



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

DIPLOMATERV

A TECHNOLOGIAI PARAMÉTEREK HATÁSA PREPREGBŐL
AUTOKLÁVBAN GYÁRTOTT KOMPOZIT LEMEZEK
SZERKEZETÉRE ÉS TULAJDONSÁGAIRA

Témavezető:

Dr. Mezey Zoltán Tamás
adjunktus

Konzulens:

Dr. Czél Gergely
egyetemi docens

BUDAPEST, 2022



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Polimertechnika Tanszék

<http://www.pt.bme.hu>

DIPLOMAMUNKA-FELADAT

NYILVÁNOS

AZONOSÍTÁS	Név: Marton Gergő Zsolt		Azonosító: 72751368936	
	Képzéskód: 2N-MG0		Specializáció kódja:	Feladatkiírás azonosítója:
	Szak: Gépészmérnöki mesterképzési szak		2N-MG0-PT	GEPT:2023-1:2N-MG0:HU2JI8
	Diplomamunka-feladatot kiadó tanszék:		Zárvizsgát szervező tanszék:	
	Polimertechnika Tanszék		Polimertechnika Tanszék	
	Témavezető: Dr. Mezey Zoltán Tamás (71956341465), adjunktus			

FELADAT	Cím	A technológiai paraméterek hatása prepregből autoklávban gyártott kompozit lemezek szerkezetére és tulajdonságaira The effect of processing parameters on the structure and properties of prepreg based autoclave cured composite plates
	Részletes feladatok	1. Készítsen irodalomkutatást a technológiai paraméterek prepregből készült szerkezetek tulajdonságaira gyakorolt hatásaival kapcsolatban. 2. Végezzen előkísérleteket különböző technológiai paraméterekkel, és készítsen kísérlettervet az előkísérletek tapasztalatai alapján. 3. Vizsgálja a felfűtési sebesség hatását az autoklávban gyártott minták szerkezetére, különös tekintettel a kialakuló szál térfogathányadra. 4. Vizsgálja meg a felfűtési sebesség hatását prepregből készült próbatestek mechanikai jellemzőire.
	Hely	A diplomamunka-készítés helye: BME Polimertechnika Tanszék 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3 Konzulens: Dr. Czél Gergely, egyetemi docens

ZÁRÓVIZSGA	1. záróvizsga tantárgy(csoport)	2. záróvizsga tantárgy(csoport)	3. záróvizsga tantárgy(csoport)
	ZVEGEPTNGAT Anyagszerkezetan	ZVEGEPTNGKO Kompozit	ZVEGEPTNGFE Feldolgozás

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2022. szeptember 5.		Beadási határidő: 2022. december 9.		
	Összeállította: Dr. Mezey Zoltán Tamás (71956341465) témavezető		Ellenőrizte: Dr. Bárány Tamás s.k. tanszékvezető		Jóváhagyta: Dr. Györke Gábor s.k. dékánhelyettes
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Diplomamunka-készítés c. tantárgy előkövetelményeit maradéktalanul teljesítettem. Tudomásul veszem, hogy jogosulatlan tantárgyfelvétel esetén a jelen feladatkiírás hatálytalan.				
..... Marton Gergő Zsolt					

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt tartalmi és formai követelménynek megfelelően készült. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2022.12.09.

Dr. Mezey Zoltán Tamás
témavezető

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 diplomatervet 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, 2022.12.09.

Marton Gergő Zsolt
szigorló hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Mezey Zoltánnak és konzulensemnek, Dr. Czél Gergelynek, hogy szakmai iránymutatásukkal és tanácsaikkal nagy mértékben hozzájárultak diplomamunkám létrejöttéhez.

Köszönettel tartozom Kovács Lászlónak és Takács Lászlónak, az eCon Engineering Kft. munkatársainak a szimuláció elkészítéséhez adott tanácsaikért.

Külön köszönetet szeretnék mondani a családomnak, akik egyetemi éveim alatt is mindvégig támogattak.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	vi
Jelölések jegyzéke.....	ix
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Prepregs	4
2.1.1. <i>Prepregs előállítása</i>	5
2.1.2. <i>Prepregs tárolása, előkészítése, feldolgozási körülményei</i>	7
2.1.3. <i>Prepregs feldolgozása</i>	8
2.1.4. <i>Autokláv és out-of-autoclave technológiák összehasonlítása</i>	11
2.2. A prepregs feldolgozási paramétereirek kapcsolódó vizsgálatok.....	12
2.2.1. <i>A hőciklus hatásainak vizsgálata</i>	12
2.2.2. <i>A nyomás hatásai</i>	14
2.3. Rétegek közötti tulajdonságok vizsgálata.....	15
2.3.1. <i>Rétegek közötti nyírószilárdság meghatározása</i>	15
2.3.2. <i>Törésmechanikai vizsgálatok</i>	18
2.4. Az irodalomkutatás kritikai elemzése	20
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	22
3.1. Felhasznált alapanyagok	22
3.1.1. <i>Előkísérletek alapanyaga</i>	22
3.1.2. <i>A vizsgált prepregben található epoxi mátrix</i>	22
3.1.3. <i>A lemezgyártáshoz felhasznált prepreg</i>	23
3.1.4. <i>Segédanyagok</i>	24
3.2. Alkalmazott berendezések	24
3.2.1. <i>A próbatestgyártás és -előkészítés berendezései</i>	24
3.2.2. <i>Reológiai vizsgálatokhoz alkalmazott berendezés</i>	24
3.2.3. <i>Mechanikai vizsgálatokhoz használt berendezések</i>	25
3.2.4. <i>Egyéb vizsgálatok berendezései</i>	26
3.3. Vizsgálati módszerek	26
3.3.1. <i>Reológiai vizsgálatok</i>	26
3.3.2. <i>Sűrűség- és száltartalom mérés</i>	28
3.3.3. <i>Mechanikai vizsgálatok</i>	30
3.3.4. <i>Mikroszkópos vizsgálat</i>	34
4. A technológiai paraméterek hatásainak vizsgálata.....	35

4.1.	Előkísérletek.....	35
4.1.1.	<i>Szén-epoxi kompozit lemezek előállítása</i>	35
4.1.2.	<i>Száltartalom mérés.....</i>	38
4.1.3.	<i>Szakítóvizsgálat</i>	39
4.1.4.	<i>Hárompontos hajlítóvizsgálat</i>	40
4.1.5.	<i>Ellenőrző mérések.....</i>	41
4.1.6.	<i>Előkísérletek eredményeinek értékelése, következtetések</i>	43
4.2.	Kísérletterv, kutatás célja	44
4.3.	Reológiai vizsgálatok.....	45
4.3.1.	<i>Vizsgálati paraméterek meghatározása</i>	45
4.3.2.	<i>A reológiai vizsgálatok eredményei.....</i>	46
4.4.	Kompozit lemezek előállítása.....	50
4.4.1.	<i>Alkalmazott térhálósítási ciklusok</i>	50
4.5.	Sűrűség- és száltartalom meghatározása.....	52
4.6.	Hárompontos hajlítóvizsgálat	56
4.7.	Rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálat	58
4.8.	Rétegek közötti tulajdonságok szakításra visszavezetett vizsgálatai.....	61
4.8.1.	<i>A rétegek közötti nyírószilárdság meghatározása kétszeresen átlapol</i> <i>próbatestekkel.....</i>	61
4.8.2.	<i>A kritikus repedésterjesztő erő meghatározása</i>	63
4.9.	Optikai mikroszkópos vizsgálat	66
4.10.	A kétszeresen átlapolt próbatesteknél tapasztalt jelenségek magyarázata.....	68
4.11.	Az eredmények értékelése, következtetések.....	72
5.	ÖSSZEFOGLALÁS	75
5.1.	Magyar nyelvű összefoglaló	75
5.2.	Zusammenfassung	76
5.3.	További megoldásra váró feladatok	78
6.	Felhasznált források	79

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
b	próbatest szélesség (specimen width)	mm
E	húzó rugalmassági modulusz (elastic modulus)	GPa
E_h	hajlító rugalmassági modulusz (flexural modulus)	GPa
F	erő (force)	N
G_c	törési szívósság (fracture toughness)	N/mm
h	vastagság (specimen thickness)	mm
M_f	a szálak tömege (fibre weight)	g
m_f	a szálak tömegaránya (fibre weight fraction)	-
M_m	a mátrix tömege (matrix weight)	g
p	porozitás (porosity)	V%
t	átvágott rétegek vastagsága (cut plies thickness)	mm
v_f	a szálak térfogataránya (fibre volume fraction)	-
V_f	az szálak térfogata (fibre volume)	cm ³
V_m	a mátrix térfogata (matrix volume)	cm ³

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	fajlagos nyúlás (strain)	-
Q_f	a szálak sűrűsége (fibre density)	g/cm ³
Q_k	a kompozit sűrűsége (density of the composite)	g/cm ³
Q_m	a mátrix sűrűsége (matrix density)	g/cm ³
σ	feszültség (stress)	MPa
σ_h	húzószilárdság (tensile strength)	MPa
τ	rétegek közötti nyírószilárdság (interlaminar shear strength)	MPa
ω	szögsebesség (angular velocity)	rad/s

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
BMC	prézelés előre impregnált vágott szálakból (bulk moulding compound)
CZM	kohéziós zóna modellezés (cohesive zone modelling)
OOA	autoklávon kívüli (out-of-autoclave)
PCM	prepreg prézelés (prepreg compression moulding)

SBS	rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat (short-beam shear test)
SMC	préselés tekercs formájú előgyártmányból (sheet moulding compound)
VBO	vákuumsákos eljárás (vacuum bag only)

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre szélesebb körben alkalmaznak polimer kompozitokat. A legmagasabb minőségi követelményeket támazstó területeken leginkább prepregből készült kompozit szerkezetek kerülnek felhasználásra. Az elnevezés a „pre-impregnated” szóból ered, olyan kompozit előgyártmányokat jelent, amelyekben a szálas erősítőanyagot előre átitatják mátrixanyaggal, a mátrix pedig egy kis mértékben előtérhálósított, ún. „B” állapotban van, a térhálósodási reakció már megkezdődött. Ennek lelassítása érdekében a prepregok tárolása lefagyasztott állapotban történik. A prepregok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, kiemelendő ezek közül, hogy száltartalmuk rendkívül pontosan beállítható, az erősítőanyag jól átimpregnált és rendkívül kis mennyiségű légüregot tartalmaznak. Prepregokból kiválóan reprodukálható, nagy teljesítményű kompozit alkatrészek állíthatók elő, ehhez azonban elengedhetetlen egy szigorúan kontrollált feldolgozási folyamat. Ennek biztosítása érdekében prepregok esetében leggyakrabban az autoklávban történő térhálósítást alkalmazzák, de egyre elterjedtebbek az autoklávon kívüli prepreg kikeményítési technológiák is [1, 2].

A kikeményítés során alkalmazott technológiai paraméterek számottevő hatást gyakorolnak az előállított kompozit szerkezetére és tulajdonságaira. A felfűtési sebesség meghatározza a mátrix viszkozitás esésének mértékét és ütemét, nagyobb felfűtési sebesség a ciklus során alacsonyabb viszkozitásértékekhez vezet. A hőciklusba a térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően esetlegesen beiktatott hőtartási szakasz, plató jelentős mértékben befolyásolja a gyanta viselkedését a feldolgozás során. Szerepe a vastagság mentén egyenletes hőmérséklet-eloszlás biztosítása és a térhálósodási reakcióval járó hőfejlődés korlátozása. Emellett megállítja a viszkozitás csökkenését, miközben a térhálósodási reakció előrehalad, így a plató hőmérsékletének helyes megválasztása kulcsfontosságú a sikeres gyártáshoz. Nem elhanyagolható hatású a térhálósításkor alkalmazott túlnyomás mértéke sem. A túlnyomás jelenti a legfontosabb különbséget az autoklávos és a legnépszerűbb OOA technológiának számító vákuumzsákos eljárás között. Kérdés, a két technológiával azonos hőciklus mellett gyártott termékek milyen eltéréseket mutatnak.

Az említett paraméterek hatással vannak többek között a szálak impregnáltságára, az eltávozó gyanta mennyiségére – ezáltal a kompozit száltartalmára – és a termékben kialakuló légüregok mennyiségére és méretére. A szerkezetbeli eltérések miatt a különböző paraméterekkel előállított kompozitok mechanikai, ezen belül főleg a rétegekzi tulajdonságai is jelentősen eltérőek lehetnek. A gyártói adatlap általában pontosan előírja az alkalmazandó feldolgozási paramétereket, kérdés azonban, hogy az ettől való – gyakran kényszerű – eltérések, illetve a gyártó alternatív ciklus javaslatai milyen eredményre vezetnek [3-5].

Elsőként előkísérleteket végeztem szénszövettel erősített, epoxi mátrixú prepregből, különböző hőciklusokkal gyártott kompozit lemezek felhasználásával. Az

előkísérletek során a hőciklusbeli változtatásoknak a száltartalomra, illetve a húzó és hajlító mechanikai jellemzőkre gyakorolt hatásaival foglalkoztam.

Az előkísérletek tapasztalatait figyelembe véve a további vizsgálatoknál unidirekcionális szálerősítésű prepreget alkalmaztam. Előbb reológiai vizsgálatokkal igyekeztem kimutatni, hogy a hőciklus változtatása miként befolyásolja a mátrix viszkozitásának alakulását és a térhálósodási reakciót. Ezután a felfűtés sebességének, a ciklus során a kompozitra kifejtett nyomás mértékének, illetve a hőmérséklet-plató alkalmazásának hatásait vizsgáltam üvegszál/epoxi kompozit lemezek prepregből autoklávban történő gyártása esetén. Ehhez különböző paraméterekkel állítottam elő lemezeket, majd meghatároztam ezek száltartalmát, sűrűségét és egyes mechanikai tulajdonságait. A szerkezeti eltérésekre leginkább érzékeny jellemzőkkel foglalkoztam, amelyek elsősorban a hajlító mechanikai jellemzők, illetve a rétegek közötti tulajdonságok. Végül a vizsgálatok eredményei alapján elemeztem az adatlapon szereplő gyártási paraméterektől való eltérések következményeit.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az alábbi fejezetben kerül bemutatásra a diplomamunkám elkészítése során elvégzett irodalomkutatás. A szakirodalmi áttekintés központi témáját a prepregok mint kompozit előgyártmányok és feldolgozási technológiáik jelentik. Részletesen foglalkozom a térhálósítási ciklussal, illetve a feldolgozás során alkalmazott paraméterekkel és azok hatásaival. Emellett kitérek a kompozitok rétegek közötti tulajdonságainak vizsgálati lehetőségeire is.

2.1. Prepregok

A polimer kompozitok között a legmagasabb minőséget a prepregből készült alkatrészek képviselik. Azokat az előgyártmányokat, amelyekben az erősítőanyagot előre átitatják mátrixanyaggal, prepregnek nevezzük. A prepreg elnevezés az angol „pre-impregnated” – előimpregnált – szóból származik [6, 7].

Az említett definíciónak megfelel minden, mátrixanyaggal előre átitatott szálerősítést tartalmazó kompozit előgyártmány, ám fontos megkülönböztetnünk ezeknek két csoportját. Léteznek kimondottan adott feldolgozási technológiákhoz kifejlesztett lapszerű és tömbszerű előre impregnált vágott szálal előgyártmányok. Ezeket a Sheet Moulding Compound (SMC) és Bulk Moulding Compound (BMC) elnevezésű préseléses kompozitgyártási technológiákkal dolgozzák fel. Ezek alkalmazásának elsődleges céljait a technológiai folyamat egyszerűsítése, a ciklusidő és a gyártási költségek csökkentése és a termelékenység fokozása jelentik. Ezen előgyártmányok erősítőanyagként általában 50 mm-nél rövidebb, vágott szálak szolgálnak. Ezzel szemben a szigorúbb definíció szerinti, klasszikus értelemben vett prepregok közé kizárólag azon előgyártmányok tartoznak, amelyek végtelen hosszú szálúnak tekinthető erősítőanyagot tartalmaznak, ezek közül is a hőre nem lágyuló mátrixanyag felhasználásával gyártott prepregok állnak a kompozittechnológia középpontjában. Ezek használatának célja a lehető legmagasabb termékminőség, mechanikai tulajdonságok biztosítása. Dolgozatom elkészítése során az utóbbi, szigorúbb prepreg definíciót tekintettem mérv-adónak [1, 6, 7].

A prepregokban a mátrixanyag egy csekély mértékben előtérhálósított, ún. B állapotban van. Míg A állapotban az tekinthető, amikor az anyag nem térhálós, C állapotát pedig a térhálósodás befejeződése után éri el. B állapotban a térhálósodási reakció már megkezdődött, az anyag viszkozitása és üvegesedési átmeneti hőmérséklete megemelkedett, felülete ragadós. A B állapot nem tekinthető stabilnak, az anyag ekkor reaktívan viselkedik, eltárolhatósága korlátozott, szavatossági idővel rendelkezik. Mivel a hőmérséklet jelentős mértékben befolyásolja a térhálósodási reakció sebességét, ezért a prepregokat általában mélyhűtve, -18°C környékén tárolják, ezáltal jelentősen megnövelhető eltarthatóságuk ideje [8, 9, 10].

A prepregok leggyakoribb mátrixanyaga az epoxi, de léteznek poliészter, vinilészter, fenol és poliimid alapú prepregok, illetve speciális alkalmazási területeken egyéb gyanták is előfordulhatnak [9, 11].

Erősítőanyagot tekintve a prepregoknál leggyakrabban szén- vagy üvegszálat, esetenként aramidszálat alkalmaznak. Az erősítőanyag a prepregben leggyakrabban unidirekcionális elrendezésben van jelen, de nem ritkák a szövetet vagy akár multidirekcionális erősítést tartalmazó prepregok sem [9, 10].

Prepregekkel többnyire tekercs formájában találkozhatunk. Mivel felületük tapadós, tekercselésükhöz mindkét oldalukat formaleválasztó fóliával vagy papírral látják el [1].

Prepregből kiváló minőségű, rendkívül jól reprodukálható termékek állíthatók elő. Legfontosabb előnyeik közé tartozik az egyenletes száeloszlás, a pontosan beállítható száltartalom és -orientáció. Kiemelendő még, hogy használatukkal biztosítható az erősítőanyag megfelelő átítatottsága, jelentős mértékben csökkenthető a termékben lévő légbuborékok száma és mérete, illetve kiváló felületi minőség érhető el. Hátrányként megemlíthető, hogy a prepreg előgyártmányok ára magas, tárolásuk energiaigényes, illetve feldolgozási technológiáik költségesek és szakképzett munkaerőt igényelnek [1, 9, 12].

2.1.1. Prepregok előállítás

Prepreg előgyártmányok kereskedelmi forgalomban kaphatók, a feldolgozók többnyire erre szakosodott prepreggyártóktól szerzik be őket, de az sem ritka, hogy a feldolgozást végző cég rendelkezik valamilyen prepreggyártó berendezéssel, gépsorral [1].

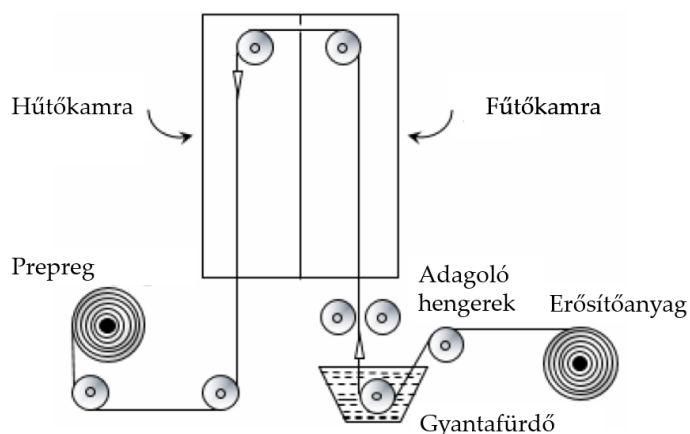
A prepregok előállítására használt eljárások elvi alapon két csoportra bonthatók: oldószeres és ömledékes eljárásokra [13].

Az oldószeres eljárásokat alkalmazzák régebb óta. Ezek lényege, hogy a mátrix komponenseit alacsony forráspontú oldószer hozzáadásával hígítják a kívánt koncentrációig, ezáltal a gyanta viszkozitása lecsökken, folyóképessége megnő, és alkalmassá válik az erősítőanyag átimpregnálására [9, 10].

A típus legfőbb előnye éppen az alacsony viszkozításban rejlik, amely lehetővé teszi az erősítőanyag teljes átimpregnálását akár vastag, komplex erősítőstruktúrák esetén is. További előnyt jelent, hogy az így készült prepregok szavatossági ideje általában hosszabb, mint az ömledékes eljárásokkal készült előgyártmányoké. Az eljárás legnagyobb hátránya az oldószer, amelynek eltávolítása és utókezelése növeli a technológia költségeit, továbbá a visszamaradó oldószer üregek megjelenését okozhatja a gyártandó termékben [9, 10, 13].

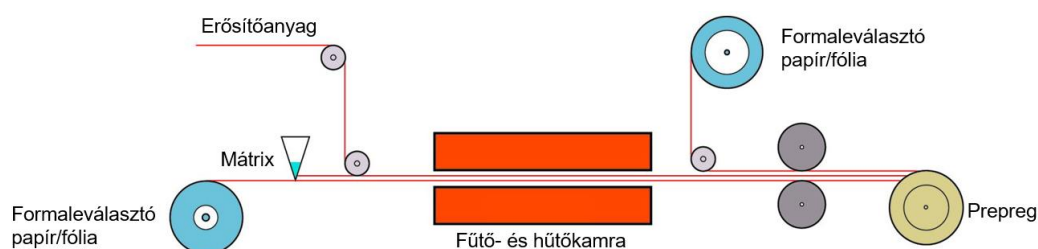
Az eljárásnak két fő változata ismert, a függőleges és a vízszintes elrendezésű. Függőleges eljárásváltozat során ezen a hígított gyantafürdön vezetik át az erősítőanyagot, ezáltal impregnálják. A prepreg gyantatartalmának szabályozására a

mátrixfürdő koncentrációja, az erősítőanyag elhúzási sebessége és az elhúzó hengerek közti távolság ad lehetőséget. Következő lépésként a már mátrixszal átitatott erősítőanyagot egy fűtőkamrába vezetik, ahol az emelt hőmérséklet az oldószer eltávozásához vezet, illetve megindul a térhálósodás. Az anyag ezt követően egy hűtőkamrába kerül, ezáltal a térhálósodási reakciót még korai állapotában lelassítják. A prepreget végül hengerek segítségével leválasztó fóliákkal látják el, majd szélezzik és tekercselik. A függőleges eljárásváltozat elvi vázlatát az 1. ábra szemlélteti [9, 10, 13, 14].



1. ábra Függőleges elrendezésű oldószeres prepreggyártási eljárás, forrás: [14]

A vízszintes eljárásváltozat nagy mértékben hasonlít a függőleges típushoz, azzal a különbséggel, hogy itt gyantafürdő helyett a mátrixot formaleválasztó papírra vagy fóliára rétegzik, és erre vezetik rá az erősítőanyagot. Az eljárás vázlatát a 2. ábra mutatja be [13, 15].

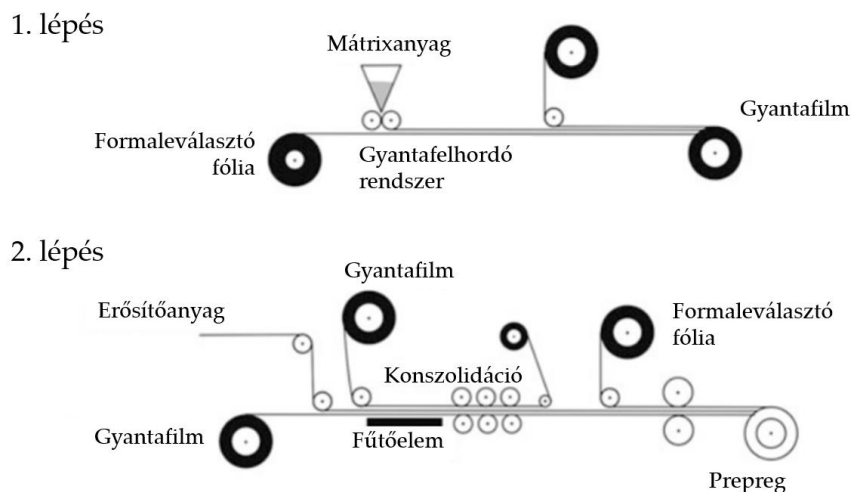


2. ábra Vízszintes elrendezésű oldószeres eljárásváltozat, forrás: [15]

A prepreggyártási technológiák másik nagy csoportját az ömledékes eljárások alkotják. Alapvetően ezek esetében is két típusról beszélhetünk: egylépéses, direkt ömledékes eljárások és kétlépéses, ún. filmtranszfer eljárások [9].

Direkt eljárás alapja, hogy a mátrixanyagot hevítéssel megömlesztik, majd az erősítőanyag átimpregnálását fűtött kalanderhengerek segítségével végzik el. Filmtranszfer eljárás esetén a technológiát két részfolyamatra bontják. Az első a gyantafilm előállítása. A mátrixból emelt hőmérsékleten, többnyire 60-90°C-on gyantafilmot képeznek, amit hordozórétegre visznek fel, majd tekercselnek. A második lépésben gyantafilmből indulnak ki. A mátrixanyagot fűtőelemek és temperált kalanderhengerek segítségével melegítik, ezáltal lecsökken a viszkozitása,

ezt követően bevezetik az erősítőanyagot, amit további hengereket felhasználva átimpregnálnak. A filmtranszfer eljárás vázlatja a 3. ábrán látható [9, 10, 13].



3. ábra A filmtranszfer eljárás elvi vázlatja, forrás: [13]

Az ömledékes eljárás alkalmazásával megelőzhetők az oldószer okozta problémák, továbbá egyszerűbben és pontosabban szabályozható a gyantatartalom. A filmtranszfer eljárás további előnye, hogy a részfolyamatok szétválasztásával gazdaságosabbá tehető az alapanyag-felhasználás. Az ömledékes eljárások legfőbb hátrányát az oldószeres technológiákkal szemben a magasabb mátrixviszkozitás jelenti, ami gyengébb átimpregnáltságot eredményezhet, különösen vastag, komplex erősítőstruktúrák esetén [9, 10].

Az iparban manapság gyakrabban alkalmazzák az ömledékes eljárásokat, de a legmodernebb multifunkciós berendezések már képesek mindkét elven történő működésre [10].

2.1.2. 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°C alatti hőmérséklet szükséges, az ideális tárolási hőmérséklet -18°C , így a prepreg szavatossági ideje (shelf life) akár az egy-két 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°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 környezeti hőmérsékletet. Ezen szempontok figyelembevételével elkerülhető a páralecsapódás a prepreg tekercsen, amely a

kompozitrétegek közé zárva a magas hőmérsékletű térhálósítás során gázzárványokat képezhetne, 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 prepreg eltarthatósága szobahőmérsékleten a konkrét gyantarendszer függvényében általában 4-8 hét [16, 17].

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 éri 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 rétegzett 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. [17]

2.1.3. *Prepreg feldolgozása*

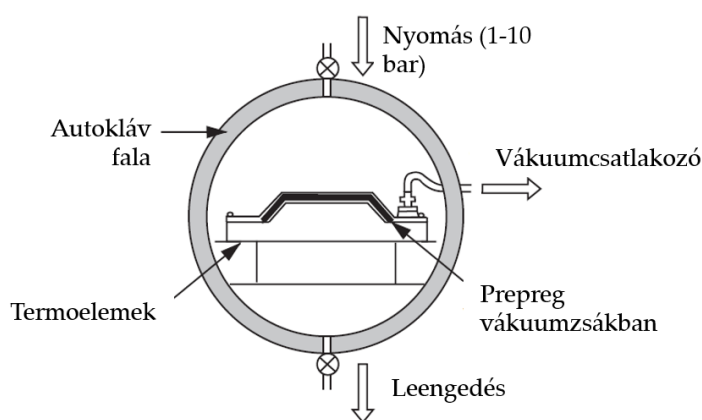
A prepreg feldolgozási technológiáit tekintve megkülönböztethetjük az autoklávós eljárást, illetve az autoklávon kívüli technológiákat. Előbbi számít a legjobb termékminőséget biztosító technológiának, de alacsonyabb költségeik, esetleg rövidebb ciklusidejük miatt az autoklávon kívüli (out-of-autoclave-OOA) technológiák is egyre elterjedtebbek [10].

Az autoklávós technológia kulcsa maga a berendezés, ami tulajdonképpen egy fűthető nyomástartó edény. 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 fenntartható a vákuum [18].

Elsőként megtörténik a kiolvasztott tekercsből a megfelelő geometriájú rétegek kivágása. Ezt követően a szerszámban kialakítják a kívánt rétegrenddel a megfelelő termékgeometriát. Ez többnyire kézi laminálással történik, de a folyamat akár automatizálható is. A laminálást általában néhány rétegenként megszakítják, és a terméket vákuum alá helyezik, ezt nevezik konszolidációnak. Ennek célja a laminálás

során keletkező általában makroszkopikus méretű légüregek eltávolítása a termékből. A laminálás végeztével felépítik a vákuumzsákot a szerszámra. Ez több különböző technológiai rétegből áll. Fontos, hogy a szerszámra először formaleválasztó fóliát tesznek, ezt követi a prepreg. Erre gyakran perforált formaleválasztó fóliát helyeznek, ezen keresztül távozhat el a gyanta a prepregből. A következő réteg általában a vákuumfilc (breather), ez gondoskodik a vákuum elosztatásáról a zsákon belül. Ezt pedig már követheti a vákuumfólia, amit vákuumtömítő szalaggal rögzítenek a szerszám-hoz [16].

A levákuumozott szerszámot az autoklávba helyezik, ahol a termék térhálósítása szigorúan kontrollált körülmények között, vákuum és túlnyomás segítségével emelt hőmérsékleten történik. Az autoklávban történő feldolgozás elvi vázlatát a 4. ábra szemlélteti [16].



