

**NEUMANN JÁNOS EGYETEM GAMF MŰSZAKI ÉS
INFORMATIKAI KAR
JÁRMŰMÉRNÖK SZAKIRÁNY
NAPPALI TAGOZAT**

PULTRUDÁLT PROFILOK RAGASZTOTT KÖTÉSEINEK VIZSGÁLATA

**ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI
KONFERENCIA**

Konzulensek:
Kun Krisztián
Tanársegéd
Szabó Valentin Endre
Tanszéki mérnök

Készítette:
Mundrucz Péter
Járműmérnök hallgató

**Kecskemét
2022**

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	4
1. SZAKIRODALOMKUTATÁS	5
1.1. KOMPOZITOK	5
1.1.1. Műanyag kompozitok	6
1.1.2. Mátrix anyagok	6
1.1.3. Szálerősítéses kompozitok	9
1.1.4. Szálak elrendezési formái	10
1.1.5. A szál geometriájának a jelentősége	10
1.1.6. Szálak anyagi jellemzői	11
1.2. PULTRUDÁLT PROFILOK	12
1.2.1. Folyamatok áttekintése	13
1.2.2. Folyamat és anyag viselkedése	14
1.2.3. Alternatív kikeményítési és fűtési technológiák	15
1.2.4. Üvegszállal erősített műanyag profilok (GRP-glass reinforced plastic)	17
1.3. RAGASZTÓANYAGOK	18
1.3.1. Ragasztók tulajdonságai és tönkremeneteli módjai	18
1.3.2. Ragasztó típusok	20
1.4. RAGASZTÁSTECHNOLÓGIA	20
1.4.1. A ragasztás előnyei és kerülendő jellemzői	20
1.4.2. A ragasztás elméleti felépítése	21
1.4.3. Nedvesítőképesség és szétterülés metódusa	22
1.4.4. Nedvesítési peremszögek határértékei	23
1.4.5. Ragasztott kötések igénybevételei	24
1.4.6. Ragasztó felhordási módok	25
1.5. RAGASZTÁSI ELŐKÉSZÜLETEK ÉS FELÜLETKEZELÉSEK	25
1.5.1. Ragasztási előkészületek	25
1.5.2. Felületkezelés	25
1.5.3. Felületérdesítés	25
1.6. PULTRUDÁLT PROFILOK RAGASZTÁSTECHNOLÓGIÁJA, JELENLEGI ÁLLÁSPONTOK, EREDMÉNYEK	26
1.6.1. Epoxi és poliuretán ragasztók tapadása kézzel csiszolt felületen	26
1.6.2. Különböző felületkezelések hatása akril ragasztóval történő ragasztás során	27
1.6.3. Környezeti öregedés hatása a pultrúzióval készült profilok ragasztott kötéseire	31
2. KÍSÉRLETTERV	33
2.1. KÍSÉRLETET BEFOLYÁSOLÓ FAKTOROK	33
Felületérdesítés nélküli felület	34
Felületkezelés homokszórással	34
Felületkezelés kézi csiszolással	34
2.2. FELHASZNÁLT RAGASZTÓ/GYANTA TÍPUSOK	35
Loctite HY 4090 ragasztó	35
Sikapower 4720 ragasztó	35
IpoX MR 3010 + MH 3124 epoxi gyanta rendszer	36
2.3. PRÓBATESTEK KIVÁLASZTÁSA	36
Lapos profilok	37
2.4. ALKALMAZOTT RAGASZTÁSTECHNOLÓGIA	38
3. A RAGASZTOTT KÖTÉSEKET BEFOLYÁSOLÓ HATÁRRÉTEG JELENSÉGEK	40
3.1. FELÜLETI ENERGIA MEGHATÁROZÁSA	40
Nedvességmérés	40
Érdességvizsgálat	42
4. MÉRÉSEK ÉS VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK	44

4.1.	LAPOS PROFILOK SZAKÍTÓVIZSGÁLATA: EREDMÉNYEK.....	44
4.2.	LAPOS PROFILOKNÁL ALKALMAZOTT RAGASZTOTT FELÜLET LINEÁRIS NÖVELÉSE: EREDMÉNYEK	48
5.	TECHNOLÓGIAI- ÉS IPARI AJÁNLÁS.....	52
	ÖSSZEFOGLALÁS	54
	ÁBRAJEGYZÉK.....	55
	IRODALOMJEGYZÉK	56

Bevezetés

Az elmúlt években, évtizedekben érzékelhető volt a pultrudált profilok alkalmazásának növekedése. Ezeket a kompozit anyagokat általában olyan ágazatokban hasznosítják, amelyek magas mechanikai tulajdonságokat, vegyi és korrózióállóságokat igényelnek, kötéstechológiájuk kötőelemekkel (például csavarokkal), vagy ragasztással valósulhat meg. A pultrudált profilok polimer kompozitok. Felületi energiájuk meglehetősen alacsony, ami a ragasztott szerkezet tapadási minőségét negatívan befolyásolja. A ragasztásnak számos előnye van a csavarokkal szemben. A ragasztott kötés tömege alacsony, korrózióálló és nincs szükség az anyagot gyengítő furatokra sem. A felületkezelések a ragasztott kötések pozitívan befolyásolják, amennyiben az eljárást és a ragasztóanyagokat megfelelően választjuk meg az anyaghoz.

Kutatásomban pultrudált profilokon felületkezeléseket alkalmazok a felületi energia növelése érdekében. Kézi csiszolással és homokszórással érdesítek felületet, majd különböző zsírtalanítószerkeket alkalmazva nedvességmérést végzek el egy kezelés nélküli és az előbb említett két módszerrel kezelt felületeken. A felületkezelés létrejöttének bizonyítására és nagyságának a meghatározására a felületeken érdeségmérést végzek. A próbatest-ragasztásokat kétféle kétkomponensű szerkezeti ragasztóval és egy szintén kétkomponensű epoxi gyantával készítem. A lapos profilok nyírószilárdsági értékét szakítóvizsgálaton hasonlítom össze, majd meghatározom a felületkezelések képességét.

Kutatásom célja a pultrudált profilok felületi energiájának a nagymértékű növelése. Az eredmények kiértékelése után meghatározom a technológiai- és ipari alkalmazhatóságukat, majd ezek alapján ajánlást fogok készíteni.

1. Szakirodalomkutatás

1.1. Kompozitok

Kompozit anyagok megjelenésének a fő oka az ipar fejlődése. A hagyományos anyagok szerkezetei már nem felelnek meg a mai technológia elvárásainak. Az anyagok nem képesek minden követelménynek megfelelni. Például a kerámiák jó hőálló képességgel rendelkeznek, emellett jó elektromos szigetelők, viszont kifejezetten ridegek, míg a fémes szerkezetek már sokkal kevésbé lesznek hőállóak, viszont jó elektromos vezetőként funkcionálnak. Éppen ezért jelentek meg a mesterséges inhomogén (heterogén) szerkezetű kompozit anyagok, amik kettő vagy több anyagból épülnek fel és együttes oldhatatlan kötésként jobb anyagszerkezeti tulajdonságokkal rendelkeznek, mint külön-külön és az anyagok közötti kapcsolat megmarad terhelés hatására is. [21]

Eredetileg a kompozitok elsősorban a repülőgépiparban és az űrtechnikában bizonyították be jó anyagtulajdonságaikat. Ezeknél az iparágaknál nagy hangsúlyt fektetnek arra, hogy minél kisebb sűrűségű anyagot használjanak, viszont nagy szakítószilárdsággal rendelkezzen a felhasznált anyag. Általában a cél a mechanikai tulajdonságoknak a növelése. Emiatt fejlődtek ki a szálerősítésű anyagok és a rétegszerkezetek. Fontos megjegyezni, hogy a kompozit anyagok legtöbb esetben nem igényelnek forgácsolással járó megmunkálást, hiszen a kompozit elkészítéskor készterméket hozunk létre. Továbbá az előnyök közé tartozik a korrózióállóság és a viszonylag egyszerű és olcsó felszerszámozás lehetősége. Aminek előnye van annak hátránya is: a kompozitok elkészítése magas árat követel, gyártásához és tervezéséhez speciális ismeretek szükségesek. A kompozit anyagoknak a minőségét több tényező is befolyásolja. Fontos tényező az alkotók paraméterei, százalékos arányuk, alakjuk, a mátrix anyagban való elhelyezkedési geometriájuk és nem utolsósorban a határfelületeik minősége. A határfelületek alatt a találkozási vagy érintkezési felületeket értjük. Az alkotók a kémiai összetétele és az alakja is legtöbbször eltérő. Az egyik alkotó egy folytonos mátrix anyag, míg a másik alkotó egy erősítő szál anyag, amit a beágyazó mátrix anyag fog körül zárni. Legtöbb esetben a mátrix alkotót és az erősítő szál anyagot külön-külön készítik el, majd a végső formájukban valósítják meg a kompozit alkatrészt/terméket. A kész alkatrész utólagos alakítása nem jellemző. [21], [30]

A kompozitokat többféleképpen tudjuk osztályozni: a mátrix anyag típusa alapján, az erősítő anyag alakja szerint, vagy anyagpárosítás szerint. A mátrix anyagok felhasználását az alkalmazási hőmérsékletük alapján tudjuk meghatározni. A műanyag mátrix anyagokat 200°C-ig, a fém alapú mátrix anyagokat 200-400°C között, a kerámia alapú kompozitokat

pedig 500°C felett lehet megfelelően alkalmazni. Az alkalmazhatóság nagyban függ a mátrix anyag maximális hőmérséklet tűrésétől. Az erősítő anyagok alapján lehetnek szemcsés-, szál- és lemezes (rétegelt) erősítésűek a kompozitok. Az anyagpárosítások leggyakrabban fém-fém, fém-kerámia, kerámia-kerámia, polimer-üveg. A műanyag mátrix anyaggal rendelkező kompozitokat két nagyobb csoportba oszthatjuk. A poliészterek és a duroplasztok csoportjába. [18], [21], [30], [34]

1.1.1. Műanyag kompozitok

Három kulcsfontosságú, de különböző alkotórészből állnak a műanyag kompozitok, amik nem mások, mint a mátrix anyag, az erősítő- és/vagy a töltőanyag és az adalékok.

A mátrix legfőbb feladata, hogy a szálakat a kívánt helyzetben és orientációban rögzítse, de el is kell választania őket egymástól, hogy a kompozit deformációja során elkerülje a kölcsönös sűrűlődni. A mátrix a szálak közötti teherátadó közegként is funkcionál, de a kompozit terhelés kevésbé ideális esetében, komplex terhelés esetén, a mátrix a szálak tengelyére merőleges terhelést is képes felvenni. [25], [34]

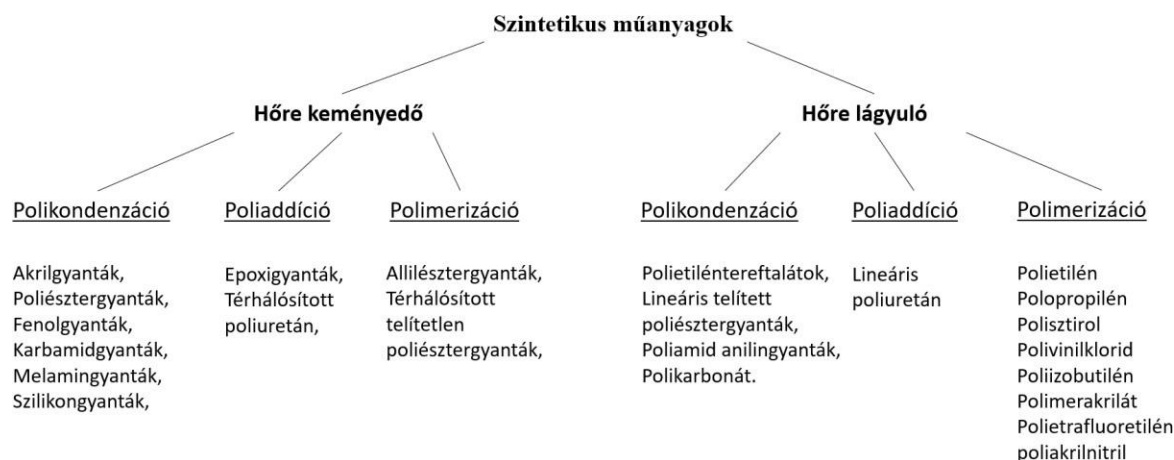
Az erősítőszálak általánosságban nagy szilárdsággal és rugalmassági modulussal rendelkeznek és a fő teherviselő elemként szolgálnak. Az erősítőanyagok a mátrixba ágyazódva hatnak, általában növelve a kompozit húzó- és hajlítószilárdságát. Az iparban nagyobb részt üvegszálakat, szén- és grafit szálakat, szén nanocsöveket és aramid szálakat használnak. [21], [43], [53]

1.1.2. Mátrix anyagok

Csoportosítás szempontjából a mátrix anyagok típusa szerint is tudjuk osztályozni a kompozit anyagokat. Leggyakrabban a mátrix anyagok fémek, kerámiák vagy polimerek. A fém alapú mátrixok legnagyobb előfordulásban alumínium-, titán-, magnézium-, vagy rézötvözet alapúak. A kerámia alapú mátrixokat magas hőmérsékleten használják olyan alkalmazásokhoz, ahol alapvető az anyag jó kémiai stabilitása. Ezt a kémiai stabilitást úgy lehet elérni, ha a kerámia mátrix már egy kompozit anyag, mivel ezek tartalmazhatnak üveget és félfémeket. A szálkompozitok leggyakoribb mátrix anyaga a mesterséges alapú polimer, amik lehet hőre keményedő vagy hőre lágyuló gyanta. Ezeket **szintetikus műanyagoknak** nevezzük. [25], [28]

A hőre keményedő polimerek (másnéven a duroplasztok) kifejezetten sok térhálósodási hellyel rendelkező molekulákból állnak. A duroplasztoknak megszűnik a képlékenységek egy adott hőmérséklet fölött. A hőre lágyuló műanyagok (másnéven a termoplasztok) az üvegesedési hőmérsékletük fölötti szilárd állapotból képlékenyen alakítható állapotba

mennek át. A termoplasztok makromolekulái kis mértékben, vagy egyáltalán nem térhálós szerkezettel rendelkeznek. [53]



1. *Ábra: Szintetikus műanyagok csoportosítása [30]*

Hőre keményedő műanyagok

A hőre keményedő műanyagok nagy stabilitással rendelkeznek, aminek az egyik oka az, hogy sok térhálósodási hellyel rendelkeznek, a másik ok pedig a nagy mennyiségű keresztkötés kialakulása a polimer szerkezetében. A keresztkötés mennyisége egyenesen arányos a műanyag ridegségének mértékével. Újraolvasztásra nincs lehetőség, ezért a selejtes vagy elhasználódott terméket az esetek többségében elégetik. A legismertebb hőre keményedő mátrix anyagok, amiket használunk a kompozit gyártás során, az epoxi, poliészter, vinilészter és fenol/formaldehid típusú gyanták. [53], [34]

	Epoxi	Fenolplaszt	Poliészter	Vinilészter
Sűrűség [g/cm ³]	1,2 - 1,3	1,2 - 1,4	1,1 - 1,4	1,1 - 1,2
Folyamatosan alkalmazható üzemi hőmérséklet [°C]	80-215	70-250	60-150	-
Húzó modulusz [Gpa]	2,5 - 5,0	2,7 - 4,1	1,6 - 4,1	3,0 - 4,0
Szakadási nyúlás [%]	<9	-	<5	<6
Szakítószilárdság [Mpa]	50-130	35-60	40-90	70-90
Nyomószilárdság [Mpa]	110-210	-	90-200	-
Hajlítószilárdság [Mpa]	110-215	-	60-160	120-140

2. ábra: Hőre keményedő mátrix anyagok tulajdonságai [53]

Az epoxi gyanták a piacra oligomer formában jutnak, amik molekulánként legalább két epoxi csoportot tartalmaznak, oldószermentesek, folyékonyságuk a molekulatömegtől

fűgg és méz állagúak vagy szilárd anyagok. Az epoxi csoporttal reakcióba kell lépnie a funkciós csoportot tartalmazó anyagoknak (aminok, poliamidok, savanhidridek), amik lehetővé teszik a térhálósítást. Meghatározó szempont, hogy a térhálósítás közben semmilyen folyékony termék nem keletkezik (például víz). Nem utolsó sorban pedig a már térhálósított gyanta nem oldódik oldószerben. Ezek a gyanták kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, a különféle szálakkal és fémekkel kitűnő az adhéziójuk. A szobahőmérsékleten térhálósodó gyantákhoz képest költségesebbek a melegen térhálósított gyanták, viszont ezek tulajdonságai messze felülmúlják a szobahőmérsékleten térhálósodó gyantákét. [34], [41]

A kompozitok készítésekor a leggyakoribbak a biszfenol-A bázisú epoxi-gyanták, az epoxi novolakkok, cikloalifát epoxidok és a halogén epoxidok. Ezeknek a gyantáknak kiváló a korrózióval és a vegyszerekkel szembeni ellenállása. Általánosan törékenyek, ha viszont hőre lágyuló műanyagokkal együtt alkalmazzák őket, akkor lágyabbá tehetőek és a hőre lágyuló műanyagok termikus stabilitásuk is javul ezáltal. [34], [41]

A poliészter gyanták azok a makromolekuláris anyagok, ahol a szerkezeti felépítés szabályosan ismétlődő alapegységekből áll, amik észter kötésekben keresztül kapcsolódnak össze. [53]

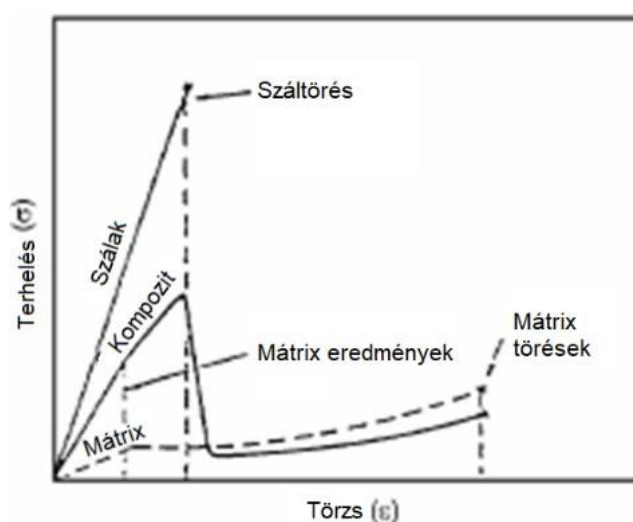
Három fő tulajdonságaik alapján lehet őket csoportokba rendezni. A telítetlen poliészterek több-bázisú telítetlen karbonsavakból és többértékű alkoholokból felépülő vegyületek. A telítetlen poliészter gyanta monomeréhez szükséges egy oldószer, ez jelen esetben a sztirol, ami reakcióba lép az oldószerrel. Így alakul ki a térhálós szerkezet, amivel a legtöbb oldószer nem lép reakcióba. Mivel a sztirolnak egészségre káros hatásai vannak, egyre szigorúbb környezetvédelmi előírásoknak kell megfelelni az előállítás során. A gyártók törekednek a hatékonyabb térhálósító katalizátorok alkalmazására annak érdekében, hogy a gyanta sztirol tartalma csökkenjen, ezen felül pedig a kevésbé illékony, szubsztituált sztirol-vegyületek felhasználásához. [34], [41]

