



Lezárva:
2024. december 20.

Szálerősített műanyag kompozitok előállítása vákuum infúziós eljárással

Szerző: Pallos Patrik József¹

¹Vegyésmérnök MSc

Témavezető: Dr. Pethő Dóra¹

¹Egyetemi docens, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék

Tartalmi összefoglaló.

A hőre keményedő műanyagok nem mindig rendelkeznek megfelelő tulajdonságokkal, ezért azokat erősíteni kell. Az erősítőanyag alkalmazása miatt különleges előállítási módszereket kell használni. Az infúziós eljárásoknál vákuumot hozunk létre az erősítő anyag rétegei között és ezzel szívjuk be a mátrixanyagot a formába. Ezen módszerrel nagyon magas erősítőanyag tartalmú termékeket lehet előállítani. Ennek köszönhetően a termékek kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Gyakran alkalmazott mátrix anyag a poliészter gyanta. A polimer kompozitok legnépszerűbb erősítő anyagai a különböző szálak szerkezetek, amelyek lehetnek természetesek és szintetikusak. A feladata különféle struktúrájú üvegszövettel erősített poliészter kompozitok előállítása és mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. A kísérleti munka során különböző szálak erősítőanyagok alkalmazásával készítettük el a kompozitokat, és a minták mechanikai jellemzőit, így a törési szilárdságot, a rugalmasságot és a nyújtási tulajdonságokat mértük. Az eredmények alapján a kompozitok szilárdsága és rugalmassága szoros összefüggést mutatott az alkalmazott erősítőanyag típusával és a gyártási paraméterekkel. A szakítószilárdsági elemzések azt mutatták, hogy az üvegszálak erősítőanyagok alkalmazása jelentősen javítja a kompozitok mechanikai tulajdonságait, és az infúziós eljárás kulcsszerepet játszik a kívánt teljesítmény elérésében. Az unidirekcionális üvegszövet keresztirányú sérülékenységén javítani tudtunk a keresztirányú rétegrenddel. A különböző gyanták minimálisan befolyásolták a laminátum tulajdonságait, azonban hatásuk jelen volt. A szimmetria hatását nem sikerült egyértelműen megfigyelni, ezért további mérés bevonása szükséges a teljes képhez.

1 Bevetés

A polimer mátrix kompozitok, és azon belül is a szálerősítéses műanyagok (FRP) széles körben elterjedtek az ipar világában. Elsődleges alkalmazásuk a repülőgépiparon át, a sporteszközökön keresztül egészen a háztartási eszközökig megtalálható. A műszaki FRP-k kifejlesztése az üvegszálak anyagok megjelenésével indult az 1940-es években, amely jelentős fellendülést hozott a repülőgép teljesítmény-orientált gyártásában. A fejlesztési irányokat jelenleg elsősorban gazdasági szempontok határozzák meg, a cél pedig olyan kompozitok előállítása, amelyek hatékonyan, kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezek az anyagok, ha nem is minden területen, de versenyképes alternatívát nyújthatnak a hagyományos szerkezeti anyagokkal szemben. A FRP-nek a hátránya a fém- és kerámiaalapú szerkezeti anyagokkal szemben, hogy alkalmazhatósági hőmérsékletük 400°C alatt van még a legfejlettebb mátrixok esetében is.[1]

2 Irodalmi összefoglalás

2.1 Alkalmazás

2.1.1 Repülőgépipar. A repülés korai időszakában a repülőgépek szerkezetei kompozit szerkezetek voltak, amelyeket nagyrészt fából (természetes kompozit), drótból és szövetből készítettek. Az alumíniumötvözetek az 1930-as években vették át az uralmat, és azt követő időkhöz domináltak az iparágban. A fából készült szerkezetek azonban egészen a II. világháborúig fennmaradtak, mint például a fa szendvics laminátumból ([rétegezt lemez/balsa/rétegezt lemez]) épített (DH98) repülőgép. A Spitfire 1940-es törzset pedig Gordon Aerolite anyagból tervezték és építették, amely egy olyan fenolgyanta volt, amely lenrost szálakat tartalmazott, és a modern szálerősített műanyagok elődjének tekinthető.

A jelenlegi kereskedelmi repülőgép alkalmazások a másodla-

gos szerkezet FRP-vel történő helyettesítésére összpontosítanak, ahol az erősítőanyag szén, üveg, kevlár, vagy ezek hibridjei. A CFRP fő előnyei közé tartozik a tömeg- és alkatrészcsökkentés, a komplex formájú gyártás, a kevesebb selejt, a jobb fáradási tulajdonságok, a tervezés optimalizálása és az általánosan jobb korrózióállóság.

A másodlagos szerkezetek (pl.: külső borítás, belső alkatrészek) esetében a könnyűfémötvözetek helyett a kompozitok alkalmazásával 40%-ot megközelítő súlymegtakarítás érhető el, míg az elsődleges szerkezetek (pl.: szárnyak, törzs, farok, futómű) esetében 20%-os megtakarítás realisabb.[2]

2.1.2 Építőipar. Az utóbbi két évtizedben az üvegszál-erősítésű műanyag anyagok, mint például az üvegszál-erősítésű műanyag betonacélok mint betonszerkezetek erősítőanyagai nagy figyelmet kaptak. Számos építőmérnök az FRP-t az egyik leginnovatívabb anyagnak tekinti, amely a korrózió miatt a betonszerkezetek erősítésének acél betonvasakkal való, öröklött hiányosságait kiküszöbölheti zord környezetben.

Az acélhoz képest az FRP nagyobb korrózióállósággal, nagyobb szakítószilárdsággal és kisebb tömeggel rendelkezik. Emellett nem vezet az elektromosságot és nem mágnesesek. Így a tengervízben, tengervíz közelében vagy hasonló korrozív környezetben épített szerkezeteknél, ahol elektromágneses semlegességet és/vagy elektromos szigetelést kell biztosítani, vagy ahol jegesedés elleni sóknak vannak kitéve, az FRP felbecsülhetetlen értékűvé válhat.

Sajnos az FRP nem mentes az akadályoktól, amelyeket meg kell oldani, mielőtt betonszerkezetek megerősítésére használhatók. A fő akadályok a magas kezdeti költségek, az alacsony rugalmassági tényező és az alakíthatóság hiánya.[3]

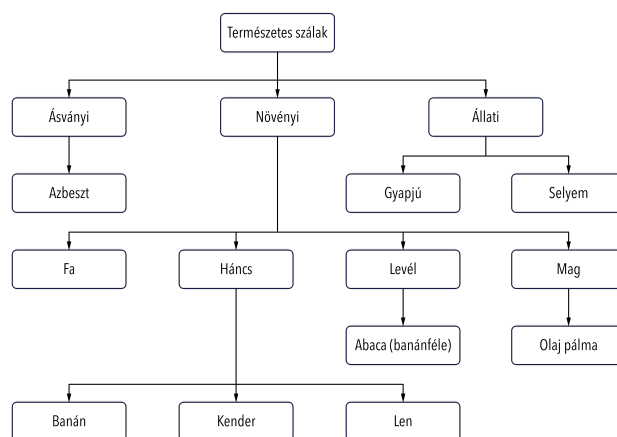
Továbbá az üvegszál erősítésű műanyagok megoldást jelentenek az alagútfúró gép (TBM) által a feltérési területen való áthaladás problémájára. Az egyik nehezebben kezelhető problémának bizonyult a vasbeton szerkezetek TBM általi áthaladása, amelyek az alagutak építésénél a különböző indító kamrákat, a visszavezető és közbenső szerkezeteket alkotják. Vasbeton szerkezet esetén a szerkezet átfúrása károsítaná a fúrópajzsot. Így ezt kézi bontószerszámok bevonásával oldották meg, ami időigényes és veszélyes. Az alacsony nyírósilárdság lehetővé teszi, hogy a TBM könnyedén áthaladjon az üvegszál-erősítésű válaszfalszakaszon, ami hatalmas előnyökkel jár a biztonság, az időmegtakarítás, és ezáltal a gazdaságosság szempontjából is. Ez az ún. "Soft-Eye" feltérési technika.[3]

2.1.3 Járműipar. A kompozit anyagok használata a gépjárműalkatrészek gyártásában számos előnnyel jár a hagyományos fémekkel szemben. A nagy tartósság, szilárdság, könnyű súly és korróziótűrősség miatt kerülnek felhasználásra a kompozitok. Az alváz, a fékekkel kapcsolatos alkatrészek, a kormányrendszerek, az akkumulátorral és töltéssel kapcsolatos berendezések, valamint a differenciálmű és a felfüggesztési rendszerek jelentős mértékben függenek a kompozit anyagoktól. Itt megjelennek a szén-szén, fém és kerámia mátrix kompozitok is a szálerősítésű anyagok mellett. Az autóipar nagymértékben támaszkodik a szálerősítésű kompozitokra, mivel azok a szilárdság, a merevség és az alacsony önsúly keverékét kínálják.[4]

2.2 Szál anyagok

2.2.1 Természetes szálak. A természetes szálak alacsony költségűek, jól hozzáférhetőek, illetve számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek a polimer szálakhoz képest. Mint például az alacsony sűrűség, a biológiai lebomlás és a koptató hatás hiánya. Bizonyos hátrányok azonban, mint például a hidrofób polimer mátrixszal való inkompatibilitás, a feldolgozás során történő aggregátum képződésre való hajlam és a nedvességgel szembeni gyenge ellenállás nagymértékben csökkentik a természetes szálak polimerek erősítőanyagaként való felhasználási lehetőségeit.[6]

A természetes szálakat a forrástól függően három csoportba soroljuk: mag(szór), hánccszálak és levélszálak. E szálak közül a juta, a Hócsalán (ramie), a len és a szizál(kender) a leggyakrabban használt szálak a polimer kompozitokban. A természetes szálakat faörlemény formájában is gyakran alkalmazzák a természetes szálak kompozitok előállításához.



1. ábra Természetes szálak osztályozása[5]

1. táblázat Természetes szálak mechanikai tulajdonságai[6, 7]

	Fajsúly [-]	Szakítószilárdság [MPa]	Rugalmassági állandó [GPa]	Fajlagos modulus
Juta	1.3	393	55	42
Szizál	1.3	510	28	22
Len	1.5	334	58	34
Kender	1.1	389	35	32
Ananász	1.6	170	62	39
Üvegszál-E	2.5	3 400	72	29

2. táblázat Különböző üvegszálak fizikai és mechanikai tulajdonságai[8, 9]

	Fizikai tulajdonság	Young modulus [GPa]	Sűrűség [g cm ⁻³]	Nyúlás [%]	Szakítószilárdság [GPa]
A-üveg	Jobb élettartam, szilárdság és elektromos ellenállás	68.99	2.43	4.9	3.30
C-üveg	Magasabb korrózióállóság	68.94	2.53	4.6	3.32
E-üveg	Nagyobb szilárdság és elektromos ellenállás	72.31	2.59	4.7	3.45
R-üveg	Nagyobb szilárdság és korrózióállóság	85.58	2.56	4.9	4.13
S-üveg	Legnagyobb szakítószilárdság	86.92	2.45	5.5	4.88

Amint az 1. táblázatban látható, az üvegszálak szakítószilárdsága lényegesen nagyobb, mint a természetes szálaké, bár a modulusuk azonos nagyságrendű. Ha azonban a természetes szálak fajlagos modulusát (rugalmassági állandó/fajsúly) vesszük figyelembe, a természetes szálak értékei az üvegszálakéval megegyező vagy annál jobb értékeket mutatnak. Ez a magasabb fajlagos tulajdonság az egyik fő előnye a természetes szálak kompozitok alkalmazásának olyan területeken, ahol a kívánt tulajdonságok között szerepel a súlycsökkentés is.

