



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

BAZALTTAL ERŐSÍTETT POLITEJSAV KOMPOZIT
KÖTÉSTECHNOLÓGIAI LEHETŐSÉGEI ÉS VIZSGÁLATUK

TDK DOLGOZAT

FEHÉR MÁTÉ

Msc I. évfolyam

KONZULENS:
DR. KISS ZOLTÁN
ADJUNKTUS

2014

Tartalomjegyzék

Jelölés- és rövidítésjegyzék	4
1. Bevezetés.....	5
2. Irodalomkutatás	6
2.1. Biopolimerek bevezetés.....	6
2.2. Biopolimerek fogalma	6
2.3. Politejsav	8
2.4. Bazaltszál.....	10
2.5. Bazalttal erősített politejsav kompozit	12
2.6. Polimerek kötési technológiái	12
2.7. Hegesztett kötés.....	13
2.7.1. Hővezetési hegesztési eljárások.....	14
2.7.2. Mechanikai súrlódásos hegesztés	16
2.7.3. Sugárzásos hegesztések	17
2.8. Ragasztás	20
2.9. Polimer kompozitok hegesztése, ragasztása	23
3. Kísérleti rész.....	24
3.1. Felhasznált anyagok	24
3.2. Felhasznált berendezések és eszközök	25
3.3. Alapanyaggyártás	28
3.5. Előkísérletek	30
3.6. Kísérletek, vizsgálati módszerek	34
3.7. Kiértékelés alapösszefüggései	42
4. Eredmények.....	44
4.1. Lézerhegesztéssel létrehozott varratok minősítése	44
4.2. Forrógázos hegesztéssel létrehozott varratok minősítése	46
4.3. Kavaró dörzshegesztéssel létrehozott varratok minősítése	48
4.4. Ragasztott kötés minősítése.....	50
4.5. Ultrahanghegesztéssel létrehozott varratok minősítése	52
4.6. Kötéstechnológiák összehasonlítása.....	53
5. Összefoglalás.....	56
Irodalomjegyzék.....	58

Jelölés- és rövidítésjegyzék

PLA – poly(lactic acid), politejsav

BF – basalt fiber, bazaltszál

PDLLA – poli-D,L-tejsav

PLLA – poli-L-tejsav

SiO₂ – szilícium-dioxid

Al₂O₃ – alumínium-oxid

TiO₂ – titán-dioxid

Fe₂O₃ – vas(III)-oxid

MgO – magnézium-oxid

CaO – kalcium-oxid

K₂O – kalium-oxid

Na₂O – nátrium-oxid

FeO – vas(II)-oxid

Nd:YAG – neodímium adalékolt ittrium-alumínium-gránit

Nd: YLF – neodímium adalékolt ittrium-lítium-fluorid

ABS – akrilnitril-butadién-sztirol

DVS – Német Hegesztési Szövetség

F – az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajláshoz vagy töréshez tartozó erő

L – az alátámasztási távolság

b – a hajlítandó próbatest szélessége

h – a hajlítandó próbatest vastagsága

σ_{bh} – hajlítószilárdság

s – a maximális erőhöz tartozó lehajlás

Φ – jósági fok

σ_a – alapanyag hajlítószilárdsága

σ_h – hegesztett kötés hajlítószilárdsága

1. Bevezetés

„Földünk, a műanyag bolygó” 2009-ben vászonra került film címe is arról tesz bizonyosságot, hogy manapság már az életünk szinte elképzelhetetlen műanyagok nélkül. Talán már észre sem vesszük, de gondoljunk csak bele: reggel a polimer burkolatú ébresztőóra vagy telefon csörgésére kelünk és este lefekvéskor a lámpát szintén műanyag kapcsolóval oltjuk le. Életünk részévé váltak, nem lehet megkerülni őket. Azonban a nagymértékű elterjedésük nagy felelősséggel is jár: fel tudjuk-e úgy használni a kedvező tulajdonságú polimereket, hogy közbe ne veszélyeztessük környezetünket? A válasz: igen, a megfelelő alapanyagok megválasztásával és a helyes gondolkodásmód kialakításával.

Napjainkban kiemelten fontos, hogy környezettudatos gondolkodásmód kialakításával Földünket védjük és a fenntartható fejlődés elve alapján éljük a mindennapjainkat. A biológiailag lebontható polimerek bár beleillenek ebbe a filozófiába, azonban vannak olyan felhasználási területek, ahol elengedhetetlenek a nagyobb teherbírású, szívósabb vagy szilárdabb polimerek, és ezeket az igényeket sok esetben a biopolimerek nem, vagy csak nagyon magas áron tudják kielégíteni. Ennek megoldása a biokompozitok gyártása, ahol a szívós mátrix egy biodegradábilis polimer, az erősítőanyag pedig ideális esetben valamilyen természetes szál, szövet, pamut, stb.

Az egyre komplexebb műanyag termékek gyártásának következtében napjainkra már iparágak épültek ki a sok kis alkatrész egy termékévé való egyesítésére, így jelentőségüket nem lehet kétségbe vonni, lényeges ezen technológiák (illesztések, ragasztások, hegesztések) ismerete, fejlesztése is.

Szakedolgozatom folytatásaként bazaltszállal erősített politejsav biopolimer kötéstechológiáival és azok összehasonlításával foglalkozom. A dolgozat első részében a megújuló energiaforrásokból előállított biológiailag lebomló polimerek, azon belül is részletesen a kukoricakeményítőből készült politejsav műanyag ismertetését tűztem ki célul. Ezt követően a bazaltszál tulajdonságainak és a fent említett „zöld” polimerrel alkotott kompozitjának ismertetése következik. A műanyagok kötéstípusai közül nagyító alá kerülnek a hegesztett kötések, továbbá a ragasztás is, mint manapság a polimereknél széles körben alkalmazott kötéstechológia. Munkám második részében az erősítetlen, valamint 30 tömegszázalékban bazaltszállal erősített PLA (polylactic-acid, magyarul politejsav) hegesztésének, valamint ragasztásának eredményességére, hajlító- és szakítóvizsgálati eredményeinek közlésére, következtetések levonására kerül sor.

2. Irodalomkutatás

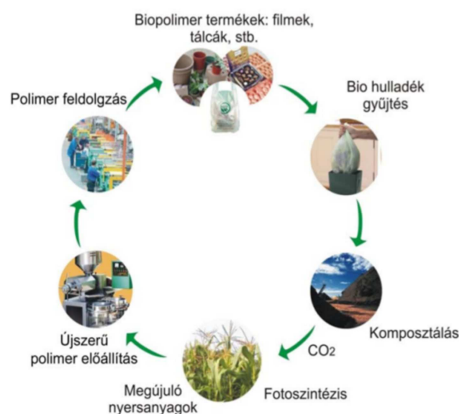
2.1. Biopolimerek bevezetés

Napjainkban különösen nagy figyelmet kell fordítanunk a környezettudatos, fenntartható fejlődés jegyeit tükröző életmód kialakítására. Ezt nemcsak a szelektív hulladékgyűjtéssel és a károsanyag-kibocsátás csökkentésével tehetjük meg, hanem mindennapi használati eszközeink anyagának, gyártástechnológiájának és felhasználásának is illeszkednie kell ebbe a gondolkodásmódba. Az iparban alkalmazott technológiák folyamatos fejlődése és a kutatások mára lehetővé tették, hogy a mindennapjaink részét képező műanyag tárgyak alapanyaga kőolaj helyett valamilyen megújuló erőforrás legyen - mindezt úgy, hogy előnyös tulajdonságaik nem maradnak el korábban alkalmazott fosszilis energiaforrás alapú társaiktól.

A kőolajkészletek folyamatos csökkenése és (ezzel párhuzamosan) árának növekedése követelte meg olyan műanyagok előállítását, amelyeknek alapanyaga megújuló forrásból származik, melynek mennyisége kielégítő és állandó minősége fenntartható. Manapság a bioműanyagok alapanyagának legnagyobb része mezőgazdasági eredetű (burgonya, kukorica, cukornád), amelyek bár korlátozottan, de elméletileg végtelen ideig elérhetők (az élelmiszeripart nem fenyegetve). [1]

2.2. Biopolimerek fogalma

Biopolimereknek nevezzük azokat a polimereket, amelyeknek építőelemei valamilyen élő szervezetből származnak, előállításuk nem terheli a környezetet, valamint megfelelő körülmények között képesek lebomlani és szerves összetevőire esve visszakerülni a természeti körforgásba úgy, hogy a környezetet nem terhelik a bomlás során keletkezett káros, mérgező anyagokkal. A biopolimerek ideális életciklusa az 1. ábrán látható.