A kompozitok mátrixanyagaként széleskörű felhasználhatóságuk miatt terjedtek el a poliészter gyanták, mivel erősítés nélkül műszaki célokra nem használhatóak a túl nagy ridegségük és az alacsony szilárdsági értékük miatt. Leggyakoribb erősítő anyaguk az üvegszövet, vagy az üvegszál. Ezzel az összeállítással a fémekkel összemérhető szilárdsággal rendelkeznek, viszont azoknál jelentősen könnyebb terméket lehet előállítani. A széleskörű alkalmazásukat az magyarázza, hogy viszonylag olcsó az áruk, kezelhetőségük könnyű, gyors kikeményedésűek, jó ellenállást mutatnak a légköri hatásokkal szemben. Emellett kifejezetten jók a mechanikai, kémiai és elektromos tulajdonságaik is. [49]

A vinilészter gyanták annyiban különböznek a poliészter gyantáktól, hogy a reaktív helyek a lánc végén helyezkednek el. A vinilészter gyanták két-három típusú gyantának a módosított változatai, melyek alapja a poli(vinil-alkohol) alapú poliészter és ennek a módosító gyantái lehetnek az epoxi-, novalakk-, vagy epoxi-novalakk gyanták. A kevesebb észtercsoport tartalom miatt kevésbé érzékenyek a víz hatására bekövetkező degradációra. A jó terhelésátadásukat és ellenállóságukat hosszú szénláncainak köszönhetik. A poliészter gyantákhoz képest jobbak a mechanikai tulajdonságaik, nagyobb a hőállóságuk és kiváló vegyszerállóságuk vannak. A rugalmasságukat a kevesebb keresztkötés kialakulás lehetőségének köszönheti. [49], [53]

1.1.3. Szálerősítéses kompozitok

Ezeknél a kompozitoknál a mátrix anyag mechanikai tulajdonságait lényegesen növelik a benne elhelyezett nagy szilárdságú merev szálak. Lehet szó a szívósságról, szilárdságról és a szilárdság/tömeg arányról (vagy a tribológiai jellemzőiről). Mivel a szálerősítés felépítése bonyolult, ennek a kompozitnak a tulajdonságai nem vezethetők le egyszerűen keverési szabállyal a mátrix és a szál tulajdonságaiból. Két szempontot fogunk figyelembe venni a vizsgálat során. Az első szempont a szilárdság. A szálerősítésű kompozitoknál a szilárdság érdemi növelése akkor történhet meg, ha a szálak és a mátrix között erős kötés alakul ki. Ebben az esetben a terhelés nagyobb részét a szálak veszik át, ahogyan az a xy. ábrán láthatjuk. [30], [19]



3. Ábra: Folytonos egyirányú szálakkal erősített kompozit szakítódiaagramja [30]

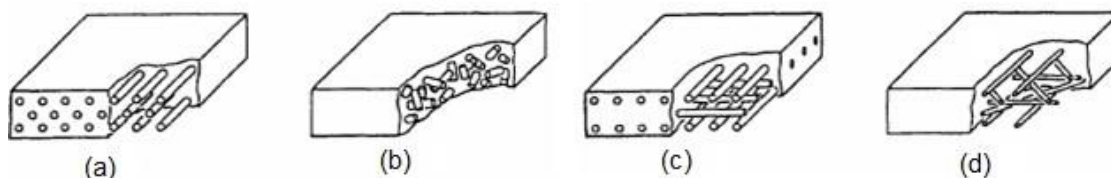
Az erős kötés akkor jöhet létre, ha a szál és a mátrix közötti nedvesítési viszonyok megfelelőek, tehát a mátrix nedvesítse a szálát. Vannak helyzetek, ahol szükség van a nedvesítés elősegítésére. Ezt úgy lehet kivitelezni, ha a szálak felületét bevonják egy másik

anyaggal. Például ha a mátrix anyag alumínium és szén-szál lesz a szálerősítő anyag, akkor a szén-szálak felületét nikkellel (vagy tantállal) vonják be, hogy növeljék a szilárdságot az alumínium és szén-szál között. A szál és a mátrix érintkezési felületén a végbemenő kémiai reakciók miatt a szál részleges oldódásához vezethet főleg, ha magas hőmérsékleten zajlik a folyamat. [30]

A második szempont a szívósság. A szívósság növelése leginkább kerámia mátrix alapú kompozitoknál lényeges. A kerámiák nagy szilárdsággal rendelkeznek, viszont nem képesek képlékeny alakításra, tehát ridegek. A kerámiák esetében szívósság növelése szálerősítéssel érhető el, ha a szál és a mátrix közötti kötés közepes erősségű. Terheléskor a mikrorepedés eléri a szálakat, ezáltal megbontja a kötést. A szál szakadása után is munkát kell végezni a szál teljes kihúzásáig, amíg a mátrix el nem törik. Így lesz egy rideg mátrixból szívósabb anyag. A szál és a mátrix közötti kapcsolat (határfelület) kialakítása nagy szerepet játszik a kompozit tulajdonságainak meghatározásában. [30]

1.1.4. Szálak elrendezési formái

Ezek kompozitok tulajdonságait alakítani tudjuk a szálak geometriáival, elrendezési formáival, mennyiségeivel és kialakításaival. A szálak elrendezési formáival különféle tulajdonságokat alakíthatunk ki. [30]



4. Ábra: Szálerősítésű kompozitok elrendezési formái [30]

- a) Folytonos egyirányú szálak
- b) Rendezetlen orientációjú rövid szálak
- c) Egymásra merőleges szálak
- d) Filc

1.1.5. A szál geometriájának a jelentősége

Előny a szilárdság növeléskor a rövid szálakkal rendelkező kompozitoknál, ha a száldarabok hosszúságának és átmérőjének a hányadosa (L/D viszony) minél nagyobb. Ez a geometriai jellemző a szál karcsúságát fejezi ki, értéke pedig 30-100 között helyezkedik el. Kedvezően hat a szálerősítés szempontjából a szálak térfogat-arányának a növelése is. [30]

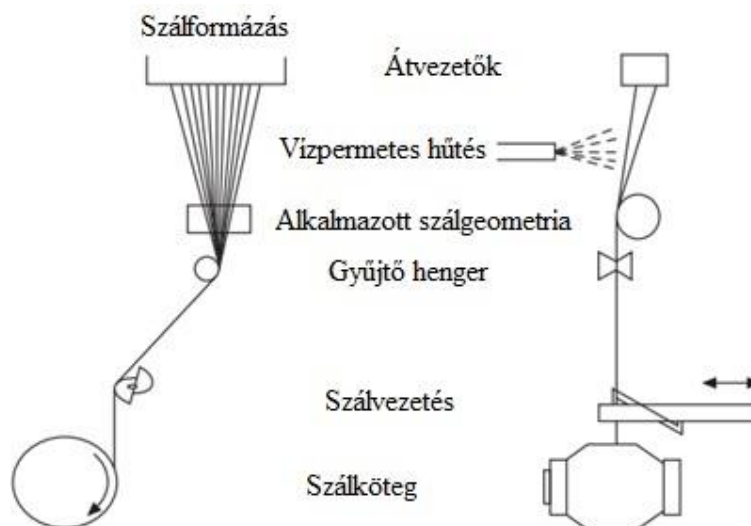
1.1.6. Szálak anyagi jellemzői

Ezeknek a szálaknak különböző elvárásoknak kell megfelelniük:

- kiváló mechanikai tulajdonságok kis sűrűség mellett (szilárdság)
- tartós kötés a szál és a mátrix anyag között, hasonló hőtágulási értékek
- jó geometria: kis átmérő szükséges (nagy fajlagos felület, kevesebb hiba)

A gyakorlatban leggyakrabban üveg, fém, kerámia, polimer és szénalapú szálakat, továbbá tűkristályokat használnak. Az erősítőszálak átmérője elég széleskörű, az esetek többségében 1-10 μ m, ennél viszont vannak vékonyabbak (tűkristályok) és vastagabbak is (100 μ m-es monofilamentek). A szálak forgalomba helyezése történhet kötegekben, szövet vagy háló formában. [30]

Az üvegszálak előállításához olvadék szükséges, ami egy több száz lyukat tartalmazó platina lemezen folyik keresztül a gravitáció miatt.



5. Ábra: Üvegszálak gyártása [30]

A szálak hűtés hatására megszilárdulnak, majd ezzel párhuzamos időben felcsévélik a szálakat. Ezeket a szálakat nagy szilárdság, nagy modulus és a kedvező ár jellemzi. A kompozitok legelterjedtebb csoportját alkotják az üvegszállal erősített polimer mátrixú kompozitok. [30]

1.2. Pultrudált profilok

Ebben a fejezetben szó lesz a pultrudálás technológia folyamatáról, a közelmúltbeli innovációkról, amelyek a pultrudálást sokoldalú gyártási technológiává fejlesztették és ezáltal lehetővé tették a kompozit anyagok piacra jutását például az autóiipar, az építőipar, a repülőgépipar és a szélturbina-ipar területén. A pultrudálás korai változatai először az 1950-es években jelentek meg W. Brandt Goldsworthy munkájával az USA-ban a poliészter gyanták és Ernst Kühne munkájával Svájcban az epoxigyanta területén. A kezdeti elképzelések óta sok innováció került napvilágra. Az elmúlt 70 év során a pultrudálás az iparág vezető eljárásává érett, ha nagy áteresztőképességű és automatizált kompozitgyártásról van szó versenyképes áron. Ez az eljárás ma már egy rendkívül sokoldalú technika, amely a szálerősítések és mátrixanyagok széles skálájával kompatibilis, pl. a hagyományos hőre keményedő és hőre lágyuló műanyagokkal, valamint üveg-, szén-, aramid- és természetes szálakkal erősített megújuló mátrixokkal. [54], [14], [49]



6. Ábra: Pultrudált profilok [22]

A pultrudálás továbbá egy folyamatos, teljesen automatizálható és egyre népszerűbb eljárás, amelyet szálerősítésű, állandó keresztmetszetű kompozitprofilok gyártására használnak. Az elnevezése a “pull” és “extrudálás” szavakból ered, de szemben az extrudálási eljárásokkal, ahol a profilt úgy állítják elő, hogy az anyagot egy szerszámon keresztül tolják, a pultrúziós eljárás a profilt húzással mozgatja elő. A pultrudált profilok és termékek egyre szélesebb körben kerülnek alkalmazásra. Ennek oka az eljárás költség- és energiahatékonysága, valamint a megismételhető, magas anyagminőség még nagy szálmennyiség-tartalom esetén is. Az olyan eljárásokkal együtt, mint a száltekercselés és az automatizált szálelhelyezési technológiák, a pultrúzió folyamatos gyártási folyamat, de ez az egyetlen olyan gyártási technológia, amely végtelenített és megszakítás nélküli kompozitgyártást tesz lehetővé. [49]

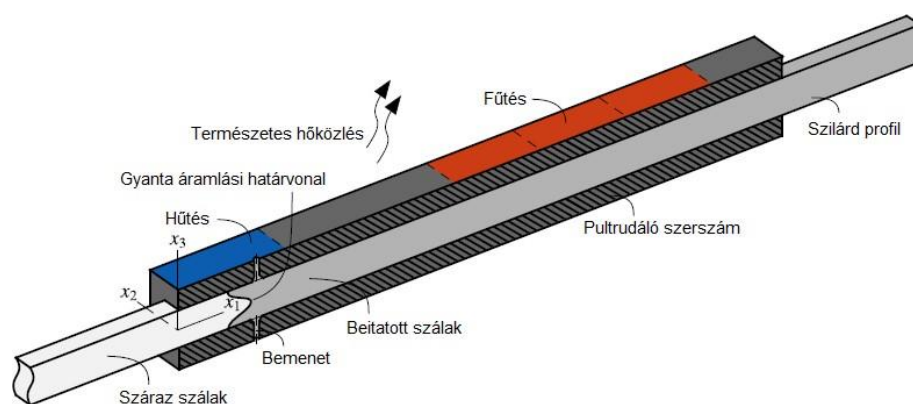
Ráadásul biztosított a versenyképes előállítási költség, mivel a pultrúzió nagy anyaghatékonysággal, alacsony hulladékmennyiséggel rendelkezik és nincs szükség eldobható elemekre (például vákuumzsákok). [54]

Összegzésképp a pultrúziós eljárás nagyon jól automatizálható és magas minőségű végtelenített szálerősítéssel rendelkező kompozit anyagot hoz létre.

1.2.1. Folyamatok áttekintése

A pultrúziós technológiával gyártott profilok többféle eljárással is feldolgozhatók, amelyek kompatibilisek a megújuló és fosszilis erőforrásokból előállított üveggel, szénnel, aramiddal és különböző típusú természetes szálakkal erősített hőre keményedő és hőre lágyuló polimerekkel. Bár a pultrudálási eljárások kialakításonként eltérőek, a folyamat általában a következő lépéseket foglalja magába:

- I. **A rétegezés előkészítése:** A nyersanyagot rostgörgőkből vagy állványokból húzzák ki. A profil kívánt felhasználásától függően a profil rétegezésébe rovingok (egyedi szálakból álló kötegek), szőnyegek és szövetek kerülnek, de lehetnek pre-preg¹ anyagok, szalagok, kevert szálak vagy kétkomponensű szálak, valamint más nyersanyagok is, ahol a szálakat előzetesen kombinálják a mátrixanyaggal. Mielőtt a nyersanyag belép a pultrudáló szerszámba, számos vezetőn halad át, amelyek a rétegelt anyagot a kívánt keresztmetszeti alakra és rétegrendre szervezik és alakítják.
- II. **Impregnálás¹ és fűtés/hűtés:** A rendezett szálak anyagát ezután a pultrudáló szerszám felé mozgatják. A gyantainjekciós pultrúzióban (7. Ábra) a befecskendezés a szerszám első részében történik. Ekkor jellemzően aktív fűtést és hűtést alkalmaznak a megfelelő viszkozitás biztosítása érdekében, miközben szabályozzák a profil megszilárdulását.

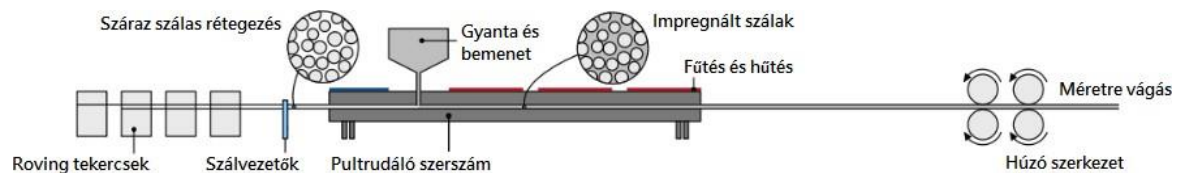


7. Ábra: Pultrudáló szerszám vágott nézeti vázlata [30]

¹ előre átitatott anyag

Más pultrúziós koncepciók esetén, például a gyantafürdős pultrúziónál és a nyitott szerszámmal történő pultrúziónál a szálanyagot a szerszámba való belépés előtt előimpregnálják, ezt követően a feldolgozási lépések már azonosak. A gyantainjekciós pultrúzió egyértelmű előnye az, hogy ez a technika egy zárt szerszámmal működő eljárás, amely korlátozza a gyantarendszerből származó illékony oldószereknek stb. való esetleges kitettséget. A szerszámból való kilépés előtt a profil külső éleit meg kell szilárdítani, hogy a profil stabil maradjon, amikor már nem támasztják meg a szerszám falai. [25]

- III. **Hűtés és vágás:** Egy húzómechanizmus viszi tovább a folyamatot azáltal, hogy a megszilárdult profilt folyamatosan húzza ki a szerszámból, hogy lehűljön. Végül a profilt a kívánt hosszúságúra vágják. [25]



8. Ábra: Pultrudáló gyártósor elvi vázlata [30]

1.2.2. Folyamat és anyag viselkedése

A szálerősítésű polimerprofilok pultrudálási eljárással történő feldolgozásának a pultrudálási koncepciótól független, kulcsfontosságú összetevője a hő. Mivel a mátrixanyag reológiai viselkedése idő- és hőmérsékletfüggő, a profil hőtörténetének szoros ellenőrzése elengedhetetlen a megfelelő anyagáramlás és a folyamat minőségének biztosítása érdekében. Ebben az fejezetben egy hőre keményedő műgyanta befecskendezéses pultrudálási eljárás folyamatviselkedése kerül bemutatásra, azt is tárgyaljuk, hogy ez miben különbözik más anyagok és pultrudálási koncepciók esetében. [49]

A pultrúziós szerszám kialakítható kúpos szelvénnel és anélkül is. A kúp alakú fűvóka lehetővé teszi, hogy a gyanta telítődése alacsonyabb szál térfogattömeg-arány mellett történjen, ami a gyantafürdős pultrúzió esetében, ahol az impregnálás légköri nyomáson kezdődik, elengedhetetlen. A kollimáció, valamint a viszkózus és mechanikus csúszósúrlódás hozzájárul a húzóerőhöz, de a kúpos szerszám kialakításánál a konszolidáció során a hidrosztatikus gyantanyomást is le kell küzdeni. A gyantainjekciós pultrudálásnál a gyantarendszert megnövelt nyomáson fecskendezik be, ami lehetővé teszi a telítődést, szintén egyenes pultrudáló szerszámban. Itt a befecskendezési nyomás nagyságát a profilt előrevivő húzási sebességgel együtt úgy kell beállítani, hogy a gyanta túlfolyás miatti

gyantaveszteség nélkül elegendő impregnálást érjenek el. Miután a szálak impregnálódtak, a kompozit profil állapota a pultrudálási eljárás során a T hőmérsékletből és hőre keményedő polimer esetén az α keményedési fokból is levezethető. Itt az α 0 és 1 között mozog, ami megfelel a kikeményítetlen ($\alpha = 0$) és a teljesen kikeményedett mátrixanyagnak ($\alpha = 1$). Egy numerikus szimulációval elért, hőre keményedő gyanta-injekciós pultrúziós eljárás folyamatábrája láthat. Ez a diagram azt szemlélteti, hogy a hőmérséklet, a keményedési fok, az üvegesedési hőmérséklet, a gyantanyomás és a viszkozitás hogyan alakulhat a pultrudálási folyamat során. A kemorheológia a mátrixanyag keményedés- és hőmérsékletfüggő konstitutív viselkedését írja le. Egy polimer esetében ez a viselkedés három fázisra osztható. Az első, vagyis a viszkózus szakaszban a polimerláncok mozgékonyak, ezt a mozgékonyt pedig a mátrixanyag viszkozitása jellemzi. A legtöbb hőre keményedő pultrudálási eljárás során az impregnálás szobahőmérséklet közelében vagy az alatt történik, míg egyes pultrudálási koncepciókban hőt alkalmaznak a viszkozitás csökkentése és ezáltal az impregnálásra alkalmas folyamatok bővítése érdekében. A teljesen polimerizált hőre lágyuló műanyagok esetében hőt kell alkalmazni a polimer megolvasztásához, különben az impregnálás nem történhet meg. A második fázis, a zselésedés felé haladva a viszkozitás megnő, mivel a polimerláncok mozgékonyága csökken. A zselésedési pont az a pont, ahol a viszkozitás gyorsan növekszik és a mátrix elkezd felvenni a terhelést anélkül, hogy szétfolyna. A zselésedés után a polimer "gumiszerű" fázisban van és a kialakult polimerlánc-szerkezet következtében a polimer feszítése tartós feszültségi állapotot hoz létre. Köznnyelven ezt nevezik annak a pontnak, amikor a mátrix elkezd "memóriát" nyerni, mivel a reakció már nem csak viszkózus, hanem rugalmas is. A hőre keményedő polimerek esetében a keményedés hővel aktiválódik (innen a "hőre keményedő" elnevezés), ezért általában külső hőre van szükség, a hőre lágyuló anyagok esetében azonban a polimer megszilárdulásához hűtést kell alkalmazni. A végső fázisban további hűtést alkalmaznak és a hőmérséklet eléri a keményedéstől függő üvegesedési hőmérsékletet (amely megfelel az üvegesedési hőmérsékletnek), $T = T_g$. A gyantakeményedés a szerszámból való kilépéskor is folytatódhat. Lehűlés után a folyamat befejeződik. [25], [49]

1.2.3. Alternatív kikeményítési és fűtési technológiák

A hagyományos pultrudálási eljárásokban egy elektromos fűtőelemekkel ellátott fémszerszámot használnak a pultrudált profil kikeményítésére és megszilárdítására (szétvágott pultrudáló szerszám kép). Bár a hagyományos pultrudálási eljárások

energiatakarékosnak tekinthetők, alternatív fűtési/keményítési módszerekkel igyekeztek tovább javítani a pultrudálás hatékonyságát. A sugárzásos keményítés a termikus keményítés alternatívája, amelyben a hőre keményedő keményítőanyagok polimerizációját ultraibolya

(UV) sugárzással, gamma röntgensugárzással, elektromágneses (mikrohullámú) vagy elektronsugarakkal idézik elő. Az UV-sugárzás kevésbé veszélyes, kisebb az energiafogyasztása és a többihez képest alacsonyabb kezdeti beruházási költséget igényel, ezért ez az egyik legígéretesebb választás a pultrudálási folyamat alternatív kikeményítési módszerei közül. Az UV-keményítés kritikus tényezője a gyanta és a szálak átlátszatlansága,

ami korlátozza például a szénerősítésű kompozitok keményítésének hatékonyságát. A pultrúzió esetében az UV-keményítési technikákhoz való hozzáférést vizsgáló tanulmányok az üvegszálprofilokra korlátozódtak. Az UV-keményítés pultrudálásra történő adaptálásának első kísérleteit a 80-as években mutatták be, UV-transzparens szerszámmal. Később az UV-

keményítést szerszámon kívüli keményítési módszerként tesztelték, amelyben az UV-sugárzást a formázószerszám kijáratánál alkalmazták. Itt a felesleges gyantát eltávolították és az impregnált, nem keményített profilt a formázószerszámban a kívánt keresztmetszeti

alakra tömörítették, alakították. A szerszámon kívüli kikeményítés a hagyományos pultrudáláshoz képest kisebb húzóerőt igényel és lehetővé teszi a szerszám utáni kezeléseket is, hogy a pultrudált profilon ívelt területeket alkalmazzanak (az ún. "hajlított pultrudálás").

