javasolt 1 °C/min, illetve ennél gyorsabb, 5 °C/min felfűtési sebességgel végezte. Azt tapasztalta, hogy gyorsabb felfűtés esetén hamar leesett a gyanta viszkozitása, így nagyobb mennyiségű gyanta távozott el a térhálósítás során, ami magasabb száltartalmat eredményezett. Ezt követően mechanikai vizsgálatokat végzett. A prepreg lemezeket elsőként szakítóvizsgálatnak vetette alá. Itt jelentős különbségeket tapasztalt, a gyorsabb felfűtési sebességgel gyártott termékeknel a húzószilárdság értéke lényegesen nagyobb volt, amit a magasabb száltartalommal magyarázott. Rugalmassági modulusz tekintetében viszont nem tapasztalt lényeges eltéréseket. Ezt követően hárompontos hajlítóvizsgálatot végzett, ami nem eredményezett szignifikáns különbségeket, a tapasztalt eltérésekből pedig a nagy szórásértékek miatt nem vont le következtetéseket. [31]

2.8. Az irodalomkutatás kritikai elemzése

Irodalomkutatásom során viszonylag kevés olyan publikációt találtam, amely a prepregek feldolgozásánál alkalmazott technológiai paraméterekkel, illetve azok hatásaival foglalkozik. A témában készült kutatások többsége pedig elsősorban az out-of-autoclave feldolgozástechnológiákra korlátozódik. Ezzel kapcsolatban felmerül problémaként, hogy az OOA technológiák reprodukálhatósága nem minden esetben kielégítő, ami a mérések során nagy szórásértékeket eredményezhet. Ez korlátozza az eredmények értékelhetőségét, illetve akár téves következtetésekhez is vezethet. Kutatásom során az autoklávós gyártás mellett döntöttem, így egyrészt ennek eredményeit összevethetem az OOA technológiáknál végzett kutatásokkal, másrészt a technológia kimagasló reprodukálhatósága lehetővé teszi a technológiai paraméterek hatásának pontosabb elemzését.

Dong és társai kutatásukban a gyors és lassú felfűtési sebességeknél tapasztalt viszkozitásmínimumok közötti 3,6 Pa·s-os eltérést nem tekintették szignifikáns különbségnek, ez a kezdeti viszkozitásértékekhez képest valóban lényegtelennek tűnő differencia, az egyéb technológiáknál – pl. vákuuminjektálás – tapasztaltak alapján azonban befolyásolhatja a gyanta folyóképességét ez a különbség. [2]

Megfigyelhető volt továbbá, hogy a témához kapcsolódó kutatásokban a felfűtési sebesség hatását úgy vizsgálták, hogy a ciklus tartalmazott platót. Ezzel kapcsolatban felmerülhet, hogy mivel a plató szerepe pont a felfűtés – főként a gyors felfűtés – okozta viszkozitasesés kompenzálása, ezért a kísérletek során nem vizsgálták a felfűtési sebesség kizárólagos hatását. Kutatásomban ezért foglalkozni kívántam a plató elhagyásának következményeivel is, illetve a felfűtési sebesség hatásának vizsgálatakor nem iktattam be platót a ciklusba, ezáltal kiküszöböltem a vizsgálni kívánt paramétert ellensúlyozó tényezőt. [2, 3]

Kutatásom keretei között a technológiai paraméterek prepreg szerkezetek tulajdonságaira gyakorolt hatásával foglalkoztam. A térhálósítás során a technológiai paraméterek alapjaiban határozzák meg a végtermék tulajdonságait. Ezek közül is kiemelkedik a hőmérséklet hatása, ezért a prepregek feldolgozásának kulcskérdése a hőciklus helyes kialakítása. A felfűtési sebesség hatással lehet a mátrix viszkozitásának alakulására, amely befolyásolhatja a térhálósítás során eltávolított gyanta mennyiségét, a légüregek számát és méretét, a kompozit termék tényleges száltartalmát, illetve a felületi minőséget. Ezen tényezők alakulásának függvényében a végtermék tulajdonságai is jelentős mértékű eltérést mutathatnak. A hőciklus másik fontos eleme a felfűtési szakasz közben beiktatott hűntartás, az ún. plató hatása, amely fontos szerepet játszik a mátrix túlzott viszkozitasesésének ellensúlyozásában, illetve a

terméken belüli hőmérséklet-különbségek kiegyenlítésében. Fontos kérdés, hogy ennek használata milyen esetekben indokolt, illetve elhagyása milyen következményekkel jár.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ezen fejezet tartalmazza a kutatómunka keretein belül felhasznált alapanyagokat, alkalmazott berendezéseket, illetve az elvégzett vizsgálatok módszertanát. Ezek részletes bemutatása az elvégzett kísérletek reprodukálhatóságát szolgálja.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Ebben az alfejezetben kerülnek bemutatásra a kutatómunka közben felhasznált alapanyagok.

3.1.1. Reológiai vizsgálatokhoz alkalmazott alapanyag

A reológiai vizsgálatokhoz a Hunstman Corporation által forgalmazott Araldite LY 1556/ Aradur 1571/ Accelerator 1573/ Hardener XB 3403 négykomponensű epoxi prepreg gyantát alkalmaztam. Ennek összetevőit és az alkalmazott keverési arányt az 1. táblázat tartalmazza. A prepreg gyanta komponenseinél tömegarányos keverést használtam. Fontos, hogy mivel a gyanta a prepregekben B állapotban van, így a vizsgálatok megkezdése előtt meg kellett várnom, amíg letelik a gyanta B állapotba kerüléséhez szükséges 48 óra. A gyanta vizsgálatokhoz az adatlapon feltüntetett hőkezelési ciklust tartottam szem előtt, amely a gyanta térhálósításához 2 órás, 120 °C-on történő hőntartást ír elő. [32]

Komponens	Tömegarány [-]
Araldite LY 1556	100
Aradur 1571	23
Accelerator 1573	3
Hardener XB 3403	12

1. táblázat A prepreg gyanta komponensei és a keverésnél alkalmazott tömegarányok, forrás: [32]

3.1.2. Próbagyártások alapanyaga

A próbagyártásokhoz a Microtex Composites X2-120 elnevezésű prepregjét használtam fel. Ez egy epoxi mátrixú, 0/90°-os, vászon szövési struktúrájú szénszövettel erősített prepreg. Az erősítőanyag felületi sűrűsége 160 g/m², a gyanta sűrűsége térhálósított állapotban 1,20 g/cm³. A prepreg a 7. ábrán látható a gyártást megelőzően, kiterített állapotban, a megfelelő méretű rétegek kivágása közben. A prepreg mind autoklávós, mind OOA technológiákkal feldolgozható. [33]



7. ábra A felhasznált prepreg

A próbagyártások elvégzéséhez szükséges vákuumzsák felépítéséhez a Tanszéken elérhető segédanyagokat használtam, ezek a következők: formaleválasztó fólia, lyukacsos fólia, vákuumfilm (bleeder), vákuumfólia és nagy hőállóságú vákuumszigetelő szalag.

3.1.3. Egyéb segédanyagok

A szakítópróbatestek tabolásához üvegszállal erősített epoxi lemezeket használtam, amelyeket Araldite 2011 típusú kétkomponensű ragasztóanyaggal rögzítettem a prepreg lemezekhez.

A gyanta viszkozitásának nem szabványos vizsgálatánál a gyanta vákuum alá helyezéséhez felhasznált segédanyagok a következők: alumínium fólia, letépőszövet, PET fólia, vákuumfólia. Az elvárt nagy hőállóság miatt a vákuumozásnál a megszokott LDPE vákuumcsövet egy 10 mm belső átmérőjű, szövetbetétes gumicsővel helyettesítettem.

3.2. Alkalmazott berendezések

Az alábbi alfejezetben kerülnek bemutatásra a kutatás során alkalmazott berendezések.

3.2.1. Reológiai vizsgálatoknál alkalmazott berendezések

A reológiai vizsgálatok elvégzéséhez Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki Kar Szerves Kémia és Technológia Tanszékének laboratóriumában található TA AR2000 típusú reométert alkalmaztam. Ennek típusa megegyezik az irodalomkutatás 2.7.5. alfejezetében bemutatott kísérleteknél alkalmazott berendezésével. [34]

A viszkozitás alakulásához kapcsolódóan végzett további vizsgálatoknál a gyanta felfűtéséhez és hőntartásához a Tanszéken elérhető Heraeus UT20 elnevezésű szárítószekrény került felhasználásra. A berendezés 20 és 250 °C közötti hőmérséklettartományban alkalmazható. [35]

3.2.2. Szakító- és hajlítóvizsgálatok berendezései

A szakítóvizsgálatokhoz a Polimertechnika Tanszék anyagvizsgáló laboratóriumában található Zwick Z250-es univerzális szakítógépet használtam 100 kN-os ékpályás befogókkal. A szakítógép a -250-től +250 kN-ig terjedő erőtartományban terhelhető, a mérések a 0,001-600 mm/min sebességtartományban végezhetőek. A próbatestek deformációjának méréséhez a Tanszéken elérhető Mercury Monet DIC optikai nyúlásmérő berendezés került felhasználásra. [36, 37]

A hajlítóvizsgálatokat a Tanszéken lévő Zwick Z020 univerzális szakítógépen végeztem hárompontos hajlító feltétellel. A berendezés -20 és +20 kN közti erő-, illetve 0,001-től 750 mm/min-ig terjedő sebességtartományban alkalmazható mérésekhez. [38]

3.2.3. Egyéb berendezések

A lemezek gyártását a Polimertechnika Tanszék Olmar ATC 1100/2000 típusú autoklávjával végeztem. Ez látható a 8. ábrán. A berendezéssel elérhető maximális hőmérséklet 260 °C, a maximális nyomásérték pedig 10 bar. [39]



8. ábra A próbagyártásokhoz alkalmazott autokláv, forrás: [39]

A száltartalom meghatározása a tanszéki laboratóriumban található Denkal 6B típusú izzító kemence segítségével történt. A kemence hőmérsékleti tartománya 50-1100 °C. [40]

A gyártott lemezek sűrűségét a Sartorius által gyártott Quintix 125D típusú mérleggel határoztam meg. A mérleghez tartozó megfelelő feltét segítségével a sűrűség g/cm³-ben, 3 tizedesjegy pontossággal határozható meg.

3.3. Vizsgálati módszerek

Az alábbi fejezetben mutatom be az általam alkalmazott vizsgálati módszereket.