1. ábra: Biopolimerek ideális életciklusa [2]

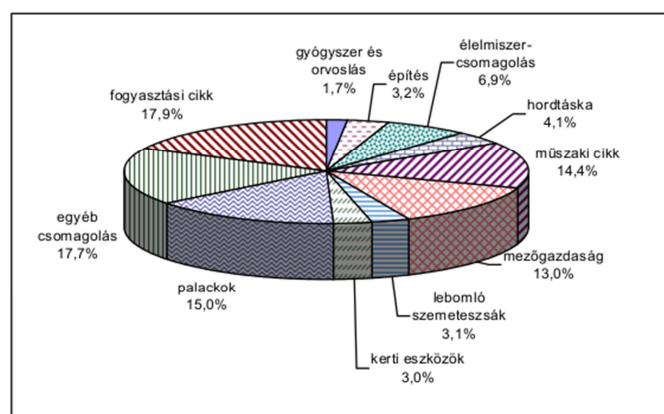
A biopolimereket a következőképpen csoportosíthatjuk:

- növényi vagy állati eredetű fehérje bázisúak
- poliszacharid bázisúak
- lignin alapúak
- fermentációval monomerekből előállított biopolimerek (ide tartozik a PLA is) [3]

A lebontható polimereknek számos előnye is bizonyítja jelentőségüket és elterjedésük fontosságát:

- előállításuk nem kőolajból, hanem megújuló erőforrásból történik,
- a növényi alapú biopolimerek gyártásához szükséges alapanyag földterület-igénye csekély és annak minőségére sem érzékenyek,
- a környezettudatos gondolkodásmód sémájába beleillik, hogy a termék „élete” végén (ha a megfelelő környezet biztosítva van) vízre, szén-dioxidra és humuszra, ill. biomasszára bomlik,
- életciklusuk CO₂-semleges, mivel az elbomlásuk vagy elégetésük során felszabaduló szén-dioxid mennyisége megegyezik annak a levegőnek a szén-dioxid mennyiségével, amiből a biomassa a felépítéséhez szükséges szént felveszi
- feldolgozásuk nem igényel más, bonyolultabb technológiát, mint kőolaj alapú társaik,
- gyártásuk kevésbé energiaigényes, mint a hagyományos műanyagoké,
- mechanikai tulajdonságaikban és árukban a fosszilis alapú műanyagokkal versenyeznek,
- orvostechnikai alkalmazás esetén felszívódó implantátumok alapanyagai lehetnek,
- műszaki célra erősítőanyaggal alkotott kompozitjaik kiválóan alkalmazhatóak. [2][4]

A 2. ábrán látható a biopolimerek sokrétű felhasználási módja:



2. ábra: A biopolimerek tömeg szerinti eloszlása 2011-ben a különböző alkalmazási területek között [4]

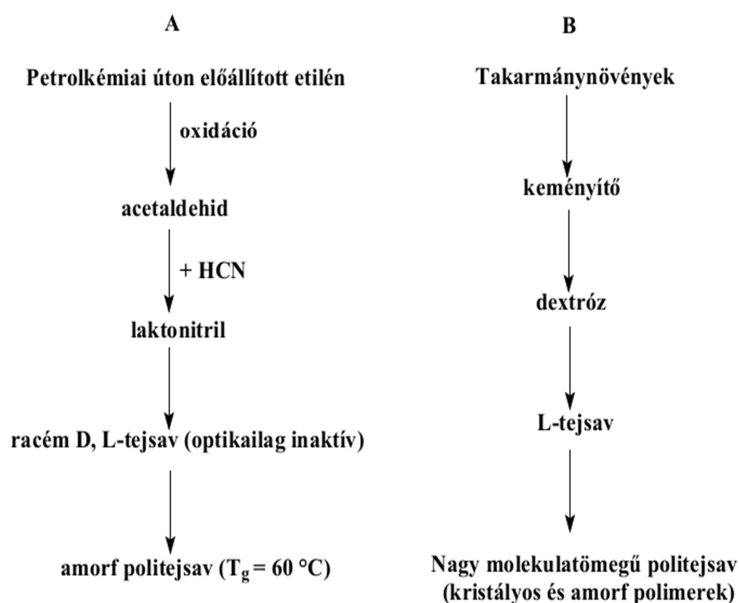
2.3. Politejsav

A politejsav (PLA, polylactic-acid) napjainkban egyre inkább teret nyerő biodegradábilis (lebontható) műanyag. Legfőbb előnye, hogy kőolaj helyett megújuló energiaforrásból származik, így a fenntartható fejlődés eszméjébe illeszkedve a „hagyományos” műanyagokhoz hasonló tulajdonságú, de környezetbarát termékek készíthetők belőle.

Előállítása:

A politejsav alapja a tejsav, ami ebben a formában a természetben is megtalálható: emlősöknél a nagy izommunka következtében keletkező vegyület, melyet hétköznapiabban néven izomláznak hívunk. Ezen kívül tejben és tejtermékekben a cukor savvá (tejsavvá) alakul, illetve uborka, káposzta savanyítása is a tejsav képződésén alapul. [5][6]

„A politejsavat laktidból gyűrűfelnyílasos polimerizációval vagy tejsav monomerből (D,L- vagy L-) polikondezációval lehet előállítani.” [7] Előállításának két módját a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: Politejsav előállítása petrokémiai úton (A), illetve takarmánynövényekből (B) [6]

A politejsav ipari mennyiségű tömeggyártása annak következtében valósulhatott meg, hogy a korábbi igen drága eljárást (amellyel D,L-tejsavat, majd poli-D,L-tejsavat állítottak elő), felváltotta a takarmánynövényekből új technológiával előállított L-tejsav gyártás, melyből poli-L-tejsavat hoztak létre. A kétféle politejsav rövidítése PDLLA, illetve PLLA, attól függően, hogy a tejsav mely izomerjeiből származik. [5] [6]

Tulajdonságai:

A bioműanyagok közül a leginkább elterjedt a PLA, ami nem véletlen: tulajdonságaiban a poliészter és a polisztirol vetélytársa. Kitűnően használható termékek csomagolására, mivel nem eresztí át az aromákat és ízanyagokat, átlátszó, olajnak és zsírnak egyaránt ellenáll és jó vízgőzáteresztő. Feldolgozás szempontjából nem kell külön berendezés, hagyományos műanyag termékek gyártására használt gépekkel feldolgozható. [8]

A PLA főbb tulajdonságai a 4. ábrán láthatók.

<i>Sűrűség</i>	1,21-1,25 g/cm ³
<i>Ár</i>	493-542 Ft/kg
<i>Legfőbb gyártók</i>	NatureWorks PLA, B OPLA, LACEA
<i>Összegképlete</i>	(C ₃ H ₄ O ₂) _n
<i>Rugalmassági modulus</i>	3,45-3,83 GPa
<i>Poisson-tényező</i>	0,38-0,4
<i>Folyáshatár</i>	48-60 MPa
<i>Szakítószilárdság</i>	48-60 MPa
<i>Nyúlás</i>	2-6 %
<i>Olvadáspont</i>	160-178 °C
<i>Üvegesedési hőmérséklet</i>	56-58 °C
<i>Átlátszóság</i>	Transzparens
<i>Éghetőség</i>	Rendkívül gyúlékony
<i>UV ellenálló képesség</i>	Jól ellenáll
<i>CO₂ lábnyoma</i>	2,25-2,48 kg/kg

4. ábra: PLA legfőbb tulajdonságai [9]

Alkalmazása, felhasználása:

A politejsavnak, mint biológiailag lebomló műanyagnak egyik fő felhasználási területe a gyógyászat, de az ökológiai alkalmazása is jelentős. Az orvostudományban a PLA azon tulajdonságát, hogy megfelelő környezetben képes lebomlani káros anyag keletkezése nélkül, hamar felismerték és kihasználták, így számos orvostechikai eszköz készül manapság politejsavból. Ilyen például a sebészeti varrócérna, fecskendő, katéter, vér tárolására használt zacskó, protézis, implantátum, de bőrpótló szövet is, amelyet égéssérült betegeknél

alkalmaznak.

Jelentős a felhasználása különböző ökológiai területeken is: erdészeti, halászati, mezőgazdasági termékek (PLA mezőgazdasági takarófólia), mindennapi használati tárgyak (tégelyek, poharak, evőeszközök, bögrék), csomagolóanyagok (fóliák, zacskók). [7] Felhasználásukra egy példa az 5. ábrán látható.



