



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Lézer segítségével felületkezelt pultrudált üvegszálak kompozitok ragasztott kötéseinek vizsgálata

Examination of Bonded Joints of Laser Surface Treated Pultruded Glass Fiber Composites

Kiss János
CVQIGH

Vaczko Dániel, tanársegéd

2023

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	2
1. IRODALOMKUTATÁS.....	3
1.1. KOMPOZITOK BEMUTATÁSA.....	3
1.1.1. Általános jellemzés	3
1.1.2. Polimer kompozitok erősítő szálai – az üvegszál.....	4
1.2. A MŰANYAG KOMPOZIT GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA	6
1.2.1. Pultrudálás.....	6
1.2.2. Egyéb gyártástechnológiák	7
1.3. ÜVEGSZÁLAS KOMPOZIT SZERKEZETEK FELHASZNÁLÁSA.....	8
1.4. KÖTÉSTECHNOLÓGIA.....	9
1.4.1. Illesztés kötőelemekkel	9
1.4.2. Hegesztés.....	10
1.4.1. Ragasztás.....	10
1.4.2. Nedvesítés.....	11
1.5. FELÜLET ELŐKEZELÉSE RAGASZTÁSNÁL.....	11
1.5.1. Az előkezelés fontossága	11
1.5.2. Felület tisztítása.....	12
1.5.3. Köszörülés/homokszórás	12
1.6. LÉZERES FELÜLET ELŐKEZELÉS	13
1.6.1. Lézer általános jellemzése	13
1.6.2. CO ₂ - lézeres megmunkálás.....	14
1.6.3. UV lézeres megmunkálás.....	19
2. KÍSÉRLETTERV	25
2.1. TAGUCHI KÍSÉRLETTERV	25
2.2. ESZKÖZÖK BEMUTATÁSA	26
2.2.1. Monaco 1035-80-60	26
2.2.2. Lext 3D measuring laser microscope OLS5000-Konfokális mikroszkóp	28
2.2.3. INSTRON 5900R 4482 univerzális mechanikai anyagvizsgáló gép.....	28
2.2.4. Cseppentési berendezés.....	29
2.3. PRÓBATEST MÉRETMEGHATÁROZÁSA	30
2.4. RAGASZTÓ KIVÁLASZTÁSA.....	31
2.5. RAGASZTÁS ISMERTETÉSE	31
2.6. KÍSÉRLET SORÁN HASZNÁLT GFRP BEMUTATÁSA	32
3. ELŐMÉRÉSEK, KÍSÉRLETEK	33
3.1. ELŐMÉRÉSEK	33
3.2. KÍSÉRLET ELVÉGZÉSE.....	33
4. MÉRÉSEK	37
4.1. FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉS, PROFILMÉLYSÉG MÉRÉS	37
4.2. CSEPPENTÉSI VIZSGÁLAT.....	40
4.3. ÁTLAPOLT RAGASZTOTT KÖTÉS SZAKÍTÓVIZSGÁLATA.....	41
5. MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE, OPTIMALIZÁLÁS	44
ÖSSZEFOGLALÁS	46
SUMMARY	47
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	48
IRODALOMJEGYZÉK	49
ÁBRAJEGYZÉK	51

Bevezetés

Az üvegszálerősítésű kompozit szerkezetek kezdenek teret hódítani az iparban, tekintettel arra, hogy a tömegcsökkentés egy fő befolyásoló tényező egy alkatrész tervezésekor, továbbá korrózióálló és mechanikai tulajdonságokat figyelembe véve hasonló adatokkal bír, mint egyes acél ötvözetek. Mivel a nagyobb kompozit profilokat általában nem egy egységes részként szokták legyártani, ezért valamilyen kötéssel illesztik egymással össze őket. A ragasztás talán a legjobb kötési módszer a kompozitok egymáshoz történő egyesítésére, mivel nem jár anyagszerkezet módosulással. Ha ezt a módszert akarjuk alkalmazni, akkor egy erős kötés létrehozásának érdekében a felületet valamilyen módon kezelni kell.

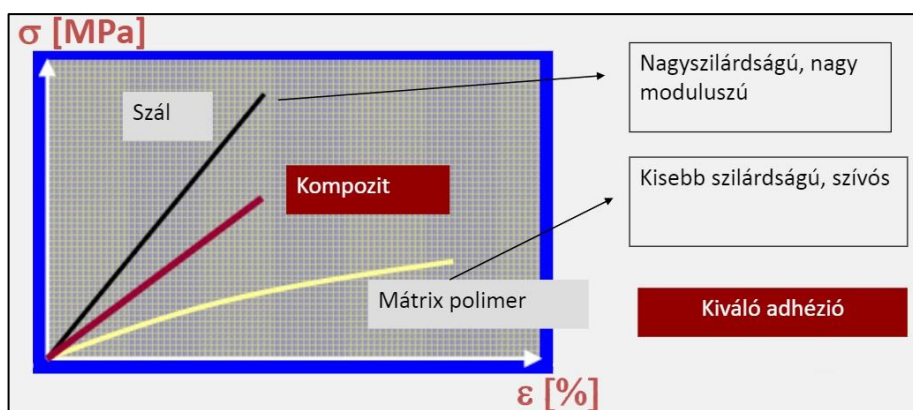
A kutatás során a felületet egy femtoszekundumos lézerrel fogom előkészíteni a ragasztáshoz. Ez azzal fog járni, hogy a ragasztási felület növekedni fog és a ragasztó beágyazódási mélysége is nagyobb fog lenni, mely várhatóan egy jobb ragasztási erősséget fog produkálni. Továbbá azért tartom jó ötletnek a lézer segítségével készült minták létrehozását mert a lézert jól lehet szabályozni, jól automatizálható, tekintve, hogy nem jár erőhatással a lézer a felületre történő becsapódáskor és egy úgynevezett mechanikai kapcsolódás nagyobb szintű megjelenése is hatással lesz a ragasztásra. A minél nagyobb beolvadási mélység érdekében egy elektronmikroszkóppal fogom megkeresni a szálmélységet és ahhoz mérten fogom meghatározni a lézerbeállítást. Ragasztási tulajdonságot szem előtt tartva cseppentési vizsgálatra is sor fog kerülni, ezzel azt vizsgálva, hogy a kezeletlen felület peremszögértékei és a kezelt felület szögértékei milyen pozitív változást fog nyújtani, mely nagy hatással van a ragaszthatóságra.

1. Irodalomkutatás

1.1. Kompozitok bemutatása

1.1.1. Általános jellemzés

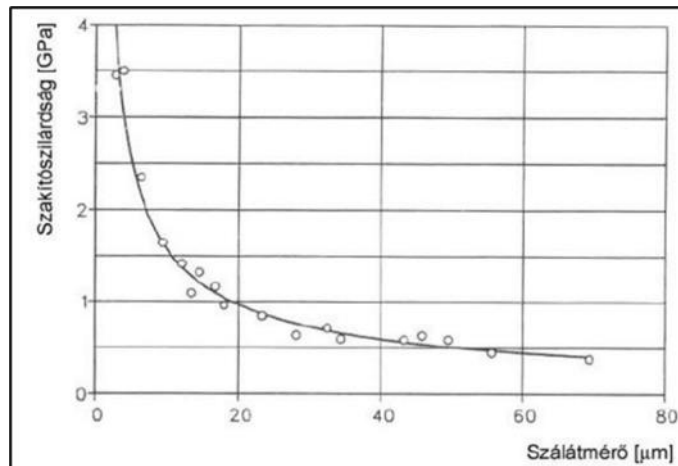
Mindenféle alkatrész, szerkezet tervezésekor általában vannak olyan erővonalak, melyek mentén biztosan nagyobb lesz egy igénybevételnek a nagysága más feszültségekhez képest, gondolok itt például egy csavarkötésre, mely egy függőleges konzolt tart, itt be lehet látni, hogy a nyíró igénybevétel a fő mechanikai feszültség, amire méretezni kell a csavart, nincs ez másképp a kompozit szerkezeteknél se. Kevés olyan eset van, amikor a tér minden irányában azonos erőhatás éri az adott szerkezetet. Ezért indokolt, hogy egy szerkezeti anyagot erősítőanyagokkal egészítsenek ki a teherviselés irányába. [1]



1. ábra: A szál és mátrix hatása a nyúlásra és a feszültségre [2]

A kompozit anyagokról el lehet mondani általánosságban azt, hogy többfázisúak (jól elkülöníthető fázishatárok), összetett, azaz több anyagból áll, és mindig van egy befoglaló anyag (mátrix) és egy erősítőanyag. A mátrix anyagról el lehet mondani, hogy kisebb szilárdságú, mint az erősítőanyag, viszont sokkal szívósabb, ezzel szemben az erősítő nagy szilárdságú, nagy rugalmassági moduluszú. A két anyag harmóniájának feltétele a mátrix és a szálak közötti kitűnő adhéziója, az egymáshoz való tapadás. Röviden megfogalmazva a terhelést a szál veszi fel, a mátrix pedig ezt a terhelést a szálak között közvetíti. E két anyag együttes tulajdonságát az 1. ábra mutatja be. Ezen lehet látni, hogy az egyesítésből egy jobb tulajdonságú, új anyag keletkezik, hasonlóan az ötvözéshez. [1] [2]

Az erősítőanyag többnyire valamilyen szálak anyaga, abból a megfontolásból, hogy egy meghatározott irányban a szilárdságnak nagyobbak kell lenniük. Továbbá az



2. ábra: Szálátmérő hatása a szakítószilárdságra [2]

úgynevezett *méret-hatás* jelenség is indokolja. Röviden ez annyit tesz, hogy a tönkremenetelt a felületen hibahelyek indítják el és ezen hibahelyek csökkentésére a szálátmérő csökkenésével lehet kiküszöbölni. A nagyon kicsi átmérőjű szálon ugyanis nehezebben alakul ki hibahely, ezért is lehet megfigyelni azt a jelenséget, hogy minél kisebb a szálátmérő, annál nagyobb lesz szilárdság. Ez a szálátmérő csökkenés mikronokra zsugorodik le, amit a 2. ábra szemléltet. Ezen a képen azt lehet megfigyelni, hogy nagyjából 20 mikron alatti átmérőnél exponenciálisan kezd a szilárdság növekedni, viszont ilyen kis szálátmérőt nagyon nehéz előállítani, a gyártástechnológiája nagyon költséges lehet. [2]

Polimer mátrixanyagokat tekintve megkülönböztethetünk hőre lágyuló és térhálós polimereket. Az előbbi hallva lehet következtetni, hogyha ez a mátrix elveszti a merevségét hő hatására, az megolvad, így ez semmiképpen se lehet jó választás, ha nagyobb terheléseket szeretnénk közvetíteni a szálakkal. Ellenben a térhálós polimerek a legjobb mátrixanyagok, amiket kompozit anyagokba hozzáadhatunk. Ezt is két csoportra lehet tagolni, a telítetlen poliészterre (UP) és az epoxi gyantára (EP). Egyes tanulmányok a legjobb tulajdonságú gyantának is tartják számon az EP-t, ragasztóként is első osztályú, tekintve, hogy kicsi a zsugorodása. Míg az UP-nak a jellemzője a kiváló hőállóság (+) és a zsugorodás (-), addig az epoxinak jobb a tapadása (+), de körülményesebb az előállítása, tárolása stb (-). [1] [2]

1.1.2. Polimer kompozitok erősítő szálai – az üvegszál

Az üvegszál elsősorban szilícium-oxidokból tevődik össze, emellett tartalmaz egyéb fém-oxidokat is, melyek együtt egy nagy óriásmolekulává állnak össze, melyek elég erős kötésekkel alkotnak egymással (primer-kovalens-ionos kötések). Ennek is van egy különleges gyártástechnológiája, a megolvasztott üveget nagyon kicsi

átmérőjű húzószemeken húzzák keresztül, megközelítőleg ezek a nyílások 8-24 μm nagyságúak, ezután pedig levegővel érintkezve gyorsan megszilárdulnak ezek a szálak. Dermedés után pedig egy úgynevezett rovingba fogják össze ezeket a szálakat (3. ábra)



3. ábra: Rovingolt üvegszál [1]

és úgy viszik tovább a különböző felhasználási területekre, jellemzően a kompozitüzemekbe. A többi erősítőanyaghoz képest az üvegszál az egyik legolcsóbb, nagy mennyiségben rendelkezésre áll, vegyszerálló, szigetelő anyag. További

	Sűrűség [g/cm ³]	Rugalmassági modulus [GPa]	Szakító- szilárdság [GPa]	
E-üvegszál	2,5	73	3,5	
Aramidszál	1,45	130	2,7	
Szénszál	1,8	544	2,6	
Polietilénszál (Spectra)	0,97	73-120	2,3-3,6	
Eutektoidos acélhuzal	7,8	240	4,0	

4. ábra: Különböző szálak mechanikai tulajdonságai [2]

összehasonlítást a 4. ábra ad, a mechanikai tulajdonságokat figyelembe véve. Ebből láthatjuk, hogy a többi jellemző kompozitszáltípussal összehasonlítva lehet, hogy nem a legjobb tulajdonságokkal rendelkezik, de olcsóságát tekintve előszeretettel használják különféle eszközökben, tömegcsökkentés terén pedig még mindig jobb választásnak minősül, mintha valamilyen acél ötvözetet választanánk. [1] [2]

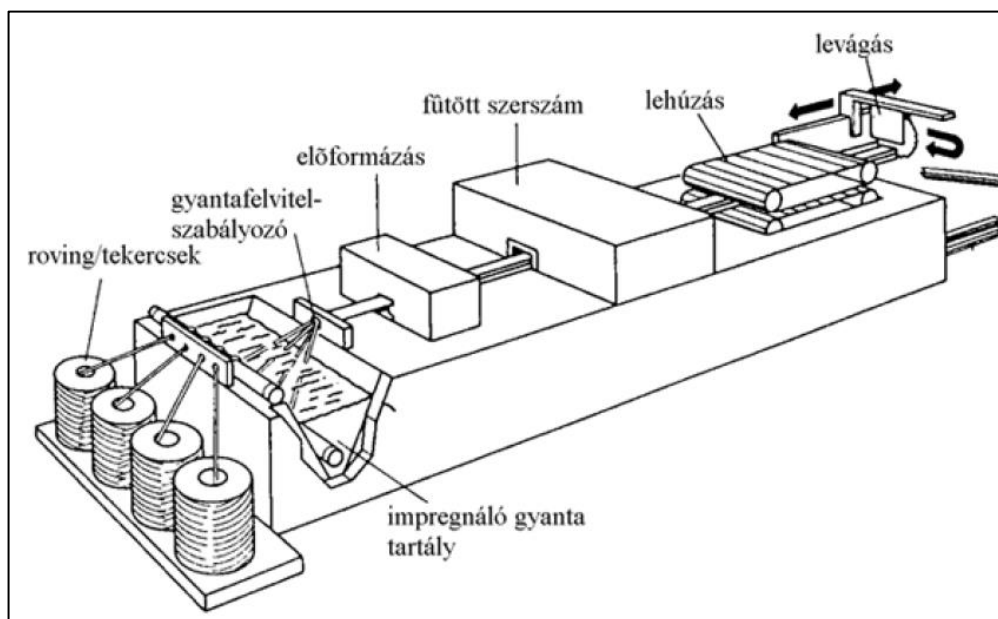
Terhelés irányától függően, különböző szálorientációjú kompozitok más-más szilárdsági adatokat adnak. Az előbbieken már ismertettem, hogy a terhelés irányára párhuzamos szálak erősítenek igazán, de ezeket nem mindig egyszerű irányítani. Viszont

százelrendezésnél is továbbfejlődött a technika, a szövött, hurkolt, sőt bizonyos esetekben méhsejt mintájú kialakítás is megfigyelhető. Utóbbi különösképpen az alkatrészek fő igénybevételének helyén erősítésként is szolgál (Kevlar-NOMEX). [1] [2]

1.2. A műanyag kompozit gyártástechnológiája

1.2.1. Pultrudálás

A kompozit gyártás eltér a homogén szerkezetű anyagok elkészítéséhez képest, hiszen a kompozit valamilyen szálanyagból és mátrixból áll, tehát valahogy bele kell ágyazni a szálakat a mátrixanyagba úgy, hogy azok ne sérüljenek meg. A pultrúzió (pultrusion) két szó egyesüléséből jött létre, a 'húzás' (pulling) és az 'extrúzió' (extrusion) szóból. Az extrúzió egy tipikus műanyagoknál használatos technológia, ahol a műanyag granulátumot egy tölcsérbe szórva adagolják, ahol megolvasztják és keresztülnyomják egy furaton át, ahol a környezetbe jutva lehül és elnyeri végleges alakját. A pultrúciónak is nagyvonalakban majdnem ugyan ez a lényege,



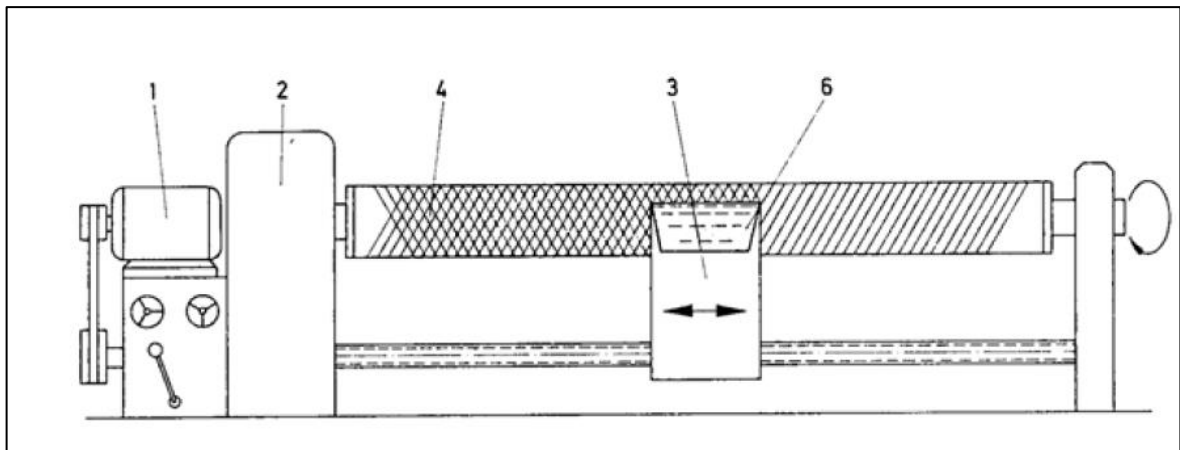
5. ábra: Pultrudálás folyamata [1]

csak azzal a különbséggel, hogy az itt lévő kompozitot nem nyomják, hanem kihúzzák a szerszámból. A részletes gyártástechnológia az 5. ábrán látható. Az eljárás lényege, hogy a tekercseken található szálakat, jellemző esetben üvegszálakat, szénszálakat, egy gyantával teli kádba terelik, ahol a gyanta az üvegszál felületén odatapad. A megfelelő mennyiségű gyantafelvitel eléréséhez egy szabályozón keresztül mennek végig a szálak, ahol a felesleges mátrixanyag eltávolításra kerül. Egy előformázóban ezután elrendezésre kerülnek a szálak és egy fűtött szerszámban térhálósodik a gyanta. A berendezés végén található egy lehúzó

szerkezet, ami gondoskodik a szálak egymáshoz képesti párhuzamosságáról és a szálak előfeszítéséről. A folyamat végén tetszőleges hosszúságú egységekre darabolják fel az elkészült kompozitot. A gyártás akár egy egész hosszadalmas folyamat is lehet, tekintettel arra, hogy a szerszámban mennyi ideig tart a térhálósodás, jellemzően 1,5-60 m/óra körüli ez az idő. Tekintettel arra, hogy ezek a szálak egymással párhuzamosak, így egy unidirekcionális szál elrendezésű kompozitszerkezetet kapunk, üvegszál esetén akár 55% is lehet a tömegszázalék, húzó és hajlítói igénybevétele elérheti az akár 200 MPa-t is. A technológia teljesen automatizált, könnyen állítható, jellemzően akkor kell hozzányúlni a géphez, ha az erősítőszál fogyóban van, a kapott kompozit geometriája pedig a szerszámtól függ, tehát elég széles kialakítású szerkezetek is kijöhetnek a gépből, viszont jellemzően laposprofilokat gyártanak. A felületi szennyeződésektől pedig egy alsó és egy felső védőfólia gondoskodik, így garantálva, hogy a kialakított profilban mindenhol azonos legyen a határfelületeknél az tapadás. Ragasztásnál ezt a réteget el szokták távolítani a kedvező tulajdonságok eléréséhez. [1]