2.2.2 Üvegszál. Az üvegszálak széles körben használt polimer erősítőanyagok, az összes FRP mintegy 93%-át üvegszállal erősítik. Az E-üveg (elektromos osztályú üvegszál) a legrégebbi és legelterjedtebb típus. Emellett létezik A-üveg és C-üveg, mindkettő vegyszerálló üveg, valamint egy nagyon erős R-üveg és S-üveg. Az üvegszálak laboratóriumi körülmények között, akár 7 000 MPa szakítóhúzást is képesek elviselni. Ezzel szemben a forgalomban kapható üvegszálak 2 800 MPa-os terhelést viselnek el. A szálerősítésű kompozitok mechanikai tulajdonságait elsősorban a bennük rejlő feszültség átviteli képessége határozza meg, amelyet ezen felül a mátrix szilárdsága, a szálak szilárdsága és a felületi adhézió mértéke is befolyásol.[8]

A folytonos üvegszálak szálátmérője általában 9 és 24 µm között mozog, bár lehet akár 3 µm is. A hagyományos E-üveg átmérője jellemzően ennek a tartománynak a felső végén van. A nagy teljesítményű R- vagy S-üvegszálak a teljes tartományban rendelkezésre állnak, de a legnagyobb szakítószilárdságot igénylő alkalmazásokban a finomabb szálátmérőket részesítik

előnyben. A finomabb szálak nagyobb szilárdságot mutatnak, mint a durvább társaik, mert kisebb térfogatukkal együtt kisebb a valószínűsége a meghibásodást okozó rendellenességeknek. A nagyobb szilárdság mellett a finom, nagy teljesítményű szálak előnyben részesítésének másik oka a kompozit alkalmazásokban való könnyebb feldolgozhatósága.[10]

2.2.3 Szénszál. Az összes erősítőszál közül a szénszálak biztosítják a legnagyobb fajlagos szilárdságot és rugalmassági modulusot. A szénszálak még nagyon magas hőmérsékleten is képesek megtartani szakítószilárdságukat. A szénszálak magas hő- és elektromos vezetőképességet biztosítanak viszonylag alacsony hőtágulási együttható mellett.[8]

Kezdetben az 1960-as években a szénszállal erősített polimereket (CFRP) a repülőgépiparban használták szerkezeti elemek készítésére. A CFRP ára az 1990-es években jelentősen csökkent, és ezért megjelent a kompetitív sportok világában. Az ezredforduló utáni évtizedekben a CFRP felhasználása megduplázódott a világpiacra, jelenleg szélerőművek lapátjai, járművek szerkezetei, de legnagyobb mennyiségben a hadipar és az űrkutatás alkalmazza. Szakértők úgy vélik, kis sűrűségük, könnyű súlyuk, nagyobb korrózióállóságuk, jobb merevségük és jobb fáradási teljesítményük miatt felváltják a hagyományos fémeket.[12]

2.2.4 Kevlár. Az 1966-ban felfedezett polipara-feniléntereftál-amid (PPTA), a Fiber B (Kevlar), volt az első para-aramid, amely merev struktúrája miatt nagyon magas

3. táblázat A szénszál mechanikai és fizikai tulajdonságai [8, 11]

Típus	Sűrűség [%]	Szakítószilárdság [GPa]	Rugalmassági állandó [GPa]	Szén tartalom [m/m%]	Szakadási nyúlás [%]
Alacsony szilárdság	1.6–1.9	2.5–3.2	245–275	92–94	1.20–1.50
Nagy szilárdság	1.6–1.8	3.7–4.2	245–275	91–93	1.20–1.30
Ultranagy szilárdság	1.5–1.9	4.6–4.8	251–272	92–95	1.20–1.45
Közepes modulus	1.8–1.9	5.8–6.1	305	96–99	1.21–1.42
Magas modulus	1.6–1.8	2.4–3.0	382–405	>99.2	0.61–0.73
Ultranagy modulus	1.8–2.2	3.7–4.1	538–545	>99.9	0.31–0.42

4. táblázat Kevlár szál fizikai és mechanikai tulajdonságai [8, 15]

	Rugalmassági állandó [GPa]	Sűrűség [g cm ⁻³]	Szakítószilárdság [GPa]	Szakadási nyúlás [%]
Kevlár 29	71	1.43	2.8	4.5
Kevlár 49	134	1.46	2.8	2.9
Kevlár 129	98	1.46	3.5	3.2
Kevlár 149	144	1.48	2.4	1.6

olvadásponttal rendelkezett. A para-aramid szálak különleges tulajdonságai azzal is magyarázhatók, hogy a láncmolekulák kötéstengelyük körüli elfordulása térbelileg akadályozott, miután a nagy molekulák nem hajtogatottak, hanem pálcika alakúak.[13]

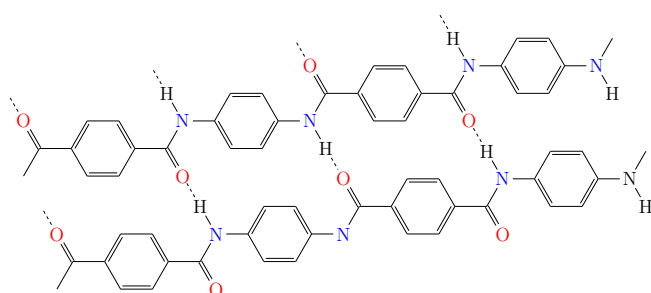
Úgy is értelmezhető, mint a nylon, amelynek polimerláncában extra benzolgyűrűk vannak a merevség növelése érdekében. Elsősorban az ipari és fejlett technológiákban, például a ballisztikus páncélzatban, helikopter lapátokban, pneumatikus merevítésben egyre szélesebb körben alkalmazott alkalmazása miatt népszerű. Más szintetikus szálakkal összehasonlítva jelentősen kisebb szálnyúlással és nagyobb szakítószilárdsággal, illetve rugalmassággal rendelkezik. A kevlárszál üvegesedési hőmérséklete 360°C körül van, és nem olvad meg, mint a nylon.[14]

2.3 Mátrix anyagok

A termoplaszt műanyagok használata megnőtt az injektálásra használt műanyagok körében, a legtöbb FRP ennek ellenére is

hőre keményedő gyantákon alapszik. A 5. táblázat összefoglalja a főbb jellemzőket, bár van némi átfedés, mivel az FRP-k szívóssága mindkét gyanta típusnál érzékeny a szálak morfológiájára, a határfelületi adhézióra és az adalékanyagok jelenlétére.

2.3.1 Termoplaszt. A hőre lágyuló műanyagok esetében a nagy moláris tömeg miatt az impregnáláshoz magasabb hőmérséklet vagy speciális technikák alkalmazása szükséges. Ezt a nehézséget viszont az alábbi tényezők ellensúlyozhatják: nem reaktívak, tehát a prekursorok korlátlanul eltarthatóak, a formázási folyamatok reverzibilisek. Feldolgozása fröccsöntéssel (injection molding) történik, jellemzően <1 mm hosszúságú szálakkal. Vákuum infúziós eljárás során speciális eszközökre lenne szükség a hőmérséklet szabályozására, a duroplaszt (termoszet) műanyagoknál magasabb viszkozitás áramoltatására. Általánosságban véve kompozit anyagok során kiemelkedő lehet a jövőben a biodegradációt tekintve, a polilaktidok (PLA) és biológiai eredetű poliészterek.[16]

**2. ábra** Kevlár szerkezete[13]**5. táblázat** A hőre keményedő és hőre lágyuló műanyagok tulajdonságai és technológiai jellemzői [1]

Tulajdonság	Duroplaszt	Termoplaszt
Rugalmasság	magas	közepes
Alkalmazási hőmérséklet	magas	közepes
Szívósság	közepes	magas
Viszkozitás	alacsony	magas
Feldolgozási hőmérséklet	alacsony	magas
Újrahasznosíthatóság	limitált	jó

2.3.2 Duroplaszt. A hőre keményedő polimerek több fő típusa létezik, amelyeket kémiai összetételük, kikeményedési mechanizmusuk és végső tulajdonságaik különböztetnek meg. A hőre keményedő keményítőanyagok katalitikusan, termolítikusan vagy fotolítikusan polimerizálhatóak széles hőmérséklet tartományban. Az FRP-k egyik fő előnye az alacsony kezdeti viszkozitásuk, amely megkönnyíti a szálak impregnálását. A legfontosabbak a poliészterek, az epoxik és a nagy hőtűrésű (HPTP) műanyagok.[1]

Itt sem kerülhetjük ki a biopolimerek kérdését. Természetes olajokból (szójabab, ricinus, lenmag stb.) származó gyanták felhasználhatók a telítetlen poliészterek, vinilészterek és epoxigyanták helyettesítésére. A természetes olajok olcsók, nagy mennyiségben állnak rendelkezésre és megújuló anyagok. A zsírsavak trigliceridjei polimerizálhatóak, ha aktív helyeikre pl.: észtercsoportot, allil szénhidrogént vagy kettős kötést csatolunk. A funkcionálisra használt módszerek közé tartozik az epoxidáció, a halogénsavakkal vagy alkoholokkal történő gyűrűnyitási reakció, az ozonolízis és a hidratálás.[16]

2.3.3 Epoxigyanták. A térhálósodás megindítása általában egy többfunkciós társ reagenssel történik ("hardener"). Ez a katalizátor poliaddíció révén alacsony zsugorodás mellett, háromdimenziós hálót alkot. Általában a használt alifás amin katalizátorok lehetővé teszik a polimerizációt szobahőmérsékleten, de a folyamat erősen exoterm, ami vastagabb rétegeknél problémát okoz. Az aromás amin keményítők magasabb térhálósodási hőmérsékletet igényelnek, de jobban alkalmazhatók nagyméretű alkatrészekhez, és viszonylag magas HDT-t (230°C) biztosítanak. [1]

2.3.4 Telítetlen poliészter gyanták. Ezeket a telítetlen poliésztereket (UP) kifejezetten a szálerősítéses kompozitokhoz fejlesztették ki, alacsony költséget és könnyű kezelhetőséget előtérbe helyezve. A prepolimerek (adalék- anyagot nem tartalmazó "nyers" gyanta) adalékolással, majd fotolitikus vagy termolitikus katalizációval térhálósodási folyamatba vihetők. Számolni kell a megfelelő folyási tulajdonság elérése érdekében további társ-reagens hozzáadásával, ami sztirol tartalmú és gyakran 50 m/m% is szükséges lehet. A szilárdulás után az UP-ok hűtőrése (HDT) 80°C felett mozog, egyes vinilészter gyantáknál a 150°C-ot is elérheti.[1]

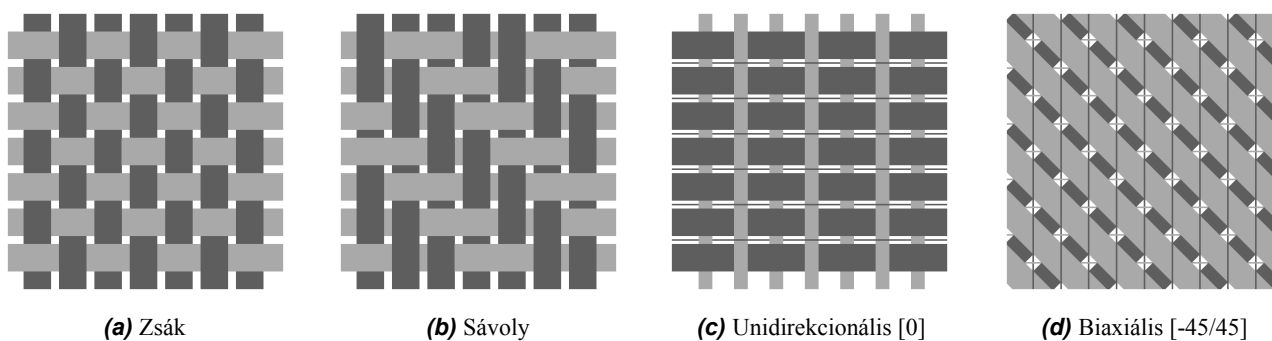
2.3.5 Vinilészter gyanták. A vinilészter gyanták szívósságot és kémiai ellenálló képességet biztosítanak, amely általában

jobb, mint a telítetlen poliésztereké. Egyrészt az epoxi vázon nincsenek észterkötések, ahol a polimeregységek fenil-éter kötéssel kapcsolódnak, így számos kémiai környezetben és különösen magas lúgos tartományban sokkal ellenállóbbak a degradációval szemben, mint az észterkötések. Másrészt a vinilészter gyantában az észterkötések csak a molekula végén vannak jelen, ami minimálisra csökkenti a reakcióba vihetőségét. Az UP-ok és vinilészterek fő kompozit felhasználási területei az építő- és közlekedési ipar (hajók, karosszériaelemek), és vegyszertároló tartályok.[1, 17]