5. ábra: Politejsav termékek (A K-2013 düsseldorfi világkiállításon készült saját fotó.
2013.10.20.)

2.4. Bazaltszál

Bevezetés:

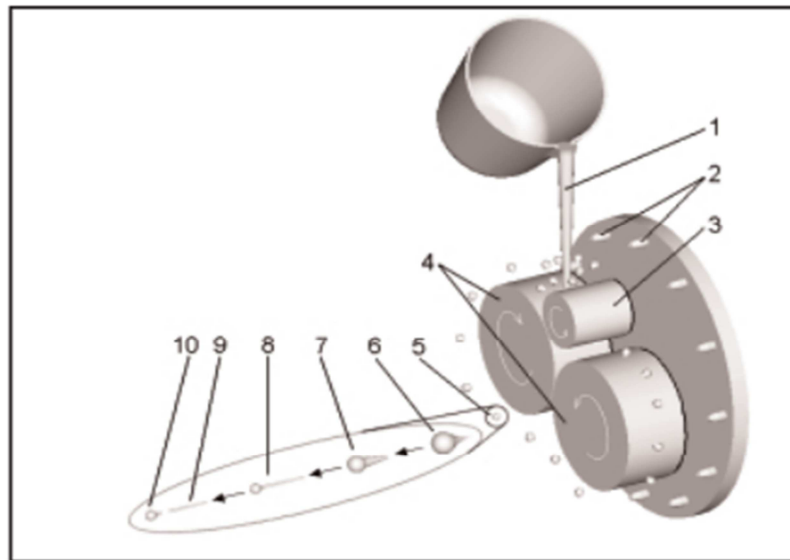
A bazalt a világon számtalan helyen előforduló vulkanikus kőzet. Színe a kinyerés helyétől és így az összetételétől függően változó: lehet szürke, barna, de akár zöld is. Kémiai összetétele az üveghez hasonló, mivel a legfőbb alkotói: SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , FeO . Szálgyártásra alkalmas kiömléses kőzetfajták közül a bazalt a leggyakoribb. [10] [11]

Bazaltszál gyártása:

A bazaltszál gyártásának kezdte az 1960-as évekre tehető, amikor egymással párhuzamosan az USA-ban és a Szovjetunióban is megindultak az ilyen irányú fejlesztések. A gyártáshoz szükséges technológia sikeres elsajátítása végül Ukrajnához köthető: a három legjelentősebb (erősítőanyagnak előállított) bazaltszálgyártó üzem közül kettő napjainkban is Ukrajna, egy pedig Oroszország területén van. [10][12]

A bazaltszálak előállítása kétféle módon is történhet: az egyik módszerrel hosszú (végtelen) szálú bazaltot képesek létrehozni, a másik (Junkers-típusú) technológiával pedig rövid bazaltszálak gyártására van lehetőség.

A Junkers-technológia vázlatja a 6. ábrán látható.



6. ábra: Junkers-típusú szálgyártás [13]

A technológia lényege: a megolvasztott bazaltömlédek (1) egy három hengerből álló (3-as jelű gyorsító és a 4-es jelű két szálazó henger) berendezésre vezetik, ahol a forgó hengerek hatására a centrifugális erő következtében szálak képződnek. Ezeket a szálakat a 2-es jelű levegő fúvókák segítségével lefűjják. Az ábra további jelölései: 5 – csepp, 6-8 – szálképződés, 9 – szál, 10 – szálfej.

A bazaltszál tulajdonságai, alkalmazása:

A bazalt igen nagy hőmérséklet-tartományon belül, akár $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig felhasználható. Emellett nagy mértékben ellenáll az oxidációnak, illetve jobb nyomó- és nyírószilárdsággal rendelkezik, mint a szénszál vagy az aramidszál. [12] A fent említett előnyös tulajdonságain túl a bazalt jó hő- és hangszigetelő, ellenáll a lúgoknak, jó rezgéscsillapító, inert, nem éghető és a környezetet sem veszélyezteti.[11]

A 60-as években a Szovjetunióban létrehozott bazaltszálakat eleinte golyóálló textíliák készítésére használták fel [12], majd ahogy jobban elterjedt, szigetelőanyagként (közetgyapot), később pedig polimer kompozitok erősítőanyagaként kezdték el alkalmazni rendkívül előnyös tulajdonságainak és olcsóságának köszönhetően. Manapság elsősorattal használja a bazaltot vagy kompozitjait az elektronikai- és autóipar, valamint az építőipar is.[11] [14]

2.5. Bazalttal erősített politejsav kompozit

A politejsav, mint megújuló energiaforrásból nyert és lebontható polimer, kedvező tulajdonságainak hála, már önmagában is lehetőségek tárházát nyújtja, hogy forradalmasítsa a műanyagipart, mivel bizonyos termékek fosszilis alapanyagát helyettesíteni tudjuk környezetünk felesleges terhelése nélkül. Számátalan termék, használati eszköz előállítására megfelel a PLA, azonban még szélesebb körben való elterjedéséhez és műszaki célra való alkalmazásához érdemes politejsav mátrixú kompozitokat is alkotni. A bazalt fentebb említett kedvező tulajdonságainak tudatában logikusnak tűnik a bazaltszállal erősített politejsav kompozit létrehozása, alkalmazhatóságának, megmunkálhatóságának, tulajdonságainak vizsgálata. Az ilyen irányú törekvésekre Kínában [15], Koreában [16], és hazánkban, Magyarországon a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékén is van példa.[17]

2010-ben Kínában végzett laboratóriumi kísérletek szerint a PLA bioműanyag bazaltszállal való erősítése kedvező hatással van a polimerre és nem csak mechanikai tulajdonságaira, hanem nedvfelszívó (hidrofil) képességére és degradációs hajlamára nézve is. [15]

A magyar kutatások a fröccsöntéssel létrehozott kompozit vizsgálata során kimutatták, hogy a politejsav bazaltszállal való erősítésekor (0-30 tömeg%-os száltartalomnál) a szakítószilárdság és a rugalmassági modulus az erősítő szál mennyiségével arányosan, lineárisan nő. Hasonló linearitás figyelhető meg 0-30 tömeg% száltartalom esetén a hajlítószilárdság, hajlítási modulus és az ütésállóság vizsgálatakor is. Az eredmények azt mutatják, hogy a keményítő alapú politejsav biopolimert érdemes a kiváló tulajdonságokkal rendelkező természetes – bár nem lebomló- bazaltszállal erősíteni és így hagyományos műszaki műanyagokhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkező műanyagot létrehozni. [17]

2.6. Polimerek kötési technológiái

Mindennapi használati tárgyaink közül rengeteg (és egyre több) műanyagból van. Bármennyire is törekszünk az eszközeink geometriájának, formájának egyszerűségére, mindig vannak és lesznek olyanok, amelyeknek működését, esztétikáját vagy gazdaságos gyártását tekintve több darabból, alkatrészből kell állniuk. Sokszor ezen alkatrészek között valamilyen kapcsolatot, **kötést** kell létrehozni, hogy betölthesse kívánt funkcióját.

„A műanyag szerkezeti elemek kötéstípusai egyrésztől fizikai, vagy kémiai hatáselvük szerint csoportosíthatók, ennek megfelelően megkülönböztetünk erővel-, alakkal- és anyaggal záró fizikai kötések, és kémiai erőkkel működő ragasztott kötések. Másrészt a kötések

funkciójuk – és az újrahasznosítás szempontja – alapján oldhatóságukkal (oldható, vagy nem oldható kötések) jellemezhetjük.” [18]

Néhány példa a különböző fizikai kötésekre:

- erővel záró kötések: csavarkötések
- alakkal záró kötések: bepattanókötés, szegecskötés
- anyaggal záró kötések: *ragasztott kötés*, *hegesztett kötés* [20]

2.7. Hegesztett kötés

A hegesztett kötés célja hőre lágyuló polimerből készült alkatrészek oldhatatlan összekapcsolása úgy, hogy jó kohéziós kapcsolat alakuljon ki, minél jobb szilárdság elérése mellett. A hegesztés során az óriásmolekulák másodlagos kötéseinek felszakadásával a molekulák képesek egymás közé diffundálni, így létrehozva egy nagy szilárdságú kötetet. [18]

A műanyagok hegesztésének feltételei:

1. a hegesztendő anyagoknak egymással összeférhetőnek kell lenniük,
2. megfelelő hőmérséklet,
3. hegedéshez szükséges időtartam,
4. megfelelő nyomás az optimális kötés létrehozásához,
5. lehűlési idő, aminek elteltével a kötés kezelhetővé válik. [19][20]