1.2.2. Egyéb gyártástechnológiák

Kutatásom csak a pultrudált profillal foglalkozik, de említés szintjén szeretnék beszélni más technológiával készült kompozitról is, ide tartozik a laminálással, sajtolással, tekercseléssel, pull-winding módszerrel készült kompozit. A **laminálás** talán egy egyik legrégebbi kompozitkészítési technika, ahol egy szerszámra (fém/fa/hab/gipsz) különböző sorrendben szöveteket visznek fel, majd a szövet felületére mátrixanyagot terítenek szét. A rétegek felhelyezése után egy hőkezelő kemencébe (pl. Autoclave) helyezik be az elkészült profilt, ahol előre beállított hőmérsékleten és nyomáson térhálósodik a mátrixanyag. A **sajtolás** során a szerszámra felhelyezett kompozit előgyártmányt vákuum segítségével tartják nyomás alatt. Különböző előgyártmányokat alkalmaznak ennél a technológiánál, az egyik legelterjedtebb az SMC (Sheet Molding Compound) típusú előgyártmány. Az SMC a szerszámban megolvad, a vákuumnak köszönhetően nyomás alatt lesz, anyagvastagságtól függően, pár perc alatt térhálósodik a gyanta. A különböző irányban történő erőhatások felvételére a **tekercseléssel** elkészült kompozit az egyik legjobb megoldás (6. ábra). [1]



6. ábra: Tekercselés folyamata [1]

Tekercselés során a szerszámra különböző irányban és sebességgel kerül fel a mátrixanyaggal bevont szál. A jól szabályozott folyamat során a szálak előre meghatározott szögben lesznek az erőhatásokhoz képest, így jól feltudják venni a terheléseket. Jellemzően a nem egy kitüntetett irányban terhelt szerkezeteknél szokták ezt az eljárást alkalmazni. [1]

A **pull-winding** a pultrúzió és a tekercselés vegyítése, ahol a szálak helikálisan kerülnek rá a szerszámra, ahol a szálak a szerszámra történő felkerülés után meg is lesznek feszítve, így egy jobb tulajdonságokkal rendelkező profilt fogunk kapni. [3]

1.3. Üvegszálak kompozit szerkezetek felhasználása

Alkalmazási területe a sok jó tulajdonságának köszönhetően nagyon sokrétű, általában az építőiparban használják előszeretettel, tekintettel a környezeti hatásokkal szembeni ellenállósága miatt (7. ábra), továbbá a kiváló szilárdsági jellemzőinek hála. Lépcsők, korlátok, kábelelvezető rendszerek, sőt, hidakat is építenek belőle.

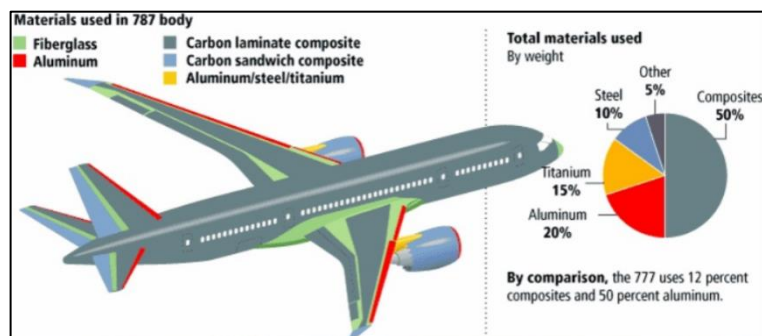


7. ábra: Pultrudált profilok tulajdonságai [4]

Elektromos szigetelőképességének köszönhetően bizonyos kinti villamoshálózatok telephelyein is remekül megállja a helyét, meghibásodás esetén nem gyullad ki. [4]

Egy másik felhasználási területe a repülőgépipar. Tekintettel a súlycsökkentésre, manapság egyre kevesebb fémszerkezetet építenek a versenyrepülőgépekbe, főképp kompozitot alkalmaznak, többségében szénszállal erősített polimereket, de bizonyos részeken üvegszálalás részeket is alkalmaznak (8. ábra). Ahol tömeget kell csökkenteni, de egyben bizonyos terheléseket is fel kell venni, széleskörű felhasználást nyújt ez a fajta anyag. [5]

Továbbá nem csak az ipar használja ezeket az egységeket, hanem például az orvoslásban is megvan a maga szerepe, például készülhet belőle MR gép is. [6]



8. ábra: Boeing repülőgép építőelemeinek anyagai [5]

Egyes külföldi kirándulóhelyeken, táborokban is lehet találkozni velük, ugyanis mobilházakat is építenek üvegszálalás polimerből. Szinte nincs negatívuma a kompozitoknak, negatívumnak esetleg azt lehet felhozni, hogy nehéz őket javítani, ugyanis, ha megszakítjuk valahol a folytonosságot, akkor azon a részen már nem feltétlen lesz megfelelő a szilárdsága. Jelenleg is rengeteg kutatás folyik, hogy miképpen, milyen kötésekkel lehet a legjobban egymáshoz illeszteni ezeket az anyagokat, és egyre jobban hajlanak rá, hogy a kompozitokat ragasztással egyesítsék egymáshoz.

1.4. Kötéstechnológia

1.4.1. Illesztés kötőelemekkel

Tekintettel arra, hogy műanyag kompozitokról beszélünk, kötéstechnológia terén, mindenféle eljárást lehet alkalmazni egyesítéskor, csakúgy, mint normál polimerek kötésénél, ilyen például a csavarkötés, menetmetsző csavaros kötések. Szinte bármely anyagot lehet csavarkötéssel egymáshoz illeszteni, azonban a műanyagoknál nem ilyen egyszerű a helyzet a kúszás miatt, de így is alkalmazzák ezt a fajta módszert, azonban ez egy kicsit munkaigényes. Ahhoz, hogy egy jó kötést létre lehessen hozni, ahhoz egy úgynevezett tubust kell alkalmazni hőre lágyuló polimereknél, melynek több kialakítása is van. Ha lehetőség van rá, akkor ezt kerülni kell kompozitoknál, mert egy furatot kell létrehozni ehhez, ami megszakítja a folytonosságot a szálaknál. [1]

1.4.2. Hegesztés

Polimereknél a hegesztés nagyon sokrétű, sok eljárás létezik, amit a 9. ábra is mutat. Az eljárás lényege ugyanaz, mint a fémeknél. Két összeegyeztethető anyagot kissé megolvasztjuk, majd megfelelő ideig, megfelelő nyomással egymáshoz illesztjük és el is készül a kötés.

Hőkonvekciós eljárások (hővezetés, hőáramlás)					Sugárzásos eljárások		Közvetlen melegítés		
A varrat helyének közvetlen melegítése			A varrat helyének közvetett melegítése		Elektromágneses energia elnyelése		Mechanikai energia		Elektromos energia
Hőközlés gáznemű anyaggal (meleg levegő, meleg inert gáz)	Hőközlés folyékony anyaggal	Hőközlés szilárd testtel (többnyire fémmel)	Hőközlés szilárd testtel, tartós melegítés	Hőközlés szilárd testtel, rövid idejű melegítés	Melegítés nem koherens sugárzással	Melegítés koherens sugárzással	Melegítés sűrűdással	Melegítés nyomás-változással	Poláros molekulák <u>dielektromos melegítése</u>
Meleg (forró) levegős hegesztés, láng-hegesztés	Extrúziós hegesztés	Fűtött ékes (folyamatos), hőtükros, fűtődrót, betétes hegesztési eljárások	Tartósan melegített fűtőszalagok, huzalok, fűtőlapok	Hőimpulzus fűtőszalagok és lapok	Infravörös hegesztés	Lézeres hegesztés	Dörzshegesztések (forgató-, kúp- és rezgő)	Hang és ultrahang hegesztés	Nagyfrekvenciás (NF) hegesztés

9. ábra: Hegesztési eljárások műanyagoknál [1]

Azonban hegeszteni csak a hőre lágyuló polimereket lehet, így a nagyszilárdságú kompozitok nem hegeszthetők, mivel befoglaló mátrix anyaguk hőre keményedő polimer, mely csak nagy hőhatás következtében alakul át, ez az átalakulás pedig nem egy kedvező folyamat, ugyanis akkor elég a térhálós polimer. Így nem maradt más kötési mód, mint a ragasztás ezen anyagok egyesítésekor. [1]

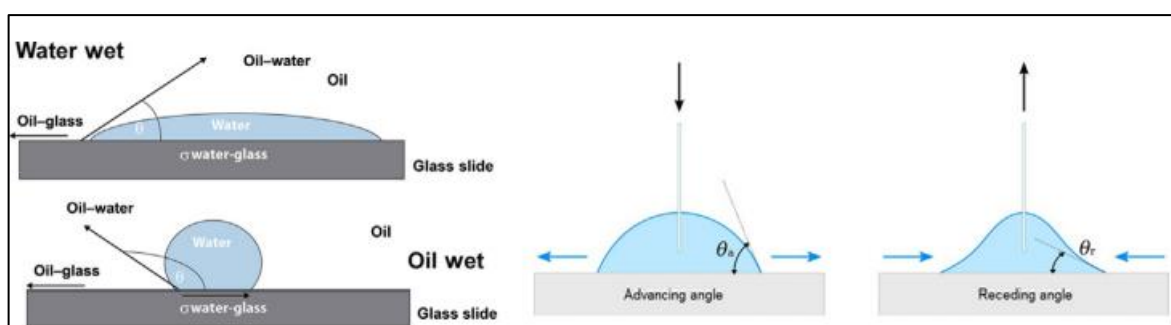
1.4.1. Ragasztás

Jelen állás szerint összekapcsolni két nagyszilárdságú kompozit anyagot úgy lehet megfelelően, ha ragasztjuk őket, ugyanis ez nem jár anyagszerkezet módosulással. Ragasztani két nem összeegyeztethető anyagot is lehet, például kompozit-alumínium. A ragasztás feltétele az, hogy a két jelenlévő erő, az adhézió (mdb-ragasztó) és a kohézió (ragasztómolekula-ragasztómolekula) egyensúlyban legyen. A jó ragasztás akkor valósul meg, ha az adhézió legalább ugyanolyan mértékű, mint az adhézió, leegyszerűsítve akkor jó a kötés, ha tönkremenetelkor a ragasztott rész megy tönkre (ragasztómolekulák válnak le egymásról) és nem a ragasztó válik le a ragasztott felületről. A ragasztás elméleti alapjairól sokat lehetne beszélni, ezért ebbe nem megyek bele, egy fontos összefüggést viszont megemlítenék, ami a későbbiek során fontos fog lenni, ez pedig a **mechanikai kapcsolódás** elve. Ez a jelenség azt írja le, hogy a kötést az hozza létre ragasztásnál, hogy a ragasztó a

ragasztandó anyag felületi egyenetlenségeibe behatol, ott megszilárdul és így jön létre a kapcsolat, ezzel jelentős kötéserő növekedés jön létre. [1]

1.4.2. Nedvesítés

Ragasztásnál egy fontos mérést szoktak elvégezni, mellyel következtetni lehet majd a későbbiekben a ragasztás minőségére, ez pedig a **nedvesítési vizsgálat**. A legismertebb nedvesítési módszerek a peremszög mérés, az Amott és az USBM eljárás, olykor utóbbi kettőt vegyíteni is szokták. Ezek közül a legelterjedtebb, az a peremszög mérés módszere, talán ez a legegyszerűbb vizsgálat, nem kell más hozzá, csak egy nagy felbontású fényképezőgép, és egy lámpa vagy valamilyen más erős fényforrás.



10. ábra: Peremszögmérés bemutatása [7]

Elve, hogy egy fecskendővel folyadékot kell felszívni, jellemzően desztillált vizet, majd pontosan egy cseppet az asztal mozgatásával a darabhoz kell érinteni. A folyadék a felszínen igyekszik gömb formát felvenni a rá ható erők miatt. A fényképezővel készíteni kell erről a csepről egy képet, majd meg kell mérni a peremszöget, ami a folyadék a síkkal bezárt szöge, a csepp belseje felől, amit a 10. ábra is mutat. Minél kisebb ez a szögérték, annál jobb a nedvesítése a felületnek, ekkor azt látjuk a felületen, hogy a folyadék elterült. Jó nedvesítés 0-90°-os tartományban van, míg a rossz nedvesítés 90° feletti értékeknél kapható. [1] [7]

1.5. Felület előkezelése ragasztásnál

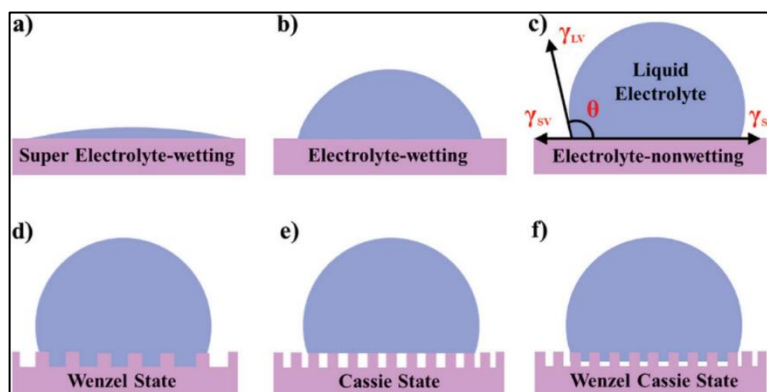
1.5.1. Az előkezelés fontossága

Mielőtt a felületre felhordanánk a kívánt ragasztóréteget, előtte elő kell készülni a művelet végrehajtásához. Az első lépés a felület tisztítása, zsírtalanítása, ez azért szükséges, hogy megakadályozzuk, hogy a ragasztó a szennyeződéssel érintkezve kössön meg a felületen, ekkor a ragasztás nem lesz megfelelő, kisebb terhelés hatására is tönkre mehet a ragasztás adhéziós tönkremenetellel. Ezután következik a ragasztó előkészítése, kétkomponensű ragasztók esetén a komponensek megfelelő arányú összekeverése. Ezután fel lehet hordani a felületre, rögzíteni a ragasztott felületet megfelelő nyomóerővel, majd

várni, hogy a ragasztó megkössön. A tisztítás mellett a felületi érdességet is szokták növelni különböző módszerekkel. [1]

1.5.2. Felület tisztítása

Az egyik legelterjedtebb felülettisztítási módszer a zsírtalanítás, melynek lényege, hogy valamilyen oldószert, például acetont, viszünk fel a ragasztani kívánt felületre, így a szennyeződések, porszemek, zsírréteg eltávolításra kerül. Peremszög mérésekor így jobb eredményeket lehet kapni, a ragasztó jobban szét fog terülni a felületen, eredményesebben fog a felületi egyenetlenségekbe behatolni a ragasztó (11. ábra), ezután a ragasztani kívánt felülethez a ragasztás pillanataig nem lehet hozzáérni, különben újabb szennyeződések vihetünk fel akaratlanul is, főképpen akkor, ha csupasz kézzel nyúlunk a darabhoz, mert az ujjakon is van zsírréteg. [8]

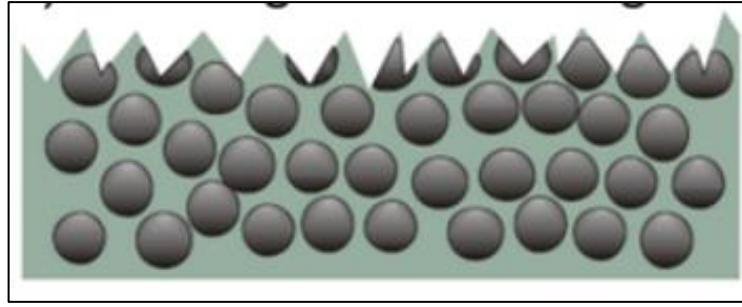


11. ábra: Lehetséges cseppformák különböző felületeken [8]

Erősebb terhelések felvételéhez azonban nem elég csupán eltávolítani a felületen található negatív befolyásoló tényezőket, hanem érdesíteni is kell a felületet, így a mechanikai kapcsolódás elve jobban érvényesülni fog, nagyobb felületen fog érintkezni a ragasztó a felülettel, továbbá nagyobb mélységben tud a ragasztó behatolni a felszínen található árkocskába. [1] [7]

1.5.3. Köszörülés/homokszórás

A csiszolásnak és a homokszórásnak is ugyanaz a célja felület előkezelés gyanánt, a felület érdesítése, a mechanikai kapcsolódás növelése. A köszörülés és a homokszórás is anyagot távolít el. A kettő közül viszont általában a homokszórást szokták alkalmazni, kényelmesebb eljárás. Viszont mind a két műveletnél kártékony a kompozitanyagra a folyamat, mert szálkárosodás jön létre, amit a 12. ábra szemléltet.



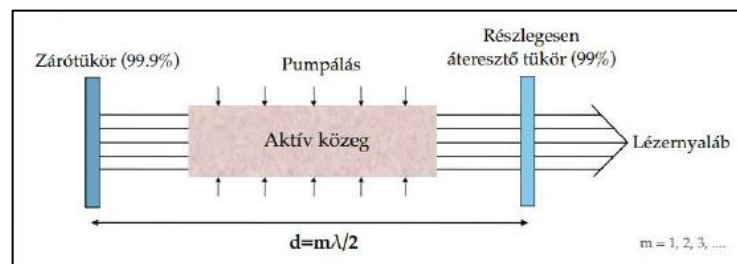
12. ábra: Csiszolás hatása a szálakra [9]

A felület érdesítése köszörüléssel jó elképzelés, viszont nem lehet jól szabályozni, mindig finomítani kell a beállításon, mert a korongból szemcsék fordulnak ki, nem határozható meg jól a szemcsekopás, hő fejlődik közben és még lehetne sorolni az egyéb hatásokat, amit köszörüléshez lehet kötni. A homokszórás is egy jó alternatíva lehet felületelőkészítéshez, a szemcse formája, alakja, keménysége mind változtatható az adott kompozithoz, de addig, amíg nem lehet szabályozni, hogy milyen mélységig történjen meg a fűvás, addig ez a technológia sem ajánlott, ha precíz ragasztást akarunk elérni, továbbá csökkenti a mechanikai tulajdonságait a szálrövidülés formájában. Ennek kiküszöbölésére a mai technológia viszont megengedi, hogy pontosan rögzített adatok alapján történjen meg ez a folyamat, lézerezéssel. [9]

1.6. Lézeres felület előkezelés

1.6.1. Lézer általános jellemzése

A lézer az angol L.A.S.E.R. szóból ered, melynek jelentése magyarul 'Fényerősítés a sugárzás stimulált emissziójával'. Lényege, hogy a fényrészecskéket, másnéven fotonokat, egy alacsony energiaszintről egy magasabb energiaszintre juttatjuk, majd innen hagyjuk, hogy a foton energiaszintje visszatérjen az alacsonyabb szintjére, miközben a foton energiát ad le. Lézer akkor keletkezik, hogyha ezeket a fotonokat szabályozni tudjuk úgy, hogy a fotonok fázisa, iránya és frekvenciája megegyezzen. A lézerfény létrehozását a 13. ábra mutatja be.