2.3.6 Térhálósodás. A lineáris telítetlen poliészterek láncként általában tíz telítetlen csoportot tartalmaznak, és sztirol monomerrel történő szabadgyökös kopolimerizációval, gyorsító és katalizátor jelenlétében térhálós polimer hálóvá alakulnak át. A térhálósodási folyamat összetett, és lehetségesek az egyidejű reakciók: a sztirol-UP kopolimerizáció, a sztirol homopolimerizáció és az UP homopolimerizáció. A sztirol az egyedüli használt monomer, bár más, kereskedelmi szempontból fontos térhálósító anyagok, köztük vinilészterek, dimetakrilátok és divinilbenzolok is használhatók. A gyanta kikeményítése szobahőmérsékleten nagyban függ a peroxid katalizátortól és a gyorsítótól, ami egy kobalt só.[18]

A fázisváltás során a megkülönböztetünk egy gélesedési és egy üvegesedési szakaszt. Definíció szerint a gélesedési az a pont, ahol a gyantára jellemző viszkózus folyadék hirtelen rugalmas gél állapotot vesz fel. A rendszer viszkozitása tart a végtelenbe, és a nyírófeszültség nullából tart egy véges érték felé. A gélesedés a kikeményítés korafázisában jelentkezik, alacsony konverzióval, enyhe hőmérséklet emelkedéssel. Végül az üvegesedési szakasz, ahol az aktív csoportok mobilitása nagyban lecsökken, így vezetve a polimerizációs folyamat végéhez.[19]

2.3.7 Katalizátor. A alacsony hőmérsékletű (szobahőmérséklet) eljárások esetén általánosan használt iniciátorok közé tartoznak a dialkil-peroxidok, keton-peroxidok (MEKP) és hidroperoxidok. A katalizátor alacsony hőmérsékleten történő bomlásának előidézése érdekében a peroxidokhoz gyorsítót, például tercier aminokat és fémek sóit, mint például kobalt-oktoátot vagy -naftenátot adnak. A magasabb hőmérsékleten (70-90°C) használt legfontosabb iniciátorok a peroxidok, amelyek a hőbomlás eredményeként szabadítják fel a gyököket.[19]



3. ábra Szövési struktúrák (vetülékfonal: világos, láncfonal: sötét, kötőfonal: vékony szürke)

2.4 Szövet

A szálak biztosítják a kompozit fő merevségét és szilárdságát, így a szálak rendezettsége és iránya jelentős hatással van a kompozit mechanikai tulajdonságaira. A szálak elrendezése eltérő lehet: rendezetlen, mint az aprított szálak és az ún. üvegszönyegek vagy rendezettek, például hosszú szálak formájában, amelyek fonalkötegekbe állva szövött, fonott vagy kötött textíliákat alkotnak. Minél inkább igazodnak a szálak a terhelési irány(ok)hoz, annál nagyobb a kompozit merevsége és szilárdsága az adott irány(ok)ban. Ennek eredményeként a véletlenszerűen elhelyezkedő szálakat tartalmazó nem szövött üveggompozit merevsége alacsonyabb lesz, mint egy olyan szövött kompozit, amelyben a szálak a terhelés irányába rendezettek.

2.4.1 Zsák szövés. A zsák(plain) szövésű szövetek a legegyszerűbb szövött szövetarchitektúrát képviselik. A sima szövött szövetben a megfelelő lánc- (warp yarn) és vetülékfonalak (weft yarn) egymás fölött, egymás után helyezkednek el (3a. ábra). A zsák szövésű szövetek általában szimmetrikusak, jó stabilitást mutatnak és porózusak. Mindezek mellett magasabb gyűrődési fokot eredményez a szerkezetben lévő nagy átkötési sűrűség miatt, ami negatív hatással van ezeknek a szövetalapú kompozitoknak a mechanikai tulajdonságaira.[20]

2.4.2 Sávoly szövés. A sávoly szövésű (twill) szövetekben egy vagy több láncfonalat szönek a megfelelő vetülékfonalak fölé és alá szabályos mintázatban. A szövet felépítésében a bordázat egyenes/tört átlós megjelenésű (3b. ábra). A sávoly szövésű szöveteknél jó a drappolhatóság és nedvesítési tulajdonság. Ha a gyártás során a szövetszerkezetben lévő gyűrődéseket csökkenteni tudják, akkor az FRP kompozitok nagyobb mechanikai teljesítményt érhetnek el, mint a zsák szövésű szövetekkel.[20]

2.4.3 Unidirekcionális. Az unidirekcionális szövet, amelyben a szálak egyetlen irányban futnak. A szövetben ritkított és keskenyebb vetülékfonalak haladnak a láncfonalak felett és alatt, amit a láncfonallal párhuzamos kötőfonalak (binding yarn) fognak össze (3c. ábra). A szálak egyirányú futása kifejezetten nagy szakítószilárdságot és merevséget biztosítanak ebben az irányban, azonban a szövet csak egy irányban nyújt kellő ellenállást, így a keresztirányú terhelésekre sérülékenyebb. Ez különösen hasznos olyan alkalmazásoknál, ahol egy adott irányban kell ellenállni a nyomó- vagy húzóerőnek, mint például repülőgép-szárnyak, vitorlák, hajótestek és sportfelszerelések esetében.

2.4.4 Biaxiális. A biaxiális szövet, amely két irányba elhelyezkedő szálakat tartalmaz, jellemzően egymásra merőlegesen. A szövet hagyományos értelemben vett lánc- vagy vetülékfonalak nem tartalmaz, hanem a két ellentétes irányú fonalak rétegeit kötőfonal tartja össze (3d. ábra). A kétirányú szálelrendezés növeli a szövet mechanikai tulajdonságait, különösen a szakítószilárdságot és a merevséget mindkét szálirányban.

2.5 Technológia

A vákuum asszisztált gyanta infúziós eljárás (VART) egy költséghatékony módszer szálerősített műanyag kompozitok előállítására az 1950-es évektől kezdődően. Viszonylag alacsony szerszámköltsége és a kiváló minőségű alkatrészek előállítására való képessége miatt számos iparágban alkalmazzák a gyártók, különösen nagyméretű szerkezetek, például hajótestek és szél-turbinák lapátjainak gyártására.

A végtermék minősége megegyezik az autoklávban készült kompozitokkal. Autokláv alkalmazásával tömörebb és lényegesen alacsony levegőtartalmú kompozit állítható elő a kikeményítés hőmérsékletén, nagy nyomást alkalmazva. A VART módszer

az autokláv alkalmazása nélkül képes a repülőgépipar minőség követelményeinek megfelelni. A fő kihívás a folyamat minden egyes lépésének alapos ismerete és kellő tapasztalat megléte.[21] Az eredeti gyantainfúziós eljáráshoz számos módosítás létrejött története során, ami jelentős számú eljárásváltozat létrehozásához vezetett. Ide tartoznak többek között a gyantaáramlást segítő gyantaelosztó csatornák, illetve a szövet ciklikus tömörítése az infúzió előtt melynek célja, hogy csökkentsék annak vastagságát. A gyanta infúziója részleges vákuumban történik, hogy csökkentsék a szövet visszarágását. Félig áteresztő membránokat alkalmaznak a gázmentesítés elősegítésére. Két vákuumkamra kialakítását végzik dupla „zsákolási” technikával, hogy növeljék a vákuum integritását és csökkentsék a szálak visszarágását. Továbbá dupla vákuumkamrát használnak dinamikusan változó nyomásszintekkel és nyomáselosztással, az ún. „impulzus infúzió” megvalósítása érdekében.[22]

2.6 Laminátum felépítése

Klasszikus gyanta infúziós eljáráshoz képest, ahol két részből álló szerszám van, egy merev váz adja (A-oldal) a termék formáját, melynek a szélére fólia van rögzítve, ez lesz a rugalmas réteg (B-odal). Az A-oldali szerszámot nagyon kis terhelés éri, a szerszámkészítési költségek jelentősen csökkennek, de a vákuumzsák minimális merevségének hiányában a laminátum vastagságát befolyásolja a vákuumtérben létrejövő nyomáskülönbség, ami közvetlen hat a gyanta áramlási sebességre.

A szerszámlapra fektetett szövetre kerül egy lehúzzható réteg (tépőszövet), ami lehetővé teszi az A-oldali szerszám leválasztását. Ha az erősítőanyag síkbeli áteresztőképessége alacsony, a gyantaáramlás fokozása érdekében a tépőszövet felé egy elosztó közeget (gyantavezető háló) is érdemes fektetni.[23]

A legfelső rétegre és a vákuum fólia közé kerül a gyantaelosztó spirál, mind a bemeneti, mind a kimeneti csomák alá. Feladata a gyanta elosztása az áramlás irányára merőlegesen, ezzel meggátolva az üres terek kialakulását. A kilépő oldalon lévő

spirál alá, lehetőség szerint érdemes ún. gyantafogó szövetet helyezni, mely segítségével csökkenteni lehet a szövetből a gyanta elhordást.

2.6.1 Kiegyensúlyozott rétegfelépítés. A kiegyensúlyozott rétegfelépítés azt jelenti, hogy a laminátumban a különböző szögállású rétegek párosítva vannak egymással úgy, hogy a pozitív és negatív elforgatású rétegek kiegyenlítik egymást. Például egy $[+45/-45]$ rétegfelépítés kiegyensúlyozottnak számít, mivel a $+45^\circ$ és -45° szögpárok megszüntetik nyúlás-nyírás, vagyis az anyag nem fog húzás hatására elcsavarodni.[24]

2.6.2 Szimmetrikus rétegfelépítés. A szimmetrikus rétegfelépítés esetén, a laminátum középsíkja mentén tükrözve az egyik oldal rétegei ugyanazok, mint a másik oldalon. Például, ha egy laminátumban a rétegek sorrendje a középsíktól felfelé $[0/-45/+45]$, akkor a középsíktól lefelé ugyanilyen sorrendben kell lenniük $[-45/+45/0]$.

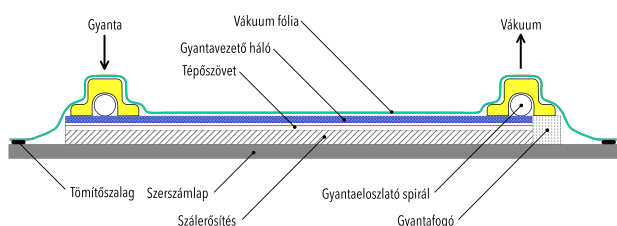
Ez a szimmetria biztosítja, hogy a laminátum hőtágulás vagy mechanikai terhelés hatására ne deformálódjon aszimmetrikusan (ne hajoljon vagy csavarodjon meg). A kiegyensúlyozott felépítés önmagában nem feltétlenül szimmetrikus, de biztosítja, hogy a nyíró és húzó irányú feszültségek ne vezessenek nem kívánt alakváltozáshoz.[24]

A szimmetrikusan rétegzett lapokat olyan alkalmazásokban használják, ahol a kikeményítés magas hőmérsékleten megy végbe, ezzel meggátolva a vetemedést. Kiegyensúlyozott réteg esetében a nyúlás-nyírás kölcsönhatás kiküszöbölhető. A repülőgép szerkezetekhez használt kompozit anyagoknál csak kiegyensúlyozott és szimmetrikus rétegrendet alkalmaznak. Ezek a szerkezetek rendelkeznek olyan tulajdonságokkal, amelyek független merevségi jellemzőket biztosítanak, és egyúttal lehetővé teszik a hajlító-csavaró kölcsönhatásokat is.[24, 25]

2.7 Mechanikai jellemzők

2.7.1 Szakítószilárdság. Egy anyagban a feszültség és az igénybevétel közötti kapcsolatot úgy határozzák meg, hogy az anyagmintát húzó- vagy nyomóvizsgálatnak vetik alá. Ebben a vizsgálatban a próbadarabra folyamatosan növekvő tengelyirányú erő hat, és a terhelés növekedésével mérhető az alakváltozás. Ezeket a feszültség-nyúlás értékeket ábrázoljuk és ún. szakítógörbét (stress-strain curve) kapunk.