Az UV-keményítésű pultrudálás során jellemzően elért viszonylag alacsony csúcshőmérséklet által elérhető az olyan hőmérséklet-érzékeny erősítőanyagok használata,

mint a Nylon6. Egy másik útvonal a mikrohullámmal támogatott pultrúzió. Itt az anyagtulajdonságok az elektromágneses jellemzőkkel együtt határozzák meg a

mikrohullámú kölcsönhatást, ami azt jelenti, hogy a profil szelektív felmelegítése a szerszámba történő korlátozott energiavesztés mellett részben mikrohullámmal átlátszó szerszámmal érhető el. A profil mikrohullámú fűtéssel történő közvetlen fűtése ötször nagyobb húzási sebességet és 1,7-szer kisebb energiafelhasználást eredményezhet, ahogyan

azt Barkanov és társai egy nemrégiben készült elméleti tanulmánya kimutatták. Az energiahatékonyság mellett a mikrohullámú fűtés homogénebb kikeményedést biztosíthat az egész keresztmetszetben, ami alacsonyabb maradó feszültségeket eredményez. Ezen

alternatív fűtési és keményítési módszerek mellett a kompozitok körében olyan új stratégiákat is vizsgálnak, amelyek az anyagalapú technológiákat használják ki a hatékonyság növelése érdekében. Az egyik újonnan megjelenő energiahatékony kompozit

gyártási mód a frontális polimerizáció. Itt a stratégia a nagy reakcióképességű gyantarendszerek kiaknázására irányul, amelyek lehetővé teszik a polimerizációt egy

nagyon szűk folyamatablakon belül. Az elképzelés szerint a megfelelő kikeményedési kinetikával, ha egyszer beindul a folyamat, egy nagyon lokális és önfenntartó reakció alakul ki, amely az egész anyagrétegben terjed, anélkül, hogy további fűtésre lenne szükség. Jól szabályozott frontális polimerizációval a nagy teljesítményű kompozit anyagok előállítása mellett minimalizálható az energiabevitel. Elméletileg a frontális polimerizáció lehetővé teheti a polimerizáció beindulása után a külső hőforrás nélküli vagy korlátozott mértékű pultrudálást. [49]

1.2.4. Üvegszállal erősített műanyag profilok (GRP-glass reinforced plastic)

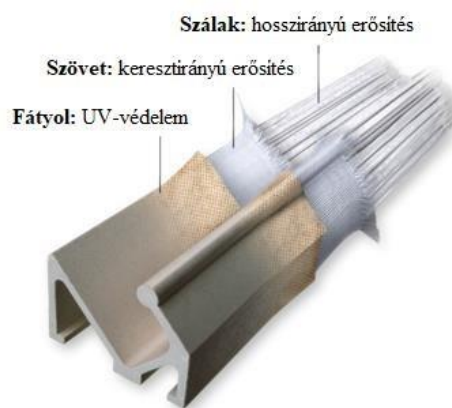
Ezek a kompozitok legoptimálisabban -vagyis szálirányban- az acéloknál is nagyobb terhelések elviselésére képesek, de összetett terhelésnél még nem tudnak akkora erőket elviselni, mint az acélok. [34]

A kompozit anyagok egyre nagyobb helyet kapnak az élet minden területén, egyre nagyobb választékban találhatóak meg a piacon, éppen ezért, ha GRP profilokról beszélünk, akkor a legtöbb esetben általánosítunk. A GRP anyagokat pultrúziós technológiával készítik el, ahogyan azt a pultrudált profilok fejezetben olvashattuk. Vannak standard profilok (L alakú, lapos, cső keresztmetszetű és rúd profil), speciális profilok (vevők igényeiktől függő bonyolultságú) és szigetelő profilok (kutyacsont alakú, sarokprofilok, hornyos élű profilok).

A GRP profilok felépítéséhez a profil anyagának közepétől a külső felületéig fogjuk feltérképezni a kompozitot. A profil közepén elhelyezett egyirányú üvegszálak a hosszanti irányú erőket fogják fel, míg az egyirányú üvegszálakat egy üvegszövet fed be, így a GRP anyag keresztirányú erősítést kap. A külső réteget egy üvegfátyol borítja, ami a felület kopásállóságát, UV-sugárzás tűrését, valamint környezetállóságát javítja. [22], [25]

További előnyei a GRP profiloknak:

- felhasználási területük -100°C és 180°C között van
- rendkívül kis tömeg
- önkioltók és halogénmentesek
- lineáris feszültségnyúlás
- jó elektromos szigetelő
- nagyfokú vegyszerállóság
- korrózió- és kopásállóság
- UV-állóság
- nagyfokú gazdaságosság



9. Ábra: Pultrudált profil felépítése

[22]

- nagyfokú szilárdság
- egyszerű és rövid ideig tartó szerelés
- nincs szükség földelésre
- nincs szükség további karbantartási munkálatokra
- egyszerű a megmunkálásuk, ami akár a helyszínen is elvégezhető a hagyományos kéziszerszámokkal
- fúráskor és fűrészeléskor nem keletkezik sorja
- kül-és beltérben is felhasználhatóak. [22]

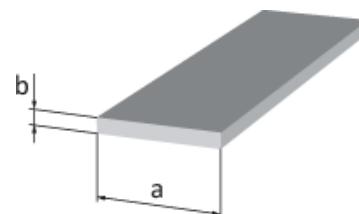
GRP anyag mátrix anyagai:

Mátrix anyagként egy izoftálsav alapú poliészter, speciális követelmények esetében azonban más gyantatípus szükséges. Minden követelménynek megfelelő mátrix anyag nincsen, ezért a szélsőséges igényekhez más-más gyantatípusokat kell alkalmazni.

Drasztikusan nagy korrózióállóságot a vinilészter gyanta tulajdonságai teszik lehetővé, míg a magas tűzterhelésnek és hőmérsékletnek a fenolgyanta tud kiváló ellenállási értékeket mutatni. Speciális elektromos tulajdonságokhoz az epoxigyanta alkalmazása az elterjedt, míg tűz esetén kismértékű füstképződésnél az akrilgyanta tulajdonságai a kedvezőek. [25]

Laposrúd profilok

Kutatásom során lapos keresztmetszetű profilt tesztelek. Leggyakoribb felhasználási területei a lépcsőházak, szennyvíztisztító telepek, járdák, GRP rácsok és GRP-felület alszerkezeteinek. [31]



10. Ábra: Lapos profil [31]

1.3. Ragasztóanyagok

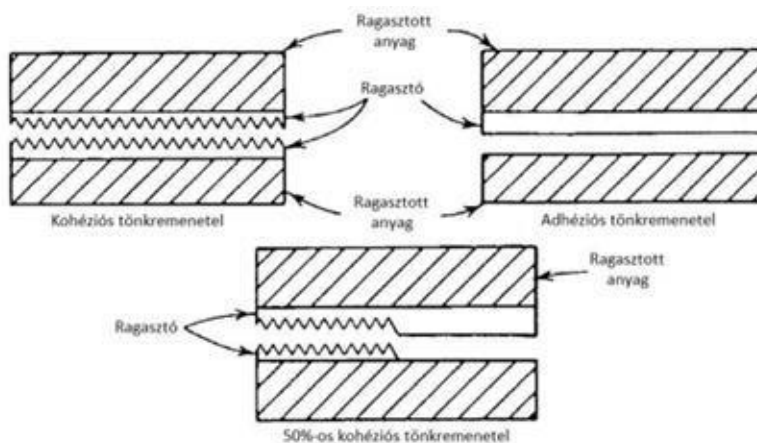
A ragasztók olyan nemfémes anyagok, amik a szilárd anyagok felületét tapadással (adhézió) és a saját szilárdságukkal (kohézió) kötik össze anélkül, hogy az összekötött anyag szerkezeti felépítése és eredeti tulajdonságai számottevően megváltoznának. Ha az összekötendő anyagok ragasztása térben történik (például farostlemez), akkor kötőanyagról beszélünk. [1] [55]

1.3.1. Ragasztók tulajdonságai és tönkremeneteli módjai

A ragasztóknak olyan jellegzetes tulajdonságai vannak, hogy a kötés első fázisaiban folyadékként kell viselkedniük a megfelelő szétterülés és nedvesítés miatt, emellett a felülethez is tapadniuk kell. A ragasztók nagyrészt szerves vegyületek, melyek megszilárdulási módjai kémiai reakcióval (pl. polimerizációval), vagy fizikai úton (pl.

oldószeresztéssel) történnek. Kikeményedési hőmérséklet szerint beszélhetünk hideg- és melegragasztókról. A hidegragasztók szobahőmérsékleten is képesek a kikeményedésre, a hőmérsékletbeavatkozás 100°C-ig segít a kikeményítés gyorsításában. A melegragasztóknál kritérium a legalább 100°C-os hőmérséklet, de a felső határnak 200°C alattinak kell lennie. [3], [26]

A másik alapvető jellemvonása a ragasztóknak az adhézió, másszóval két különböző anyag molekulái között fellépő vonzóerő. Az adhézió mellett a kohéziót érdemes megemlíteni, aminek a definíciója az egy anyag molekulái között kialakuló vonzóerőt jelenti. Ezek a vonzóerők a Van der Waals erők. A ragasztott kötések kétféleképpen mehetnek tönkre: adhéziósan vagy kohéziósan. Adhéziós tönkremenetelről akkor beszélünk, ha a két összeragasztott felület egyikéről a ragasztó fog elválni. A kohéziós tönkremenetelnél a ragasztó anyagában fog elszakadni, ami akkor tud létrejönni, ha az adhéziós erő nagyobb, mint a kohéziós erő (vagy a ragasztó tört el). [26]

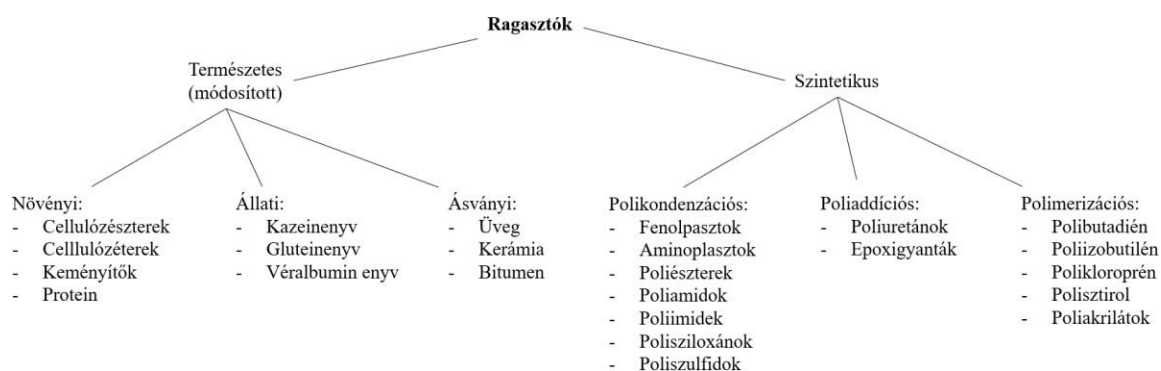


11. Ábra: Adhéziós és kohéziós tönkremeneteli módok [53]

A ragasztók lehetnek egy- és kétkomponensű összetételűek. Az egykomponensű ragasztóknak nincs szükségük előkészületekre. A kétkomponensű ragasztók alkotóelemeit felhasználás előtt kell összekeverni, a gyártó által megadott keverési adatok pontos betartásával. A hidegen kezelhető kétkomponensű ragasztókat kikeverhetjük műanyag edényben, ahol üvegrúddal keverjük össze az összetevőket, de vannak olyan ragasztók, amik egy speciális keverőszár segítségével tudjuk összekeverni őket. A melegen kezelhető kétkomponensű ragasztók összekeveréséhez egy szabályozható hőmérsékletű elektromos fűtésű tégely szükséges. Az összekeverés egy lassú folyamat a buborékképződés minimalizálása miatt. Ha mégis jelentkezik buborékképződés, akkor enyhe nyomással el lehet távolítani őket, vagy a már felkevert ragasztót „pihentetni” kell a buborékfelszállás érdekében. [2], [3]

1.3.2. Ragasztó típusok

A ragasztók rendszerbe foglalása első pillantásra egyszerűnek tűnik, de a rendszerbe foglalás különféle szempontok alapján történnek, ezért egy kritérium szerint nem lehet megfelelően csoportosítani őket. Ezek a szempontok alapján a felosztásuk lehet pl. eredetük, megjelenési formájuk, komponens számuk, igénybevétel, környezeti ellenállóképességük, felhasználási céljuk, fizikai/kémiai tulajdonságuk és kötési módjuk szerint is. [26]



12. Ábra: Ragasztók csoportosítása

1.4. Ragasztástechnológia

A ragasztók első jelei már több ezeréves múltra tekint vissza (Kínában enyvet és lakkot használtak hasonló célokra), de az igazi áttörésre csak a 20. században kezdődött. [55]

A napjainkban használt ragasztók kialakulása a 20. század második felében kezdődött, párhuzamosan a vegyipar gyors fejlődésével. Ebben az időszakban kezdetét vette a szintetikus, hőre lágyuló ragasztóanyagok gyártása. Ma már elkerülhetetlen az, hogy ne találjuk magunkat szemben valamilyen ragasztott tárggyal, a ragasztástechnológia már pedig nélkülözhetetlenné vált az iparágak számára. [6], [17], [26]

1.4.1. A ragasztás előnyei és kerülendő jellemzői

A ragasztás a nem oldható kötések (korlátozottan oldható) csoportjába tartozik. Fő jellemvonása és előnye a ragasztásnak az, hogy az összekötendő anyagokat hőterhelés nélkül képes összekötni, ellenben a hegesztéssel és a forrasztással. A ragasztással létrejött kötés jó szigetelő, zajcsökkentő és rezgéscsillapító hatásokat mutat. A ragasztóanyag az az összekötő elem, ami alkalmazható két azonos vagy két különböző szerkezetű anyag között. A ragasztás tehát létrejöhet fémes és nem fémes anyag között is, de akár műanyag és textilanyagok között is (pl.: autókárpitok). A ragasztás nem minden esetben tudja helyettesíteni a hagyományos kötési eljárásokat (csavarkötést, szegecselést, forrasztást, hegesztést stb.), viszont sok esetben egészítik ki azokat. [56]

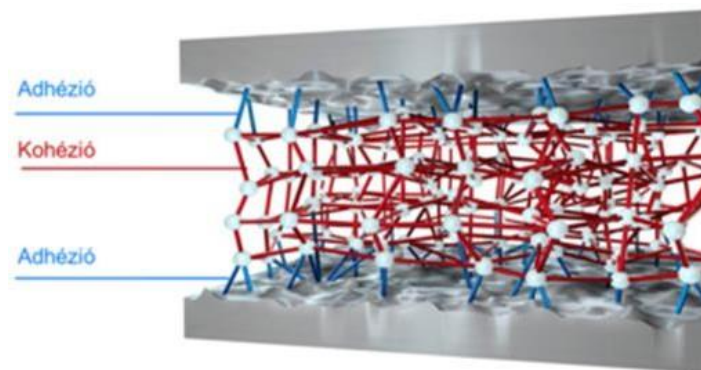
Ez a kötési módszer számos előnnyel bír. A kötés során jelentkező kikeményítéshez szükséges hőkezelés nem indukál kilágyulást. A kötésben a terhelés egyenletes eloszlása miatt nem képződik a kötésben maradó feszültség, így nem jelentkeznek feszültséggyűjtő helyek. Meggátolja a különböző anyagok közötti potenciálkülönbség miatt adódó (vagy adódható) kontaktkorróziót. Aerodinamikai szempontból kifejezetten jó kész felületet lehet vele létrehozni, mivel "varratdudor"-mentes kötést eredményez amiatt, hogy a ragasztás után legtöbbször a ragasztófelesleg könnyen eltávolítható, festhető és csiszolható. A ragasztórétegek általánosságban vegyszerállóak, egyáltalán nem korrodálnak, könnyűek és rezgéscsillapító hatást mutatnak. Különböző típusú anyagok is összeköthetőek. A ragasztott felületek méretei tetszőlegesek. Az esetek többségében nem indokol költséges beruházást vagy szakképzett munkásokat. [26], [56]

A megfelelő minőségű ragasztáshoz több tényező figyelembevétele szükséges. A ragasztandó felületek alapos felületelőkészítéseket igényelnek. A kikeményedési idő alatt (1-2 perctől – 24 óra) terhelésmentesnek kell lennie a félkész kötésnek, tehát nagy az átfutási idő. Tervezéskor fontos kerülni a húzó és lefejtő igénybevételeket, mivel kicsi a ragasztóréteg ellenállása ezekkel az igénybevételekkel szemben. Vannak ütésre érzékeny vagy kúszásra hajlamos ragasztók, amik miatt indokoltá válik egy másik kötési eljárás (pl. szegecselés, csavarozás, karcolás) alkalmazása is. [3]

1.4.2. A ragasztás elméleti felépítése

A megfelelő ragasztókötés-szilárdság kialakulásához az alapvető feltételnek kell teljesülnie:

- A ragasztóanyagnak nedvesítenie kell a ragasztandó felületet, aminek két előzetes kritériuma van:
 - I. A ragasztóanyag és a ragasztandóanyag közötti felületi energiaviszonyok megfelelőek, illetve a kialakításuk
 - II. folyékony ragasztó halmazállapot
- Kötésszilárdítás megvalósulása: Nedvesítés után a ragasztandó anyag és a ragasztó között kialakuló kölcsönhatások