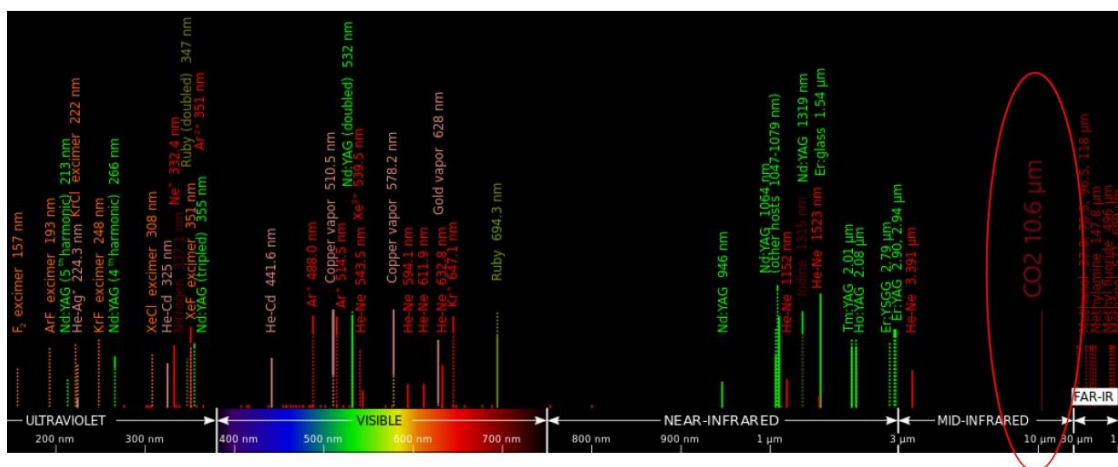


13. ábra: Lézernyaláb létrejötte [10]

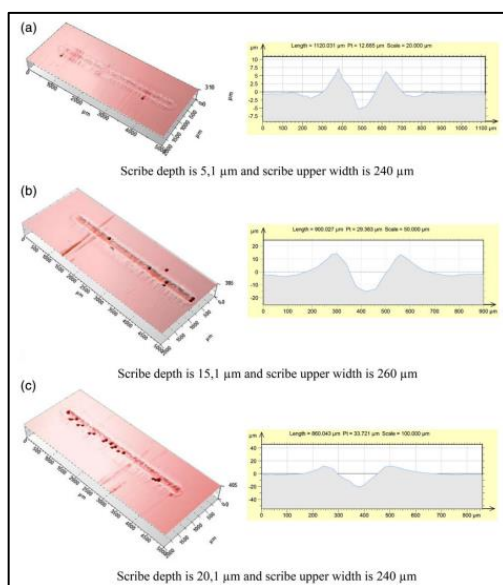
Fontos beszélni továbbá a lézernyí fő tulajdonságairól, a divergenciáról, a teljesítményről, a spektrális sávról, a polarizáltságról és az impulzusidőről. **Divergencia** szempontjából jellemző a lézerekre, hogy széttartásuk kicsi, párhuzamos nyalábok lépnek ki a keresztmetszetből, példa gyanánt említeném a lámpa és a mutatólézer összehasonlítását. Falra irányítva őket látható, hogy a lézermutató fénye ugyanolyan kicsi marad távol és közel is, szemben egy zseblámpa fényével. **Teljesítmény** felől elmondható, hogy igen nagy a teljesítménye a foltátmérőhöz képest, az ipari felhasználásban az akár több száz wattos lézerek is előfordulnak. A **spektrális sáv**, másnéven hullámhossz, megadja két szomszédos, azonos fázisú pont távolságát, jellemzően ezek az egységek nanométerben vagy mikrométerben vannak kifejezve, ami a méter milliárdod és milliomod része. A **polarizáció** a fény pályáját írja le az elektromos és a mágneses térben, a lézergépekben minimum egy lineáris polarizáló eszközt szoktak használni ahhoz, hogy fény pályája azonos legyen. Az **impulzusidő** megadja, hogy egységnyi idő alatt az adott felületre mennyi nyaláb érkezzen, a legmodernebb lézergépek femtoszekundumos nagyságrendben dolgoznak, ami $1 \cdot 10^{-15}$ másodperc. A jövő felületkezelési technikájává válhat a lézerezés, amennyiben a gazdasági oldalát mérsékelni tudják. A technológia előnye a precizitás, a jó felületminőség és egyéb pozitív hatások mellett véleményem szerint a legnagyobb pozitívum, hogy a munkadarabra nem hat erő. A továbbiakban az UV, a CO₂ és az excimerlézeres felületkezeléseket fogom tanulmányozni, melyeket valamilyen FRP anyag ragasztás előtti felületmegmunkálására használtak. [10]

1.6.2. CO₂- lézeres megmunkálás

A szén-dioxid lézeres felületkezelés a lézerek pár mikrométeres hullámhosszúságú csoportjába tartozik, mely túlmutat a látható hullámhosszúságú fényen. (14. ábra) [10]

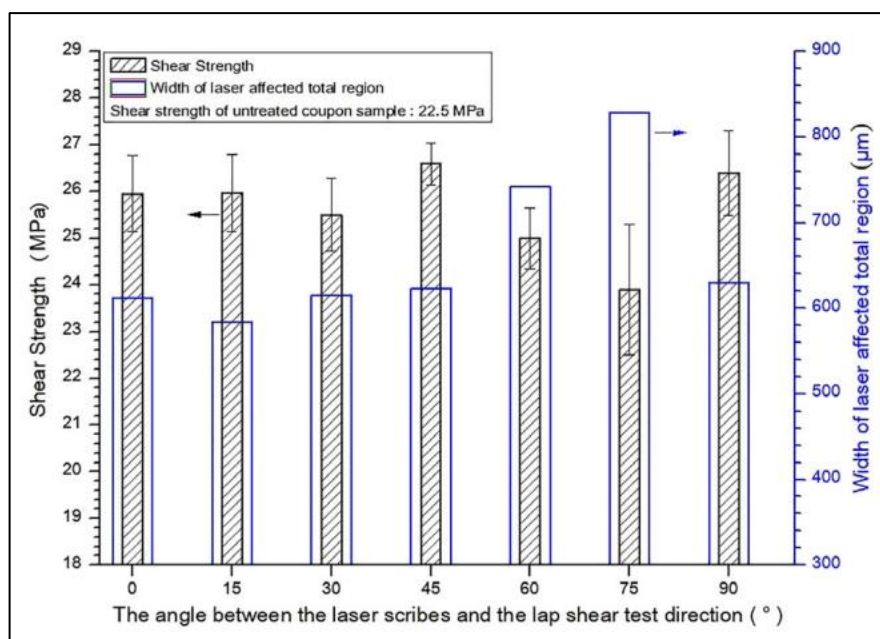


Török tudósok CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) anyagon végeztek méréseket a gázlézer segítségével. A kezelt próbatest méretei az ASTM D5868-01 szabvány szerint történt kiválasztásra (1.6x25.4x101.6 – 1.6 mm vastag, 1x4 inches méret). A próbatestek felületét 340, 850 és 1360 J/cm² energiasűrűséggel kezelték, ezeket úgy érték el, hogy a berendezés teljesítményét konstans 38 W-on hagyták, de az egy vonalra bevitt energia mennyiségét szorozták úgy, hogy a fény egy vonalon többször haladt át, a lézer munkameneti sebessége 200 mm/s volt. A folyamat során az üvegszálakat felsértették, a felületi topográfia a 15. ábrán látható.



15. ábra: Lézerkezelt felület [11]

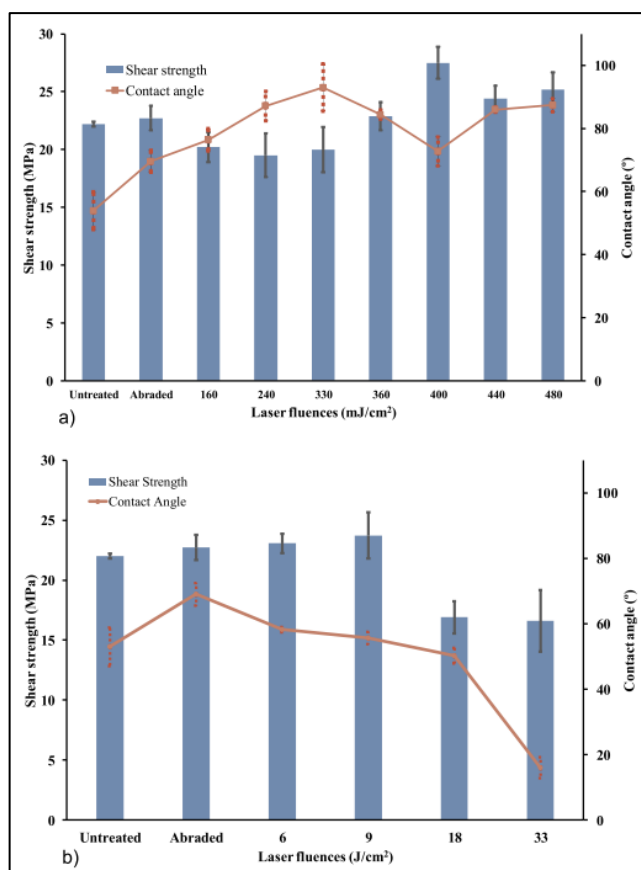
A kapott felületen a lézer nyomvonala mentén az anyagot sikeresen eltávolították, viszont a nyomvonal mentén kiemelkedések keletkeztek, ami a megolvadt és megszilárdult olvadéknak tudható be. A különböző számú lézerlövések más-más profilokat adtak, ahol a beolvadási mélység látszólag arányosan nőtt az egy vonal mentén számlálható lézerlövésekkel. Szakítási vizsgálatok elvégzése után azt tapasztalták, hogy az 5-szöri impulzusbevétel adta a legjobb eredményt a három impulzusszám közül, így ezzel az adattal haladtak tovább a vizsgálat során. A következő vizsgálandó tulajdonság az egy felületen található vonalszám, azaz a sraffozási távolságot csökkentették/növelték. Továbbá ezen vonalak szöge a szakítási vizsgálat során fellépő erővel szemben is értékelési szempont volt. A sraffozási szám változtatásával meglepő módon a ritkább sraffozási távolság jobb eredményeket adott a szakítási vizsgálat során, mintha sűrűbbre vették volna a vonalközt. Szögváltoztatással elért eredményeket összefoglaló táblázat a 16. ábra szemlélteti.



16. ábra: Megmunkálás irányának hatása a feszültségre és a megmunkálás szélességére [11]

A tanulmány során kiemelt figyelmet fordítottak a profil geometriájának méretére és próbáltak valami párhuzamot keresni különböző szögértékek és a lézervonalak topográfiája között és a (16. ábra) számú ábra is jól mutatja, hogy nincs feltétlen összefüggés a kettő között. [11]

A következő forrásban ugyanezek az emberek szintén a nyírószilárdság nagyságát vizsgálták szénszálal kompozit anyagnál, viszont ebben az esetben a vonalban közölt energia nagyságát és az így kapott peremszög értéket tanulmányozták, ahol egy UV lézert és egy CO₂-es lézert használtak. A gázlézernél 6-33 J/cm² energiasűrűségű vonalakat lőttek a felületre, míg a szilárdtest lézer esetében ezek az értékek 160-480 mJ/cm² sűrűségűek voltak. Fontos megemlíteni, hogy a két lézer nagyban eltér egymástól, ugyanis a hullámhossz a Nd:YAG lézernél tized akkora másik társával szemben és tud impulzusüzeműben is működni, így a származtatott egység, a sugárintenzitás merőben eltér a két esetben, míg a szén-dioxid lézernek 250-400 kW/cm² között mozog ez az érték, addig társának 35-110 MW/cm² is lehet ez az érték. Az így kapott feszültségeket a 17. ábra szemlélteti a mért peremszögértékekkel együtt.

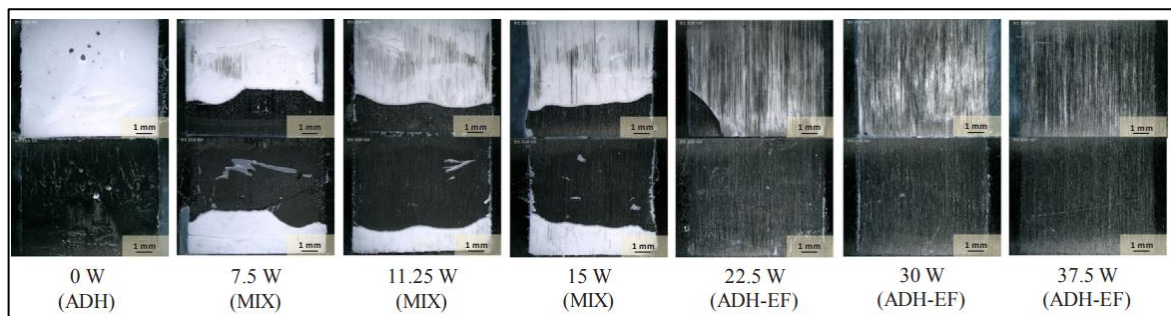


17. ábra: Teljesítménysűrűség hatása a peremszögre [12]

A kísérlet során bázismérésnek egy érdesített felületet ragasztottak. A mérések eredménye gázlézer esetén azt mutatta, hogy minél tovább növelték az energiasűrűséget, annál kisebb lett a peremszögérték, jobban szétterült a folyadék, azaz jobb lett a ragaszthatósága, viszont a 9 és 18 J/cm² érték között bekövetkezett egy törés, az átlapolt kötés szilárdsága csökkent. A szilárdtest lézer esetében pont fordított értékeket mutatott a kísérlet, ahol növekvő energiasűrűség értékeknél nagyobb lett a szilárdság, viszont számottevően nem javult a peremszögérték. Ezt azzal magyarázták, hogy az UV lézer hullámhosszája növelte a hidroxid(-OH) csoportokat. Összességében a kísérlet szilárdtest lézer szempontjából 23,87 illetve 21,1 %-os szilárdságjavulást mutatott a kezeletlen és az érdesített felületekkel szemben. [12]

Koreai kísérletezők egy csoportja szintén CFRP típusú kompozittal kísérleteztek 10,6 µm-es sávzélességű szén-dioxid lézerrel. Kutatásuk során az volt az elhatározás, hogy a lézer a szálakat ne bántsa, így próbálták optimalizálni lézerteljesítményüket (ezzel együtt az energiasűrűséget), hogy csak a mátrix anyagot érintse a nyaláb. Megállapították, hogy az így kapott felület mélysége 20 µm körüli értékhez közelített minden esetben, ahol a sugár útját a szál akadályozta. Az esetükben a kezeletlen és a kezelt felületet összehasonlítva a

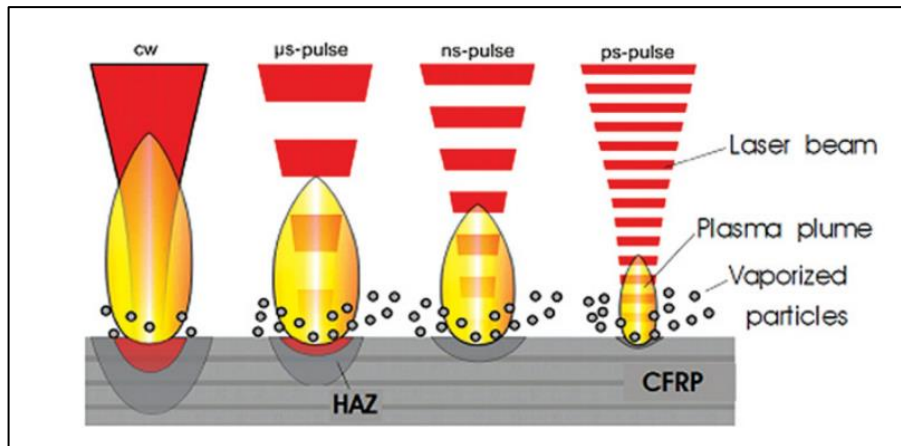
legnagyobb szilárdsági érték 37,5 MPa volt, ami 92%-os növekedést mutatott. A szakítások során nem volt kohéziós tönkremenetel, jellemzően levált teljesen az egyik felületről a ragasztó (adhéziós hiba), mindkét felületen maradt ragasztó (adhéziós-kohéziós hiba) illetve kijött a szál a mátrixanyagból adhéziós/kohéziós hiba folyamán, melyet a 18. ábra szemléltet. [13]



18. ábra: Ragasztás lehetséges tönkremeneteli módjai [14]

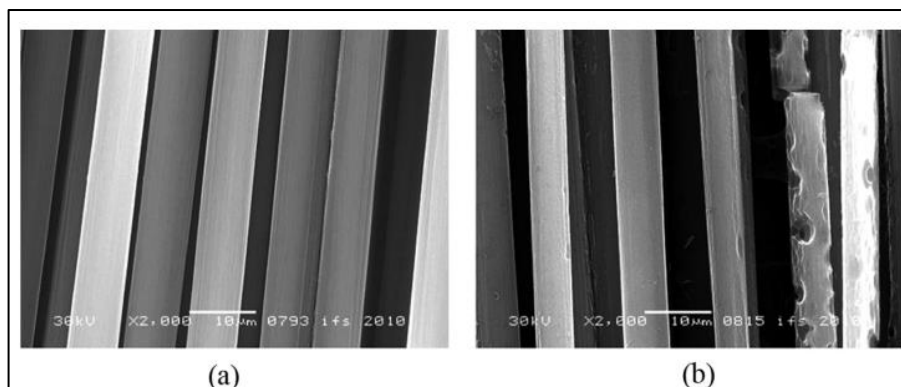
Egy 2016-os publikáció kapcsán japán emberek mutatták be kutatásuk eredményét, melyet CFRP típusú kompozit anyagok ragasztásával értek el. Kísérletüket egy CO₂ gázzal üzemelő lézergéppel hajtották végre, melynek maximális teljesítménye 250 W, frekvenciája 50 Hz és maximálisan 6,5 J-nyi energiát képesek a felülettel közölni pulzálásonként. Ragasztóként egy adhéziós filmréteget használtak, ragasztás után pedig 110 °C-on kezelték a ragasztott felületet 90 percig, 10 bar-os nyomás alatt. A kapott eredményeket kezeletlen és érdesített felületű ragasztással hasonlították össze, és kiértékeléskor megállapították, hogy az érdesített felületen történt kötés, ha egy kicsivel is, de jobb eredményt adott. Az érdekessége a kutatásuknak az, hogy 1, illetve 3 hónap múlva is elvégezték a lézerezett darabokon a szilárdsági méréseket és azt az eredményt kapták, hogy az idő elteltével a ragasztott kötés kismértékben erősebb lett. [14]

Tíz évvel ezelőtt német kutatók szintén CFRP kompoziton végeztek ragasztási vizsgálatokat, melyben a szén-dioxid gázlézerrel és az UV lézerrel történő felületkezelést hasonlították össze. Fontos tudni, hogy az ultraibolya tartományban lévő hullámhosszúságú lézerek általában pulzáló üzemmódban működnek, annak megfontolásából, hogy teljesítményük nem mondható nagy, ellenben a pulzálás következtében nagy csúcsteljesítménnyel (angolul peak power) rendelkeznek, ami egyedülállóvá teszi ezzel a technológiával történő megmunkálást, hatása a 19. ábrán látható.



19. ábra: Pulzusidő hatása a megmunkálási felületre [9]

Az ábrán a különböző időtartamok alatt végbemenő pulzálások hatását írja le a kezelés. Minél kisebb ez az időtartam, annál precízebb mélységeket tudunk megmunkálni, miközben szinte nem lesz hőhatás övezet bizonyos egyéb lézerbeállítások mellett. A kísérlet folyamán SEM-es képeken látható (20. ábra), hogy az UV lézer (bal oldalt) egyáltalán nem bántotta a szálakat, szemben a gázlézerrel.