Ideális hegedésről beszélünk akkor, ha a megömlesztett, majd megszilárdult anyagrészt (varrat) fizikai állapotát és összetételét nézve is megegyezik a hegesztett kötéstől távolabbi résszel, amennyiben az összehegesztett anyagok kémiai és fizikai is azonosak. A hegedés létrejöttéhez szükséges diffúzió feltétele, hogy a szabad részecskemozgás biztosítva legyen: ezért kell megömleszteni az anyagot. A kötés létrehozásának egyszerűségét tekintve polimereket nehezebb hegesztetni, mint fémeket, mivel a műanyagok esetén fonalgombolyag-szerű makromolekulák között kell a kötetet létrehozó folyamatoknak lejátszódnia. [21]

A hőre lágyuló polimerek hegesztési eljárásait a hőátadás szempontjából három fő csoportra oszthatjuk:

- hőkonvekciós eljárások
- sugárzásos eljárások
- közvetlen melegítés

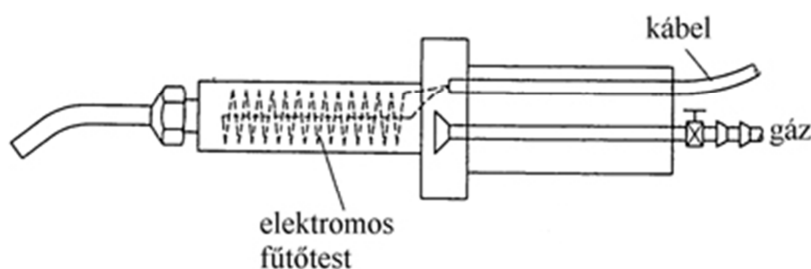
A részletesebb csoportosítás a 7. ábrán látható:

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 fémekkel)	Hőközlés szilárd testtel, tartós melegítés	Hőközlés szilárd testtel, rövid idejű melegítés	Melegítés nem koherens sugárzással	Melegítés koherens sugárzással	Melegítés súrlódással	Melegítés nyomásváltozással	Poláros molekulák dielektromos melegítése
Meleg (forró) levegős hegesztés, lánghegesztés	Extrúziós hegesztés	Fűtött ékes (folyamatos), hőtükros, fűtődrótbetét 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

7. ábra: Termoplasztikus polimerek hegesztési eljárásai [21]

2.7.1. Hővezetéses hegesztési eljárások

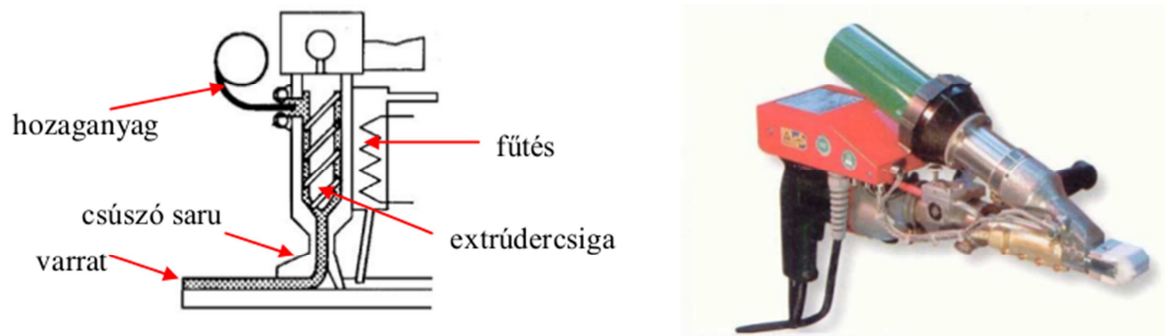
Forró gázos hegesztés: ez az eljárás (kívülről legalábbis) a fémeknél ismeretes hegesztőpálcás kézi ívhegesztésre hasonlít a leginkább. Azonban a két technológia paraméterei, a végrehajtás módja és természetesen a felhasznált anyagok merőben eltérnek egymástól. A két technológia közötti analógia a pálcás hozaganyaggal való hegesztésben ki is merül. Az eljárás lényege: a 8. ábrán látható berendezés segítségével a kívánt területet, illetve az összehegesztendő anyagoktól eltérő anyagú hegesztőpálcát (lengető mozgást végezve) felmelegítjük és azonos reológiai állapotba hozzuk a ráfűvott forró levegővel. A pálcát olyan anyagból van, hogy könnyebben, jobban felhevül, mint az összehegesztendő kívánt anyagok. [18][20]



8. ábra: Forró gázos hegesztés berendezése [21]

Extrúziós hegesztés: az extrúziós hegesztés során a hegesztőpisztolyban lévő kis méretű extrúder és forró levegő által létrehozott forró polimer ömledéket használjuk fel a hegesztendő anyagok közötti hegesztési varrat létrehozásához. Ezzel az eljárással nagy térfogatú varratok hozhatók létre. A forró gázos hegesztéssel ellentétben itt nem csak a varratot képező ömledék, hanem az alapanyag is megolvad, így létrehozva egy folyamatos, jó szilárdsággal rendelkező kötést. [21] A korábban említett, hegesztéseknél szükséges nyomást

a pisztoly elején található csúszó saruval biztosítják. [18] [20] A berendezés és vázlata a 9. ábrán látható.



9. ábra: Extrúziós hegesztőkészülék vázlata (balra) és kép a berendezésről (jobbra) [18]

Hőtükörös hegesztés: kifejezetten nagyméretű termékek és műanyag csövek összehegesztésére használt eljárás. Működési elve a következő: a két összehegeszteni kívánt csövet (terméket) a berendezésbe befogják, majd első lépésként a hegesztendő felületeket párhuzamossá teszik, legyalulva azokat. Miután a két felület párhuzamos, közéjük a szükséges hőmérsékletre felmelegített ún. hőtükört tesznek. A termék hegesztendő felületeit a hőtükörhöz érintve felmelegítik, majd a melegítőelemet eltávolítva a felületeket meghatározott erővel, adott ideig egymáshoz nyomják. Az idő leteltével a nyomóerőt megszüntetve a varrat elkészült. Hátránya a hosszú ciklusidő, de előnye, hogy akár több méter átmérőjű csövek is hegeszthetők ezzel az eljárással. A berendezésről kép a 10. ábrán látható.

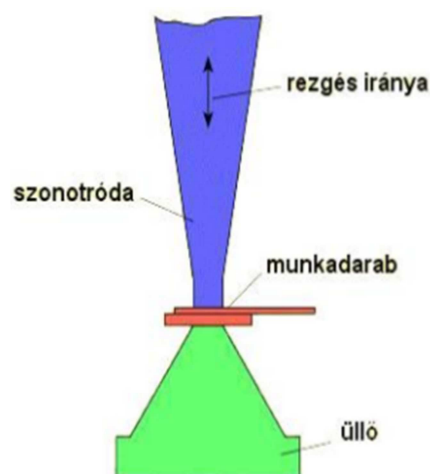


10. ábra: Fűtőelemes tompahegesztő (tükörhegesztő) berendezés [22]

2.7.2. Mechanikai súrlódásos hegesztés

Dörzshegesztés: mechanikai súrlódás alapú hegesztési eljárások közé tartozik, mivel a felületek összehegedéséhez szükséges hőmérséklet nem külső hőforrásból, hanem a dörzsfajnak vagy az egyik hegesztendő anyagnak gyors mozgása során a másik anyaggal történő érintkezésekor fellépő súrlódásból származik. A leggyakrabban alkalmazott két fajtája a rotációs és a kavaró dörzshegesztés. Rotációs dörzshegesztés során a két összehegesztendő alkatrész közül az egyik áll, a másik pedig gyors forgómozgást végez. A két alkatrész az egymáshoz nyomást követően súrlódás hatására megömlik és a forgatás befejeztével összeheged. Kavaró dörzshegesztés esetén a leendő varrat mentén egy forgó dörzsfaj megy végig. Az alkatrészekhez érve súrlódik, azokat ömledék állapotba hozza és a pályája mentén elkészül a tompavarrat a hűlési idő leteltével. Ezzel az eljárással leginkább sík felületeket, lemezeket, táblákat lehet hegesztetni. Munkám során a PLA és bazalttal erősített PLA lapkák ezzel a technológiával is hegesztve lettek. Az így elkészült kötéseket hárompontos hajlítással vizsgáltam, így a varratok minőségét össze tudtam hasonlítani a lézerrel hegesztett próbatestekével.