13. Ábra: Ragasztás során fellépő erők [27]

A megfelelő ragasztott kötés akkor jön létre, ha az adhézión erők legalább akkorák, mint a kohéziós erők. Példaképpen szakítás során az erőhatások miatt szakadás, vagy törés keletkezik, ez a tönkremenetel egy jó ragasztott kötésnél nem a határfelületen fog keletkezni, hanem a ragasztandó darabban vagy a ragasztóban, tehát a ragasztott rész „sértetlen” marad. [26], [56]

1.4.3. Nedvesítőkéesség és szétterülés módszere

A nedvesítéssel kapcsolatos jelenségek két végletét preferáljuk az iparban. Az egyik amikor rosszak a nedvesítési körülmények, a másik pedig amikor jók. A rossz nedvesítési körülményekre akkor van igény, ha a két anyag között nem szeretnénk kapcsolatot, vagy el szeretnénk különíteni őket egymástól. Például a járművek karosszériáját és szélvédőjét egyre gyakrabban vetik kerámiás kezelés alá, kifejezetten azért, hogy a vízcsepp ne tudjon rajta maradni egyáltalán. Ilyenkor a vízcseppek nem tudnak elterülni a kezelt felületen, így legurulnak a karosszériáról. A jó nedvesítésnél viszont az a lényeg, hogy a csepp minél nagyobb helyen terüljön el, így jóval stabilabb kapcsolat alakul ki az atomok között. Példaképpen: Öntéskor releváns az öntött anyag megfelelő elterülése az öntőformában, kifejezetten a precíziós öntéseknél, ahol a formák bonyolultak és tizedmilliméteres helyekre is el kell jutnia az anyagnak. [55]

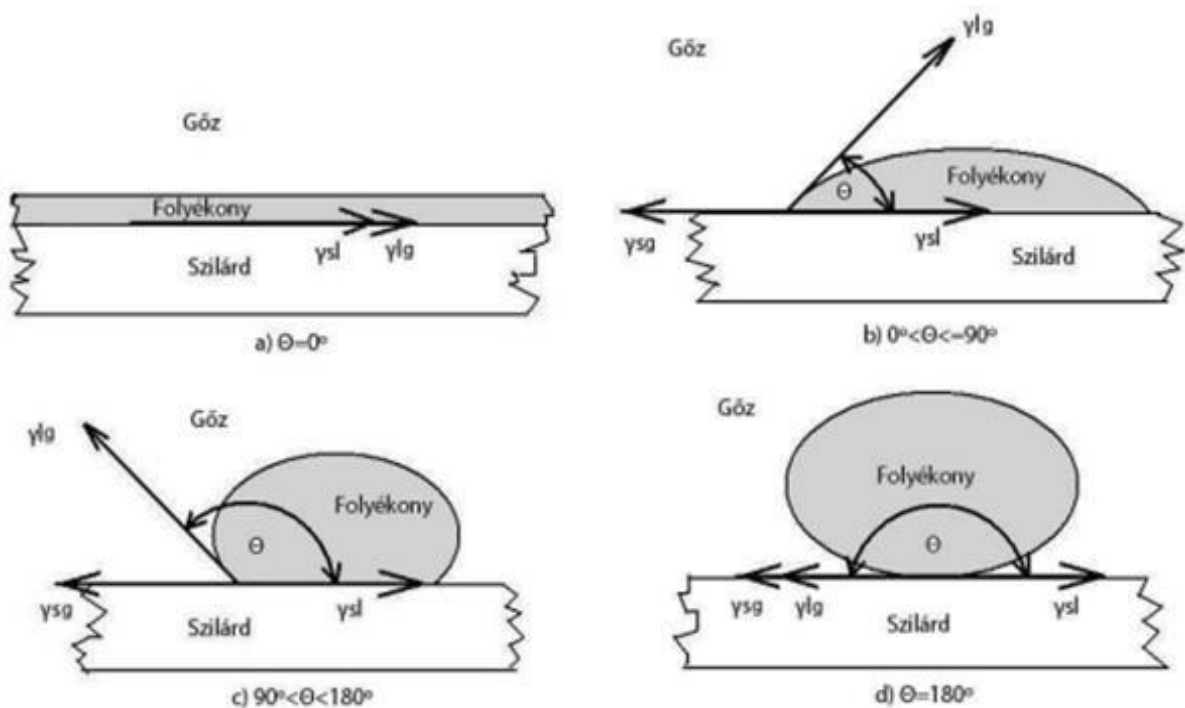
A kötőszilárdság egyik alapvető eleme, hogy a ragasztóanyag képes legyen megfelelően nedvesíteni a ragasztandó anyagot.

A nedvesítőkéességet meg tudjuk határozni egy szilárd felületre helyezett véges molekulájú folyadék szétterülésével. A peremszög (θ), mint mérőszám a két fázis érintkezése között kialakuló érintkezési szög. Ha a folyadék teljesen szétterül, a szilárd rétegen pedig egy összefüggő réteget alkot, filmhelyzetnek nevezett állapot jön létre, ami egyenlő a tökéletes nedvesítéssel, a peremszög pedig nulla. Ha nem filmhelyzetről beszélünk, akkor a peremszög felvesz valamilyen értéket, ezt nevezzük kontaktus helynek. [56]

1.4.4. Nedvesítési peremszögek határértékei

Teljes nedvesítés (peremszög = 0°)

A nedvesítő folyadék tökéletesen nedvesíti a szilárd felületet, ami akkor jön létre, ha az olvadék felületi feszültségének a kétszerese legalább az adhéziós energia. Más szóval az adhézió annyira erős, hogy monoatomos rétegekben a szilárd fázis felületére kényszeríti az olvadékot. Megvalósulása akkor lehetséges, ha a szilárd fázis felületi feszültsége nagyobb, mint az olvadék felületi feszültsége (ez érvényes karbidokra, boridokra, nitridekre stb, viszont a fémek többségére nem). Ha az adhéziós energia értéke a vizsgálat során több mint a kétszerese a felületi energiának, akkor figyelembe kell venni azt, hogy a peremszög már nem ad valós információt a határfelületi energetikai viszonyokról, hiszen a peremszög minden esetben 0° . [55]



14. Ábra: Nedvességi peremszögértékek alakulásának a lehetőségei szilárd fázisra helyezett folyadékcsepp esetén [53]

Részleges nedvesítés (A peremszög 0° és 90° között van)

Ezen értékhatáron belül is az olvadék nedvesíti a szilárd fázist és az adhéziós energia is nagyobb, mint a határfelületi energia, viszont nem nagyobb a duplájánál. Az adhéziós energia még elég erős ahhoz, hogy az olvadékot egyre jobban a szilárd fázishoz kényszerítse. [55]

Részleges, nem megfelelő nedvesítés (A peremszög 90° és 180° között van)

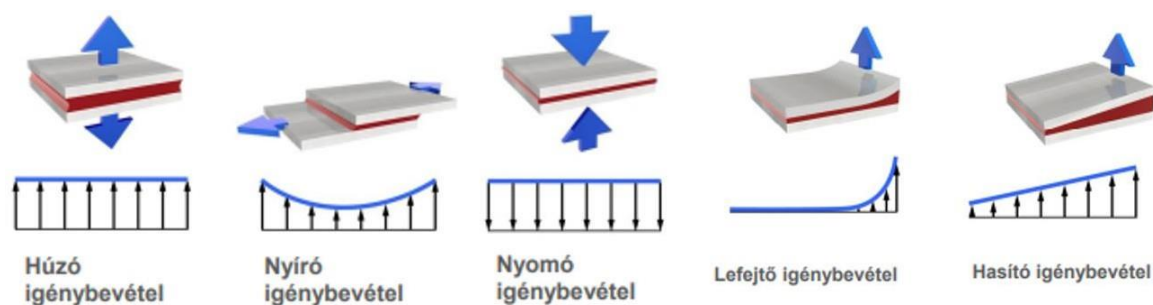
Az adhéziós energia kisebb az olvadék felületi feszültségénél, tehát az olvadék inkább a gőzzel képez nagy közös felületet. Ilyenkor kijelenthetjük, hogy az olvadék nem nedvesíti a szilárd fázist. [55]

Zéró nedvesítés (a peremszög értéke 180°)

Az adhézió a két felület között nulla, így nem jön létre a nedvesítés. Ilyenkor az olvadék csak egy ponton érintkezik a szilárd fázissal. Előfordulásuk abban az esetben lehetséges, ha az olvadék szilárd halmazállapotúvá válik és szilárd/szilárd fázisokat vizsgálunk. Ennek a magyarázata az, hogy amíg a rendszer bármilyen olvadékot tartalmaz, addig valamilyen szinten létrejön bizonyos mértékben a nedvesítés. [55]

1.4.5. Ragasztott kötések igénybevételei

A kötés előkészítésekor meg kell tervezni a kötés előrelátható igénybevételét. Az 1.4.1.-es pontban már említésre került a húzó és lefejtő igénybevétel elkerülésének a fontossága. Húzó igénybevételkor kicsi a szakítószilárdság, az adhéziós tapadás tulajdonságai miatt pedig minimális a terhelhetősége. A lefejtő igénybevétel ennél is rosszabb, mivel a húzó (tépő) igénybevétel egy kisebb sávra koncentrálódik. [27]



15. Ábra: A ragasztási felületen létrejövő különböző terheléstípusok és azok feszültségeloszlásai [27]

A megfelelő igénybevétel a ragasztás szempontjából a nyíró igénybevétel, de a nyomó és csavaró igénybevétel is megfelelő lehet. [55]

A kötészilárdság nem csak az igénybevételektől függ, hanem a ragasztó típusától, rétegvastagságától és az átlapolási felületek nagyságától is függ. A folytonos ragasztóréteg vastagságának csökkenésével növekszik a ragasztott kötések szilárdsága. A porózus anyagok esetében más ragasztási módszert kell alkalmazni, mivel ezek az anyagok pórusai, képesek beszívni a ragasztó anyagot (és más folyékony anyagokat is), tehát ha ilyen történik, a ragasztandó felületet újra kell ragasztani. Ha a beszívódás miatt még mindig vékony a ragasztó vastagsága, akkor rendkívül fontos a ragasztás alatt álló részeket egyenletesen nagy erővel összenyomni. [56]

1.4.6. Ragasztó felhordási módok

Számos ragasztó felhordási módot ismerünk, amik függenek a halmazállapotuktól és az alkalmazási helyüktől. A felkevert ragasztót sima felületeknél elég az egyik felületre felhelyezni, érdes felületnél pedig mind a két felületre fel kell hordani a ragasztót. Általánosságban célszerű kiegészítő nyomást alkalmazni kifejezetten az összeillesztés pillanatában, ami ellensúlyozza a kötés közbeni belső feszültségek káros hatásait. [33], [44]

1.5. Ragasztási előkészületek és felületkezelések

1.5.1. Ragasztási előkészületek

Ragasztáskor a ragasztandó felületre kerülő szennyeződések (pl. zsírok, porszemek, oxidok) miatt a felületet ragasztás előtt egy bizonyos szinten kezelni kell. Általában ez a felületkezelés egy tisztítást jelent (pl. alkohollal, vagy tisztító spray-vel), vagy ezelőtt felületi érdesítést is alkalmaznak. Több felületérdesítési mód létezik, a legáltalánosabb a csiszolás és a szemcseszórás. Vannak helyzetek, amik miatt ezek a hagyományos érdesítési módszerek már nem elég hatékonyak, ezért más technológiát választanak a megfelelő érdesség kialakításához. [28], [32], [44]

A nedvesítőképeség vizsgálatnak nagy szerepe van ezen a téren, hiszen a vizsgálattal könnyen meg tudjuk határozni a felületi energia nagyságát. Minél kisebb egy anyag felületi energiája, vagyis a ragasztó kevésbé nedvesíti a felületet, annál komplexebb és költségesebb a felületkezelés. [55]

Továbbá az előkészületek közé tartoznak a kétkomponensű ragasztóknál az alkotórészek kimérése, megfelelő arányú összekeverése. Oldószeres ragasztóknál a hígítás ide sorolható, vagy a töltőanyag-bekeverésének a folyamata is.

1.5.2. Felületkezelés

A felületmódosítás elvégezhető mechanikai, kémiai, bevonatolósos, lézersugaras és plazmasugaras módszerrel az anyag típusától függően. A felületérdesítés előtt nélkülözhetetlen a felületek tisztítása, mivel a felületérdesítést az esetek többségében már a ragasztani kívánt anyagon kell elvégezni. Ez az előkészület lehet vegyszeres tisztítás, zsírtalanítás, vagy oxidmentesítés. [55]

1.5.3. Felületérdesítés

A felületérdesítés nagy mértékben befolyásolja a ragasztás kötési szilárdságát. Az érdesség mértéke anyagfüggő.

1.6. Pultrudált profilok ragasztástechnológiája, jelenlegi álláspontok, eredmények

Ebben a pontban már a kutatásomhoz hasonló kísérletek, tanulmányok vannak összegezve, amik meghatározzák a kísérlettervem struktúráját. Minden ragasztási kísérlet ebben a pontban csak pultrudált profilokra érvényes.

Az ilyesfajta kutatások fontossága az elmúlt évtizedben jelentősen megnőtt, hiszen egyre nagyobb számban alkalmaznak pultrudált kompozit anyagokat. Ezeket az anyagokat olyan ipari ágazatok alkalmazzák, ahol magas mechanikai igénybevételek vannak, emellett fontos a vegyi és korrózióállóság. A pultrudált profilokat mechanikus úton (pl. csavarokkal), vagy ragasztással lehet összekötni. Ezekben az anyagokban a ragasztással készült kötés optimális alternatívának tekinthető, mivel a mechanikus kötésekhez lyukakra van szükség a hordozón, amelyek vágásokat okoznak a szálakban. Ezek a csavarozott kötések fáradási jelenségeket, ellenálláscsökkenést és súlynövekedést okoznak. Ragasztás szempontjából előnyös az alacsony tömege, a tervezési rugalmassága és a korrózióállósága. A polimereknek viszont van egy olyan tulajdonsága, ami a ragasztásnak határt szab, az az alacsony felületi energia. Az üvegszállal erősített pultrudált profilok gyártásánál formaleválasztót alkalmaznak, annak érdekében, hogy megfelelő legyen a termék a szerszámból való távozáskor. Ez jellemzően lehet üvegfátyol is. Ez jelentősen befolyásolja a tapadási minőséget. Emiatt kell szükséges a ragasztástechnológia megismerése az adott anyaggal szemben, ami a megfelelő felületkezelést és a megfelelő ragasztó kiválasztását foglalja magában. [58]

1.6.1. Epoxi és poliuretán ragasztók tapadása kézzel csiszolt felületen

Egy 2021-es kutatás során szabványos próbatesteket (ASTM 1002) készítettek el egylapos kötéssel és két típusú ragasztót alkalmaztak, amik epoxi és poliuretán alapúak voltak. Mivel az üvegfátyol rendkívül csökkent az adhéziónak a teljesítményt, így emiatt szükséges a felületkezelés. A ragasztott szerkezetek teljesítményének optimalizálására egyszerű és megbízható megoldásokat lehet elérni a különböző anyagok és felületkezelések új kombinációival. Két fajta mechanikus koptatási módszert alkalmaztak, egy és két irányú csiszolást. Az egy irányú csiszolás az üvegszálakkal párhuzamosan történt, a két irányú pedig egy kiegészítő csiszolást kapott erre merőlegesen. A csiszolópapír szemcsemérete 80-as volt. A felületérdesítés után (közvetlen a ragasztás előtt) acetonos tisztítást alkalmaztak, ezzel megakadályozva a zsírok és porok felületen maradását. Az itt alkalmazott ragasztóvastagság 0,2mm. [42]

A felületi érdességek alapján azt a konzekvenciát vonták le, hogy a két irányú felületi csiszolás homogénebb. Az egy irányban csiszolt és a kezeletlen felülethez képest sokkal nagyobb felületi érdességgel rendelkezett a két irányú csiszolás. [42]

A kutatás a ragasztók típusának és a felületkezelésnek a hatását vizsgálták pultrudált kompozit kötések szilárdságára. A szakítások során a ragasztott kötések szilárdsága és a tönkremeneteli módja volt elsődleges megfigyelési szempont. A kezeletlen felületeknél mindkét típusú ragasztónál adhéziós felületi meghibásodások jelentkeztek. A felületkezeléssel érdesített felületeknél jobb eredmények születtek. Az epoxi ragasztó ridegebb kötést alkotott, míg a poliuretán ragasztó rugalmasabb eredményeket adott. A tapadás a kezelt felületeken számottevő volt, mivel jobb mérési eredményeket mutattak a kezeletlen felületekkel szemben. Az egylapos kötést kapott próbatestek szakítási vizsgálatai azt mutatták, hogy a tönkremeneteli mód megváltozott a felületkezelés hatására. Más szóval a felületkezelés hatása javulást eredményezett. Az epoxi alapú ragasztóval létrejött kötésnél az egyirányú csiszolással kezelt mintáknál nagyobb feszültséget értek el, míg a poliuretán ragasztókkal készült kötéseknel a kétirányú csiszolás eredményei mutattak nagyobb szilárdságot. Az epoxi és a poliuretán ragasztó 150%-nál nagyobb növekedést mutatott a kötés szilárdságában. Kézi felületkezelés hatására a poliuretán ragasztó jobb javulást mutatott, mint az epoxi ragasztó. A magyarázat erre az, hogy a poliuretán ragasztó képlékeny viselkedése a kétirányú felületkezelés hatására a nagyobb felületi érdességgel hozzájárult a ragasztó hatékonyabb mechanikai rögzítéséhez. Az epoxi ragasztók is hatékonyak bizonyultak, mivel csak minimálisan mutatott jobb értéket a poliuretán ragasztó. Viszont míg a poliuretán ragasztók a kétirányú csiszolásnál értek el jobb eredményt, addig az epoxi ragasztók az egyirányban csiszolt felületnél mutattak közel akkora értéket. [37], [42]

Ebben a kutatásban a kötés jobb teljesítményét poliuretán ragasztóval érték el, de nem sok különbség volt a két ragasztó között. Ez jól példázza, hogy a ragasztott kötés szilárdságát hogyan befolyásolhatják a szubsztrát anyagának, a felületkezelésnek és a ragasztó tulajdonságainak különböző paraméterei. Ez jól példázza, hogy a szubsztrát anyagának, a felületkezelésnek és a ragasztó tulajdonságainak különböző paraméterei hogyan befolyásolhatják a ragasztott kötés szilárdságát. [7], [8], [42]

1.6.2. Különböző felületkezelések hatása akril ragasztóval történő ragasztás során

A kompozit anyagok ragasztott kötéseivel kapcsolatos tanulmányok többsége elsősorban az epoxi ragasztók használatára összpontosított, míg más ragasztócsaládokról, mint például a szívós akrilok vagy a rugalmas ragasztók (pl. poliuretánok) csak kevés

tanulmány született. Míg elfogadott, hogy a hőre keményedő epoxi alapú ragasztók használata esetén a ragasztandó felületek egyszerű érdesítése és oldószeres tisztítása elegendő a magas kötésszilárdság biztosításához, más ragasztórendszerek használata esetén alternatívát kell találni. A plazmakezelés egy környezetbarát felületmódosítási technológia, amelyet számos iparágban alkalmaznak különböző anyagok módosítására. A plazmákat alacsony nyomású és atmoszférikus plazmákhoz lehet sorolni. Mindkét plazma használható anyagok felületmódosítására. A légköri plazma azonban légköri körülmények között, vákuumkamra megkötése nélkül is előállítható, ami ígéretes módszer, mivel így a kompozit felületet ellenőrzött módon lehet módosítani és könnyen megvalósítható egy ipari folyamatban. A szilánkapcsolók fontos szerepet játszanak az üvegszálerősítésű polimerekben. Az üvegszálak nagyon hidrofílek és vonzzák a vizet a határfelületre. Ha nem alkalmaznak szilánkezelést, az üvegszál és a gyanta közötti kötés meggyengül és végül meghiúsodik. Számos cikk született, amely a szilánok alkalmazását, valamint e molekulák általános kémiai reakcióképességét írja le. A kompozit kötések szilánkezeléssel történő adhéziójavításáról azonban csak néhány tanulmány született. [13]