20. ábra: SEM által vizsgált, lézerezett felület [9]

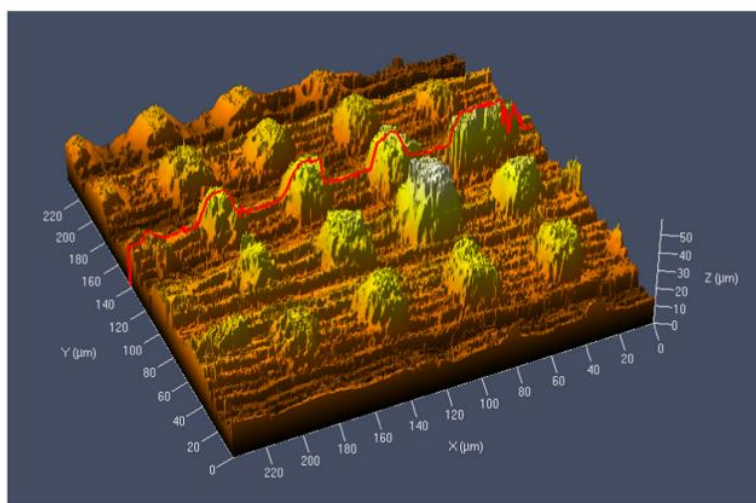
A mérések végén azt az eredményt adták a felületkezelések, hogy a kontroll érdesített felületű ragasztáshoz képest a lézeres kezelés hasonló eredményeket adott, azzal a különbséggel, hogy a lézerezett darabokon a szálak nem degradálódtak. A ragasztás tönkremeneteli módja lézeres és abrasált felületnél is kohéziós tönkremenetel volt. Felületkezelésre ennél az anyagtípusnál az UV lézert ajánlják, mivel ennél a technológiánál nagyobb a fotonok energiája és kisebb az esély a szálleválásnak, mivel pontosan szabályozható. [9]

1.6.3. UV lézeres megmunkálás

UV lézerekről beszélünk, ha a nyaláb hullámhossza nagyjából 400 nm alatt van, a látható fény szintje alatt. Ebben különböző excimer, ritkább esetben Nd: YAG lézer is található. A

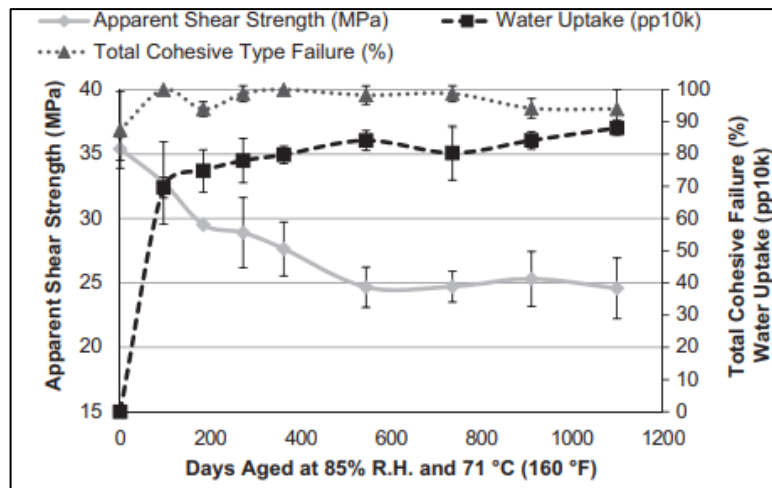
különlegessége az előbbi lézernek, hogy az aktív közeget kétatomos molekula alkotja – általában nemezgáz + halogenid elem – amely gerjesztett állapotban van, energiájukat pedig elektromos kisülés révén adják le. Ez a fajta lézer csak impulzusüzeműben üzemel, csúcsteljesítménye elérheti a 100 MW-ot. [10]

Ezzel a felületkezeléssel a NASA és a Boeing emberei együttesen is foglalkoztak, mely eredményeit egy 2016-os publikációban is nyilvánosságra hozták. Ezek az emberek egy triplázott frekvenciájú lézerrel végezték el a kutatásukat, melynek hullámhossza 355 nm, 10 ns-os impulzusidővel. Kutatásuk célja a szálerősített kompozit ragasztási szilárdságának növelése volt mesterséges öregbítéssel, emelt hőfokon, állandó relatív páratartalom mellett. Az eljárás során a teljesítményt, frekvenciát, sebességet és a foltátmérőt rögzítették, választott mintának hosszirányban és keresztirányban egyenes vonalakat választottak, melyek távolsága egymástól a foltátmérő kétszerese volt. Ezen állandó beállításokkal sikerült elérniük a nagyjából 10 μm -es megmunkálási mélységet, ahol a szálak épségben maradtak. A felületek topográfiáját egy konfokális mikroszkóppal vizsgálták meg, melyet a 21-es ábra szemléltet.



21. ábra: Szerkezeti struktúra lézeres felületkezelésnél [15]

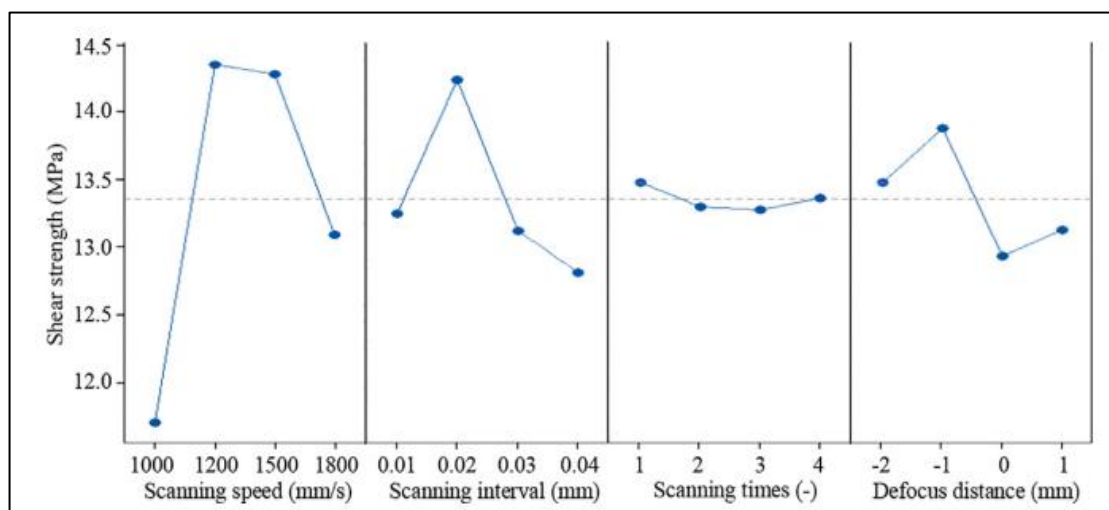
A mesterséges öregbítésű darabokat maximálisan 3 évig tartották az öregbítőben, közben összesen 7 alkalommal végeztek szakítási vizsgálatokat. Az eredményeket a 22. ábrán látható diagramon foglalták össze.



22. ábra: Öregbítés hatása a ragasztási szilárdságra [15]

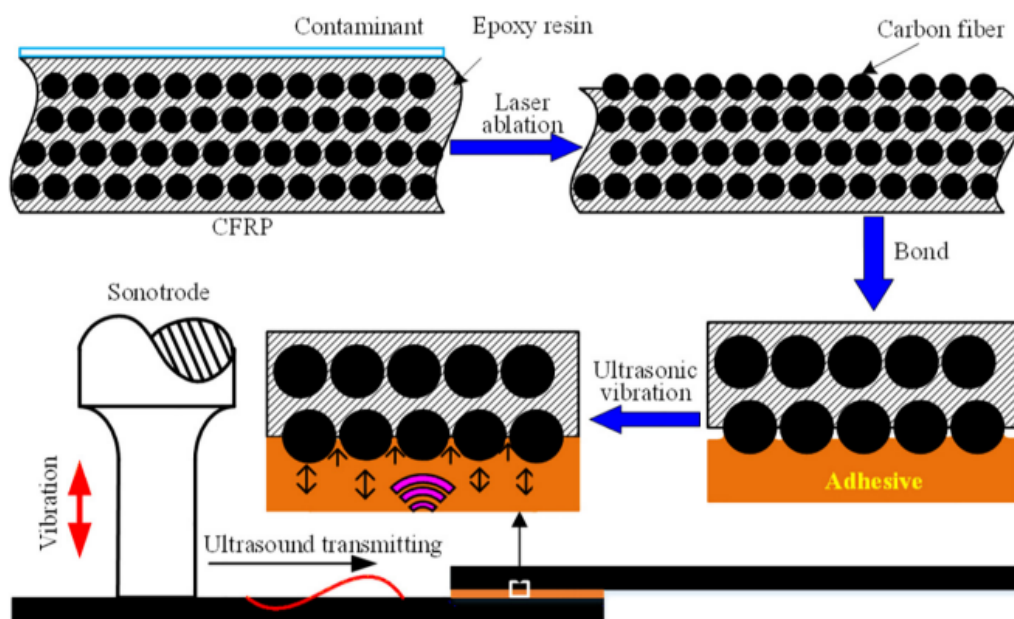
Az ábra alapján megállapították, hogy az öregítés időtartamával szinte egyenletesen növekedett a nyírási szilárdsága a kötésnek, továbbá a kohéziós tönkremenetel nagysága a felületen is növekedett. [15]

Kínában próbáltak egy kicsit tovább menni a ragasztás erősségének fokozásában, ahol nemcsak lézeres felületéresítés történt, hanem egy szonotródát tettek az egyik kezelt lapra ragasztás közben. A kísérlet során egy új változót is beiktattak a mérésbe a lézernél, ez pedig a fókuszálási távolság a lézerefénynél. A beállítások során 4 faktor alapján történt a felületkezelés: pásztázási sebesség, pásztázási köz, egy vonal mentén történő lézerezés darabszáma és az előzőekben említett fókuszálási távolság. Taguchi kísérlettervezés segítségével történt a mérés, ahol 16 mérés segítségével keresték meg azokat a beállításokat, ahol a legjobb szilárdsági értéket kapták szakításkor. A kapott eredmények legmagasabb értéke 15,48 MPa volt, a beállítások értékelését a 23. ábra mutatja meg.



23. ábra: Kísérletterv kiértékelése Taguchi analízissel [16]

Az értékek alapján három csoportra bontották a további kísérleteket, ahol csoportonként 5 mérést végeztek el. Az első csoportba kezeletlen felületek ragasztási szilárdságát mérték, a második csoportban a lézerrel felületkezelt darabok ragasztását vizsgálták, a harmadik csoportban pedig a lézerezett + szonotrodázott felületek erősségéről kaptak eredményeket. Az első csoport átlagosan 4,82 MPa-os, a csak lézerezett csoportnál 16,09 MPa-os, míg a harmadik egységénél 21,19 MPa-os szilárdsági értéket kaptak. A szonotróda hatását a ragasztott felületre a 24. ábra szemlélteti.

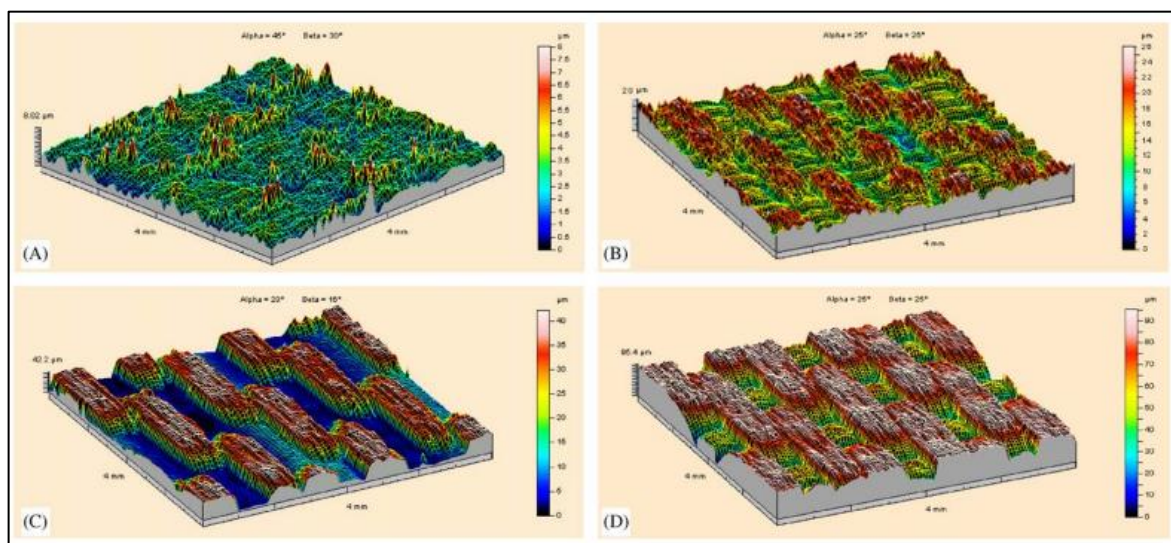


24. ábra: Vibrációval segített ragasztás szemléltetése [16]

Az ábrából jól lehet látni a ragasztás közbeni vibráció jelentőségét. A ragasztó adhéziós kötésnél nem feltétlen tud szétterülni/befolyjni a mátrix közbelső árkaiba, ezért a szonotróda segítségével megrezegtetik a darabot, hogy a ragasztó magatehetetlenségénél fogva belemenjen ezekbe a kis gödrökbe. Százalékosan kifejezve az eredményeket a kezeletlen felülethez képest a csak lézerezett felületnél négyszeres, a vibrált lézerezett ragasztásnál pedig több, mint ötszörös erősséget értek el. [16]

A további két forrásban alkalmazott lézer valamelyest különbözik a nyaláb előállításának tekintetében, ezeket excimer lézereknek nevezik. Lézermédium szerint gázlézerekről beszélhetünk, mely gázok kétatomos molekulákból állnak, melyek gerjesztett állapotban vannak. Pumpálás hatására ezek a molekulák szétesnek alkotóikra, közben leadják energiátöbbletüket, az eddigiekhez eltérően nagyobb energiát, mely hatására az energiakülönbség nagyobb lesz, ami hullámhosszúságcsökkenést okoz. Molekuláktól függően jellemzően 100 és 350 nm között mozog ez a sáv szélesség. [10]

Francia emberek csoportja ezen technológia felhasználásával végeztek felületkezelési vizsgálatokat FRP anyagokon. Gázok szempontjából ArF-t és KrF-t használtak, mely hatására a lézer hullámhossza 193 és 248 nm volt, az impulzusidő pedig 40 ns. Kísérletük során impulzusszám változtatással mértek eredményeket, az így kialakított felületi struktúra a 25. ábrán látható, az első három képen ArF gázt használtak, az így kapott energiasűrűség 150 mJ/cm² volt, impulzusszáma 4, 40 és 400, a negyedik képen KrF-t alkalmaztak 500 mJ/cm² sűrűséggel és 500-as impulzusszámmal.



25. ábra: Felületi struktúra különböző lézerbeállításoknál [17]

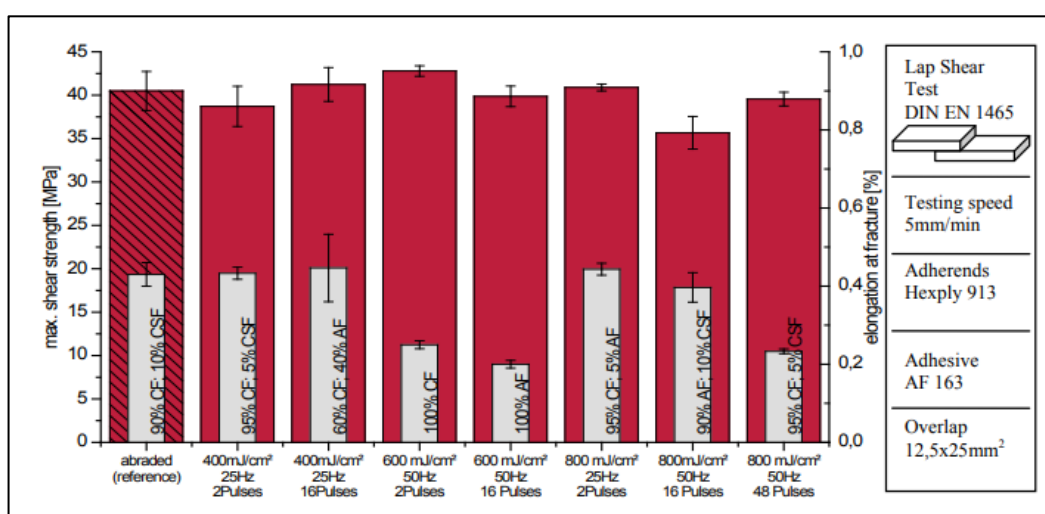
A felületeken peremszögmérést is végeztek kezeletlen, 1 és 10 impulzusszámú felületen különböző folyadékokkal, melyek felületén a peremszögérték csökkent, a különböző folyadékoknál különböző szögeket mértek, tehát elmondható, hogy a folyadékok milyensége is befolyással van a peremszögértékre. Az eljárás során üveg és szénzálás kompozitokon folytak a megmunkálások, melynek ragasztásnál a szakadási erő nagysága a 26. ábrán látható táblázat foglal össze, ahol az értékek daN egységben vannak megadva.

Treatment	Lap shear strength (daN)	Failure mode	Treatment	Lap shear strength (daN)	Failure mode
Untreated	337 ± 29	Adhesive	Untreated	642 ± 15	Cohesive in the material
150 mJ/cm ² –1 pulse	602 ± 9	Adhesive and cohesive in the material	150 mJ/cm ² –1 pulse	647 ± 35	Cohesive in the material
150 mJ/cm ² –40 pulses	722 ± 29	Cohesive in the material and in the adhesive	150 mJ/cm ² –40 pulses	651 ± 21	Cohesive in the material
150 mJ/cm ² –400 pulses	675 ± 17	Cohesive in the material adhesive where bonded to the fibre	150 mJ/cm ² –400 pulses	853 ± 25	Cohesive in the material cohesive in the adhesive when bonded to the carbon fibre
500 mJ/cm ² –500 pulses	480 ± 14	Adhesive	500 mJ/cm ² –500 pulses	671 ± 3	Cohesive in the material ripping of superficial fibre

26. ábra: Szakítási erők GFRP (bal) és CFRP (jobb) ragasztásnál [17]

A darabokat 12,5 x 25 mm felületen kezelték/ragasztották (312.5 mm²), feszültségben kifejezve ezek az értékek üvegszál esetében 10,79 és 23,1 MPa között mozognak, míg szénszál esetében 20,5 és 27,3 MPa körüli értékek. Az üvegszál értékeit bemutató táblázatból megállapítható, hogy az pásztázási szám növelésével egy bizonyos szintig növelhető a nyíróerő, a szénszál esetében a 400-as számig folyamatosan növekedett a feszültség, de számottevő különbséget a 40 és a 400 közötti érték mutatott. Tönkremenetel szempontjából többségében kohéziós tönkremenetelt tapasztaltak kezelt felületeknél. [17]

Kreling és társai Coherent excimer lézerrel folytattak kutatásokat CFRP anyagokon, melyben három változóval végeztek kísérleteket. Ezek a változók az energiasűrűség, a frekvencia és a pulzálások száma, melyet a 27. ábrán látható táblázatban foglaltak össze.