3.3.1. Reológiai vizsgálatok

A bekevert epoxi prepreg gyanta viszkozitásmérését a 3.2.1. alfejezetben bemutatott TA AR2000 reométerrel végeztem, oszcillációs módban, sík-sík elrendezésben. A mérés lényege, hogy a vizsgálandó anyag a két adott átmérőjű, sík tárcsa közötti, pontosan beállított méretű résben helyezkedik el, ezt tölti ki. Az egyik tárcsa – jellemzően az alsó – fix, míg a másik oszcilláló mozgást végez adott frekvenciával, ezáltal deformálja a vizsgált anyagot. A legtöbb vizsgálat esetében ez a deformáció meghatározott mértékű, ezt deformációvezérelt módnak is nevezik, de létezik ún. feszültségvezérelt mérési mód is. A berendezés a mérés közben a tárcsa elforgatásához szükséges nyomatékot detektálja. A beállított paraméterek és a fellépő nyomaték értékeinek felhasználásával a berendezés nyírófeszültséget számol, ennek segítségével határozza meg az anyag viszkozitását. A reométerek természetesen számos egyéb más felhasználási célra is alkalmasak. Egy gyakori alkalmazásuk a viszkoelasztikus anyagok esetében a komplex nyíró rugalmassági modulusz komponenseinek – tárolási és veszteségmodulusz – meghatározása, de számos egyéb anyagtulajdonság is vizsgálható segítségükkel. A legtöbb reométer rotációs módban történő mérést is lehetővé tesz, illetve a sík-sík elrendezéstől eltérő mérési elrendezések is megvalósíthatóak, pl. kúp-sík elrendezés. A mérési mód és elrendezés megválasztása a vizsgálandó alapanyag függvényében történik. A szakirodalom szerint térhálós anyagok viszkozitásának mérésére az általam is alkalmazott oszcillációs mód és sík-sík elrendezés a leginkább alkalmas. [41]

Vizsgálataim során 25 mm átmérőjű sík alumínium tárcsákat használtam a gyanta viszkozitásának meghatározásához. Bemenő paraméterként 1 %-os deformációt és 2 rad/s

szögsebességet állítottam be. A tárcsák közötti résméretet 800 μm -re vettem fel. A kísérleteknél a gyanta technikai adatlapja által ajánlott hőkezelési paramétereket alkalmaztam. Ennek megfelelően a vizsgálat két szakaszból állt: felfűtés, majd hűtőtartás 2 órán keresztül 120 °C-on. A különböző mérések az első szakaszban alkalmazott felfűtési sebességek tekintetében különböznek. Négy különböző felfűtési sebességet használtam, ezek értékei: 0,625 °C/min, 1,25 °C/min, 5 °C/min, illetve 20 °C/min. A vizsgálat eredménye a gyanta komplex viszkozitásának alakulása az idő, illetve a hőmérséklet függvényében eltérő felfűtési sebességek esetén. A 9.a) és b) ábrákon látható a mérőberendezés kinyitott állapotában a kísérletet megelőzően, illetve zárt állapotban, mérés közben.



a)



b)

9. ábra Az oszcillációs reométer: a) mérés előtt, nyitott állapotban, az alsó tárcsán a felvitt gyantaréteggel, b) mérés közben, zárt állapotban

A reométerrel történt viszkozitásmérés eredményeinek gyakorlati jelentőségét egy saját mérési elrendezésen keresztül vizsgáltam. Ennek lényege, hogy egy üveglapra alumínium fóliát, illetve letépőszövetet helyeztem. Erre minden alkalommal azonos mennyiségű – 1,2 g – B állapotú prepreg gyantát tettem, amire egy réteg PET fóliát helyeztem. Az említett rétegeket vákuumtömítő szalag, vákuumfólia és egy csatlakozó csomák segítségével vákuum alá helyeztem. A „technológiai rétegek” közül az alumíniumfólia biztosította, hogy ne tapadjon fel a gyanta az üveglapra, ez a réteg a gyártást követően könnyedén leválasztható a gyantával átitimpregnált letépőszövetről. A PET fólia szerepe az volt, hogy akadályozza a gyanta eltávozását a letépőszövetről a vákuumcsatlakozó irányába.

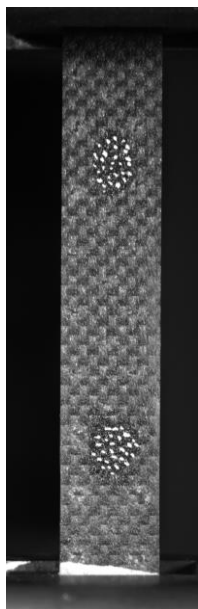
Az üveglapot szárítószekrénybe helyeztem, ahol egy vákuumszivattyú segítségével vákuum alá helyeztem, és a mérési elrendezést a teljes kísérlet ideje alatt vákuum alatt tartottam. A szárítószekrényt – és természetesen vele együtt a gyantát – eltérő sebességekkel fűtöttem fel. Itt a reométeres vizsgálatoknál is alkalmazott fűtési sebességeket kívántam beállítani, ezek közül azonban a 20 mm/min felfűtésre nem volt lehetőségem, mivel az alkalmazott szárítószekrény nem képes ilyen felfűtési sebesség elérésére. A felfűtési sebesség függvényében a gyanta viszkozitása és ezáltal folyóképessége eltérően alakul. Azt feltételeztem, hogy amennyiben a gyanta viszkozitása nagyobb mértékben csökken le, akkor jobban elterül, nagyobb területen impregnálja át a letépőszövetet. Ennek megfelelően a kísérlet elvégzése után a letépő szövetet beszkeneltem, majd a képet Solidworks szoftverbe

illesztettem, ahol a gyanta kontúrjára görbét illesztettem. Végül meghatároztam a görbe által bezárt terület nagyságát.

3.3.2. Mechanikai vizsgálatok

Az előállított prepreg lemezeket mechanikai vizsgálatoknak vetettem alá. Elsőként az ASTM D3039 szabvány szerinti szakítóvizsgálatot végeztem el 2 mm/min vizsgálati sebességgel. A kb. 2 mm vastagságú lemezekből 250 mm hosszú, 25 mm széles, állandó keresztmetszetű próbatesteket munkáltam ki. A kompozit próbatesteket a szakítóvizsgálat elvégzése előtt felragasztott lemezekkel (tabokkal) kell ellátni, ezt a folyamatot nevezik tabolásnak. Célja a befogásnál kialakuló feszültségkoncentráció csökkentése, így érhető el, hogy a próbatest tönkremenetele a „hasznos hossza” mentén következzen be, a valós teherbírásának megfelelő értékeknél. A próbatesteket a szabványnak megfelelően két végükön 50-50 mm hosszan taboltam, ennek megfelelően 150 mm-es „hasznos hossz” alakult ki. A tabolást 250x150 mm-es lemezekon végeztem, a próbatestek kialakítása előtt. [42]

A szakítóvizsgálatnál a próbatestek alakváltozását Monet DIC optikai nyúlásmérő berendezéssel határoztam meg. Ezáltal kiküszöbölhetők olyan pontatlanságok, amelyek a nyúlás keresztfej-elmozdulásból történő számítása esetén a mérést terhelik, ilyen lehet többek között a keresztfej deformációja nagy teljesítményű kompozitok szakításánál fellépő jelentős erők esetén, illetve a befogópofák beállításából és az alkatrészek illesztési hézagaiból adódó pontatlanság. A DIC alkalmazásához a próbatesteken feljelöltem két megfelelő kontraszttal rendelkező területet, amelyekre ráilleszthető az optikai nyúlásmérő. Ezt a két területet minden próbatesten azonos távolságra jelöltem ki úgy, hogy középpontjaik egymástól 70 mm-re legyenek. A szakítóvizsgálat közben az optikai nyúlásmérő ennek a 70 mm-es szakasznak a hosszváltozását detektálta, s ebből határozta meg a próbatest alakváltozását. A 10. a) ábrán látható egy a DIC berendezés által a mérés közben készített fotó, míg a 10. b) ábra bemutatja a mérési elrendezést.



a)



b)

10. ábra a) A DIC berendezés által készített fotó, b) A mérési elrendezés

A mérési adatokból a szakítóvizsgálatra vonatkozó szabványnak megfelelően meghatároztam a szakítószilárdság, illetve a 0,001 és 0,003 alakváltozási értékek felhasználásával a kezdeti rugalmassági modulusz értékét. [42]

Emellett hárompontos hajlítóvizsgálatra is sor került, amelyet a szálerősített polimer kompozitok hajlítási tulajdonságainak meghatározását tárgyaló MSZ EN ISO 14125 szabvány szerint hajtottam végre. A szabványba foglaltaknak megfelelően alátámasztási közként a próbatest vastagságának 16-szorosát, jelen esetben 32 mm-t alkalmaztam. A próbatestek szélessége a szabványnak megfelelően 15 mm, hossza pedig a vastagság 20-szorosa, 40 mm volt. A hajlítóvizsgálatot 2 mm/min mérési sebességgel, 2 N előterheléssel végeztem. Mivel hajlításnál a szakítóvizsgálatokhoz képest lényegesen kisebb erők lépnek fel, így nem tartottam szükségesnek optikai nyúlásmérő berendezés alkalmazását, a próbatest deformációját a keresztfej-elmozdulásból számítottam. A hárompontos hajlítóvizsgálat folyamán alkalmazott mérési elrendezést a 11. ábra szemlélteti. [43]



11. ábra A hárompontos hajlítóvizsgálat mérési elrendezése

A hárompontos hajlítóvizsgálat esetében a szabványban található összefüggések felhasználásával a mérési adatokból meghatároztam a próbatestek hajlítószilárdságát, illetve a szabványnak megfelelően a 0,0005 és 0,0025 értékű nyúlásokhoz tartozó lehajlásértékek segítségével az ún. kezdeti hajlító rugalmassági moduluszt. [43]

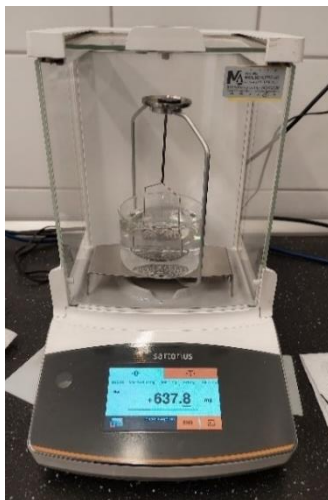
3.3.3. Egyéb vizsgálatok

Az elkészült prepreg lemezek száltartalmát kiégetéssel vizsgáltam, ahol a száltartalmat a minták kiégetés utáni és előtti tömegének hányadosaként határoztam meg tömegszázalékban. A mérés és az eredmények értékelése szempontjából fontos, hogy a cél nem a száltartalom pontos meghatározása volt. Erre az izzító kemencében történő kiégetés nem is alkalmas, mivel a vizsgálat során nemcsak a mátrix ég ki, hanem az erősítőanyag is oxidálódik, továbbá a mátrix egy része is visszamarad. A kísérlettel a technológiai paraméterek hatására a minták között száltartalom tekintetében kialakuló különbségek közötti összefüggéseket kerestem. A mintákat 400 °C-on égettem ki 6 órán keresztül. A 12. ábrán láthatók a kemencébe helyezett, mintákat tartalmazó kiégető csészék a folyamat előtt.



12. ábra Az izzító kemencébe helyezett, mintákat tartalmazó kiégető csészék a kiégetési folyamatot megelőzően

Meghatároztam továbbá a különböző paraméterekkel gyártott lemezek sűrűségét a 3.2.3 alfejezetben bemutatott mérleg segítségével. A sűrűség meghatározásához a próbatestek tömegét előbb levegőn, majd ismert sűrűségű mérőközegben mértem meg. Mérőközegnek desztillált vizet választottam. A laboratóriumban a mérés elvégzésekor 24 °C-os léghőmérsékletet mértem, ahol a víz sűrűsége 0,99732 g/cm³. Ezen adat betáplálását és a tömegmérések elvégzését követően a mérleg szoftveresen meghatározta a próbatestek sűrűségét. A 13. a) és b) ábra bemutatja a kísérlet menetét, előbbi a levegőn, míg utóbbin a vízben történő tömegmérést.



a)



b)

13. ábra A sűrűség meghatározásának folyamata: a) tömegmérés levegőn, b) tömegmérés ismert sűrűségű mérőközegben

4. A TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Az alábbi fejezetben a hőmérséklet mint technológiai paraméter hatását vizsgálom prepeg szerkezetek autoklávus feldolgozása esetén. A kísérletek elvégzése során figyelmemet elsősorban a felfűtési sebesség hatására és a plató szükségességének kérdésére fordítottam.

4.1. Kísérletterv

A kísérletterv összeállításakor figyelembe vettem Takács [31] munkáját, amiben a felfűtési sebesség hatásával foglalkozott a legelterjedtebb OOA technológiának számító vákuumzsákos eljárás esetén. Én a prepregek másik leggyakoribb feldolgozás-technológiájának számító autoklávus eljárásnál kívántam vizsgálni a felfűtési sebesség hatását több szemszögből, kiegészítve a plató alkalmazásának kérdésével.

Eredményeink összehasonlíthatóságának érdekében a kísérletekhez az említett kutatásban [31] alkalmazottal megegyező prepreget használtam. Emellett azonban magát a prepeg gyantát is vizsgálni szerettem volna, hiszen a hőmérséklet mint technológiai paraméter elsősorban a mátrixon keresztül fejti ki hatását a prepregre. A már átimpregnált prepregből azonban a mátrixanyag termikus előéletének jelentős megváltoztatása nélkül nem tudtam gyantát kivonni, komponensenként pedig nem állt rendelkezésemre ez az anyag, ezért a kizárólag gyantával végzett kísérletekhez az említett prepeg mátrixától eltérő gyantát használtam. A vizsgálatokhoz egy – a prepeg mátrixanyagához hasonlóan – alacsony hőmérsékleten is térhálósítható epoxi prepeg gyantát szereztem be. A két mátrixanyag tulajdonságai, illetve adatlap által előírt térhálósítási ciklusai nagyfokú hasonlóságot mutatnak, ezért a kapott eredmények – legalábbis jellegüket tekintve – alkalmasak a választott prepeg mátrixanyagának leírására is.