Ebben a részben különböző felületkezelési módokat hasonlítok össze. A GRP felületét zsírtalanítással, atmoszférikus plazmával, szemcseszórással, valamint γ -metakriloxipropiltrimetoxiszilánnal (γ -MPS) történő szilanizálással segítik a felületkezelést a tapadási tulajdonságok javítása érdekében. [13]

A felületi kezelések felületi energiára gyakorolt hatásának meghatározására kontaktusszög-méréseket végeztek. A kezelések hatását a ragasztott kötések mechanikai tulajdonságaira és tartósságára is vizsgáltuk egylapos nyíró próbatestekkel. A felhasznált ragasztó egy kétkomponensű akrilragasztó, pontos típusneve Loctite Hysol H4800 Speedbonder. [13]

Több felületkezelést is alkalmazásra került, ami összegzésre kerül a későbbiekben. A lapos profilú próbatesteken egylapos kötést alkalmaztak és ezen ragasztott felületeit kezelték oldószeres zsírtalanítással, atmoszférikus plazmakezeléssel, szemcseszórással és szemcseszórással plusz szilanizálással. Az oldószeres zsírtalanítás metil-etil-ketonos (MEK) kendővel történt. a plazmakezelés során 6mm távolságra volt a kezelendő felülettől a fűvóka és a kezelési sebessége 8m/perces volt, de a plazmakezelés előtt zsírtalanítást (MEK) alkalmaztak. A szemcseszórás 250kPa nyomáson történt 50 μ m-es timföldszemcsékkel, de a szemcseszórás előtt itt is zsírtalanítást alkalmaztak (MEK). A felületkezelés során itt száraz levegős fűvással tisztították a felületet. A szemcseszórás és a szilanizálás kombináció első fázisa a szemcseszórás, ami ugyanúgy történt, mint az előzőleg leírtakban, viszont utána 10

percet állt egy 1 térfogatszázalékos reagens minőségű γ -MPS-víz keverékben (4PH értékű nagy tisztaságú víz), ezt követően egy órán át 100°C-on szárították. [13], [48]

Környezeti hatásnak is kitétték a próbatesteket. Keményedés után az egyrétegű nyíró próbatesteket $31 \pm 2\%$ relatív páratartalomnak tették ki 25°C-on és $95 \pm 2\%$ relatív páratartalomnak 50°C-on 30 napig. Az ék próbatesteket $95 \pm 2\%$ relatív páratartalomnak tették ki 50°C-on legfeljebb három hónapig. [13]

Az egylapos nyíróvizsgálatok eredményeit a tönkremeneteli terhelésben fejezték ki.

Az alacsony és magas páratartalomnak kitett próbatestek nyírószilárdsága az mutatja, hogy a ragasztott kötések nyírószilárdsága nem változik a 31% páratartalom alatt 25°C-on történő expozíció után a kezdeti szilárdsághoz képest. A rossz viselkedést mutató kezelések (zsírtalanítás és atmoszférikus plazmakezelés) 2,5-3 kN közeli szilárdságot adtak. A plazmakezelés a szilárdság kismértékű csökkenéséhez vezet a zsírtalanító kezeléshez képest. Ez a kezdeti szilárdság a szemcseszórás és a γ -MPS kezelések esetében 6 kN közelében van. Amikor a próbatesteket szobahőmérsékletű (25°C) és alacsony páratartalmú (31%) körülményeknek tették ki, nem volt jelentős különbség a kezdeti szilárdság és a 30 napos környezetnek való kitettség után (expozíció). Az egylapos nyírószilárdsági adatok azt mutatják, hogy a magas páratartalomnak (95%) kitett zsírtalanított és plazmával kezelt próbatestek nagymértékű romlást szenvedtek el, a szilárdságvesztesség meghaladta a 60%-ot. A szemcseszórással vagy γ -MPS kezeléssel kezelt próbatestek azonban nem mutatják ezt a viselkedést és a szilárdságban nincs jelentős különbség a kezdeti állapot és a magas páratartalmú környezet között. A szemcseszórás és a γ -MPS kezelés az öregedési időszak után is nagyon jó teljesítményt nyújt. A zsírtalanítás és a plazma előkezelés nyilvánvaló adhéziós vagy határfelületi hibát eredményezett. Ez a meghibásodási mód azt jelzi, hogy ezek a próbatestek nedves környezetben gyorsan degradálódnak és szilárdságuk több mint 50%-kal csökken. Ez az eredmény az ilyen felületkezelésű kötések gyenge tapadását bizonyítja. A szemcseszórt minták elsősorban kohéziós hibát mutatnak a ragasztásban. A meghibásodott kötés egyik oldalán vastag ragasztóréteg volt jelen, a másik oldalon pedig nagyon vékony réteg. A szemcseszórással és szilánnal történő kezeléssel együtt a szemcseszórásos kezeléshez hasonló kohéziós tönkremenetelt mutat. [13]

Az atmoszférikus plazmakezelés által biztosított nedvesedés fokozása nem biztosít jobb nyírószilárdságot (7,9Mpa). Ebben a vizsgálatban alkalmazott plazmakezelés feltételei nem módosítják a felületi érdességet. Ezért a szilárdság csak a kompozit és a ragasztó közötti kémiai adhézió révén érhető el. A mechanikai eredmények és a tönkremeneteli mód azonban azt mutatja, hogy ez nem elegendő. Lehetséges az, hogy a plazmakezelés paraméterei nem

voltak elég intenzívek ahhoz, hogy a felület hatékony tisztításával vagy koptatásával és ezáltal jobb adhéziót eredményezzenek. A nyírószilárdság a szemcseszórásnál 19,7 MPa volt. A szemcseszórással létrehozott érdesebb felület nagyobb rendelkezésre álló felületet biztosít és így nagyobb lehetőséget biztosít a ragasztó és a hordozó közötti kötés kialakítására. A szilanizálás javíthatja a tartósságot azáltal, hogy kitölti a kis repedéseket és pórusokat, megszüntetve a víz esetleges bejutási csatornáit. Hasonló értéket kaptunk a szemcseszórással és γ -MPS-szel együtt (19,9 MPa), azonban ez a kezelés kisebb szórást mutatott az eredményekben. [13]

A szemcseszórás és a γ -MPS felületkezelések nagyobb törési energia növekedést mutatnak a zsírtalanításhoz és a plazmakezeléshez képest. Ebben az esetben a törési energiák 1796 J/m² a szemcseszórás és 1570 J/m² a γ -MPS kezelés esetében. Azonban, ha a szórást figyelembe vesszük, statisztikailag szignifikáns különbségeket nem találunk. A tönkremeneteli felületek a felületkezeléstől függően nagyon eltérőek. Egyrészt a zsírtalanított és a plazmával kezelt próbatesteknél a ragasztóréteg és a kompozit felület között határfelületi hiba keletkezik. Másrészt a szemcseszórással és γ -MPS-sel kezelt minták a kompozit rétegek közötti (a ragasztóanyagokon belüli) tönkremenetelét mutatják. Az adhéziós kötés erősebb, mint maga a GRP. A kötés tartósságának elemzése érdekében ékpróbákat végeztünk minden felületkezelésnél. Az ékvizsgálat érzékenyebb a degradációra, mint az egylapos nyíróvizsgálat, mivel egyesíti a környezet és a próbatestet érő feszültség hatását. Az ékvizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a repedésnövekedés jelentősen nagyobb a zsírtalanítás és a plazmakezelés esetén, ami megerősíti az egylapos nyírási vizsgálat során kapott eredményeket. Ezek az eredmények azt is mutatják, hogy a szemcseszórás és a γ -MPS szilán kezelések jó tartósságot mutatnak a zsírtalanítással és a plazmával végzett kezelésekhez képest. Ezek a kezelések más felületkezeléseknél jobb tartósságot biztosítottak, alacsony repedésnövekedési arány mellett, magas páratartalmú és hőmérsékletű, zord környezetben. [13]

A tanulmányból levonható eredmények:

Az akrilragasztó alkalmazását vizsgálták GRP/GRP kötéseken, amiken különböző felületkezelések hatását vizsgálták a mechanikai viselkedésre és a tartósságra. A szemcseszórás és a γ -MPS kezelések fokozzák a tapadást és javítják az illesztések tartósságát. Az ékvizsgálat és az egyrétegű nyírási eredmények azt mutatják, hogy a keményített akrilragasztók nedves környezetben jó tartósságot mutatnak az ilyen típusú aljzatokon, még egyszerű felület-előkészítés, mint a szemcseszórás esetén is. Az edzett akrilragasztók megfelelő felületkezeléssel jó mechanikai szilárdságot, törési energiát és

tartósságot biztosítanak a GRP ragasztott kötésekben és ezért jó alternatívát jelenthetnek más ragasztórendszerek helyett (pl. epoxi) a GRP kompozitok igényes környezetben történő összekapcsolására. Nincs megfelelő eredmény arra, hogy a γ -MPS kezelés javítaná a szemcseszórt GRP kompozitok viselkedését. Bár a plazmakezelés jelentősen növeli a felületi energiát, a szilárdság növekedése nem volt tapasztalható a csak zsírtalanító kezeléshez képest. [13]

1.6.3. Környezeti öregedés hatása a pultrúzióval készült profilok ragasztott kötéseire

Ebben a fejezetben homlokragasztott kötések (tömör henger) és felületragasztott egylapos kötések (lapos profil) vizsgálatát ismertetem. Jelen fejezet célja a mechanikai jellemzők összehasonlítása. a különböző típusú ragasztóanyagokkal ragasztott pultrudált GFRP-kötések viselkedésének összehasonlítása. Hat típusú ragasztó típust alkalmaztak, két epoxi, két poliuretán és egy metilakrilát és egy akril ragasztót. [11], [39], [47]

Egy tanulmányban olvasottak alapján, amelyben a különböző ragasztótípusok hatását elemezték a szerkezeti szilárdságra GFRP-kötések viselkedésénél. Az epoxi és poliuretán ragasztók lineáris viselkedést mutattak egészen a rideg tönkremenetelig. Az akril ehelyett rugalmasabbnak bizonyultak, magasabb képlékenységet elérve deformációkat és kedvező teherátadást biztosítanak. [39], [46]

Ez a tanulmány hat különböző ragasztó viselkedését hasonlítja össze a GFRP pultrudált anyagok szerkezeti és nem szerkezeti összekötéséhez: két epoxi ragasztó, egy akril ragasztó, egy metakrilát ragasztó és két poliuretánragasztó segítségével. A mechanikai vizsgálatokat (nyírási és szakítóvizsgálat) három különböző környezeti körülmények között végezték el: öregítés nélkül, magas és alacsony hőmérsékletnek vagy nedvességnek való kombinált kitettséget követően, valamint UV-sugárzás hatására. [39], [47]

Az eredmények alapján a következő konzekvenciákat vonták le:

- Minden környezeti feltétel mellett az összes vizsgált ragasztó közel hasonló terhelés-illesztési nyúlási reakciót mutatott az egyszerű és a tompa kötések esetében. Ezen túlmenően az epoxi-, akril- és metakrilát ragasztók minden expozíció esetén rugalmas, nem lineáris tendenciát mutattak, egészen a rideg szakadásig. Az első epoxi ragasztó mutatta a legnagyobb átlagos nyíró- és szakítószilárdságot. A metakrilát ragasztó nem volt megfelelő ragasztó a GFRP tapadóanyagokhoz, alacsony teherbíró képességgel és rideg viselkedéssel. Mindkét poliuretán ragasztó a többi ragasztóhoz képest gyenge teherbírást és nagyon magas kötésnyúlást mutatott, alacsony görbehajlással és lágyulási jelenségekkel a határfeszültség után. [39], [47]

- A két mesterséges öregítés hasonló hatással volt a próbatestek viselkedésére: az ízületek nyúlása nagymértékben megnőtt, az átlagos tönkremeneteli terhek enyhén megnőttek (kivéve az első epoxiragasztót egyrétegű konfigurációban és a metakrilátragasztót) és jelentősen csökkent az ízület merevsége (70-90%). Mindkét környezeti hatás esetében a teherbíró képesség növekedése a ragasztók további polimerizációjának tulajdonítható magas (40 °C) vagy enyhén magas (26 °C) hőmérsékleten. Az illesztési merevség csökkenése mindkét környezeti öregedésnél közel azonos százalékos arányban következett be, különböző jelenségek esetén. A különböző hőmérsékletű és relatív páratartalmú ciklusoknak való kitettség során valamennyi ragasztó elérte az üvegesedési hőmérsékletet. Az UV-expozíció során az összes ragasztó kémiai kötése az UV hullámhosszok által okozott disszociáción ment keresztül. Egyedül a metakrilát ragasztóra volt hatással a színváltozás az UV-expozíció hatására. [39]
- A két mesterséges öregítés érezhetően befolyásolta az összeköttetések tönkremeneteli módjait. Az éghajlati kamrában végzett ciklusok ugyanis a tönkremeneteli módot vegyesről (majdnem minden nem öregített próbatest esetében) főként adhéziósra változtatták, kivéve a második poliuretán (MS) ragasztót (ahol a kohéziós szakadás megmaradt). Úgy tűnt, hogy az UV-sugárzás rontja az adhéziót, különösen a két epoxiragasztó és az első poliuretán (PU) ragasztó esetében. [39]

Összefoglalva, ha szerkezeti teljesítményre van szükség, az epoxi ragasztók a legjobb alkalmazásnak bizonyultak a GFRP vinilészter pultrudált profilok számára a teherbírás szempontjából. Figyelembe kell azonban venni a nagymértékű deformációkat, amelyek különösen UV-hatás alatt jelentkezhetnek. A nem szerkezeti alkalmazásoknál a második poliuretán ragasztó jobb volt, mint az első, hasonló végterhelést, de kisebb deformációkat és nagyon jó kompatibilitást mutatott a tapadóanyagokkal. [9], [15], [57], [47]

2. Kísérletterv

A kísérlettervemem úgy állítottam össze, hogy a témában készült publikációk által kapott pozitív eredményeket használtam fel. Nem utolsó sorban lényeges szempont volt nálam, hogy amennyire lehet, egyszerű és költséghatékony felületkezelési módszereket alkalmazzak. Ez azért fontos, hogy ha az általam készült felületkezelések eredményesnek bizonyulnak, akkor az iparban lévő felhasználása ne igényeljen külön szakképesítést és labor körülményeket.

2.1. Kísérletet befolyásoló faktorok

Jelen álláspont szerint nem csak az üvegszálerősítésű kompozit anyagoknál, hanem a legtöbb ragasztásra váró anyagoknál a sikeresnek mondható ragasztott kötést elsősorban a felületkezelés minősége a legfontosabb és majd csak ezután a ragasztástechnológia és a megfelelő ragasztótípus választása határozza meg. A felületkezelés hatékonysága függ a kezelendő felület típusától (például fém vagy műanyag), a felületkezelés típusától és mértékétől. A GRP profilok gyártása közben fontos, hogy ne ragadjon bele a profil a szerszámba, így a kész profil felülete könnyen elválik a szerszámtól (a külső felület egy üvegfátyol), de ragasztás szempontjából ez meglehetősen előnytelen. A ragasztó a kezelés nélküli felületre emiatt csak nagyon minimálisan ragad, így a felületkezelés nélküli pultrudált profil ragasztása teljes mértékben értelmetlenné válik. Az ilyen típusú szakítási vizsgálatoknál a ragasztó elválik a pultrudált profil felületéről.

Több felületkezelési eljárást is alkalmaztak már pultrudált profilokon. A plazmakezelés nem túl eredményes értékeket hozott, hasonló eredményeket adott a kezelés nélküli felületek szakítási értéke. A homokszórás és a kézi csiszolás hatékonyabbnak bizonyult, ezekkel a felületkezelési módszerekkel nagyobb szakítószilárdságot lehet elérni. A kísérletemben a homokszórást és a kézi csiszolást alkalmaztam. A munkámban felhasznált felületkezeléseket a későbbiekben részletesen fogom kifejteni.

A felületérdesítés előtt és után is elengedhetetlen művelet a por- és zsírtalanítás. A mindennapokban is jól bevált felülettisztítószeret vizsgáltam meg különböző felületi érdességeken, amit a nedvességmérés pontban részletesen kifejték. Három felülettisztítószeret használtam, acetont, metanolt és egy Super Cleaner (Loctite) nevű tisztító sprayt. Választásukat az indokolja, hogy a felületek tisztítására milyen típusú tisztítószeret írnak elő a ragasztó gyártók.

Ha a felületérdesítés és a zsírtalanítás kész van, akkor következhet a ragasztás. Két típusú kétkomponensű szerkezeti ragasztót választottam ki, amik nagy szakítószilárdsággal

rendelkeznek. A szerkezeti ragasztóknál 10-20N erőt is ki lehet fejteni egy négyzet mm-re, ami egy meglehetősen nagy érték. A harmadik választás nem egy ragasztótípusra esett, hanem egy kétkomponensű gyantára, amit üvegszálak termékek mátrix anyagaként alkalmaznak. A gyantával való ragasztásnak az a célja, hogy szemléltetni tudjam az, hogy a ragasztás minősége lényegesen változik a felületi érdesség változásakor. Nagyon magas minőségű ragasztókkal is lehet alacsony szakítószilárdságot elérni, ha rossz a felületkezelés módja és egy nem ilyen közegre gyártott gyantával is lehet nagy szakítószilárdságot elérni megfelelő felületkezelési módszerrel.

Felületérdesítés nélküli felület

Amiatt, hogy egyszerűen látható legyen az érdesítések hatékonysága, ezért szükség van egy viszonyítási alapra. Így olyan mérést is készítettünk, ahol nincsen felületérdesítés, csupán csak zsírtalanítás. A zsírtalanítást acetonnal áztatott rongy segítségével végezzük el.

Felületkezelés homokszórással

A homokszórás más kutatásokban is hatékonynak bizonyult. Jelen kutatásban ezért is szükséges ezt a felületérdesítést alkalmazni.

A homokszórást egy Sandblast Cabinet SBC990 típusú gépen végeztem el. Ez a gép egy kézi pisztolyos homokszóró, ami 8,6bar nyomással fújja a homokot. A homokfúváshoz használt homok típusa 0,5-0,7mm-es kvarchomok volt. A pisztoly és a kezelendő felület távolsága nagyjából 20-30mm volt. A homokszórás ideje körülbelül 2-3 percet vett igénybe felületenként (25x50mm). Így a felületek érdessége egységesnek mondható. A homokszórás után az érdesített felületeket két lépésben portalanítottam. Elsőnek sűrített levegővel fújtam le a próbatesteken maradt por nagyobb részét. A második lépés a végső por és zsír eltávolítása volt, amit egy acetonnal áztatott rongy segítségével végeztem el. Ezek után a felületek készen is álltak a ragasztásra.