27. ábra: Nyírófeszültségek és nyúlások értékei a beállítások függvényében [18]

A táblázatban feltüntették a ragasztás során kapott nyírószilárdság értékét, a felületkezelés beállításait, a tönkremeneteli módokat és a százalékos megnyúlás értékét. Referenciaként érdesített felületet is ragasztottak és annak értékeit is belefoglalták a táblázatba. Legjobb eredményként a közepes energiasűrűségű, nagyobb frekvenciájú, kis ismétlésszámú felületkezelésszolgált, de összehasonlítva az abrasált felülettel nem kaptak sokkal jobb eredményt. Összevetve az előző forrásban kapott értékekkel meg lehet állapítani, hogy szénszál erősítésnél lényeges különbséget nem lehet elérni kis pulzusszámoknál, ellenben üvegszál esetében már egyszeri felületkezelés is jelentős szilárdságnövekedést eredményez. [18]

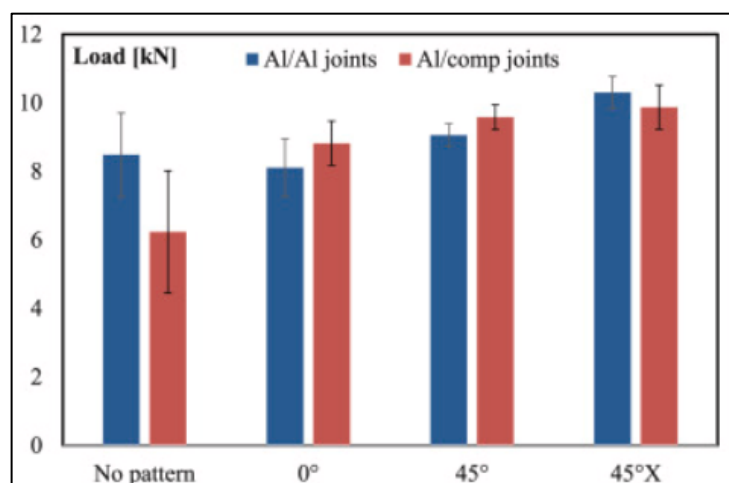
2. Kísérletterv

2.1. Taguchi kísérletterv

A források alapján 4 változóval fogom a kísérleteket végrehajtani. Mivel a lézernél több paramétert lehet változtatni, ezért előméréseket fogok végezni, ahol egy fix lézerbeállításnál csak a teljesítményeket fogom változtatni addig, amíg üvegszál mélységig nem munkál meg a gép. Ha megtaláltam ezt a beolvasási távolságot, akkor három különböző teljesíténnel fogok megmunkálni, üvegszál távolságig, felett egyszeres és kétszeres távolságig.

A következő változó az a sraffozási távolság változtatása lenne, melynél azt szeretném megállapítani, hogy a ragasztási szilárdságot mennyire fogja befolyásolni a hozzáadott felület. Ennél a sraffozási távolságot lézerfoltátmérő kétszeresére, háromszorosára és négyszeresére fogom beállítani.

A harmadik faktor a megmunkálási stratégia, melynél azt fogom tanulmányozni, hogy a feszültséget, hogy fogja befolyásolni a létrehozott felületi struktúra. T. Alderucci kísérleteket végzett, melyben vizsgálta, hogy a ragasztási struktúra és szög hogyan változtat a szakítási szilárdságon, melyben húzási irányra párhuzamos, 45°-os és keresztsraffozott vonalakkal kialakított felületet hozott létre. Az eredményeket a 28. ábrán látható diagram mutatja meg.



28. ábra: Megmunkálás és szakítás által bezárt szög hatása a terhelőerőre [19]

A diagram alapján megállapítható, hogy a minta egyértelműen hatással van a ragasztás minőségére. A választott struktúra az egyenes vonal lesz, egymásra merőleges vonalak és egy hullámvonal. Az utóbbi struktúrával kapcsolatos kísérleteket nem találtam, és meg szeretném állapítani, hogy ez a fajta minta mennyire befolyásolja a szilárdságot, összevetve az egyenes vonallal. [19]

A negyedik változtatható a tulajdonság, melyet az előző bekezdésben meg is említettem, a létrehozott vonal és a húzás iránya által bezárt szög. A 9-es forrásban ezt is tanulmányozták, melyből három értéket választok ki, ezek az értékek a 15°, a 60°, és a legígéretesebb, a 45°.

A faktorok és szintek meghatározása után Taguchi kísérlettervezési 'recepteket' kerestem egy BME-s jegyzetben, melyben találtam az én faktorjaimhoz és szintjeimhez megfelelő tervet, melyet a 29. ábra szemléltet. [20]

L₉ (3⁴) KÍSÉRLETI TERV ORTOGONÁLIS TÁBLÁZATA				
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	2	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

29. ábra: 4 faktoros, 3 szintes kísérletterv [20]

E kísérletek alapján elvégzett mérések után a Minitab nevű program segítségével fogom kiértékelni a kapott eredményeket. Ennek a programnak is van egy Taguchi kísérletterves része, melyben 4 faktort és három szintet beállítva ugyanúgy 9 kísérletből álló táblázatot adott. Felajánlott egy 27 db kísérletből álló lehetőséget is, de ugyanúgy 9 db különböző kísérletet határozott meg, csak egy kísérletet háromszor írt bele a táblázatába. Az én elképzelésem szerint egy kísérletet ötször fogok elvégezni, és az öt kísérletből 3 átlagát fogom venni, a legnagyobb és a legkisebb eltérést ki fogom venni, így valamelyest ki tudom küszöbölni az esetleges emberi hibából származó rossz mérési eredmény lehetőségét.

2.2. Eszközök bemutatása

2.2.1. Monaco 1035-80-60

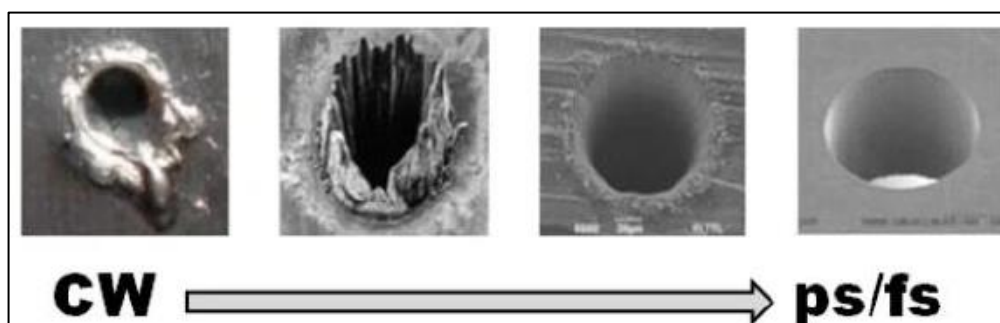
A lézeres felületkezelésekhez a Coherent femtoszekundumos lézerét fogom használni, ami a Neumann János Egyetem Lézerdiódközpontjában található (30. ábra).



30. ábra: Monaco femtoszekundumos lézer

A megnevezésben található számok a hullámhosszra, az kilépő energiára (750kHz-en) és a teljesítményre vonatkozik, amik nm-ben, μ J-ban és W-ban értendők. Különlegessége ennek a lézernek az energianagysága. A fent említett forrásokban a legkisebb energiaérték is mJ-ban volt megadva, az általam használt berendezés pedig ennek az ezredrészét tudja nyújtani, még precízebb megmunkálást biztosítva. További különlegesség, hogy a pulzálási idő és a frekvencia is fs-ban, illetve kHz-ben van megadva, az eddigi forrásokban ezek az értékek ps-ban és Hz-ben voltak megadva. [21]

Az ilyen impulzusidőnek köszönhetően a hőhatás övezet (HAZ- **H**eat **A**ffected **Z**one) szinte nincs is, ezért 'hideg megmunkálás'-nak is nevezik emiatt. A kezelt felületen nincs/szinte alig van olvadék, mert a kis energiának köszönhetően az anyag rögtön gőzfázisba lép, forgács/megolvadt anyag nem jön létre. Az impulzusidő csökkenésével a kialakított lenyomat is sokkal szebb lesz, amit a 31. ábra is szemléltet.



31. ábra: Impulzusidő hosszának hatása a megmunkálási felületre [10]

A képen látható, hogy a megmunkált felületen nincs sorja, utómegmunkálást nem igényel a folyamat. Ez a technológia, labor körülmények között, már az 1980-as években is jelen volt, azonban az ipar számára csak az utóbbi pár évben lett elérhető. [10]

2.2.2. Lext 3D measuring laser microscope OLS5000-Konfokális mikroszkóp

A felületi struktúra tanulmányozásához a fent megnevezett lézermikroszkópot fogom használni, mely a 32. ábrán látható.



32. ábra: Konfokális mikroszkópi mérés

A gép jellemzőihez lehet sorolni a hozzá tartozó objektíveket, amik lehetővé teszik a 10-20-50 és 100x-os nagyítást. A lézerezett darabokat könnyen meg tudom mérni, mivel a mikroszkóp asztala 100x100 mm-t képes mozdulni és z irányban szintén 100 mm mozgásra képes. Ez az eszköz továbbá lehetővé teszi, hogy felületi érdességet is mérjek, koordináta mérőgépen való felületi érdesség mérés így mellékes marad. A programban létrehozott kép viszont zajos is lehet, ami a felületi érdességnél negatív tényező, azonban jelentős eltéréseket nem valószínű, hogy a gép produkálna. Az utolsó dolog, amire használni fogom a gépet, az az, hogy megnézzem a lézer által létrehozott vonalak mélységét, előljáróban arra fogok számítani, hogy a teljesítmény növelésével a vonalak alja a felület tetejéhez képest mélyebben fognak elhelyezkedni. [22]

2.2.3. INSTRON 5900R 4482 univerzális mechanikai anyagvizsgáló gép

Az anyagtechnológia tanszéken található szakítógépen fogom elvégezni a szilárdsági vizsgálatokat (33. ábra).



33. ábra: Szakítógép és a rajta található munkadarab befogók

A műanyag tanszéken is található egy szakítógép, viszont azon a gépen nincs az úgynevezett próbatest védelem funkció, aminek köszönhetően, ha a befogóban a pofákat összeszorítom, akkor nem fog jelentős erőtöbbletet közvetíteni a munkadarabbal, az esetleges deformációtól megvédi a darabot. Fémek esetén is hasznos ez a funkció, de tekintve, hogy műanyag kompozittal dolgozom úgy vélem, hogy ez a funkció különösen fontos, hiszen a műanyagot könnyebben meg lehet sérteni, mint a fémeket. A gép maximálisan 100 kN erővel tudja a szakítást elvégezni és a maximális sebessége 500mm/perc. Jelen esetben nem tartom valószínűnek, hogy ekkora erő szükségeltetik a szakítás elvégzéséhez. Előreláthatólag a nagyjából 625 mm² felületnél 10 MPa-os feszültségnél is csak 6250 N erő fog keletkezni. A berendezés 5 mm/perc sebességgel fog mozogni, csakúgy, mint egyes szabványokban. [23]

2.2.4. Cseppentési berendezés

A 34. ábrán látható a kialakítása a cseppentési vizsgálatnál használt eszközöknek, látható egy kamera, a legfontosabb része az egésznek, mozgatható asztal, mellyel milliméter pontosan lehet a mozgást végrehajtani és egy fényforrás.

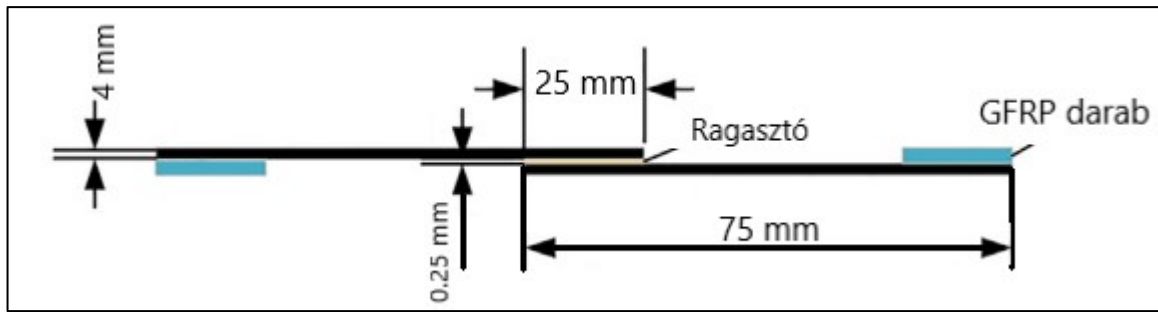


34. ábra: Cseppentési vizsgálat eszközei

A kamerán két kis befoglaló méretű vízimérték is található, mely segítségül szolgál a kamera megfelelő szögben való elhelyezésének. A kamera szabályozható nagyításának köszönhetően, miután cseppentettünk a darabra, megfelelő élességben lehet képeket lehet készíteni, amennyiben nem megfelelő a közelítés, akkor a csepp szélén egy zöldes színű kontúrt lehet látni. A cseppentéshez egy fecskendőt fogok használni, ami 5 ml desztillált vizet fog felszívni. A fecskendő tartójába pedig visszahelyezve az eszközt benyomva tartom, hogy a folyadék csepp formát vegyen fel és az asztalt felfelé mozgatva a darabhoz fogom érinteni.

2.3. Próbatesszt méretmeghatározása

A források alapján a próbatesszt egyméretűek voltak, ez leginkább a szabványokra vezethető vissza. Összesen három szabvány alapján választották ki a méreteket, jellemzően 4' x 1'-es darabok voltak ezek, metrikus adatra átváltva 101,6 x 25,4 mm, vastagságuk általában 2mm körüli volt, a leggyakrabban alkalmazott szabvány a DIN 1465 (Lap Shear Joint Adhesive Tensile Test) volt. A ragasztási hossz szintén 25,4 mm-en van meghatározva. A szakítógéppben való elhelyezés a 35. ábrán látható.



35. ábra: Próbatetek illesztése ragasztásnál

A GFRP darabok a ragasztott próbatetek végén azzal magyarázható, hogy a szakítógépen nem középen van a nyírási sík, ha a hozzárakott darabok nélkül raknánk be őket. A plusz toldalékokkal ez a probléma meg van oldva. Továbbá az én általam használt anyag az nem 101,6 mm hosszúságúra van vágva, hanem 75 mm-re, mivel úgy gondolom, hogy a mérés folyamán ennek az értéknek nincs jelentősége. Másrészt az általam használt darab nem 2 mm vastag, hanem 4 mm fog lenni, de ez sem fog hatással lenni a ragasztási szilárdságra, ennek annyi jelentősége lesz, hogy nagyobb erővel kell megterhelni a darabot, hogy elszakadjon.

2.4. Ragasztó kiválasztása

Az irodalmakban általában valamilyen LOCTITE terméket használtak adhéziónak, de a ragasztási vastagságot így nem nagyon lehet szabályozni, helyette a Sikapower 4720 nevű ragasztót fogom alkalmazni, mivel ebben a kétkomponensű ragaszanyagban távtartó üveggyöngyök találhatóak, amik megadják a kellő vastagságot, a darabok egymáshoz való nyomása során nem lehet összebb nyomni a ragasztót, továbbá ez egy egyfajta kompozitragasztó, mivel a ragasztón kívül egy más anyag is található ebben, így remek szilárdsági értéket tud adni. A térhálósodási ideje nagyjából 24 óra, 23°C-on, mely csökkenthető, ha kemencében, emelt hőmérsékleten megy végbe a keményedés folyamata. [24]

2.5. Ragasztás ismertetése

A ragaszanyagot mindkét felületre felviszem, 25x25 mm-es felületen nagyjából 0,2 g a szükséges mennyiség, de mivel azt szeretném, hogy egyenletesen, mindenhol megtalálható legyen a ragasztó, ezért valamennyivel többet nyomok a felületre. A Sikapower ajánlásával, a darab szélétől 5 mm-rel beljebb kezdem felvinni a ragaszanyagot, úgy, hogy nagyjából a ragasztó egy G alakot vegyen fel, így garantáltan minden irányban szét fog terülni, majd a másik darabbal nagyjából szétkenem és egymáshoz nyomom. A ragasztott darabokat egy másik GFRP rúddal támasztom meg alulról, hogy a felső test ne hajoljon meg. Miután az

összes darabot megragasztottam várok egy órát, hogy nagyjából térhálósodjon a ragasztó, majd azután egy hosszú GFRP profilt teszek a ragasztott darabok tetejére, ezután gyorszorítókkal rögzítem a darabokat és hagyom állni őket 1 napig. [24]

2.6. Kísérlet során használt GFRP bemutatása

Az AVIUS cégtől kapott információ alapján a kompozit 68%-ban tartalmaz üvegszálat, az alapgyanta ISO NPG, keménysége 48 Barcol (műanyagoknál használt keménységmérés mérőszáma), ami nagyjából 27 HRC-nek felelhet meg.

3. Előmérések, kísérletek

3.1. Előmérések

Az AVIUS-tól 4 mintadarabot kaptam, hogy megállapíthassam, mely kompozit lehet alkalmas lézerezésre. A teszt során egy optimálisnak mondható beállítással lettek kezelve a felületek, 10x10 mm-es keretben lettek párhuzamos vonalak a felületre juttatva. A négyzetekben található mintákat pedig 10% teljesítménynövekedéssel kezeltem, egy sorba összesen így 10 db lövés található. Az 50% teljesítménynél pedig szűkítettem a teljesítményt és 2,5%-os növekedéssel változtattam ezt a paramétert. A felületeket konfokális mikroszkóppal vizsgáltam meg. A négy közül 1 alkalmatlannak bizonyult, mivel kezelés után a lézer által létrehozott árkokban olvadék volt látható. A maradék három felülete nagyjából elfogadható volt, az egyiknél az árkok alját nem mindenhol érte el a lézer, a harmadiknál pedig a felszín és a vajat kezdeténél kiemelkedések keletkeztek. Az utolsó anyagnál pedig azt tapasztaltam, hogy kis teljesítménynél és nagy teljesítménynél is egyformán alakultak ki a felületek. Az előmérések elkészültével megállapítottam, hogy a kialakult felületeknél nem lehet látni az üvegszálat, csak több lézerezéssel lehetne ezt látni, és mivel faktorként ez nem szerepel, így ezt nem tudom meghatározni, hogy milyen mélységben lehet a pultrudált üvegszál.

A felhasznált anyagmennyiséget kiszámolva megkaptam, hogy egy ragasztás 2db 75 mm-es darabból fog állni, összesen 9db kísérletet fogok végrehajtani, kísérletenként 5-ös ismétléssel, azaz összesen 90 db kezelt felületet fogok összeragasztani, így lesz 45 db pár. Viszonyítási alapnak kezeletlen felületet is fogok ragasztani, hogy a javulást/romlást lehessen mihez viszonyítani, továbbá minden felületmegmunkálásból készítek mintákat mikroszkópi mérésekhez és a cseppentési vizsgálatnál az idő múlását is tanulmányozni fogom és kelleni fog optimalizálásra is anyag, ami +5pár, mérésekre +19 db, az optimalizált anyag mérését is, így összesen 119 db 75 mm-es anyag fog kelleni. A cég 1 m-es hosszúságban fogja ezeket a darabokat elküldeni, minimálisan 10 m anyag fog kelleni, az esetleges hibával számolva, hogy biztosan elég legyen a kompozit, 11 m anyag lesz berendelve.