Mindezek alapján tehát az általam elvégzett gyakorlati munka két részre bontható: a prepreggyanta vizsgálataira, illetve a prepreggel kapcsolatos feladatokra.

Elsőként a prepreggyantát vettem alá különböző vizsgálatoknak azzal a céllal, hogy ezek eredményeit, illetve az itt szerzett tapasztalatokat a prepreggel végzett kísérleteknél hasznosíthassam. Miután a bekevert gyanta B állapotba került, oszcillációs reométer segítségével különböző felfűtési sebességek mellett vizsgáltam viszkozitásának alakulását. A megfelelő következtetéseket levonását követően a viszkozitásmérés eredményeinek gyakorlati jelentőségét egy saját mérési elrendezésen keresztül kívántam szemléltetni.

A kutatás további részében a prepreggel foglalkoztam. Meghatároztam a próbagyártásoknál alkalmazandó technológiai paramétereket, majd a próbagyártmányok előállítását követően különböző vizsgálatokat végeztem. Meghatároztam a különböző paraméterekkel gyártott lemezek sűrűségét, száltartalmát, majd az általam kimunkált próbatesteket szakító-, illetve hárompontos hajlítóvizsgálatnak vettem alá.

Végül értékeltem az eredményeket, összevettem őket a szakirodalomban fellelhető kutatásokkal, illetve levontam a szükséges következtetéseket.

4.2. Reológiai vizsgálatok

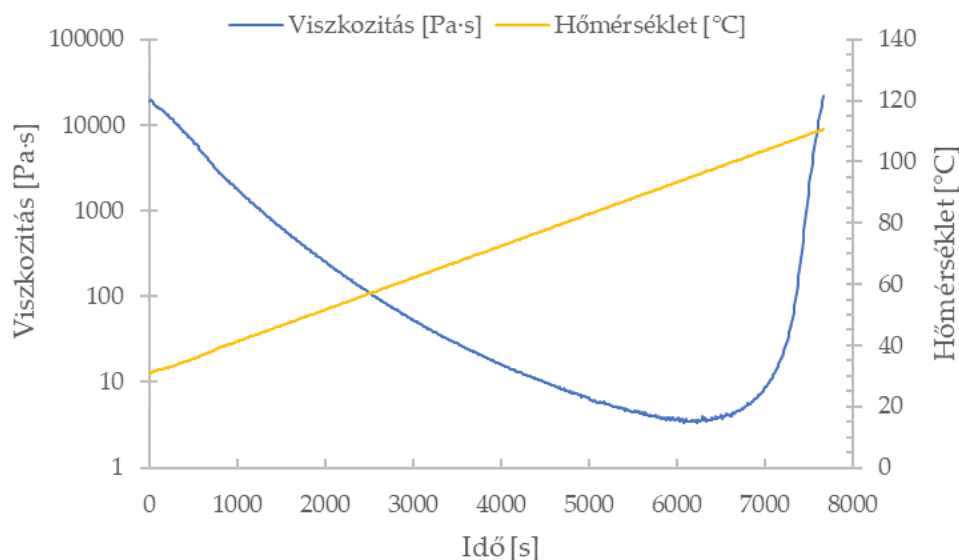
A kutatás ezen szakaszában előbb viszkozitásmérést végeztem, majd ennek tapasztalatait hasznosítva saját mérési elrendezéssel vizsgáltam a gyantát.

4.2.1. Viskozitásmérés

A gyantához kapcsolódó viszkozitásmérést a 3.3.1 alfejezetben leírtaknak – elrendezés, paraméterek – megfelelően hajtottam végre oszcillációs reométer alkalmazásával, a vizsgálat a gyanta feldolgozás közbeni viselkedéséről szolgáltat információkkal. Az egyes kísérletek a beállított felfűtési sebesség tekintetében különböztek. Fontos kijelenteni, hogy a mérés elsődleges célja nem egzakt viszkozitásértékek meghatározása volt, hanem a felfűtési sebesség hatásának megismerése a gyanta viszkozitásának változására, illetve a térhálósodási reakció kezdetére. Ennek megfelelően az eredmények értékelése során a tapasztalt trendekre fektettem nagyobb hangsúlyt, konkrét értékek közül az elért legalacsonyabb viszkozitással foglalkoztam részletesebben, hiszen ennek jelentős hatása lehet a gyanta viselkedésére a feldolgozás során. Ez megnyilvánulhat egyrészt a szálak átimpregnáltságában, másrészt az eltávozó gyanta mennyiségében.

A hőmérsékletet mérő szenzor a fűtőkamrában, az alsó tárcsa alatt helyezkedett el, tehát nem közvetlenül a vizsgálandó anyag hőmérsékletét detektálta. Éppen ez szolgáltatott okot arra, hogy a másik lehetőségként felmerülő acéltárcsákkal szemben az alumíniumot válasszam. Úgy vélekedtem, hogy a jobb hővezető-képesség és az alacsonyabb tömeg miatt kisebb lesz a detektált hőmérsékletértékek és az alapanyag valós hőmérséklete közti eltérés. A méréseket 30 °C-ról indítottam, mivel szobahőmérsékleten a B állapotú gyanta deformációjához szükséges nyomaték meghaladta a gép által engedélyezett maximális értéket. A mérést akkor állítottam le, amikor a gyanta viszkozitása meghaladta a kezdeti, B állapotban tapasztalt viszkozitás értékét. Ekkor a térhálósodási reakció már előrehaladott állapotban van, a gyanta folyóképessége olyan mértékben lecsökken, hogy az ezt követő szakasz már irreleváns vizsgálataim szempontjából.

Elsőként 0,625 °C/min felfűtési sebességgel hajtottam végre a kísérletet. A hőmérséklet és a viszkozitás alakulását a mérés ideje alatt a 14. ábrán látható diagram mutatja be.

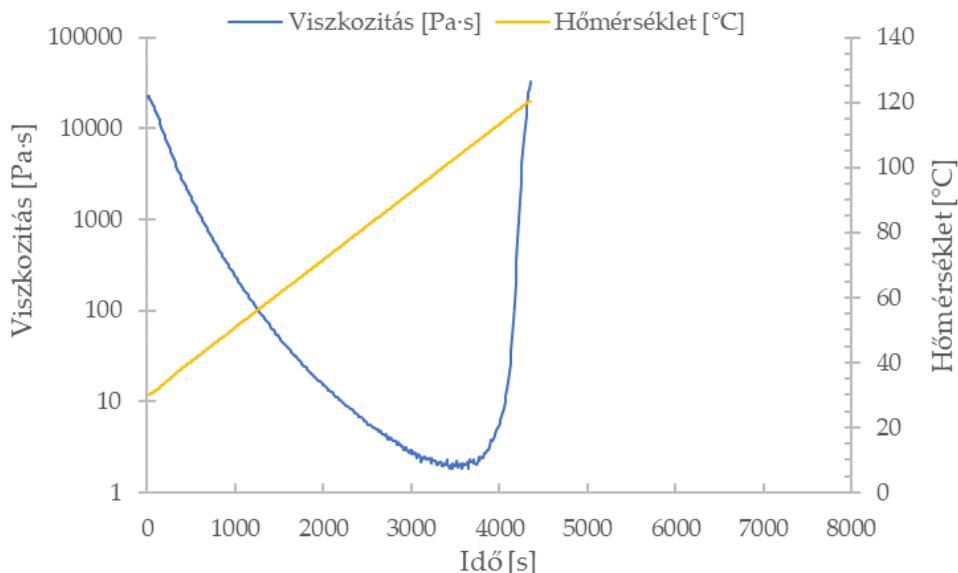


14. ábra A viszkozitás és a hőmérséklet alakulása az idő függvényében 0,625 °C/min felfűtési sebesség esetén

A diagramon látható, hogy a felfűtés hatására a gyanta viszkozitása csökken, majd 95 °C környékén eléri minimumát, ezt követően növekedésnek indul, és még a 120 °C-os hőntartási hőmérséklet előtt eléri és meghaladja a kezdeti, B állapotú gyanta viszkozitását. Ez azzal magyarázható, hogy ilyen lassú hevítés mellett a térhálósodás „utoléri” a hőmérséklet növekedése által okozott viszkozitáscsökkenést, s a már alacsonyabb hőmérsékleten is

intenzív térhálósodási reakció hatására a viszkozitás növekedésnek indul, az anyag térhálósági foka pedig már a 120 °C-on történő hőtartás elérése előtt meghaladja a mérés előtti, B állapotú gyantáét. Az egyes méréseknél detektált legkisebb viszkozitásértékekkel az alfejezet későbbi részében foglalkozom számottevően.

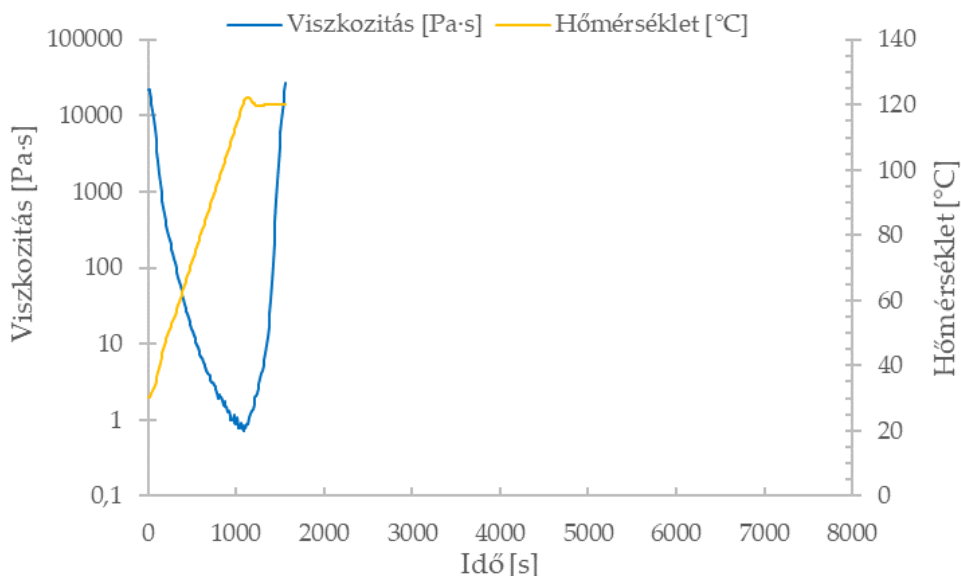
Ezt követően 1,25 °C/min felfűtési sebességgel végeztem vizsgálatot, a felvett görbék a 15. ábrán láthatók.