4. ábra Autoklávos gyártás vázlat, forrás: [16]

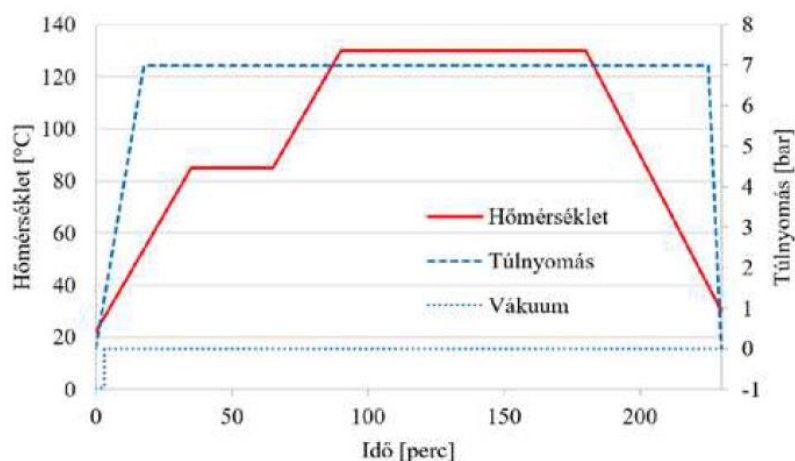
A térhálósítási ciklus folyamán alkalmazott technológiai paraméterek kulcsfontosságúak a sikeres termékgyártás szempontjából. Vákuumot, amely hozzájárul a termékben lévő légüregek számának és méretének csökkentéséhez, gyakran csak a ciklus kezdeti szakaszában alkalmaznak, amíg 1 bar túlnyomás fel nem épül az autokláv belsejében, de akár a ciklus egészére vákuum alatt maradhat a termék. Az autoklávban uralkodó nyomás a termékre külső nyomásként hat. A terméket leggyakrabban 6-7 bar túlnyomásnak teszik ki, amit a ciklus utolsó szakaszának, a hűtési fázisnak a végéig fenntartanak. A túlnyomás kompaktálja a terméket, és csökkenti a légüregek számát és méretét [16, 19].

A legfontosabb feldolgozási paraméternek a hőmérséklet tekinthető. A precízen szabályozott hőciklus a megfelelő minőségű termék gyártásának alapja. A felfűtési sebesség befolyásolja a mátrix viszkozitás esésének mértékét a ciklus során. Túl alacsony felfűtési sebesség alkalmazása esetén a mátrix viszkozitása nem csökken le a szükséges folyóképesség biztosításához szükséges mértékben, ami a termék tulajdonságainak romlásához, a gyártás sikertelenségéhez vezethet. Ezzel szemben a túl nagy felfűtési sebesség az optimálisnál nagyobb mértékű viszkozitás esést eredményezhet. Emellett különösen nagy falvastagságú termékeknél gyors felfűtés esetén egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás alakulhat ki a falvastagság mentén, illetve

előfordulhat, hogy az exoterm térhálósodási reakció során képződő hő nem tud eltávozni, ezáltal a termék túlhevülhet és akár károsodhat is [16, 19].

Ezen jelenségek kiküszöbölésére főleg gyorsabb felfűtési sebességek, illetve nagy falvastagságú termékek esetén gyakran beiktatnak a hőciklusba még a térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően egy a felfűtést ideiglenesen megszakító hőntartási szakaszt, ezt nevezzük platónak [19].

Egy jellegzetes, platót tartalmazó térhálósítási ciklust mutat be az 5. ábra.



5. ábra Egy jellegzetes térhálósítási ciklus, forrás: [19]

Az OOA technológiák közül a legnépszerűbb a VBO eljárás. Itt a rétegek szerszámba laminálása és a vákuumzsák felépítése az autoklávus eljárással megegyező módon történik, viszont a terméket többnyire kemencében térhálósítják. A termékekre tehát a ciklus során nem hat túlnyomás, kizárólag a vákuum és az emelt hőmérséklet befolyásolja a reakciót és a termékgyártást [5, 20].

Dinamikusan fejlődő technológia a prepreg préselés (Prepreg Compression Moulding, PCM). A technológia térnyerése rövid ciklusidejének – 3-5 perc – és nagyfokú automatizálhatóságának köszönhető, főként az autóiparban jelentős, karosszériaelemek előállítására használják. A kézi – vagy gépi – laminálást követően a lemezt előformázzák. Ehhez felmelegítik, a gyanta viszkozitás lecsökken, ezáltal a prepreg alakítható állapotba kerül. A lemezt egy szerszámon rugalmas membránnal előformázzák, majd hagyják lehűlni alakrögzítés céljából. Az előformázott lemezt szélezzik, majd egy fűtött présszerszámba helyezik; ahol kialakításra kerül a végső geometria [21].

A gyakorlatban viszonylag ritkán fordul elő az ún. quickstep eljárás. Első lépésként a prepreget egyoldalas szerszámra laminálják, majd erre vákuumzsákot építenek fel. Ezt követően a laminátot tartalmazó szerszámot egy nyomástartó kamrába helyezik, amelynek belső felületeit rugalmas membránok alkotják. A membránokkal egy nagy hőkapacitású, kiváló hővezető-képességű, ún. hőközlő folyadék segítségével a vákuumzsákon keresztül legfeljebb néhány bar nagyságrendű nyomást fejtenek ki a termékekre. A hőközlő folyadék lehetővé teszi a szerszám és a laminát gyors felfűtését

és lehűtését Az eljárással közepes méretű, jó minőségű kompozit termékek állíthatók elő [21].

2.1.4. Autoklávós és out-of-autoclave technológiák összehasonlítása

Az autoklávós és OOA technológiákat összevetve elmondható, hogy a legmagasabb minőséget és legjobb reprodukálhatóságot egyértelműen az autoklávós eljárás biztosítja. Ez részben a precízen kontrollált feldolgozási körülményekre vezethető vissza, másrészt a hőmérséklet a nyomás és a vákuum együttes alkalmazására a térhálósítási ciklus során. Az eljárás legnagyobb hátrányait a berendezés költségigénye és a feldolgozási folyamat magas energiaigénye jelentik [5].

Az OOA technológiák is egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek. Ennek oka, hogy bár általában gyengébb minőség mellett, de alkalmazásukkal nagymértékben csökkenthetők a gyártási költségek. A vákuumzsákos (Vacuum-Bag Only, VBO) technológiánál ennek alapjául a lényegesen egyszerűbb és olcsóbb feldolgozó berendezés szolgál, míg a prepreg préseléssel az autoklávós technológia másik jelentős hátrányát jelentő rendkívül hosszú ciklusidő csökkenthető, ezáltal fokozható a termelékenység [2, 21].

Az autoklávós és az autoklávon kívüli feldolgozásra szánt prepregok között van egy lényeges különbség. A kizárólag autoklávós technológiákkal feldolgozható prepregok esetében az erősítőanyagot teljes területén, a lehető legnagyobb mértékben előre átítatják, míg egyes, kizárólag OOA technológiákkal feldolgozható prepregok részben átítatott mikrostruktúrával rendelkeznek, gyantadús és gyantában szegény régiókból állnak. Ennek alapja, hogy az autoklávós eljárás esetén a termékre kifejtett túlnyomás megakadályozza a légüregek keletkezését és növekedését, ezzel ellentétben az OOA technológiáknál kizárólag a vákuum hat a kompozitra, ami nem képes ezen hatás kifejtésére, itt a száraz régiókon keresztül távozhat el a levegő. Emiatt míg autoklávós feldolgozásnál nincs szükség rendkívül alacsony gyantaviszkozitás elérésére, mivel az akár nem kívánt anyagáramokhoz (gyanta kiáramlás), vagy éppen nagyobb méretű légüregek kialakulásához is vezethet, az OOA technológiáknál a megfelelő gyártás alapja az alacsony viszkozitásértékek elérése, hiszen ezzel biztosítható a szálak megfelelő átítatottsága és a légüregek megszüntetése [22].

Bizonyos prepregok mindkét típusú technológiával feldolgozhatók. Ezek autoklávban történő térhálósításakor szintén a túlnyomás biztosítja a megfelelő termékminőséget, autoklávon kívüli feldolgozásuknál azonban az erősítőanyag megfelelő impregnáltságához és a légüregek méretének és számának csökkentéséhez alacsonyabb viszkozitásértékekre van szükség [22].

Az OOA technológiák, elsősorban a VBO eljárás számos kutatás témájaként szolgálnak, ezek célja a meglévő költséghatékonyság mellett minél magasabb, az autoklávós technológiáéval összevethető termékminőség elérése. Erre az egyik lehetőséget az alapanyagok fejlesztése jelenti. Dang és társai [23] egy UD szénszál

erősítésű, epoxi mátrixú, autoklávus gyártáshoz ajánlott prepreget hasonlítottak össze egy kimondottan OOA technológiához kifejlesztett, az előzővel megegyező erősítőanyagot tartalmazó és azonos felületi sűrűségű, epoxi mátrixú prepreggel. A prepregből egy-egy azonos geometriájú kompozit alkatrészt állítottak elő. Az OOA prepreg feldolgozását fűtött szerszámon, VBO módszerrel végezték. A prepregeket azonos hőciklus szerint térhálósították, mindkettő esetében az OOA prepreghez ajánlott értékeket alkalmazták. Paraméterek tekintetében a különbséget az autoklávus technológia esetén alkalmazott 90 psi≈6,21 bar abszolút nyomás jelentette. Az alkatrészből kialakított próbatesteken száltartalom-vizsgálatot és különböző mechanikai vizsgálatokat – szaktóvizsgálat, hajlítóvizsgálat, rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat, nyomóvizsgálat – végeztek. Azt tapasztalták, hogy az OOA prepregből készült alkatrész minden vizsgált mechanikai jellemzője összemérhető az autoklávban gyártott alkatrésznél mért értékekkel. Emellett kiemelendő, hogy az OOA eljárással gyártott termék nem tartalmazott szignifikánsan több légbuborékot, ezt az alkalmazott speciális epoxi gyantarendszer hatásának tekintették. Az egyedüli jelentős különbséget a száltartalom eloszlása jelentette, amely az autoklávban gyártott alkatrész esetén egyenletesebbnek bizonyult.

2.2. A prepregek feldolgozási paramétereikhez kapcsolódó vizsgálatok

Prepregből kiváló minőségű kompozit alkatrészek állíthatók elő, ehhez azonban elengedhetetlen egy szigorúan kontrollált, szabályozott lépésekből álló feldolgozási folyamat. A térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek hatással vannak a kompozit alkatrész tulajdonságaira. Ezekkel a hatásokkal, illetve a hozzájuk kapcsolódó vizsgálatokkal foglalkozom ezen alfejezetben [2].

2.2.1. A hőciklus hatásainak vizsgálata

Korábbi kutatásom során [4] a hőciklus paramétereinek a mátrix feldolgozás közbeni viselkedésére gyakorolt hatásaival foglalkoztam, amihez egy epoxi prepreg gyantán végeztem reológiai vizsgálatokat. A gyantát különböző felfűtési sebességekkel – 0,625, 1,25, 5 és 20°C/min – melegítettem a 120°C-os térhálósítási hőmérséklet elérésig, majd ott hőn tartottam. Eközben oszcillációs reométerrel detektáltam a viszkozitás alakulását. Céлом az volt, hogy megállapítsam, a felfűtés sebessége milyen hatással van a gyanta viszkozitásának változására, illetve a térhálósodási reakció kezdetére, emellett az egyes ciklusok folyamán mért legalacsonyabb viszkozitásértékekkel foglalkoztam részletesebben. Az eredmények azt mutatták, hogy a térhálósítási ciklus során a nagyobb felfűtési sebesség alacsonyabb viszkozitásértékekhez vezet, illetve gyorsabb felfűtés esetén a térhálósodási reakció csak magasabb hőmérsékleteken indul be. Az egyes felfűtési sebességek mellett jelentkező viszkozitás minimumok között pedig technológiai szempontból is jelentős különbségeket tapasztaltam.

Park és társai [5] egy szénszövettel erősített, epoxi mátrixú, autoklávus és OOA technológiával egyaránt feldolgozható prepreg térhálósításához kapcsolódóan végeztek kutatást. A gyártói ajánlásokat követve a prepregből kézi laminálással elkészített lemezek hőmérsékletét $1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ felfűtési sebességgel növelték, 65°C -on beiktattak egy 30 perces platót, majd ezt követően 180°C -on 2 órán keresztül végezték a térhálósítást. A lemezek vizsgálatakor azt tapasztalták, hogy az autoklávban gyártott kompozit jelentősen alacsonyabb porozitással és magasabb szálhányaddal, ezáltal jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezett, mint a VBO eljárással előállított. A tulajdonságok javítása érdekében az OOA prepreg térhálósítási ciklusát kívánták optimalizálni, amit a plató hőmérsékletének megváltoztatásával terveztek elérni. Ehhez 65 és 130°C között 8 különböző hőmérsékleten beiktatott platóval végeztek viszkozitásmérést. Azt tapasztalták, hogy a plató hőmérsékletét 65 -ről 130°C -ra növelve a viszkozitás közel egy nagyságrenddel alacsonyabb minimumértéket vesz fel. Autoklávus feldolgozásnál a magasabb viszkozitásértékek megfelelő minőséget eredményeznek, OOA technológia esetében azonban alacsonyabb értékekre van szükség a megfelelő impregnáltság eléréséhez és a légüregek megszüntetéséhez. Ezen eredmények alapján 130°C -os hőmérsékletű platóval, VBO eljárással végeztek gyártást. Az így előállított termék száltartalma megnőtt, porozitása lecsökkent, mechanikai tulajdonságai pedig közelebb kerültek az autoklávval gyártott termékéhez. Különösen nagymértékű javulást tapasztaltak a rétegek közötti nyírószilárdság tekintetében. Az eredmények igazolták azon feltevésüket, hogy az OOA technológiák az autoklávus eljárásnál alacsonyabb gyantaviszkozitást igényelnek, ami magas hőmérsékletű plató alkalmazásával biztosítható.

Costa és társai [24] azt vizsgálták, hogy a felfűtési sebesség, illetve a felfűtést megszakító hőtartási szakasz (plató) hőmérséklete miként befolyásolja a mátrix viselkedését autoklávus feldolgozás során, különös tekintettel viszkozitásának alakulására és a térhálósodás folyamatára. Ehhez szénszállal erősített, epoxi mátrixú prepreget használtak. $2,5$, 5 és $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 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 térhálókötések kialakulására, ami kontrolláltabb reakciót eredményez. Ezután a 177°C -os térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően a ciklusba beiktatott plató optimális hőmérsékletét kívánták meghatározni. Három különböző hőmérsékletű plató – 100 , 110 , 120°C – alkalmazásával végeztek vizsgálatokat, ezek közül a legalacsonyabb hőmérsékleten érték el a legjobb eredményeket. Arra a következtetésre jutottak, hogy a lassabb felfűtés és az alacsonyabb hőmérsékletű plató hatására a termék kevesebb légüregot tartalmaz, ami jobb mechanikai tulajdonságokat eredményez.

Dong és társai [2] egy repülőgépgyártásban alkalmazott, szívósított fenol-epoxi mátrixú, szénszál erősítésű UD prepreg térhálósítási ciklusát optimalizálták VBO technológiához. Fő céljuk az ideális technológiai paraméterek meghatározása volt a lehetőségek szerint legrövidebb ciklusidő mellett. Elsőként a felfűtési sebesség hatását

vizsgálták, kísérleteikhez a gyártó által javasolt 1,5°C/min és 5°C/min sebességértékeket alkalmazták. 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 viszkozitásának alakulásából következtek. Azt tapasztalták, hogy bár alacsonyabb felfűtési sebesség esetén a plató elérésekor nagyobb volt a térhálósági fok, ami a lassabb felfűtés miatt eltelt hosszabb idővel magyarázható, a ciklus további szakaszaiban már hasonló jelleget mutatott a térhálósági fok változása, majd a ciklus végéhez érkeve mindkét minta megfelelő mértékben térhálósodott. Ez alapján arra következtettek, hogy a gyorsabb felfűtés sem okoz problémát a térhálósodási reakcióra nézve. Ezután reométerrel detektálták a gyanta viszkozitását a hőciklus közben. Az adatok azt mutatták, hogy a mátrix viszkozitása mindkét esetben hasonló jelleggel csökken, illetve a várakozásoknak megfelelően a gyorsabb felfűtésnél alacsonyabb minimumértéket vesz fel – 6,9 Pa·s a 10,5 Pa·s-mal szemben –, ugyanakkor arra is következtetése jutottak, hogy ez a különbség nem okoz szignifikáns eltérést az erősítőanyag átítatottságában.

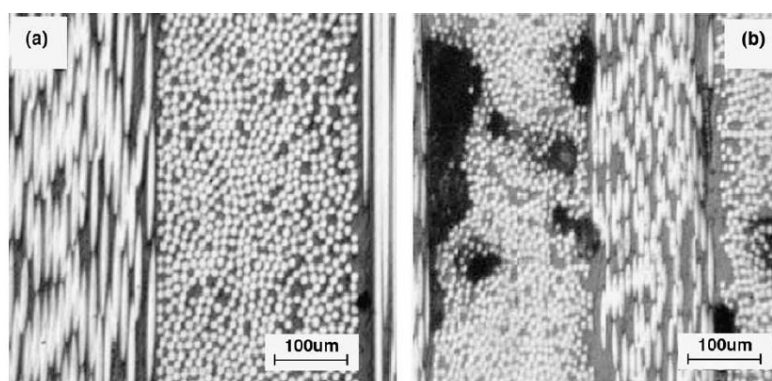
Agius és társai [25] a felfűtési sebesség hatásait kutatták szén/epoxi prepreg autoklávon kívüli, VBO eljárással történő térhálósítása esetén. Ehhez mérték a gyanta viszkozitásának alakulását a térhálósítási ciklus alatt 1,5 és 10°C/min felfűtési sebességek alkalmazása mellett, továbbá meghatározták a termék porozitásának mértékét, továbbá a légüregek méretét. Azt tapasztalták, hogy a gyorsabb felfűtéssel alacsonyabb viszkozitásértékek érhetők el, azonban amennyiben ez az érték túl alacsony, a mobilisabbá váló kisebb légüregek egyesülése révén nagyobb méretű pórusok alakulhatnak ki.

2.2.2. A nyomás hatásai

Olivier és társai [3] szén/epoxi prepreg autoklávós térhálósításával kapcsolatban végeztek kísérleteket. Kutatásuk célja az volt, hogy megismerjék a térhálósítási ciklus folyamán alkalmazott túlnyomás mértékének a termékben lévő légüregek mennyiségére és méretére, illetve a kompozit mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását. Előkísérletekkel, illetve a téma szakirodalmának áttekintését követően megállapították, hogy a rétegek közti nyírószilárdság a hajlító rugalmassági modulusz és a transzverzális húzó rugalmassági modulusz a leginkább érzékenyek arra, hogy a kompozit alkatrész milyen arányban tartalmaz légüregeket, így ezen tulajdonságok álltak a vizsgálataik középpontjában. Ezt követően különböző nyomásértékekkel – 1, 2, 5, 7 és 10 bar – gyártottak kompozit lemezeket, majd mérték ezek porozitását és az említett mechanikai jellemzőit. A termékgyártást és a vizsgálatokat két eltérő típusú prepreg esetében is elvégezték. Azt tapasztalták, hogy a túlnyomást 1 bar-ról egészen 7 bar értékig emelve a porozitás jelentős mértékben csökken, de e fölött a nyomás változtatása már nem befolyásolja érdemben sem a légüregek számát, sem méretüket. A porozitással párhuzamosan ugyanez a trend jelentkezett a mechanikai tulajdonságok tekintetében is. Az eredményeket értékelve megállapították, hogy

módszerükkel meghatározható egy a térhálósítási ciklushoz javasolt, közel optimális nyomásérték. Ehhez azonban fontosnak tartják a légüregek alakjának és eloszlásának figyelembevételét, mivel kísérleteik azt mutatták, hogy ez a két további tényező jelentős mértékben befolyásolja a kompozit vizsgált mechanikai tulajdonságait.

Liu és társai [26] is hasonló következtetésre jutottak a nyomás hatásának vizsgálatakor. A kísérleteket szintén szén/epoxi prepreggel végezték. Amennyiben az autoklávos gyártás során kizárólag vákuumot alkalmaztak, túlnyomást nem, 3,2 V%-os porozitást tapasztaltak, ami 6 bar túlnyomás mellett 0,6 V%-ra csökkent. A légüregek mennyiségének csökkenésével párhuzamosan a rétegek közötti nyírószilárdság és a hajlítószilárdság jelentős, a keresztirányú húzószilárdság pedig kis mértékben nőtt. A 6. ábrán látható két általuk készített optikai mikroszkópos felvétel, ami bemutatja a porozitásbeli különbséget a két említett esetben.



6. ábra A porozitás a) 6 bar, b) 0 bar túlnyomás alkalmazása esetén, forrás: [26]

2.3. Rétegek közötti tulajdonságok vizsgálata

A 2.2 alfejezetben bemutatott kutatások is arról tanúskodnak, hogy a prepregek kikeményítésének technológiai paraméterei jelentős hatást gyakorolnak az elkészült kompozit alkatrészek rétegek közötti tulajdonságaira. A rétegek közötti tulajdonságok vizsgálatára számos szabványos és nem szabványos módszer létezik, ezek közül néhányat és az ezekkel kapcsolatos kutatási eredményeket mutatom be az alábbi alfejezetben.

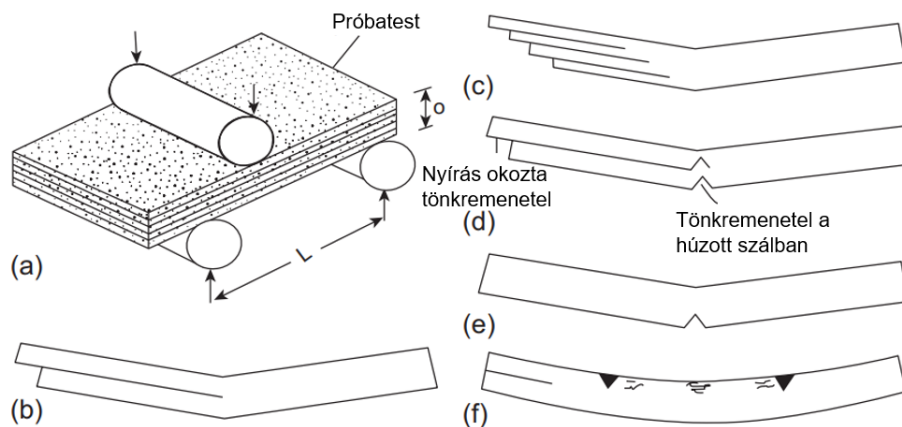
2.3.1. Rétegek közötti nyírószilárdság meghatározása

Az egyik legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott módszer a rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat (short-beam shear test, SBS test), amellyel meghatározható egy kompozit lemez rétegek közötti nyírószilárdsága. Ez egy szabványos vizsgálat, amelyet többek között az ISO 14130 és az ASTM D 2344 szabványok tárgyalnak. A vizsgálat elrendezése megegyezik a normál hárompontos hajlítóvizsgálatéval, azzal a különbséggel, hogy a lemezvastagsághoz viszonyítva

lényegesen kisebb az alátámasztási távolság, szabványtól függően a vastagság négyszerese vagy ötszöröse [27, 28].

A rövid támaszköz célja a hajlítófeszültség minimalizálása a lehető legnagyobb nyírófeszültség biztosítása mellett, így érhető el a nyírás okozta tönkremenetel. A keresztmetszeten belül a nyírófeszültség parabolikusan oszlik el, a próbatest középsíkjában veszi fel maximális értékét. A hajlítófeszültség ezzel szemben éppen a középső síkban, az ún. semleges szálban nulla. A nyírás okozta tönkremenetel ezért általában a középsíkból vagy annak környékéről indul ki. Ezáltal amennyiben rétegelválás jelentkezik, a mérés reális értéket ad a próbatest rétegeközi nyírószilárdságára [29].

A mért adatokból a tönkremenetelnél detektált erőérték felhasználásával számítható a rétegeközi nyírószilárdság. A vizsgálat értékelésekor különös figyelmet kell fordítani a próbatest tönkremenetelére. Kizárólag az egy vagy több határfelületen jelentkező, nyírás okozta tönkremenetel fogadható el, de sajnos felléphetnek a próbatest tönkremenetelének ettől eltérő típusai is. Gyakori deviáns tönkremeneteli mód a nyomó igénybevétel okozta tönkremenetel, főként a középső terhelő henger alatt, továbbá a klasszikus hajlítóvizsgálatra emlékeztető, húzott szálban ébredő tönkremenetel. Az sem ritka, hogy a nyíró igénybevétel okozta tönkremenetel együtt jelentkezik valamelyik egyéb típussal, a kiértékelés szempontjából ez a lehetőség is távol áll az ideálistól. A vizsgálati elrendezés és a tönkremenetel leggyakoribb típusai a 7. ábrán láthatók [30, 31].



7. ábra a) A SBS teszt elrendezése; Nyírás okozta tönkremenetel b) egy, c) több határfelületen; d) Nyírás + húzott szálban bekövetkező tönkremenetel; e) Tönkremenetel a húzott szálban; f) Nyírás mellett nyomó tönkremenetel a terhelő henger alatt és a nyomott oldalon, forrás: [31]

A módszernek természetesen vannak hátrányai, korlátai. Adams és Busse [32] vizsgálták az ASTM D 2344 szabvány szerinti eljárásváltozatot, majd eredményeik alapján javaslatokat fogalmaztak meg a módszer javítására. Két fő problémát neveznek meg a vizsgálat kapcsán. Egyrészt a rövid támaszköz miatt a terhelő erő és az alátámasztásoknál ébredő reakcióerők jelentős hatással vannak a teljes feszültségmezőre, ezáltal nem tudnak kialakulni olyan nagyobb méretű zónák, ahol a nyírófeszültség értéke állandó. A másik problémát a terhelő hengernél jelentkező

nagymértékű feszültségkoncentráció jelenti, ami gyakran a próbatest lokális tönkremeneteléhez vezet.

Előbbi problémára megoldásként a próbatest-vastagság (t) és az alátámasztási távolság (L) arányának növelését javasolták, míg utóbbira a hajlító feltét hengerátmérőinek növelését. Különböző L/t viszonyokkal végeztek vizsgálatokat üveg/epoxi, illetve szén/epoxi kompozit próbatestek felhasználásával. Azt tapasztalták, hogy a két méret arányának növelésével csökken a mért nyírószilárdság értéke, továbbá az L/t viszony függvényében változik a tönkremenetel típusa. Túl rövid támaszköz esetén nem tisztán nyíró, hanem nyomó jelleget is mutató, vegyes tönkremenetel jelentkezett, míg túl nagy alátámasztási távolság mellett már a hajlító igénybevétel dominált. Azt állapították meg, hogy az L/t arányt 4 és 9 között megválasztva a tönkremenetel általában megfelelő, de a legjobb eredményekhez az vezet, ha az alátámasztási távolság a lemezvastagság 6-7-szeresével egyezik meg [32].

A feszültségkoncentráció kiküszöbölését a hengerátmérők növelésével kívánták megvalósítani. A szabványos terhelő henger átmérőt – 0,25 inch $\approx$ 6,35 mm – négyszeresére növelve jobban eloszthatóvá vált a terhelés, és megszűnt a henger alatti koncentrált nyomó igénybevétel hatására jelentkező lokális tönkremenetel. Azt is megállapították, hogy a nagyobb hengerátmérő alkalmazásával csökkenthető az alátámasztási távolság hatása a szilárdság értékére és a tönkremenetel típusára. Kutatásukban foglalkoztak azzal is, hogy a kompozit erősítőanyagának típusa befolyásolja-e a terhelő henger átmérőjére való érzékenységet. Arra jutottak, hogy míg a hengerátmérő változtatása szén- vagy üvegszál erősítés esetén jelentős különbséghez vezetett az eredményekben, addig a jóval szívósabb aramidszállal történő erősítés esetén lényegesen kisebb hatással volt a vizsgálat végkimenetelére [32].

Epoxi mátrixú, üvegszállal erősített, egyirányú szálelrendezésű prepregből gyártott kompozitok rövid támaszközű hajlítóvizsgálatával több kutatás is foglalkozik.

Fernando és Al-Khodairi a Hexcel által gyártott 913-as epoxi gyantát tartalmazó, E-üveggel unidirekcionálisan erősített prereggel dolgoztak. Az általuk használt prepregben a gyanta tömegaránya 30% volt, ami kb. 53 V%-os száltartalomnak felel meg. 16 réteg prepreget egymásra lamináltak, ami 2,5 mm körüli vastagságot eredményezett, majd a lemezt fűtött szerszámban történő préseléssel, a gyártói ajánlásoknak megfelelően térhálósították. Emellett olyan lemezeket is gyártottak, ahol minden réteg közé felvittek egy réteg 913-as gyantafilmet, ettől a módszertől a rétegek közötti tulajdonságok javulását várták. A lemezekből kialakított próbatesteken rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztek. A referencia lemez esetében 83 MPa értékű átlagos rétegek közötti nyírószilárdságot tapasztaltak 4 MPa szórással, míg a gyantafilmmel gyártott lemez esetében a rétegek közötti nyírószilárdság ezt kis mértékben meghaladó, 83,7 MPa-os értéket vett fel, 2,4 MPa értékű szórás mellett. Várakozásaikkal ellentétben tehát nem tapasztaltak jelentős növekedést a rétegek közötti nyírószilárdság tekintetében [33].

Wisnom és Jones [34] a mérethatás jelenségét vizsgálták üvegszállal unidirekcionálisan erősített, epoxi mátrixú prepregből gyártott kompozitok esetén. A

vizsgálatokhoz a Hexcel E-üveg/913 epoxi prepregjét alkalmazták. A lemezeket 120°C-on autoklávban térhálósították, a térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően pedig 90°C-on beiktattak a hőciklusba egy platót, hogy ezáltal elkerüljék a túlzott mértékű hőfejlődést. Három vastagsággal gyártottak lemezeket – 16 réteg $\approx$ 2 mm, 32 réteg $\approx$ 4 mm és 64 réteg $\approx$ 8 mm –, a ciklusban a plató hosszát a vastagság függvényében növelték. Az így előállított lemezekből kivágott próbatesteken SBS vizsgálatokat végeztek a lemezvastagság ötszörösével megegyező alátámasztási távolsággal. A kísérletekhez alkalmazott hajlítófeltét hengereinek méretét is növelték a vastagsággal és az alátámasztási távolsággal párhuzamosan, a hengerek sugara minden esetben az alátámasztási távolság értékének felével volt azonos. A vizsgálatok folyamán jelentős mérethatást tapasztaltak. Az eredmények értékelésekor arra jutottak, hogy míg a 16 rétegből felépülő lemez esetén a rétegek közötti nyírószilárdság átlagértéke 4,9%-os szórás mellett 97 MPa, addig a vastagabb próbatestek esetében ez jelentősen csökken. A 32 rétegből gyártott lemez esetén az említett szilárdság átlagértéke 90,4 MPa volt, míg a legvastagabb, 64 rétegből álló lemeznél a rétegek közötti nyírószilárdság már csak 85 MPa átlagértéket vett fel. Előbbi lemez esetében 4,3%, míg utóbbinál 3,1%-os szórást tapasztaltak.