A próbatest alakváltozása függ mind az anyag rugalmassági állandójától, mind a próbatest geometriájától. Mivel az anyag



4. ábra Szerszámlap felépítése

viselkedése a geometriára való tekintet nélkül érdekel, hasznos az adatokat általánosítani a geometria hatásának kiküszöbölésére. Ez úgy történik, hogy a terhelési értékeket feszültségértékekké, az alakváltozási értékeket pedig nyúlásértékekké alakítjuk át:[26]

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2)$$

ahol: σ = feszültség

ε = nyúlás

A_0 = eredeti keresztmetszeti terület

L_0 = próbatest eredeti hossza

L = próbatest mérés utáni hossza

A szakítószilárdság mértékegysége N mm^{-2} de a gyakorlatban MPa vagy angolszász területen a Psi elterjedt. A nyúlás dimenziómentes (mm/mm), mértékét százalékban fejezik ki.

2.7.2 Rugalmassági állandó. A görbe korai szakaszában (rugalmas alakváltozás tartománya) sok anyag elfogadható közelítéssel megfelel a Hooke-törvénynek, így a feszültség (σ) arányos az alakváltozással, az arányossági állandó (E) pedig a rugalmassági állandó, vagy Young-modulus:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

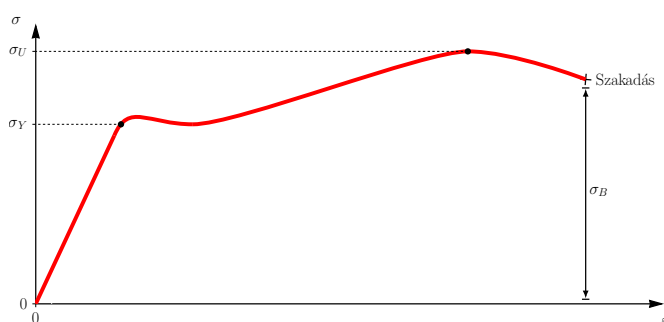
Az igénybevétel növelésével sok anyag végül eltér ettől a lineáris arányosságtól, ahol ez a pont lesz az arányossági határ. Ez a nem linearitás általában a feszültség által kiváltott „képlékeny” folyással (folyáshatár) függ össze a próbatestben. Itt az anyag belső molekuláris vagy mikroszkopikus szerkezete átrendeződésen megy keresztül, amelyben az atomok új egyensúlyi helyzetbe

kerülnek. Ez a plaszticitás a molekulák mozgékonyágát biztosító mechanizmust igényel, amely kristályos anyagokban a diszlokációs mozgásból származik. Az ilyen mozgékonyággal nem rendelkező anyagok (diszlokációs mozgást gátló belső mikroszerkezetek miatt) általában inkább ridegek, mint képlékenyek. A rideg anyagok szakítógörbéje jellemzően a teljes nyúlási tartományban egyenes vonalú, és végül a törés jelentős képlékeny alakváltozás nélkül fejeződik be.[27]

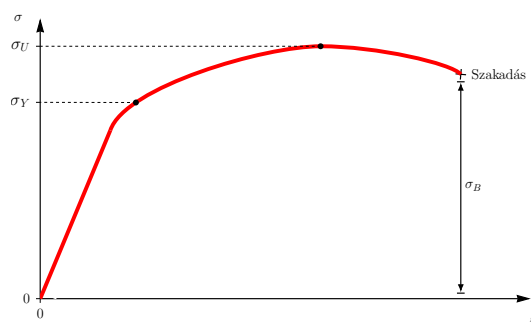
Az anyagok feszültség-nyúlás diagramjai széles skálán mozognak, és az ugyanazon anyagon végzett különböző szakítóvizsgálatok eltérő eredményeket adhatnak a terhelés sebességétől függően. A szakítógörbe alapján azonban néhány közös jellemzőt meg lehet különböztetni, és így az anyagokat két nagy kategóriába lehet sorolni: képlékeny és rideg.

2.7.3 Képlékeny anyagok. A képlékeny anyagokat (pl.: szerkezeti acél, ötvözetek) az jellemzi, hogy normál hőmérsékleten képesek nyúlni, megfolyni. Ahogy a mintadarabot növekvő terhelésnek teszik ki, a hossza először lineárisan nő a terheléssel, és nagyon lassú ütemben. Így a feszültség-alakváltozás diagram kezdeti része egy meredek lejtésű egyenes. A feszültség σ_Y kritikus értékének elérése után azonban a próbatestre az alkalmazott terhelés viszonylag kis növekedése mellett nagy alakváltozáson megy keresztül. Ezt a deformációt a ferde felületek mentén történő csúszás okozza, és elsősorban a nyírófeszültségek miatt következik be. A terhelés maximális értékének elérése után a próbatest egy részének átmérője a helyi instabilitás miatt csökkenni kezd. Ezt a jelenséget nevezik nyakasodásnak.

A nyakképződés kezdete után kisebb terhelések is elegendőek ahhoz, hogy a próbatest tovább nyúljon, míg végül el nem szakad. A képlékeny anyagok tönkremeneteléhez elsősorban a nyírás felelős. A legnagyobb alkalmazott terhelésnek megfelelő σ_U feszültséget nevezzük szakítószilárdságnak. A szakadás-



(a) Képlékeny anyag



(b) Rideg anyag

5. ábra Képlékeny és rideg anyag szakítógörbéi [26].

nak megfelelő σ_B feszültséget szakadási/törési feszültségnek nevezzük.[26]

2.7.4 Rideg anyagok. A rideg anyagok (pl.: öntöttvas, üveg) a nyúlás mértékének észrevehető előzetes változása nélkül szakadnak. Így a rideg anyag esetében nincs különbség a szakadási feszültség és a szakítószilárdság között. A rideg anyagú próbatest nem nyakasodik és a szakadás a terhelésre merőleges hosszú felületen következik be, illetve az alakváltozás is sokkal kisebb, mint a képlékeny anyagoknál. A rideg anyagok tönkremenetelért elsősorban a normál feszültségek felelősek.[26]

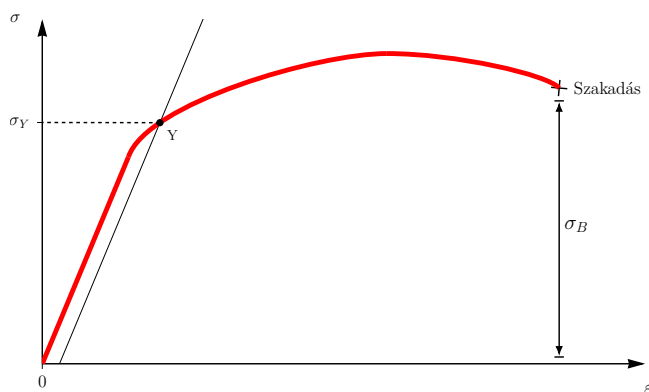
2.7.5 Folyáshatár. A σ_Y feszültséget, amelynél a folyás megindul, az anyag folyáshatárának (yield strength) nevezik. Az egyik legfontosabb feszültség mechanikai mérőszám, ami megmutatja, hogy mekkora feszültség hatására indul meg az anyagban a képlékeny alakváltozás. A feszültség a folyáshatár bekövetkezése után az alakváltozás nagy tartományában állandó marad, később pedig növelni kell a próbatest folyamatos megnyúlásához, amíg a σ_U maximális értéket el nem éri.[26]

Az egyenletes növekedés után a terhelés hirtelen alacsonyabb értékre csökken, amely egy bizonyos ideig állandó, mivel a próbadarab folyamatosan nyúlik. Meg lehet különböztetni a felső folyáshatárt, amely a közvetlenül a folyás kezdete előtt elért terhelésnek felel meg, és az alsó folyáshatárt, amely a folyáshatár fenntartásához szükséges terhelésnek felel meg. Mivel a felső folyáshatár átmeneti, az alsó folyáshatárt használják az anyag folyáshatárának meghatározására.

Képlékeny anyag esetében a feszültség folyamatosan növekszik (nem lineárisan), amíg el nem éri a határterhelést. Ilyen esetekben a folyáshatár nem markáns, nehezen definiálható. Ilyen anyagok esetén a σ_Y folyáshatár az eltolásos módszerrel határozható meg.

A gyakorlatban leggyakrabban a mért egyezményes folyáshatárt ($R_{p0.2}$) számolják. Ez a 0,2%-os képlékeny mérnöki alakváltozashoz tartozó mechanikai feszültség érték. A folyáshatárt 0,2%-os eltolásnál úgy kapjuk meg, hogy az $\varepsilon = 0,2\%$ abszcissza vízszintes tengelyének pontján keresztül húzunk egy vonalat, amely párhuzamos a rugalmassági állandó egyenes szakaszával. Az Y pontnak megfelelő σ_Y feszültséget 0,2%-os eltolásnál a folyáshatárként definiálják. [28]

2.7.6 Szívósság. Az u alakváltozási energiasűrűséget az energia- és a térfogategység osztott értékében fejezzük ki. Az SI mértékegység szerint az alakváltozási energiasűrűség $J\ m^{-3}$



6. ábra A folyáshatár meghatározása eltolással[26]

vagy annak többszörösében van megadva de egyszerűen MPa is használható, ami a mérnöki gyakorlatban inkább elterjedt.

$$u = \int_0^{\sigma_R} \sigma_R d\varepsilon_R \quad (4)$$

Az alakváltozás-energia sűrűséget, ahol ε_R a szakadási feszültség, az anyag szívóssági modulusának vagy egyszerűen szívósságnak neveznek. Ez megegyezik a teljes szakítógörbe alatti területtel, és az anyag töréséhez szükséges, térfogat egységenkénti energiát jelenti. Egy anyag szívóssága (modulus of toughness) összefügg a képlékenységgel, valamint a szakítószilárdságával.[26]

3 Kísérleti rész

3.1 Kísérletterv

A feladat vákuuminfüziós technikával poliészter mátrixú, unidirekcionális üvegszövettel erősített laminátumok gyártása, meghatározott rétegrenddel. A laminátumokból a szabványoknak megfelelő méretű próbatestek vágása és mechanikai tulajdonságaik vizsgálata. A minták jelölésénél az alábbi rendszert alakítjuk ki, annak érdekében, hogy a jelölésből is látható legyen a minta jellege és a mérési módszer is. Per jellel elválasztva egymástól az információkat az első rész a mérni kívánt mechanikai tulajdonságot jelöli (húzás: T), a második rész a rétegrendet, a harmadik rész a laminátumból kivágott próbatestek orientációját a szá irányhoz képest (fokban), a negyedik rész pedig a párhuzamos mérések mintaszámát (szabványosan előírt darabszám) mutatja. Esetenként a T előtt egyéb betű (Polylite gyanta: P) található, ami az eltérő gyantára utal a sokasághoz képest.