Ultraszónushegesztés: ezen hegesztési eljárás során az anyag melegedése és így a hegedés az ultrahang által az anyagban létrehozott rezgések következménye: mivel a polimerek csillapítják a rezgéseket, így azoknak energiája csökken és hő fejlődik. A hegesztés elvi vázlata a 11. ábrán látható.



11. ábra: Ultraszónushegesztés elvi működésének vázlata [18]

A rezgéskeltés úgy történik, hogy a hálózati áramot egy generátor nagyfrekvenciás árammá alakítja, amiből egy konverter segítségével kis amplitúdójú mechanikai rezgés jön létre. A használhatóságához azonban egy erősítőt építenek be a berendezésbe, majd a rezgések az ún.

szonotródán keresztül érnek el a munkadarabhoz. A rezgések ezután a fent leírt módon kötést hoznak létre a hegesztendő anyagok között. Dolgozatomban vizsgáltam az ultrahanghegesztéssel létrehozott kötések szilárdságát is, összehasonlítva a más technológiákkal (hegesztés, illetve ragasztás) létrehozott kötésekkel.

2.7.3. Sugárzásos hegesztések

Sugárzásos hegesztésről beszélünk akkor, amikor valamilyen forrásból származó sugárzás az anyagba hatolva részben elnyelődik, ezáltal hő fejlődik, ami hegesztésre használható. Tehát a fenti eljárásokkal ellentétben itt nem hőközlés vagy közvetlen melegítés szolgáltatja a hőenergiát. Ezen hegesztési eljárások közül dolgozatomban a lézersugaras hegesztéssel foglalkozom részletesebben. (Ide tartozik még az infravörös hegesztés is.)

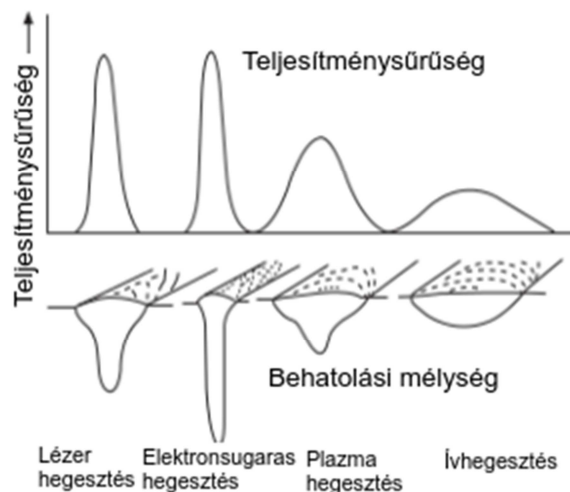
Lézersugaras hegesztés: A lézersugárral történő hegesztés módszerének és berendezéseinek bemutatása előtt nézzük meg, hogy mi is az a lézer és hogyan keletkezik? A lézer szó, az angol LASER betűszóból származik, ami az alábbi kifejezés kezdőbetűiből tevődik össze: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (fényerősítés sugárzás indukált emissziójával). A lézer tehát egy indukált emisszióval létrehozott fény, amely koherens, poláros, monokromatikus és jól fókuszálható. [23]

Tulajdonságaiból következően felhasználási területe széles skálán mozog:

- előadások, prezentációk során használt „lézer pointer”-ként (~1 mW-5 mW teljesítményűek),
 - szenzorok, távolságmérő és optikai jelző- vagy mérőberendezéseknél is gyakran alkalmaznak lézert,
 - (lézer)nyomtatók, CD és DVD olvasók működése is a lézeren alapul,
 - jelölés, anyagba (fém, fa, üveg, polimer) történő gravírozás is végezhető vele,
 - nagy teljesítményű lézerek műanyagok hegesztésére, de akár fémek vágására is használhatók,
 - orvostechikában manapság elterjedt, műtétek során használatos a sebészeti lézer,
- ...és számtalan egyéb felhasználási területe létezik. [24], [25]

Lézersugaras hegesztés jellemzői: A hegesztés az iparban igen elterjedt, az egyik legsokoldalúbb, alkatrészek közötti kötések létrehozására alkalmas technológia. A lézer, nagy teljesítményének és energiasűrűségének köszönhetően termékek hegesztésére kiválóan alkalmas. A lézersugár teljesítménysűrűségben az elektronsugárral vetekszik, az anyagba

történő behatolási mélysége pedig az ív-, de még a plazmahegesztésnél is jobb (12. ábra), így méltán foglal el előkelő helyet a hegesztési eljárások között. [26]



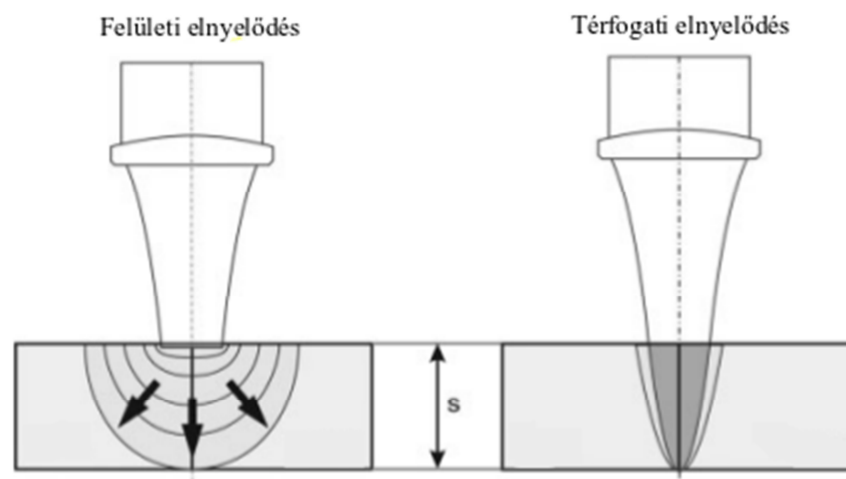
12. ábra: A lézersugaras hegesztés összehasonlítása az elektronsugaras-, plazma- és ívhegesztéssel a teljesítménysűrűség és a behatolási mélység alapján. [26]

A fentebb felsorolt kedvező tulajdonságokon kívül számos előnye van a lézerhegesztésnek: a kötés rugalmassága, minősége és megbízhatóságának együttese kiemeli a rokon hegesztő technológiák közül. Ezen kívül lényeges, hogy a hegesztés során mikrorészecskék nem képződnek, ezzel is biztosítva a varrat tisztaságát, erősségét és gázzártságát. A megolvasztáshoz és varratkialakításhoz szükséges energia csak a hegesztendő felületen nyelődik el, így hőre érzékeny alkatrészek közelében is végezhető a hegesztés, és akár tömör vagy zárt darabok esetén is alkalmazható ez az eljárás. A lokális melegedés az alkatrész minimális termikus igénybevételét tekintve is előnyös tulajdonság. A lézersugár tetszőleges pályán vezethető, ezzel is elősegítve rugalmas felhasználását. Nagy előnye még, hogy sok más hegesztés-, illesztés- vagy ragasztástechnikai módszerrel ellentétben a felületi előkészítésre nem érzékeny. A lézerhegesztés esetén kopással nem kell számolni, illetve a hegesztett termék mechanikai igénybevétele minimális, mivel ez az eljárás érintésmentes. A technológiára jellemző a stabil reprodukálhatóság és nagyfokú ismételhetőség, mindez úgy, hogy a hegesztés minősége változatlan. [27] [28] [29]

A polimer lézerhegesztés alapja, hogy a hegesztendő anyag elnyeli a lézersugarat, annak energiája hővé alakul, így a termékrészek között (az alapanyag megolvasztása, megömlesztése révén) hegesztett kötés, varrat jön létre, összekapcsolva a két (vagy több) alkatrészt egy terméké. A műanyaghegesztéseket a hegesztendő darabok elhelyezése és így a kötés típusa szerint kettő, a megvalósítás módja szerint pedig három csoportba oszthatjuk. A darabok pozíciója szerinti kötések csoportosítása:

- tompa kötés
- átlapolt kötés

Tompa kötéses lézerhegesztés: A tompa kötéses hegesztéssel egymással egy síkban lévő, párhuzamos felületű termékreszek között hozható létre kötés. A lézernyaláb a felületekre fókuszálva megolvasztja azokat, majd a hűtési időt követően a hegesztési varrat létrejön. A lézersugár hullámhosszától és az anyag optikai jellemzőitől függően megkülönböztethetünk felületi vagy térfogati sugárzás-elnyelődést (abszorpciót). Felületi elnyelődés jellemző például a hőre lágyuló polimerek hegesztése esetén, ha CO_2 lézerrel sötét színű (nagy elnyelőképességű) anyagot hegesztünk. Ilyen esetben a felületre érkező sugárzás által keletkezett hő az anyag további részeihez hővezetés útján terjed. Mivel a termoplasztikus polimereknek rossz a hővezető képessége, így ezt az eljárást általában filmek, vagy vékony termékek esetén szokták alkalmazni. Az eljárás vázlatát két különböző esetben a 13. ábrán látható.