Számos más vizsgálati módszer létezik, amellyel meghatározható polimer kompozitok rétegek közötti nyírószilárdsága. Egy ilyen eljárás a Iosipescu-teszt, amellyel a rétegek közötti nyírószilárdság mellett a nyíró modulus értéke is meghatározható. A vizsgálat egy viszonylag vastag, két oldalán V alakú bemetszést tartalmazó kompozit próbatest és egy speciális befogó segítségével történik. Bár elméletben a vizsgálat alkalmas a nyírószilárdság az SBS tesztnél pontosabb meghatározására, a gyakorlatban mégis ritkábban alkalmazzák. Ennek oka, hogy lényegesen bonyolultabb a vizsgálat, az eredményeket számos körülmény és tényező befolyásolja, amelyekkel a mért eredményeket korrigálni kell. A másik hátrányt maga a próbatest jelenti, amely egyrészt jelentős vastagsága – min. 20 mm – miatt kevésbé releváns gyakorlati szempontból, másrészt előkészítése nehézkes és rendkívül költséges, a bemetszések geometriájára kimondottan érzékeny a vizsgálat [35].

2.3.2. Törésmechanikai vizsgálatok

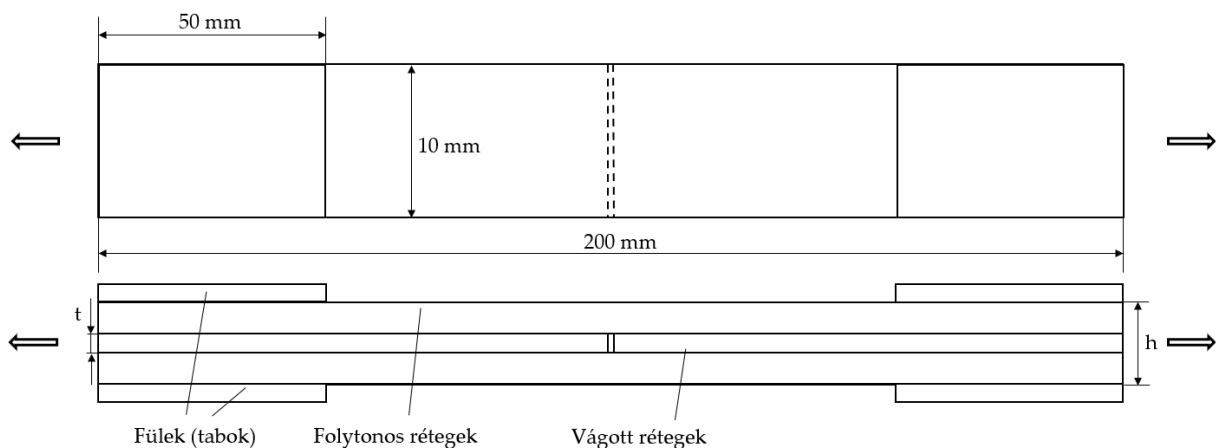
A kompozitok tönkremenetelét meglehetősen gyakran okozza rétegelválás így kimondottan fontos, hogy megfelelő információkkal rendelkezünk arról, hogy mikor lép fel ez a jelenség. A tönkremenetel előrejelzése többnyire törésmechanikai megközelítéssel történik, ehhez azonban szükséges a G_c paraméter, az ún. kritikus repedésterjesztő erő ismerete. Ezen paraméter nagysága függ a tönkremenetelt okozó I-es nyitó, illetve II-es nyíró igénybevételi módok arányától. A G_c meghatározása úgy történik, hogy a tisztán I-es, illetve II-es módot jellemző kritikus repedésterjesztő erőt előbb külön-külön méri, majd ezekből a megfelelő összefüggés alkalmazásával már számítható a paraméter értéke [36].

Wisnom [36] foglalkozott a kritikus repedésterjesztő erő meghatározásával tisztán nyíró mód hatására jelentkező rétegelválás esetén. Ehhez egy kimondottan egyszerű módszert alkalmaztak, amelynek lényege, hogy egy több réteg üveg/epoxi prepregből felépített kompozit középső egy vagy több rétegét a teljes szélesség mentén átvágták. Az így kialakított próbatest-geometriát a 8. ábra szemlélteti. A próbatesteket ezt követően szakítóvizsgálatnak vetették alá. A mérések során a vágott rétegek végei között a mátrix már alacsony terhelés mellett tönkrement. A terhelést tovább növelve pedig a próbatest tisztán II-es módnak tekinthető igénybevétel hatására, a folytonos és vágott rétegek közti rétegelválással ment tönkre. A $G_{II,C}$ [N/mm] kritikus repedésterjesztő erő értéke az (1) egyenletben szereplő összefüggéssel számítható:

$$G_{II,C} = \frac{\sigma^2 h t}{4E(h - t)} \quad (1)$$

ahol:

- E a szálirányú rugalmassági modulusz [GPa],
- σ a teljes keresztmetszettel számított húzófeszültség [MPa]
- t a vágott rétegek vastagsága [mm],
- h a próbatest teljes vastagsága [mm].



8. ábra A vágott réteget tartalmazó próbatestek geometriája, forrás: [35]

Wisnom [36] illetve Cui és társai [37] egyaránt foglalkoztak az egyes rétegek vastagságának a $G_{II,C}$ paraméterre gyakorolt hatásával. Azt tapasztalták, hogy a vastagsággal változik, méghozzá nő a paraméter értéke, ez igazolta azt a feltevést, hogy a $G_{II,C}$ nem tisztán anyagparaméter, hanem több tényező, többek között a geometria is befolyásolja.

A kritikus repedésterjesztő erő meghatározására léteznek szabványosított vizsgálatok is, I-es mód esetén a „Double Cantilever Beam” (DCB), II-es mód esetén az „End-Notched Flexure” (ENF) vizsgálat alkalmas erre. A DCB vizsgálat viszonylag egyszerűen kivitelezhető, ám gyakorlati jelentősége kisebb, mivel a nyitó terhelési módot a termék tervezésekor igyekeznek kiküszöbölni. Az ENF-hez használatos

próbatest kialakítása, illetve a vizsgálat végrehajtása pedig lényegesen bonyolultabb, mint a szakításra visszavezethető módszer [38].

2.4. Az irodalomkutatás kritikai elemzése

Irodalomkutatásom során a prepregek térhálósításához kapcsolódó szakirodalommal foglalkoztam. Prepregből kiváló minőségű kompozit alkatrészek állíthatók elő, ehhez azonban elengedhetetlen egy szigorúan kontrollált térhálósítási ciklus. A feldolgozás során alkalmazott technológiai paraméterek, elsősorban a felfűtési sebesség, a nyomás, illetve a plató beiktatása és paraméterei jelentős mértékben befolyásolják a gyártandó kompozit alkatrész szerkezetét és tulajdonságait.

A szakirodalomban fellelt kutatások eredményei azt mutatják, hogy a magasabb felfűtési sebesség alacsonyabb viszkozitásértékekhez vezet, ami befolyásolhatja a kompozitból eltávozó gyanta mennyiséget, ezáltal a kialakuló száltartalmat, továbbá hatással lehet a légüregek számára és méretére, illetve a szálak átitatottságára is. A plató megállítja a viszkozitás csökkenését, közel konstans értéken tartja azt, de a hőn tartás ideje alatt a térhálósítási reakció is előrehalad, így a plató hőmérséklete jelentős mértékben befolyásolja szerepét.

Nem elhanyagolható az sem, hogy milyen technológiával történik a prepreg feldolgozása. Az autoklávos technológiához szánt prepregek feldolgozása magasabb viszkozitásértékek mellett történik, míg OOA technológiáknál az erősítőanyag megfelelő impregnáltsága és a levegő eltávolítása csak alacsonyabb viszkozitásértékek mellett biztosítható. A túl alacsony viszkozitás azonban egyik technológia szempontjából sem előnyös, mert nagy méretű légüregek kialakulásához, illetve a gyantatartalom jelentős mértékű csökkenéséhez vezethet. Ezen tényezőket szem előtt kell tartani a térhálósítási ciklus megtervezésekor, különösen a felfűtési sebesség, illetve a plató hőmérsékletének megválasztásakor.

A nyomás mint technológiai paraméter hatását tekintve elmondható, hogy a nyomás növelése alapvetően a termék porozitásának csökkenéséhez vezet. A megismert kutatások azonban azt mutatják, hogy a porozitás érzékenysége az alkalmazott nyomás értékére alapanyagonként eltérő, amit a vizsgálati eredmények értékelésekor és a következtetések levonásakor nem szabad figyelmen kívül hagyni.

A túlnyomás alkalmazásának vizsgálata azonos hőciklus mellett autoklávban és autoklávon kívül is térhálósítható prepregek esetén lehetőséget ad a két eljárás csoport közvetlen összehasonlítására. Ezzel a lehetőséggel több általam tanulmányozott kutatás is élt, itt azonban fontos megjegyezni, hogy mivel hasonló termékminőség – porozitás és mechanikai tulajdonságok – eléréséhez OOA feldolgozás esetén alacsonyabb viszkozitásértékek szükségesek, mint az autoklávos eljárásnál, így az adott felfűtési sebességgel, autoklávon kívül gyártott termékek szerkezetét és tulajdonságait érdemes lehet összevetni a lassabb felfűtés mellett, autoklávban gyártott termékeknel tapasztaltakkal.

Több kutatás is arra jutott, hogy a technológiai paraméterek és az általuk okozott száltartalom- és porozitásbeli eltérések kompozit tulajdonságaira gyakorolt hatása jelentős. Azt állapították meg, hogy az említett szerkezetbeli eltérésekre a rétegek közötti tulajdonságok a legérzékenyebbek. Ezen kutatásokkal szemben kritikaként megfogalmazható, hogy a rétegek közötti tulajdonságokra vonatkozó vizsgálatokat kizárólag egyfajta, szabványos (ISO 14130) hengerátmérővel végzett rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálatok alapján vonták le. Ez a vizsgálati módszer hengerátmérőre való érzékenysége miatt akár téves következtetésekhez is vezethet. Különösen igaz ez az említett szabvány szerint elvégzett vizsgálatokra, mivel az rendkívül kis hengerátmérőt ír elő – a középső henger esetében 10 mm, míg az alátámasztást biztosító hengereknél 4 mm. Emellett fontosnak tartom a paraméterek rétegek közötti tulajdonságokra kifejtett hatásainak egyéb mérőszámokkal való jellemzését, ilyen lehet többek között a rétegelválás jelentkezése és előrejelzése szempontjából lényeges $G_{II,C}$ kritikus repedésterjesztő erő.

A fellelt szakirodalom alapján kijelenthető, hogy a számos előremutató kutatási eredmény ellenére számtalan kérdés megválaszolatlan maradt a technológiai paraméterek prepregből készült alkatrészek szerkezetére és tulajdonságaira gyakorolt hatásait illetően, a diplomamunka keretein belül végzett kutatásomban ezek egy részére kívántam választ találni.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Az alábbi fejezetben mutatom be részletesen a diplomamunka keretein belül felhasznált alapanyagokat, alkalmazott berendezéseket, illetve az elvégzett vizsgálatok módszertanát. Mindezek részletes ismertetésének célja a kutatás reprodukálhatóságának biztosítása.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Ezen alfejezetben a diplomamunka témájául szolgáló kutatáshoz felhasznált alapanyagok kerülnek bemutatásra.

3.1.1. Előkísérletek alapanyaga

Az előkísérletekhez a Microtex Composites X2-120 elnevezésű prepregjéből gyártottam kompozit lemezeket. 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 9. ábrán látható a gyártást megelőzően, kiterített állapotban, a megfelelő méretű rétegek kivágása közben. A prepreg mind autoklávus, mind OOA technológiákkal feldolgozható. [39]



9. ábra Az előkísérletekhez felhasznált prepreg

3.1.2. A vizsgált prepregben található epoxi mátrix

A vizsgálatoknál alkalmazott prepreg HexPly 913 (Hexcel) típusú epoxi mátrixanyagot tartalmaz. A gyanta 34 g/m² felületi sűrűségű, B állapotú gyantafilmként állt rendelkezésemre, ezt egymásra rétegezve alakítottam ki a viszkozitásméréshez szükséges geometriájú mintát. Az 1. táblázatban foglaltam össze a gyanta néhány jellemzőjét [40].

Anyag	913 epoxi
Húzószilárdság [MPa]	65,5
Húzó rugalmassági modulusz [GPa]	3,39
Sűrűség térhálósított állapotban [g/cm ³]	1,23

1. táblázat A HexPly 913 epoxi prepreggyanta néhány jellemzője, forrás: [40]

Az adott gyanta használatát két fő tényező indokolta. Egyrészt a mátrixanyag feldolgozható nemcsak autoklávus, hanem OOA technológiákkal is, ami lehetővé tette a leggyakoribb ilyen technológiának számító VBO eljárás és az autoklávus feldolgozás összehasonlítását. Emellett a másik motivációt az jelentette, hogy a HexPly 913 típusú epoxigyanta és az abból készült prepregok számos kutatás alapjául szolgáltak, vizsgálatuk jelentős szakirodalmi háttérrel rendelkezik, többek között a rétegek közötti tulajdonságokra vonatkozóan is.

A gyártó a technikai adatlapon a gyanta autoklávus feldolgozására vonatkozóan számos ajánlást tesz: [40]

- 2°C/min felfűtési sebesség,
- térhálósítás 125°C-on,
- 1 óra hőn tartás a térhálósítási hőmérsékleten,
- térhálósítás 7 bar túlnyomáson.

Az adatlap szerint a gyártó a hőciklusba beiktatott plató használatát 3 mm-es termékvastagság fölött javasolja. A plató időtartamára vonatkozóan 20-30 perc, míg hőmérsékletét illetően 80-100°C szerepel az adatlapon [40].

3.1.3. A lemezgyártáshoz felhasznált prepreg

A lemezgyártáshoz, majd az ezt követő vizsgálatokhoz alkalmazott prepreg mátrixanyagaként a 3.1.2 alfejezetben bemutatott HexPly 913 epoxi prepreggyanta szolgált. Ezáltal a reológiai vizsgálatok tapasztalatai közvetlenül felhasználhatók a mechanikai és egyéb vizsgálatok eredményeinek magyarázatára. A felhasznált prepreg üvegszálerősítésű. Az erősítőanyag az AGY által gyártott UD elrendezésű S-üvegből készült rovingokból áll. Az erősítőanyag néhány jellemzőjét tartalmazza a 2. táblázat, míg a prepreg egyes tulajdonságait a 3. táblázatban foglaltam össze [41].

Típus	AGY Y110-S-2 üvegszál
Húzószilárdság [MPa]	4890
Húzó rugalmassági modulusz [GPa]	89
Szakadási nyúlás [%]	5,7
Sűrűség [g/cm ³]	2,47

2. táblázat Az erősítőanyag jellemzői, forrás: [41]

Típus	S-üveg/913 prepreg
Erősítőanyag felületi sűrűsége [g/m ²]	190
Szálhányad [-]	0,51
Rétegvastagság térhálósítás után [mm]	0,152
Húzó rugalmassági modulusz [GPa]	45,6
Szakadási nyúlás [%]	3,05

3. táblázat A prepreg jellemzői, a gyártótól származó adatok alapján becsült értékek, forrás: [40, 41]

3.1.4. *Segédanyagok*

A lemezgyártáshoz szükséges vákuumzsák felépítéséhez – mind az előkísérletekhez, mind az ezt követő vizsgálatokhoz előállított kompozit lemezek esetében – a Polimertechnika Tanszék által biztosított segédanyagokat használtam, ezek a következők: formaleválasztó fólia, perforált fólia (bleeder), vákuumfilc (breather), vákuumfólia és nagy hőállóságú vákuumtömítő szalag.

A mikroszkópos vizsgálatokhoz a mintákat átlátszó epoxi öntőgyantába ágyaztam be. A beágyazó anyagot az MR3012 jelzésű gyanta és az MH 3122 jelzésű térhálósítószer bekeverésével állítottam elő. A gyantához térhálósítószert tömeg szerint 100:40 arányban adtam hozzá [42].

Az előkísérleteknél végrehajtott szakítóvizsgálatok esetében a próbatestek tabolásához üvegszállal erősített epoxi lemezeket használtam, amelyeket Araldite 2011 típusú kétkomponensű epoxi ragasztóanyaggal rögzítettem a kompozit lemezekhez.

3.2. Alkalmazott berendezések

Az alábbi alfejezet tartalmazza a próbatestgyártáshoz- és előkészítéshez, továbbá az előkísérletekhez és az azokat követő vizsgálatokhoz alkalmazott berendezések részletes ismertetését.

3.2.1. *A próbatestgyártás és -előkészítés berendezései*

Az előkísérletekhez használt szén/epoxi, illetve a kutatás későbbi fázisában alkalmazott üveg/epoxi kompozit lemezek előállításához egyaránt a BME Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszékének Olmar ATC 1100/2000 típusú autoklávját használtam. A berendezéssel legfeljebb 260°C-os hőmérséklet és 10 bar nyomás biztosítható. A maximális felfűtési sebesség 2°C/min [43].

A üveg/epoxi mintákból a mikroszkópi csiszolatokat Buehler Beta polírozógép alkalmazásával készítettem el. A berendezés percenkénti 30 és 600 fordulat közötti tartományban szabályozható [44].

3.2.2. *Reológiai vizsgálatokhoz alkalmazott berendezés*

A viszkozitásmérést a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyész- és Biomérnöki Karának Szerves Kémia és Technológia Tanszékén található, TA AR2000 típusú komplex reométerrel végeztem. A reométer alkalmas oszcillációs, illetve rotációs módban történő viszkozitásmérésre is, segítségével végezhetők izoterm mérések, illetve különbözőhőmérsékleti profilok – adott sebességgel történő felfűtési fázisok, hőn tartás meghatározott ideig – is megvalósíthatók, ezáltal lehetővé

teszi a gyanta térhálósítási ciklus közben mutatott viselkedésének vizsgálatát. A reométer típusa megegyezik az irodalomkutatás 2.2 alfejezetében bemutatott kutatásoknál használt berendezések típusával. Az alkalmazott reométert a 10. ábra szemlélteti [45].



10. ábra TA AR2000 típusú reométer

3.2.3. Mechanikai vizsgálatokhoz használt berendezések

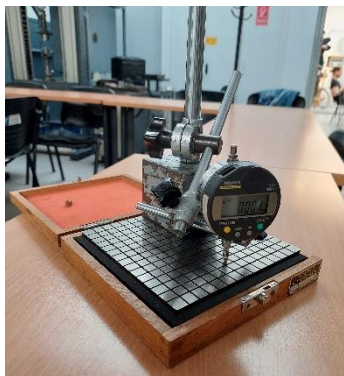
Az előkísérletek során a szakítóvizsgálatokat, majd a későbbiekben a rétegek közötti tulajdonságok egytengelyű húzásra visszavezetett mechanikai vizsgálatait Zwick Z250 250 kN mérőhatárú univerzális szakítógéppel segítségével hajtottam végre. A fajlagos nyúlások pontos követéséhez Mercury Monet DIC optikai nyúlásmérő berendezést alkalmaztam. A szakítóvizsgálatokat 100 kN felső erőkorláttal rendelkező, kézi működtetésű ékpályás befogóval végeztem [46, 47].

A rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatokhoz szintén a Zwick Z250 típusú univerzális szakítógépet alkalmaztam. Itt az ISO 14130 szabványnak megfelelő hajlítófeltétellel végeztem vizsgálatokat. A próbatestek tönkremenetelét Mercury Monet DIC berendezés segítségével követtem nyomon [27].

A hárompontos hajlításhoz az előkísérletek és a kutatás későbbi szakaszában elvégzett vizsgálatok során egyaránt Zwick Z20 típusú, 20 kN mérőhatárú univerzális szakítógépet alkalmaztam az ISO 14125 szabvány előírásainak megfelelő hárompontos hajlítófeltétellel [48].

A normál és a rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatok esetében a próbatest vastagságának pontos meghatározása kulcsfontosságú, mivel jelentős mértékben befolyásolja az eredményeket, ezért a vastagságmérést akkreditált mérőasztalon, század milliméteres pontossággal végeztem a 11. ábra szerinti elrendezésben elrendezésben Mitutoyo ID-C112B típusú digitális mérőórával. A mérési hibák kiküszöbölése érdekében a mintát minden esetben úgy helyeztem a

mérőasztalra, hogy az a termék szerszámmal érintkező, jobb síklapúsággal rendelkező felületével találkozzon.



11. ábra A vastagságméréshez alkalmazott elrendezés

3.2.4. Egyéb vizsgálatok berendezései

A minták sűrűségét a Sartorius gyártó Quintix 125D típusú mérlegével határoztam meg. A mérleg a megfelelő feltét és mérési elrendezés alkalmazása mellett a sűrűség értékét g/cm^3 -ben 3 tizedesjegy pontossággal adja meg.

A száltartalom kiégetéssel történő meghatározását Denkal 6B típusú izzító kemencében végeztem, amely $50\text{--}1100^\circ\text{C}$ -os hőmérséklettartományban történő hevítést tesz lehetővé [49].

A kompozit termékek száltartalmát TGA Q500 (TA Instruments) termogravimetriás berendezéssel (TGA) is vizsgáltam. A mérőberendezés vizsgálati hőmérséklettartománya: $23\text{--}1000^\circ\text{C}$ [50].

A beágyazást követően elkészített csiszolatokat Olympus BX51M típusú optikai mikroszkóppal vizsgáltam. A mikroszkóp legfeljebb százszoros nagyítást tesz lehetővé [51].

3.3. Vizsgálati módszerek

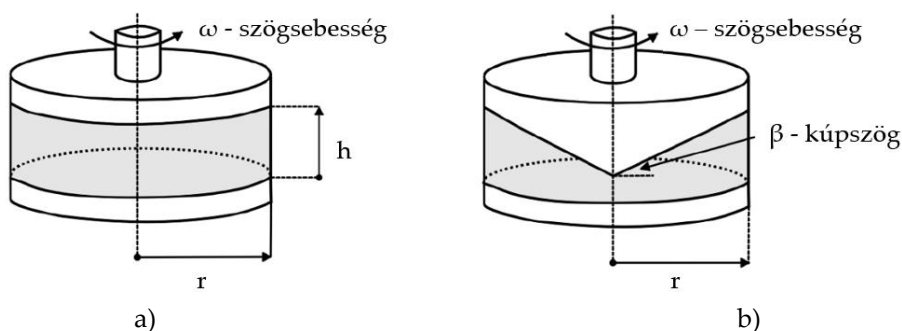
Ezen alfejezetben kerül bemutatásra a kutatás során végrehajtott vizsgálatok módszertana.

3.3.1. Reológiai vizsgálatok

A viszkozitásmérést a 3.2.2 alfejezetben részletesen bemutatott TA AR 2000 típusú komplex reométerrel végeztem. A mérés lényege, hogy a vizsgálandó anyag a két adott geometriájú tárcsa közötti, pontosan beállított méretű résben helyezkedik el, azt tölti ki. Az egyik tárcsa – jellemzően az alsó – fix, míg a másik a működési módnak megfelelően oszcilláló vagy rotációs mozgást végez meghatározott szögsebességgel – illetve oszcillációs mód esetén frekvenciával –, ezáltal nyíró deformációnak teszi ki a

vizsgált anyagot. A vizsgálat lehet deformáció- vagy feszültségvezérelt. Előbbi esetben a berendezés meghatározott mértékben deformálja a vizsgált anyagot, míg utóbbinál az anyagra a berendezés által kifejtett nyomaték értéke adott. Előbbi vizsgálati mód számít elterjedtebbnek, én is ezt alkalmaztam méréseim során. [51]

Deformációvezérelt módban a berendezés a tárcsa elforgatásához, tehát az anyag meghatározott mértékű alakváltozásának eléréséhez szükséges nyomatékot detektálja. A beállított paraméterek és a berendezés által kifejtett nyomaték értékeinek segítségével a berendezés meghatározza az anyagban ébredő nyírófeszültséget, majd ebből a viszkozitás értékét. Emellett számos egyéb jellemző is meghatározható a mérés eredményeiből, többek között az anyag viszkoelasztikus jellemzőiről is szerezhetünk információt reométeres vizsgálattal. Fontos paraméter a mérési elrendezés, tehát az anyaggal közvetlenül érintkező tárcsák geometriája. A két leggyakoribb elrendezést és legfontosabb geometriai jellemzőiket mutatja be a 12. ábra [52, 53].



12. ábra a) Sík-sík elrendezés, b) Kúp-sík elrendezés, forrás: [53]

A mérési mód és elrendezés megválasztása mindig a vizsgálandó alapanyag függvényében történik. Kutatásom során a szakirodalmi ajánlásoknak megfelelően a térhálós anyagok viszkozitásának meghatározásához legalkalmasabb, deformációvezérelt, oszcillációs módban és sík-sík elrendezésben történő mérés mellett döntöttem [52].

A vizsgálatokat 25 mm átmérőjű sík alumínium tárcsákkal végeztem. A kísérletekhez 1%-os alakváltozást állítottam be, további bemenő paraméterekként pedig 2 rad/s szögsebességet és 10 Hz frekvenciát alkalmaztam. A tárcsák közötti résméretet 1000 μm -re vettem fel.

Munkám során négy viszkozitásmérést hajtottam végre eltérő beállításokkal, amelyek célja az volt, hogy meghatározzam, a hőciklusba a végleges térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően beiktatható plató alkalmazása, illetve hőmérsékletének megválasztása milyen hatást gyakorol a gyanta viszkozitásának alakulására és a térhálósodási reakcióra. A kísérletek folyamán a hőciklus paramétereit a gyanta technikai adatlapját szem előtt tartva választottam meg, a pontos okokat és célokat a 4. fejezetben ismertetem.

Ennek megfelelően a négy vizsgálat az alábbi paraméterekkel zajlott:

- 2°C/min felfűtési sebesség, térhálósítás 125°C-on, legfeljebb 1 óra hőn tartással,

- 2°C/min felfűtési sebesség, plató 90°C-on 25 perces hőntartási idővel, majd térhálósítás 125°C-on, legfeljebb 1 óra hőn tartással,
- 2°C/min felfűtési sebesség, legfeljebb 1 óra hőn tartás 90°C-on,
- 2°C/min felfűtési sebesség, legfeljebb 1 óra hőn tartás 110°C-on.

3.3.2. Sűrűség- és száltartalom mérés

A száltartalmat mind az előkísérletek, mind a későbbi vizsgálatok során két eltérő módszerrel, kemencében történő kiégetéssel és termogravimetriával határoztam meg. Emellett meghatároztam a száltartalommal szorosan összefüggő sűrűséget is. A vizsgálatokhoz a 3.2.4 alfejezetben bemutatott berendezések kerültek felhasználásra.

A kiégetés során az egyes lemezekből 5-5 db 15x30 mm alapterületű mintát vizsgáltam. A mintákat 4 órán keresztül tartottam hőn, az előkísérletek szén/epoxi mintáinál az erősítőanyag oxidációjának elkerülése végett alacsonyabb, 400°C-os hőmérsékletet alkalmaztam, míg az üveg/epoxi mintákat 550°C-os hőmérsékletnek tettem ki. A minták kiégetés utáni, illetve kiégetés előtti tömegének hányadosaként határoztam meg a tömegszázalékban vett száltartalmat. Ezt számítottam át szál térfogathányaddá az erősítőanyag és a mátrix sűrűségének felhasználásával, a (2) egyenletben szereplő összefüggéssel:

$$v_f = \frac{V_f}{V_f + V_m} = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} = \frac{\frac{m_f M}{\rho_f}}{\frac{m_f M}{\rho_f} + (1 - m_f) \frac{M}{\rho_m}} = \frac{m_f}{m_f + (1 - m_f) \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (2)$$

ahol:

- v_f a szálhányad [-],
- V_f a szálak térfogata [cm³],
- V_m a mátrix térfogata [cm³],
- M_f a szálak tömege [g],
- M_m a mátrix tömege [g],
- ρ_f a szálak sűrűsége [g/cm³],
- ρ_m a mátrix sűrűsége [g/cm³],
- M a kompozit tömege [g]
- m_f a szálak tömegaránya [-].

A kiégetésnél jóval pontosabb módszer a termogravimetriai analízis. Termogravimetriával a minta tömegváltozása detektálható a hőmérséklet függvényében. A mérés során a mintákat platina tégelybe vagy tálcára helyezük, majd ezzel együtt egy elektromosan fűtött kemencébe tesszük. A kemence atmoszféráját kitöltő gáz megválasztása a vizsgálat céljának függvényében történik. A minta tömegének detektálása a mérési térben egy speciális analitikai mérleggel történik, amit termomérlegnek nevezünk. A TGA vizsgálatok során a mintákat

5°C/min sebességgel, nitrogén közegben hevítettem 650°C-ra, miközben detektáltam a tömegük változását. A vizsgálat végén a visszamaradó tömeg megadta a tömegszázalékban mért száltartalmat [54]. Ezt szintén a (2) egyenletben szereplő összefüggés segítségével számítottam át szál térfogataránnyá.

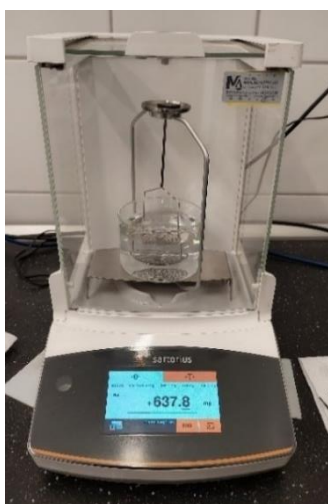
A (2) egyenlet tömör kompozitokra vonatkozik, így csak alacsony porozitás esetén érvényes, a kompozit elméleti szál térfogatarányát adja meg. A pontosabbnak tekinthető TGA módszerrel meghatározott térfogathányadból keverékszabállyal becsültem meg a tömör kompozit elméleti sűrűségét a (3) egyenlet szerint: [1]

$$\rho_k = v_f \rho_f + (1 - v_f) \rho_m \quad (3)$$

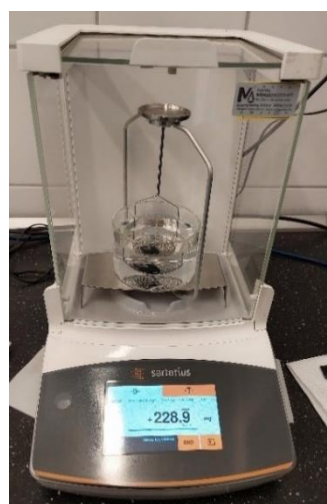
ahol:

- v_f a szálhányad [-],
- ρ_f a szálak sűrűsége [g/cm³],
- ρ_m a mátrix sűrűsége [g/cm³],
- ρ_k a kompozit sűrűsége [g/cm³].

Ezt követően az előállított lemezek valós sűrűségét arkhimédészi elven határoztam meg a 3.2.4 alfejezetben ismertetett mérleg segítségével. Ehhez a próbatestek tömegmérését levegőben, majd ismert sűrűségű mérőközegben is elvégeztem. Mérőközegként desztillált vizet alkalmaztam. Az előkísérletek esetében a helyiség hőmérséklete 24°C volt, itt a desztillált víz sűrűsége 0,99732 g/cm³. Az üveg/epoxi minták vizsgálatánál tapasztalt 24,4°C-os környezeti hőmérsékletén ez az érték 0,99722 g/cm³. Az egyes lemezek esetében 5-5 mintát vizsgáltam. A 13. a) és b) ábra mutatja be 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

Az ASTM D2374 szabvány ajánlásainak megfelelően a térfogatszázalékban értelmezett porozitás becsülhető a sűrűség elméleti és arkhimédészi elven meghatározott értékei alapján, a (4) egyenletben szereplő összefüggéssel: [55]

$$p = \frac{\rho_{k,elm} - \rho_{k,mért}}{\rho_{k,elm}} \cdot 100 \quad (4)$$

ahol:

- p a porozitás [V%],
- ρ_{elm} a tömör kompozit elméleti sűrűsége [g/cm³],
- $\rho_{mért}$ a kompozit valós, mért sűrűsége [g/cm³].