6. táblázat Szabványos próbatest méretei

Szabvány (ISO 527-5)	Próbatest méretei
Orientáció 0°	250 mm × 15 mm × 1,5-2 mm
Orientáció 0°-tól eltérő	250 mm × 25 mm × 1,5-2 mm

7. táblázat Laminátum orientáció a próbatest függvényében

Jelölés	Rétegrend	Rétegszám	Orientáció
T/[0]4/0/...	[0]4	4	0
T/[0]4/30/...	[0]4	4	30
T/[0]4/45/...	[0]4	4	45
T/[0]4/90/...	[0]4	4	90
T/[0/90]2s/45/...	[0/90]2s	4	45
T/[0/90]2s/0/...	[0/90]2s	4	0
T/[0/90]2s/15/...	[0/90]2s	4	15
T/[0/90]2s/30/...	[0/90]2s	4	30

3.2 Laminátumok előállítása

Az előállított laminátumok (gyantával átitatott szövetek egy-ége) standard vákuuminfúziós eljárással E-típusú üvegszövet és poliészter gyanta felhasználásával történik. A szövet egy unidirekcionális szövésű, 0,35 mm szálátmérővel és négyzetméterenként 440 g üveg tartalommal rendelkezik.[29]

Mátrixként szolgáló gyanta mindkettő esetben ortoftálsav alapú telítetlen poliészter, melyet a Scott Bader gyárt és CRYSTIC® U 904 LVK60 fantázianévre hallgat; a másik pedig a Polynt által forgalmazott POLYLITE® készítmény. A gyanta és a kikeményített műanyag tulajdonságait a 8. táblázatban van összefoglalva. A gyantapolimerizációs folyamat katalizálásához 1%-os Co-só tartalmú gyorsítót és 50%-os MEKP katalizátort alkalmaztunk. A bekeverésnél az utóbbi sorrendben történt, ahol fokozatosan ügyelni kell a légmentes homogenizálásra.

Szerszámlapként egy 500 x 500 mm-es üveglap szolgál, melyet acetonnal zsírtalanítunk és ún. formaleválasztót (wax) vittünk fel rá. Az első réteg felvitelekor a waxból vékony réteget viszünk fel egy szösmentes ruhával a szerszám felületére, majd hagyjuk megszáradni. Száradás után egy tiszta ruhával felpolírozzuk a felületet. Ezt a folyamatot négyszer ismételjük meg, minden alkalommal 90°-kal változtatva a felhordás irányát. Az így kezelt szerszám felülete többszöri termék kibontását teszi lehetővé (kb. 10-12) további kezelés nélkül.

Erre kerülnek a 450x450 mm-es üvegszövet lapok a már ismertett (2.6. fejezet) felépítésben. A bevezetést (SZ1) és kivezetést (SZ2) ellátjuk egy-egy csappal, a vákuumszivattyú elé helyezzünk egy 10 L-es gyanta csapdát és egy szeleppel (SZ3) választjuk

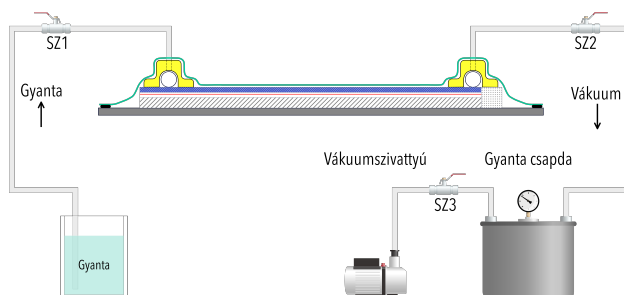
8. táblázat Poliészter gyanták tulajdonságai[30, 31]

Nyers gyanta			
		Crystic	Polylite
Sűrűség	g cm ⁻³	1.1	1.07-1.11
Viszkozitás	mPa s	1100	180-200
Savasság	mg KOH/g	22	20-25
Sztriot tartalom	%	44-48	41-45
Gélesedés	perc	55-65	75-85
Kikeményített gyanta			
		Crystic	Polylite
Szakítószilárdság	MPa	52	72
Rugalmassági áll.	MPa	4 000	3 200
Szakadási nyúlás	%	2	5
HDT	°C	80	90
Barcol keménység		40	40-50

lesz a vákuumszivattyútól. A csapok és csomok csatlakozást butil alapú adhezív tömítőszalaggal szigeteljük. Emellett alkalmas a vákuumfólia rögzítésére a szerszámlapra, levegőt kapott rendszer javítására, egyéb alkatrészek rögzítésre.

Az elkészült rendszer légtelenítjük (SZ1: zárva, SZ2-3: nyitva) a maximális vákuum eléréséig (0,88-0,90 bar). A rendszert jól szigeteltnek tekintjük, ha a szivattyú lekapcsolása (SZ3: zárva) után 10 percig tartja a negatív nyomást. Esetleges szivárgás felderítése és szigetelése után újra meg kell vizsgálni a rendszer integritását.

A poliészter gyantához közvetlenül futtatás előtt keverjük a segédanyagokat. A 60/40-es arány szabályt alkalmazva vett gyanta tömegéhez viszonyítva 1.5-2.0% kobalt gyorsítót és 1.5-2.0% MEKP katalizátort mérünk. A környezeti hőmérséklet függvényében esetenként korrigálni kell a MEKP mennyiséget, illetve fontos figyelembe venni a vastagabb laminátumok esetén a futtatási időt. Ha ez magas, tehát a futtatás során megindul a gélesedés, akkor érdemes csökkenteni a katalizátor. A téli

**7. ábra** Technológia felépítése

hónapokban 18-20°C, a nyári hónapokban pedig 23-25°C között változott a hőmérséklet.

A gyanta bevezetőcsövet a folyadéksztint alá helyezzük a hozzá tartozó csapot (SZ1) megnyitottuk. A gyanta átáramoltatása addig tart, míg a gélesedési tartományt el nem éri, vagy a kilépő csőben meg nem jelenik. Először a SZ1 csap zárása történik meg, ameddig a maradék gyantát át nem szívja a vákuum, így az egyenletes vastagságot növeljük a laminátum mentén, majd végül zárjuk a SZ2 csapot is. A kötési idő (minimum 24 óra) után a rendszer megbontható.

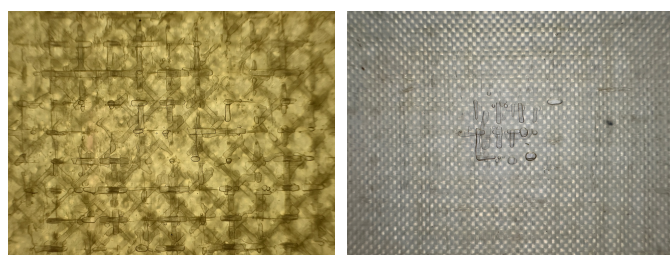
3.3 Megfigyelések

A laminátumok gyártása során a mátrixban kialakuló üreges holtterek kedvezőtlenül befolyásolhatják az elkészült próbatest mechanikai tulajdonságait. Ezek a megrekedt buborékok csoportja, ami vagy a gyantában diszpergált levegővel jut be vagy a vákuumfólia sérüléséből adódik.

A 8a. ábrán látható esetben egy sérülésből adódó folyamatos levegő bejutás eredménye. Nem csak a felső rétegben alakulnak ki "zárványok", hanem közelebből megvizsgálva a mélyebb rétegekben is megjelennek az üres terek. Másik esetben (8b. ábra) a gyantával bejutott levegőbuborékok akadtak fent, amikor már a gélesedési tartományba lépett a gyanta.

3.4 Húzóvizsgálat

A mérési módszer lényege, hogy a mérni kívánt anyag szilárdságának és deformációs tulajdonságainak meghatározása. A teszt során a minta a hosszmenti tengely irányába konstans sebességgel nyúlik, amíg el nem szakad. A használt berendezés egy Instron 3385H, 100 KN-os erőmérőcellával ellátott kétoszlopos szakítógép. A szakítás húzósebessége 2 mm/perc volt. A minták befogási hossza 150 mm.



(a) Rétegekben rekedt levegő

(b) Felületi megrekedt levegő

8. ábra Laminátum hibák

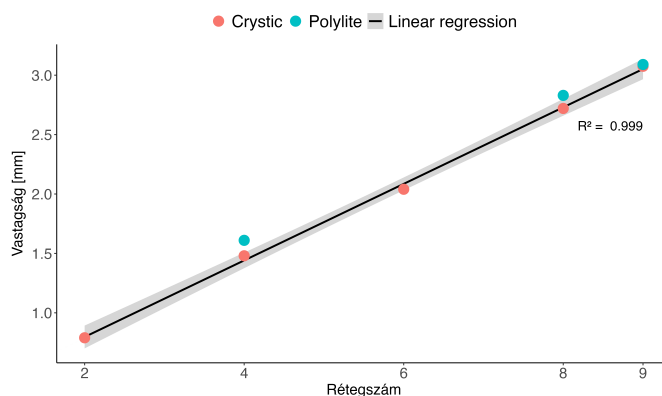
4 Kiértékelés

A szakítóvizsgálat során mért adatok feldolgozására Python-ban írt programmal végeztem. A szakítószilárdságból és nyúlásból kifejeztem a rugalmassági állandót, folyáshatárt és rendszerre jellemző szívósságot. A kinyert adatok elemzése és vizualizációja R-ben (R-Studio) történt.

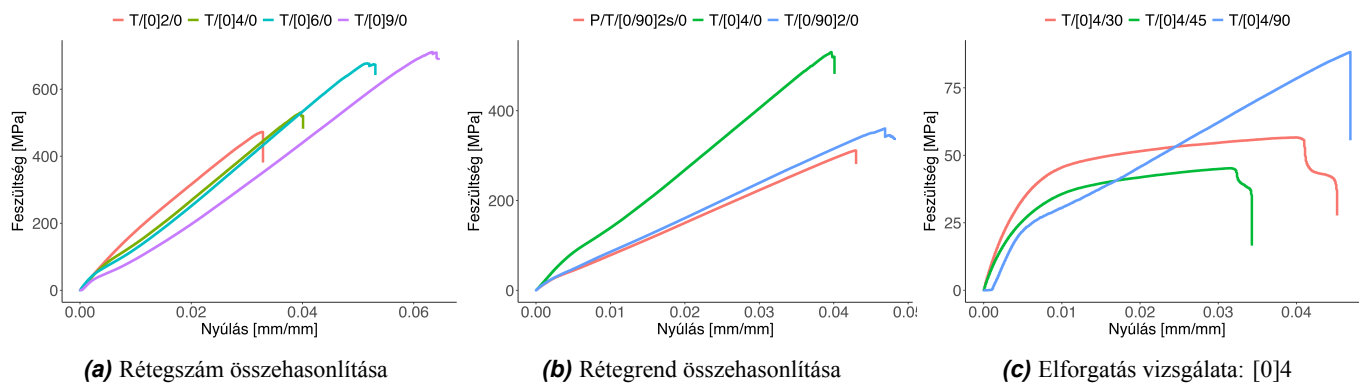
4.1 Vastagság

Laminátum és a próbatestek fontos jellemzője a vastagság, a tekintetben, hogy a szabványnak megtudjon felelni. Mivel a rétegszám adott volt, egyes esetekben mért eltérés nagyobb gyantamennyiségre utal. A kész laminátumokból előállított próbatesteket alPa AM610N modellszámú 0.01 mm pontosságú készülékkel mértem le, minden esetben három pontban, az össze-sített eredményeket a mellékletben található M2. táblázatban foglaltam össze.

A crystic gyanta adataira lineáris modellt illesztettem, mivel a polylyte gyantánál nem minden esetben történt mérés, így azokat zöld jelzéssel láttam el az 9. ábrán. Általánosságban véve az utóbbi gyanta, vastagabb próbatestet eredményezett, amit annak nagyobb viszkozitásával lehet magyarázni. A gyanta infúzió során, azonos méretekkel dolgoztunk minden esetben, így nagyban megnehezítette a futtatást. A gélesedés fázisa is hamarabb indult meg, amit a katalizátor és gyorsító csökkentésével ellensúlyoztunk. Érdekes lenne megvizsgálni a felületi adhézió hatását is, mivel az is közrejátszhat. Ha egyik gyanta jobban kötődik az erősítőanyaghoz, akkor valós feltételezés, hogy vastagabb laminátum érhető el. De mivel kémiailag közel azonos a gyanták összetétele, ezért továbbra is a viszkozitásnak tulajdonítom a pozitív eltérést a polylyte gyanta felé.