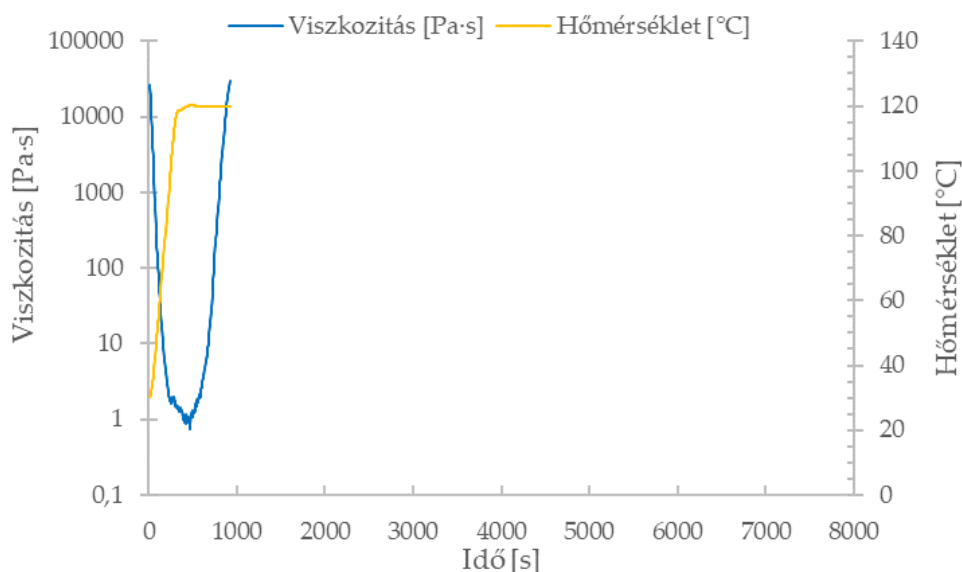
15. ábra A viszkozitás és a hőmérséklet alakulása az idő függvényében 1,25 °C/min felfűtési sebesség esetén

Itt azt tapasztaltam, hogy a gyanta viszkozitása magasabb hőmérsékleten, 100 °C körül éri el minimumát, majd a térhálósodási reakció előrehaladtával viszkozitása nő, és nagyjából a 120 °C-os hőmérséklet elérésekor túllépi a kezdeti értéket, ezzel pedig véget ér a mérés. Ez arra vezethető vissza, hogy a gyorsabb felfűtés miatt a térhálósodás csak magasabb hőmérsékleten indul be, és vezet a viszkozitás növekedéséhez.

A 16. ábrán látható az 5 °C/min-es, a 17. ábrán pedig a 20 °C/min-es felfűtéshez tartozó diagram.



16. ábra A viszkozitás és a hőmérséklet alakulása az idő függvényében 5 °C/min felfűtési sebesség esetén



17. ábra A viszkozitás és a hőmérséklet alakulása az idő függvényében 20 °C/min felfűtési sebességen

A percenkénti 5, illetve 20 °C-os felfűtéssel végzett kísérletek esetében a korábbiaknál tekintélyesebb viszkozitáscsökkenést tapasztaltam, a viszkozitás értéke a felfűtés során 1 Pa·s alá csökkent. Azt tapasztaltam, hogy a térhálókötések kialakulása magasabb felfűtési sebességek esetén nagyobb hőmérsékleteken is kevésbé képes kompenzálni a hőmérsékletnövekedés által okozott viszkozitáscsökkenést. Ennek megfelelően 5 °C/min felfűtési sebességnél csak a 120 °C-os térhálósítási hőmérséklet elérésekor, míg percenkénti 20 °C-os felfűtésnél csak a 120 °C elérését követően, a hőtartási szakasz alatt indul el a viszkozitás emelkedése. A gyanta viszkozitása mindkét esetben csak a hőtartás közben haladja meg a kísérlet kezdetekor mért értéket.

A 2. táblázat tartalmazza az egyes felfűtési sebességek esetében meghatározott viszkozitásminimumok értékeit, illetve a hőmérsékleteket, amelyeknél jelentkeztek.

Felfűtési sebesség [°C/min]	Viszkozitás minimuma [Pa·s]	Hőmérséklet [°C]
0,625	3,34	95,6
1,25	1,81	102,1
5,0	0,73	120,4
20,0	0,74	120,1

2. táblázat Az egyes felfűtési sebességek esetén tapasztalható legalacsonyabb viszkozitásértékek és a hozzájuk tartozó hőmérsékletek

A táblázat adataiból is látható, hogy a felfűtési sebesség növelésének hatására nagyobb mértékű viszkozitáscsökkenés következik be. Ennek megfelelően a 0,625 °C/min sebességű felfűtésnél mért legalacsonyabb viszkozitásérték több mint 4,5-szerese, az 1,25 °C/min felfűtési sebességnél detektált érték pedig közel 1,5-szerese az 5 °C/min-nél tapasztalt viszkozitásminimumnak. Bár az egyes méréseknél tapasztalt legalacsonyabb viszkozitásértékek közti különbségek abszolút értékben a gyanta kezdeti, B állapotban tapasztalt 20 000 Pa·s körüli viszkozitásához képest elhanyagolhatónak tűnnek, de ezek a gyanta feldolgozásakor jelentős eltéréseket okozhatnak. Abban a tartományban, ahol ezek az értékek elhelyezkednek, a tapasztalt különbségek szignifikánsak, nagy mértékben befolyásolják a gyanta folyóképességét, ezáltal a térhálósítás során eltávozó gyanta mennyiségét, illetve az prepregben lévő erősítőanyag esetlegesen szárazon maradt részeinek átimpregnálását. A tapasztalt értékek közti eltérések mértékének jelentősége egy egyszerű

példával alátámasztható. Az injektáló gyanták viszkozitása jellemzően 300-900 mPa·s [44-46], míg a szerszámgyantáké 1100-1700 mPa·s [47-49]. Az 5 és 20 °C/min-es felfűtés esetén a viszkozitás minimuma előbbi tartományba esik, míg 0,625 °C/min sebességű felfűtésnél jelentősen meghaladja utóbbi tartomány felső határát. Belátható tehát, hogy az említett különbségek technológiai szempontból jelentősnek tekinthetők.

A két leggyorsabb felfűtési sebességnél szinte nem tapasztaltam különbséget viszkozitásminimumok tekintetében, sőt az 5 °C/min sebességgel végrehajtott kísérletnél kis mértékben alacsonyabb viszkozitásértéket is tapasztaltam. Ez alapján feltételezhető, hogy a felfűtési sebességnek van egy olyan felső határa, amelyet meghaladva a felfűtés gyorsasága nem befolyásolja érdemben a gyanta viszkozitasesésének mértékét.

Megfigyelhető a diagramokat és a táblázat adatait tekintve, hogy míg a két gyorsabb felfűtésnél 120 °C környékén veszi fel legalacsonyabb értékét a viszkozitás, addig a két alacsonyabb felfűtési sebesség esetében ezen a hőmérsékleten a viszkozitás már meghaladja az előtérhálósított, B állapotú gyanta 30 °C-on mért viszkozitását. Minél nagyobb felfűtési sebességgel hajtjuk végre a kísérletet, a térhálósodási reakció annál magasabb hőmérsékleten veszi kezdetét, és eredményezi a térhálósági fok növekedésével párhuzamosan a viszkozitás emelkedését. Megfelelően nagy sebesség esetén pedig a viszkozitás csak a felfűtési szakasz befejeződését követően, hűntartás közben indul növekedésnek. Ez magyarázható azzal, hogy lassú felfűtésnél elegendő idő jut arra a magasabb hőmérsékletek eléréséig, hogy a térhálósodás során végbemenő kémiai reakciók kellően előrehaladott állapotba kerüljenek, megfelelő számú térhálókötéspont alakuljon ki ahhoz, hogy a gyanta viszkozitásának csökkenése megálljon, majd növekedésnek induljon. Ezzel szemben gyors felfűtés esetén a térhálósodás képtelen „lépést tartani” a hőmérséklet-változás okozta viszkozitaseséssel.

4.2.2. *A gyanta vizsgálata saját mérési elrendezéssel*

A viszkozitásmérés eredményeinek és a belőlük levont következtetéseknek a gyakorlati-technológiai vonatkozásait saját elrendezésben végzett kísérletekkel kívántam szemléltetni. Ennek alapja, hogy a viszkozitás hatással van a folyóképességre, ezáltal különböző viszkozitású anyagoknál eltér a szálak közötti gyantaáramlás mértéke, ami befolyásolhatja a kompozit tulajdonságainak alakulását. A vizsgálat módszertana a 3.3.1 alfejezetben került bemutatásra. A gyanta technikai adatlapján előírt, 120 °C-on, 2 órán át történő térhálósító hőkezelést a reométernél alkalmazott felfűtési sebességekkel kívántam elvégezni, ezek közül azonban az általam használt berendezés korlátai miatt a hőmérséklet percenkénti 20 °C-kal történő növelésére nem volt lehetőségem.

A kísérlet elvégzését követően lebontottam a vákuumzsákot, majd az általam használt „technológiai rétegek” közül eltávolítottam az alumíniumfóliát. Azt tapasztaltam, hogy a gyanta a varakozásoknak megfelelően szétterült, és egy meghatározott területen átimpregnálta a letépőszövetet. A részlegesen átimpregnált letépőszövetet a PET fóliával együtt beszkeneltem, majd Solidworks szoftverben a gyanta által átimpregnált rész kontúrjaira görbét illesztettem, s meghatároztam az általa határolt területet. Az 0,625 °C/min felfűtési sebességgel melegített gyanta által átimpregnált letépőszövet látható a Melléklet M.1. ábráján kétszeres kicsinyítésben. A gyanta által átimpregnált terület nagyságát az egyes felfűtési sebességek esetére a 3. táblázat tartalmazza.

Felfűtési sebesség [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	Terület [mm^2]
0,625	13 748,3
1,25	14 425,7
5	16 205,9

3. táblázat A gyanta által átimpregnált terület mérete különböző felfűtési sebességek esetén

Az eredmények várakozásaimnak, illetve a reométeres vizsgálatból levonható következtetéseknek megfelelően alakultak: minél gyorsabban fűtöttem fel a gyantát, annál nagyobb területen impregnálta át a letépőszövetet. Az általam elvégzett kísérletek tehát igazolják azt, hogy a felfűtési sebesség növelésével alacsonyabb viszkozitás, ezzel párhuzamosan pedig jobb folyóképesség érhető el. A kísérlet eredményei alátámasztják azon kijelentésemet, miszerint a reométeres vizsgálatoknál mért viszkozitásminimumok közti különbségek technológiai szempontból jelentősek lehetnek. A 0,625 és az 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ -es felfűtési sebességgel kísérleteket összehasonlítva látható, hogy utóbbi esetben a gyanta közel 18 %-kal nagyobb területet nedvesített át. Ez alapján kijelenthető, hogy a két kísérlet összevetésében a folyóképesség érzékelhető eltérést mutat. Ez befolyásolhatja a gyanta viselkedését a feldolgozás során, többek között hatással lehet a térhálósítás ideje alatt eltávozó gyanta mennyiségére, ezáltal pedig a száltartalomra, a sűrűsége és a termék mechanikai tulajdonságaira is.

4.3. Gyártási folyamat

A gyanta vizsgálatainak befejezését követően a prepreghez kapcsolódóan folytattam a kutatómunkát. Ehhez először meghatároztam a rétegrendet, és az előállítandó próbagyártmányok méreteit. Az eredmények összehasonlíthatóságának érdekében ugyanazt a rétegrendet alkalmaztam, mint Takács [31], így a lemezek 10 db $0^{\circ}/90^{\circ}$ -es szövésű erősítőanyagot tartalmazó rétegből épültek fel. Ez a 10 réteg nagyjából 2 mm-es vastagságot eredményezett. A próbagyártmányok méreteit úgy alakítottam ki, hogy az elvégzendő mechanikai vizsgálatokhoz legalább 5-5 próbatest kialakítható legyen belőlük. Ez alapján a lemezek méretét 320x160 mm-nek választottam. Összesen három ilyen lemez kialakítását tűztem ki célomnak.

4.3.1. A gyártás előkészítése

A prepreget feldaraboltam, majd a rétegeket egymásra lamináltam. A gyártásokhoz egy sík alumínium szerszámot használtam. A szerszámra formaleválasztó fóliát tettem, erre ráfektettem a prepreget, majd felépítettem a vákuumzsákot. Először felhelyeztem a szükséges technológiai rétegeket. A prepregre lyukacsos fóliát tettem, amely lehetővé teszi a gyanta eltávozását térhálósítás közben. Erre került a vákuumfólia, amelynek feladata egyrészt a vákuum szétterítése, másrészt a prepregből eltávozó gyanta felszívása. Ezután következett a vákuumfólia felhelyezése vákuumtömítő szalag segítségével. Kiemelném még, hogy a szerszámra két vákuumcsatlakozót helyeztem, mivel autoklávós gyártás folyamán az egyik csatlakozó segítségével helyezük vákuum alá a szerszámot, míg a másikon keresztül ellenőrizzük, hogy a vákuum tényleg kialakult-e.