A kompozit valós sűrűségének ismerete a tömegszázalékban meghatározott száltartalom pontosabb szál térfogatarányára történő átszámítását teszi lehetővé az (5) egyenletnek megfelelően:

$$v_f = \frac{m_f \rho_{k,mért}}{\rho_f} \quad (5)$$

ahol:

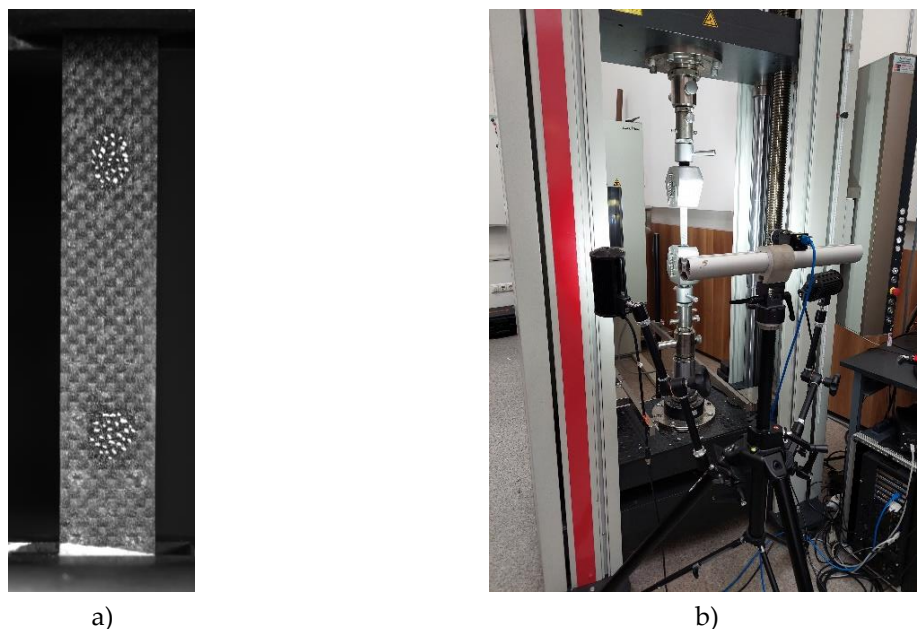
- v_f a szálhányad [-],
- $\rho_{k,mért}$ a kompozit sűrűsége [g/cm³].
- m_f a szálak tömegaránya [-],
- ρ_f a szálak sűrűsége [g/cm³].

3.3.3. Mechanikai vizsgálatok

Az előkísérletekhez előállított szén/epoxi lemezekből kialakított próbatesteken szakító- és hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztem. A szakítóvizsgálatokat az ASTM D3039 szabvány előírásainak megfelelően végeztem el 2 mm/min 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 fülekkel (tabokkal) láttam el, ezt a folyamatot nevezik tabolásnak. Célja, hogy a próbatest tönkremenetele ne a befogópofáknál, hanem 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 [56].

A szakítóvizsgálatnál a próbatestek alakváltozását Mercury 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 egymástól 70 mm távolságra két megfelelő kontraszttal rendelkező területet, amelyekre ráilleszthetők az optikai

nyúlásmérő „célpontjai”. A szakítóvizsgálat közben az optikai nyúlásmérő a célpontok követésével a közöttük kialakult szakasznak a hosszváltozását detektálta, s ebből határozta meg a próbatest alakváltozását. A 14. a) ábrán látható egy a DIC berendezés által a mérés közben készített fotó, míg a 14. b) ábra bemutatja a mérési elrendezést.



14. 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 [56].

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 a vizsgálatot a szövet kisserelésű erősítőanyag esetére javasolt elrendezésben végeztem el, 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 keresztfejelmozdulásból számítottam. A hárompontos hajlítóvizsgálat esetében a szabványban található összefüggések felhasználásával a mérési adatokból meghatároztam a próbatestek hajlítószilárdságát, a 10%-os határlehajlás elérése esetén határhajlító feszültségét, illetve a szabványnak megfelelően a 0,0005 és 0,0025 értékű nyúlásokhoz tartozó lehajlásértékek segítségével a hajlító rugalmassági moduluszt [57].

Az üveg/epoxi prepregből, különböző paraméterekkel, autoklávban gyártott lemezekből kivágott próbatesteken több, különböző mechanikai vizsgálatot végeztem.

Elsőként hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztem szintén a kompozitok hajlítását tárgyaló MSZ EN ISO 14125 szabványnak megfelelően. A szabvány unidirekcionális elrendezésű üvegszálás erősítést tartalmazó kompozitokra vonatkozó előírásait követve 15 mm széles, a 3 mm névleges vastagság 30-szorosának megfelelő 90 mm hosszúságú próbatesteket alakítottam ki, alátámasztási távolságként pedig a vastagság 20-szorosát, 60 mm-t állítottam be. A hajlítóvizsgálatokat 2 mm/min sebességgel hajtottam végre, előterhelésnek szintén 2 N-t állítottam be. A vizsgálatot az előkísérletekkel megegyező módon értékeltem ki. A hárompontos hajlítóvizsgálat mérési elrendezését a 15. ábra mutatja be [57].



15. ábra A hárompontos hajlítóvizsgálat mérési elrendezése

Ezt követően a rétegek közötti tulajdonságok meghatározásával foglalkoztam. Rövid támaszközzű hárompontos hajlítóvizsgálatot hajtottam végre. A méréseket alapvetően az MSZ EN ISO 14130 szabványnak megfelelően, minden lemez esetében 10-10 próbatest felhasználásával végeztem el. A szabvány előírásait szem előtt tartva, 3 mm-es névleges próbatest-vastagság (h) mellett a vizsgálatokat az alábbi paraméterekkel végeztem: [27]

- Próbatest hossza: $l = 10h = 30$ [mm],
- Próbatest szélessége: $b = 5h = 15$ [mm],
- Alátámasztási távolság: $L = 5h = 15$ [mm],
- Terhelő henger sugara: $r_1 = 5$ [mm],
- Alátámasztást adó hengerek sugara: $r_2 = 2$ [mm],
- 2 mm/min vizsgálati sebesség,
- 2 N előterhelés.

A vizsgálatot azonban a 2.3 alfejezetben ismertetett szempontokat figyelembe véve a szabvány által előírtnál nagyobb hengerátmérőkkel megismételtem. Ekkor 10 mm sugarú terhelő hengert és 5 mm sugarú alátámasztást alkalmaztam.

A vizsgálat értékelése szempontjából az elsődleges a tönkremenetel értékelése. Ennek pontosabb meghatározását elősegítve a próbatestek tönkremenetelét Mercury Monet DIC berendezéssel készített felvételeken is figyelemmel kísértem, majd

szemrevételezéses vizsgálatot végeztem. A kísérlet szempontjából a nyírás okozta, rétegek közötti törésmenetel tekinthető elfogadhatónak. A nyírás következtében törésmenettel próbatestek esetében a mért adatok felhasználásával meghatároztam a rétegek közötti nyírószilárdság értékét a (6) egyenletben szereplő képlet felhasználásával: [27]

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bh} \quad (6)$$

ahol:

- τ a rétegek közötti nyírószilárdság [MPa],
- F a törésmenettel pillanatában mért erő [N],
- b a próbatest szélessége [mm],
- h a próbatest vastagsága [mm].

A rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat mérési elrendezését a nagyobb átmérőjű hengerek esetén a 16. ábra szemlélteti.



16. ábra A rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat mérési elrendezése

Emellett végeztem szakításra visszavezethető vizsgálatokat a rétegek közötti tulajdonságok meghatározására, amelyekhez speciális geometriájú próbatesteket alkalmaztam. Kétféle próbatesttípussal dolgoztam, az egyik esetében a cél a nyírás hatására bekövetkező törésmenettel jellemző II. módú kritikus repedésterjesztő erő ($G_{II,C}$) értékének meghatározása volt, míg a másik esetben a rétegek közötti nyírószilárdságot kívántam meghatározni. A próbatestek geometriájának tervezését és kialakítását a 4.8 alfejezetben mutatom be részletesen. A vizsgálatokat 250 mm hosszúságú, speciális szakítópróbatesteken végeztem. A mintákra a befogásnál 50-50 mm hosszan ragasztószalag segítségével csiszolópapírt rögzítettem. Ez segített megelőzni a próbatesteknek az éles körmöket tartalmazó befogópofával érintkező felületein bekövetkező törésmenettel. A kísérleteket 2 mm/min vizsgálati sebességgel és 10 N előterheléssel hajtottam végre. A próbatestek alakváltozását optikai nyúlásméréssel rögzítettem. Ezáltal kiküszöbölhető számos, a nyúlás keresztfejl-elmozdulásból történő számítása esetén a mérési eredményeket terhelő pontatlanság. Az alakváltozás méréséhez a próbatesteken egymástól 100 mm távolságra feljelöltem két megfelelő kontraszttal rendelkező területet, amelyekre ráilleszthetők az optikai nyúlásmérő rendszer célkeresztjei.

3.3.4. Mikroszkópos vizsgálat

A lemezekből vett keresztmetszeti mintákat epoxi gyantába ágyaztam be, majd csiszoltam és políroztam őket a 3.2.1 alfejezetben bemutatott berendezés segítségével. A csiszolást folyóvíz alatt, négy különböző szemcseméretű – P180, P500, P1000, P2000 – csiszolópapírral végeztem 50 1/perc fordulatszámmon. Ezt követően polírkendő és 1 μm szemcseméretű szuszpenzió alkalmazásával alakítottam ki a végleges felületi minőséget. Az előkészített mintákat optikai mikroszkópos vizsgálatnak vetettem alá. Két, különböző paraméterekkel gyártott lemezből vett 3-3 db, 10x15 mm-es mintát vizsgáltam. A mikroszkóp segítségével a minták jellemző felületeiről különböző nagyításokban felvételeket készítettem, majd ezek alapján összevetettem az egyes lemezek porozitását. A beágyazott és polírozott mintákat a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra A mikroszkópos vizsgálat beágyazott, polírozott mintái

4. A TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

Az alábbi fejezetben a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek kompozit lemezek szerkezetére és tulajdonságaira gyakorolt hatásait vizsgáltam.

4.1. Előkísérletek

A kutatómunkát előkísérletekkel kezdtem, amelyek során különböző paraméterekkel állítottam elő prepregből autoklávban kompozit lemezeket. Az előkísérletek alapanyagául a kompozitiparban gyakran alkalmazott, szénszövettel erősített, epoxi mátrixú prepreget választottam. Célom az volt, hogy a hőciklusbeli eltéréseknek a kompozit szerkezetére és tulajdonságaira gyakorolt hatásait vizsgáljam. Emellett a hangsúlyt annak megállapítására helyeztem, hogy az említett hatások milyen vizsgálati módszerekkel mutathatók ki, ahol természetesen minél egyszerűbb eljárások használatára törekedtem.

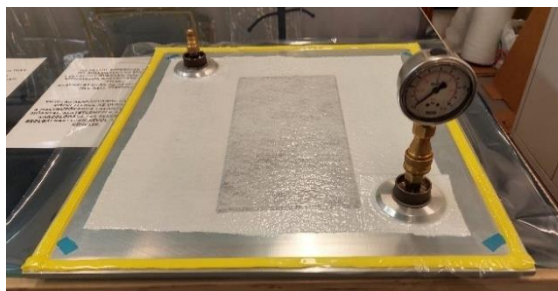
Elsőként a kompozitok száltartalmát határoztam meg különböző módszerekkel, majd szakító- és hárompontos hajlítóvizsgálatokat végeztem. Az előkísérletek eredményeiből levontam a szükséges következtetéseket, és ezek alapján alakítottam ki a további munkaszakaszhoz a kísérlettervet.

4.1.1. Szén-epoxi kompozit lemezek előállítás

A próbatestek előállításához először meghatároztam a rétegrendet és a gyártandó kompozit lemezek méreteit. 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.

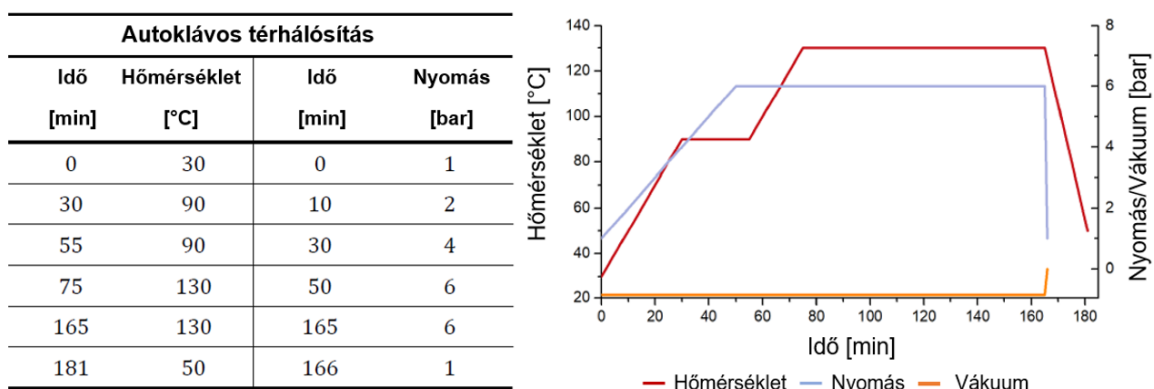
Első lépésként a tekercs formában rendelkezésre álló prepreget feldaraboltam, ezután a rétegeket egymásra helyeztem, a laminálást néhány rétegenként megszakítottam, hogy a lemezt vákuum alá helyezve konszolidáljam, ennek célja a légüregek megszüntetése és a rétegek jobb tapadásának elősegítése volt. A lemezek gyártásához sík alumínium szerszámlapot használtam. A szerszámra formaleválasztó fóliát tettem, erre ráfektettem a prepregből összeállított kompozit lemezt, majd felépítettem a vákuumzsákot. Először felhelyeztem a szükséges technológiai rétegeket. A kompozit lemezre perforált fóliát (bleeder) tettem, amely lehetővé teszi a gyanta eltávozását térhálósítás közben. Erre került a vákuumterítő paplan (breather), amelynek feladata a vákuum eloszlatása a zsákon belül. Ezután következett a vákuumfólia felhelyezése vákuumtömítő szalag segítségével. A szerszámra két vákuumcsatlakozót helyeztem, mivel autoklávos gyártás folyamán az egyik

csatlakozó segítségével helyezzük vákuum alá a terméket, 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. A levákuumozott prepreg lemez a teszt elvégzése közben látható a 18. ábrán.



18. ábra A levákuumozott prepreg lemez a zsák ellenőrzése közben

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.

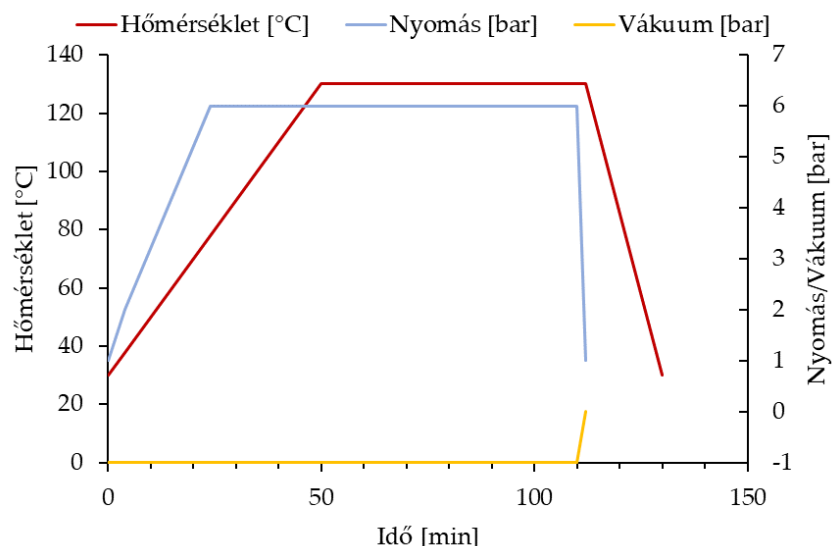


19. ábra A technikai adatlapon előírt térhálósítási ciklus, forrás: [39]

A 19. ábrán látható, hogy az adatlap $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 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 hőn tartást 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 $1,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ körül volt.

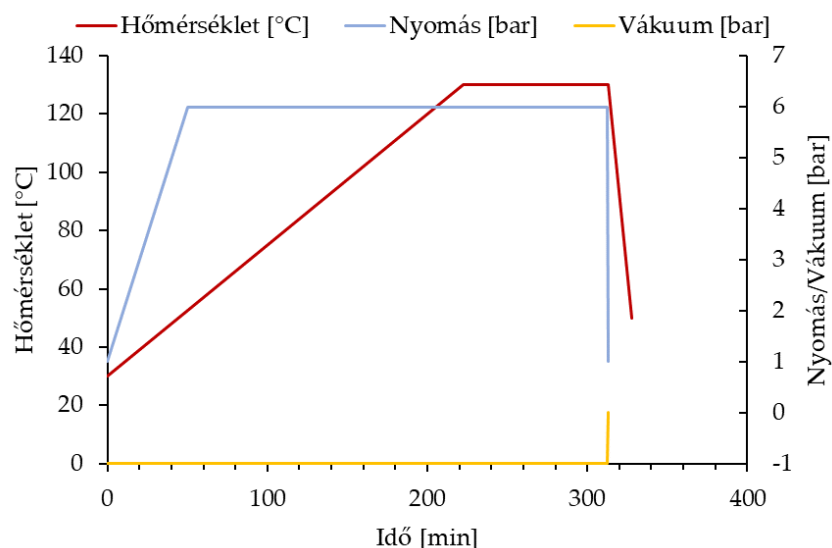
Itt megjegyezném, hogy adatlapi paraméterekkel a kutatás utolsó szakaszában gyártottam még egy lemezt. Ezt a mechanikai vizsgálatoknál tapasztalt jelenségek miatt, kontrollmérések elvégzéséhez gyártottam. Az ehhez kapcsolódó okokat és célokat a 4.1.5 alfejezetben fejtem ki részletesebben.

A 2. gyártás autokláv ciklusában a felfűtési sebességet az előző gyártásával megegyező értékre, $1,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ -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 hőn tartást. 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 $1,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ sebesség negyedét állítottam be. A hőmérséklet tehát a ciklus közben percenként $0,45^{\circ}\text{C}$ -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

Az előkísérletek esetében alkalmazott különböző térhálósítási ciklusok főbb jellemzőit a 4. táblázatban foglaltam össze.

#	Elnevezés	Felfűtési sebesség [°C/min]	Túl-nyomás [bar]	Plató	Plató jellemzői	Térhálósítási hőmérséklet [°C]	Hőntartás ideje [min]
1.	Adatlapi	1,8	5	van	25 perc, 90°C	130	90
2.	Adatlapi felfűtés plató nélkül	1,8	5	nincs	-	130	90
3.	Lassú felfűtés plató nélkül	0,45	5	nincs	-	130	90

4. táblázat Az előkísérletek esetében alkalmazott térhálósítási ciklusok főbb jellemzői

4.1.2. Száltartalom mérés

A száltartalom és a sűrűség mérését a 3.3.2 alfejezetben bemutatott módon hajtottam végre. A száltartalmat termogravimetriával és kiégetéssel vizsgáltam, majd a tömegszázalékban kapott száltartalmat átszámítottam szál térfogataránnyá, továbbá megbecsültem a tömör kompozitra jellemző elméleti sűrűség értékét. Ezen eredményeket tartalmazza az 5. táblázat

Próbatest típusa	TGA			Kiégetés		
	Szál tömegarány [m%]	Tömör kompozit becsült szál térfogataránya [V%]	Tömör kompozit becsült sűrűsége [g/cm³]	Szál tömegarány [m%]	Tömör kompozit becsült szál térfogataránya [V%]	Tömör kompozit becsült sűrűsége [g/cm³]
1. – Adatlapi	52,56 (0,78)	42,48	1,455	64,67 (3,51)	54,96	1,529
2. – Adatlapi felfűtés plató nélkül	55,93 (0,89)	45,83	1,475	67,60 (3,78)	58,18	1,549
3. – Lassú felfűtés plató nélkül	52,88 (0,54)	42,80	1,457	64,94 (3,26)	55,25	1,531

5. táblázat A TGA és a kiégetés eredményei, zárójelben a relatív szórás relatív százalékban

Az 5. táblázat eredményeiből látható, hogy a két módszer eredményei bár azonos trendet mutatnak, értéküket tekintve lényegesen eltérnek egymástól. Az adatlap szerint az alkalmazott prepreg 48%-os gyanta tömegaránnyal, ezáltal 52%-os szál tömegaránnyal rendelkezik, ez a TGA eredményeivel mutat egyezést. A kiégetett mintákat vizsgálva visszamaradó gyanta jeleit is tapasztaltam, erre vezethetők vissza a kapott magasabb értékek. A mátrix megfelelő eltávolítása magasabb hőmérséklet értékeket igényelt volna, de a levegő közeg miatt ekkor vélhetően már a szén erősítőanyag oxidációja is jelentős mértékben megindult volna. Ezzel szemben a TGA-nál alkalmazott nitrogén közeg lehetővé teszi magasabb hőmérsékletek alkalmazását, ezáltal jelentősen pontosabb eredményhez vezet.

A minták sűrűségét ezt követően arkhimédészi elven határoztam meg, ennek eredményeit a 6. táblázatban foglaltam össze.

Próbatest típusa	Sűrűség [g/cm ³]
1. – Adatlapi	1,448 (0,55)
2. – Adatlapi felfűtés plató nélkül	1,470 (0,34)
3. – Lassú felfűtés plató nélkül	1,453 (0,62)

6. táblázat A mért sűrűség értékek és zárójelben relatív szórásuk

A 6. táblázatban szereplő mérési eredmények csak kis mértékben térnek el a TGA-ból becsült sűrűség értékektől, ez arra utal, hogy alacsony a kompozit porozitása, így a kompozit jellemzésére elfogadhatónak tekinthető a TGA-ból átszámított, az egyébként a tömör kompozitra érvényes szál térfogatarány értéke.

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 lehet 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.

4.1.3. Szakítóvizsgálat

Az előkísérleteket a mechanikai tulajdonságok vizsgálatával folytattam, első lépésként a 3.3.3 alfejezetben bemutatott szakítóvizsgálatot végeztem el. A mérési adatokból a szabvány összefüggéseinek felhasználásával meghatároztam a próbatestek húzószilárdságát és rugalmassági modulusát. A kísérlet során minden gyártásból 5-5 próbatestet vizsgáltam. A húzószilárdság és a húzó rugalmassági modulusz átlagos értékeit és a mért értékek szórását a 7. táblázat tartalmazza [42].

Próbatest típusa	Vastagság [mm]	Húzószilárdság [MPa]	Húzó rugalmassági modulusz [GPa]
1. – Adatlapi	2,07 (1,88)	516,1 (6,57)	50,91 (4,07)
2. - Adatlapi felfűtés plató nélkül	1,95 (3,06)	607,5 (1,07)	56,35 (2,11)
3. - Lassú felfűtés plató nélkül	2,06 (2,78)	556,4 (5,50)	51,27 (1,43)

7. táblázat A húzószilárdság és a húzó rugalmassági modulusz átlagos értékei, zárójelben a mért értékek relatív szórása százalékban (névleges szélesség: 25 mm)

A 7. 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 száltartalom 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, ennek mértéke azonban nagy teljesítményű kompozitok szakítóvizsgálatánál elfogadható.

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

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.

4.1.4. Hárompontos hajlítóvizsgálat

Ezután a 3.3.3 alfejezetben leírtaknak megfelelően hárompontos hajlítóvizsgálatot hajtottam végre. Mivel a mérések során az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő határlehajlás előtt tönkremenetelt tapasztaltam, így a szabványnak megfelelően meghatároztam a próbatestek hajlítószilárdságát. Emellett kiszámítottam a hajlító rugalmassági modulusz értékét is. A hajlítószilárdság és a hajlító rugalmassági modulusz átlagos értékeit és az adatok szórását tartalmazza a 8. táblázat.

Próbatest típusa	Vastagság [mm]	Hajlítószilárdság [MPa]	Hajlító rugalmassági modulusz [GPa]
1. – Adatlapi	2,06 (2,03)	670,6 (1,70)	24,94 (8,82)
2. - Adatlapi felfűtés plató nélkül	1,94 (2,26)	704,7 (3,33)	30,27 (2,02)
3. - Lassú felfűtés plató nélkül	2,07 (1,79)	677,4 (1,70)	26,52 (6,33)

8. táblázat A hajlítószilárdság és a hajlító rugalmassági modulusz átlagos értékei és zárójelben az adatok szórása százalékban (névleges szélesség: 15 mm, alátámasztási távolság: 32 mm)

Az eredményekből látható, hogy az adatlapi 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 szálaban 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 autoklávossal eljárásal gyártott termékek kiváló minőségét.

4.1.5. 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 moduluszának 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.

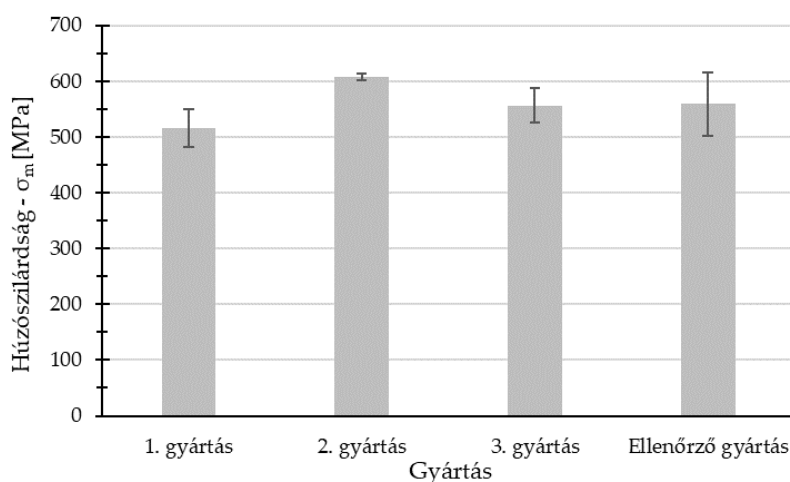
Feltevésem igazolására vagy cáfolására újabb próbagyártást végeztem az adatlapi ciklusnak megfelelően, tehát az 1. gyártással megegyező paraméterekkel. A szakító próbatestek előkészítésekor kiemelten figyeltem a megfelelő tabolás kialakítására. Ezt követően elvégeztem a többi lemezen is végrehajtott vizsgálatokat. Ezek eredményeit a 9. táblázatban hasonlítottam össze a szintén adatlapi 1. és az adatlapi gyártáshoz

hasznló tulajdonságokat mutató 3. lemezhez tartozó értékekkel. Az elvégzett mérésekkel kettős célom volt: egyrészt az 1. lemez húzási tulajdonságainak felülvizsgálata, másrészt a gyártás reprodukálhatóságának értékelése.

Próbatest típusa	1. - Adatlapi	3. - Lassú fűtés plató nélkül	Ellenőrző gyártás (adatlapi)
Szál tömegarány [m%] (TGA)	52,56 (0,78)	52,88 (0,54)	52,11 (0,44)
Becsült sűrűség [g/cm ³] (TGA)	1,455	1,457	1,415
Szál térfogatarány [V%] (TGA)	42,48	42,80	42,04
Mért sűrűség [g/cm ³]	1,448 (0,55)	1,453 (0,62)	1,450 (0,21)
Húzószilárdság [MPa]	516,1 (6,51)	556,4 (5,50)	558,9 (10,13)
Húzó rugalmassági modulusz [GPa]	50,91 (4,07)	51,27 (1,43)	52,09 (1,86)
Hajlítószilárdság [MPa]	670,6 (1,70)	677,4 (1,70)	677,9 (4,25)
Hajlító rug.mod. [GPa]	24,94 (8,82)	26,52 (6,33)	24,65 (2,55)

9. táblázat Az adatlapi paraméterekkel végzett ellenőrző gyártás eredményeinek összehasonlítása az 1. és a 3. gyártással, zárójelben az értékek relatív szórása százalékban

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 9. táblázatban összehasonlított húzószilárdságokat a 2. lemez (plató nélkül, gyors felfűtéssel gyártott) eredményeivel kiegészítve a 22. ábrán található diagramon is bemutatom.



22. 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 terhelte.

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 autoklávos gyártás egyik előnyeként emlegetett jó reprodukálhatóságot.

4.1.6. Előkísérletek eredményeinek értékelése, következtetések

Az előkísérletek során azt tapasztaltam, hogy a felfűtési sebesség változtatása, illetve a plató elhagyása vagy alkalmazása jelentős hatást gyakorol a kompozit száltartalmára, illetve mechanikai jellemzőire.

A szakító- és hajlítóvizsgálatok eredményeként azt tapasztaltam, hogy mind a gyorsabb felfűtés, mind a plató elhagyása jobb mechanikai tulajdonságokat eredményez. Ez vélhetően a ciklus során kialakuló alacsonyabb gyantaviszkozításra vezethető vissza, amelynek köszönhetően több gyanta távozik el, ami magasabb száltartalmat eredményez.

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 vizsgálatok módszertanát illetően is számos tapasztalattal gazdagodtam. A száltartalom vizsgálata során a TGA mérés pontos eredményre vezetett. A kiégetés szempontjából hátrányos volt, hogy a szén mint erősítőanyag alkalmazása korlátozta a hőmérsékletet, hiszen ez levegő közegben könnyen oxidálódik, ami téves

eredményekhez vezethet. Ez a jelenség nagyrészt kiküszöbölhető üveg erősítőanyag alkalmazásával.

A szakítóvizsgálatok eredményeit nagyban befolyásolja a tabolás minősége, ami megnehezíti azok értékelését és a következtetések levonását. Emellett arra jutottam, hogy mivel alapvetően a szálak veszik fel a terhelést, így itt a száltartalom a meghatározó. Mindezek alapján az egytengelyű húzóvizsgálatot nem tartom megfelelőnek a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek minősítésére.

A hajlítóvizsgálat során kevesebb a hibalehetőség, de eredményeit tekintve elmondható, hogy itt is a száltartalom dominál. Mivel azonban ez a vizsgálat jól működik, illetve egyszerűen kivitelezhető, ez ötletet adott arra, hogy a későbbiekben rövid támaszközű hajlítóvizsgálatot is végezzek, amellyel meghatározható a kompozit rétegek közti nyírószilárdsága.