9. ábra Laminátum vastagság a rétegszám függvényében



10. ábra Szakítógörbék

4.2 Szakítószilárdság

Ami meghatározza a laminátumok és belőlük kivágott próbatetek tulajdonságait, az a rétegszám, a rétegek elrendezése és a próbatetek elforgatása a szálirányhoz képest. A szálirányhoz viszonyított terhelés nagyban befolyásolja a kompozit anyag maximális tűrését. Az adatfeltárás célja nemcsak a szövet orientáció, elrendezés hatása független változókra, hanem a mátrix anyagok hatása a kimentre. Több aspektusát szeretném megvizsgálni a minta halmaznak: A 0° -os elforgatást a 4 rétegszám esetében, ahol a próbatetek elforgatása a szálirányra 0° , 30° , 45° , 90° . A $0/90^\circ$ -os elforgatást 4 rétegszám esetén, ahol a próbatetek elforgatása a szálirányra 0° , 15° , 30° , 40° . Itt lehetőség van a Polyte és Crystic epoxy gyanta összehasonlítása és a szimmetria viszonyok valóban hatással vannak-e paraméterekre. A felhasznált mérési adatokat a mellékletben található M1. táblázatban találhatók.

4.3 Szakítógörbék

A 10. ábra bemutatja a szakítógéppel kapott szakítógörbét. A 10a. ábra szerint a rétegszám növelésével nagyobb szakítószilárdság érhető el, illetve a szakadási nyúlás is növekszik. Ha a száliránytól eltérő szögben vizsgáljuk (10c. ábra), akkor az eredeti feszültségtűrésnek a töredékét tolerálja a próbatet, de 90° -ban enyhe javulást mutat. Feltételezés szerint ezt a jelenséget javítani lehet a rétegrend megváltoztatásával, amit a 4.4. fejezetben vizsgállok. A szimmetria és mátrix anyagának hatását a 10b. ábra szemlélteti pár kiragadott példa alapján. A hatások feltérképezését a 4.5. fejezetben tárgyalom.

4.4 Rétegrend vizsgálata

Ezt az összefüggést 4 rétegre vizsgáltam. Az eddig ismertetett 0° -os szálirányhoz képest, minden második lapot 90° -kal el-

forgatva helyeztük egymásra. Az eredményekben azt várjuk, hogy javítunk a száliránytól eltérő feszültségek eloszlását a laminátumban, tehát a szakítószilárdsága a 0° -tól eltérő irányban növekedni fog.

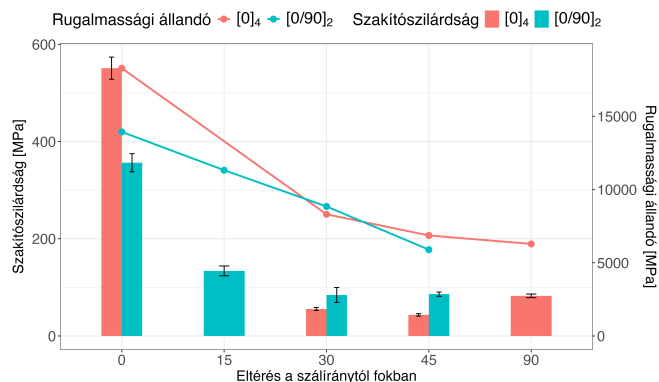
A 11a. ábra mutatja, hogy a különböző irányú terhelések függvényében, hogyan csökken a szakítószilárdsága, illetve hogyan veszít a rugalmassági állandójából. Ha szálirányra merőleges terhelés éri a laminátumot, akkor jobb értéket adott szakításra. Ezt a vetülfonalk minimális erőelnyelésével tudom magyarázni. Ahol volt összehasonlításra adat, ott látszik, hogy akár 50%-ot is lehetett javítani törési jellemzőkön.

Ezzel szemben, ha a száliránytól bármely irányba elértünk, akkor alacsonyabb rugalmassági állandóval kell számolnunk. Legyen az egy irányba rendezett szövet vagy $0/90^\circ$ -os elrendezésű. A folyáshatárra hasonló lecsengésű exponenciálisra hasonlító tendenciát kapunk, mivel ez adja a rugalmas alakváltozás felső határát.

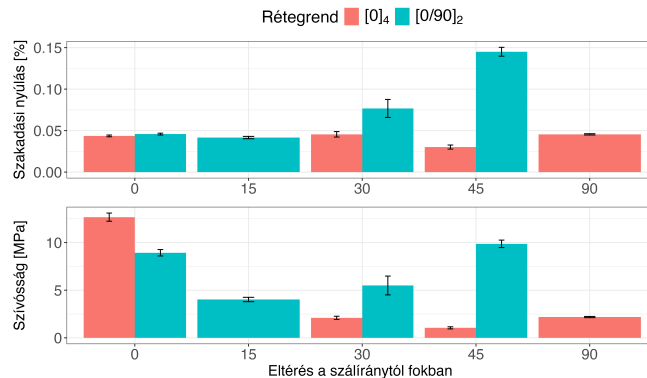
A szívósság (toughness) megadja, hogy az anyag mennyire képes energiát elnyelni és deformálódni, mielőtt szakad. Mivel a szakítás maximális értékének és a nyúlásnak függvényében kapjuk, így bármelyik változásával a kompozit rendszer szívóssága is változik. A jelenség (11b. ábra) a 30° és 45° -os irányú terhelésnél figyelhető meg abban az esetben, ha a $[0/90]$ -fokos orientációban rendezzük a szövetet.

4.5 Anyagi rendszer és szimmetria viszony

A $[0/90]_2s$ laminátum rétegrend esetében vizsgáljuk a mátrix-anyag hatását a mechanikai tulajdonságokra. A szimmetria mechanikai hatásáról a 2.6.2 fejezetben volt szó. Azonban, nem teljesen behatólag van vizsgálva, mivel a próbatestre vonatkozó adatok hiányosak vagy szimmetriára vagy gyantatípusra nézve.



(a) Szakítószilárdság és rugalmassági állandó összehasonlítás



(b) Szakadási nyúlás és szívósság kapcsolata

11. ábra Rétegrend összehasonlítás: [0]4, [0/90]2

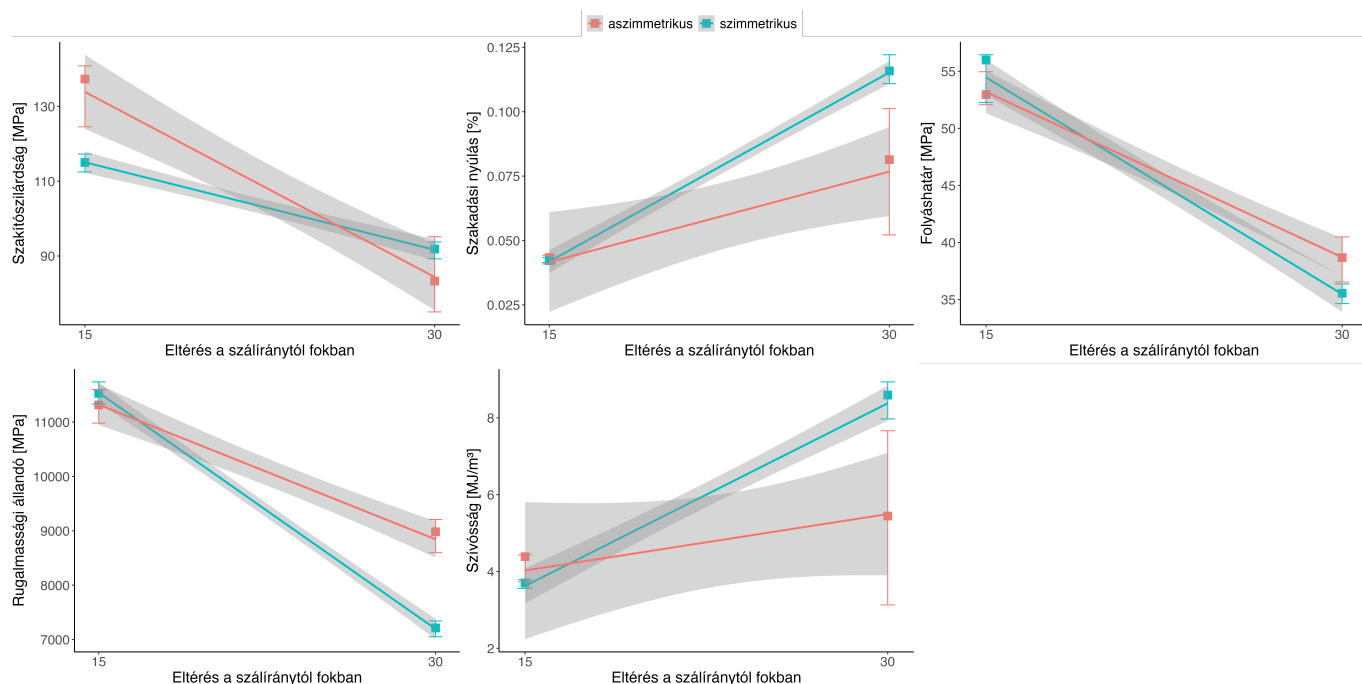
4.5.1 Szimmetria. Viszonylag alacsony mintaszám amit meg tudunk vizsgálni minkét esetben. Egyik a [0/90]2s rétegrend másik pedig [0/90]2s rétegrendű mérési pár. Lineáris modell illesztésével és összehasonlításával (ami a mellékletben található M3. táblázatban van összefoglalva), a következő eredményeket kaptam.(12. ábra)

Általánosságban a szimmetrikus modellek minden változó esetében erősebb magyarázóképeséggel rendelkeznek és szignifikánsak, míg az aszimmetrikus modellek több esetben csak közepesen vagy gyengén teljesítenek, és néha nem is szignifikánsak.

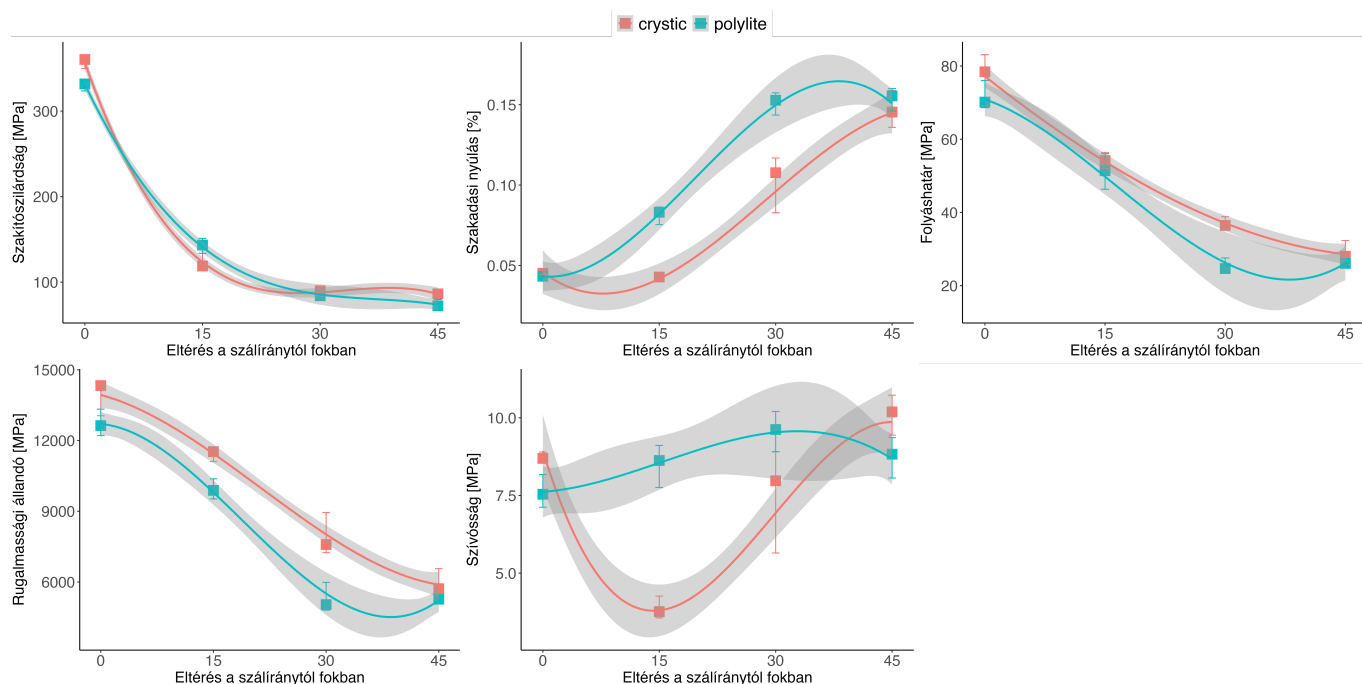
Kiemelném, hogy a szakadási nyúlás aszimmetrikus R^2 érté-

ke 0.340, ami sokkal gyengébb kapcsolatot jelez. A korrigált R^2 (0.298) szintén alacsony. A magasabb reziduális standard hiba (0.0258) és a p-érték (0.011) azt jelzi, hogy a kapcsolat még szignifikáns, de nem túl erős. Következtetés: A szimmetrikus modell kiemelkedően jobb a törési nyúlás magyarázatában, míg az aszimmetrikus modell csak közepesen magyarázza az adatokat.