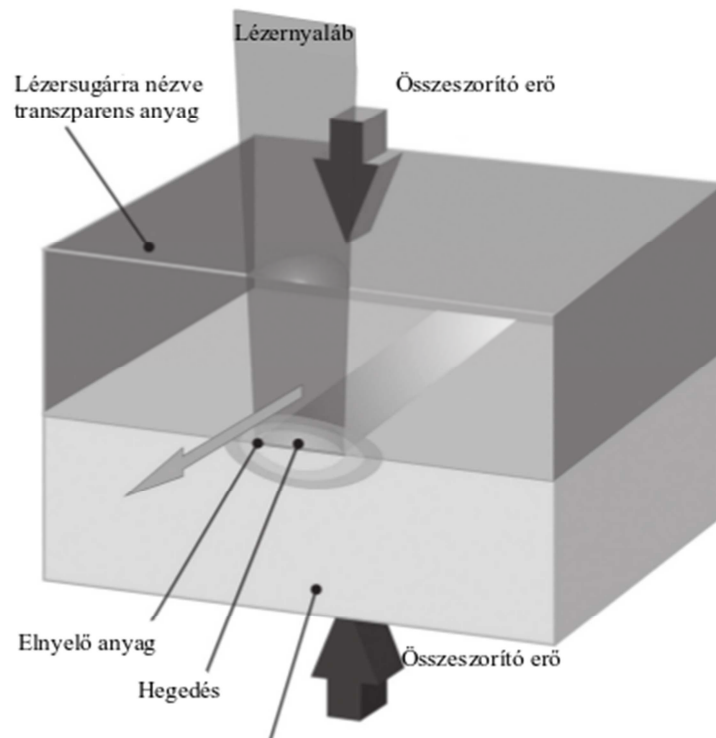


13. ábra: Tompakötéses hegesztés lézersugárral [30]

Térfogati elnyelődés akkor fordul elő, ha a lézersugár anyagba való behatolási mélysége az anyagvastagság tartományába esik. [30]

Átlapolt kötéses (transzmissziós) lézersugaras hegesztés: Manapság a hőre lágyuló polimerek ipari szinten történő hegesztésének legnagyobb része átlapolt kötések kialakításával valósul meg. Az eljárás lényege, hogy az egymásra átfedéssel elhelyezett alkatrészek közül az egyik (amelyikkel elsőként lép kapcsolatba a lézernyaláb) a lézer hullámhosszára nézve transzparens legyen, míg a másik anyag elnyelje azt. Az anyagok ezen tulajdonságait általában adalékanyagok segítségével szabályozzák. Így a lézersugár az egyik anyagon áthalad, de a másik anyagban elnyelődve annak felületét megömleszti, majd

hővezetés által a (lézersugárra nézve) transzparens anyagot is megolvasztja, ezáltal kialakítva a kötést a két alkatrész között. Szimultán eljárás esetén az alkatrészek mechanikai rögzítése által (hegesztéssel egyidejűleg) kifejtett nyomás biztosítja az erős kötés kialakítását. [26] [29] A technológia vázlatja látható a 14. ábrán.



14. ábra: Transzmissziós lézersugaras hegesztés vázlatja [26]

2.8. Ragasztás

Az anyaggal záró kötéstehnológiák másik részét a ragasztott kötések képezik. Ez a kötési módszer rendkívül elterjedt, különösen a polimer termékek esetén, mivel általában nem igényel drága és bonyolult berendezéseket, sem nagyfokú szakértelmet, vagy hosszadalmas betanítást, sokak számára elérhető akár az iparra, vagy akár a hétköznapi emberekre gondolunk. Mindezekon túlmenően az adott anyaghoz, illetve termékhez tartozó megfelelő ragasztóanyag megválasztásával kitűnő kapcsolatot, kötést tudunk létrehozni a különböző termékrészek között.

A ragasztásnak a fent említett kedvező tulajdonságokon túl számos előnye van:

- két különböző anyag eltérő hőtágulásából eredő (kötésben fellépő) hibákat kitűnően kompenzálja, ezzel állandó és jó kapcsolatot biztosítva az összeragasztott elemek között,
- a kötés mellett szigetelő funkciót is ellát, legyen szó víz-, rezgés-, elektromos- vagy hőszigetelésről,
- a ragasztott elemek terheléseloszlása egyenletesebb, aminek következtében nagyobb szilárdság érhető el,
- jó réskitöltő képessége van, és esztétikus, mivel a kötés „láthatatlan”,
- olcsó,
- akár erősebb kötés is létrehozható, mint a ragasztandó alapanyagok,
- nagy felületek is könnyen ragaszthatók. [31][32][33]

A ragasztás során azonban figyelniük kell a technológia nehézségeire, hátrányaira is:

- biztosítani kell a ragasztáshoz szükséges megfelelő környezetet (tisztaság) és körülményeket (pl. adott hőmérséklet, relatív páratartalom),
- a felületet minden esetben elő kell készíteni a ragasztáshoz (tisztítás, felületkezelés, zsírtalanítás,...),
- a ragasztó használata a gyártási folyamat átalakulását, az összeszerelési folyamat módosítását vonja maga után,
- meg kell felelnie mind a ragasztónak, mind pedig a helynek, ahol ragasztanak az egészség- és környezetvédelmi előírásoknak,
- kevésbé termelékeny, mint pl. a hegesztés, szegecselés. [31], [32], [33], [34]

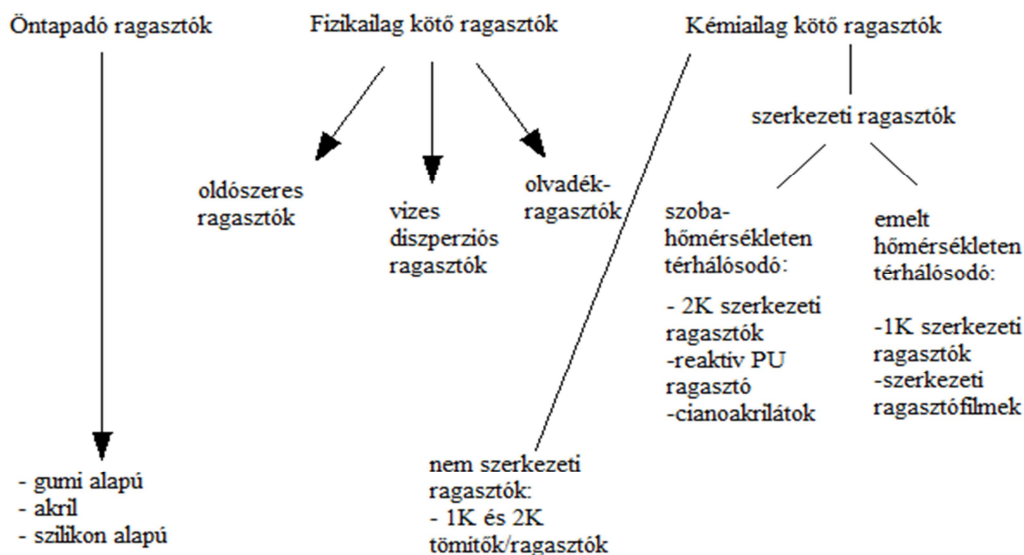
A ragasztás során kétféle összetartó erőről beszélhetünk: az adhézióról, valamint a kohézióról. A kohézió az a „belső összetartó erő”, ami a ragasztóanyagon belül a kémiai kötések hatására fellép. Amennyiben egy ragasztott kötés vizsgálata során maga a ragasztó megy tönkre és nem a felületről válik le, kohéziós tönkremenetelről beszélünk. Ekkor a ragasztó maximális teljesítőképessége ki lett használva. Adhézióról két különböző anyag között fellépő „vonzerő” esetén beszélünk. Adhéziós erő lép fel a ragasztóanyag és a ragasztási felület között. Ennek

nagysága függ a felület minőségétől: a felületi energiától és a felületi érdességtől. Amennyiben a tönkremenetel adhéziós, úgy felület-előkészítéssel vagy –módosítással, valamint az adott felülethez jobban alkalmazható speciális ragasztó használatával hozhatunk létre jobb és erősebb kötést. [31]

A jó ragasztott kötés létrehozásához – csakúgy, mint a hegesztésnél – adott feltételek teljesülése szükséges. Ezek a paraméterek:

- megfelelő idő a ragasztóanyag felviteléhez, a kötés létrehozásához, a ragasztó réskitöltéséhez,
- megfelelő hőmérséklet a ragasztás szakszerű végrehajtásához, a felületkezelésekhez, a kötés kialakulásának gyorsításához vagy a ragasztóanyag viszkozitásának csökkentéséhez,
- megfelelő nyomás a szükséges felületkontaktus eléréséhez, a légzárványok eltávolításához, valamint, hogy a ragasztott felek jól összetartsanak. [31]

A ragasztók csoportosítása a következő ábrán látható:



15. ábra: A ragasztók csoportosítása [31]

A politejsav, valamint a bazalt erősítésű politejsav kompozit ragasztásáról és ragaszthatóságáról az általam talált irodalom igen csekély volt, így érdemesnek találtam vizsgálni ezt különböző típusú ragasztókkal.