A térhálósítási ciklus során alkalmazott paraméterek pontosabb értékeléséhez fontosnak tartom a rétegek közti tulajdonságok megismerését is, emellett a zavaró tényezők egy részének kiküszöbölésére érdemesnek tartom a szövet helyett az UD erősítőanyagra való áttérést.

4.2. Kísérletterv, kutatás célja

A kísérletterv összeállításakor figyelembe vettem az irodalomkutatásban feltárt, a kutatott témával foglalkozó publikációkat, illetve a szénszövettel erősített epoxi mátrixú prepregből gyártott kompozitokkal végzett előkísérleteim eredményeit és az azokból elvont következtetéseket is.

Kutatásom célja az volt, hogy megismerjem, a térhálósítási ciklus során alkalmazott nyomás, illetve a hőciklus legfontosabb paraméterei, a felfűtési sebesség és az esetlegesen beiktatott plató milyen hatással vannak a kompozitok szerkezetére és tulajdonságaira. A nyomás hatásának vizsgálata lehetővé tette továbbá az autoklávus és a legnépszerűbb OOA technológiának számító VBO eljárással gyártott termékek szerkezetének és tulajdonságainak összehasonlítását.

Vizsgálataimat UD üvegszál /epoxi kompozitokon végeztem. A továbbiakban elvégzett kutatás két részre osztható: mátrixanyaghoz kapcsolódó reológiai vizsgálatokra, illetve prepregből, különböző feldolgozási paraméterekkel gyártott lemezek szerkezetének és tulajdonságainak megismerését szolgáló kísérletekre.

Elsőként a mátrixanyaghoz kapcsolódó reológiai vizsgálatokat kívántam elvégezni, azzal a céllal, hogy ezek eredményeit és az itt szerzett tapasztalatokat a lemezgyártás, elsősorban a térhálósítási ciklusok tervezéséhez, továbbá a lemezek vizsgálataihoz hasznosítani tudjam. A vizsgálatokhoz ugyanazt a gyantát alkalmaztam, mint ami a termékgyártáshoz használt prepreg mátrixanyagként is szolgált. A felfűtési sebesség viszkozításra gyakorolt hatásával számos publikáció foglalkozik, belátható, hogy a gyorsabb felfűtés a térhálósítási ciklus során alacsonyabb viszkozitásértékeket

eredményez. Korábbi kutatómunkám keretei között én is végeztem kísérleteket ezzel kapcsolatban, így a reológiai mérésekkel ettől eltérő kérdésekre kívántam választ találni. Ennek megfelelően azzal foglalkoztam, hogy a plató alkalmazása, illetve hőmérsékletének megválasztása miként befolyásolja a gyanta feldolgozás közbeni viselkedését, elsősorban viszkozitásának alakulását és a térhálósodási reakciót.

Ezt követően áttértem a prepreghez kapcsolódó feladatokra. A technikai adatlapon szereplő gyártói ajánlásokat és a kutatás céljait szem előtt tartva meghatároztam az egyes térhálósítási ciklusok során alkalmazandó technológiai paramétereket. Összesen négy ciklussal gyártottam lemezeket, amelyeknek meghatároztam a sűrűségét és a száltartalmát, majd a lemezekből kialakított próbatesteken különböző mechanikai vizsgálatokat végeztem. Itt a szerkezeti változásokra leginkább érzékenynek tekinthető jellemzők vizsgálatával foglalkoztam, ezek a hajlító mechanikai tulajdonságok, illetve a rétegek közötti tulajdonságok.

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

4.3. Reológiai vizsgálatok

A kutatás első szakaszában a prepreg mátrixanyagán végeztem reológiai vizsgálatokat. A végrehajtott kísérleteket és azok eredményeit mutatom be ebben az alfejezetben.

4.3.1. Vizsgálati paraméterek meghatározása

Az első mérést az adatlapon előírt hőciklussal végeztem, ezáltal meghatároztam egy referenciagörbét, amely a gyantának a gyártó által optimálisnak tartott feldolgozás közbeni viselkedéséről ad tájékoztatást. A gyantát 2°C/min felfűtési sebességgel 125°C-ra hevítettem, majd ott hőn tartottam. 60 perces hőn tartást állítottam be, de a mérés hamarabb befejeződött, amennyiben a gyanta deformálásához szükséges nyomaték elérte a berendezés méréshatárát, 50 000 μNm -t.

Az összes mérésnél azonos, 2°C-os felfűtési sebességet alkalmaztam, ezt a paramétert nem változtattam, így valóban a plató beiktatásának, illetve hőmérsékletének hatásairól szerezhettem információkat.

A második mérésnél a 125°C-os térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően beillesztettem a hőciklusba egy platót. A plató hőmérsékletének és hosszának megválasztásakor szem előtt tartottam az adatlapon szereplő gyártói ajánlásokat, ez alapján a plató egy 90°C-on történő – ez az ajánlott hőmérséklet-tartomány közepe – 25 perces hőn tartást jelentett. Ennek leteltét követően fűtöttem tovább a gyantát a térhálósítási hőmérsékletre, ahol az előzővel azonos idejű, 1 órás hőn tartást állítottam be. Ez a kísérlet arról adott tájékoztatást, hogy miként befolyásolja a viszkozitás változását és a térhálósodási reakciót a gyártó által ajánlott plató alkalmazása.

A harmadik és negyedik méréssel a plató hőmérsékletének szerepéről kívántam további ismereteket szerezni. A harmadik vizsgálat esetében a gyantát 90°C-ra fűtöttem fel, majd ott 1 órán keresztül hőn tartottam. A negyedik, utolsó kísérletnél az epoxigyantát 110°C-ra melegítettem, a felfűtést pedig szintén egy 1 órás hőn tartás követte.

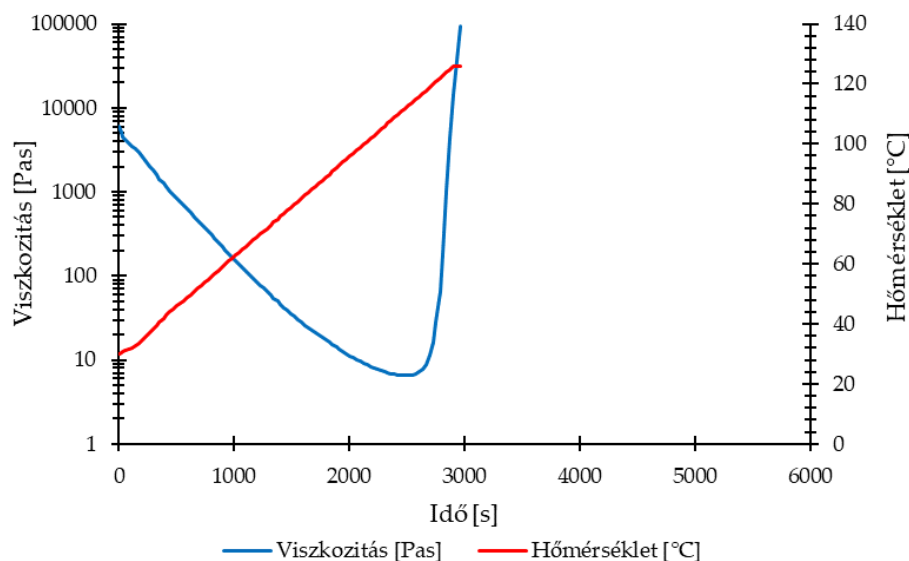
A mérésekhez a kamrát 30°C-ra előmelegítettem, innen indítottam a vizsgálatot. Ennek oka az volt, hogy szobahőmérsékleten a B állapotú gyanta deformációjához szükséges nyomaték meghaladta a gép által engedélyezett maximális értéket.

Az eredmények későbbi értékelése szempontjából fontos tényező, hogy a hőmérséklet detektálását végző szenzor a fűtőkamrában, az alsó tárcsa alatt helyezkedett el, tehát nem közvetlenül a vizsgálandó anyag hőmérsékletét mérte. Így a vizsgálat pontosságának fokozása érdekében a másik lehetőségként felmerülő acéltárcsákkal szemben alumínium tárcsák használata mellett döntöttem. Az alumínium az acélnál lényegesen jobb hővezető-képességgel rendelkezik, továbbá sűrűsége is alacsonyabb, ezáltal a tárcsák tömege is kisebb. Ez a két tényező hozzájárul ahhoz, hogy az anyag valós hőmérséklete és a mért hőmérséklet közti különbség minél kisebb legyen. Emellett a hibák minimalizálása érdekében törekedtem a mérés szempontjából megfelelő, de minél kisebb mennyiségű anyag használatára. Így igyekeztem elkerülni azt, hogy a gyantaréteg vastagsága mentén egyenlőtlen hőmérséklet-eloszlás alakuljon ki.

A mérés célja egyrészt a viszkozitásminimum, másrészt a platónál tapasztalható viszkozitásértékek meghatározása volt. Mindkét tényező jelentős mértékben befolyásolhatja az eltávozó gyanta mennyiségét, ezáltal a kompozit tényleges száltartalmát, továbbá hatással lehet a légüregek számára és méretére, illetve a szálak átitatottságára is. Ezek a kompozit szerkezetét érintő változások jelentős tulajdonságbeli eltéréseket eredményezhetnek. Az említett egzakt viszkozitásértékek mellett a kísérletekkel a plató használatának, illetve hőmérsékletének a gyanta viszkozitásának változására, illetve a térhálósodási reakció előrehaladására gyakorolt hatásait kívántam megismerni. Ennek megfelelően az eredmények értékelése során nagy hangsúlyt fektettem a tapasztalt trendekre is.

4.3.2. A reológiai vizsgálatok eredményei

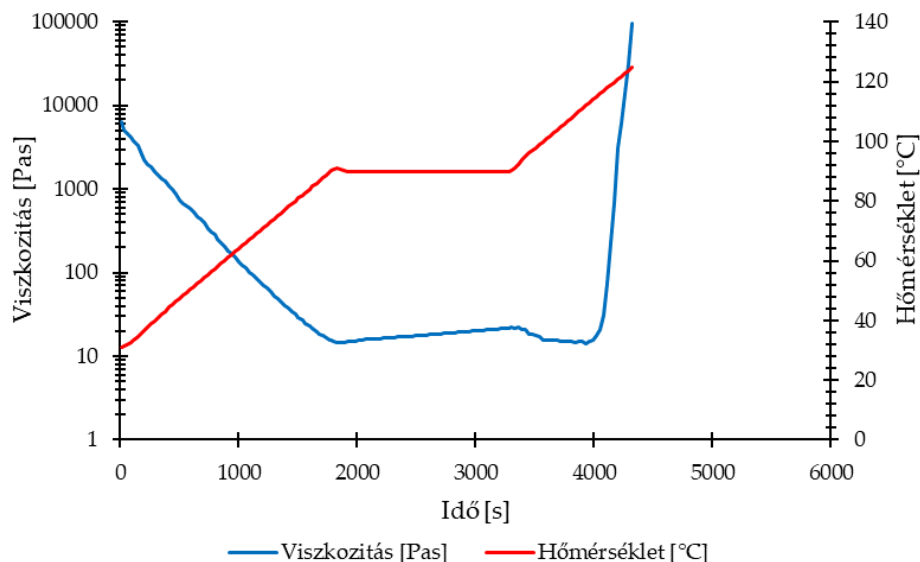
Az első, adatlapi hőciklussal végzett mérés folyamán felvett görbéket – viszkozitás, illetve hőmérséklet az idő függvényében – mutatja be a 23. ábra.



23. ábra Az adatlapi hőciklussal végzett viszkozitásmérés görbéi

A diagramon látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével a gyanta viszkozitása a B állapotban mért 6000 Pa·s körüli értékről lecsökken, 110°C-on éri el minimumát (6,60 Pa·s), ahol a térhálósodási reakció beindulásának eredményeként megáll a viszkozitáscsökkenés, és a térháló kötés pontok kialakulásával a gyanta viszkozitása növekedésnek indul. A reakció rendkívül gyorsan zajlik le, a 125°C-os hőtartási szakaszba érve a térhálósodás olyan mértékben előrehalad, hogy az anyag deformálásához szükséges nyomóerő megközelítőleg 90 másodperc elteltével eléri a berendezés méréshatárát.

A második mérés eredményeként kapott diagramot a 24. ábra szemlélteti.



24. ábra A platót tartalmazó hőciklussal végzett viszkozitásmérés eredményei

Ennél a vizsgálatnál a felfűtés során a gyanta viszkozitása szintén esésnek indul, azonban a viszkozitás csökkenését a 90°C-on történő hőtartás 15 Pa·s környékén megállítja. Látható, hogy a plató ideje alatt a viszkozitás értéke kis mértékben emelkedik, ami a térhálósodási reakció előrehaladásával, a térhálósági fok

növekedésével magyarázható. Mivel azonban a térhálósodás sebessége erősen hőmérsékletfüggő, így ezen a 125°C-os térhálósítási hőmérséklethez képest viszonylag alacsony hőfokon a reakció kimondottan lassan halad előre. Ennek eredményeként a viszkozitás a 25 perces plató végén is csak kb. 22 Pa·s-os értéket vesz fel. A hőmérséklet további emelésével a viszkozitás újra lecsökken, értéke azonban ekkorra sem megy 14 Pa·s alá. 110°C fölött a térhálósági fok és azzal párhuzamosan a viszkozitás is gyorsan nő, majd utóbbi még a térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően meghaladja a berendezés méréshatárát.

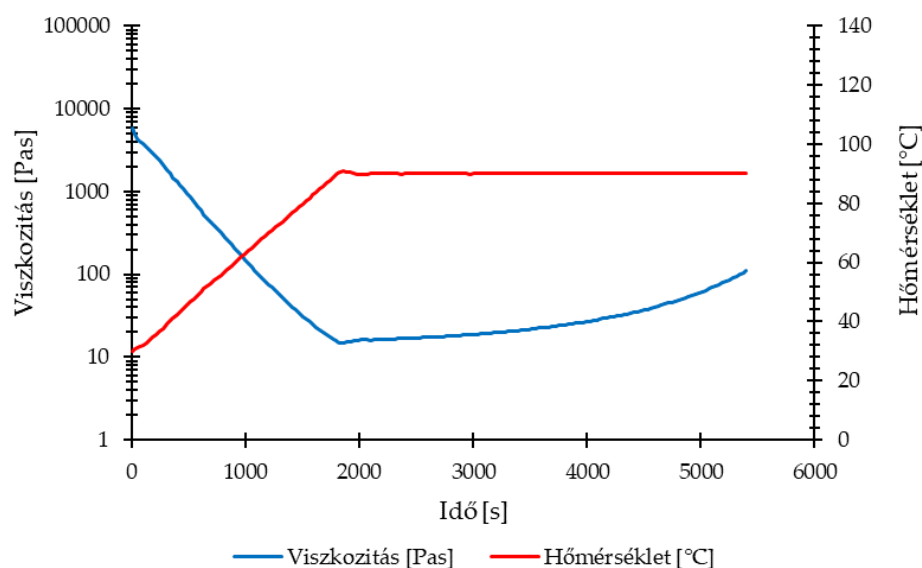
Az egyes méréseknél tapasztalt viszkozitásminimumokat és detektálásuk hőmérsékletét a 10. táblázat tartalmazza.

Mérés száma	Jellemző	Viszkozitás [Pa·s]	Hőmérséklet [°C]
1	Abszolút minimum	6,60	112,9
2	1. felfűtés és plató lokális minimuma	14,52	90,8
2	2. felfűtési szakasz lokális minimuma	14,13	111,9

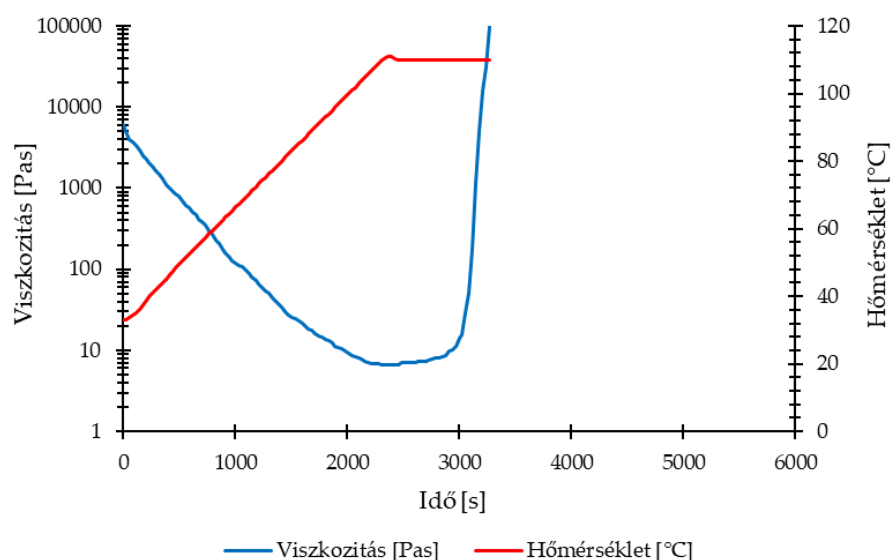
10. táblázat Az első két mérés viszkozitásminimumainak értékei és detektálásuk hőmérséklete

A 10. táblázat adatai alapján látható, hogy míg plató nélkül a viszkozitás minimuma 6,60 Pa·s, a platót tartalmazó ciklusban nem csökken 14 Pa·s alá. Utóbbi hőciklus esetén a plató elején detektált lokális minimum értéke alig haladja meg a második felfűtési szakaszban mért abszolút viszkozitásminimumot. Ennek oka, hogy a 25 perces plató ideje alatt a térhálósodási reakció még ezen az alacsony hőmérsékleten is kismértékben előrehalad, így az újabb, kevésbé erőteljes viszkozitásosítás kb. 22 Pa·s-ról indul. A viszkozitásminimumok között tapasztalható különbség bár a kezdeti és ciklus végi viszkozításokkal összevetve nem tűnik jelentősnek, nagymértékben befolyásolhatja a gyanta viselkedését a térhálósítás során, ami megnyilvánulhat az eltávozó gyanta mennyiségében, a szálak impregnáltságában, továbbá a kompozit porozitásában. Emellett megjegyezném, hogy a lokális minimum a hőmérséklet-szabályozás pontatlansága miatt kialakuló kismértékű túlfűtés következtében 90°C-nál magasabb, 90,8°C-os hőmérsékleten jelentkezett.

A plató megállítja a viszkozitás csökkenését, de kérdés, ezt milyen hőmérsékleten, és ennek függvényében milyen viszkozitásértéken teszi. Emellett fontos a plató időtartama is, hiszen ez határozza meg, hogy az adott hőmérsékletnek megfelelő reakciósebesség mellett milyen mértékben halad előre a térhálósodás. A harmadik és a negyedik kísérletben ezekre a kérdésekre kerestem a választ. Két lehetséges platóhőmérsékleten végeztem a felfűtést követően egyórás hűtést, 90°C-on, a gyártó által ajánlott hőmérsékleten, illetve a gyanta normál hőciklus során tapasztalt viszkozitásminimumának környezetében, 110°C-on. A harmadik és a negyedik mérés eredményeit a 25. és a 26. ábra szemlélteti.



25. ábra A harmadik, 90°C-on történő hõn tartással végzett mérés eredményei



26. ábra A negyedik, 110°C-os hõn tartással végzett mérés eredményei

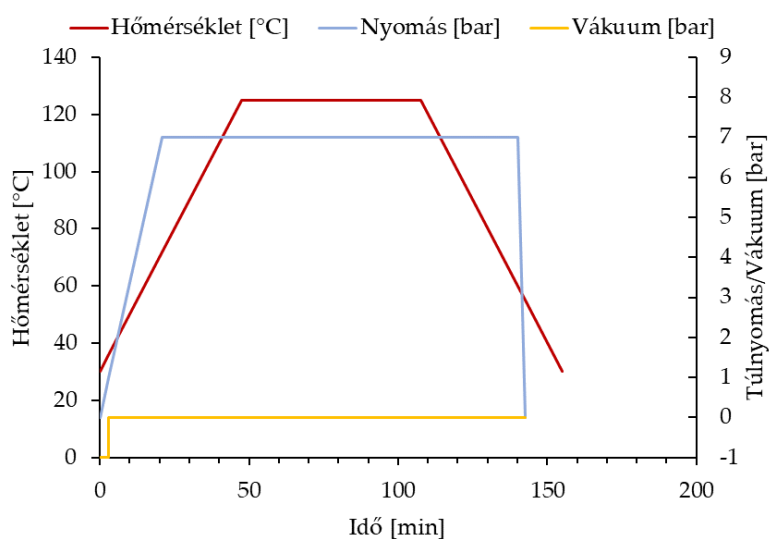
A kísérletek eredményei azt mutatják, hogy míg az alacsonyabb hőmérsékletű plató az adatlapi ciklushoz képest magasabb értékeken állítja meg a viszkozitás esését, addig magasabb hőmérsékletű platóval adott esetben az adatlapi ciklusban tapasztaltaknál hosszabb ideig tartható alacsonyabb értékeken a gyanta viszkozitása. Ez arra enged következtetni, hogy míg előbbi esetben a gyanta rosszabb folyóképessége miatt kisebb mértékben távozik el a prepregből, így alacsonyabb száltartalmat eredményez, addig utóbbi esetben a hosszan fenntartott alacsony viszkozitás és ezáltal jobb folyóképesség több gyanta eltávozásához és magasabb száltartalomhoz vezethet. Természetesen ezen jelenségek mértékét a plató hőmérséklete és időtartama befolyásolja. Ennél pontosabb következtetések levonása további vizsgálatokat igényel, ez azonban nem képezte tárgyát kutatásomnak. A kísérletek eredményei és a belőlük levonható következtetések megfeleltek az elvárásaimnak és teljesítették a reológiai vizsgálatokra vonatkozó célkitűzéseimet.

4.4. Kompozit lemezek előállítás

Ezt követően a prepreggel foglalkoztam. Elsőként meghatároztam a rétegek számát és a gyártandó lemezek méretét. 20 réteg prepreg alkalmazása mellett döntöttem, UD elrendezésben. Ez a 20 réteg kb. 3 mm-es vastagságot eredményez, ami azért fontos, mert a gyártó 3 mm-es vastagságtól ajánlja plató alkalmazását, így ennél a méretnél már várhatóan jelentkeznek szerkezetbeli eltérések a platóval és plató nélkül gyártott lemezek között, amik a vizsgált tulajdonságok tekintetében is különbségekhez vezethetnek. 300x300 mm-es lemezeket gyártottam, amelyek 20-20 mm leszélézését követően lehetővé tették az összes vizsgálni kívánt próbatest kialakítását. A kompozit lemezek gyártását az előkísérletekhez előállított lemezekkel közel megegyezően, a 4.1.1 alfejezetben bemutatott módon végeztem. Az egyetlen különbséget az átvágott rétegeket tartalmazó, rétegek közötti tulajdonságok vizsgálatára használatos próbatestek kialakítása jelentette. Ezek miatt bizonyos rétegeket a megfelelő pozícióban el kellett vágnom, amihez egy körkéses kézi vágóeszközt alkalmaztam. Ezen próbatestek pontos kialakítását és tervezésük folyamatát a 4.8 alfejezetben ismertetem.

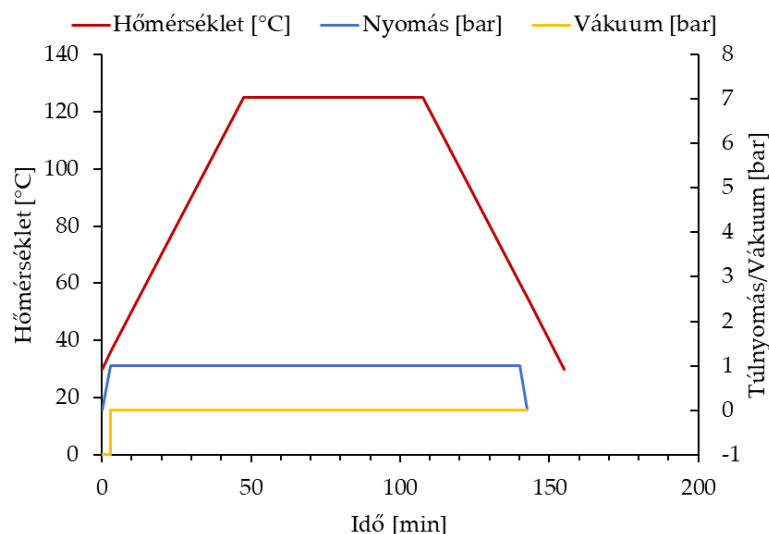
4.4.1. Alkalmazott térhálósítási ciklusok

Négy különböző autokláv ciklust terveztem. Elsőként a gyártó adatlapon szereplő előírásaival megegyező ciklussal végeztem gyártást. Az ehhez tartozó ciklusdiagram a 27. ábrán látható. A hőmérséklet az adatlapon előírtaknak, és természetesen ezzel párhuzamosan az első reológiai vizsgálatnál beprogramozott hőciklusnak megfelelően alakult. A gyantát 2°C/min sebességgel melegítettem a 125°C-os térhálósítási hőmérsékletre, ahol 1 óra hőn tartás következett. A ciklus során 7 bar túlnyomást állítottam be, míg a termék csak addig volt vákuum alatt, míg az autoklávban 1 bar túlnyomás fel nem épült.



27. ábra Az első, adatlapi paraméterekkel végzett gyártás ciklusdiagramja

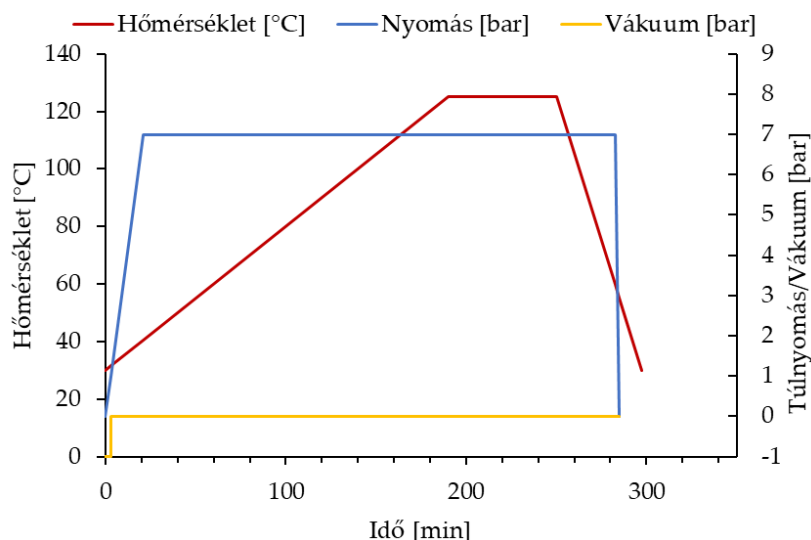
A második ciklussal a nyomás hatását kívántam vizsgálni, az ehhez tartozó ciklusdiagramot szemlélteti a 28. ábra.



28. ábra A második, alacsony nyomású ciklus diagramja

A 28. ábrán látható, hogy a hőmérséklet és a vákuum a ciklus során az első gyártással megegyezően alakult. Az egyetlen különbséget a nyomás jelentette, ebben az esetben mindössze 1 bar túlnyomást állítottam be. Ez a termék szempontjából ugyanúgy 1 bar nyomáskülönbséget jelent, mint a VBO technológiánál, ahol végig vákuum alatt van a termék, túlnyomás pedig nem hat rá.

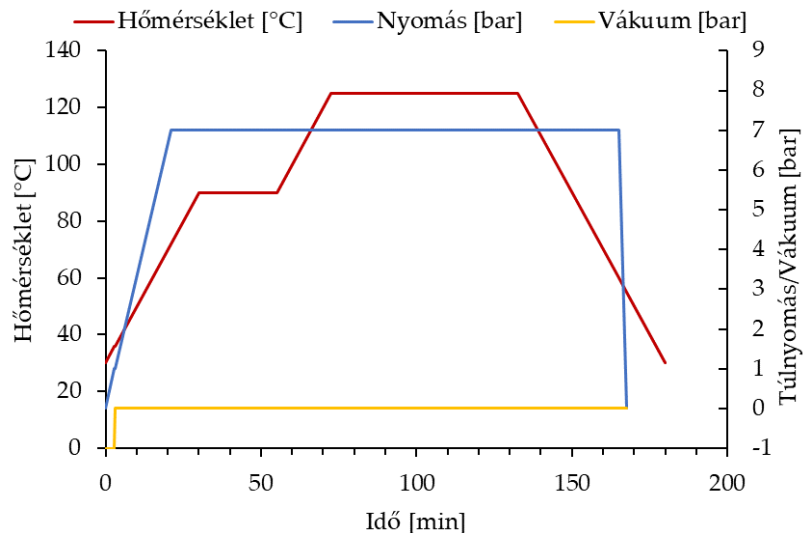
A harmadik ciklusnál a nyomást és a vákuumot is az első ciklussal megegyezően állítottam be, illetve a hőcikluson belül is kizárólag a felfűtési sebesség tekintetében volt eltérés. Ebben az esetben a hőmérsékletet percenként mindössze 0,5°C-kal növeltem. A ciklusdiagramot a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra A harmadik, lassú felfűtéssel végzett ciklus diagramja

A negyedik ciklus esetében is csak a hőciklusban eszközöltem változtatást. A térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően egy platót alkalmaztam, amelynek

hőmérséklete 90°C, időtartama pedig 25 perc volt. Ez megfelel a gyártói ajánlásnak 3 mm-nél vastagabb termékek esetére. A hőmérséklet tehát ebben az esetben a viszkozitásmérésnél másodikként vizsgált hőciklussal megegyezően alakult. A ciklust a 30. ábra mutatja be.