A másik az aszimmetrikus modell: Az R^2 értéke 0.096, ami gyenge kapcsolatot jelent. A korrigált R^2 (0.039) szinte jelentéktelen kapcsolatot jelez. A reziduális standard hiba magasabb (2.38), és a p-érték (0.211) nem szignifikáns. Következtetés: A szimmetrikus modell sokkal jobban teljesít a szívósság ma-



12. ábra Szimmetriára illesztett modellek



13. ábra Anyagi jellemzőkre illesztett modellek

gyarázatában, míg az aszimmetrikus modell gyakorlatilag nem mutat kapcsolatot.

A szakirodalom szerint a szimmetrikusan elrendezett szövetekből létrejövő laminátumok mechanikai tulajdonságaiban javulást várunk. Jelen eredményekből azonban ez nem egyértelmű. Ezt alapul véve végezhető összehasonlítás a polylyte és crystic gyantra, azt feltételezve, hogy a szimmetriára nem lesz hatással az eredményre.

4.5.2 Crystic és Polylyte. A két eltérő gyanta adatlapja szerint (8. táblázat) polylyte gyantával 38%-kal magasabb szakítószilárdságot érünk el, de rugalmassági állandója 25%-kal alacsonyabb lesz, és a szakadási nyúlása is 2,5-szöröse a crystic gyantához viszonyítva. Mindez igaz a szálerősítés nélküli kikeményített műanyagra. Az, hogy ez a számszerű különbség miként jelenik meg a szálerősített műanyagban, és mennyire szignifikáns a kapott összefüggés, azt modell illesztéssel határoztam meg.

A modellek jellemzői a M4. táblázatban van összefoglalva. Minden modell, kivéve a szívósságnál, rendkívül alacsony p-értékeket mutat (gyakran 0.001 alatt) jelezve, hogy a megfigyelt kapcsolatok statisztikailag szignifikánsak. A szívósságra illesztett modell, különösen a polylyte esetében, magasabb p-értékeket mutatnak, ami azt jelzi, hogy ezek a kapcsolatok kevésbé megbízhatóak. A legtöbb 3. fokú polinom modell szignifikáns kapcsolatokat mutat a prediktorok és válaszváltozók között, a

szívósság kivételével.

A 13. ábra szerint nem egyértelmű a két anyagi rendszer közötti szakítószilárdság különbsége. Habár a modell illeszkedése pontos és a szignifikancia alacsony (p-érték: szürke sáv); ennek ellenére nem kapunk választ arra, hogy a két kikeményített gyanta adatlapja szerint lenne különbség a kész laminátumban. Ha megvizsgáljuk a nyúlást, akkor a polylyte gyantára nézve kedvezőbb értéket kapunk 15°, és 30°-os elfogadás esetén (akár 50%-os javulás), viszont 0° és 45°-nál ez az eltérés minimális. A rugalmas alakváltozásra jellemző rugalmassági állandó és folyáshatár az előbbinek inverze. A crystic gyanta jobb rugalmassági tulajdonságokkal rendelkezik, ahogy a kikeményített, de szálerősítés nélküli poliészter is.

A két gyanta együttes hatásának eredménye a szívósság. Ahol a nyúlás és a szakadáshoz tartozó feszültség értéke magas, ezáltal a laminátumra ható erőhatásokat jobban tolerálja. Ami itt érdekes, hogy csak a száliránytól 15° és 30°-os eltérésű terhelések irányába. Azonban, ha a kitüntetett szálirány mentén 0° és 45°-ban éri terhelés, akkor a crystic gyanta nagyobb energia elnyerésére képes.

5 Összegzés

A gyanta infúziós eljárással sikerült nagy szakítószilárdságú és mechanikai terhelésnek ellenálló laminátumokat előállítani.

A laminátumokból kivágott próbatestekkel megvizsgáltam az alapvető szilárdsági jellemzők összefüggéseit a rétegrend és elforgatás függvényében. Ezt tovább vittem, és vizsgáltam a különböző anyagrendszerek és szimmetria viszonyok hatását.

Arra a megállapításra jutottam, hogy a szálirányhoz képest $[0/90]$ rétegrenddel, egy nem lineáris összefüggésben, de javítani lehetett a keresztirányú terhelések maximális tűréshatárán, illetve szignifikánsan javította az általuk bezárt tartomány terhelését is 15° és 30° -os elforgatás esetén. Továbbá a szálerősített anyagok magas szakítószilárdságáért maga a szövet anyaga felelős, ennek ellenére a mátrix anyagnak is közvetlen szerepe van, még így is a maximális terhelés elérésében.

Sajnos szimmetria és mechanikai szilárdság korrelációjának feltérképezése sikertelen volt a megfelelő mérési adatok hiányában, de ezek jövőbeli pótlásával könnyen megoldhatóak és egy további célt állítanak, amit még érdemes megvizsgálni.

Irodalomjegyzék

- [1] C. Plummer, P.-E. Bourban és J.-A. Manson, "Polymer Matrix Composites: Matrices and Processing", *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016. jan. 1.
- [2] C. Soutis, "Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction", *Materials Science and Engineering: A*, 412. évf., 1-2. sz., 171–176. old., 2005. dec. 5.
- [3] E. Natoli, C. Mandelli és G. Baiconi, "Glass Fiber for Underground Projects - Recent Applications", *Fachtagung für Untertagbau*, STS Swiss Tunnelling Society, szerk., 296–302. old., 2014.
- [4] F. Khan és tsai., "Advances of Composite Materials in Automobile Applications – a Review", *Journal of Engineering Research*, 2024. febr. 27.
- [5] S. Sathees Kumar, B. Sridhar Babu, C. N. Chankravarthy és N. Prabha-
kar, "Review on Natural Fiber Polymer Composites", *Materials Today: Proceedings*, 46. évf., 777–782. old., 2021. jan. 1.
- [6] D. Nabi és J. P. Jog, "Natural Fiber Polymer Composites: A Review", *Advances in Polymer Technology*, 18. évf., 4. sz., 351–363. old., 1999.
- [7] C. Baley, "Analysis of the Flax Fibres Tensile Behaviour and Analysis of the Tensile Stiffness Increase", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33. évf., 7. sz., 939–948. old., 2002. júl. 1.
- [8] S. Waghmare, S. Shelare, K. Aglawe és P. Khope, "A Mini Review on Fibre Reinforced Polymer Composites", *Materials Today: Proceedings*, 54. évf., 682–689. old., 2022. jan. 1.
- [9] T. P. Sathishkumar, S. Satheeskumar és J. Naveen, "Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites - a Review", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33. évf., 13. sz., 1258–1275. old., 2014.
- [10] J. M. Stickel és M. Nagarajan, "Glass Fiber-Reinforced Composites: From Formulation to Application", *International Journal of Applied Glass Science*, 3. évf., 2. sz., 122–136. old., 2012. jún.
- [11] T. Ohsawa, M. Miwa, M. Kawade és E. Tsushima, "Axial compressive strength of carbon fiber", en, *Journal of Applied Polymer Science*, 39. évf., 8. sz., 1733–1743. old., 1990. ápr. 20.
- [12] S. Hegde, B. Satish Shenoy és K. N. Chethan, "Review on Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Their Mechanical Performance", *Materials Today: Proceedings*, 1st International Conference on Manufacturing, Material Science and Engineering, 19. évf., 658–662. old., 2019. jan. 1.
- [13] C. Kutasi, "Magyar kémikusok lapja", hu, *Magyar Kémikusok Lapja*, 77. évf., 2. sz., 2022.
- [14] T. J. Singh és S. Samanta, "Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review", *Materials Today: Proceedings*, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, 2. évf., 4. sz., 1381–1387. old., 2015. jan. 1.
- [15] D. Tanner, J. A. Fitzgerald és B. R. Phillips, "The kevlar story—an advanced materials case study", en, *Angewandte Chemie International Edition in English*, 28. évf., 5. sz., 649–654. old., 1989. máj.
- [16] E. Zini és M. Scandola, "Green composites: An overview", en, *Polymer Composites*, 32. évf., 12. sz., 1905–1915. old., 2011.
- [17] A. Kandelbauer, G. Tondi, O. C. Zaske és S. H. Goodman, "Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters", *Handbook of Thermoset Plastics (Third Edition)*, H. Dodiuk és S. H. Goodman, szerk., Boston: William Andrew Publishing, 2014. jan. 1., 111–172. old.
- [18] P. Penczek, P. Czub és J. Pielichowski, "Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology", en, *Crosslinking in Materials Science*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, 1–95. old.
- [19] F. Mohamed, M. Hmyene, A. Anouar, S. Chah és M. Bouzziri, "Unsaturated Polyester Resins: Catalysts, Accelerators, and Inhibitors", 2023. jan. 1., 25–42. old.
- [20] I. R. Chowdhury és J. Summerscales, "Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review", en, *Journal of Composites Science*, 8. évf., 7. sz., 280. old., 7 2024. júl.
- [21] K. Balasubramanian, M. T. Sultan és N. Rajeswari, "Manufacturing techniques of composites for aerospace applications", en, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Elsevier, 2018, 55–67. old.
- [22] S. van Oosterom, T. Allen, M. Battley és S. Bickerton, "An Objective Comparison of Common Vacuum Assisted Resin Infusion Processes", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125. évf., 105528. old., 2019. okt. 1.
- [23] J. Bai, szerk., *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications* (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering sor.), eng, Second edition. Cambridge, Massachusetts: Woodhead Publishing, 2023, 809 old.
- [24] R. M. Jones, *Mechanics Of Composite Materials*, 2. kiad. Boca Raton: CRC Press, 2018. okt. 31., 538 old.
- [25] C. B. York, "Characterization of Nonsymmetric Forms of Fully Orthotropic Laminates", *Journal of Aircraft*, 46. évf., 4. sz., 1114–1125. old., 2009. júl.
- [26] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf és D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Education, 2020.
- [27] D. Roylance, "Stress-Strain Curves", *Massachusetts Institute of Technology*, Department of Materials Science and Engineering 2001.
- [28] C. T. F. Ross, J. Bird és A. Little, *Mechanics of Solids*. Routledge, Taylor & Francis Group, 2022.
- [29] Novia Kft. "Üvegszövet". (2024), cím: <https://shop.novia.hu/termekategoria/szalerosito-anyag/ueveg/uevegszovet/> (elérés dátuma 2024. 05. 08.).
- [30] Scottbader. "Crystic U904 LVK60". (2024), cím: https://www.scottbader.com/wp-content/uploads/1138_crystic-u904-lvk-resin-en-feb13.pdf.
- [31] Polynt. "Polylite 415-677". (2024), cím: https://shop.novia.hu/wp-content/uploads/2019/11/Polylite_415-677_infusion.pdf.