Ezt az ún. vákuumtesztet az autokláv a ciklus kezdetét megelőzően automatikusan elvégzi, de közvetlenül a vákuumzsák felépítését követően én is ellenőriztem, hogy az megfelelően tartja-e a vákuumot. Ehhez az egyik csatlakozón keresztül a szerszámot vákuum alá helyeztem, míg a másikon keresztül egy mérőórát kötöttem be. Ezt követően a szerszámot leválasztottam a hálózati vákuumról, majd néhány óra elteltével a mérőóra által mutatott érték

segítségével el tudtam dönteni, hogy megfelelő-e a zsák. A levákuumozott prepreg lemez a teszt elvégzése közben látható a 18. ábrán.

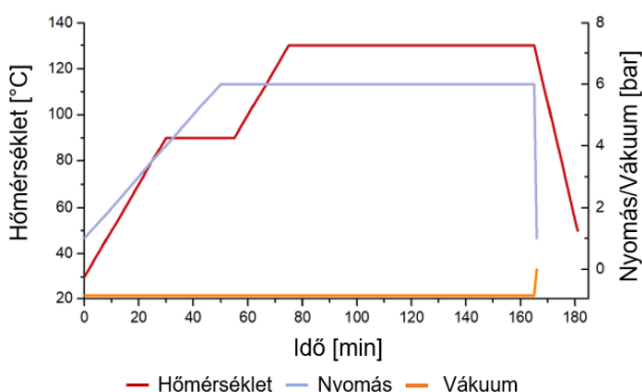


18. ábra A levákuumozott prepreg lemez a zsák ellenőrzése közben

4.3.2. Az alkalmazott autokláv ciklusok

Először három próbagyártást végeztem, különböző autokláv ciklusok alkalmazásával. Az első gyártást a gyanta technikai adatlapjának megfelelően végeztem el. Az ennél használt autokláv ciklust mutatja be a 19. ábra.

Autoklávós térhálósítás			
Idő [min]	Hőmérséklet [°C]	Idő [min]	Nyomás [bar]
0	30	0	1
30	90	10	2
55	90	30	4
75	130	50	6
165	130	165	6
181	50	166	1

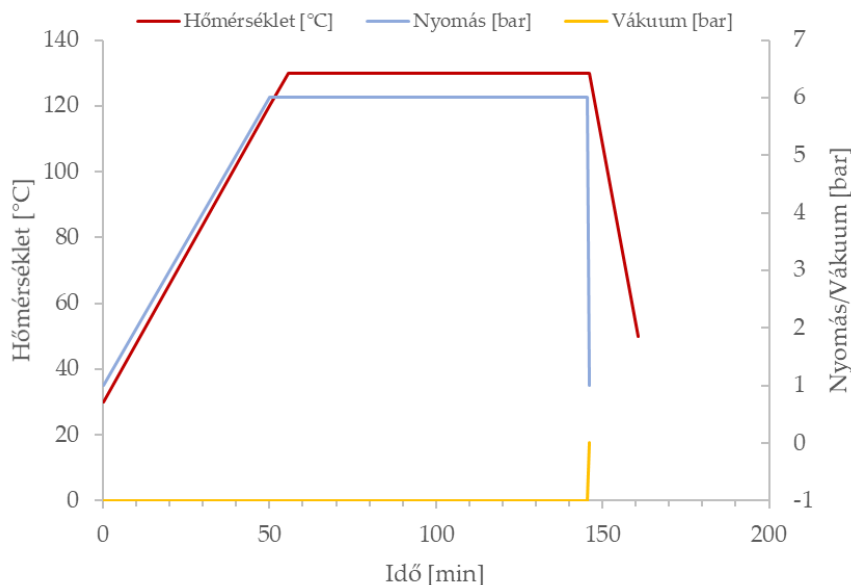


19. ábra A technikai adatlapon előírt térhálósítási ciklus, forrás: [33]

Az ábrán látható, hogy az adatlap 2 °C/min sebességgel történő felfűtést ír elő. A felfűtést megszakítja egy 25 perc hosszúságú plató, amelynek hőmérséklete 90 °C. A végső térhálósítási hőmérséklet 130 °C, ezen 1,5 órás hőntartást ír elő az adatlap. A ciklus ideje alatt a berendezés a terméket végig vákuum alatt tartja, a nyomás felépítése pedig 50 perc alatt történik, ekkor éri el a berendezés a 6 bar abszolút nyomást. Az első gyártásnál ezt a programot állítottam be. A ciklus során azonban azt tapasztaltam, hogy az autokláv nem volt képes a hőmérséklet percenként 2 °C-kal történő növelésére, a valós felfűtési sebesség 1,8 °C/min körül volt.

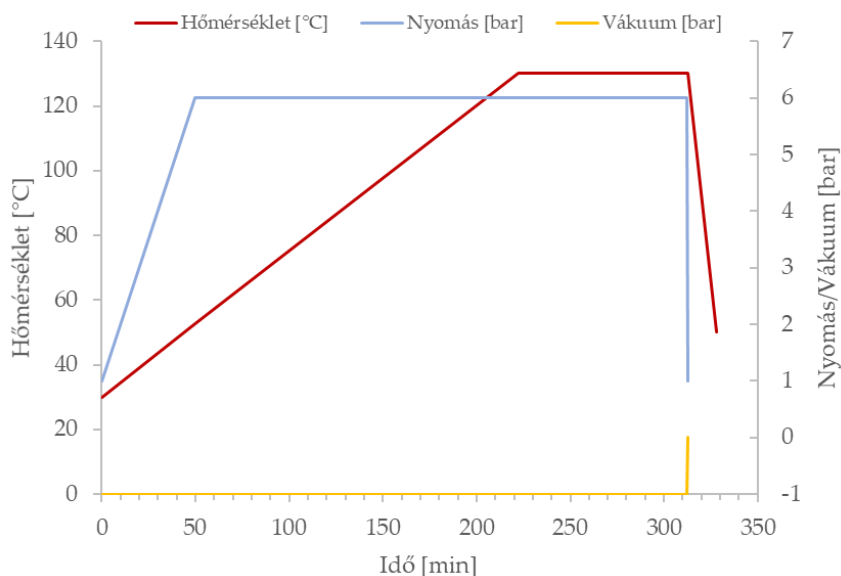
Itt megjegyezném, hogy adatlapi paraméterekkel a kutatás utolsó szakaszában gyártottam még egy lemezt. Ezt a mechanikai vizsgálatoknál tapasztalt jelenségek miatt, kontrollmérések elvégzéséhez gyártottam. Az ehhez kapcsolódó okokat és célokat a 4.4.4 alfejezetben fejtem ki részletesebben.

A 2. gyártás autokláv ciklusában a felfűtési sebességet az előző gyártásával megegyező értékre, 1,8 °C/min-re állítottam be, illetve a nyomás és a vákuum is az adatlap által előírtaknak megfelelően alakult. A különbség az volt előző gyártáshoz képest, hogy a ciklus nem tartalmazta az adatlap által ajánlott, 90 °C-on történő, 25 perces hőntartást. Ezzel a gyártással tehát a plató elhagyásának hatását kívántam vizsgálni. A 2. gyártáshoz beállított ciklust a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra A 2. gyártás autokláv ciklusa

A 3. gyártásnál szintén nem alkalmaztam platót, illetve lassabban fűtöttem fel az autoklávot. Felfűtési sebességnek a korábban alkalmazott 1,8 °C/min sebesség negyedét állítottam be. A hőmérséklet tehát a ciklus közben percenként 0,45 °C-kal emelkedett, egészen a 130 °C-os térhálósítási hőmérséklet eléréséig. A ciklus nyomás és vákuum tekintetében megegyezett a korábbiakkal. Az itt használt autokláv ciklust a 21. ábra szemlélteti.



21. ábra A 3. gyártás autokláv ciklusa

Mindegyik gyártás sikerrel zárult, az első eredményét mutatja a 22. a) és b) ábra közvetlenül a szerszámbontást követően. Előbbin a lemez A, utóbbin pedig B felülete látható. Mivel az A felület a polírozott alumínium szerszámmal érintkezett a formaleválasztó fólián keresztül, míg a B felületnek a lyukacsos fólián és a vákuumfilcen keresztüladtuk át a nyomást, így felületi minőség tekintetében lényeges különbség alakult ki a kettő között. A képeken látható, hogy az autoklávval gyártott termékeken nem fordultak elő az OOA technológiák esetén gyakori felületi hibák, pl.: pinhole-osodás.



a)



b)

22. ábra Az adatlapi ciklussal gyártott lemez: a) a lemez A felülete, b) a lemez B felülete

A lemez széleire sorját képzett az eltávozott gyanta egy része, emellett a lemez szélein kisebb elvékonyodásokat tapasztaltam, ezért leszéleztem a termékeket. Így végül 310x150 mm alapterületű lemezek álltak rendelkezésemre a vizsgálatokhoz.

4.4. Prepreg lemezek vizsgálatai

Ezután elvégeztem a prepreg szerkezetekkel kapcsolatos különböző vizsgálatokat, ezek eredményeiről szól az alábbi fejezet.

4.4.1. A sűrűség és száltartalom meghatározása

Kompozit szerkezetek esetében a sűrűség és a száltartalom egymással összefüggésben van, mivel a szál és a mátrix sűrűsége eltér egymástól. Az adatlapon található információk szerint a gyanta átlagos sűrűsége kitérhálósodott állapotban $1,20 \text{ g/cm}^3$, míg a szénszál jellemző sűrűsége $1,80 \text{ g/cm}^3$. [33, 50]

Először a kompozit lemezek sűrűségét határoztam meg. Ehhez végeztem egy előzetes számítást. Meghatároztam a lemezek tömegét, illetve átlagos vastagságát. A vastagság, a szélesség és a hosszúság ismeretében térfogatot számoltam. A tömeg és a térfogat hányadosaként pedig kaptam egy-egy becsült értéket az egyes lemezek sűrűségére. Az átlagos vastagságokat, illetve a sűrűség becsült értékeit tartalmazza a 4. táblázat.

Gyártás	Átlagos vastagság - h [mm]	Becsült sűrűség - ρ [g/cm ³]
1. (adatlapi)	2,08	1,419
2. (adatlapi felfűtés plató nélkül)	1,93	1,456
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	2,07	1,423

4. táblázat A lemezek átlagos vastagsága és becsült sűrűsége

Az átlagos lemezvastagságok tekintetében jelentős, kb. 7 %-os különbség van a plató nélkül, gyors felfűtéssel gyártott lemez és a másik két termék között, utóbbiak értéke majdnem megegyezik. A becsült sűrűség esetében is hasonlóan alakultak az eredmények.

Ezt követően a 3.3.3 alfejezetben leírtaknak megfelelően, ismert sűrűségű mérőközegben – desztillált vízben – és levegőben történő tömegméréssel határoztam meg a különböző ciklusokban készült próbagyártmányok sűrűségét. Ehhez minden lemezből 3-3 db 15x15 mm-es próbatestet használtam fel. A méréssel meghatározott sűrűségértékek átlagát és szórását az 5. táblázatban összesítettem.

Gyártás	Sűrűség - ρ [g/cm ³]	
	Átlag [g/cm ³]	Szórás [g/cm ³]
1. (adatlap)	1,448	0,008
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	1,470	0,005
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	1,453	0,009

5. táblázat A két közegben történő tömegméréssel meghatározott sűrűségértékek átlaga és szórása

A sűrűség meghatározásakor – a becsléshez hasonlóan – az 1. és a 3. gyártások között nem tapasztaltam jelentős eltérést, az átlagos sűrűségek közti különbség kisebb, mint a mért értékek szórása az egyes lemezeket tekintve. A plató nélkül, adatlap felfűtési sebességgel előállított lemez sűrűsége a mérések alapján is meghaladja az 1. és a 3. gyártásnál tapasztalt értékeket. Az eltérés nagyobb, mint a méréseknél jelentkező szórásértékek, így szignifikánsnak tekinthető.