3.2. Kísérlet elvégzése

Az anyag beérkezése után a profilokat méretre vágtam egy szalagfűrészszel. A fűrészeléssel ismervé belátható, hogy a beállított 75 mm hossz valamennyivel nagyobb lesz, mivel a fűrészgépek általában valamilyen szöghibával dolgoznak, jellemzően 1°-os hibával. Az 1 m

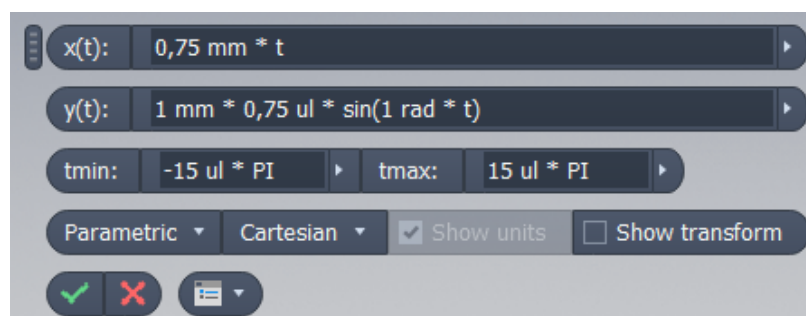
anyagból 13 db próbatestet vágtam le, elviekben 50 mm anyagnak kellett volna maradnia, de jellemzően 5-10 mm maradt, így szinte veszteségmentesnek tekintettem a folyamatot. Fűrészelés után finomszemcséjű csiszolópapírral dörzsöltem meg a darabok végén található éleket. Miután néhány darabot megcsiszoltam, kesztyűt húztam, mert a nem látható szálak belementek az ujjaimba, megjegyzésként annyit megemlítek, hogy ha üvegszálak kompozittal vagy bármilyen szálerősített anyaggal dolgozik valaki, ajánlott kesztyűt húzni. Miután ezt elvégeztem, a Minitab nevű programban elkészítettem a kísérletvariációkat, melyeket a 36. ábrán lehet látni.

#	C1	C2-T	C3	C4
	Teljesítmény	Megmunkálási stratégia	Vonaltávolság	Szög
1	60	Egyenes	140	15
2	60	Kereszt	210	45
3	60	Hullám	280	60
4	80	Egyenes	210	60
5	80	Kereszt	280	15
6	80	Hullám	140	45
7	100	Egyenes	280	45
8	100	Kereszt	140	60
9	100	Hullám	210	15

36. ábra: Minitab által generált kísérletterv

A lézergép programjában az egyenes és a kereszt mintákhoz tartozó beállításokat el tudtam végezni, azonban a hullámformákat nem lehet elkészíteni benne, azonban dxf kiterjesztésű fájlokban található vonalakat le tud követni a lézer.

A hullámformákat az Autodesk Inventor 2023 nevű programban készítettem el. Hullámformának egy szinuszfüggvényt használtam, a 37. ábrán látható paraméterekkel.

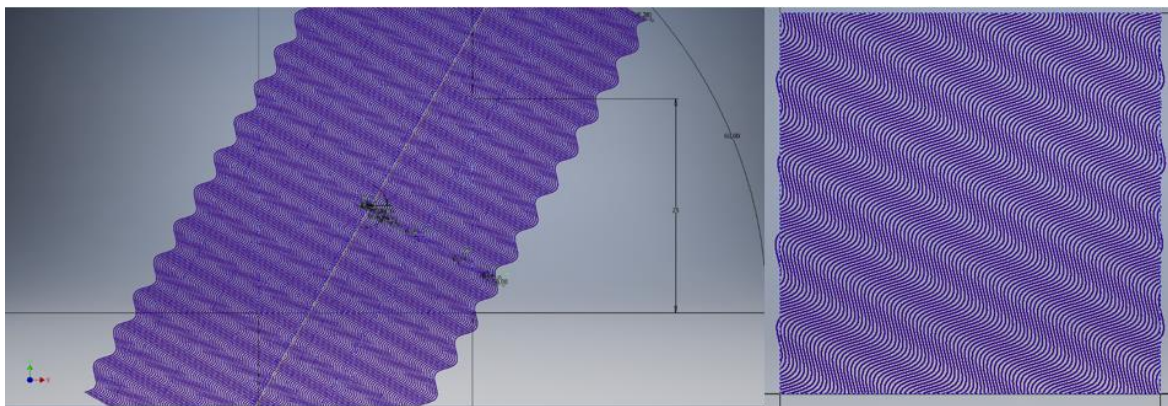


37. ábra: Szinuszfüggvény beállításai

A 0,75-szörös amplitúdót és kisebbítést azért használtam, mert így a felületen hosszabb lesz a hullám. Egy darab hullám létrehozásával nem volt problémám, a többi hullám létrehozásával volt gondom, ugyanis a hullámot nem lehet offset parancsral eltolni. A minél gyorsabb létrehozás érdekében létrehoztam az adott szögre merőleges egyenest és az

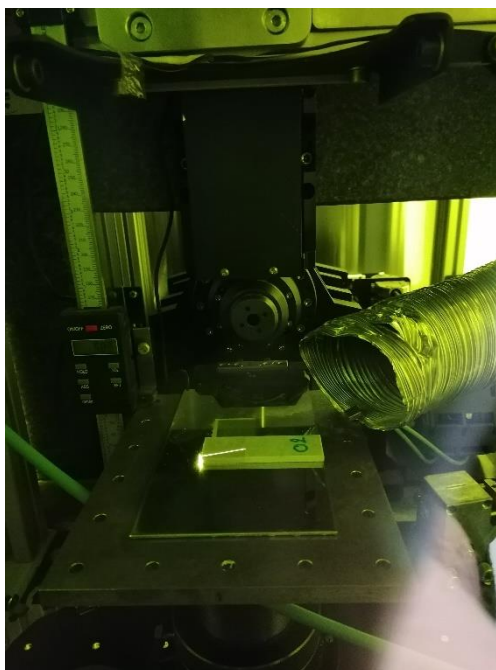
egyenesen pontokat helyeztem el. Ezután a hullámot, későbbiekben másoltam, a másolt hullámon beméreteztem a hullám felét, majd eltolással a merőleges vonalon létrehozott pontra illesztettem a hullámokat.

Az origóból indulva létrehoztam egy 25x25 mm-es négyzetet, a felesleges részeket pedig a trim nevű paranccsal levágtam, melyet a 38. ábra szemléltet.



38. ábra: Szinuszfüggvény nyers formában és méretre vágva

Minden felesleges vonalat nem sikerült eltüntetni, ezért ezek a plusz vonalak a megmunkálásnál rákerülnek a felületre, de ezek a hozzáadott felületek nem lesznek ragasztva. Miután készen vannak a formák, ezután a lézeres megmunkálás következik. A lézergépet 750 kHz-en, 277 fs-en fogom üzemeltetni. Mivel a darabolás folyamán nem sikerült tiszta, 90°-os oldalferdeségű darabokat kivitelezni, ezért a későbbi feszültség meghatározásnál ezt is figyelembe fogom venni. A probléma ezzel az, hogy a lézergépnél használt asztalnál nem lehet ütköztetni a darabokat. A gyors darabbehelyezés érdekében először egy 2mm-es lemezre rá lett löve a minta, majd jelölve lett a lemezen a 25mm-es távolság. További fontos tudnivaló, hogy a lézer lassítási sebességének köszönhetően a 25x25 mm-es méret nem lesz pontos (ha pontosan 25x25 mm-es felületet kellene, akkor a 25-öt el kell osztani 1,167-tel, ami kísérleti út alapján kapott érték). Tehát ez alapján a dxf fájlban létrehozott minta se lesz pontos, de ez nem is baj, a 25 mm-es mélységig biztosan rajta lesz a minta, az utána lévő felület nem lesz ragasztva. A felesleges energiát pedig a lemez fogja elnyelni. Cseppentési vizsgálathoz és mikroszkópi méréshez mindegyik kísérletből +1 darab lett elkészítve. A felületkezelést a X. számú ábra mutatja be (39. ábra).



39. ábra: Kompozit megmunkálás közben

A képen egy fotonokat nem áteresztő borítás van, melyen át lehet látni a folyamat létrejöttét, visszajelzést adva, hogy a beállított pozíció megfelel-e. A programban továbbá két külön felületen van a minta létrehozása és a megmunkálás indítása. Előzetesen, hogy hova fog kerülni a minta, egy lézermutatóval a berendezés körbefutja a befoglaló méretet, ezzel segítve az elhelyezést. Ilyenkor ez a lézer nem közvetít annyi energiát, hogy anyageltávolítás jöjjön létre, ez a funkció éppen olyan, mint a lézerpointerek. A darabok elkészülte után pedig az előzőekben taglalt módon lesznek ragasztva a darabok. A szükséges idő eltelte után a gyorszorítókat (40. ábra) leszedtem a hosszú GFRP profilról és a darabokon elvégeztem a szakítási vizsgálatokat.

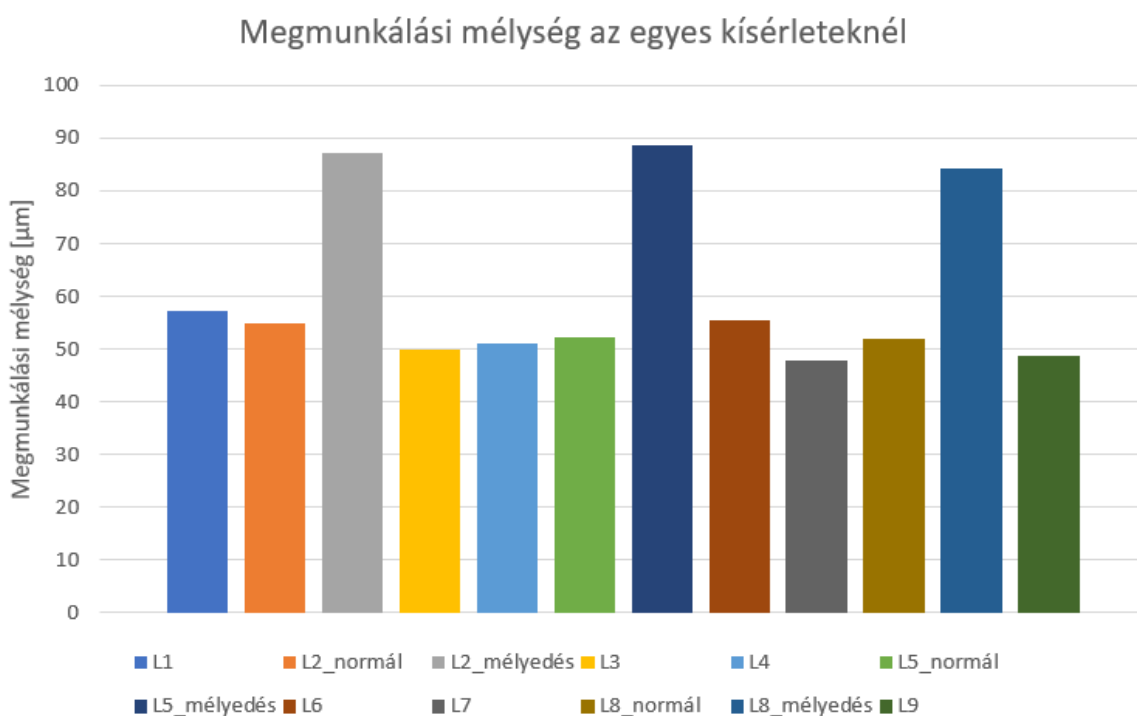


40. ábra: Leszorított, ragasztott próbadarabok

4. Mérések

4.1. Felületi érdesség mérés, profilmélység mérés

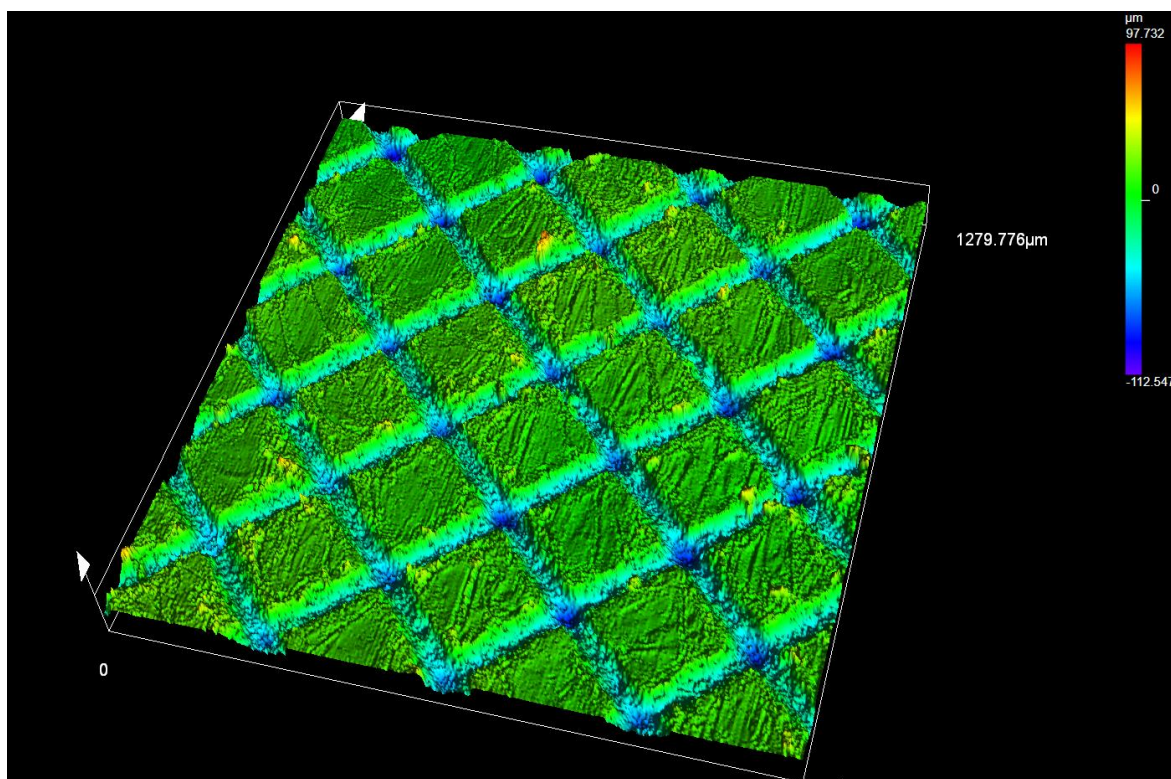
A megmunkálás után a kapott felületeket mikroszkópi vizsgálatoknak vettem alá. A konfokális mikroszkóp programja segítségével kaptam eredményeket, az egységes mérés érdekében mindegyik darabon a 10-as objektívet használtam. A kapott poir kiterjesztésű pontfelhőt a rezgés nagymértékben képes zavarni, ezért mindegyik kísérletnél 9 mérést végeztem el (általában profilmélység mérésnél) felülettől függően, ahol a legnagyobb értéket és a legkisebb értéket kivettem, hogy az átlagolásnál a nagyobb eredmények ne zavarják a kapott eredményt. A kapott eredményeket az 41. ábrán látható diagram foglalja össze.



41. ábra: Megmunkálási mélységek különböző kísérleteknél

A diagram függőleges tengelyén az értékek µm-ben vannak megadva, a színjelölések pedig a kísérletek sorszámait jelöli. Minden egyes keresztsraffozott mintájú kísérletnél az ábrán látható egy normál és egy mélyedés megnevezés is. Ez abból adódik, hogy a megmunkálás folyamán a lézer először mindig az egymással párhuzamos vonalakat készíti el, majd csak ezután jön a más orientáltságú vonal. Ennek következtében a találkozási pontoknál duplán lesz megmunkálva a felület. Ez a mélyedés több felületet biztosít ragasztás során, mely nagyobb feszültségértéket eredményezhet. Erről a mintáról a konfokális

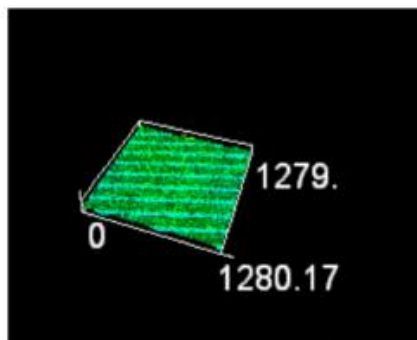
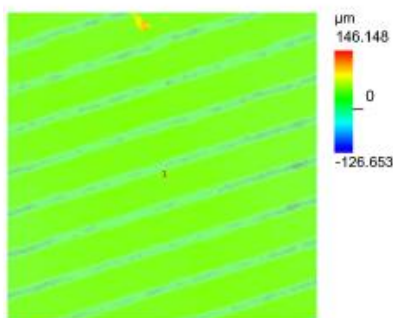
mikroszkóp programjában 3D-s kép is rendelkezésre áll, melyet a 42. ábrán lehet megtekinteni.



42. ábra: A kialakított felület a 2-es kísérletnél

Az ábrán a négyzetformák csúcsinál látható az említett mélyedés. Az egyteljesítményű értékek mélységeit átlagolva kiszámoltam, hogy a 60%-os teljesítménynél 54 μm, 80%-nál 52,72 μm és 100%-nál pedig 49,12 μm a megmunkálási mélység. Ez egy egészen különös jelenség, ugyanis azt vártam volna, hogy a teljesítmény növekedésével a mélység is növekedni fog, ez valószínűleg azzal magyarázható, hogy a mátrixanyag hirtelen megfolyt kissé és az olvadék az árkokba folyva megszilárdult. Ragasztási szilárdságnál így a kisebb teljesítménytől nagyobb erőt fogok várni. A másik dolog, amit a mikroszkóppal meg tudok mérni, az a felületi érdesség. (1. melléklet)

Az érdességmérésre általában használt kontakt mérés adja a legpontosabb értékeket, azonban az érintésmentes mérési módszerek egyre elterjedtebbek, így a konfokális mikroszkópon is éppúgy lehet mérni felületi érdességet, mint koordináta mérőgépen. Előnye, hogy gyorsan mér, viszont negatívumként a nem kívánt rezgéseket lehet említeni. Miután a mikroszkóppal lepásztáztam egy adott területet, majd 3D-s képet generált a program róla, utána pár kattintás után ki is adja az érdességet. Az így kapott eredményről a ad tájékoztatást, melynél nem alkalmaztam szűrést.



[Roughness Settings Information]
 Cutoff: S filter -- μm
 L filter -- μm
 F-operator --
 Load area ratio for V parameter:
 p 10 % q 80 %
 Load area ratio for Sxp parameter:
 p 2.5 % q 50 %
 Correlation threshold c: 0.2
 Filter: Gaussian
 Analysis parameter: Height / Hybrid

No.	Result	Sq[μm]	Ssk	Sku	Sp[μm]	Sv[μm]	Sz[μm]	Sa[μm]	Sdq	Sdr[%]	FOperator	S-filter[μm]	L-filter[μm]
1		20.798	-1.017	3.639	133.126	113.378	246.505	16.821	3.342	143.192	--	-	-

43. ábra: Felületi értékek mérése a konfokális mikroszkópon

Az ábrán látható érdességi értékek S'x' formában vannak megadva, ez a program miatt van, R'x' értékeként kell kiolvasni. A programmal mért értékeket tanulmányozva megállapítható, hogy attól függ, hogy mekkora az érdesség, hogy a felületnek mely részét elemezzük. Azért jutottam erre a következtetésre, mert a legnagyobb felületi érdesség érték éppen a 8-as számú kísérletemnél a legnagyobb, teljesítmény szerint lebontva, átlagolva pedig a 60%-os teljesítménynél a legnagyobb, sőt, van olyan mérés, mely azt mutatja, hogy a hullámforma érdessége nagyobb a keresztirafozotténál (44. ábra).