Melléklet

M1. táblázat Szakítóvizsgálat alapján mért és származtatott adatok összesítése

Próbatest	Szakítószilárdság [MPa]				
	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	490.69	22.32	493.85	446.79	513.40
T/[0]4/0	550.81	22.83	555.28	519.32	589.43
T/[0]4/30	55.49	3.08	56.29	49.76	58.80
T/[0]4/45	43.45	2.48	44.99	40.05	46.16
T/[0]4/90	82.53	3.72	81.83	77.83	88.24
T/[0]6/0	544.45	125.33	611.11	391.68	677.16
1T/[0]9/0	671.03	16.38	669.85	654.03	710.70
2T/[0]9/0	681.36	20.16	684.08	646.19	710.29
T/[0/90]2/0	356.39	18.67	360.39	328.33	381.76
T/[0/90]2/15	133.88	10.09	137.33	119.61	145.45
T/[0/90]2/30	84.38	15.29	83.29	57.48	106.47
T/[0/90]2/45	85.99	4.39	86.34	79.81	93.15
T/[0/90]2s/15	115.07	5.13	115.01	105.88	125.60
T/[0/90]2s/30	91.66	3.31	91.88	86.23	96.97
P/T/[0/90]2s/0	331.30	11.99	331.81	311.55	353.07
P/T/[0/90]2s/15	140.94	11.94	143.42	119.26	155.23
P/T/[0/90]2s/30	85.54	7.12	84.07	79.27	93.28
P/T/[0/90]2s/45	73.75	6.12	72.41	65.39	82.64
Próbatest	Rugalmassági állandó [MPa]				
	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	19876.36	637.90	19845.07	18705.66	21132.14
T/[0]4/0	18283.29	1257.79	18415.75	15619.40	19834.28
T/[0]4/30	8308.18	739.13	8198.44	7243.56	9144.27
T/[0]4/45	6863.09	436.63	7022.17	6071.70	7357.22
T/[0]4/90	6286.84	404.41	6396.36	5493.86	6811.75
T/[0]6/0	19646.56	917.21	19898.40	18150.11	20766.53
1T/[0]9/0	15597.17	1140.53	15969.81	12986.45	16523.38
2T/[0]9/0	14590.47	1052.19	14575.73	12155.27	15998.74
T/[0/90]2/0	13933.27	1137.69	14329.11	12266.10	15684.80
T/[0/90]2/15	11319.14	402.23	11314.22	10871.47	11919.43
T/[0/90]2/30	8843.34	562.80	8982.29	7579.16	9544.76
T/[0/90]2/45	5891.52	883.47	5718.62	4519.74	7330.36
T/[0/90]2s/15	11540.10	308.02	11526.87	11091.57	12000.46
T/[0/90]2s/30	7195.86	249.86	7213.93	6770.66	7599.89
P/T/[0/90]2s/0	12702.18	850.14	12631.55	11367.50	14032.92
P/T/[0/90]2s/15	9798.14	899.84	9885.38	7888.41	10850.20

P/T/[0/90]2s/30	5511.99	1245.49	5041.73	4570.10	6924.14
P/T/[0/90]2s/45	5224.89	193.58	5270.73	4812.28	5542.78

Rugalmassági állandó [MPa]

Próbatest	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	19876.36	637.90	19845.07	18705.66	21132.14
T/[0]4/0	18283.29	1257.79	18415.75	15619.40	19834.28
T/[0]4/30	8308.18	739.13	8198.44	7243.56	9144.27
T/[0]4/45	6863.09	436.63	7022.17	6071.70	7357.22
T/[0]4/90	6286.84	404.41	6396.36	5493.86	6811.75
T/[0]6/0	19646.56	917.21	19898.40	18150.11	20766.53
1T/[0]9/0	15597.17	1140.53	15969.81	12986.45	16523.38
2T/[0]9/0	14590.47	1052.19	14575.73	12155.27	15998.74
T/[0/90]2/0	13933.27	1137.69	14329.11	12266.10	15684.80
T/[0/90]2/15	11319.14	402.23	11314.22	10871.47	11919.43
T/[0/90]2/30	8843.34	562.80	8982.29	7579.16	9544.76
T/[0/90]2/45	5891.52	883.47	5718.62	4519.74	7330.36
T/[0/90]2s/15	11540.10	308.02	11526.87	11091.57	12000.46
T/[0/90]2s/30	7195.86	249.86	7213.93	6770.66	7599.89
P/T/[0/90]2s/0	12702.18	850.14	12631.55	11367.50	14032.92
P/T/[0/90]2s/15	9798.14	899.84	9885.38	7888.41	10850.20
P/T/[0/90]2s/30	5511.99	1245.49	5041.73	4570.10	6924.14
P/T/[0/90]2s/45	5224.89	193.58	5270.73	4812.28	5542.78

Folyáshatár [MPa]

Próbatest	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	214.29	20.46	213.80	187.52	239.37
T/[0]4/0	122.34	10.79	119.35	108.43	136.52
T/[0]4/30	35.18	2.58	34.81	31.31	38.41
T/[0]4/45	28.50	1.45	28.48	26.11	30.90
T/[0]4/90	24.46	0.94	24.34	23.14	25.87
T/[0]6/0	78.13	8.17	79.75	63.53	87.29
1T/[0]9/0	54.16	9.02	53.39	38.96	71.16
2T/[0]9/0	51.82	6.74	54.56	36.47	57.60
T/[0/90]2/0	77.20	9.29	78.42	66.24	92.69
T/[0/90]2/15	53.19	2.51	52.96	48.72	56.62
T/[0/90]2/30	38.71	2.49	38.68	35.62	42.95
T/[0/90]2/45	28.59	4.51	28.04	22.60	35.92
T/[0/90]2s/15	54.46	2.74	55.99	49.45	57.33
T/[0/90]2s/30	35.48	1.86	35.55	32.46	38.81
P/T/[0/90]2s/0	70.90	10.19	70.15	54.56	86.81
P/T/[0/90]2s/15	49.79	7.53	51.40	33.92	57.71
P/T/[0/90]2s/30	26.28	3.66	24.68	23.70	30.47
P/T/[0/90]2s/45	26.11	0.79	26.08	24.66	27.16

Próbatest	Szakadási nyúlás [mm/mm]				
	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	0.0351	0.0022	0.0351	0.0315	0.0393
T/[0]4/0	0.0436	0.0032	0.0444	0.0396	0.0483
T/[0]4/30	0.0455	0.0104	0.0427	0.0344	0.0677
T/[0]4/45	0.0302	0.0065	0.0315	0.0218	0.0378
T/[0]4/90	0.0455	0.0024	0.0456	0.0412	0.0492
T/[0]6/0	0.0436	0.0103	0.0496	0.0307	0.0535
1T/[0]9/0	0.0622	0.0015	0.0627	0.0590	0.0640
2T/[0]9/0	0.0642	0.0018	0.0648	0.0607	0.0662
T/[0/90]2/0	0.0458	0.0033	0.0451	0.0408	0.0514
T/[0/90]2/15	0.0416	0.0040	0.0434	0.0352	0.0446
T/[0/90]2/30	0.0768	0.0343	0.0814	0.0134	0.1235
T/[0/90]2/45	0.1450	0.0169	0.1455	0.1105	0.1662
T/[0/90]2s/15	0.0418	0.0032	0.0422	0.0340	0.0455
T/[0/90]2s/30	0.1153	0.0089	0.1159	0.1014	0.1268
P/T/[0/90]2s/0	0.0432	0.0024	0.0433	0.0397	0.0467
P/T/[0/90]2s/15	0.0821	0.0100	0.0831	0.0700	0.1025
P/T/[0/90]2s/30	0.1497	0.0141	0.1528	0.1343	0.1620
P/T/[0/90]2s/45	0.1508	0.0224	0.1555	0.0974	0.1843

Próbatest	Szívósság [MJ m ⁻³]				
	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
T/[0]2/0	9.60	1.06	9.48	7.67	11.58
T/[0]4/0	12.67	1.28	13.08	10.73	14.70
T/[0]4/30	2.10	0.54	2.00	1.45	3.20
T/[0]4/45	1.05	0.29	1.05	0.67	1.40
T/[0]4/90	2.18	0.20	2.14	1.94	2.50
T/[0]6/0	12.47	5.49	15.19	5.91	18.23
1T/[0]9/0	20.34	0.81	20.42	19.09	21.90
2T/[0]9/0	20.98	1.20	21.38	18.73	22.93
T/[0/90]2/0	8.93	1.01	8.69	7.30	10.64
T/[0/90]2/15	4.03	0.65	4.39	2.99	4.57
T/[0/90]2/30	5.49	3.12	5.44	0.49	10.20
T/[0/90]2/45	9.87	1.24	10.19	7.15	11.11
T/[0/90]2s/15	3.62	0.33	3.70	2.78	3.96
T/[0/90]2s/30	8.38	0.91	8.59	6.89	9.56
P/T/[0/90]2s/0	7.62	0.58	7.54	6.91	8.39
P/T/[0/90]2s/15	8.55	1.11	8.62	6.60	9.98
P/T/[0/90]2s/30	9.53	1.30	9.62	8.19	10.78
P/T/[0/90]2s/45	8.68	1.78	8.83	5.05	11.71

M2. táblázat Próbatetek vastagságának összesítése

Rétegszám	Gyanta típus	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
2	crystic	0.79	0.0225	0.79	0.75	0.84
4	crystic	1.53	0.1300	1.48	1.30	1.83
4	polylite	1.65	0.1110	1.61	1.50	1.93
6	crystic	2.04	0.0470	2.04	1.91	2.12
8	crystic	2.71	0.0766	2.72	2.55	2.88
8	polylite	2.87	0.1610	2.83	2.51	3.27
9	crystic	3.07	0.1490	3.08	2.84	3.31
9	polylite	3.11	0.0961	3.09	2.95	3.41

M3. táblázat Szimmetria modell paraméterek

Függő változó	Szimmetria	R^2	Korrigált R^2	Standard hiba	p-érték
Szakítószilárdság	szimmetrikus	0.8910	0.8850	4.31E+00	4.21E-10
	aszimmetrikus	0.7945	0.7816	1.32E+01	6.90E-07
Szakadási nyúlás	szimmetrikus	0.9710	0.9694	6.68E-03	2.68E-15
	aszimmetrikus	0.3396	0.2983	2.58E-02	1.11E-02
Folyáshatár	szimmetrikus	0.9480	0.9451	2.34E+00	5.22E-13
	aszimmetrikus	0.9032	0.8972	2.49E+00	1.57E-09
Rugalmassági állandó	szimmetrikus	0.9852	0.9843	2.80E+02	6.28E-18
	aszimmetrikus	0.8724	0.8644	4.98E+02	1.46E-08
Szívósság	szimmetrikus	0.9300	0.9261	6.86E-01	7.65E-12
	aszimmetrikus	0.0956	0.0393	2.38E+00	2.11E-01

M4. táblázat Gyanta modell paraméterek

Függő változó	Gyanta típus	Modell	R^2	Korrigált R^2	RSE	p-érték
Szakítószilárdság	crystic	2. fokú	0.9398	0.9375	24.02	3.62E-33
		3. fokú	0.9846	0.9838	12.25	3.68E-48
	polylite	2. fokú	0.9874	0.9865	12.94	7.96E-28
		3. fokú	0.9925	0.9917	10.13	4.51E-30
Szakadási nyúlás	crystic	2. fokú	0.7636	0.7548	0.02	2.08E-15
		3. fokú	0.7965	0.7850	0.02	8.68E-16
	polylite	2. fokú	0.8926	0.8852	0.02	1.66E-15
		3. fokú	0.9219	0.9135	0.01	8.98E-17
Folyáshatár	crystic	2. fokú	0.9271	0.9244	4.58	2.27E-32
		3. fokú	0.9273	0.9232	4.62	1.19E-31
	polylite	2. fokú	0.8772	0.8687	7.38	1.79E-14
		3. fokú	0.8895	0.8776	7.12	1.38E-14
Rugalmassági állandó	crystic	2. fokú	0.9100	0.9067	869.55	2.17E-29
		3. fokú	0.9194	0.9149	830.62	1.22E-29
	polylite	2. fokú	0.9310	0.9262	896.67	2.87E-18
		3. fokú	0.9514	0.9462	765.83	1.08E-19
Szívósság	crystic	2. fokú	0.5108	0.4927	2.04	2.16E-01
		3. fokú	0.6448	0.6247	1.76	3.53E-01
	polylite	2. fokú	0.1806	0.1241	1.26	6.13E-02
		3. fokú	0.1959	0.1097	1.27	6.36E-02