Az eredmények alapján arra következtettem, hogy a 2. gyártásnál a gyors felfűtés és a plató elhagyása olyan mértékű viszkozitasesést okozott, hogy a másik két esethez képest valószínűleg több gyanta távozott el a lemezből a térhálósítás során. A gyanta mennyiségének csökkenésével magyarázható nemcsak a vastagság csökkenése, hanem a sűrűség növekedése is, hiszen ennek eredményeként magasabb lesz a termék száltartalma.

A gyártás közben kilépő gyanta többségét a vákuumfilm szívta fel, így azt feltételeztem, hogy a ciklus közben a próbatest felületén elhelyezkedő, gyantával részlegesen átitatott vákuumfilm tömegéből következtetni tudok az eltávozó gyanta mennyiségében tapasztalható különbségekre, ezáltal közvetve a száltartalmak közti eltérésekre. A gyártásokhoz alkalmazott vákuumfilmekről már ránézésre megállapítható volt, hogy a 2. gyártás során lényegesen több gyanta távozott el. A vákuumfilmek a Melléklet M.2.-M.4. ábráin láthatók. Először meghatároztam a gyantát nem tartalmazó vákuumfilm felületi sűrűségét, ez 140 g/m²-re adódott. Ezt követően kivágtam a gyártásokhoz használt vákuumfilcekből a közvetlenül a lemezek felülete mentén elhelyezkedő, 320x160 mm-es darabokat, majd lemértem ezek tömegét. Ezekből az adatokból már meg tudtam határozni a vákuumfilm által ezen a felületen felvett gyanta tömegét. Ennek értékei az egyes lemezek esetére a 6. táblázatban található.

Gyártás	Felszívott gyanta tömege [g]
1. (adatlap)	6,00
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	10,97
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	5,57

6. táblázat A vákuumfilm által a próbatest felülete mentén felszívott gyanta tömege az egyes gyártások esetén

A táblázat adatai is alátámasztják feltevésemet, miszerint a 2. gyártásnál lényegesen több gyanta távozott el, mint az 1. és a 3. gyártásoknál, míg utóbbi kettő között nem tapasztalhatók szignifikáns különbségek.

Az eltávozott gyanta mennyisége hatással van a termék száltartalmára is, így ezzel folytattam vizsgálataimat. A kompozit lemezek sűrűségének ismeretében először keverékszabály alkalmazásával becsültem a térfogatszázalékban mért szálhányadot. A keverékszabály a 2. egyenletben szerepel: [14]

$$\rho_k = v_f \rho_f + v_m \rho_m = v_f \rho_f + (1 - v_f) \rho_m \quad (2)$$

, ahol:

- ρ_k a kompozit sűrűsége $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ -ben,
- v_f a szálhányad $[-]$,
- ρ_f a szál sűrűsége $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ -ben, jelen esetben $1,80 \left[\frac{g}{cm^3}\right]$,
- v_m a mátrixhányad $[-]$,
- ρ_m a mátrix sűrűsége $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ -ben, ennek értéke most $1,20 \left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

Ebből a lemezek átlagos vastagságainak felhasználásával tömegszázalékban is meghatároztam a száltartalmat. A számítások eredményeit a 7. táblázatban foglaltam össze.

Gyártás	Szálhányad [V%]	Száltartalom [m%]
1. (adatlap)	41,39	51,44
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	44,94	55,05
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	42,11	52,18

7. táblázat A keverékszabállyal számított szál- és mátrixhányadok

Emellett az erősítőstruktúra felületi sűrűségének, a rétegrendnek, az átlagos lemezzvastagságoknak és a kompozit mérésel meghatározott sűrűségének az ismeretében adható még egy becslés a száltartalomra. A számítások eredményeit a 8. táblázat tartalmazza.

Gyártás	Száltartalom [m%]
1. (adatlap)	53,00
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	56,33
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	53,10

8. táblázat Az erősítőstruktúra felületi sűrűségének felhasználásával számított száltartalom

A két módszerrel hasonló eredményeket kaptam. Egyrészt azonos tendenciákat tapasztaltam, másrészt nincs nagy eltérés a kétféleképpen meghatározott értékek között.

Végül a kompozit lemezek száltartalmát kiégetéssel is vizsgáltam. A mérés leírását a 3.3.3 alfejezet tartalmazza. Fontos, hogy a kísérlet célja nem a minták pontos száltartalmának meghatározása, hanem a trendek felismerése, a száltartalom alakulása és a technológiai paraméterek közti összefüggések vizsgálata volt. Az így meghatározott száltartalmak tömegszázalékban a 9. táblázatban szerepelnek.

Gyártás	Száltartalom kiégetéssel [m%]
1. (adatlap)	64,67
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	67,60
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	64,94

9. táblázat A kiégetéssel becsült száltartalom tömegszázalékban

A 7., a 8. és a 9. táblázat adataiból látható, hogy a 2. gyártásnál magasabb száltartalom alakult ki, mint az 1. és a 3. gyártásnál.

A sűrűség- és száltartalomvizsgálatok eredményei arra engednek következtetni, hogy azonos felfűtési sebesség mellett a plató elhagyásával az eltávozó gyanta mennyisége nő, ami magasabb száltartalmat és emiatt nagyobb sűrűséget is eredményez. Erre az adhat magyarázatot, hogy a plató szerepe a túlzott viszkozitasesés ellensúlyozása, ami annak elhagyásával nem történik meg, így az alacsonyabb viszkozitású gyanta könnyebben el tud

távozni a prepregből. Elmondható továbbá, hogy amennyiben a plató elhagyásával párhuzamosan csökkentjük a felfűtési sebességet, nem következik be jelentős változás a vizsgált értékek tekintetében az adatlapi gyártáshoz képest.

Az adatokból látható az is, hogy bár a kiégetéses vizsgálat eredményei is követik a sűrűségmérésből számított értékeknél tapasztalt tendenciákat, tehát tükrözik a lemezek között szártartalom tekintetében kialakult különbségeket, de jelen esetben a kísérletet terhelő bizonytalanságok, elsősorban a visszamaradó mátrixanyag miatt a vizsgálat túlbecsüli a szártartalmat.

4.4.2. Szakítóvizsgálat

A kutatást a mechanikai tulajdonságok vizsgálatával folytattam, első lépésként a 3.3.2 alfejezetben bemutatott szakítóvizsgálatot végeztem el. A mérési adatokból a szabvány összefüggéseinek felhasználásával meghatároztam a próbatestek húzószilárdságát és rugalmassági moduluszát. A kísérlet során minden gyártásból 5-5 próbatestet vizsgáltam. A húzószilárdságok átlagos értékeit és a mért értékek szórását a 10. táblázat tartalmazza. [42]

Gyártás	Húzószilárdság - σ_m [MPa]	
	Átlag [MPa]	Szórás [MPa]
1. (adatlapi)	516,1	33,9
2. (adatlapi felfűtés plató nélkül)	607,5	6,5
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	556,4	30,6

10. táblázat A húzószilárdság átlagos értékei és az adatok szórása

A táblázat adataiból megállapítható, hogy a 2. gyártás próbatestjeinek húzószilárdsága jelentősen meghaladja a másik két gyártásnál meghatározott értékeket. Az 1. és a 3. gyártás húzószilárdsága közti szignifikáns különbség azonban várakozásaimmal ellentétes, hiszen ezeknél a sűrűség és a szártartalom vizsgálatakor csekély mértékű eltérést tapasztaltam, ami nem okozhat ekkora különbséget a mechanikai tulajdonságok tekintetében. Megjegyezném emellett, hogy az 1. és a 3. ciklus lemezeinél viszonylag nagy, 5 %-ot meghaladó szórást tapasztaltam, azonban ennek mértéke nagy teljesítményű kompozitok szakítóvizsgálatánál elfogadható.

Meghatároztam továbbá a húzó rugalmassági modulusz átlagos értékét és szórását az egyes lemezekre, az eredményeket a 11. táblázatban összesítettem.

Gyártás	Húzó rugalmassági modulusz - E [MPa]	
	Átlag [MPa]	Szórás [MPa]
1. (adatlapi)	50 910	2070
2. (adatlapi felfűtés plató nélkül)	56 354	1194
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	51 274	728

11. táblázat A húzó rugalmassági modulusz átlagos értékei és az adatok szórása

Az adatok alapján egyértelmű, hogy modulusz tekintetében is jelentkezik a 2. lemeznél a magasabb szártartalom hatása. Az 1. és a 3. lemez közötti különbség viszont szóráson belüli, ami magyarázható hasonló sűrűségükkel és szártartalmukkal. A szórás minden lemez esetében 5 % alatti, így elfogadhatónak tekintetem.

A próbatestek tönkremenetele az esetek túlnyomó többségében a befogás közelében ment végbe. Ennek oka, hogy bár a tabolás csökkenti a befogás okozta feszültségkoncentrációt, teljesen nem képes kiküszöbölni azt. A tapasztalt tönkremenetelekből azonban levonható az a

következtetés, hogy mivel a próbatest a befogás közelében szakadt el, így a „hasznos hossza” mentén nem volt számottevő hibahely. Ez a gyártások sikerességét igazolja.

4.4.3. Hárompontos hajlítóvizsgálat

Ezután a 3.3.2 alfejezetben leírtaknak megfelelően hárompontos hajlítóvizsgálatot hajtottam végre. Mivel a mérések során az alátámasztási távolság 10 %-ának megfelelő határlehlajlás előtt tönkremenetelt tapasztaltam, így a szabványnak megfelelően meghatároztam a próbatestek hajlítószilárdságát. Emellett kiszámítottam a hajlító rugalmassági modulusz értékét is. A hajlítószilárdság átlagos értékeit és az adatok szórását tartalmazza a 12. táblázat, míg a hajlító rugalmassági moduluszra vonatkozó eredményeket a 13. táblázatban foglaltam össze.

Gyártás	Hajlítószilárdság - σ_h [MPa]	
	Átlag [MPa]	Szórás [MPa]
1. (adatlap)	670,6	11,4
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	704,7	23,5
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	677,4	11,5

12. táblázat A hajlítószilárdság átlagos értékei és az adatok szórása

Gyártás	Hajlító rugalmassági modulusz - E_h [MPa]	
	Átlag [MPa]	Szórás [MPa]
1. (adatlap)	24 939	2197
2. (adatlap felfűtés plató nélkül)	30 273	608
3. (lassú felfűtés plató nélkül)	26 516	1676

13. táblázat A hajlító rugalmassági modulusz átlagos értékei és az adatok szórása

Az eredményekből látható, hogy az adatlap felfűtéssel, plató nélkül gyártott lemez hajlítószilárdsága és hajlító rugalmassági modulusza is jelentősen meghaladja a másik két lemezét, ez összhangban van a 2. lemez magasabb száltartalmával. A korábbi vizsgálatok döntő többségéhez hasonlóan az 1. és a 3. próbagyártmány között nem tapasztaltam szignifikáns különbségeket. Az eltérések mindkét jellemző tekintetében kisebbek, mint az egyes adatsorok szórása.

A hajlítóvizsgálatnál tapasztalt összes tönkremenetel a húzott oldali szélső szálabban történő szálszakadás formájában jelentkezett. Ez azt jelenti, hogy hajlító igénybevétel során megfelelően kihasználhatók az erősítőanyag tulajdonságai, a próbatestben nem találhatók szignifikáns hibahelyek. Ez is tükrözi az autoklávus eljárással gyártott termékek kiváló minőségét.