Felületkezelés kézi csiszolással

Stazi, F., Giampaoli, M., Rossi, M., & Munafò, P. kutatásukban [47] a kézi csiszolás és a homokszórás jobb eredményeket értek el a kezelés nélküli felülethez képest. Ezért a GRP felületét hagyományos kézi csiszolással, P80-as csiszolópapírral érdesítettem. A csiszolások két irányban kerültek elvégzésre, először a felületeket szálirányra merőlegesen csiszoltam fel, másodszor pedig szálirányra párhuzamosan. A felületek portalanítását sűrített levegővel portalanítottam, majd a maradék port és az esetlegesen rajta lévő zsírokat acetonnal áztatott ronggyal távolítottam el, hasonlóan, mint a homokszórt felületeknél. Így a csiszolt felület ragasztható állapotba került.

2.2. Felhasznált ragasztó/gyanta típusok

A ragasztók kiválasztása során két szerkezeti ragasztót és egy üvegszálak kompozitok gyártására használt gyantát alkalmaztam. Úgy gondolom, hogy érdemes lehet olyan ragasztott kötést kipróbálni üvegszálak kompozitoknál, ahol a ragasztó egy olyan anyag, ami a kompozit mátrix anyagaként is helytáll. A ragasztók és a gyanta is kétkomponensű epoxi alapú készítmény. A szerkezeti ragasztók nagy viszkozitással és nagy szilárdsággal rendelkeznek. Emiatt ezeket a ragasztókat szét kell teríteni a felületen, míg a gyanta kisebb viszkozitással rendelkezik, ezért a gyanta nagy valószínűséggel jobban nedvesíteni fogja a felületet.

Loctite HY 4090 ragasztó

Ez a típus egy kétkomponensű fehér vagy világos sárga színű szerkezeti ragasztó nagy viszkozitással és csepegésmentes formában. Jól ellenáll a magas páratartalomnak, a rezgéseknek, ütközéseknek és ütéseknek. A pillanatragasztók és az epoxik tulajdonságait kombinálja a jobb eredmények elérése miatt. Rögzítési ideje 90-180 másodperc, maximum 2mm-es hézagoknál alkalmazható. Hőálló 150°C hőmérsékletig és jól bírja az UV sugárzást is, ezért megfelelő kültéri felhasználásokhoz is. Nyírószilárdsága acélnál 17,0 N/mm². Keverési aránya 1:1, a keverést egy speciális keverőszárral és egy adagoló pisztollyal lehet kivitelezni nagyon egyszerűen. [32]

Sikapower 4720 ragasztó

A Sikapower 4720 egy kétkomponensű, epoxi bázisú, nagy viszkozitású és nagy szilárdságú szerkezeti elem ragasztó. Felhasználásukat leginkább fémek és kompozit elemek ragasztására tervezték. Bár a tapadása a fém és kompozit elemeken a legoptimálisabb, a legtöbb alapfelületen alapozó nélkül is jól tapad. Lényeges tapadási minősége miatt az általa létrehozott kötés nagy szilárdsággal bír. Minden ragasztónak megvan a gyártó által előírt minimum és maximum ragasztóhézagja, ebben a ragasztóban viszont 0,25mm-es távtartó üveggyöngyöket helyeztek el, ezáltal a megfelelő hézag elérése sokkal egyszerűbb. Térhálósítás szobahőmérsékleten történik. A térhálósítás hőmérséklet hatására hamarabb befejeződik, ahogyan azt a 16. ábrán láthatjuk. Rögzítési ideje 4,5 óra. Hőállósága 190°C-ig tart. Húzó-nyíró szilárdsága körülbelül 14Mpa. Keverési aránya 2:1, a keverést egy keverőszár segíti és kartuspisztollyal adagolható a ragasztani kívánt felületre. A táblázatban a ragasztónak a különböző hőmérsékleten történő száradási időintervallumjai láthatóak. [44]

Idő (óra)	Húzó-nyíró szilárdság [MPa]			
	kb.			
	10 °C	23 °C	30 °C	60 °C
1	-	-	-	13
2	-	0,1	2,7	Végső szilárdság 14 Mpa
4	-	0,1	12	
4,5	-	1,2		
6	-	3		
8	0,1	6		
24	6	12		
48	12			

16. Ábra: Sikapower-4720 húzó-nyíró szilárdsága [44]

Ipox MR 3010 + MH 3124 epoxi gyanta rendszer

Az MR3010 egy kétkomponensű, közepes viszkozitással rendelkező öntő-, lamináló gyanta. Az adott gyantatípus megfelelő alkalmazásához epoxi edzőt kell alkalmazni. Az MH3124-es edző lehetővé teszi a megfelelő kötést a kikevert gyanta elegyének. A megfelelő kikeveréshez 100:33-as arányt kell létrehozni. Így ebben az összekevert állapotban 40 perc a fazékideje. A közepes viszkozitása miatt jó nedvesítő tulajdonságokkal bír. Mechanikailag és hőállóság szempontjából jó tulajdonságokkal rendelkezik, főleg, ha hőkezelést is végeznek a kész munkadarabon. Kikeményedésre képes +15°C-tól. Leggyakoribb felhasználási közege a szénszál és üvegszál erősítésű kompozitok gyártása, modellek készítése. Negatívoknál és szerszámoknál alkalmas a háttérkitöltésre is. Felhasználáskor a jó minőségű termék elkészítéséhez fontos a megfelelő keverési arány, az egyenletes hőmérséklet és az alacsony páratartalom.

2.3. Próbatetek kiválasztása

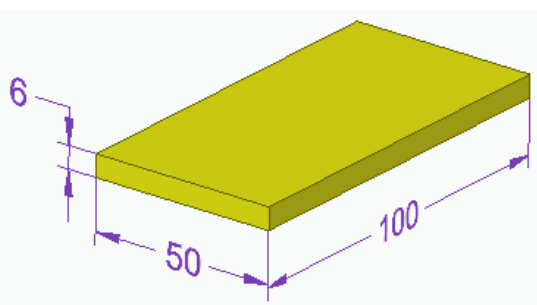
A próbatetek kiválasztása az előzetesen megismert eddigi kutatások alapján történt. Teljes mértékben nem követtem mások próbatestjeinek paramétereit. A legtöbb kutatásban pultrudált lemezekből vágunk ki próbatesteket adott szélességben és hosszúságban. Mivel a vágás a kivágott profil oldalszéleinél a szálak elvágásával gyengíthetik a profilt, így ezt elkerülve kész lapos profilokat alkalmaztam a szakításhoz. Ezáltal az én kísérletemben lévő próbatesteket csak adott hosszúságban kellett méretre vágni, a szélességek maradtak a gyártó által legyártott méretben.

Az epoxi alapú ragasztók tulajdonságai és az üvegszálerősítésű kompozitok ragasztásánál elért eredmények miatt kutatásomban epoxi két fajta ragasztót és egy epoxi gyantát alkalmaztam. Úgy gondolom, hogy a pultrudált profilok ragasztástechnológiáját nem csak az epoxi alapú ragasztókkal lehet sikeresen megoldani, de jelen helyzetben a

pultrudált anyagok ragaszthatóságának megismerése a cél, ezért az első szempont a felületkezelés. Mivel az üvegszálerősítésű kompozitok mátrix anyaga nagy gyakorisággal epoxi alapú gyanta, így fontosnak tartottam vizsgálat alá helyezni, hogy mire képes egy ilyen közegre gyártott gyanta szakítás során. A következő bekezdésben a lapos profilok előkészületét vezetem le.

Lapos profilok

A ragasztott felületek szakítóvizsgálatához leggyakrabban lapos profilokat alkalmaznak. A felhasznált szálanyagom a gyártó által készített 6mm vastag és 50mm széles méretben került szakításra. A szálanyagokat egy Bernardo EBS 128 C típusú szalagfűrészszel vágtam 100mm hosszúságú méretre.



17.Ábra: A felhasznált profil méretbeli paramétereit és a darabolás egy pillanatképe

A próbatest és a ragasztott felület hosszának az aránya 4:1-hez. A befogási hossz alapján is ezt az arányt alkalmaztam, így elegendő távolságra van a ragasztott felület a befogási ponttól. A lapos profilok 6mm vastagságúak, 50mm szélességűek és 100mm hosszúak. A ragasztási és a befogási hossz 25-25mm. A ragasztott felület 1250mm² nagyságú. A lapos profilhoz szükséges kísérlettervet az alábbi táblázatban mutatom be.

1. Táblázat: Lapos profilok jelölése

Felületkezelések típusa	Ragasztótípusok		
	Loctite HY4090	Sikapower 4720	Ipox gyanta
Sima	Lo_S_(1-3)	S_S_(1-3)	Gy_S_(1-3)
Homokszórt	Lo_H_(1-3)	S_H_(1-3)	Gy_H_(1-3)
Csiszolt	Lo-Cs_(1-3)	S-Cs_(1-3)	Gy-Cs_(1-3)

Minden próbatest típusból három szakítás került elvégzésre. A próbatestek jelölései az alábbi táblázatban láthatók, ahol a zárójelben lévő adott típusú próbatesteken belüli szakítási számok vannak feltüntetve.

2.4. Alkalmazott ragasztástechnológia

A ragasztástechnológia legfontosabb része a felület megfelelő előkészítése, a ragasztó megfelelő mennyiségű egyenletes felhordása és az, hogy a kikeményedés alatt kerülni kell a ragasztott felületet érő terheléseket, például húzást. A ragasztott felületet érő nyomóterhelés (például a megfelelő ragasztóvastagság eléréséhez) nem számít a kerülendő terhelések közé. Egy megfelelő ragasztás a felületek előkészítésétől a kész ragasztott termékig így épül fel:

A felületek érdesítését elvégezzük az adott próbatesteken. Itt jelen helyzetben elsőnek zsírtalanítottam a felületet acetona áztatott ronggyal, majd homokszórással vagy kézi csiszolással érdesítettem az adott próbatesteket. Érdesítés után sűrített levegővel portalanítottam a felületet. Mivel a sűrített levegős portalanítás csak a por nagyját távolítja el, így ragasztás előtt egy újabb zsírtalanítást kellett alkalmazni acetona áztatott ronggyal.

A legtöbb kétkomponensű szerkezeti ragasztók az egyszerű felhasználás érdekében úgy készítették a gyártók, hogy nyomópisztoly és keverőszár segítségével egyszerűen lehessen adagolni a ragasztót a ragasztani kívánt felületre. A gyantánál a kikeverést 0,1 gramm pontosságú mérlegen kellett elvégezni, majd kikeverés után ecsettel és egy 25ml-es fecskendővel vittem fel a felületre.

A szerkezeti ragasztók a nagy viszkozitásuk miatt rosszul terülnek el a felületen, ezért ezeket a típusú ragasztókat egy műanyag kenőlappal kell szétteríteni a felületen (a Sikapower 4720-nál gyártói követelmény a használati utasításban). A ragasztóanyagok elterítése után össze kell illeszteni a ragasztott felületeket. A gyanta közepes viszkozitással rendelkezik, így az elterülésnél nem volt szükséges a beavatkozás. A HY4090-es ragasztónál törekedni kell az 1mm-es ragasztóvastagságra, míg a Sikapowernél a benne lévő távtartó üveggyöngyök miatt elég a felületeket illesztés után megfelelő erővel összenyomni és a ragasztóvastagság automatikusan 0,25mm lesz. Mivel a gyanta nem ilyen felhasználásra van tervezve, így nincs hozzá adat, hogy milyen vastagságban érdemes ragasztani, így 0,5-1mm közötti ragasztóvastagságot alkalmaztam.

Bár nem írja elő minden gyártó a mindkét felületre való ragasztó felvitelt a használati utasításokban, viszont ezáltal mindkét felületet megfelelően lehet nedvesíteni. Pont emiatt ragasztás szempontjából sokkal hatékonyabb kötést tudunk létrehozni, ezért alkalmaztam ezt a felviteli módot minden próbatestnél.

A ragasztó megszilárdulása során nem lehet mozgatni a ragasztott próbatesteket. A HY4090-es ragasztón kívül a Sikapowernek és a gyantának 24 óra száradás volt szükséges 23°C-os szobahőmérsékleten.

3. A ragasztott kötéseket befolyásoló határréteg jelenségek

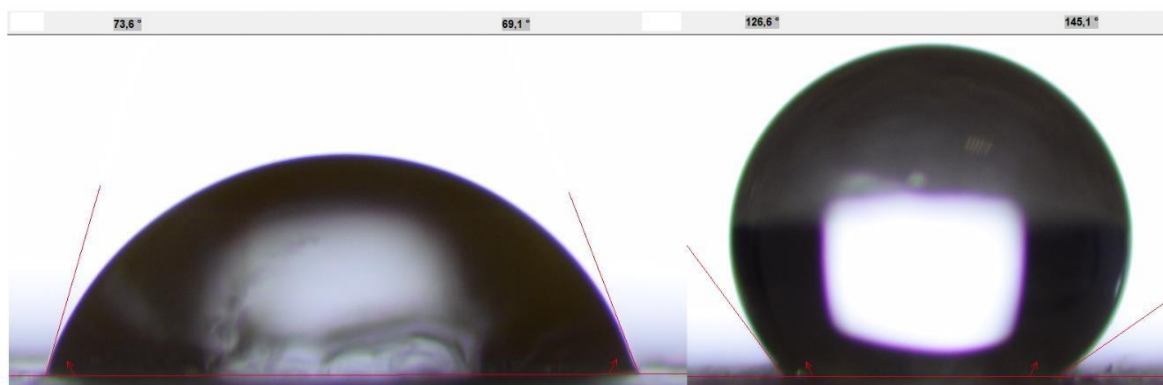
A pultrudált profilok ragasztástechnológiája még egy kiforratlan technológia, ami megoldás lehet erre a problémára, az a megfelelő felületkezelés. A ragasztott kötés alapja a ragasztott felület minősége. A felületek érdességét különféle módszerekkel érdesítettem (kézi kétirányú csiszolással és homokszórással). A felületek érdességének a nagyságát célszerű egy olyan vizsgálattal elvégezni, ahol visszajelzést kapunk a kezdeti felület és az érdesített felület közötti különbségekről. Így emiatt végeztem a felületeken érdességvizsgálatot, ahol a létrejött érdesség nagyságát hasonlítottam össze a kezelés nélküli felület érdességével.

A ragasztásnál fontos szempont a felület nedvesítőképessége, ezért nedvességmérést is készítettem a felületeken. A mérés során különféle zsírtalanítószeret alkalmazok, mivel a felületek nedvességét befolyásolja a tisztítás módja is. Az elvégzett vizsgálatokat és a megkapott eredményeket a következő pontokban részletezem.

3.1. Felületi energia meghatározása

Nedvességmérés

A vízcseppek érintkezési szögét egy videokamerához csatlakoztatott Somet típusú állvány segítségével készült a mérés. A cseppeket egy Accumax Pro pipetta segítségével helyeztem a felületekre. A kontaktszögek közvetlenül minden egyes felületkezelés után mérve lettek. Szondafolyadékként desztillált vizet alkalmaztam. Méréseim száma a felülettípus és a tisztítószer számának (itt egy kezelés nélkülivel is számolni kell) szorzata, tehát 12 mérést készítettem. Mérésenként 3 cseppet használtam 25 mm × 50 mm-es felületeken a kontaktusszög meghatározásához. A bal és a jobb oldali érintkezési szöget pedig képelemzéssel számítottam ki. Három féle felülettípust mértünk, a kezelés nélkülit, a homokszórt és a kézzel csiszolt felületet. Zsírtalanítás szempontjából négy tisztítási típust alkalmaztam. Elsősorban egy zsírtalanítás nélküli felületet vizsgáltam meg, hogy legyen mihez viszonyítani a különböző zsírtalanító folyadékokat. Három féle zsírtalanítószer alkalmaztam: acetont, metanolt és a Loctite Super Cleaner tisztítóspray-t.



18. Ábra: A legjobban (bal) és a legkevésbé (jobb) elterült csepp a mérés során

A mérések által kapott két szélsőérték képei láthatók, ahol a legjobban elterült csepp a sima felületen történt zsírtalanítás nélkül, a másik képen pedig a legkevésbé elterült csepp látható csiszolt felületen zsírtalanítás nélkül. A következő táblázat jelöli az átlagolt mérések értékeit.

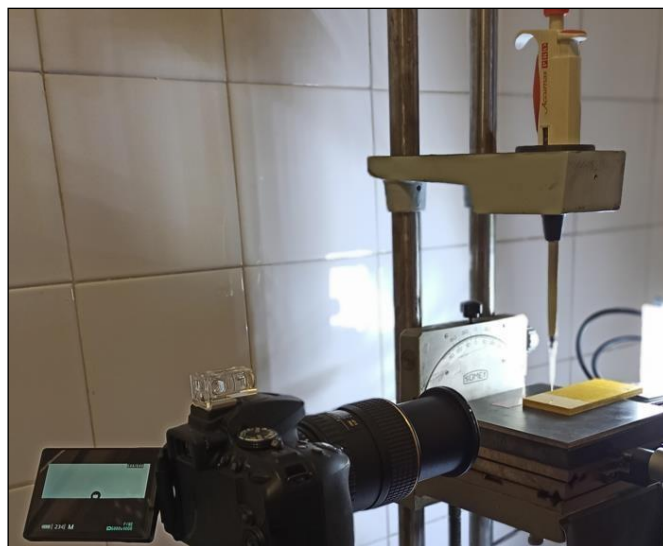
2. Táblázat: Nedvességmérés eredményeinek az átlaga

Kezelés nélküli			
	Bal	Jobb	Átlag
Zsírtalanítás nélküli	84,8	82,8	83,8
Aceton	109,6	114,6	112,1
Metanol	103,8	107,6	105,7
Loctite Supercleaner	93,2	95,5	94,3
Kézzel csiszolt			
	Bal	Jobb	Átlag
Zsírtalanítás nélküli	130,2	136,7	133,5
Aceton	103,4	103,1	103,2
Metanol	94,9	93,4	94,2
Loctite Supercleaner	125,2	128,3	126,8
Homokszórt			
	Bal	Jobb	Átlag
Zsírtalanítás nélküli	117,1	120,6	118,8
Aceton	100,8	104,3	102,6
Metanol	94,7	93,8	94,3
Loctite Supercleaner	113,1	113,3	113,2

Mint ahogy a táblázatban is látható, az eredmények között nagy eltérések vannak. A legjobban nedvesíthető felület a felületkezelés és zsírtalanítás nélküli felület eredménye adta. Megfigyelhető, hogy a kezeletlen felület a Loctite Super Cleaner tisztítóspray

alkalmazásával a többi tisztítófelülethez képest jobb eredményt mutatott, de még így sem jobbat attól a felülettől, amelyiket zsírtalanítás nélkül vizsgáltam. A kézzel csiszolt és a homokszórt felületeknél egyértelműen a metanollal való zsírtalanítás vált hatékonyrá, mivel a kézzel csiszolt felületnél az átlag szög $94,18^\circ$, a homokszórtnál pedig $94,25^\circ$ eredményt mutatott. Az érdesített felületeknél megfigyelhető, hogy az acetone nagyjából $8-9^\circ$ szögeltéréssel mutatott nagyobb értékeket a metanolhoz képest.

A mért eredmények alapján a kezelés nélküli felületnél a zsírtalanítás nélküli felületet tudta csak a csepp részlegesen nedvesíteni, aminek az értéke 90° alatti volt, viszont minden más érték azt mutatja, hogy a felületek nedvessége meglehetősen előnytelen ($90-180^\circ$ közötti eredmények). A felhasznált ragasztók elterülése viszkozitástól függő, ezért célszerű lesz beavatkozni. Vannak ragasztó gyártók, akik előírják a használati utasításban a ragasztó elterítését/elkenését, például műanyag kenőlappal.