30. ábra A negyedik, platót tartalmazó ciklus diagramja

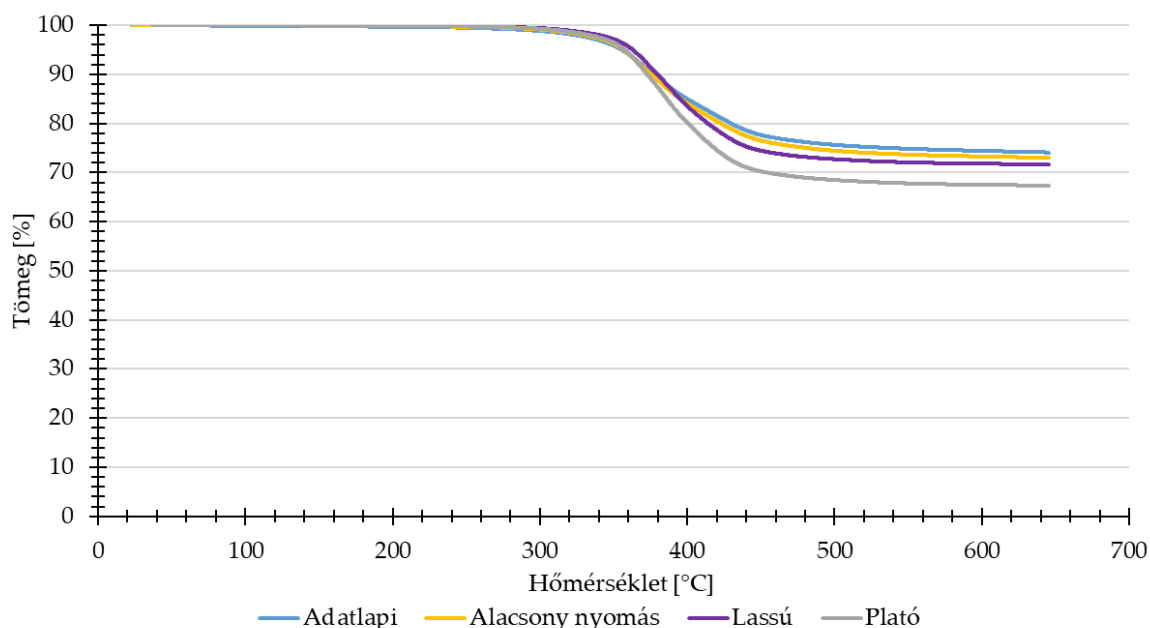
A különböző térhálósítási ciklusok legfontosabb jellemzőit az 11. táblázatban foglaltam össze.

#	Elnevezés	Felfűtési sebesség [°C/min]	Túl-nyomás [bar]	Plató	Plató jellemzői	Térhálósítási hőmérséklet [°C]	Hőntartás ideje [min]
1.	Adatlapi	2	7	nincs	-	125	60
2.	Alacsony nyomás	2	1	nincs	-	125	60
3.	Lassú felfűtés	0,5	7	nincs	-	125	60
4.	Plató	2	7	van	90°C 25 perc	125	60

11. táblázat A különböző térhálósítási ciklusok legfontosabb jellemzői

4.5. Sűrűség- és száltartalom meghatározása

A sűrűség és a száltartalom meghatározása a 3.3.2 alfejezetben bemutatott módszerekkel és összefüggésekkel történt. Az előkísérletekhez hasonlóan, különböző módszerekkel, elsőként tömegszázalékban határoztam meg a száltartalmat. A 31. ábra egy-egy jellemző, TGA eljárással felvett görbét mutat be mind a négy lemezre vonatkozóan.



31. ábra A négy ciklusban gyártott lemez egy-egy jellemző TGA görbéje

Ezt követően a kiégetéssel, illetve TGA-val meghatározott tömegszázalékos száltartalomból elméleti szál térfogatarányt számoltam, továbbá a száltartalomból az erősítőanyag és a mátrix sűrűségének ismeretében, a keverékszabály alkalmazásával megbecsültem a tömör kompozit elméleti sűrűségét. Ezen jellemzőket tartalmazza a 12. táblázat.

Próbatest típusa	TGA			Kiégetés		
	Szál tömegarány [m%]	Tömör kompozit becsült szál térfogataránya [V%]	Tömör kompozit becsült sűrűsége [g/cm ³]	Szál tömegarány [m%]	Tömör kompozit becsült szál térfogataránya [V%]	Tömör kompozit becsült sűrűsége [g/cm ³]
1. – Adatlapi	74,00 (0,19)	58,63 (0,58)	1,957	73,54 (2,73)	58,05 (1,74)	1,950
2. – Alacsony nyomás	72,27 (1,07)	56,48 (1,03)	1,930	72,10 (2,67)	56,27 (1,72)	1,928
3. – Lassú felfűtés	71,67 (0,52)	55,75 (0,50)	1,921	72,03 (1,61)	56,02 (1,41)	1,925
4. – Plató	67,65 (0,40)	51,01 (0,27)	1,863	67,71 (1,41)	51,08 (0,94)	1,861

12. táblázat A szál tömegarány különböző módszerekkel meghatározott átlagos értéke, illetve az ebből számított szál térfogatarány és a becsült sűrűség, zárójelben az értékek relatív szórása relatív százalékban

Fontos ismét kiemelni, hogy a prepreg rétegek névlegesen minden esetben azonos mennyiségű erősítőanyagot tartalmaztak. A lemezek között száltartalom tekintetében

kialakuló különbségekhez az egyes ciklusok során eltávozó gyanta mértékében tapasztalható eltérések vezettek.

A TGA és a kiégetés eredményei nagyfokú egyezést mutatnak. Az előkísérletek tapasztalatai után kimondottan ügyeltem a kiégetés után visszamaradó minták szemrevételezéses vizsgálatára, itt – az előkísérletekkel ellentétben – a szálak szabadon mozogtak, visszamaradó gyanta jeleit nem tapasztaltam, a kiégetés során alkalmazott hőmérsékleten a gyanta megfelelően eltávozott. Az üvegszál lehetővé tette az előkísérletekhez képest magasabb, 550°C-os hőmérsékleten történő kiégetést, hiszen a szénszállal ellentétben itt még nem állt fenn az erősítőanyag jelentős mértékű oxidációjának veszélye.

A 12. táblázat adatai, illetve a 31. ábrán látható diagram alapján is megállapítható, hogy az első, adatlapi paraméterekkel gyártott lemez eredményezte a legmagasabb száltartalmat. Az alacsony nyomású ciklus ennél kisebb száltartalomhoz vezetett. Ez azzal magyarázható, hogy a megegyező hőciklus miatt azonosan alakuló gyantaviszkozítás mellett a kisebb nyomáskülönbség hatására kevesebb gyanta távozik el.

Lassú felfűtés esetén az első ciklushoz viszonyítva szintén alacsonyabb száltartalom alakult ki. Ennek oka a felfűtési sebességnek a gyanta viszkozítására gyakorolt hatásában keresendő. A lassabb felfűtés a ciklus során magasabb viszkozitásértékekhez, ezáltal rosszabb folyóképességhez vezet [4]. Ennek eredményeként azonos nyomás mellett alacsonyabb felfűtési sebességet alkalmazva kevesebb gyanta távozik el a kompozitból a térhálósítás során, így alacsonyabb száltartalom alakul ki.

A negyedik, plató alkalmazásával gyártott lemez rendelkezett a legalacsonyabb száltartalommal. Ez az eredmény egyrészt megegyezik az előkísérleteknél tapasztaltakkal, másrészt alátámasztja a viszkozitásmérés eredményeiből levont következtetéseimet. Ahogy a 24. ábra is bemutatja, a 90°C-on beiktatott plató megállítja a viszkozitás esését az adatlapi ciklus esetén tapasztalható alacsony viszkozitásértékek elérését megelőzően, miközben a térhálósodás kis mértékben előrehalad, így a viszkozitás a ciklus egésze alatt 14 Pa·s fölött marad. Ennek köszönhetően a gyanta folyóképessége nem nő meg olyan mértékben, mint az adatlapi, platót nem tartalmazó ciklusnál, és lényegesen kevesebb gyanta távozik el a kompozitból, ami alacsonyabb száltartalmat eredményez. Kiemelném továbbá, hogy a platóval gyártott lemez becsült száltartalma közel megegyezik a prepreggyártó által megadott adatok alapján becsült értékkel (51%), amelyet a 3. táblázatban feltüntettem.

A tömeg változásán alapuló mérési módszerek korlátja, hogy nem veszik figyelembe a kompozit esetleges porozitását. Az alkalmazásukkal becsült sűrűség és szál térfogatarány elméleti értékek, amelyek a tömör kompozit anyagra vonatkoznak, a kompozitok azonban kisebb-nagyobb mértékben tartalmazhatnak légüregeket. Ahogy az előkísérletek is megmutatták, alacsony porozitás esetén ezek sűrűsége gyakorolt hatása elhanyagolható, így elfogadható pontossággal átszámítható a tömegszázalékban meghatározott száltartalom szál térfogatarányára, illetve ebből

becsülhető a sűrűség értéke. Amennyiben viszont a pórusok térfogataránya nem elhanyagolható, az általam is alkalmazott hagyományos átszámítási összefüggés (2. egyenlet) érvényét veszti. Ez különösen nagy jelentőséggel bírhat akkor, ha a vizsgált kompozitok térhálósítása nem azonos túlnyomáson történt.

Ilyenkor mindenképpen szükséges a sűrűség pontosabb meghatározása. A sűrűségmérést a 3.3.2 alfejezetben leírt módon, arkhimédészi elven végeztem. Az egyes lemezek esetében mért értékeket a 13. táblázatban foglaltam össze.

Próbatest típusa	Sűrűség [g/cm ³]
1. – Adatlapi	1,950 (2,58)
2. – Alacsony nyomás	1,813 (2,67)
3. – Lassú felfűtés	1,916 (1,76)
4. – Plató	1,859 (1,99)

13. táblázat A sűrűség arkhimédészi elven mért átlagos értéke, zárójelben az eredmények relatív szórása

Az ASTM D2374 szabvány ajánlásait követve a térfogatszázalékban értelmezett porozitást a sűrűség elméleti (tömör anyagra vonatkozó) és arkhimédészi elven meghatározott értékeinek felhasználásával becsültem meg. Az elméleti sűrűség esetében a porozitás meghatározásakor a pontosabbnak számító TGA módszerrel becsült sűrűséget alkalmaztam. A porozitás értékét az egyes lemezek esetére a 14. táblázat tartalmazza.

Próbatest típusa	p [V%]
1. – Adatlapi	0,375
2. – Alacsony nyomás	6,08
3. – Lassú felfűtés	0,259
4. – Plató	0,189

14. táblázat A porozitás becsült értéke az egyes lemezek esetében

A 8. táblázat adatai arra utalnak, hogy a második, 1 bar túlnyomással előállított lemez esetében jóval magasabb porozitás alakult ki, mint a 7 bar túlnyomás mellett gyártott többi lemeznél.

A valós sűrűség ismerete már lehetővé teszi a tömegszázalékban vett száltartalom pontosabb átszámítását szál térfogataránnyá. Az így meghatározott szál térfogatarány értékeit a két különböző módszer esetében a 15. táblázat tartalmazza. Az átszámítást az (5) összefüggés segítségével a szálak átlagos tömegarányának és a mért sűrűség átlagértékének felhasználásával végeztem el, így a táblázatban szereplő értékek is átlagos értékeknek tekinthetők. A táblázatban a jobb összehasonlíthatóság és a légüregek hatásának érzékeltetése végett feltüntettem még a pontosabbnak tekinthető TGA módszerrel becsült, a tömör kompozitra jellemző szál térfogatarány átlagos értékét és a porozitást is.

Próbatest típusa	TGA			Kiégetés
	Tömör kompozit becsült szál térfogataránya [V%]	Porozitás [V%]	Szál térfogat- arány [V%]	Szál térfogat- arány [V%]
1. – Adatlapi	58,63	0,375	58,42	58,06
2. – Alacsony nyomás	56,48	6,08	53,05	52,92
3. – Lassú felfűtés	55,75	0,259	55,59	55,88
4. – Plató	51,01	0,189	50,91	50,96

15. táblázat A szál térfogatarány mért sűrűségéből meghatározott átlagos értéke

A 15. táblázat adatai alapján kijelenthető, hogy az alacsony nyomással gyártott lemez kivételével a többi esetben nem eredményezett jelentős változást a szál térfogatarány értékében a kompozit valós sűrűségéből történő átszámítás. Ez az egyes lemezek porozitásával magyarázható.

Későbbi vizsgálataim értékelésekor a TGA módszerből a valós sűrűség felhasználásával meghatározott szál térfogatarányt tekintettem mérvadónak. Ez a jellemző magában foglalja a térhálósítás során eltávozó gyanta mértékének és a kompozit porozitásának hatását is.

4.6. Hárompontos hajlítóvizsgálat

A lemezekből kialakított próbatesteken a 3.3.3 alfejezetben ismertetett módon hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztem. A kísérletek során azt tapasztaltam, hogy a szabványban meghatározott, az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő 6 mm-es határlehajlás eléréséig kizárólag a második, alacsony nyomású ciklusban gyártott próbatestek esetén jelentkezett tönkremenetel. Ezen lemez esetében kiszámítottam a hajlítószilárdságot. Mivel a második lemez szálartalma az első és harmadik lemez közé esik, így ez nem ad magyarázatot a tapasztalt jelenségre, hanem valamilyen hibahelyek, vélhetően légüregek jelenlétére utal a második lemezben. Ez alátámasztja a sűrűség vizsgálatánál levont következtetésemet, miszerint a második, alacsony nyomással előállított lemez porozitása jelentős mértékben meghaladja a többi lemezét.

Azon lemezek esetében, amelyek a határlehajlásig nem mentek tönkre, a vizsgálatot tovább folytattam, és a tönkremenetelt 6 és 8 mm-es lehajlásértékek között tapasztaltam. Mivel a tönkremenetel viszonylag közel volt a határlehajláshoz, ezért a szabvány által előírt határhajlító feszültség mellett a hagyományos összefüggéssel megbecsültem a hajlítószilárdság értékét is, amelyet összehasonlításra alkalmasnak ítélt meg.

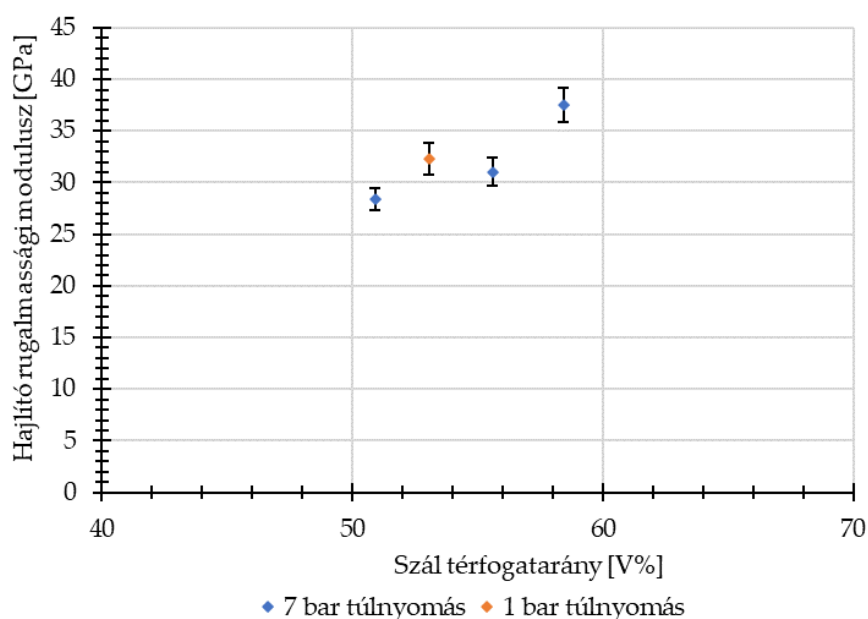
A mért adatok alapján meghatároztam az egyes lemezek hajlító rugalmassági modulusz értékét is a szabvány ajánlásainak megfelelően.

A vizsgálatok eredményeit pedig a 16. táblázat tartalmazza. A táblázatban csillaggal jelöltem azokat az értékeket, ahol a hajlítószilárdságot a határlehajlást követően, kizárólag az összehasonlítás céljából becsültem meg.

Ciklus	Vastagság [mm]	Határhajlító feszültség [MPa]	Hajlítószilárdság [MPa]	Hajlító rugalmassági modulusz [GPa]
1. – Adatlapi	3,06 (1,45)	1240,7 (3,37)	1388,64 (0,59)*	37,50 (4,50)
2. – Alacsony nyomás	3,29 (2,92)	-	1141,2 (1,49)	32,22 (4,41)
3. – Lassú felfűtés	3,11 (1,54)	1158,0 (7,36)	1303,4 (2,91)*	31,06 (4,39)
4. – Plató	3,22 (0,98)	1144,8 (4,37)	1299,4 (3,11)*	28,38 (3,81)

16. táblázat A hajlítóvizsgálattal meghatározott jellemzők átlagos értéke és zárójelben relatív szórása (névleges szélesség: 15 mm, alátámasztási távolság: 60 mm)

A modulusz értékek esetében a 16. táblázatban szereplő adatokat összevetve a száltartalom-vizsgálat eredményeivel (12. táblázat) kijelenthető, hogy a szálak tömegarányával párhuzamosan nő a hajlító rugalmassági modulusz értéke is. Az eredményeket a 32. ábra szemlélteti, amelyen a hajlító rugalmassági modulusz értékei láthatók szórásukkal a – TGA eljárással meghatározott – szál térfogatarány függvényében.



32. ábra A hajlító rugalmassági modulusz a száltartalom függvényében

A hajlítószilárdság – és határhajlító feszültség – tekintetében a 16. táblázat adatai alapján elmondható, hogy értéke a térhálósítási ciklus során alkalmazott nyomással párhuzamosan nő. Azonos nyomás esetén pedig a magasabb száltartalom nagyobb hajlítószilárdságot eredményez.

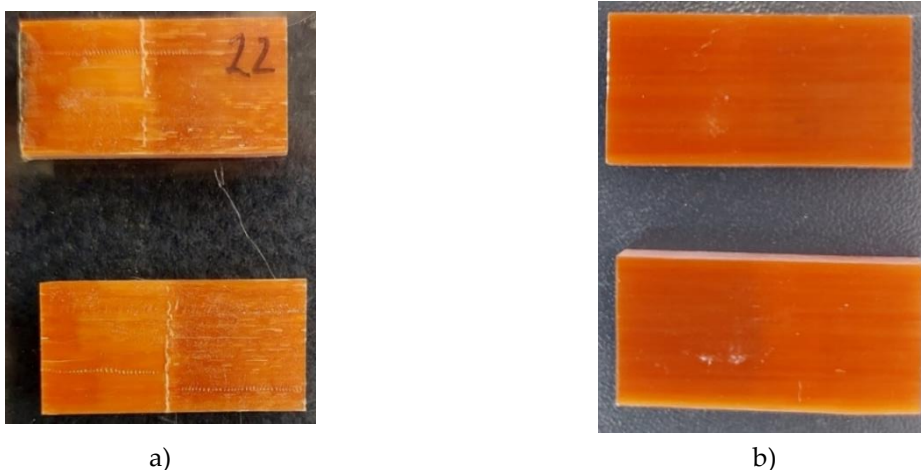
4.7. Rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat

Következő lépésként rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálatokat végeztem a rétegközi nyírószilárdság meghatározására. A vizsgálati módszert és az elvégzett kísérletek paramétereit a 3.3.3 alfejezetben mutattam be részletesen.

A vizsgálatot elsőként a szabványban előírt geometriájú hajlítófeltéttel végeztem el, ez 5 mm sugarú terhelő hengert, illetve 2 mm sugarú alátámasztó hengereket jelentett. Ekkor azonban azt tapasztaltam, hogy a nyírás hatására jelentkező rétegelválás mellett a nyomó henger alatt is kialakult egy lokális repedés, tehát vegyes tönkremenetel lépett fel. A jelenségre a szakirodalomban kerestem magyarázatot, amelyet részletesen bemutattam a 2.3.1 alfejezetben. A vizsgálati módszer érzékeny a hengerátmérőre, kis átmérőjű terhelő henger alkalmazása esetén a terhelés túlzottan koncentrált, a nyomó igénybevétel hatására pedig lokális tönkremenetel jelentkezhet a próbatest felületén, ami torzíthatja a mért nyírószilárdság értékét is. A problémára megoldást jelenthet a hajlító feltét hengerátmérőinek növelése, ezáltal a koncentrált terhelés eloszlítása a felületen.

Kutatásom során így én is nagyobb átmérőjű hengerek alkalmazása mellett döntöttem. A vizsgált próbatestek vastagságát figyelembe véve a vonatkozó szakirodalom [32] ajánlásainak megfelelő geometriájú hajlító feltétet választottam: 10 mm sugarú terhelő henger, 5 mm sugarú alátámasztás.

A vizsgálatot így megismételve már nem jelentkezett repedés a terhelő henger alatt, a próbatestek a vizsgálat szempontjából kívánatos, egy vagy több határfelületen jelentkező rétegelválással mentek tönkre. A hengerátmérő hatását a felületi tönkremenetelre a 33. ábra szemlélteti, ahol két-két különböző átmérőjű hengerekkel vizsgált próbatest felülete látható.



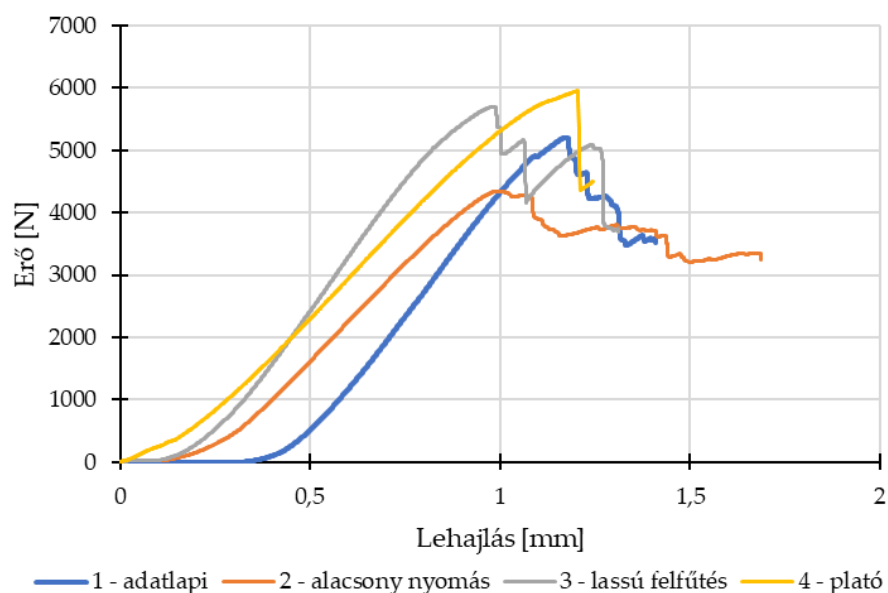
33. ábra a) A szabványos és b) a nagyobb hengerátmérőjű feltéttel vizsgált próbatestek felülete

A próbatestek tönkremenetelét DIC berendezés segítségével is figyelemmel kísértem. Egy jellegzetes, a nagyobb átmérőjű hengerekkel végzett vizsgálat során tapasztalt, több határfelületen fellépő rétegelválásról készült felvételt mutat be a 34. ábra.



34. ábra Egy jellegzetes, több felületen jelentkező rétegelválásról DIC berendezéssel készített felvétel

A 35. ábra egy-egy jellemző, a nagyobb átmérőjű hengerekkel végzett vizsgálatok során felvett mérési görbét szemléltet az egyes lemezek esetében.



35. ábra A rövid támaszközü hajlítóvizsgálat során felvett jellegzetes erő-lehajlás görbék

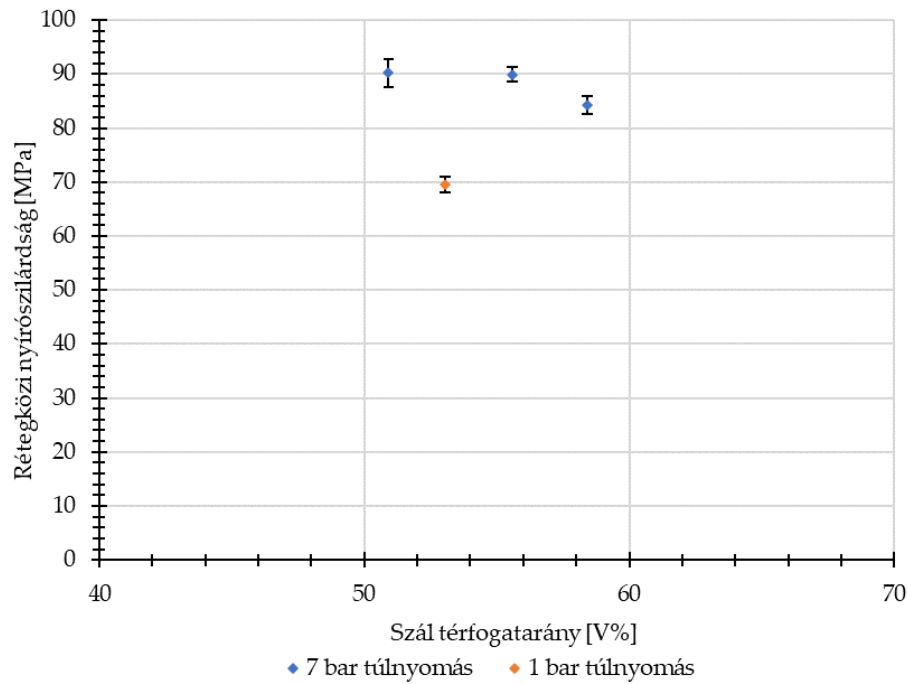
A mért adatokból ezután meghatároztam a próbatestek rétegeközi nyírószilárdságát. Az egyes lemezek átlagos vastagságát, illetve rétegeközi nyírószilárdságát és az értékek relatív szórását a 17. táblázat tartalmazza.

Próbatest típusa	Próbatest vastagsága [mm]		τ - Rétegek közötti nyírószilárdság [MPa]	
	Szabványos feltét (ISO14130)	Nagyobb átmérőjű hengerek	Szabványos feltét (ISO14130)	Nagyobb átmérőjű hengerek
1. – Adatlapi	3,08 (1,22)	3,06 (2,46)	82,81 (5,41)	84,23 (2,05)
2. – Alacsony nyomás	3,27 (3,22)	3,24 (4,56)	66,80 (6,19)	69,50 (2,19)
3. – Lassú felfűtés	3,12 (1,35)	3,11 (3,49)	85,68 (4,91)	89,94 (1,51)
4. – Plató	3,22 (0,88)	3,24 (1,13)	80,60 (5,44)	90,17 (2,95)

17. táblázat A lemezek átlagos vastagsága és a rétegek közötti nyírószilárdság különböző hengerátmérőjű hajlítófeltétekkel, rövid támaszközü hárompontos hajlítással meghatározott átlagos értéke az egyes lemezek esetén, zárójelben a mért értékek relatív szórása százalékban (alátámasztási távolság: 15 mm, névleges szélesség: 15 mm)

A 17. táblázatban szereplő adatok igazolják a próbatestek tönkremenetelének szemrevételezéses vizsgálata alapján levont következtetéseket. A hengerátmérő valóban jelentős hatást gyakorol a rövid támaszközü hajlítóvizsgálat végkimenetelére, ami nemcsak a tönkremenetel módjában – vegyes tönkremenetel vagy tisztán rétegelválás –, hanem a nyírószilárdság átlagos értékében és az eredmények szórásában is megnyilvánul. Kijelenthető tehát, hogy a szabványosnál nagyobb hengerátmérővel rendelkező hajlítófeltét alkalmazásával kiküszöbölhető a terhelő henger alatti lokális tönkremenetel, ami a vizsgálatok során magasabb rétegek közötti nyírószilárdság értékeket és kisebb szórást eredményez. Mivel ezzel a megoldással elhárítható a rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálat egyik legjelentősebb hibája, a nagyobb hengerátmérővel mért értékek feltehetően közelebb vannak a kompozit valós rétegek közötti nyírószilárdságához. A 17. táblázat eredményeit a száltartalomra vonatkozó adatokkal (12. táblázat) összevetve az látható, hogy a hengerátmérő hatása alacsonyabb száltartalom esetén jelentősebb. Ezen jelenség magyarázata további vizsgálatokat igényel.

Mivel a kísérlet értékelése szempontjából kizárólag a nyíró igénybevétel hatására fellépő rétegelválás az elfogadható tönkremeneteli mód, amely feltételnek csak a nagyobb átmérőjű hengerekkel elvégzett vizsgálatok feleltek meg, így a technológiai paraméterek hatásaira vonatkozóan ezen mérések eredményeiből vontam le következtetéseket. Az első és a második lemezre vonatkozó adatokat összevetve kijelenthető, hogy a térhálósítási ciklus során alkalmazott nyomás fokozásával jelentős mértékben nő a rétegek közötti nyírószilárdság értéke. Az azonos nyomáson gyártott lemezek esetében a nagyobb gyantatartalom magasabb rétegek közötti nyírószilárdságot eredményez, úgy tűnik azonban, hogy a gyantatartalom növekedése egy bizonyos szint fölött már kisebb hatást gyakorol erre a jellemzőre. Az egyes lemezek rétegek közötti nyírószilárdságát a szálak térfogatarányának függvényében a 36. ábra szemlélteti. A diagramon a vízszintes tengely 40-től 70 V%-ig tart, mivel a kompozitok szál térfogatarányát tekintve gyakorlati szempontból ez a releváns tartomány.



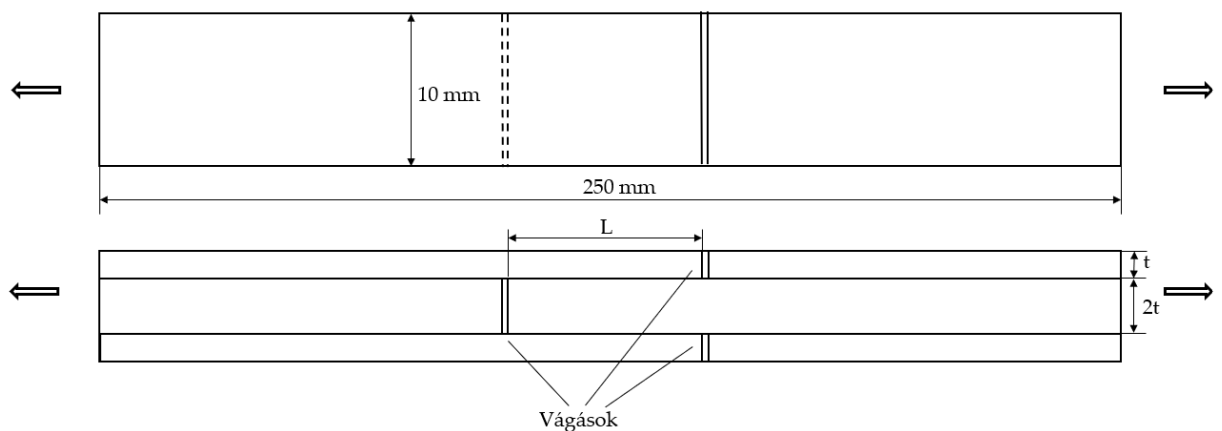
36. ábra A rétegek közötti nyírószilárdság a szál térfogatarány függvényében

4.8. Rétegek közötti tulajdonságok szakításra visszavezetett vizsgálatai

A következőkben két szakításra visszavezetett vizsgálatot végeztem, az egyikkel a rétegek közötti nyírószilárdságot, a másikkal pedig a tisztán nyíró igénybevétel esetén tapasztalható kritikus repedésterjesztő erőt kívántam meghatározni.

4.8.1. A rétegek közötti nyírószilárdság meghatározása kétszeresen átlapolt próbatestekkel

A rétegek közötti nyírószilárdságvizsgálatát szakító elrendezésben is el szerettem volna végezni, így ehhez egy kétszeresen átlapolt szakítópróbatestet terveztem, amelynek vázlatát mutatja be a 37. ábra.