2.9. Polimer kompozitok hegesztése, ragasztása

A polimerek elterjedésének, egyre nagyobb térnyerésének következtében felmerült az igény a minél jobb minőségű, kedvező tulajdonságú anyagok előállítására, amelyek akár a fémekkel is felvehetik a versenyt. A töltetlen, erősítetlen polimerekből számos, az adott célra kiválóan megfelelő termék készíthető, azonban bizonyos területeken mára már elengedhetetlenné vált a polimer mátrixú kompozitok használata (pl. repülőgép-gyártás). A kompozitok fejlesztésével, újabb és újabb erősítőanyag-mátrix párosítások kutatásával egyidejűleg fontos feltérképezni, fejleszteni azokat a technológiákat is, amelyekkel kompozit alkatrészekből késztermék alkotható. Az erősítetlen polimer félkész termékek (oldhatatlan) összekapcsolásának, egyesítésének egyik legjellemzőbb eljárása a hegesztés és a ragasztás, így érdemes megvizsgálnunk, hogy kompozit alkatrészek esetén milyen módszerek alkalmazhatók ezekre a célokra.

Ha a kompozit műanyagok mátrixanyaga hőre lágyuló polimer, akkor az hegeszthető is. A leggyakoribb kompozitok hegesztésére használt eljárások: ultrahanghegesztés, rotációs dörzshegesztés, vibrációs- és ellenálláshuzalos hegesztés, de van példa kompozitok lézersugaras hegesztésére is, amit a repüléstechnikában alkalmaznak. [35] Az ultrahanghegesztést általában kis alkatrészek precíziós hegesztésére használják, vibrációs hegesztéssel pedig leginkább autóiipari alkatrészek összekapcsolását oldják meg. [36]

A kompozitok hegesztésénél fontos szempont, hogy amennyiben lehetséges, a varratnál ne csak a mátrixanyag keveredjen, hogy a szálak a kötés helyén is ki tudják fejteni erősítő hatásukat. Erre talán a legjobb megoldás a kavarási dörzshegesztés, ahol a dörzsforgásból adódóan a mátrix és a szál együttes keveredése valósulhat meg a kötés helyén. [37]

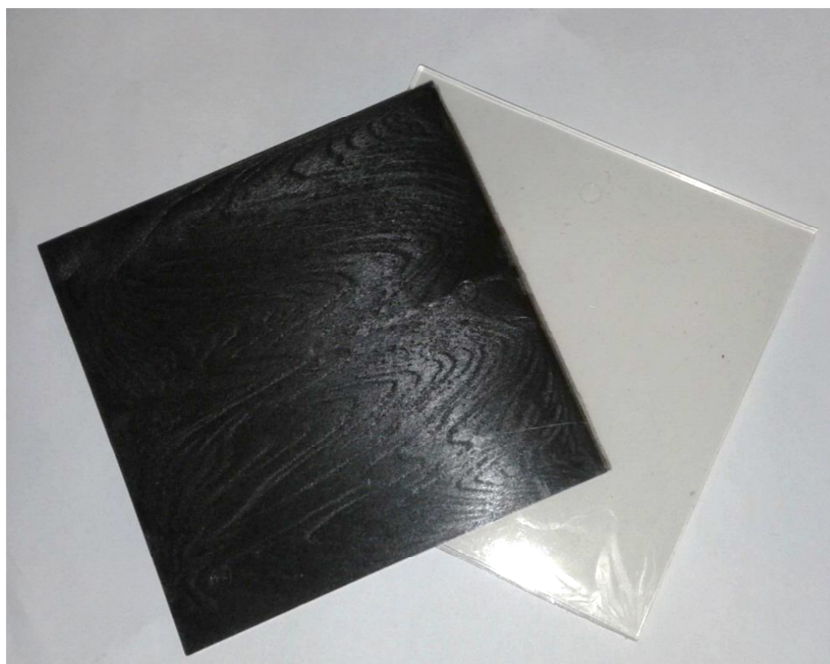
Ragasztásnál nagy előny, hogy mind termoplasztikus, mind pedig a nem termoplasztikus polimerek és kompozitok ragaszthatók, a kérdés csupán az, hogy milyen minőségű kötést lehet létrehozni az adott anyaggal, adott geometriájú és felületű termékkel. A ragasztóanyag és ragasztási technológia kiválasztása inkább termék- és alkalmazásfüggő, mintsem az alapanyagé, azonban munkám során, mivel egy „új” anyagról van szó a bazalttal erősített PLA személyében, aminek pontos alkalmazási területe még nem ismert (illetve ez annak függvényében alakulhat ki, hogy milyen módszerrel milyen kötések tudunk létrehozni), így többféle piacon lévő, ipari ragasztóval készítettem kötések és vizsgáltam a kötészilárdságot.

3. Kísérleti rész

3.1. Felhasznált anyagok

A kísérletek során erősítetlen és 30 tömeg% bazaltszállal erősített politejsav lapkákat hegesztettem, valamint ragasztottam.

A fent említett anyagok a 16. ábrán láthatók.



16. ábra: Bazaltszállal erősített (balra) és erősítetlen politejsav lapka a hegesztés és ragasztás előtt

A politejsav és a bazalt előnyös tulajdonságairól, jellemzőiről a 2.3 és 2.4. fejezetben, a biopolimer mátrix és az ásványi szál erősítőanyag által alkotott kompozitról pedig a 2.5. fejezetben írtam.

A politejsav alapanyagának a NatureWorks LLC amerikai biopolimer-gyártó cég **Ingeo™ Biopolymer 4032D** illetve **3251D** típusú termékét használtam fel. [38], [39]

Az anyagok tulajdonságai a gyártó által a termékhez rendelt technológiai adatlapok alapján a következő táblázatban foglaltak szerint alakulnak:

Tulajdonságok	Ingeo 4032D	Ingeo 3251D
Sűrűség	1,24 g/cm ³	1,24 g/cm ³
Szakítószilárdság	62 MPa	62 MPa
Üvegesedési hőmérséklet	57,8°C	61°C
Megömlési hőmérséklet	160°C	170°C

1. táblázat: A felhasznált politejsav gyártó által megadott legfőbb adatai [38], [39]

A polimer mátrixszal kompozitot alkotó erősítőanyagnak a kimondottan bazaltszál gyártásra specializálódott Kamenny Vek orosz cég **Basfiber® BCS TDS KV12** típusú alapanyagot használtam fel. [40]

3.2. Felhasznált berendezések és eszközök

Szárítószekrény: A politejsav jó nedvszívó képessége a feldolgozhatóságára (extrúzió, fröccsöntés) nézve kedvezőtlen tulajdonságnak számít, így a granulátum formában lévő alapanyag – mivel megköti a levegő nedvességtartalmát – kiszárításra szorul. A granulátum szárítását az extrúzió és a fröccsöntés előtt is elvégeztem az erre alkalmas laboratóriumi **KDCL** és **Heraeus UT20** típusú szárítószekrényekben.

Extrúder: Munkám kezdetén, az alapanyag gyártás során a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában található **Labtech scientific LTE 26-44** moduláris ikercsigás extruder volt szolgálatomra. Ezen a berendezésen történt a bazaltszál kompozit alapanyag létrehozása, majd az extrudált anyag granulálása is a hozzá csatlakoztatott berendezés segítségével.