19. Ábra: Nedvességmérés csiszolt felületen Loctite Supercleaner tisztítással

Érdességvizsgálat

Három típusú felületi érdesítést alkalmaztam a mérendő próbatesteken, egy érdesítés nélküli, egy homokszórt és egy kézzel csiszoltat. Ahhoz, hogy a felületi érdesség létrejöttét alá tudjam támasztani, emiatt az érdesített felületeken érdességvizsgálatot végeztem el. Az általam mért érdesség csupán a felületeim közötti különbségek meghatározására szolgál.

A felületeket egy Mitutoyo Formtracer SV-C3100-as gépen vizsgáltam meg. Az általános érdességnél (Ra) a kezelés nélküli felülethez képest kétszer akkora a csiszolt és homokszórt felület. A következő táblázat az átlagolt értékek eredményét mutatja be.

3. Táblázat: Az érdességvizsgálaton kapott eredmények kiértékelése

	Sima	Csiszolt	Homokszórt
Ra [μm]	1,77	3,72	3,73
Rz [μm]	8,38	21,51	22,20
Rt [μm]	11,22	31,73	33,63

A felületen létrejövő egyenetlenségek magassága (Rz) is számottevően megnőtt a felületkezelések által, hiszen a kezelés nélküli felülethez képest valamivel több mint 2,5-szeresére növekedett ez az érték. A legnagyobb érdesség mélységek (Rt) átlagánál a sima felület értékének közel háromszorosa a csiszolt és a homokszórt felület értéke.

Mivel az átlagolt eredmények összehasonlítása azt mutatja, hogy a sima felület érdességénél jóval nagyobb érdességi értékeket mutattak a csiszolt és homokszórt felületek, ezáltal kijelenthető, hogy a felületkezelések sikeresnek bizonyultak.

4. Mérések és vizsgálati eredmények

Kutatásomban egy alacsony felületi energiával rendelkező pultrudált profil típusnak a felületi energiáját növeltem meg. Ehhez felületkezeléseket alkalmaztam, csiszolást és homokszórást. A mérések során különböző felületi érdességeket hasonlítottam össze úgy, hogy a felületeket összeragasztottam, majd nyírófeszültségre szakítóvizsgálatot végeztem. A legjobban sikerült méréseket megismételtem két és háromszoros méretű próbatesteknél, ezzel megvizsgálva azt, hogy lineárisan növekvő értékeket kapunk e.

4.1. Lapos profilok szakítóvizsgálata: eredmények

Ennél a mérésnél minden próbatestnél a ragasztott felület 1250mm^2 . A felületek különböző felületkezelést kaptak, aminek a célja a ragasztott kötés erősebbé tétele. Jelen kutatásban elsősorban érdesítés nélkül összeragasztott GRP próbatesteket szakítottam. Ezt követően a homokszórt és a kézzel csiszolt felületek kerültek a szakítógépbe. A felületek érdesítésével úgy gondolom, hogy növelni lehet a GRP profiloknál is a ragasztott felület minőségét, de az eredményeknél ez hamarosan kiderül. A méréseket egy Instron 5900R 4482-es szakítógépen végeztem el. Minden mérési típust három alkalommal szakítottam, így az eredmények átlagolásával pontosabb konzekvenciát tudtam levonni. A ragasztók teljesítménye nyírószilárdság szempontjából a Loctite-nál (acél próbatesten) 17N/mm^2 , a Sikapowernél 14N/mm^2 , a gyantánál viszont nincs gyári érték a nyírószilárdságra.

A sima felületen kapott eredmények azt mutatják, hogy a ragasztók képességének csak a töredékét tudják felmutatni. A gyári adatokhoz képest a Loctite csak 13%-os, míg a Sikapower 28%-os nyírószilárdságra képes az adott felületen. A gyantával ragasztott felületnél is alacsony értékeket kaptam. A táblázatban a sima felületeknél kapott eredmények értékei és a meghibásodások típusai láthatóak.

4. Táblázat: Sima felületen kapott eredmények

Próbatest jelölés	Maximális terhelés átlaga [N]	Nyírószilárdság [N/mm ²]	Nyírószilárdság/gyári érték aránya	Meghibásodási típusok
Gyanta-Sima	2907,9	2,33	-	Adhéziós
Loctite-Sima	2841,9	2,27	13%	Adhéziós
Sikapower-Sima	4896,7	3,92	28%	Adhéziós

Ezeknek a próbatesteknek a maximális terhelése 5000N alatt maradt. A Loctite-nál három szakításból kettőnél közel azonos értéket kaptam (3113,1N és 3118,3N), míg a harmadik értéknél nagyjából 800N-nal lett kevesebb. A Sikapower által kapott eredmények

nagyobb szórással rendelkeztek, mivel a legalacsonyabb eredmény 3097,3N, a legnagyobb pedig 4958,9N. A gyanta a legkisebb szórást eredményezte, így ennél 2570,3N és 3221,5N közötti értékeket kaptam. A meghibásodások típusai egységesen adhéziós hibák voltak, mivel a ragasztó minden próbatestnél felvált a ragasztott felületről.

A homokszórt felületek az előzőnél jobb eredményeket hoztak, mivel sima felülethez képest mind a három ragasztás legalább háromszoros értéket adott a szakítások során. A Loctite ragasztóval és a gyantával készült kötések hasonló értékeket mutattak. A Sikapowerrel készült kötés önmagához képest is jó kötést alkotott, hiszen nem csak több mint a háromszorosát mutatta a sima felületi ragasztáshoz képest, hanem a gyártó által megadott maximális nyírószilárdsági értéket is 93%-ban teljesítette. A táblázatban a homokszórt felületeknél kapott eredmények értékei és a meghibásodások típusai láthatóak.

5. Táblázat: Homokszórt felületeken kapott eredmények

Próbatest jelölés	Maximális terhelés átlaga [N]	Nyírószilárdság [N/mm ²]	Nyírószilárdság/gyári érték aránya	Meghibásodási típusok
Gyanta-Homoksz.	8851,4	7,08	-	Adhéziós+min. kohéziós
Loctite-Homoksz.	8987,2	7,19	42%	Adhéziós
Sikapower-Homoksz.	16339,0	13,07	93%	Adhéziós+kohéziós

A Sikapowerrel ragasztott próbatesteknél szemmel láthatóan jobb volt a ragasztott kötés, mivel a ragasztott kötés mellett a pultrudált profilban jött létre a szakadás, amit az alábbi kép szemléltet.



20. Ábra: Kohéziós és adhéziós hibajelenségek a homokszórt profilon Sikapower ragasztóval.

Az adhéziós és kohéziós meghibásodások aránya nagyjából 60-40% volt. Gyantás ragasztásnál minimálisan, de megjelent a kohéziós hibajelenség. A sima felületekhez képest a homokszórt felületek összességében több mint háromszoros nyírófeszültségi értékeket adtak, ami arányosan mind a három ragasztóval készült kötésre igaz. A Sikapower a gyári nyírófeszültséget szinte teljesítette, hiszen ennek a 93%-át mértem a próbatesteken átlagosan.

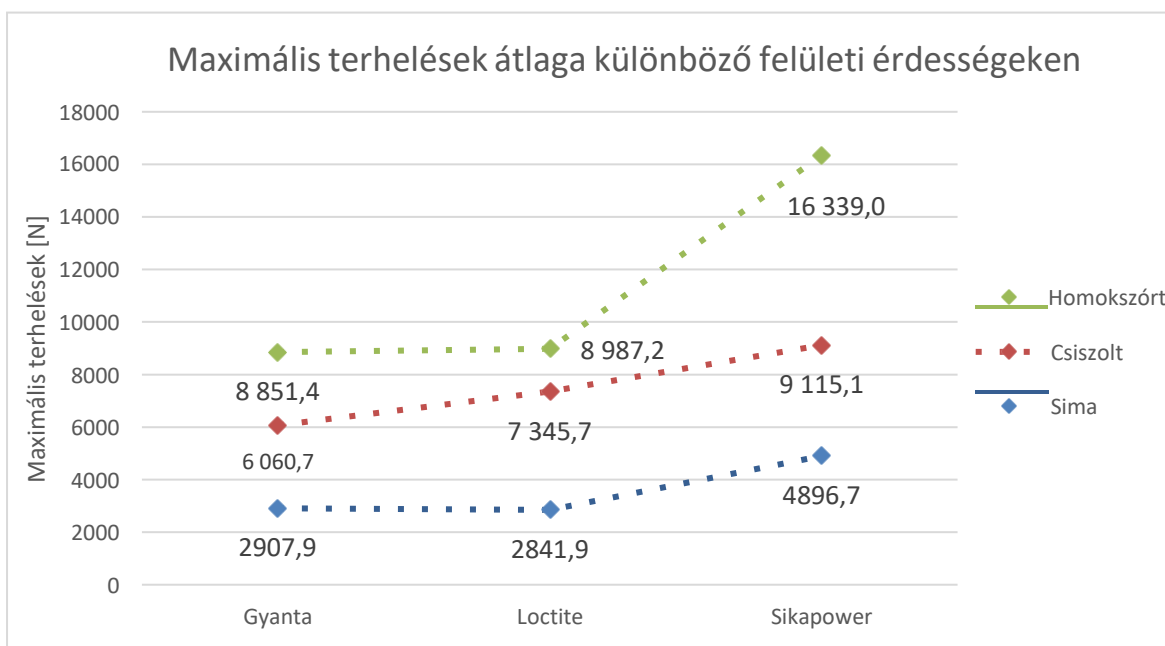
A csiszolt felületeknél kapott értékek egységesen mind kevesebb értékeket mutattak a homokszórt felületekhez képest, de a sima felületekhez viszonyítva dupla akkora terhelési ellenállást mutattak. A táblázatban leírt eredmények bizonyítják is ezt. A sima felülethez képest dupla akkora terhelést bírtak el a próbatestek, de még így sem jelentkezett kohéziós hiba a ragasztott terület körül.

6. Táblázat: Csiszolt felületeken kapott eredmények

Próbatest jelölés	Maximális terhelés átlaga [N]	Nyírószilárdság [N/mm ²]	Nyírószilárdság/gyári érték aránya	Meghibásodási típusok
Gyanta-Csiszolt	6060,7	4,85	-	Adhéziós
Loctite-Csiszolt	7345,7	5,88	35%	Adhéziós
Sikapower- Csiszolt	9115,1	7,29	52%	Adhéziós

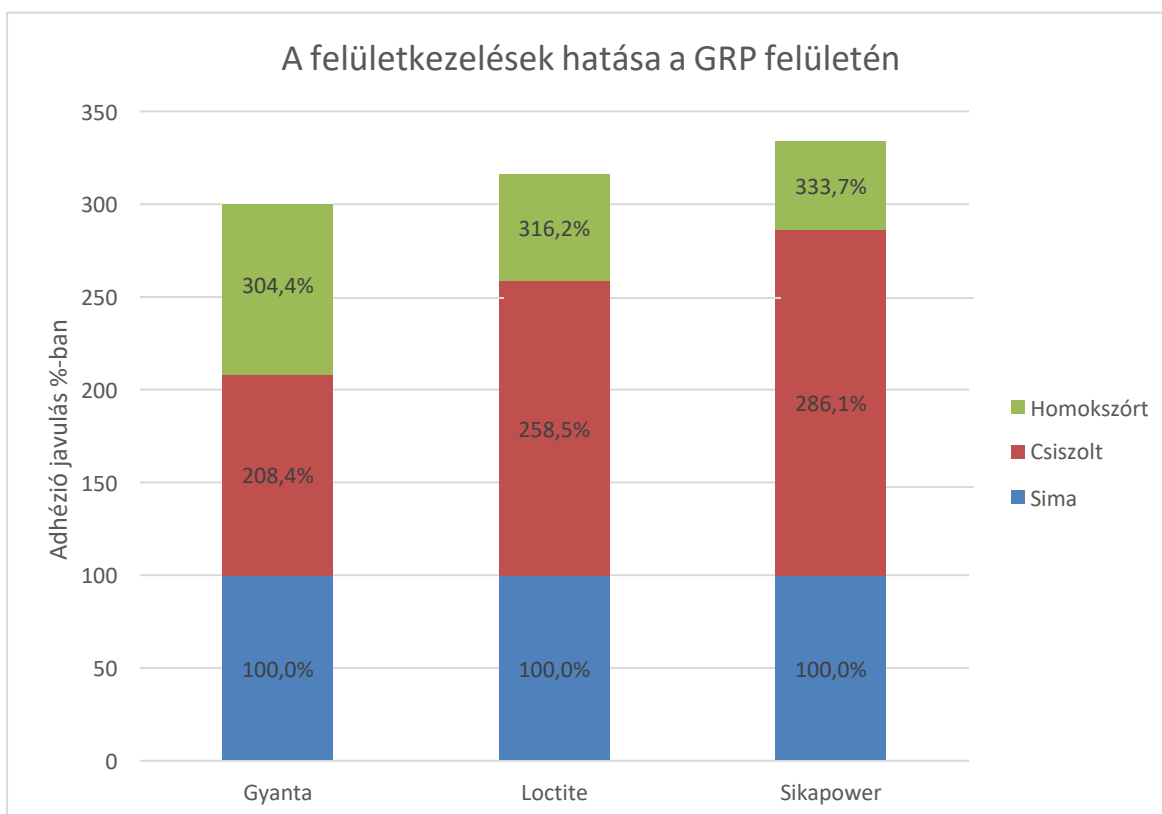
Habár a terhelések értékei megduplázódtak a sima felületek értékeihez képest, a meghibásodási típusok nem mutattak különbséget.

Összegzőképpen a maximális terhelések átlagát szemléltetem egy diagrammal, ahol a felületkezelések alkalmazásának a jelentősége egyértelműen látható. A különböző felületkezelések a táblázatban jól szemléltetik azt, hogy a ragasztástechnológia jelentős részét a megfelelően kiválasztott felületkezelések használatából adódik. A táblázatban jól látható a felületek közötti minőségi különbségek.



21. Ábra: Maximális terhelési átlagok homokszórt, csiszolt és sima felületen

Az átláthatóság miatt készítettem egy táblázatot a felületkezelések teljesítményéről. Az értékek úgy jöttek ki, hogy a sima felületkezelésből kapott értékeket vettem 100%-nak, a többi értéket pedig ehhez viszonyítottam. Így jól látszik a táblázatban, hogy a sima kezelés nélküli felülethez képest a csiszolás 1,8-2,5-szeres, míg a homokszórás 3-3,3-szoros hatásfokokat adott. A gyantával ragasztást emiatt is szerettem volna elvégezni, mivel nem ragasztásra, hanem az üvegszálerősítésű kompozitok gyártásánál alkalmazzák. Ettől függetlenül a gyantával való ragasztás is 300%-os javulást eredményezett a homokszórt felületen.



22. Ábra: Felületkezelések százalékos aránya a sima felülethez képest

A homokszórt felületek értékei lettek a legjobbak. A szakadás során adhéziós és kohéziós hibák jelentkeztek a homokszórással érdesített felületen. A lapos profilok szakításánál a legnagyobb eredményt Sikapower/homokszórt felületérdesítés kombinációja bizonyult a leghatékonyabbnak, ezért ezzel a kombinációval további vizsgálatot végeztem. A következő vizsgálat során lineárisan növeltem az érdesítési felületeket, majd azt vizsgáltam meg, hogy a nyíróerők lineárisan fognak-e növekedést mutatni.

4.2. Lapos profiloknál alkalmazott ragasztott felület lineáris növelése:

eredmények

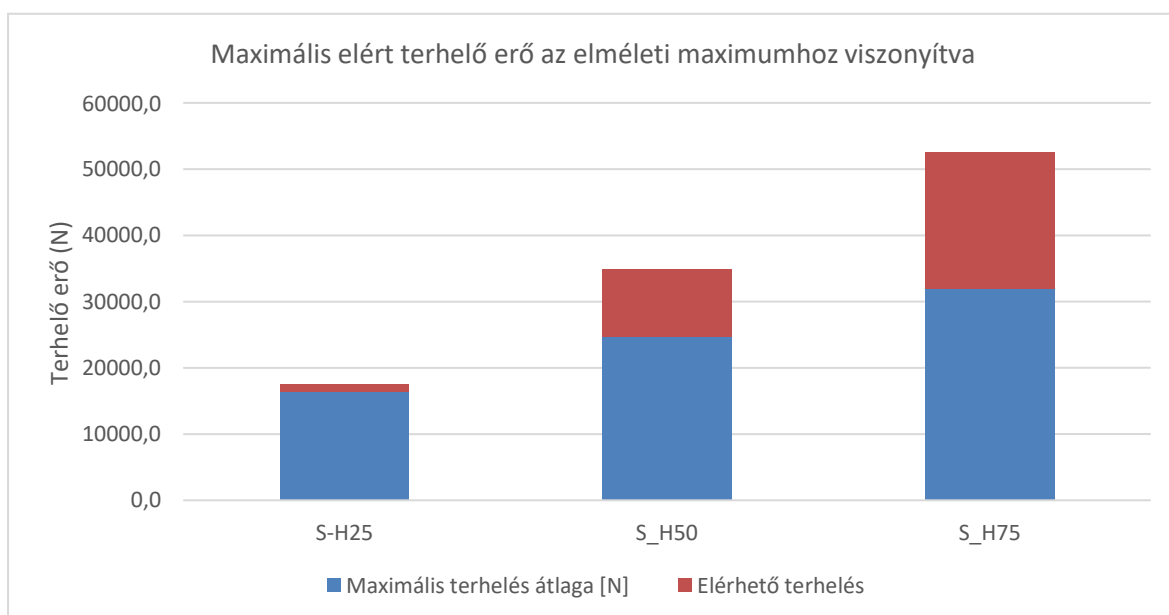
A következő vizsgálat az eddigi méretek kettő és háromszoros méreteivel kerültek vizsgálat alá. Lineárisan növekszik így a próbatest ragasztott felülete és a hossza is. Így az itt elkészült próbatestek 50x50mm-en és 75x50mm-en lesznek ragasztva, eddigi mérések 25x50mm-en kerültek elvégzésre. Az dupla akkora ragasztott felületű próbatest hossza 200mm, a háromszor akkora ragasztott felületű próbatestek hossza pedig 300mm. A vizsgálat célja, hogy a lineárisan növekvő ragasztott felülettel lineárisan növekszik-e a határfok és a maximális terhelés értéke. A jelölések első betűje a Sikapower, a második betű (H) jelöli a homokszórást, majd a mögötte lévő szám az érdesített felület szélességét. Az első sorban lévő S-H25-ös próbatesteket az első vizsgálat során már elszakítottam, így az ott kapott

értékeit tüntettem fel az itt lévő táblázatba. A táblázatban látható, hogy a ragasztott felületek növelésével a maximális terhelések is növekednek, viszont a nyírószilárdsági értékek csökkenni kezdtek.