37. ábra A kétszeresen átlapolt próbatest geometriája

A geometria megtervezésekor két fő szempontot vettem figyelembe. Az egyik, hogy a külső rétegek fele olyan vastagok legyenek, mint a középső, így elkerülhető a külső rétegek nagyobb alakváltozása, és biztosítható a közel egyenletes nyúlás a rétegekben található vágások környezetében. A másik szempont az volt, hogy a próbatest nyírás hatására menjen tönkre. A bevezetett terhelés hatására a folytonos keresztmetszetekben húzó-, míg az átlapolt zónában a két határfelületen nyírófeszültség ébred. Akkor következik be rétegelválás, ha a határfelületeken ébredő nyírófeszültség eléri a rétegek közötti nyírószilárdság értékét úgy, hogy eközben a normálfeszültség értéke egyik keresztmetszetben sem haladja meg a kompozit húzószilárdságát. Ehhez felírható a húzó- és a nyíróerő egyensúlya a középső keresztmetszet és a határfelület között.

Az erők kifejezhetők a feszültség és a geometriai jellemzők segítségével, továbbá értelmezhető az a határhelyzet, amikor a húzófeszültség megegyezik a húzószilárdsággal, a nyírófeszültség pedig a rétegek közötti nyírószilárdsággal, ez szerepel a (7) egyenletben. Itt a szakirodalomban fellelhető, illetve általam is kimért rétegek közötti nyírószilárdság helyett a gyanta nyírószilárdságát alkalmaztam, amelynek értéke 100 MPa körüli [38]. Mivel ez a szakirodalmi adatok, illetve a rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálat eredményei alapján meghaladja a rétegek közötti nyírószilárdság értékét, így a tervezéskor ezen érték használatával biztosítható, hogy a vizsgálat folyamán valóban rétegelválás következzen be. [33, 34]

$$\sigma_h 2tb = 2\tau bL \quad (7)$$

Az átlapolási hosszt (L) 10 mm-nek választottam, ami a gyártás során még éppen jól kezelhető méret. A szélességgel (b) történő egyszerűsítést követően az anyagparamétereket behelyettesítve a középső blokk vastagságának értéke (2t) megkapható a (8) egyenletben látható módon:

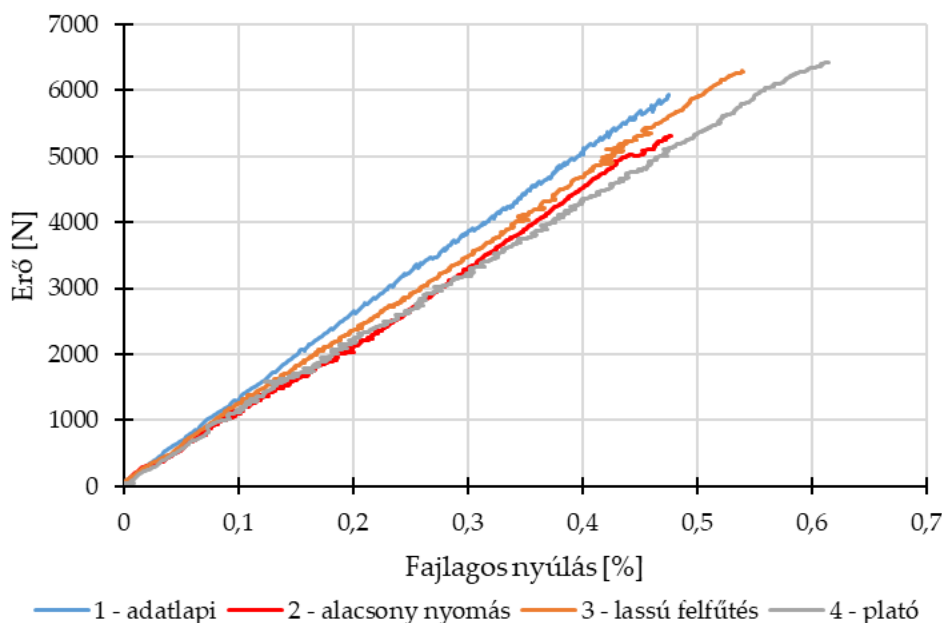
$$2t = \frac{2\tau L}{\sigma_h} \approx 1,41 \text{ [mm]} \quad (8)$$

Ez az említett határhelyzetre vonatkozik, amennyiben 2t értéke ezt meghaladja, rétegelválás következik be. A lemez vastagsága kb. 3 mm, a másik irányelvét követve a külső rétegeket a középső réteg felének terveztem, így $2t \approx 1,5$ mm, tehát a tervezett próbatest megfelel a feltételeknek.

A rétegek közötti nyírószilárdság értékét a (9) egyenletben szereplő összefüggéssel számoltam:

$$\tau = \frac{F}{2bL} \quad (9)$$

A tönkremenetelkor mért erő és a kétszeresen átlapolt próbatestekkel meghatározott rétegek közötti nyírószilárdság átlagos értékeit és szórásukat a 18. táblázat tartalmazza, míg a 38. ábra minden lemez esetében egy-egy jellemző mérési görbét mutat be.



38. ábra A kétszeresen átlapolt próbatestek mérése során felvett jellegzetes erő-fajlagos nyúlás görbék

Próbatest típusa	F [N]	τ [MPa]
1. – Adatlapi	5895,7 (7,03)	29,36 (7,27)
2. – Alacsony nyomás	5265,3 (4,46)	26,38 (4,61)
3. – Lassú felfűtés	6253,1 (2,44)	31,30 (2,65)
4. – Plató	6345,1 (5,36)	31,72 (5,52)

18. táblázat A tönkremenetelkor mért erő és a kétszeresen átlapolt próbatesttípussal meghatározott rétegek közötti nyírószilárdság átlagos értéke az egyes lemezek esetében, zárójelben a relatív szórás százalékban (próbatestek névleges szélessége: 10 mm, átlapolás névleges hossza: 10 mm)

A 18. táblázat adatai alapján látható, hogy a vizsgálat lényegesen kisebb értékekhez vezetett, mint amire a rövid támaszközű hárompontos hajlítás, illetve a szakirodalomban fellelt kutatások alapján számítottam. Ez arra enged következtetni, hogy a próbatestek nem tisztán nyíró igénybevétel hatására mentek tönkre, hanem megjelent az I-es nyitó mód is. Ezen feltevésem igazolására végesem módszerrel tettem kísérletet, amelynek ismertetését a 4.10 alfejezet tartalmazza.

Ennek ellenére az eredményekben hasonló trend látszik, mint a rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat esetében. A térhálósítási ciklus során alkalmazott nagyobb nyomás magasabb szilárdság értékeket eredményezett. Emellett azonos nyomás esetén a gyantatartalom növekedésével nő a nyírószilárdság értéke is, egy bizonyos szint fölött azonban csökken ez a hatás.

4.8.2. A kritikus repedésterjesztő erő meghatározása

Ezután a nyírás hatására jelentkező kritikus repedésterjesztő erő meghatározásával foglalkoztam. Ehhez a 2.3.2 alfejezetben ismertetett elven működő, vágott középső rétegekkel rendelkező próbatesteket alkalmaztam. Elsőként megterveztem a próbatest

pontos geometriáját, ehhez több szempontot is figyelembe kellett vennem, a 20 rétegből felépülő lemez kb. 3 mm-es teljes vastagsága adott volt.

A tervezés és a mérés kiértékelése során a kritikus repedésterjesztő erő meghatározásának nyúlás alapú összefüggését alkalmaztam, ennek oka, hogy a vizsgálatok során a fajlagos nyúlás a feszültséggel ellentétben közvetlenül mérhető mennyiség. Az összefüggés a (10) egyenletben szerepel: [35]

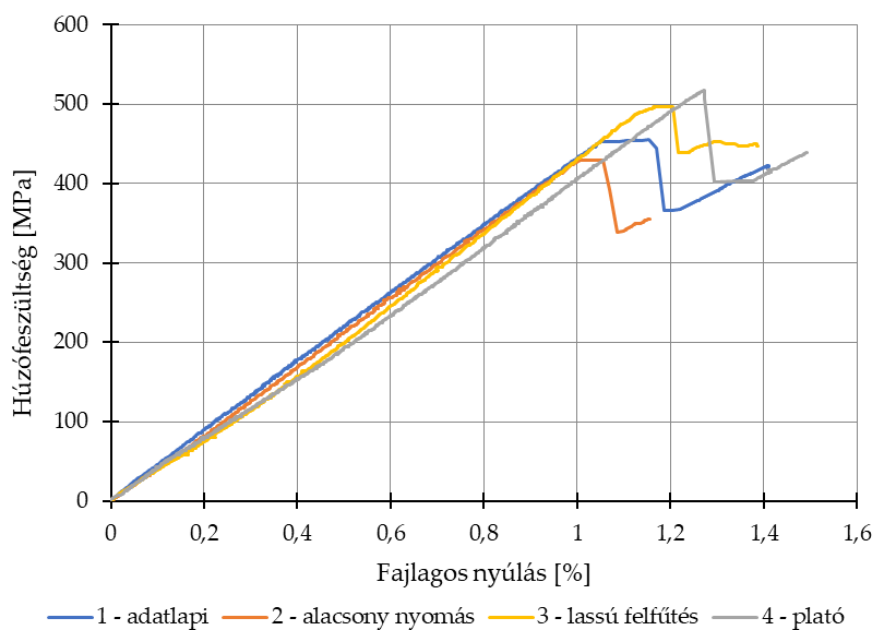
$$G_{II,c} = \frac{\varepsilon^2 E h t}{4(h - t)} \quad (10)$$

A tervezés kulcsa a rétegek arányának meghatározása, mivel ez szabályozza, hogy mikor kezdődik meg a tönkremenetel. Emellett fontos az is, hogy ne legyenek túl vékonyak a szélső rétegek, így biztosítható, hogy ne szakadjanak el, mielőtt bekövetkezik a rétegelválás. Továbbá figyelembe kell venni a tervezéskor, hogy a túl sok vágott réteg sem előnyös, mivel ekkor egyrészt túl hamar bekövetkezik a rétegelválás, amit nehezebb detektálni, másrészt a kezdeti tranziens jelenségek, többek között a vágásnál jelen lévő gyantadús régió tönkremenetele jobban befolyásolja a mérést.

Ezen szempontokat figyelembe véve úgy terveztem meg a próbatestet, hogy a tönkremenetel 1%-os fajlagos nyúlás környékén kezdődjön. A vonatkozó szakirodalom szerint az általam használt anyag esetében a $G_{II,c}$ értéke 1,5-2 N/mm között van [35].

A (10) egyenlet átrendezését követően a megfelelő rétegvastagságokat iterációval határoztam meg. Ez alapján 7-7 külső, folytonos, illetve 6 középső, vágott réteg prepregből álló próbatestet terveztem. Ez kb. 1,05 mm-es vastagságot eredményezett a folytonos, illetve 0,9 mm-t a vágott rétegek esetében. Ezen paraméterek mellett 1%-os fajlagos nyúlásnál a G_{II} értéke 1,52 N/mm, ami a kritikus érték – $G_{II,c}$ – várható tartományába esik, így előreláthatólag ekkor indul el a rétegelválás.

A tervezést követően a próbatesteken a 3.3.3 alfejezetben bemutatott módon végeztem el a vizsgálatot. Minden lemezre vonatkozóan egy-egy jellemző húzófeszültség-fajlagos nyúlás görbét szemléltet a 39. ábra. A próbatest vastagság, a tönkremenetelkor mért fajlagos nyúlás és a tisztán II-es igénybevételi módhoz tartozó kritikus repedésterjesztő erő átlagértékét és szórását az egyes lemezek esetében a 19. táblázatban foglaltam össze.

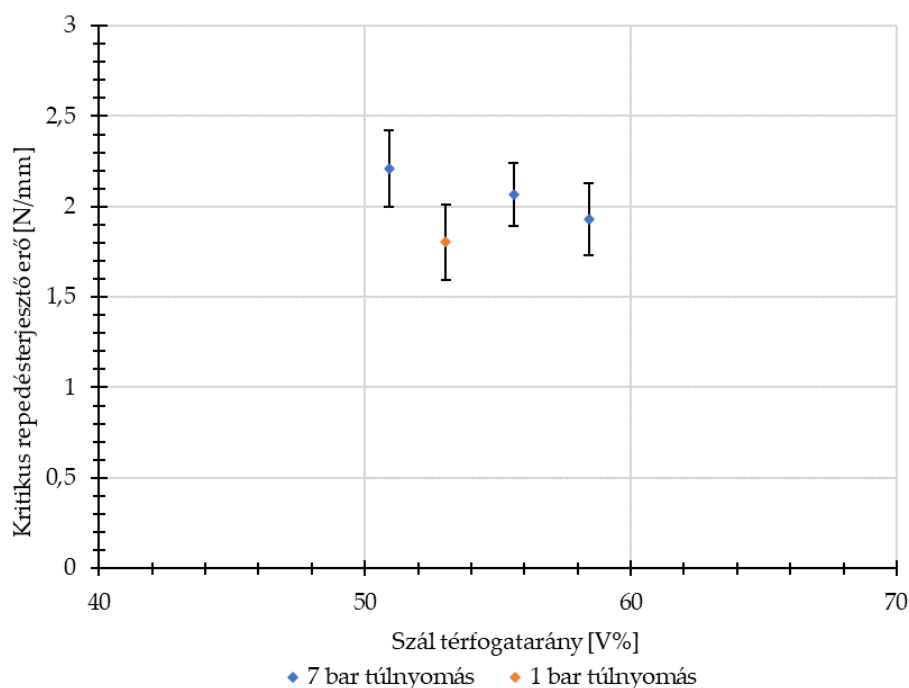


39. ábra A $G_{II,C}$ vizsgálata során felvett jellegzetes görbék

Próbatest típusa	h [mm]	ϵ_b [%]	$G_{II,C}$ [N/mm]
1. – Adatlap	3,05 (3,45)	1,13 (5,27)	1,93 (10,51)
2. – Alacsony nyomás	3,30 (5,01)	1,02 (5,13)	1,80 (11,60)
3. – Lassú felfűtés	3,13 (2,50)	1,15 (4,30)	2,07 (8,37)
4. – Plató	3,27 (0,89)	1,20 (4,98)	2,21 (9,66)

19. táblázat A próbatest vastagság, a tönkremenetelkor mért fajlagos nyúlás és a kritikus repedésterjesztő erő átlagos értéke és zárójelben relatív szórása százalékban (próbatestek névleges szélessége: 10 mm)

Kijelenthető a 19. táblázat adatai alapján, hogy a rétegek közötti nyírószilárdságnál megállapított trendhez hasonlóan tapasztaltam. A térhálósítási ciklus során alkalmazott nyomás hatással van a kritikus repedésterjesztő erőre is, amely a nyomás fokozásával nő. Emellett azonos nyomás esetén az látható, hogy az alacsonyabb száltartalom, tehát nagyobb gyantatartalom magasabb $G_{II,C}$ értékekkel jár együtt. Az eredmények értékelésének szempontjából azonban fontos megjegyezni, hogy a méréseket viszonylag nagy, 10% körüli szórás terheli. A szálak térfogataránya és a kritikus repedésterjesztő erő között tapasztalt trendet a 40. ábra szemlélteti.



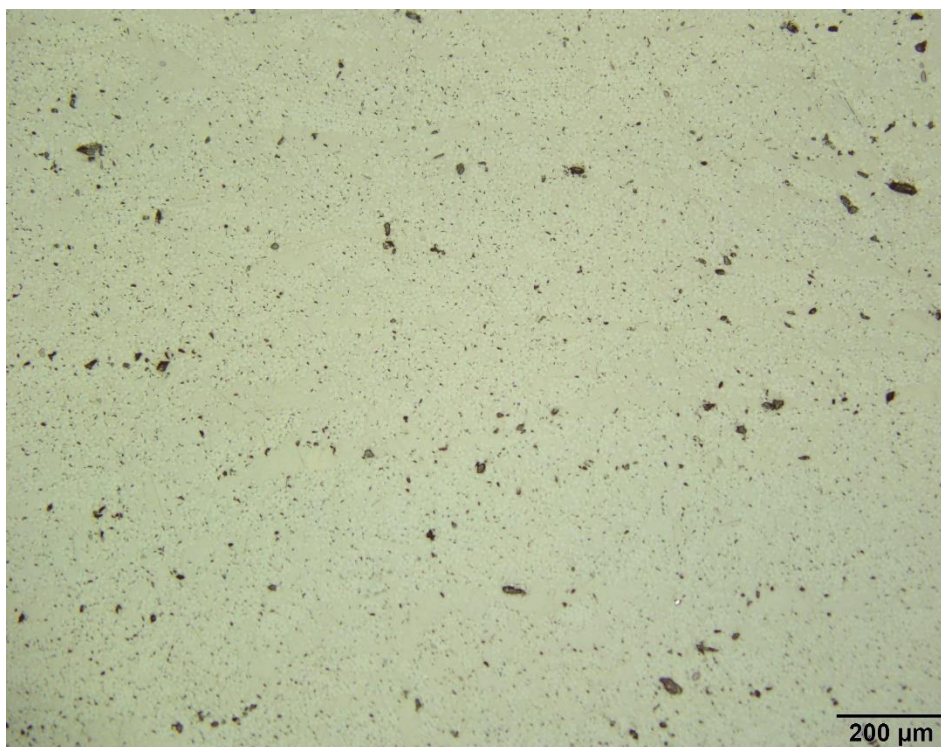
40. ábra A kritikus repedésterjesztő erő a szál térfogatarány függvényében

4.9. Optikai mikroszkópos vizsgálat

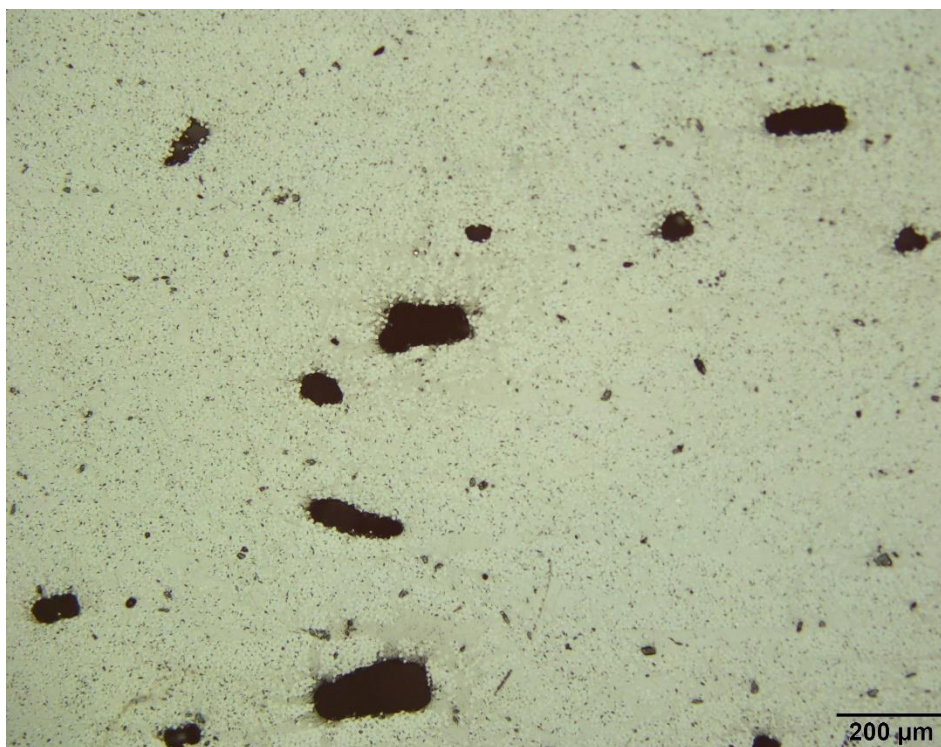
A száltartalom meghatározásakor és a különböző mechanikai vizsgálatok során arra a következtetésre jutottam, hogy a második, alacsony nyomással gyártott lemez magas porozitással rendelkezik. Ennek igazolására optikai mikroszkópos vizsgálatot is végeztem, amelynek során az azonos hőciklussal, de eltérő nyomással gyártott első és második ciklusban előállított lemezekből vett keresztmetszeti mintákat hasonlítottam össze.

Az 7 bar túlnyomáson előállított lemezből vett keresztmetszeti minta egy jellemző felületét mutatja be a 41. ábra, míg a 42. ábrán az 1 bar túlnyomással gyártott lemez keresztmetszete látható. Míg előbbi felvételen csak apróbb pórusok láthatók, addig az utóbbi felvétel bizonyítja a második lemez magas porozitását. Ezen számos kimondottan nagy méretű pórus is látható.

A keresztmetszeti minták optikai mikroszkópos vizsgálata tehát igazolta a korábbi kísérletek alapján a térhálósítási ciklus során alkalmazott nyomás porozításra gyakorolt hatását illetően levont következtetéseimet.



41. ábra Adatlapi paraméterekkel gyártott (1.) lemez keresztmetszetéről készült jellegzetes optikai mikroszkópos felvétel



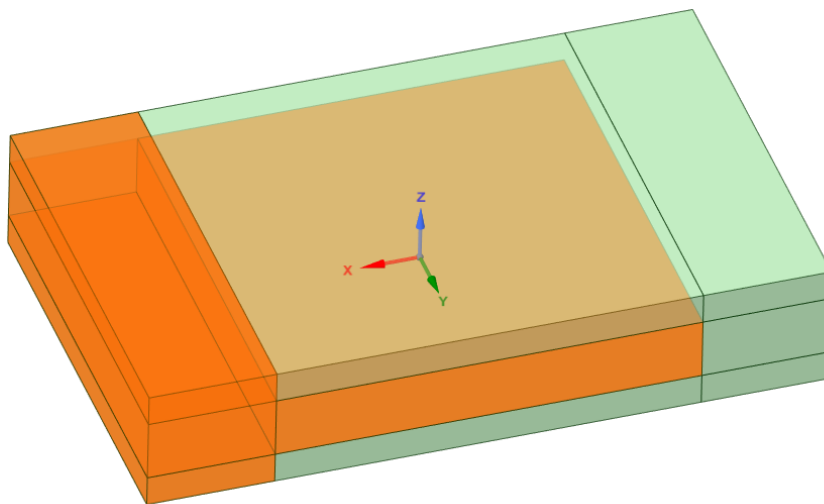
42. ábra Optikai mikroszkópos felvétel az alacsony nyomással előállított (2.) lemez keresztmetszetéről

4.10. A kétszeresen átlapolott próbatesteknél tapasztalt jelenségek magyarázata

A rétegközi nyírószilárdság kétszeresen átlapolott próbatestekkel történő meghatározásánál a szakirodalmi értékekhez és a rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálathoz képest lényegesen alacsonyabb értékeket kaptam. Ennek oka vélhetően a II-es, nyíró mód mellett az I-es, nyitó módú igénybevétel megjelenése a vizsgálat során. Ezen feltevésem igazolására a jelenséget véges elem módszerrel, Ansys 2022 R2 szimulációs szoftverben vizsgáltam. A szimulációhoz a repedésterjedés és rétegelválás modellezésére használatos kohéziós zóna modellezés (CZM) módszerét alkalmaztam.

Ez egy a hagyományostól eltérő törésmechanikai módszer, amelynek lényege, hogy a határfelületen definiálunk egy ún. kohéziós zónát, amely tulajdonképpen egy eredendően vastagsággal nem rendelkező réteg. Ez a kohéziós zóna egy olyan fenomenológiai modell, amely az alkalmazott CZM anyagmodelltől függő konstitutív egyenletek segítségével kerül bevezetésre [58]. A CZM módszer esetén a határfelületi viselkedés leírása a határfelületen értelmezett, az anyagmodellnek megfelelő egyenletekkel jellemezhető viselkedésű, speciális elemek segítségével történik [59].

A szimuláció során kizárólag a kétszeres átlapolást tartalmazó régiót és közvetlen környezetét modelleztem, ennek célja az elemszám és ezáltal a számítási igény csökkentése volt. Az egyszerűsítés érvényességét a későbbiekben igazoltam. A modellezett geometria a 43. ábrán látható. A geometriát 9 téglatestből építettem fel, majd a megfelelő szilárdtesteket összehálózva két komponenst definiáltam. A modellezés során a 4.8.1 alfejezetben ismertetett névleges próbatest-geometriát alkalmaztam.



43. ábra A szimulációhoz modellezett geometria

A kompozit anyagaként az általam alkalmazott UD üvegszál/epoxi prepregével megegyező, anizotróp tulajdonságokkal rendelkező alapanyagot alkalmaztam, a szimuláció során pedig a valóságnak megfelelő, 0° -os orientációt határoztam meg.

A két komponens 5 határfelületén 1-1 „bonded” kapcsolatot (contact) adtam meg. Mivel a CZM módszer fókuszában a kapcsolatok viselkedése áll, amelyek merevségében hirtelen változások következhetnek be, így fontosnak tartottam beállítani, hogy a megoldó algoritmus a kapcsolatok merevségi mátrixát minden egyes iteráció után újraszámolja.

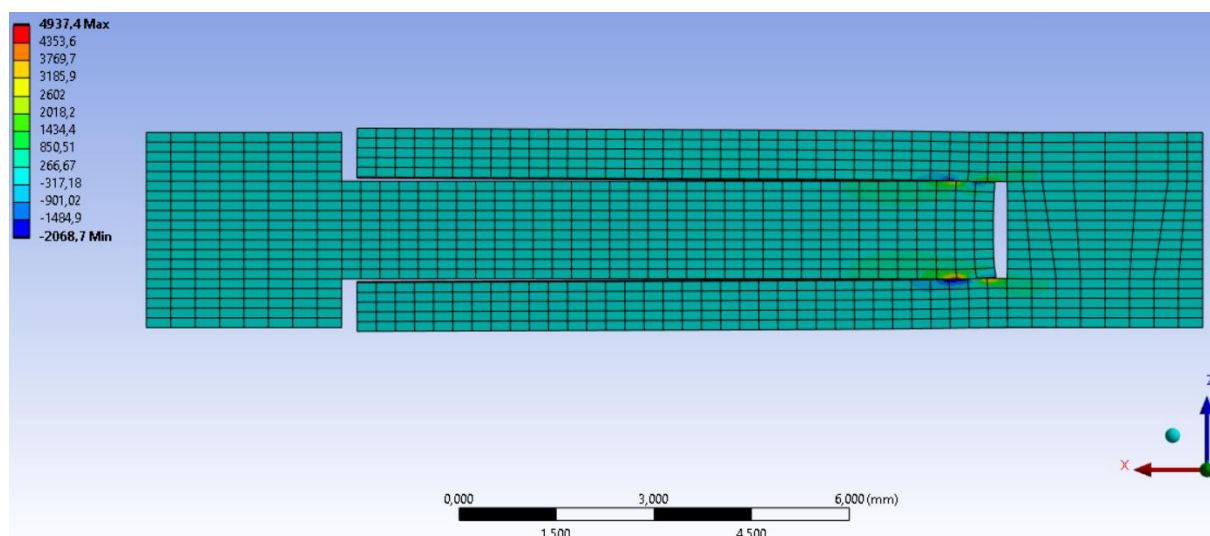
Az 5 kapcsolat közül a próbatest hosszirányára merőleges 3 kapcsolat esetére szeparációs távolság alapú (separation distance-based) CZM anyagmodellt határoztam meg. Ezen határfelületeknél normál igénybevétel jelentkezik, így I-es módú kohéziós zónát definiáltam, ahol a paramétereket a gyanta adatlap paramétereiből becsültem. A legnagyobb normál irányú kontakt feszültséget (maximal normal contact stress) ennek megfelelően a gyanta szakítószilárdságával közelítettem, amelynek értéke 65,5 MPa. A kontakt megszűnését jelentő távolságot (contact gap at the completion of debonding) 0,03 mm-ben határoztam meg. Ez egy becslés volt, amelynek alapja, hogy a valóságban ezeken a határfelületeken egy kb. 1,5 mm vastag gyantaréteg található. Erre vonatkoztatva a 0,03 mm-es deformáció 2%-os fajlagos nyúlást jelent, ami megfeleltethető az epoxi szakadási nyúlásának [40].

A terhelés irányával párhuzamosan elhelyezkedő két határfelületen, amelyek a szimuláció szempontjából a fókuszban vannak, hiszen vélhetően ezek esetében jelentkezik a kívánt II-es mellett az I-es igénybevételi mód, repedésterjesztő erő alapú (fracture energies-based) CZM anyagmodellt definiáltam. Mivel itt vélhetően vegyes módú igénybevétel lép fel, ezért az anyagmodellben a rétegelválás lehetséges módját is így határoztam meg. A CZM módszer alkalmazásakor nagy jelentőséggel bír az anyagparaméterek meghatározása. A legnagyobb normál irányú kontaktfeszültséget (maximal normal contact stress) a gyanta adatlap szakítószilárdságával közelítettem. A legnagyobb tangenciális irányú kontakt feszültség (maximal tangential contact stress) esetében a rétegek közti nyírószilárdság értékét használtam, ahol az általam az adatlap ciklussal gyártott lemez esetére rövid támaszközü hajlítással meghatározott 84,23 MPa-os értéket vettem alapul. Az I-es módhoz tartozó kritikus repedésterjesztő erő, $G_{I,C}$ esetében szakirodalmi értéket alkalmaztam, ez 250 J/m² [36]. A $G_{II,C}$ esetében a saját mérési eredményeimet használtam fel, így itt az adatlap lemez esetében meghatározott 1930 J/m²-es értéket adtam meg. Fontos még az ún. „power law exponent”, amely a vegyes tönkremenetel bekövetkezésének feltételét leíró egyenletben szereplő kitevő. Ennek alapértelmezett értéke 2, a szimuláció során ezt alkalmaztam.

Ezt követően hálózta a modellt. A véges elemes hálót hexaéder típusú elemekből építettem fel. Meggyőződtem róla, hogy az összes elem minősége (element quality) az elvárt 0,2 [-] fölött van, a szükséges hálófelbontás meghatározására konvergenciavizsgálatot végeztem. Általánosságban 0,45 mm-es elemméretet határoztam meg. Emellett „edge sizing” alkalmazásával figyeltem arra, hogy a vékonyabb, külső rétegek esetében a vastagság mentén legalább 5, míg a vastagabb középső rétegnél legalább 10 elem helyezkedjen el az átlapolt régióban. Emellett a kontaktok esetében az általánosnál kisebb, 0,3 mm-es elemméretet adtam meg.

A próbatest egyik végére befogást állítottam be kényszerként, míg a másik végére 3 mm-es elmozdulást adtam meg. A szimulációt 1 lépésben (step) végeztem el, ugyanakkor allépésekre (substep) bontottam, ezek maximális számának 3000-et adtam meg. Azt tapasztaltam, hogy ennél durvább felbontás esetén nem fut le a szimuláció.