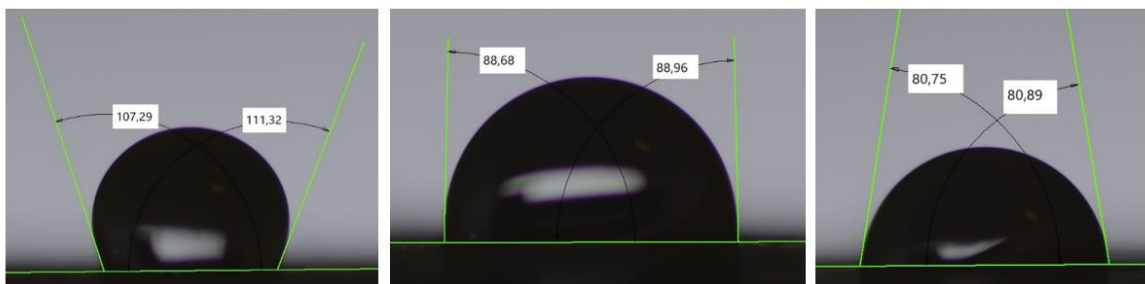
44. ábra: Felületi érdesség értékek az egyes kísérleteknél

Ez annak tudható be, hogy a hullámformánál az egyes függvények egyenlő távolságra való eltolása során vonalsűrűsödések és ritkulások tapasztalhatók. Teljesítmény szerint lebontva az első teljesítménynél 17,04, a másodiknál 16,26 míg a harmadiknál 15,55 μm a felületi érdesség. A mechanikai kapcsolódás szempontjából minél érdekesebb a felület annál

nagyobb erőt képes kibírni a ragasztás, így az első három kísérletnél fogom várni a legnagyobb feszültségeket.

4.2. Cseppentési vizsgálat

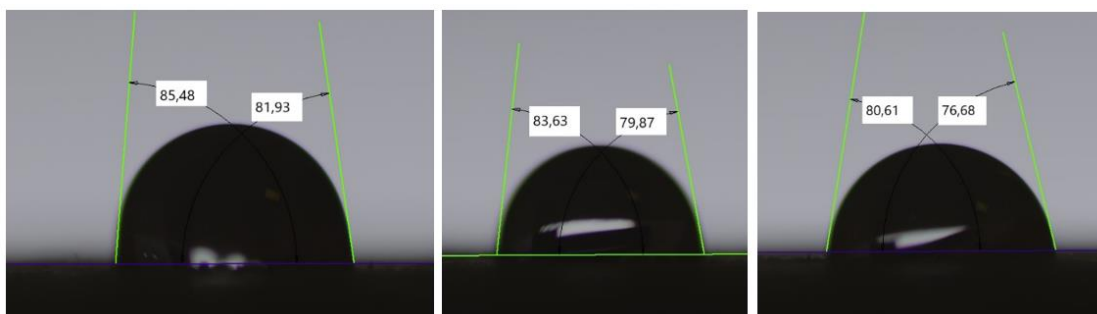
Ennél a vizsgálatnál a felületi energia nagyságát fogom vizsgálni és össze fogom hasonlítani a frissen megmunkált és a már 1 hete megmunkált felületek peremszögértékét. Teljesítmény szerint lebontva a legjobb értékek a 45. ábrán láthatóak a megmunkálás után.



45. ábra: Peremszögértékek megmunkálás után, teljesítmény szerint a legjobbak

Az eredményeket vizsgálva úgy tűnik, hogy szinte minden esetben az egyenes vonallal történő megmunkálás adja a legjobb cseppentési értéket. A képeken látható, nagyjából vízszintes vonalak azért nem vízszintesek, mert a kamerának van egy minimális dőlése, ezeket a vonalakat húzva ez a szög nagyjából $0,4^\circ$ lehet. Cseppentési vizsgálat alapján, ha a folyadékszétterülést nézem és az alapján a várható szilárdsági értéket, akkor a 7-es számú kísérlet fogja a legjobb eredményt adni.

Az energiaváltozást is szerettem volna vizsgálni, ezért újra elvégeztem a méréseket 1 héttel később. A kapott képek alapján úgy tűnik, hogy a megmunkálástól eltelt idő is hatással van a mért peremszög értékre. A legjobb kapott értékeket teljesítmény szerint osztályozva a 46. ábrán lehet látni.



46. ábra: 1 héttel későbbi peremszögek, teljesítmény szerint a legjobbak

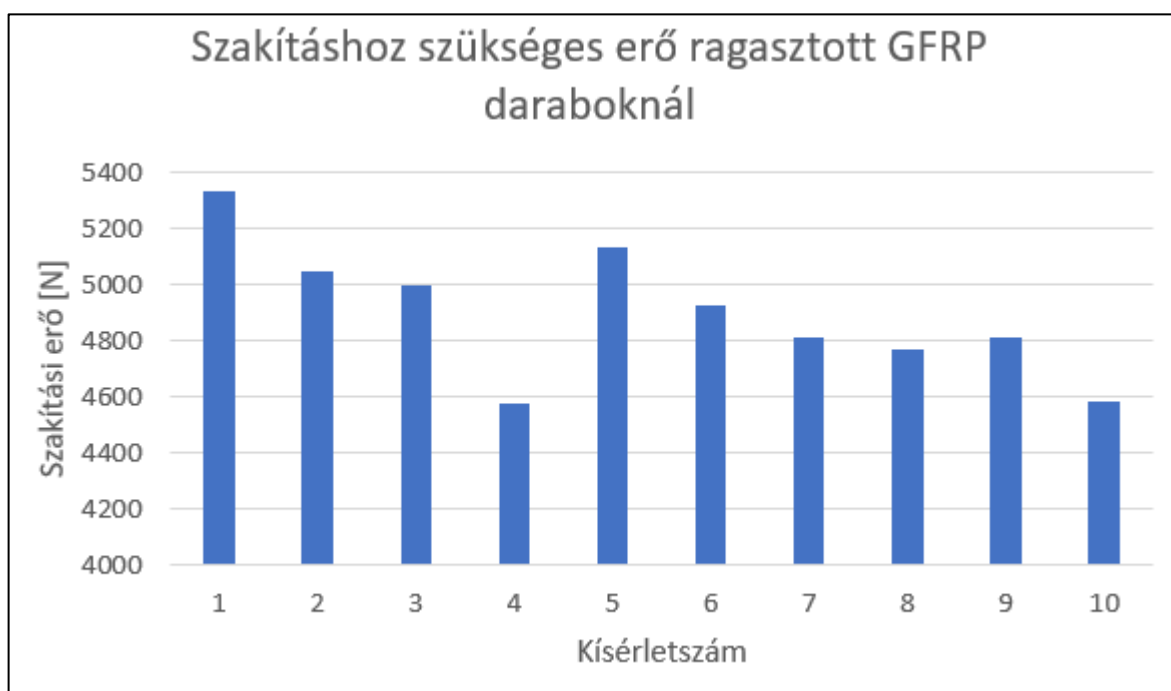
Kiértékelve a kapott értékeket megállapítható, hogy a legszembevetőbb különbség a megmunkálási stratégiáknál van, ahol a vonal minta adja általában a legjobb értékeket, míg

a hullámforma mutatja a legrosszabb eredményt. A hullámformánál pedig valószínűsíthető, hogy nem mindegy, hogy a cseppentés hova kerül, a sűrűbb részekre vagy a ritkább vonalsűrűségű részekre.

További eredmény, hogy az egy héttel későbbi cseppentések lényegesen jobb eredményeket adtak, mint a frissen, megmunkálás után kapottak. Jó cseppentésnek minősül az, ahol a folyadék síkja és a vízszintes sík által bezárt szög az kisebb, mint 90° . Az én esetemben ugyan kisebb értékek lettek, mint az előbb említett szögérték, azonban nem sokkal hagyták el a jó szétterülési zónát.

4.3. Átlapolt ragasztott kötés szakítóvizsgálata

A legértékesebb rész ebben az egész optimalizálásban a szakítóvizsgálat, ahol kiderül, hogy hány százalékkal lesz jobb a kezeletlen felülethez képest. A szakítóvizsgálat végén a 47. ábrán látható diagramban foglaltam össze a kapott eredményeket. (2. melléklet)



47. ábra: Szakítási erők a ragasztott daraboknál

Az utolsó, 10-es számú oszlop a kezeletlen felület elszakításához szükséges erő értékét mutatja. Minden kísérletet tehát ötször végeztem el, hogy az esetleges emberi hibát kiküszöböljem, a legnagyobb és a legkisebb értékeket nem számítottam bele az átlagolásba. A legjobb érték a kezeletlen felülethez képest csak 16%-os javulást eredményezett, mindegyik ragasztásnál adhéziós tönkremeneteleket tapasztaltam. Azonban ezek az értékek csak az erőket adják meg, nem a szakítószilárdságot. Elviekben 25x25 mm területű a ragasztás, de a fűrészelésből adódó oldalferdeségek és a ragasztás folyamán nem eléggé

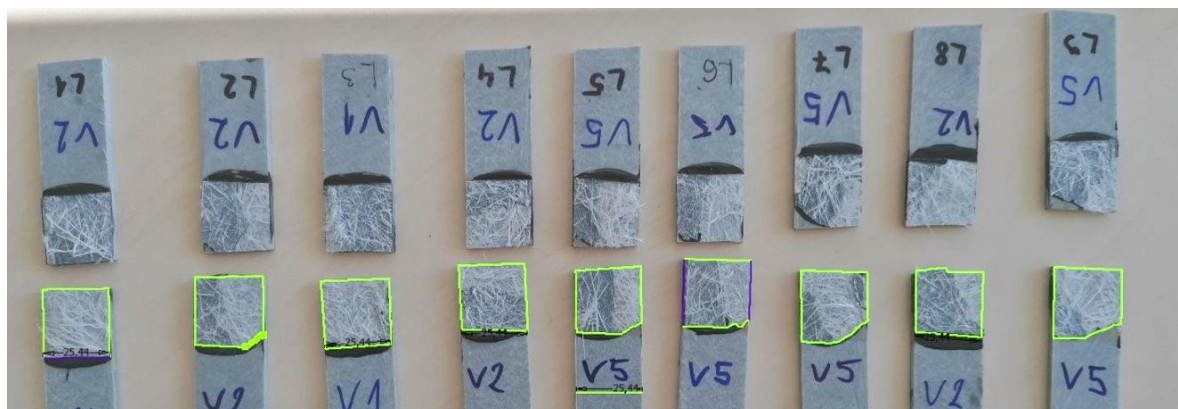
szétterült ragasztó hatására ez az érték változik. A ragasztási területet Inventorban, közelítő vonalakkal, görbékkel határoltam körbe és úgy határoztam meg a felületet. A területet úgy hoztam létre, hogy 15 darabnak lemértem a szélességét és azt átlagoltam, ez az érték 25,44 mm.

Majd ehhez képest a képet megfelelő mértékben lekicsinyítem/nagyítom, hogy a valós területet kapjam meg. Az elszakított darabok a 48. ábrán láthatóak.



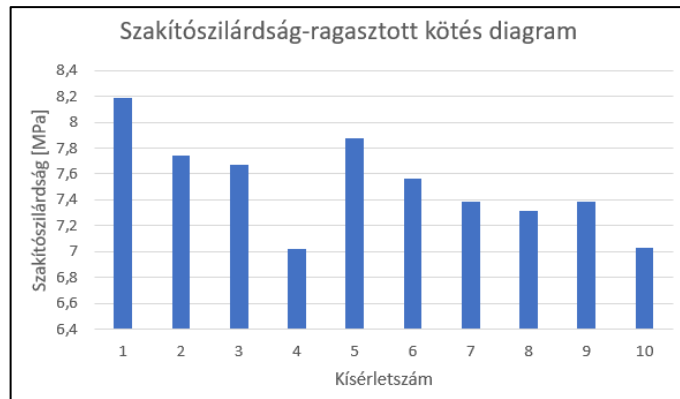
48. ábra: Tönkremeneteli módok az egyes szakításoknál

Az illesztett vonalak pedig a 49. ábrán láthatóak.



49. ábra: Illesztett vonalak az elszakadt felületekre

Ezekből testet készítettem és a felületmérés opció segítségével meghatároztam egy átlagos ragasztott felület nagyságát, ami 651,76. Az így kapott feszültségértékek a 50. ábrán látható táblázatban látható.



50. ábra: Szilárdságértékek MPa-ban

A legnagyobb érték az első kísérletnél figyelhető meg, 8,16 MPa értékkel. Az eredeti, 625 mm felületű ragasztáshoz képest ez az érték kisebb, ennél a felületnél a legnagyobb érték 8,53 MPa lenne.

Szakításkor továbbá azt tapasztaltam, hogy egyik felület se szakadt el teljesen. A tiszta szakításnál nem kell a darabokat kézzel szétszedni, azonban én azt tapasztaltam, hogy a darabokat továbbra is összetartotta a köpeny, melyet a 51. ábrán szemléltetek.



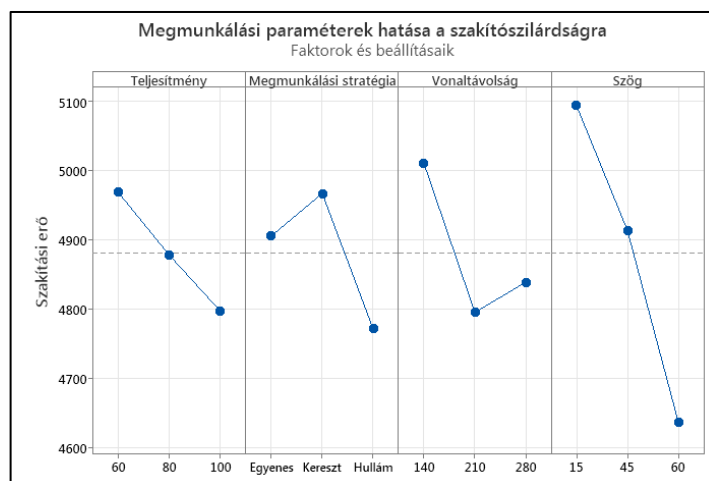
51. ábra: Köpenyszakadás

Ezzel arra a következtetésre jutottam, hogy a köpeny felületén is van valamilyen plusz réteg, amit a zsírtalanítószerrel (acetonnal) nem lehet eltávolítani. A jelenséget látván, így a kísérlettervben nem szerepelt, új mérést is szükségesnek tartok elvégezni. A kísérletben csiszolással kívánom eltávolítani ezt a felső réteget majd zsírtalanítok és ragasztom a darabokat. Az acetonnal való kezelés csiszolás után ugyanúgy szükséges, mert az érdesítés után a felületen szennyeződések maradnak, amit az anyageltávolítás során keletkezik.

5. Mérések kiértékelése, optimalizálás

A kapott eredmények azt mutatják, hogy minden egyes szakításnál a GFRP felületén található üvegfátyol réteg vált le, valószínűsíthető, hogy ha ez a réteg eltávolításra kerül/felsérül, akkor jobb eredményeket lehetne kapni. Ebben az esetben hiába lett zsírtalanítva a felület ragasztás előtt, ez a réteg a helyén maradt, úgymond szennyeződésként, mely rontja a ragasztási szilárdságot, adhéziós tönkremenetelt okozva. Mivel az előzőekben nem lett ez a köpeny felső része eltávolítva, ezért az optimalizált ragasztásnál se fogom ezt eltávolítani, csak azt szeretném megvizsgálni, hogy a Taguchi analízis alapján melyik a kapott eredmények közül a legjobb beállítás, ragasztás szempontjából. Igazam bizonyítására az optimalizált paraméterekkel ellátott darab mellett egy csiszolt felületű darabot is ragasztani fogok.

A Taguchi értékelés eredménye a 52. ábrán látható.



52. ábra Taguchi analízis eredménye

Kiértékelés szerint (53. ábra) az analízis a szöget határozta meg faktorként, ami a legnagyobb befolyással van a kapott erőkre, majd ezt követi a vonaltávolság, a megmunkálási stratégia és a teljesítmény.

Level	Megmunkálási			
	Teljesítmény	stratégia	Vonaltávolság	Szög
1	4969	4906	5010	5094
2	4879	4967	4796	4914
3	4797	4772	4839	4638
Delta	172	195	215	456
Rank	4	3	2	1

53. ábra: Faktorbefolyás a szilárdságra

A szög azért adta a nagyobb értéket, mert a megmunkálási stratégiánál két szint volt, ami 'egyszeri folytonos vonal' volt, a keresztsraffozott vonalnál ez kettő volt és az egyszeri

vonatra nagyobb hatással van a szögváltozás, mint a kétszeri folytonos vonalra. Hozzáteszem, hogy mindegyik minta csak egyszer lett lézerezve és ígyis a legkisebb teljesítményű adta a legnagyobb profilmélységet. Ha a továbbiakban továbbmennék, akkor többször mennék át a felületen, amíg el nem érem a szálakat.

Az optimalizált beállításokat végrehajtva elkészültek a szakítások, ugyanúgy a csiszolt felületnél is, és az 54. ábrán látható eredményeket kaptam, eredmények a 3. mellékletben.



54. ábra: Végleges szakítási erő diagram

A 11-es számú diagram mutatja az optimalizált értékek átlagát, míg a 12-es számú a csiszolt átlagot. Az optimalizált darabok esetében 2 darab volt, ami nagyon eltért a többi háromtól, így ebben az esetben nem a legkisebb és legnagyobb értéket vettem ki az átlagolásból, hanem a két legkisebbet, továbbá az egyik mérésnél (az egyik legkisebb erőt adó szakításnál) megcsúszás volt tapasztalható, nem volt egyenes a szakítódiaagram, ezért ez egy további indok, hogy miért pont ezeket vettem ki. Felületi érdesség és profilmélység mérés szempontjából nem tartottam fontosnak, hogy újra mikroszkóp alá tegyem a darabot, mivel mértem már ehhez hasonló darabot, csak ott nem volt azonos a szögeérték. Cseppentést sem szükséges végezni, mert nincs lineáris összefüggés a peremszögeérték és a szakítási erő között (55. ábra).



55. ábra: Peremszög és szakítási erő kapcsolata

Összefoglalás

Elöljáróban az irodalomkutatásban összegyűjtött forrásokból egész jó eredményeket vártam, bár mindegyik forrásban kézi laminálással készítették el a szálerősített kompozitokat, nagyjából kétszeres erősségű ragasztásra számítottam kezeletlen felülethez képest. Excimer lézeres kezeléseknél érték el közel kétszeres erősségűt is, de annál a technológiánál is volt olyan eredmény, ami csak pár MPa javulást okozott. A femtoszekundumos lézernél jellemző a mostani állás szerint a legnagyobb csúcsteljesítmény és ennél a technológiánál van egyedül 'hideg megmunkálás', azaz kicsi belső feszültség keletkezése a megmunkálás környezetében. Irodalomkutatásomban nem találtam még egy olyan megmunkálást, aminek ilyen kevés az impulzusideje és ilyen nagy a frekvenciája, így egy remek lehetőség volt számomra, hogy egy kis mértékben tanulmányozzam a műanyag kompozitokon a felületkezelést. Az optimalizált darabokon átlagolva 5354 N volt a szakítási erő, kezeletlen felületnél ez az érték 4583 N volt, ami azt jelenti, hogy 16,8%-os javulást sikerült elérni, úgy, hogy közben megállapítottam, hogy a megmunkálási mélység nem érte el a pultrudált üvegszálakat, csak a köpenyben található üvegszálakig hatolt.

Továbbá azt is kikövetkeztettem a kísérletek folyamán, hogy a fátyolrétegen valószínűleg található egy további réteg, melyet zsírtalanítással nem lehet eltávolítani, ragasztás folyamán ez pedig szennyeződésként van jelen, mert nincs akkora adhéziós ereje a szomszédos rétegekkel, hogy szakítás folyamán ez a helyén maradjon. Csiszolással ezt a réteget eltávolítottam és így egy 5563 N-os átlagolt szakítási erőt sikerült elérni, melynél volt olyan darab is, ahol ez az erő elérte a 5835 N-os értéket is. Csiszolásnál nem tulajdonítottam jelentőséget a csiszolópapír minőségére, nekem az volt a lényeg, hogy egy durvább papír legyen, elvégre az volt a fő szempont, hogy ezt a felső réteget eltávolítsam.