4.4.4. Ellenőrző mérések

Az eredményeket összevetve látható, hogy sűrűség, száltartalom, húzó és hajlító rugalmassági modulusz, illetve hajlítószilárdság tekintetében az 1. és a 3. ciklusban gyártott próbatestek között nem mutatkozott szignifikáns eltérés, egyedül a két lemez húzószilárdságában tapasztaltam lényeges, a szórások értékét meghaladó különbséget. A 3. lemez próbatestjeinek átlagos húzószilárdsága közel 8 %-kal meghaladja az 1. lemeznél mért értékeket. Mivel a jelenségre a lemezek többi jellemzője nem adott magyarázatot, ezért arra következtettem, hogy az eltérést az 1. lemez tabolásának hibája okozhatja. A feltevésemet

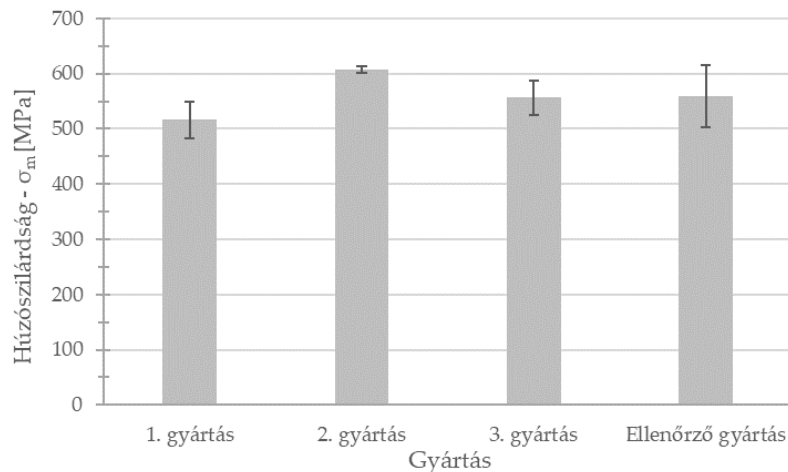
alátámasztja az, hogy a két lemez kezdeti húzó rugalmassági modulusának értéke közötti különbség kicsi, ami azt is jelenti, hogy a szakítóvizsgálat kezdeti, felfutó szakaszában a lemezek hasonlóan viselkednek. A nem megfelelő tabolás jelentős hatást gyakorolhat a lemez viselkedésére a szakítóvizsgálatnál fellépő 20-30 kN nagyságrendű erők esetén, és tönkremenetelt eredményezhet a kompozit valós húzószilárdságánál kisebb feszültség esetén is.

Feltevésem igazolására vagy cáfolására újabb próbagyártást végeztem az adatlapi ciklusnak megfelelően, tehát az 1. gyártással megegyező paraméterekkel. A szakító próbatestek előkészítésekor kiemelten figyeltem a megfelelő tabolás kialakítására. Ezt követően elvégeztem a többi lemezen is végrehajtott vizsgálatokat. Ezek eredményeit a 14. táblázatban hasonlítottam össze a szintén adatlapi 1. és az adatlapi gyártáshoz hasonló tulajdonságokat mutató 3. lemezhez tartozó értékekkel. A mechanikai vizsgálatok és a méréssel meghatározott sűrűségek esetében szórásértékeket is feltüntettem. Az elvégzett mérésekkel kettős célom volt: egyrészt az 1. lemez húzási tulajdonságainak felülvizsgálata, másrészt a gyártás reprodukálhatóságának értékelése.

	1. gyártás (adatlapi)	3. gyártás (lassú fűtés plató nélkül)	Ellenőrző gyártás (adatlapi)
Átlagos vastagság [mm]	2,08	2,07	2,05
Becsült sűrűség [g/cm ³]	1,419	1,423	1,415
Sűrűség [g/cm ³]	1,448±0,007	1,453±0,009	1,450±0,003
Felszívott gyanta tömege [g]	6,00	5,57	6,52
Szálahányad keverékszabállyal [V%]	41,39	42,11	41,61
Száltartalom keverékszabállyal [m%]	51,44	52,18	51,67
Száltartalom * [m%]	53,00	53,10	53,97
Száltartalom kiégetéssel [m%]	64,67	64,94	65,57
Húzószilárdság [MPa]	516,1±33,9	556,4±30,6	558,9±56,6
Húzó rugalmassági modulus [MPa]	50 910±2070	51 274±728	52 088±970
Hajlítószilárdság [MPa]	670,6±11,4	677,4±11,46	677,9±28,8
Hajlító rug.mod. [MPa]	24 939±2197	26 516±1676	24 645±629

14. táblázat Az adatlapi paraméterekkel végzett ellenőrző gyártás eredményeinek összehasonlítása az 1. és a 3. gyártással (a *-gal jelölt száltartalmat a 10. táblázat eredményeinél ismertetett módon számítottam)

Az adatlapi ellenőrző gyártás eredményeit a vele azonos paraméterekkel végzett 1. gyártással összevetve a legtöbb jellemző esetében szóráson belüli, csekély mértékű különbségeket tapasztaltam. Ennek megfelelően az eredmények a lassú felfűtéssel gyártott, 3. lemezhez is hasonlóan alakultak. A szintén adatlapi első gyártáshoz képest az ellenőrző mérések során – várakozásaimnak megfelelően – a legnagyobb eltérések a húzási tulajdonságok, elsősorban a húzószilárdság tekintetében jelentkeztek. A különbségek jobb szemléltetése érdekében a 16. táblázatban összehasonlított húzószilárdságokat a 2. lemez (plató nélkül, gyors felfűtéssel gyártott) eredményeivel kiegészítve a 23. ábrán található diagramon is bemutatom.



23. ábra Az egyes lemezekhez tartozó húzószilárdságok

Azt tapasztaltam, hogy bár az ellenőrző mérések szórása nagy – 10 % körüli –, a húzószilárdság átlagos értéke jelentősen eltér az eredeti adatlapi gyártásától, és ahogy arra a sűrűségből és a száltartalomból következtetni lehetett, a 3. lemez átlagos húzószilárdságával vesz fel közel azonos értéket. Ennek megfelelően ahogy a diagramon is látható, az ellenőrzéshez gyártott lemez átlagos húzószilárdsága kb. 50 MPa-lal elmarad a 2. lemez átlagától.

Az ellenőrző mérések eredményei alapján valóban arra lehet következtetni, hogy az eredeti méréseknél tapasztalt eltéréseket az adatlapi ciklussal gyártott lemez tabolásának hibája okozta. Mivel a lemezeket egy darabban, a 25 mm széles próbatestek kialakítása előtt taboltam, ezért ez a hiba valószínűleg minden az 1. lemezhez kapcsolódó szakítóvizsgálatot terhelt.

Az ellenőrző mérések alapján megállapítható továbbá, hogy az adatlapi ciklussal és a plató nélküli, lassú felfűtéssel gyártott lemezek tulajdonságai között nincs jelentős eltérés. Emellett az is látható, hogy a két adatlapi gyártás között a húzószilárdságot leszámítva nem tapasztaltam szignifikáns különbséget, az adatok tehát tükrözik az autoklávus gyártás egyik előnyeként emlegetett jó reprodukálhatóságot.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A TDK dolgozatom keretei között prepreg szerkezetek autoklávus térhálósításával foglalkoztam. A kutatás célja az volt, hogy vizsgáljam, az egyes paraméterek miként befolyásolják a polimer kompozit tulajdonságait, és meghatározzam az adatlapon előírt paraméterektől való eltérések következményeit. Ennek érdekében mátrixanyaghoz kapcsolódó reológiai vizsgálatokat végeztem, majd különböző paraméterek alkalmazásával prepregből kompozit lemezeket gyártottam, amiket szakító- és hajlítóvizsgálatnak vetettem alá.

5.1. Az eredmények értékelése, következtetések

A gyanta viszkozitásmérésének eredményeiből egyértelműen látható, hogy a térhálósítási ciklus során nagyobb felfűtési sebesség alacsonyabb viszkozitásértékeket eredményez. Ennek okai a viszkozitás hőmérsékletfüggésében és a térhálósodási reakció időigényében keresendők. A hőmérséklet növelésével párhuzamosan a gyanta viszkozitása csökken, nagyobb felfűtési sebesség esetén a gyanta rövidebb idő alatt ér el magasabb hőmérsékletértékeket, ezáltal hamarabb esik le a viszkozitása. A térhálósodás viszont nem képes „lépést tartani” ezzel a gyors viszkozitaseséssel, a ciklus időtartama alatt csak magasabb hőmérsékleteken indul be, és ér olyan előrehaladott állapotba, ahol a térhálókötések kialakulása ellensúlyozni tudja a viszkozitás csökkenését, és annak növekedéséhez vezet. Lassú felfűtés esetén a térhálósodás már alacsonyabb hőmérsékleten megkezdődik, és így előbb megállítja a viszkozitasesést. A kísérletek azt is megmutatták, hogy egy bizonyos felfűtési sebesség felett a gyanta gyorsabb melegítése nem eredményez nagyobb mértékű viszkozitasesést.

Az impregnálás viszkozitás függvényében történő vizsgálatához nem találtam szabványos módszert, így saját mérési elrendezéssel végeztem kísérleteket. Ezek igazolták azon feltevésemet, hogy az egyes felfűtési sebességek mellett jelentkező viszkozitásminimumok közti különbségek technológiai szempontból jelentősek lehetnek. A gyanta folyóképességében tapasztalt eltérések érdemben befolyásolhatják az eltávozó gyanta mennyiségét és a prepregben lévő, esetlegesen szárazon maradt erősítőanyag átimpregnálását. Ez ellentmond a szakirodalmi áttekintésben bemutatott egyik kutatásnak, ahol a viszkozitás minimum értékeiben jelentkező különbségeknek technológiai szempontból nem tulajdonítottak nagyobb jelentőséget. [2]

Következtéseimet alátámasztották a próbagyártásokat követő kísérletek is, amelyek során a felfűtési sebesség változtatásának, illetve a viszkozitasesés ellensúlyozására szolgáló plató elhagyásának következményeit vizsgáltam. A szakító- és hajlítóvizsgálatok eredményeként azt tapasztaltam, hogy mind a gyorsabb felfűtés, mind a plató elhagyása jobb mechanikai tulajdonságokat eredményez. Ez az alacsonyabb gyantaviszkozításra vezethető vissza, aminek eredményeként egyrészt több gyanta távozott el, így magasabb lett a kompozit termék száltartalma, másrészt előfordulhat, hogy a jobb folyóképessége miatt a gyanta jobban átimpregnálta az erősítőstruktúra azon részeit, amelyek a prepreg feldolgozása során a prepreggyanta nagyobb viszkozitása miatt nem impregnálódtak tökéletesen. Utóbbi hipotézis megerősítéséhez vagy cáfolásához azonban további vizsgálatok szükségesek.

Tapasztalataimat irodalmi adatokkal összevetve találtam egyezést: Takács [31] szintén arra jutott, hogy a felfűtési sebesség fokozásával nő a száltartalom, illetve javulnak a mechanikai tulajdonságok.

A vizsgálatok során azt tapasztaltam, hogy a lassú felfűtéssel, plató nélkül és a nagyobb felfűtési sebességgel, platóval gyártott termékek között sűrűség, száltartalom és mechanikai tulajdonságok tekintetében nem jelentkeztek szignifikáns különbségek. Ennek fontos gyakorlati jelentősége lehet olyan esetekben, amikor valami miatt nem tarthatók az adatlapi paraméterek. Ilyen lehet többek között a vastagabb, rosszabb hővezető-képességű szerszámokban történő gyártás, ahol a szerszám hőmérsékletének emelkedése csak lassabban képes követni az autokláv kamrájában lévő levegő felmelegedését. Az eredmények azt mutatják, hogy lassabb felfűtés mellett a plató elhagyásával is elérhetők az adatlapi ciklustól várható mechanikai tulajdonságok. Emellett igazolja azt is, hogy a plató alkalmazásával ellensúlyozható a gyorsabb felfűtés által okozott viszkozitasesés, továbbá arra enged következtetni, hogy a plató alkalmazása, illetve elhagyása már vékony, kis méretű termékek esetén is nagy mértékben befolyásolja a termék tulajdonságait.

A szakítóvizsgálatok mérési adatsorainak kiértékelésekor szembesültem vele, hogy a próbatestek befogás menti vastagításának (tabolásának) minősége jelentősen befolyásolhatja az eredményeket. Ez a legnagyobb odafigyelés mellett elvégzett tabolással is egy nehezen kiküszöbölhető hibafaktor, amit kiértékelés közben nem szabad figyelmen kívül hagyni. A bizonytalanság csökkentése érdekében végeztem ellenőrző méréseket.