7. Táblázat: Lineárisan növekvő próbatestek eredményei

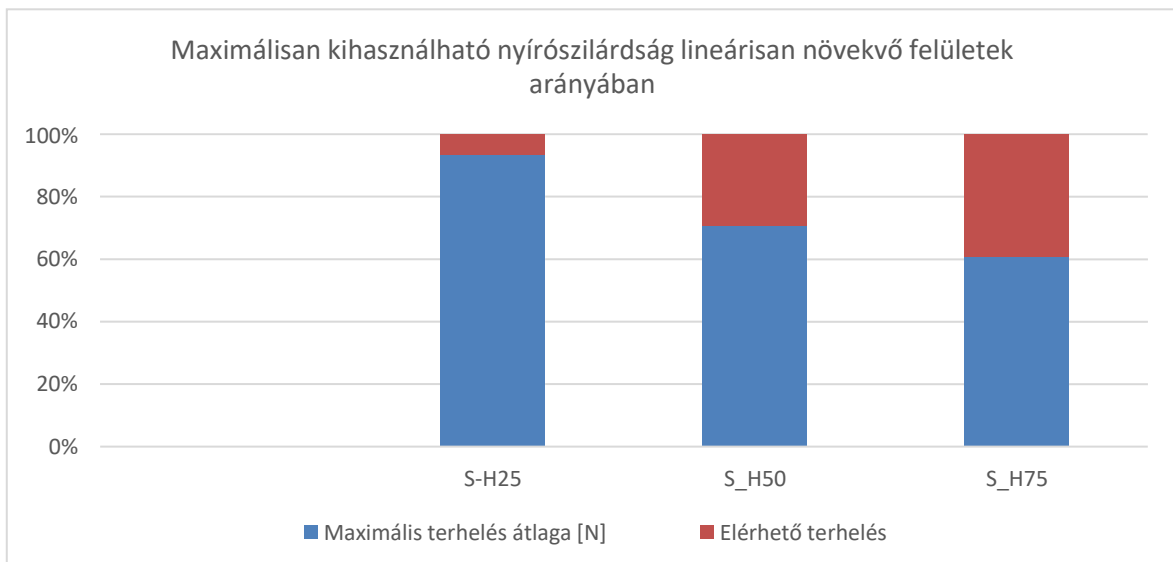
Próbatest jelölés	Maximális terhelés átlaga [N]	Nyírószilárdság [N/mm ²]	Nyírószilárdság/gyári érték aránya	Meghibásodási típusok
S-H25	16339	13,07	93%	Adhéziós + Kohéziós
S_H50	24732,7	9,89	71%	Kohéziós
S_H75	31971,8	8,53	61%	Kohéziós

A táblázatban látható, hogy a ragasztott felületek növelésével a maximális terhelések is növekednek, viszont a nyírószilárdsági értékek csökkenni kezdtek. A meghibásodási típusok teljes mértékben kohéziósra váltottak, a ragasztott felületek sértetlenek maradtak. A tönkremenetel a ragasztott kötés mellett a profil üvegszövet részén jelentkezett. Az egyik mérési eredménynél a ragasztás képes volt az egész üvegszöveti réteget leszedni a profil középső részén lévő egyenesirányú szálakig. A maximális terhelőerő az elméleti maximum terhelőerőhöz viszonyítva egyértelműen csökkent, ahogyan a diagrammok mutatják.



23. Ábra: A maximálisan elért valós és elméleti terhelés összehasonlítása

A diagramban az elérhető terhelés az adott felületen létrejövő maximális terhelhetőség a ragasztó tulajdonságaiból adódóan. A lineárisan növekvő felületeknél a ragasztott kötés állandó felületre vetített ereje fokozatosan csökken. Ennek oka a próbatestek szakítás közbeni kihajlásából adódik, ugyanis ez lefejtő igénybevételt képez.



24. Ábra: A maximálisan elért erők és az elméleti maximum terhelés viszonyítása százalékos formában

Továbbá nagyobb felületen megeshet, hogy a ragasztó oldószere nem tud tökéletesen eltávolítani a ragasztott kötés belsőbb részeiből. A mérések során viszont a legkisebb próbatesthez képest megváltoztak a meghibásodási típusok. A ragasztott felületek épek maradtak, viszont a ragasztás mellett az anyagból szakadt ki valamennyi réteg üvegszövet. Az egyik szakítás során az kereszt-kötésű üvegszálak szövet teljes mértékben kiszakadt.



25. Ábra: Kohéziós szakadás a lemért profilon

A mérési eredmények azt mutatják, hogy a homokszórással készült felületkezelés bizonyult a leghatékonyabbnak a pultrudált profilok felületkezelésénél. Továbbá megfigyelhető, hogy a ragasztott felület és a befogási pont közötti távolság nagysága lényegesen ronthatja a ragasztott kötet, mivel a kihajlás hatása miatt lefejtő igénybevétel keletkezik.

A ragasztott kötések hatékonysága a homokszórással készített érdesített felületnek köszönhető. A Sikapower kimagaslóan jó eredményeket ért el a homokszórt felületen, de százalékos arányban a Loctite és a gyanta is legalább 300%-os értéket produkált a homokszórt felületen, mint a kezelés nélkül. A technológiai és az ipari ajánlást ezek alapján készítettem el.

5. Technológiai- és ipari ajánlás

A ragasztástechnológia hatékonysága a megfelelő felületkezelés és az érdesített felülethez jól tapadó ragasztó kombinációjával fog hatékonynak bizonyulni. Bár a homokszórásnál kapott eredmények egységesen mind a három ragasztónál 300% feletti hatékonyságot mutattak a sima felülethez képest, a Sikapowerrel kapott értékek jelentősen jobb eredményeknek számítanak. Ennek az oka, hogy a Sikapower nyírószilárdsága maximum 14N/mm^2 lehet a gyártó szerint, az én mérési kiértékelésemnél pedig $13,07\text{N/mm}^2$ nyírószilárdsági érték jött ki. Ez azt jelenti, hogy a homokszórt felülettel és a Sikapowerrel létrehozott kötés annyira hatékonynak bizonyult, hogy a ragasztó nyírószilárdsági értéke 93%-ot ért el.

A homokszórt felület és a Sikapower ragasztó kötéskombinációjának feltételei a következők:

- A szennyeződéseket távolítsuk el a felületkezelés előtt a kezelésre váró felületekről.
- A homokszórás során a felületet 0,5-0,7mm átmérőjű kvarchomokkal 20-30mm-es távolságban szórjuk legalább két percig, a levegő nyomása 8 bar legyen. A megfelelő érdesítéskor a felület matt színű lesz.
- A felületen maradt por nagyrésztét sűrített levegővel távolítjuk el.
- A portalanítás után a felületeket alaposan át kell törölni egy acetonba áztatott ronggyal.
- A felület tisztítása után ragasztó pöttyöt nyomunk ki egy papírra, aminek a szélessége a keverőszár szélességével egyenlő. Ezt követően a ragasztó már megfelelően elkeveredik a keverőszárban.
- A ragasztót fel kell vinni mind a két csiszolt felületre és el kell teríteni egy műanyag kenőlap segítségével az egész felületen.
- Ezt követően a két ragasztott felületet egymásra kell helyezni, majd akkora erőt kell kifejteni rá, hogy a két felület közötti rész a lehető legkisebb legyen. A ragasztóban távtartó üveggyöngyök vannak, így nem kell a ragasztóvastagsággal foglalkozni.
- Száradása szobahőmérsékleten 24 óra, de magasabb hőmérsékleten gyorsabban köt a ragasztó, amit a Sikapower jellemzésénél fel is tüntettem egy táblázatban.

További nem elhanyagolható szempont az, hogy a kihajlás lefejtő ereje gyengíti a ragasztott kötetést, viszont ezeket a kihajlásokat el lehet kerülni merevítésekkel (például pánt formájában), vagy a ragasztott kötések kialakításai merev pontokhoz közel legyenek. A ragasztott felületek méreteinek a növelése erősebb kötetést eredményezett, viszont, ha a

kihajlással nem számolunk, akkor a felületek nyírószilárdsági értéke csökkenni fog. Így a tervezéskor számolni kell azzal, hogy el kell kerülni a kihajlás lehetőségét. Az nyíráskor létrejött két erő nem egy vonalban van a felületragasztás miatt, de ennek az elkerülésével megszűnhet a kihajlás lehetősége.

Összefoglalás

Kutatás során pultrudált profilokon felületkezelések alkalmazását vizsgáltam a felületi energia növelése érdekében. Kézi csiszolással és homokszórással érdesítettem a ragasztani kívánt felületeket, majd különböző zsírtalanítószeret alkalmazva nedvességmérést végeztem el kezelés nélküli és az előbb említett két érdesített felületen. A felületkezelés létrejöttének bizonyítására és nagyságának a meghatározására a felületeket érdességmérővel ellenőriztem. A próbatest-ragasztásokat két kétkomponensű szerkezeti ragasztóval, valamint egy kétkomponensű epoxi gyantával készítettem el. Ez a gyanta üvegszálas kompozitok készítésére szolgál. A lapos profilok nyírószilárdsági értékét szakítóvizsgálaton hasonlítottam össze, majd meghatároztam a felületkezelések hatását.

A megfelelő ragasztás elérése nagy lépéseket jelentene a pultrudált profilok felhasználásának területén. Kutatásom célja a pultrudált profilok felületi energiájának a nagymértékű növelése volt, amit az eredmények tükrében sikerült elérnem. A kutatást elsősorban a nyíróerők kiküszöbölésével folytatnám, hogy magasabb nyírószilárdsági értékeket kapjak.

Ábrajegyzék

1. Ábra: Szintetikus műanyagok csoportosítása	7
2. ábra: Hőre keményedő mátrix anyagok tulajdonságai.....	7
3. Ábra: Folytonos egyirányú szálakkal erősített kompozit szakítódiagramja [kompozitok, BME]	9
4. Ábra: Szálerősítésű kompozitok elrendezési formái	10
5. Ábra: Üvegszálak gyártása	11
6. Ábra: Pultrudált profilok	12
7. Ábra: Pultrudáló szerszám vágott nézeti vázlata	13
8. Ábra: Pultrudáló gyártósor elvi vázlata	14
9. Ábra: Pultrudált profil felépítése	17
10. Ábra: Lapos profil	18
11. Ábra: Adhéziós és kohéziós tönkremeneteli módok	19
12. Ábra: Ragasztók csoportosítása	20
13. Ábra: Ragasztás során fellépő erők	22
14. Ábra: Nedvességi peremszögértékek alakulásának a lehetőségei szilárd fázisra helyezett folyadékcsepp esetén.....	23
15. Ábra: A ragasztási felületen létrejövő különböző terheléstípusok és azok feszültségeloszlásai.....	24
16. Ábra: Sikapower-4720 húzó-nyíró szilárdsága	36
17.Ábra: A felhasznált profil méretbeli paraméterei és a darabolás egy pillanatképe	37
18. Ábra: A legjobban (bal) és a legkevésbé (jobb) elterült csepp a mérés során	41
19. Ábra: Nedvességmérés csiszolt felületen Loctite Supercleaner tisztítással.....	42
20. Ábra: Kohéziós és adhéziós hibajelenségek a homokszórt profilon Sikapower ragasztóval.....	45
21. Ábra: Maximális terhelési átlagok homokszórt, csiszolt és sima felületen	47
22. Ábra: Felületkezelések százalékos aránya a sima felülethez képest.....	48
23. Ábra: A maximálisan elért valós és elméleti terhelés összehasonlítása	49
24. Ábra: A maximálisan elért erők és az elméleti maximum terhelés viszonyítása százalékos formában.....	50
25. Ábra: Kohéziós szakadás a lemerített profilon	50

Táblázatjegyzék

1. Táblázat: Lapos profilok jelölése	37
2. Táblázat: Nedvességmérés eredményeinek az átlaga	41
3. Táblázat: Az érdességvizsgálaton kapott eredmények kiértékelése	43
4. Táblázat: Sima felületen kapott eredmények.....	44
5. Táblázat: Homokszórt felületeken kapott eredmények	45
6. Táblázat: Csiszolt felületeken kapott eredmények	46
7. Táblázat: Lineárisan növekvő próbatestek eredményei.....	48

Irodalomjegyzék

- [1] A. F. Harris and A. Beevers, Int. J. Adhesion Adhesives (1999).
- [2] Aniskevich K, Aniskevich A, Arnautov A, Jansons J. Mechanical properties of pultruded glass fibre-reinforced plastic after moistening. Compos Struct (2012)
- [3] Bagyinszki, G., & Bitay, E. (2010). Hegesztéstechnika I.-Eljárások és gépesítés.
- [4] Bai Y, Vallée T, Keller T. Delamination of pultruded glass fiber-reinforced polymer composites subjected to axial compression. Compos Struct (2009)
- [5] Bank LC, Oliva MG, Bae H-U, Bindrich BV. Hybrid concrete and pultruded-plank slabs for highway and pedestrian bridges. Constr Build Mater (2010)
- [6] B. B. Johnsen, K. Olafsen, A. Stori and K. Vinje, J. Adhesion Sci. Technol. (2002).
- [7] B. R. K. Blackman, A. J. Kinloch, M. Paraschi and W. S. Teo, Int. J. Adhesion Adhesives (2003).
- [8] Cabral-Fonseca S, Correia JR, Rodrigues MP, Branco FA. Artificial accelerated ageing of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinylester resins: characterization of physical-chemical and mechanical damage. Strain (2012)
- [9] Carra G, Carvèlli V. Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents. Compos Struct (2014)
- [10] de Castro J, Keller T. Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, part I: experimental investigation. Composite part B (2008)
- [11] de Castro J. Experiments on double-lap joints with Epoxy, polyurethane and ADP adhesives. Composite Construction Laboratory, Appendix B – Technical Report n. CCLab (2000)
- [12] Chacòn YG, Paciornic S, d’Almeida JRM. Microstructural evaluation and flexural mechanical behavior of pultruded glass fiber composites. Mater Sci Eng A (2010)
- [13] Chamochin, R., de Santayana, M. C., Abenojar, J., Pantoja, M., Ballesteros, Y., & Del Real, J. C. (2010). The effect of surface treatment on the behavior of toughened acrylic adhesive/GRP (epoxy) composite joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*
- [14] Correia JR, Cabral-Fonseca S, Branco FA, Ferreira JG, Eusebio MI, Rodrigues MP. Durability of glass fibre reinforced polyester (GFRP) pultruded profiles used in civil engineering applications. Composite in Construction (2005) – Third International Conference.
- [15] Correia JR, Gomes MM, Pires JM, Branco FA. Mechanical behavior of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: experiments and model assessment. Compos Struct (2013)
- [16] C. Tendero, C. Tixiera, P. Tristanta, J. Desmaisona and P. Leprince, Spectrochimica Acta Part B (2006).
- [17] C. Wang, Y. D. Huang, H. Y. Xu and W. B. Liu, Int. J. Adhesion Adhesives (2004).
- [18] D. K. Owens and R. C. Wendt, J. Appl. Polym. Sci. (1969).
- [19] E. Bozaci, K. Sever, A. Demir, Y. Seki, M. Sarikanat and E. Ozdogan, Fibers and Polymers (2009).

- [20] E. P. Plueddemann, Silane Coupling Agents, 2nd edn. Plenum Press, New York, NY (1991).
- [21] Farkas Csaba.: Kompozit sárkányszerkezetű repülőgép konstrukciók tervezésének, gyártásának és üzemeltetésének időszerű kérdései (2008)
- [22] Fibrolux GmbH (2020) <https://fibrolux.com/grp/knowledge/pultrusion/>
- [23] G. A. Wade, W. J. Cantwell and R. C. Pond, Interface Sci. (2000).
- [24] Godat A, Légeron F, Gagné V, Marmion B. Use of FRP pultruded members for electricity transmission towers. Compos Struct (2013)
- [25] GRP Pultruded Profiles – Description (2018)
<https://www.grpsafety.co.uk/grp-pultruded-profiles/>
- [26] Dr. Halmai Attila: Finommechanikai elemek (2012)
- [27] Henkel: A ragasztástechnológia alapjai bemutató diasor (2012)
- [28] IpoX MR 3010 + MH 3124 epoxi gyanta rendszer leírás
<https://shop.novia.hu/termek/mr-3010-mh-3124/>
- [29] ISO 25217:2009 Adhesives. Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens (2009).
- [30] Dr. Konczos Géza.: Korszerű anyagok és technológiák, 9. Kompozitok (2006)
<https://www.szfki.hu/~konczos/tanfolyam/>
- [31] Laposrúd profilok méretei
<https://www.avius.hu/termek/laposrud-profilok/>
- [32] Loctite HY4090 leírás
https://www.henkel-adhesives.com/hu/hu/term%C3%A9k/structural-adhesives/loctite_hy_4090.html
- [33] J. C. del Real, M. Cano de Santayana, J. Abenojar and M. A. Martinez, J. Adhesion Sci. Technol. (2006).
- [34] J. W. Chin and J. P. Wightman, Composites: Part A (1996).
- [35] Keller T, Tirelli T. Fatigue behavior of adhesively connected pultruded GFRP profiles. Compos Struct (2004)
- [36] Keller T, Tirelli T, Zhou A. Tensile fatigue performance of pultruded glass fiber reinforced polymer profiles. Compos Struct (2005)
- [37] M. Shahid and S. A. Hashim, Int. J. Adhesion Adhesives (1992).
- [38] M. Strobel, C. S. Lyons and K. L. Mittal (Eds), Plasma Surface Modification of Polymers: Relevance to Adhesion. VSP, Utrecht (1994).
- [39] Passos, A. C., Arouche, M. M., Aguiar, R. A. A., Costa, H. R. M., de Barros, S., & Sampaio, E. M. (2021). Adhesion of epoxy and polyurethane adhesives in pultruded composite material. Journal of Advanced Joining Processes,
- [40] Q. Benard, M. Fois and M. Grisel, Int. J. Adhesion Adhesives (2005)
- [41] R. Park and J. Park, Composites Sci. Technol. (1998).

- [42] San Román, J. D. C. (2005). Experiments on Double-lap Joints with Epoxy, Polyurethane and ADP Adhesives. Composite Structure Laboratory,
- [43] Scott, D. W., & Zureick, A. H. (1998). Compression creep of a pultruded E-glass/vinylester composite. Composites Science and Technology
- [44] Sikapower 4720 leírás
<https://hun.sika.com/hu/ipariragasztastechnika/autoiparijavitas/panelragasztas/adhesives/sikapower-4720.html#documents>
- [45] Sà MF, Gomes AM, Correia JR, Silvestre N. Creep behavior of pultruded GFRP elements – Part 1: literature review and experimental study. Compos Struct (2011)
- [46] Sousa JM, Correia JR, Cabral-Fonseca S. Durability of glass fibre reinforced polymer pultruded profiles: comparison between QUV accelerated exposure and natural weathering in a mediterranean climate. Exp Tech (2013)
- [47] Stazi, F., Giampaoli, M., Rossi, M., & Munafò, P. (2015). Environmental ageing on GFRP pultruded joints: comparison between different adhesives. Composite Structures
- [48] Sundriyal, P., Pandey, M., & Bhattacharya, S. (2020). Plasma-assisted surface alteration of industrial polymers for improved adhesive bonding. International Journal of Adhesion and Adhesives
- [49] Trevor F Starr, Pultrusion for Engineers (2000)
- [50] Turvey GJ. Testing of pultruded glass fibre-reinforced polymer (GFRP) composite materials and structures. Woodhead Publishing Series Civil Struct Eng (2013)
- [51] UNE-EN 14444:2006 Standard. Structural adhesives. Qualitative assessment of durability of bonded assemblies. Wedge rupture test (2006).
- [52] UNE EN 1465:2009 Standard. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies (2009).
- [53] Varga Csilla (2012) Műanyag kompozitok 2.rész
- [54] Volk, M., Yuksel, O., Baran, I., Hattel, J. H., Spangenberg, J., & Sandberg, M. (2022). Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies. *Composites Part B: Engineering*
- [55] Weltsch Zoltán (2019) Jár್ಮűipari kötéstechológák, Akadémiai Kiadó
- [56] Weltsch, Z. (2013). Nedvesedési jelenségek vizsgálata Ag-alapú olvadékok és kerámák között a jár್ಮűipari kötéstechológák megalapozásához.
- [57] Zhang Y, Vassilopoulos AP, Keller T. Environmental effects on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded structural joints. Compos Sci Technol (2009)
- [58] Zhang Y, Vassilopoulos AP, Keller T. Fracture of adhesively-bonded pultruded GFRP joints under constant amplitude fatigue loading. Int J Fatigue (2010)