Az ipar számára a lézeres felület előkezelés egy jó alternatíva lehet más érdesítő eszközök helyettesítésére, mert a megmunkáláskor nem keletkezik erő, így nem igényel leszorítást és forgács nem keletkezik, hanem a felesleges anyag elpárolog, egy jól beállított technológiánál pedig a létrejött árkok szélein pedig nem marad fröccsenésnek nyoma.

További kísérletek végezhetők pultrudált GFRP anyagokkal, lézerral történő felület előkezeléssel, ahol a felületet megmunkálás előtt lecsiszolják, és több lépcsőfokban történik a lézerezés, azaz a lézer többször megy végig a mintán, így növelve a mélységet.

Summary

In the forefront of literature research, I expected quite good results from the sources gathered, although all the sources had hand-laminated fiber-reinforced composites. I anticipated roughly twice the strength in adhesive properties compared to untreated surfaces. With excimer laser treatments, they achieved almost double the strength, but there were instances in this technology where it only caused a minor improvement of a few MPa.

The femtosecond laser stands out for currently having the highest peak performance. This technology uniquely involves 'cold machining,' resulting in minimal internal stress in the machining environment. In my literature research, I haven't encountered another process with such a short pulse duration and high frequency. Hence, it was an excellent opportunity for me to study surface treatments on plastic composites to some extent.

On optimized pieces, the average tensile strength was 5354 N, whereas on untreated surfaces, it measured 4583 N, signifying a 16.8% improvement. Meanwhile, I observed that the machining depth didn't reach the pultruded glass fibers but only penetrated up to the glass fibers in the shell.

Furthermore, during the experiments, I inferred the likely presence of an additional layer within the veil layer, which couldn't be removed through degreasing. During adhesion, this seems to act as contamination due to its lack of adhesive strength with neighboring layers, causing it to remain in place during breakage. I removed this layer through grinding, resulting in an averaged tensile strength of 5563 N, with some samples reaching 5835 N. During grinding, the quality of the sandpaper wasn't a significant concern for me; the main aim was to remove this upper layer.

For the industry, laser surface pretreatment could serve as a viable alternative to other roughening tools because it doesn't generate force during machining, eliminating the need for clamping and preventing chip formation. Instead, excess material evaporates, and with a well-tuned technology, there's no evidence of splatter along the edges of the created gaps.

Further experiments can be conducted on pultruded GFRP materials using laser surface pretreatment, where the surface is grinded before machining, and the laser passes through the sample in multiple steps, increasing the depth.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásom során köszönetet szeretnék mondani Vaczkó Dániel tanársegédnek, konzulensemnek témám végigvezetésében való segédkezéséért, Kovács Péter tanszéki mérnöknek, a cseppentési és szakítási mérésekben való segítségéért, Juhász Gergely, Tajti Ferenc és Könyves Zsolt tanszéki mérnököknek a lézeres megmunkálásban való segédkezésért, Bognár Adrián tanszéki mérnöknek a konfokális mikroszkópi mérésekben való segítségnyújtásáért és Dr. Berczeli Miklós adjunktusnak a szakmai tanácsadásáért.

Külön köszönetet szeretnék mondani az Avius Kft-nek az alapanyag biztosításáért.

Irodalomjegyzék

- [1] . T. Czvikovszky, P. Nagy és J. Gaál, A polimertechnika alapjai, Budapest: Műegyetemi kiadó, 2000.
- [2] D. H. Hajnalka, „Docplayer,” 19 10 2011. [Online]. Available: <https://docplayer.hu/13816530-Polimer-kompozitok-alapanyagai-tulajdonsagai-kompozitmechanikai-alapok.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 augusztus 2023].
- [3] E. Composites, „What is pultrusion, pull-winding, and continuous lamination? How do they work?,” 4 március 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=DJUIRhBxejc>. [Hozzáférés dátuma: 3 szeptember 2023].
- [4] Avius. [Online]. Available: <https://avius.hu/wp-content/uploads/2023/07/Alkalmaz%C3%A1si%20ter%C3%BCletek.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 5 szeptember 2023].
- [5] Machining4. [Online]. Available: https://www.machining4.eu/Technology-Sheets/Machining_CFRP_GFRP_Composite_material. [Hozzáférés dátuma: 9 szeptember 2023].
- [6] MIYABI. [Online]. Available: <https://www.miyabifrp.com/2019/10/22/application-of-frp-in-medical-devices/>. [Hozzáférés dátuma: 9 szeptember 2023].
- [7] C. McPhee, J. Reed és I. Zubizarreta, „Wettability and Wettability Tests. Core Analysis - A Best Practice Guide,” *Developments in Petroleum Science*, %1. kötet64, pp. 313-345, 2015.
- [8] L. Zhao, Y. Li, M. Yu, Y. Peng és F. Ran, „Electrolyte-Wettability Issues and Challenges of Electrode Materials in Electrochemical Energy Storage, Energy Conversion, and Beyond,” 2023. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202300283>. [Hozzáférés dátuma: 3 november 2023].
- [9] F. Fischer, S. Kreling, P. Jäschke, M. Frauenhofer, D. Kracht és K. Dilger, „Laser Surface Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding in Consideration of the Absorption Behaviour,” *The Journal of Adhesion*, %1. kötet88, pp. 350-363, 2012.
- [10] B. Miklós, Szerző, *Nagyteljesítményű lézersugaras technológiák*. [Performance]. 2022.
- [11] O. Çoban, E. Akman, M. Ö. Bora, B. Genc Oztoprak és A. Demir, „Laser Surface Treatment of CFRP Composites for a Better Adhesive Bonding Owing to the Mechanical Interlocking Mechanism,” *Polymer Composites*, %1. kötet40, pp. 3611-3622, 2019.
- [12] E. Akman, Y. Erdoğan, M. Ö. Bora, O. Çoban, B. G. Oztoprak és A. Demir, „Investigation of the differences between photochemical and photothermal laser ablation on the shear strength of CFRP/CFRP adhesive joints,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, %1. kötet98, %1. szám102548, 2020.
- [13] S. J. Lim, J. Cheon és M. Kim, „Effect of laser surface treatments on a thermoplastic PA 6/carbon composite to enhance the bonding strength,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, %1. kötet137, %1. szám105989, 2020.
- [14] T. Yokozeiki, M. Ishibashi, Y. Koboyashi, H. Shamoto és Y. Iwahori, „Evaluation of adhesively bonded joint strength of CFRP with laser treatment,” *Advanced Composite Materials*, %1. kötet25, pp. 317-327, 2016.
- [15] F. L. Palmieri, M. A. Belcher, C. J. Wohl, K. Y. Blohowiak és J. W. Connell, „Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy

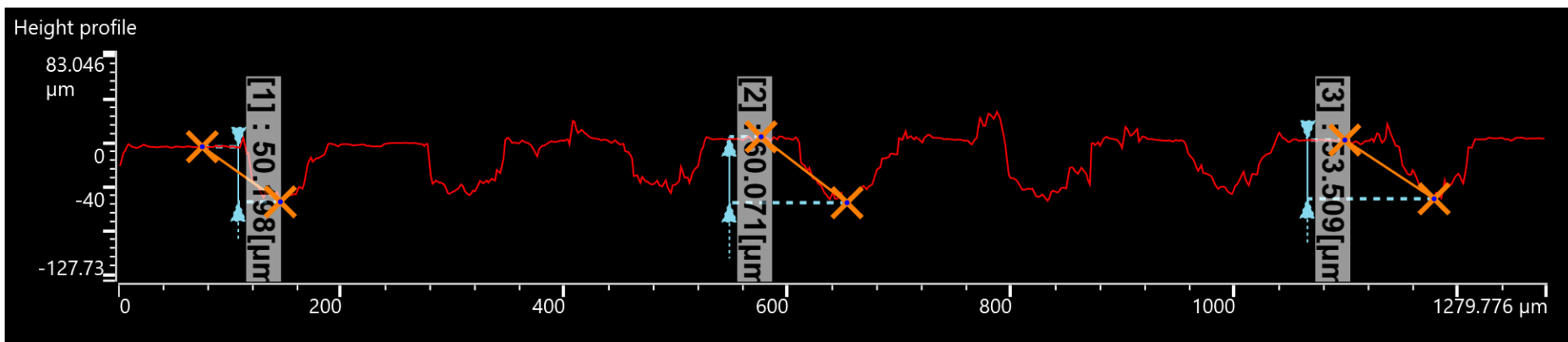
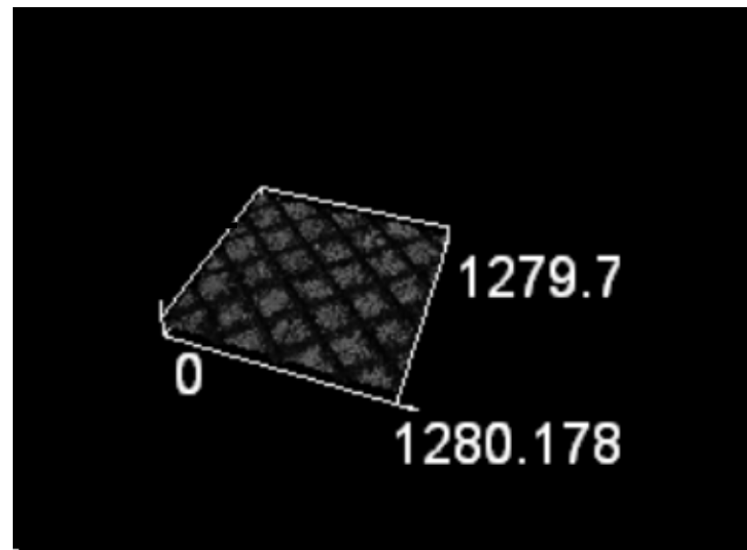
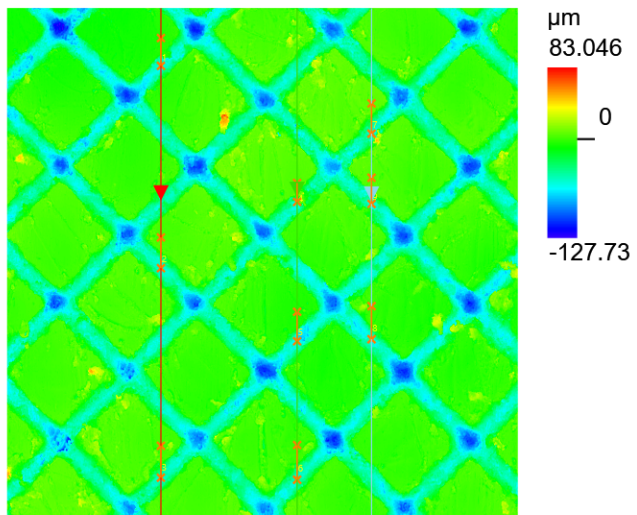
- composites,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, %1. kötet68, pp. 95-101, 2016.
- [16] H. Wang, X. Tong, Y. Chen, L. Hua, M. Wu és W. Ji, „Study on ultrasonic vibration-assisted adhesive bonding of CFRP laminates with laser ablation-treated surfaces,” *Composite Structures*, %1. kötet268, %1. szám113983, 2021.
- [17] Q. Bénard, M. Fois, M. Grisel és P. Laurens, „Surface treatment of carbon/epoxy and glass/epoxy composites with an excimer laser beam,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, %1. kötet26, pp. 543-549, 2006.
- [18] F. Fischer, S. Kreling és K. Dilger, „Surface Structuring of CFRP by Using Modern Excimer Laser Sources,” *Physics procedia*, %1. kötet39, pp. 154-160, 2012.
- [19] T. C. Alderucci, C. Borsellino és G. Di Bella, „Effect of surface pattern on strength of structural lightweight bonded joints for marine applications,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, %1. kötet117, %1. szám103005, 2022.
- [20] D. W. Klára, „Kísérletek tervezése taguchi módszerrel,” 2013. [Online]. Available: <https://docplayer.hu/45687927-Kiserletek-tervezese-taguchi-modszerrel.html>. [Hozzáférés dátuma: 21 szeptember 2023].
- [21] Coherent, „Monaco 1035 Industrial Femtosecond Laser,” [Online]. Available: <https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/monaco-1035-ds.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 27 szeptember 2023].
- [22] Olympus-IMS, „LEXT™ OLS5100 3D Laser Scanning Microscope,” [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/microscopes/laser-confocal/ols5100/>. [Hozzáférés dátuma: 28 szeptember 2023].
- [23] N. J. Egyetem, „Fémtechnológiai eszközök - Instron,” [Online]. Available: <https://ijat.hu/eszkozeink>. [Hozzáférés dátuma: 29 szeptember 2023].
- [24] SikaPower, „SikaPower 4720 Kétkomponensű, nagyszilárdságú szerkezeti elem ragasztó,” [Online]. Available: https://hun.sika.com/dam/dms/hucon/d/sikapower_4720_hu0314ta.pdf. [Hozzáférés dátuma: 1 október 2023].

Ábrajegyzék

1. ábra: A szál és mátrix hatása a nyúlásra és a feszültségre [2]	3
2. ábra: Szálátmérő hatása a szakítószilárdságra [2]	4
3. ábra: Rovingolt üvegszál [1].....	5
4. ábra: Különböző szálak mechanikai tulajdonságai [2]	5
5. ábra: Pultrudálás folyamata [1].....	6
6. ábra: Tekercselés folyamata [1].....	8
7. ábra: Pultrudált profilok tulajdonságai [4]	8
8. ábra: Boeing repülőgép építőelemeinek anyagai [5]	9
9. ábra: Hegesztési eljárások műanyagoknál [1]	10
10. ábra: Peremszögmérés bemutatása [7]	11
11. ábra: Lehetséges cseppformák különböző felületeken [8]	12
12. ábra: Csiszolás hatása a szálakra [9].....	13
13. ábra: Lézernyaláb létrejötte [10].....	13
14. ábra: Lézer csoportosítása hullámhosszúság szerint	14
15. ábra: Lézerkezelte felület [11].....	15
16. ábra: Megmunkálás irányának hatása a feszültségre és a megmunkálás szélességére [11]	16
17. ábra: Teljesítménysűrűség hatása a peremszögre [12]	17
18. ábra: Ragasztás lehetséges tönkremeneteli módjai [14]	18
19. ábra: Pulzusidő hatása a megmunkálási felületre [9]	19
20. ábra: SEM által vizsgált, lézerezett felület [9]	19
21. ábra: Szerkezeti struktúra lézeres felületkezelésnél [15].....	20
22. ábra: Öregbítés hatása a ragasztási szilárdságra [15]	21
23. ábra: Kísérletterv kiértékelése Taguchi analízissel [16].....	21
24. ábra: Vibrációval segített ragasztás szemléltetése [16]	22
25. ábra: Felületi struktúra különböző lézerbeállításoknál [17]	23
26. ábra: Szakítási erők GFRP (bal) és CFRP (jobb) ragasztásnál [17].....	23
27. ábra: Nyírófeszültségek és nyúlások értékei a beállítások függvényében [18]	24
28. ábra: Megmunkálás és szakítás által bezárt szög hatása a terhelőerőre [19].....	25
29. ábra: 4 faktoros, 3 szintes kísérletterv [20]	26
30. ábra: Monaco femtoszekundumos lézer	27
31. ábra: Impulzusidő hosszának hatása a megmunkálási felületre [10].....	27
32. ábra: Konfokális mikroszkópi mérés	28
33. ábra: Szakítógép és a rajta található munkadarab befogók.....	29
34. ábra: Cseppentési vizsgálat eszközei	30
35. ábra: Próbatetek illesztése ragasztásnál	31
36. ábra: Minitab által generált kísérletterv	34
37. ábra: Szinuszfüggvény beállításai	34
38. ábra: Szinuszfüggvény nyers formában és méretre vágva	35
39. ábra: Kompozit megmunkálás közben	36
40. ábra: Leszorított, ragasztott próbadarabok	36
41. ábra: Megmunkálási mélységek különböző kísérleteknél	37
42. ábra: A kialakított felület a 2-es kísérletnél.....	38
43. ábra: Felületi értékek mérése a konfokális mikroszkópon	39
44. ábra: Felületi érdesség értékek az egyes kísérleteknél	39
45. ábra: Peremszögértékek megmunkálás után, teljesítmény szerint a legjobbak	40
46. ábra: 1 héttel későbbi peremszögek, teljesítmény szerint a legjobbak	40
47. ábra: Szakítási erők a ragasztott daraboknál.....	41
48. ábra: Tönkremeneteli módok az egyes szakításoknál.....	42

49. ábra: Illesztett vonalak az elszakadt felületekre	42
50. ábra: Szilárdságértékek MPa-ban	43
51. ábra: Köpenyszakadás	43
52. ábra Taguchi analízis eredménye	44
53. ábra: Faktorbefolyás a szilárdságra	44
54. ábra: Végleges szakítási erő diagram	45
55. ábra: Peremszög és szakítási erő kapcsolata.....	45

Report Title



2. melléklet

Szak_vizsg_v1		_1	_2	_3
	Megnevezés	Max terhelés	Nyúlás max. terhelésnél	Szakítószilárdság max. terhelésnél
		(N)	(mm)	(MPa)
1	l1_v1	5703	3,426	9,1248
2	l1_v2	5392	1,225	8,6272
3	l1_v3	4806	1,086	7,6896
4	l1_v4	5274	1,337	8,4384
5	l1_v5	5338	1,297	8,5408
6	l2_v1	5087	2,474	8,1392
7	l2_v2	5575	1,172	8,92
8	l2_v3	5199	1,157	8,3184
10	l2_v4.1	4964	1,21	7,9424
11	l2_v5	4984	1,212	7,9744
12	l3_v1	5845	2,192	9,352
13	l3_v2	4949	1,082	7,9184
14	l3_v3	4984	1,095	7,9744
15	l3_v4	4911	1,111	7,8576
16	l3_v5	5070	1,109	8,112
17	l4_v1	4867	1,452	7,7872
18	l4_v2	4600	1,242	7,36
19	l4_v3	4705	1,025	7,528
20	l4_v4	4413	2,126	7,0608
21	l4_v5	4396	0,882	7,0336
22	l5_v1	5279	1,147	8,4464
23	l5_v2	5209	1,19	8,3344
24	l5_v3	4844	1,182	7,7504
25	l5_v4	5253	1,331	8,4048
26	l5_v5	4913	1,099	7,8608
27	l6_v1	4893	1,24	7,8288
28	l6_v2	5215	4,511	8,344
29	l6_v3	5137	1,49	8,2192
30	l6_v4	5644	3,343	9,0304
31	l6_v5	4758	1,137	7,6128
32	l7_v1	4874	1,199	7,7984
33	l7_v2	4217	1,009	6,7472
34	l7_v3	4710	1,256	7,536
35	l7_v4	4850	1,147	7,76
36	l7_v5	5576	1,914	8,9216
37	l8_v1	4599	1,323	7,3584
38	l8_v2	5107	1,166	8,1712
39	l8_v3	4641	1,105	7,4256
40	l8_v4	4916	1,273	7,8656
41	l8_v5	4745	1,522	7,592
42	l9_v1	5695	2,1	9,112
43	l9_v2	4919	1,151	7,8704
44	l9_v3	4892	1,359	7,8272
45	l9_v4	4418	1,283	7,0688
46	l9_v5	4633	1,201	7,4128

3. melléklet

Szak_vizsg_v2		_1	_2	_4
	Megnevezés	Max. terhelés	Nyúlás max. terhelésnél	Szakítószilárdság max. terhelésnél
		(N)	(mm)	(MPa)
1	O1	5053	1,226	8,0848
2	O2	5394	1,169	8,6304
3	O3	5130	0,986	8,208
4	O4	4962	1,051	7,9392
5	O5	5539	1,197	8,8624
6	Cs_v1	5448	1,166	8,7168
7	Cs_v2	5406	1,158	8,6496
8	Cs_v3	5845	1,248	9,352
9	Cs_v4	5835	1,169	9,336
10	Cs_v5	5291	1,107	8,4656