Az eredményeket összefoglalva tehát kijelenthető, hogy gyorsabb felfűtéssel és a plató elhagyásával jobb mechanikai tulajdonságok érhetők el, a képet azonban árnyalja, hogy a tulajdonságok javulása részben a száltartalom növekedésére vezethető vissza. A prepregek fontos előnye a pontosan beállított száltartalom, így ennek jelentős befolyásolása nem célja a feldolgozásuknak. Ennek ellenére mivel az adatlapokon is néhány százalékos tűréssel adják meg a száltartalmat, így a megengedett tartományon belüli finomhangolásra mindenképpen alkalmas lehet az általam vizsgált paraméterek változtatása.

5.2. További megoldásra váró feladatok

A kutatómunka során számos további, megoldásra váró feladat és a kísérletek folytatásával kapcsolatos ötlet fogalmazódott meg bennem.

Ezek közül kiemelten fontosnak tartom a tabolás hibájának csökkentését, amire léteznek speciális megoldások. Erre egy kiváló példa Czél, Jalalvand és Wisnom kutatása, akik a tabolás okozta feszültségkoncentráció kiküszöbölésére karbon/epoxi-üveg/epoxi rétegek közötti hibrid kompozit próbatesteket alkalmaztak, és ezek segítségével sikeresen meg tudták határozni a középső réteget alkotó szénszál erősítésű, epoxi mátrixú kompozit húzószilárdságát. [51]

Emellett célom a száltartalom pontos meghatározása, amit termogravimetriai analízissel tervezek végrehajtani. A későbbiekben pedig tervezem a technológiai paraméterek hatásának vizsgálatát más erősítőstruktúrával rendelkező prepreg szerkezetek – elsősorban kizárólag egyirányú szálelrendezés – esetén.

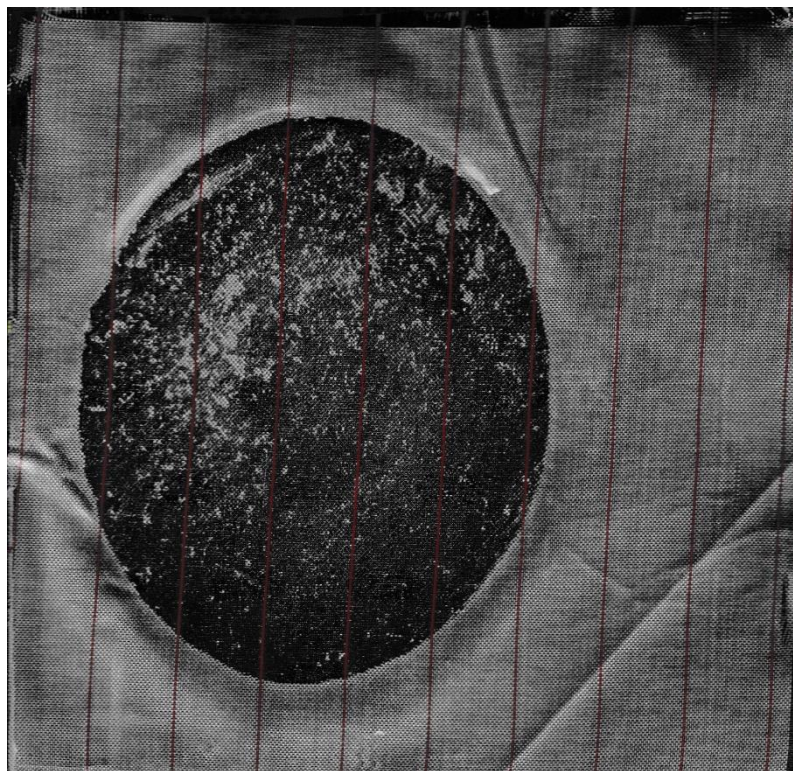
6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013).
2. Dong A., Zhao Y., Zhao X., Yu Q.: Cure Cycle Optimization of Rapidly Cured Out-Of-Autoclave Composites. *Materials*. vol. 11, no. 3, 421 (2018).
3. Costa M.L., Botelho E.C., Rezende M.C.: Monitoring of cure kinetic prepreg and cure cycle modeling. *J. Mater. Sci.*, 41, 4349-4356 (2006).
4. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
5. Csallány E.K., Czél G.: Rendezett nem folytonos szálakkal erősített, nagy teljesítményű polimer kompozitok mechanikai tulajdonságai nyomó terhelés esetére. *Polimerek Műanyagipari Szaklap*, 5, 388-392 (2019).
6. Kamal K.K.: Composite Materials – Processing, Applications, Characterizations. Springer Verlag, Berlin (2017).
7. Altenbach H., Altenbach J., Kissing W.: Mechanics of Composite Structural Elements. Springer Nature, Szingapúr (2018).
8. Peters S.T.: Handbook of Composites. Springer Science+Business Media, Dordrecht (1998).
9. Bonnet M.: Kunststofftechnik, Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2016).
10. Deák T., Kovács J.G., Szabó J.S.: Bazaltszál-erősítésű fröccsöntött poliamid mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. *Anyagvizsgálók Lapja*, 15, 88-92 (2005).
11. Lázár K.: Az üvegszál, mint textilipari nyersanyag. *Magyar Textiltechnika*, 68, 24-28 (2016).
12. Bhatt P., Goel A.: Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use, *Material Science Research India*, 14, 52-57 (2017).
13. Dumanlı A.G., Windle A.H.: Carbon fibres from cellulosic precursors: a review. *J. Mater. Sci.*, 47, 4236-4250 (2012).
14. Schürmann H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Verlag, Berlin (2005).
15. Nordin N.A., Yussof F.M., Kasolang S., Salleh Z., Ahmad M.A.: Wear Rate of Natural Fibre: Long Kenaf Composite. *Procedia Engineering*, 68, 145 – 151 (2013).
16. Kaiser W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München (2007).
17. http://www.pt.bme.hu/segedletek/a5_kompozitok_v6.pdf (2021.07.10.).
18. Romhány G.: Polimer anyagismeret műszaki menedzsereknek. Akadémiai Kiadó, Budapest (2018).
19. <https://www.chemie.de/lexikon/Prepreg.html> (2021.06.20.).
20. <https://www.lange-ritter.de/verarbeitung/vakuuminfusion> (2021.07.10.).
21. https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (2021.09.10.).
22. Yang N.: Composite Materials Engineering, Volume 2. Springer, Szingapúr (2017).
23. Flemming M., Ziegmann G., Roth S.: Faserverbundbauweisen. Springer Verlag, Berlin (1999).

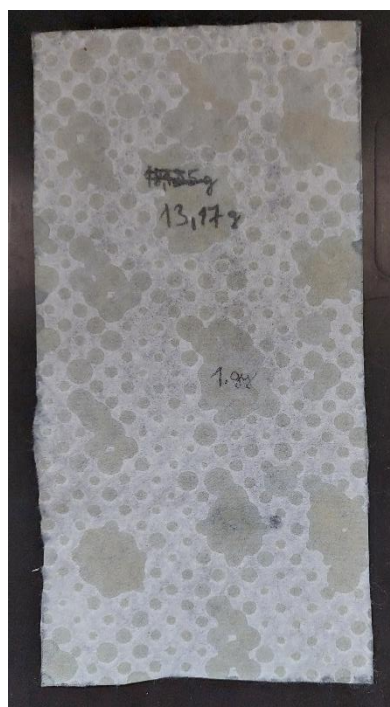
24. Dimeski D., Srebrenkoska V.: Advanced prepreg ballistic composites for military helmets. in '6th International Scientific Conference on Defensive Technologies. Belgrád, Szerbia' 717-721 (2014).
25. Cherif C.: Textile Materials for Lightweight Constructions. Springer Verlag, Berlin (2016).
26. <https://www.gurit.com/-/media/gurit/datasheets/prepreg-processing-guide.pdf> (2021.09.24.).
27. <https://www.gurit.com/-/media/gurit/datasheets/guide-to-composites.pdf> (2021.09.24.).
28. <https://www.chemie.de/lexikon/Autoklav.html> (2021.09.24.).
29. Vermes B., Czigány T.: Alakváltó kompozitok tervezése és gyártása autoklávval. Polimerek Műanyagipari Szaklap, **6**, 895-898 (2020).
30. Brymerski W., Wurl T., Schieler O.: CFK-Prepreg-Prestechnologie für Class-A-Sichtbauteile. Lightweight Design, **9**, 44-49 (2016).
31. Takács P.: Méhsejtes szendvicsszerkezetek gyártása. Szakdolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2021).
32. Huntsman Corporation, Technikai adatlap: Araldite LY 1556/ Aradur 1571/ Accelerator 1573/ Hardener XB 3403, <https://www.huntsman.com/> (2021.10.01.).
33. Microtex Composites, Technikai adatlap: X2-120, <https://microtexcomposites.com/> (2021.10.01.).
34. <https://oct.bme.hu/oct/hu/muszerpark> (2021.10.15.).
35. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=26&l=m> (2021.10.25.).
36. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=79&l=m> (2021.10.25.).
37. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=162&l=m> (2021.10.25.).
38. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=35&l=m> (2021.10.25.).
39. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=151&l=m> (2021.10.25.).
40. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=94&l=m> (2021.10.25.).
41. Marin G.: Oscillatory Rheometry. in 'Rheological Measurement' (szerk.: Collyer A.A., Clegg D.W.) Springer, Dordrecht (1998).
42. ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2017).
43. MSZ EN ISO 14125: Szálerősítésű műanyag kompozitok. Hajlítási tulajdonságok meghatározása (1999).
44. https://novia.hu/wp-content/uploads/2018/10/EPIKOTE-Resin-MGS-RIMR-426_en.pdf (2021.10.28.).
45. https://novia.hu/wp-content/uploads/2019/01/DISTITRON_5119_DSX21ZQ_EN.pdf (2021.10.28.).
46. https://shop.novia.hu/wp-content/uploads/2019/05/ipox-MR3010_MH3124_E_2013_02.pdf (2021.10.28.).
47. <https://novia.hu/wp-content/uploads/2018/07/NORESTER-1000-50-NTR-205-G-03.07.12-GB.pdf> (2021.10.28.).
48. <https://novia.hu/wp-content/uploads/2018/10/NORESTER-2550-NV-NTR.pdf> (2021.10.28.).
49. <https://novia.hu/wp-content/uploads/2018/07/NORESTER-3000-NTR163F-04-03-2010.pdf> (2021.10.28.).

50. <https://texonic.net/en/tableau/technical/> (2021.11.02.).
51. Czél G., Jalalvand M., Wisnom M.R.: Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites. Composites Part A (Applied Science and Manufacturing), **91**, 436-447 (2016).

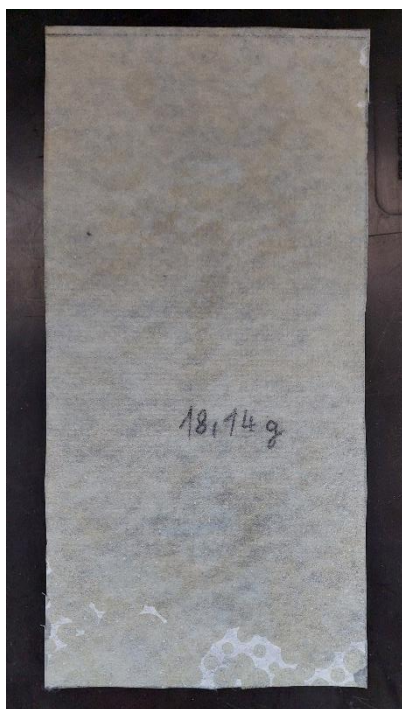
7. MELLÉKLETEK



M.1. ábra A gyanta által részlegesen átimpregnált letépőszövet a 0,625 °C/min felfűtési sebességgel végrehajtott térhálósítási ciklust követően



M.2. ábra Az 1. gyártáshoz használt, a próbatest felülete mentén elhelyezkedő, gyantát tartalmazó vákuumfilm



M.3. ábra A 2. gyártáshoz használt, a próbatest felülete mentén elhelyezkedő, gyantát tartalmazó vákuumfilm



M.4. ábra A 3. gyártáshoz használt, a próbatest felülete mentén elhelyezkedő, gyantát tartalmazó vákuumfilm