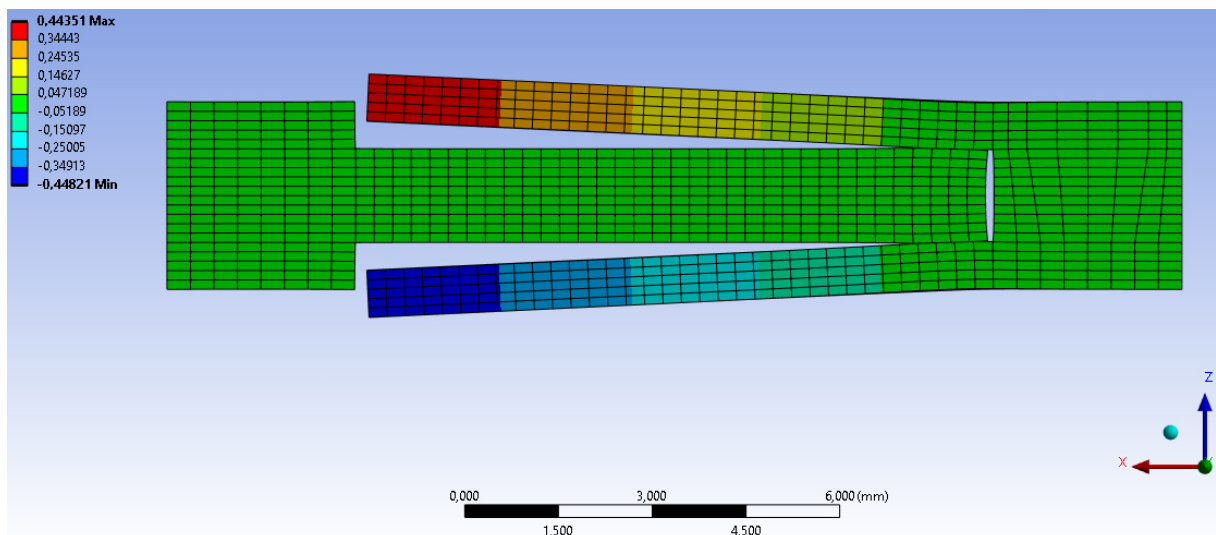
A szimuláció lefutását követően először az x irányú normálfeszültséget vizsgáltam. Ennek eloszlása abban az időpillanatban, amikor maximális értékét felveszi, a 44. ábrán látható.



44. ábra Az x irányú normálfeszültség eloszlása abban az időpillanatban, amikor a mennyiség maximuma jelentkezik

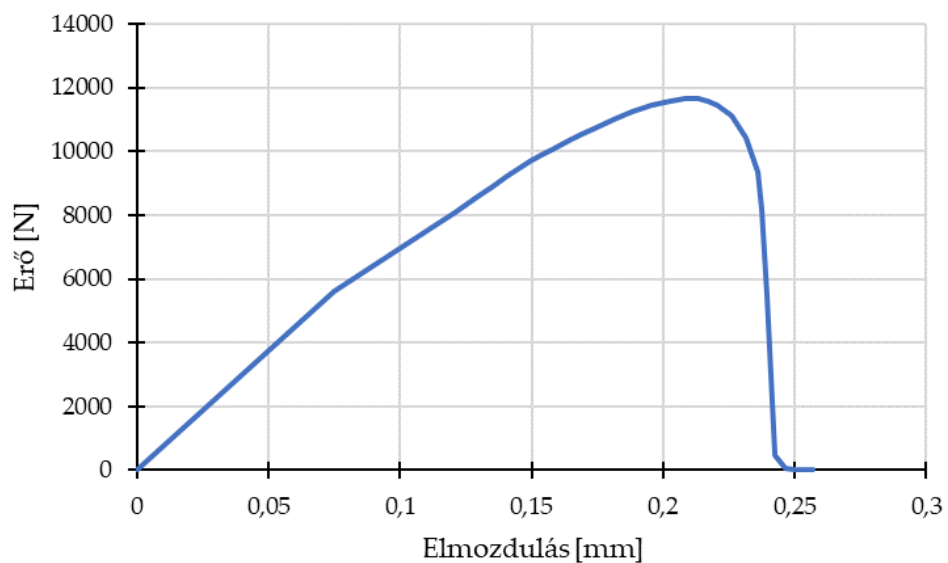
A 44. ábra azt mutatja, hogy – ahogy a szimuláció során végig – az x irányú normálfeszültség eloszlása az átlapolt régiótól távolodva homogén, ez alátámasztja, hogy az átlapolástól távolabb eső régiók elhagyása megengedhető a modellezés során.

Ezután a próbatest deformációjával foglalkoztam. A deformáció vizsgálata egyértelműen igazolta azon feltevésemet, hogy a kívánt II-es, nyíró mód mellett megjelenik az I-es, nyitó mód is a vizsgálat során, a szélső rétegek pedig ennek hatására kinyílnak. A mm-ben értelmezett z irányú deformáció eloszlása a 45. ábrán látható. Itt azt az időpillanatot ábrázoltam, amikor a z irányú alakváltozás felveszi maximális értékét. Ez 0,24 mm-es x irányú elmozdulásnál jelentkezik.



45. ábra A mm-ben értelmezett z irányú deformáció eloszlása abban az időpillanatban, amikor az felveszi maximumát

Végül a reakcióerőt ábrázoltam az elmozdulás függvényében, ezt a 46. ábra mutatja be.



46. ábra A szimuláció során felvett erő-elmozdulás diagram

A 46. ábra alapján az mondható el, hogy a szimuláció során jelentősen nagyobb erőértékek lépnek fel, illetve a tönkremenetel kisebb elmozdulásnál jelentkeznek, mint a valós vizsgálatok esetében.

A szimuláció eredményeit összegezve elmondható tehát, hogy a jelenséget kvalitatívan jól közelíti, ezáltal magyarázatot ad a mérések tapasztalataira, a valóság pontosabb leképezéséhez azonban az eredmények további elemzése és az anyagparaméterek finomhangolása szükséges.

4.11. Az eredmények értékelése, következtetések

Az előkísérletek eredményeit figyelembe véve összeállított kísérletterv végrehajtása során több szemszögből igyekeztem vizsgálni a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paramétereknek a prepregből autoklávban gyártott kompozit lemezek szerkezetére és tulajdonságaira gyakorolt hatásait.

A viszkozitásmérés során a hőciklusba a végső térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően beiktatott hőntartási szakasz, más néven plató alkalmazásának, illetve hőmérsékletének hatásait vizsgáltam. A hőmérséklet növekedésével párhuzamosan a ciklus során a gyanta viszkozitása csökken. Míg a köztes hőntartási szakaszt nem tartalmazó ciklusban a viszkozitás elér egy minimumértéket, majd gyors növekedésnek indul a térhálósodás beindulásával, addig a plató alkalmazása megállítja a viszkozitás esését, egy ideig közel konstans értéken tartja azt, miközben a térhálósodási reakció valamilyen mértékben előrehalad. A mérések során azt tapasztaltam, hogy a plató hőmérsékletének megválasztása nagymértékben befolyásolja mind a viszkozitasesés mértékét, mind a térhálósodási reakció sebességét. Alacsonyabb hőmérsékletű plató alkalmazása magasabb értékeknél fékezi meg a gyanta viszkozitásának csökkenését, ami azt eredményezheti, hogy a ciklus során kevesebb gyanta távozik el a kompozitból. Ezzel szemben magasabb hőmérsékleten történő hőntartás esetén a viszkozitás csökkenése kisebb értékeknél áll meg, így egy ilyen platóval viszonylag hosszú ideig tartható alacsonyan a mátrix viszkozitása, ami többek között nagyobb mennyiségű gyanta eltávozását eredményezheti a ciklus során. A VBO technológiánál, ahol nincs túlnyomás, a termékre kizárólag a vákuum hat, kimondottan fontos az alacsony viszkozitás elérése, hiszen ezáltal biztosítható a szálak megfelelő átitatottsága, illetve a légüregek megszüntetése. Ez alapján a viszkozitásmérés eredményei arra engednek következtetni, hogy VBO technológiánál érdemes lehet megfontolni az adatlap által ajánlottnál magasabb hőmérsékletű plató alkalmazását. Ehhez kapcsolódóan pontosabb következtetések levonásához további vizsgálatok szükségesek.

Alacsony platóhőmérséklet választása esetén a térhálósodás lassabban megy végbe, ezáltal hosszabb idejű hőntartás valósítható meg, ami kedvező vastag kompozit alkatrészek esetében a plató egyik célját jelentő hőmérséklet-kiegyenlítődség szempontjából. Ezzel szemben magas hőmérsékletű plató esetén viszonylag gyorsan beindul a térhálósodási reakció, ami a viszkozitás jelentős növekedésével jár együtt. A viszkozitásmérés folyamán szerzett tapasztalataim nagyfokú hasonlóságot mutatnak Park és társainak [5] egy eltérő epoxi gyantarendszerhez kapcsolódó eredményeivel, ők azonban kizárólag a plató hőmérsékletét vették figyelembe, elhagyásának, illetve alkalmazásának hatásaival nem foglalkoztak.

Az ezt követően előállított kompozit lemezekon végzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek nagymértékben befolyásolják a kompozit szerkezetét és tulajdonságait.

Kimondottan jelentős volt a termékre kifejtett nyomás hatása. Ennek vizsgálatakor azonos hőciklus mellett az egyik termék gyártásakor 1 bar, míg a másik esetén 7 bar túlnyomást alkalmaztam. Előbbi eset azért is különösen fontos, mert a termékre nézve a VBO technológiánál alkalmazott vákuummal megegyező nyomáskülönbséget jelent, így egyben lehetőséget ad ezen eljárás autoklávus technológiával való összehasonlítására is. A kísérletek folyamán azt tapasztaltam, hogy a térhálósításkor alkalmazott nyomás fokozásával jelentős mértékben csökken a termék porozitása, amit a sűrűségmérés mellett optikai mikroszkópos vizsgálattal is igazoltam. Ezen tapasztalataimat szakirodalmi adatokkal összevetve szintén találtam egyezést, Olivier és társai [3] jutottak hasonló következtetésekre a nyomás hatását illetően.

Az eredmények alapján arra is következtettem, hogy nagyobb nyomás a ciklus során több gyanta eltávozásához vezet, ezáltal nagyobb száltartalmat eredményez. Azonos nyomás mellett mind a lassabb felfűtési sebesség, mind a gyártó által ajánlott, a 125°C-os térhálósítási hőmérséklet elérését megelőzően, 90°C-on beiktatott plató alacsonyabb száltartalmat eredményez. A jelenség azzal magyarázható, hogy mindkét esetben magasabb értékeket vesz fel a ciklus során a mátrix viszkozitása, ezáltal kevesebb gyanta lép ki a kompozitból a térhálósítás közben.

A szálak tömegaránya nagy pontossággal meghatározható TGA eljárással, ez azonban mint tömegváltozáson alapuló mérési módszer, nem képes figyelembe venni a kompozit porozitását. A szál térfogatarány meghatározásához, és ezáltal a különböző paraméterekkel előállított kompozitok megfelelő minősítéséhez ezért szükség van a sűrűség arkhimédészi elven történő meghatározására. A sűrűségmérés és a TGA eredményeiből meghatározható a kompozit porozitása és valós szál térfogataránya.

A hajlítóvizsgálat során azt tapasztaltam, hogy a térhálósítás során alkalmazott nagyobb túlnyomás esetén a kompozit hajlítószilárdsága és deformációképessége is nagyobb. Azonos túlnyomással gyártott kompozitok esetén az eredményeket leginkább a száltartalom befolyásolja. Ennek megfelelően a paraméterek és a kompozit minősítéséhez mindenképpen szükséges a rétegek közötti tulajdonságok vizsgálata.

A kísérletek eredményei azt mutatták, hogy a nyomás, illetve a felfűtési sebesség változtatása, továbbá az említett plató beiktatása a vizsgált rétegek közötti tulajdonságokat – rétegek közötti nyírószilárdság és kritikus repedésterjesztő erő – jelentős mértékben befolyásolja. Ez a nyomás esetében főként a porozitásra vezethető vissza, így természetesen a nagyobb nyomás jobb rétegek közötti tulajdonságokat eredményez. A hőciklus változtatása esetén leginkább a gyantatartalommal hozhatók összefüggésbe a rétegek közötti tulajdonságok tekintetében tapasztalt eltérések. Magasabb gyantatartalom esetén nagyobb a rétegek közötti nyírószilárdság, illetve a kritikus repedésterjesztő erő értéke, ennek megfelelően a rétegek közötti nyírószilárdság szempontjából érdemes lassabb felfűtést alkalmazni vagy platót beiktatni a hőciklusba. A rétegek közötti tulajdonságokra hatással lehet az erősítőanyag átitatottsága is, ennek kapcsolata az alkalmazott technológiai paraméterekkel azonban további vizsgálatokat igényel.

A rétegek közötti tulajdonságok vizsgálatát tekintve elmondható, hogy egyszerű kivitelezhetősége, illetve az eredmények alacsony szórása miatt a rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat alkalmazásával viszonylag egyszerűen és pontosan értékelhetők az alkalmazott technológiai paraméterek.

Az elvégzett vizsgálatok módszertanát illetően is vonhatók le következtetések. A rövid támaszközű hárompontos hajlítóvizsgálat esetében a hajlító feltét hengereinek átmérője nagymértékben befolyásolja a töréskimenetel módját, a rétegek közötti nyírószilárdság értékét, illetve a mért adatok szórását is. Érdekes a szabványosnál nagyobb hengerátmérőt alkalmazni. A kétszeresen átlapoltsági próbatestekkel végzett vizsgálatok a vártnál lényegesen alacsonyabb értékeket eredményeztek, aminek oka az I-es, nyitósági módú igénybevétel jelentkezése. Magát a jelenséget véges elemes szimulációval, kohéziós zóna modellezéssel igazoltam, az alkalmazott anyagparaméterek finomhangolása és a szimuláció pontosítása azonban további vizsgálatokat igényel.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

A diplomamunkám keretei között folytatott kutatásomban a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paramétereknek a prepregből előállított kompozit lemezek szerkezetére és tulajdonságaira gyakorolt hatásaival foglalkoztam.

Először szénszövettel erősített epoxi mátrixú prepreggel végeztem előkísérleteket. Az előkísérletek során a technológiai paramétereknek és a kompozit tényleges száltartalmának, illetve mechanikai tulajdonságainak kapcsolatával és ennek kimutathatóságával foglalkoztam. Az előkísérletek eredményeit figyelembe véve állítottam össze a további kutatási szakaszra vonatkozó kísérlettervet.

Ezt követően UD üvegszál/epoxi prepregből készült kompozit alkatrészek térhálósításával foglalkoztam. Céлом az volt, hogy megállapítsam, a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek milyen hatással vannak a kompozit szerkezetére és tulajdonságaira, illetve meghatározom a gyártó által a technikai adatlapon előírt paraméterektől való – gyakran kényszerű – eltérések következményeit.

Ennek érdekében elsőként reológiai méréseket végeztem, ahol a hőciklusban eszközölt változtatások hatásait vizsgáltam a mátrixanyag viszkozitásának alakulására és a térhálósodási reakcióra. Ezután különböző paraméterekkel – nyomás, felfűtési sebesség, hőmérsékleti plató – gyártottam kompozit lemezeket, majd meghatároztam ezek száltartalmát és egyes mechanikai tulajdonságait. Utóbbiak esetében a szerkezeti változásokra legérzékenyebb jellemzőknek számító hajlító mechanikai jellemzőket és rétegekzi tulajdonságokat vizsgáltam.

A reológiai vizsgálatok során azt tapasztaltam, hogy a plató alkalmazása, illetve hőmérsékletének megválasztása hatással van a mátrix viszkozitásának alakulására és a térhálósodási reakció lejártszódására. Ezen tényezők jelentős mértékben befolyásolják a térhálósítás során eltávozó gyanta mennyiségét, ezáltal a kompozit száltartalmát. Alacsony hőmérsékletű plató alkalmazásával elkerülhető a túlzott viszkozitasesés, ezáltal csökkenthető az eltávozó gyanta mennyisége, így magasabb gyantatartalom érhető el. Magas hőmérsékletű plató alkalmazása főként autoklávon kívüli gyártásnál ajánlott, ahol az így viszonylag hosszan fenntartható, alacsony gyantaviszkozitás által biztosítható a légüregek megszüntetése és a szálak megfelelő átitatottsága.

A feldolgozáskor alkalmazott túlnyomás függvényében változik a kompozit porozitása. A túlnyomás növelésével csökkenthető a porozitás, ami javulást eredményez a rétegekzi nyírószilárdság és a nyíró igénybevételi módot jellemző kritikus repedésterjesztő erő tekintetében.

Mind a túlnyomás értéke, mind a hőciklus változtatása – felfűtési sebesség, plató – befolyásolják a kompozit száltartalmát, ami hatással van a kompozit tulajdonságaira. A vizsgált rétegekzi tulajdonságok tekintetében a nagyobb gyantatartalom bizonyul

kedvezőbbnek, ami lassabb felfűtéssel vagy a hőciklusba a végső térhálósítási hőmérséklet elérést megelőzően beiktatott, viszonylag alacsony hőmérsékletű plató alkalmazásával érhető el.

A kompozit száltartalma és porozitása nagy pontossággal meghatározható termogravimetria és sűrűségmérés segítségével.

Az eredményeket összefoglalva tehát kijelenthető, hogy a térhálósítási ciklus során alkalmazott technológiai paraméterek jelentős mértékben befolyásolják a kompozit szerkezetét és tulajdonságait. Tapasztalataim alapján az adatlapi paraméterektől való eltérések és a technikai adatlapon szereplő alternatív ciklusok egyaránt jelentős szerkezet- és tulajdonságbeli eltérésekhez vezethetnek a gyártó által ajánlott paraméterekkel történő térhálósításhoz képest. Továbbá elmondható, hogy a prepregok autoklávus és autoklávon kívüli, VBO eljárással történő feldolgozása azonos hőciklus esetén is számos különbséget eredményez, főként a porozitás, illetve a rétegek közötti tulajdonságok tekintetében. A térhálósítási ciklus technológiai paramétereinek értékelésére mindenképpen érdemes elvégezni néhány kísérletet, hiszen bizonyos esetekben megfontolandó lehet az adatlapi paraméterektől való eltérés, illetve az alternatív ciklusok alkalmazása. Az optimálisához közeli paraméterek viszonylag jól meghatározhatók a száltartalom és porozitás termogravimetriával és sűrűségméréssel történő vizsgálatával, illetve a rétegek közötti nyírószilárdság rövid támaszközü hárompontos hajlítóvizsgálattal történő meghatározásával.

5.2. Zusammenfassung

Im Rahmen meiner Masterarbeit habe ich die Effekte der technologischen Parameter, die im Vernetzungszyklus verwendet werden, auf die Struktur und die Eigenschaften von aus Prepreg hergestellten Faserverbundlaminaten untersucht.

Zunächst wurden Vorversuche mit kohlenstofffaserverstärktem Epoxymatrix-Prepreg durchgeführt. In den Vorversuchen untersuchte ich die Beziehung zwischen den technologischen Parametern und dem tatsächlichen Fasergehalt sowie den mechanischen Eigenschaften des Verbundstoffs und deren Nachweisbarkeit. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche habe ich den Versuchsplan für die weitere Forschungsphase erstellt.

Danach wurde die Vernetzung von Verbundteilen aus UD-Glasfaser/Epoxymatrix-Prepreg untersucht. Mein Ziel war es, die Effekte der technologischen Parameter, die während des Vernetzungszyklus verwendet werden, auf die Struktur und die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs zu bestimmen und die Folgen der oft unvermeidlichen Abweichungen von den vom Hersteller im technischen Datenblatt angegebenen Parametern zu ermitteln.

Zu diesem Zweck habe ich zunächst rheologische Messungen durchgeführt, um die Auswirkungen von Veränderungen im thermischen Zyklus auf die Veränderung der Viskosität des Matrixmaterials und die Vernetzungsreaktion zu untersuchen. Anschließend habe ich Verbundplatten mit verschiedenen Parametern wie Druck,

Heizrate und Temperaturplateau hergestellt und ihren Fasergehalt sowie einige ihrer mechanischen Eigenschaften bestimmt. Für letztere habe ich die Biegeeigenschaften und die interlaminare Eigenschaften untersucht, die am empfindlichsten auf strukturelle Veränderungen reagieren.

Bei den rheologischen Untersuchungen stellte ich fest, dass die Anwendung des Plateaus und die Wahl seiner Temperatur einen starken Einfluss auf die Viskosität der Matrix und die Vernetzungsreaktion haben. Diese Faktoren haben eine signifikante Auswirkung auf die Menge des während der Vernetzung entfernten Harzes und damit auf den Fasergehalt des Komposits. Durch die Verwendung eines niedrigen Temperaturplateaus wird ein übermäßiger Viskositätsabfall vermieden, wodurch die Menge des entnommenen Harzes verringert und ein höherer Harzgehalt erreicht werden kann. Die Verwendung eines Plateaus mit hoher Temperatur wird vor allem für die Produktion außerhalb des Autoklaven empfohlen, wo die relativ lang anhaltende niedrige Harzviskosität die Beseitigung von Lufteinschlüssen und die richtige Sättigung der Fasern gewährleistet.

Die Porosität des Komposits hängt vom Überdruck ab, der während der Verarbeitung angewendet wird. Durch Erhöhung des Überdrucks kann die Porosität verringert werden, was zu einer Verbesserung der interlaminaren Scherfestigkeit und der Bruchzähigkeit für Belastungsmodus II führt.

Sowohl der Wert des Überdrucks als auch die Änderung des thermischen Zyklus - Heizrate und Plateau - beeinflussen den Fasergehalt des Verbundstoffs, was Auswirkungen auf die Eigenschaften des Komposits hat. Bezüglich der untersuchten interlaminaren Eigenschaften hat sich ein höherer Harzgehalt als vorteilhaft erwiesen, der durch eine langsamere Erwärmung oder durch die Verwendung eines relativ niedrigen Temperaturplateaus erreicht werden kann.

Der Fasergehalt und die Porosität des Verbundwerkstoffs können mit hoher Genauigkeit durch Thermogravimetrie und Dichtemessung bestimmt werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die technologischen Parameter, die während des Vernetzungszyklus verwendet werden, einen erheblichen Einfluss auf die Struktur und die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. Nach meiner Erfahrung können sowohl Abweichungen von den Datenblattparametern als auch alternative Zyklen im technischen Datenblatt zu erheblichen Unterschieden in Struktur und Eigenschaften im Vergleich zur Vernetzung mit den vom Hersteller empfohlenen Parametern führen. Außerdem kann man feststellen, dass die Verarbeitung von Prepregs mit Autoklav- und Nicht-Autoklav-Vakuumverfahren mit dem gleichen thermischen Zyklus zu einer Reihe von Unterschieden führt, vor allem bezüglich der Porosität und der interlaminaren Eigenschaften. In jedem Fall sollten einige Versuche durchgeführt werden, um die technologischen Parameter des Vernetzungszyklus zu bewerten, da in einigen Fällen Abweichungen von den Parametern des Datenblatts oder die Verwendung alternativer Zyklen in Betracht gezogen werden sollten. Parameter, die in der Nähe des Optimums liegen, können relativ gut bestimmt

werden, wenn man den Fasergehalt und die Porosität durch Thermogravimetrie und Dichtemessung und die interlaminare Scherfestigkeit durch Kurzbiegeversuch prüft.

5.3. További megoldásra váró feladatok

A diplomamunkám keretei között elvégzett kutatást eredményesnek tartom, de természetesen számos további megoldásra váró feladat és a kísérletek folytatásával kapcsolatos ötlet fogalmazódott meg bennem.

Elsősorban a plató hőmérsékletének és időtartamának hatásaihoz kapcsolódóan szeretnék további vizsgálatokat végezni.

A kétszeresen átlapolt próbatestek esetében a várakozásokhoz képest alacsonyabb szilárdság értékekre adott magyarázatot végeelem-módszerrel igazoltam, az elvégzett szimulációk validálása, illetve a kohéziós zóna modell anyagparamétereinek finomhangolása azonban további vizsgálatokat igényel.

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. Olivier P., Cottu J.P., Ferret B.: Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates. *Composites*, **26** (7), 509-515 (1995).
4. Marton G.Zs., Mezey Z.T.: A technológiai paraméterek hatása a prepreg szerkezetek tulajdonságaira. in 'XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT 2022) Székelyudvarhely, Románia. 2022.04.21-2022.04.24., 182-186 (2022).
5. Park S.Y., Choi C.H., Choi W.J., Hwang S.S.: A Comparison of the Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites Produced by Non-autoclave with Vacuum Bag Only Prepreg and Autoclave Process. *Applied Composite Materials*, **26**, 187–204 (2019).
6. Schürmann H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Verlag, Berlin (2005).
7. <https://www.chemie.de/lexikon/Prepreg.html> (2022.10.20.).
8. Bonnet M.: Kunststofftechnik. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2016).
9. Yang N.: Composite Materials Engineering. Springer, Szingapúr (2017).
10. Flemming M., Ziegmann G., Roth S.: Faserverbundbauweisen. Springer Verlag, Berlin (1999).
11. Peters S.T.: Handbook of Composites. Springer Science+Business Media, Dordrecht (1998).
12. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
13. Cherif C.: Textile Materials for Lightweight Constructions. Springer Verlag, Berlin (2016).
14. Dimeski D., Srebrenkoska V.: Advanced prepreg ballistic composites for military helmets. in '6th International Scientific Conference on Defensive Technologies. Belgrád, Szerbia' 717-721 (2014).
15. Jacob A.: Technology update: preregs. *Reinforced Plastics*, **47**(6), 20-21 (2003).
16. https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (2022.10.20.).
17. <https://www.gurit.com/-/media/gurit/datasheets/guide-to-composites.pdf> (2022.10.20.).
18. <https://www.chemie.de/lexikon/Autoklav.html> (2022.10.20.).

19. Vermes B., Czigány T.: Alakváltó kompozitok tervezése és gyártása autoklávval. *Polimerek Műanyagipari Szaklap*, **6**, 895-898 (2020).
20. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R.: A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **70**, 132-154 (2015).
21. Brymerski W., Wurl T., Schieler O.: CFK-Prepreg-Prestechnologie für Class-A-Sichtbauteile. *Lightweight Design*, **9**, 44-49 (2016).
22. Hubert P., Centea T., Grunefelder L., Nutt S., Kratz J.: Out-of-Autoclave Prepreg Processing. *Comprehensive Composite Materials II*, **2**, 63-94, (2018).
23. Dang C., Bernetich K., Carter E., Butler G.: Mechanical Comparison of Out-of-Autoclave Prepreg Part to Conventional Autoclave Prepreg Part. In 'American Helicopter Society 67th Annual Forum, Virginia Beach, Amerikai Egyesült Államok. 3-5 (2011).
24. 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).
25. Agius S.L., Magniez K.J.C., Fox B.L.: Cure behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites. *Composites Part B: Engineering*, **47**, 230-237 (2013).
26. Liu L., Zhang B., Wang D., Wu Z.: Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Composite Structures*, **73** (3), 303-309 (2006).
27. ISO 14130: Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method (1997).
28. ASTM Standard D 2344/D 2344M-00: Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates (2000).
29. <https://www.compositesworld.com/articles/the-short-beam-shear-test-method-for-composite-materials> (2022.10.21.).
30. Krishnan P.: Evaluation and methods of interfacial properties in fiber-reinforced composites. in 'Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites' (szerk.: Jawaaid M., Thariq M., Saba N.), Woodhead Publishing, Oxford, Egyesült Királyság, 343-385 (2019).
31. Greene J.P.: Physical and Mechanical Properties. in 'Automotive Plastics and Composites' (szerk.: Greene J.P.), William Andrew Publishing, Oxford, Egyesült Királyság, 39-55 (2021).
32. Adams D.F., Busse J.M.: Suggested Modifications of the Short Beam Shear Test Method. in 'Proceedings of the 49th International SAMPE Symposium. Long Beach, Amerikai Egyesült Államok' (2009).

33. Fernando G.F., Al-Khodairi F.A.A.: The fatigue of hybrid composites. in 'Fatigue in Composites' (szerk.: Harris B.), Woodhead Publishing Limited, Sawston, Egyesült Királyság (2003).
34. Wisnom M.R., Jones M.I.: Size Effects in Interlaminar Tensile and Shear Strength of Unidirectional Glass Fibre/Epoxy. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **15**(1), 2-15 (1996).
35. Stojcevski F., Hilditch T., Henderson L.C.: A modern account of Iosipescu testing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **107**, 545-554 (2018).
36. Wisnom M.R.: On the Increase in Fracture Energy with Thickness in Delamination of Unidirectional Glass Fibre-Epoxy with Cut Central Plies. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **11**(8), 897-909 (1992).
37. Cui W., Wisnom M.R., Jones M.I.: An Experimental and Analytical Study of Delamination of Unidirectional Specimens with Cut Central Plies. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **13**(8), 722-739 (1998).
38. Marat-Mendes R., Freitas M.J.: DCB, ENF AND ECT Tests For Interlaminar Fracture Of Glass/Epoxy Unidirectional Laminates. in '10th Portuguese Conference on Fracture, Braga, Portugália' 1-11 (2006).
39. Microtex Composites, Technikai adatlap: X2-120, <https://microtexcomposites.com/> (2022.10.01.).
40. Hexcel, Technikai adatlap: 913 epoxy, <https://www.hexcel.com/> (2022.10.23.).
41. AGY, Technikai adatlap: Y110-S-2, <https://www.agy.com/> (2022.10.23.).
42. https://shop.novia.hu/wp-content/uploads/2018/07/ipox-MR-3012_MH-3122_AH12-1.pdf (2022.10.23.).
43. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=151&l=m> (2022.10.23.).
44. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=176&l=m> (2022.10.23.).
45. <https://oct.bme.hu/oct/hu/muszerpark> (2022.10.15.).
46. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=79&l=m> (2022.10.23.).
47. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=162&l=m> (2022.10.23.).
48. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=35&l=m> (2022.10.23.).
49. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=94&l=m> (2022.10.23.).
50. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=129&l=m> (2022.10.23.).
51. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=31&l=m> (2022.10.23.).
52. Marin G.: Oscillatory Rheometry. in 'Rheological Measurement' (szerk.: Collyer A.A., Clegg D.W.) Springer, Dordrecht (1998).
53. Picout D.R., Ross-Murphy S.B.: Rheology of Biopolymer Solutions and Gels. *The Scientific World Journal*, **3**, 17 (2003).
54. Szakács H., Varga Cs., Nagy R.: Polimerek Méréstechnikája. Pannon Egyetem, Veszprém (2002).

55. ASTM Standard D2734-94: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics (1994).
56. ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2017).
57. MSZ EN ISO 14125: Szálerősítésű műanyag kompozitok. Hajlítási tulajdonságok meghatározása (1999).
58. Sarkar R.: Interfacial Characterization of Fibrous Composites by Cohesive Zone Method. Diploma. North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, Department of Mechanical Engineering (2013).
59. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_thry/thy_mat11.html#d0e15412 (2022.12.01.).