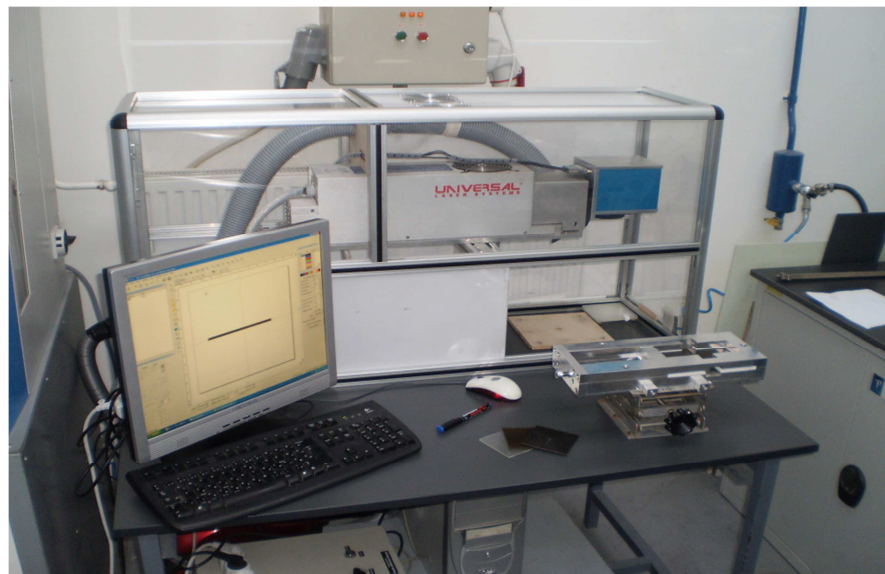
Fröccsöntőgép: Az extrúderrel és granulálóval elkészített alapanyagokból az ANTON szerszámával felszerelt **Arburg Allrounder Advance 370S 700-290** típusú fröccsöntőgéppel készítettem el a próbatesteket, amiknek a hegeszthetőségét vizsgáltam a későbbiekben.

Lézer berendezés: A hegesztett kötés létrehozásához egy 150 mm-es fókusz távolságú lencsével felszerelt **Universal Laser Systems UL 25 OEM** típusú CO₂ lézerforrást használtam. A berendezés leglényegesebb tulajdonságait a 2. táblázat mutatja:

Tulajdonságok	UL-25-OEM
Lézerforrás teljesítménye	25 W
Hullámhossz	10,6 μm
Hűtés	Levegő

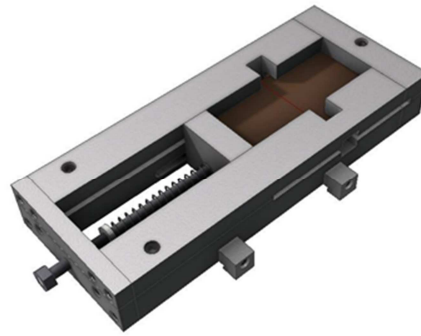
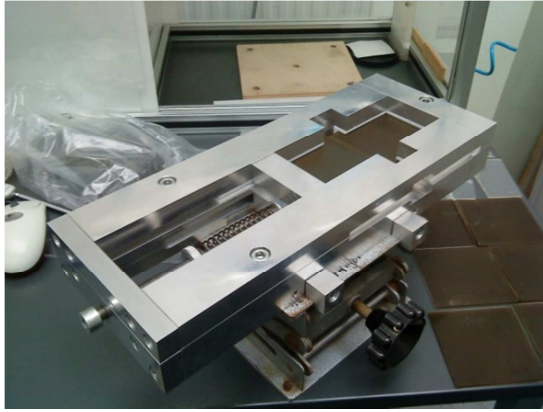
2. táblázat: A felhasznált lézerforrás legfontosabb adatai

A lézerforrás számítógépes program segítségével működtethető, a hegesztés paramétereit szoftveresen állíthatók be. A berendezés a 17. ábrán látható.



17. ábra: A hegesztő berendezés. Részei: számítógépes vezérlés (balra), lézerforrás a fókuszáló lencsével (középen), befogó (jobbra)

Befogó készülék: A befogó célja az elkészített lézerrel hegesztendő fröccsöntött lapkák pozícióban tartása a hegesztés során, illetve a megfelelő összeszorító erő biztosítása a minél jobb kötés létrehozása érdekében. A befogóról a terv és megvalósult gyártmány az alábbi képen látható:



18. ábra: A befogó terve (jobb ábra) és a megvalósult gyártmány (bal ábra)

Kavaró dörzshegesztő berendezés: A berendezéssel a PLA és bazalttal erősített PLA lapkák között tompavarratokat lehet létrehozni. Ezen hegesztés sajátosságaiból következően (2.7.2. fejezet) ígéretes varratok hozhatók létre ezzel a technológiával szálerősített anyagok esetén. A berendezés az 19. ábrán látható:



19. ábra: Kavaró dörzshegesztés berendezése

Ultraszhanghegesztő berendezés: A 2.7.2. fejezetben bemutatott technológiával hegesztett kötések készültek a PLA és 30 tömeg%-ban erősített PLA lapkák között. A hegesztések a 46.591/1 számú szonotródával készültek.

A berendezésről kép az 20. ábrán látható:



20. ábra: Herrmann Ultrashall 20kHz SM 8.949/09 típusú ultrahanghegesztő berendezés [41]

Forrógázos hegesztő berendezés: Extrudált PLA és erősített PLA huzalt adagolva, forrógázos hegesztéssel is varratokat hoztam létre, aminek szilárdságát vizsgáltam és összehasonlítottam a többi kötési módszerrel létrehozott varratokéval.

A fent felsoroltakon kívül a vizsgálatok elvégzéséhez rendelkezésemre állt a laboratórium **Zwick Z020**-as típusú berendezése, amellyel a hegesztett kötés és a ragasztás minőségét vizsgáltam hárompontos hajlítással, illetve szakítással.

3.3. Alapanyaggyártás

A bazaltszállal különböző mértékben erősített politejsav kompozitanyag hegeszthetőségének és ragaszthatóságának vizsgálatához elő kellett állítani a megfelelő alapanyagokat. A kétféle anyagból készült (erősítetlen, 30 tömeg% bazaltszálat tartalmazó PLA) próbatestek gyártása a következőképpen történt:

Erősítetlen PLA: Mindkét anyag feldolgozása (extrúzió és fröccsöntés) előtt a politejsavat szárítószekrénybe helyeztem, hogy a levegő nedvességtartalmát megkötő anyagot kiszáritsam, ezzel elkerüljem a feldolgozáskori kellemetlenségeket. A 85 °C-osra felmelegített szárítószekrénybe két órára tettem be az alapanyagot, ami elegendő volt a megfelelő szárítottság eléréséhez.

Bár a politejsav már eredeti állapotában is granulátum formában volt, a felhasználását extrudálás, majd újbóli granulálás előzte meg, hogy az erősített alapanyagokhoz hasonlóan ez az anyag is megkapja azt a hőterhelést, ami az extrúzió során éri. Az extrudálás beállításai a 3. táblázatban láthatók:

Hőmérsékletek zónák szerinti eloszlása [°C]										
Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Csigacsúcs
175	175	175	180	180	180	185	185	185	190	190

Nyomás a csigacsúcsnál	Motor nyomatéka	Csigák fordulatszáma	Adagoló fordulatszáma
35 bar	38,5 Nm	15 ford./perc	7,5 ford./perc

3. táblázat: Az extrúziónál beállított értékek

Miután az újból granulált alapanyagból a megfelelő mennyiség elkészült, kezdetét vette a próbatestek fröccsöntése. A próbatestek esetében 80x80 mm méretű négyzet alapú, 2 mm vastag lemezek (lapkák) voltak. A fröccsöntési beállítások a 4. táblázatnak megfelelően alakultak:

Fröccsöntési paraméter	Érték
Fröccsöntési térfogat	52 cm ³
Befröccsöntési nyomás	1200 bar
Befröccsöntés sebessége	50 cm ³ /s
Átkapcsolási pont	11,3 cm ³
Dekompresszió	3 cm ³
Torlónyomás	80 bar
Utónyomás	600 bar
Maradék hűtési idő	40 s
Ciklusidő	59 s
Hőmérséklet az első zónában	165 °C
Hőmérséklet a második zónában	175 °C
Hőmérséklet a harmadik zónában	180 °C
Hőmérséklet a negyedik zónában	185 °C
Hőmérséklet a ötödik zónában	190 °C

4. táblázat: Politejsav próbatest fröccsöntési beállításai

Egy fröccsöntési ciklussal két próbatest készült el. Miután a fröccsöntőgépből kikerült termékről a beömlő- és elosztócsatornákat eltávolítottam, elkészültek a hegesztésre alkalmas próbatestek.

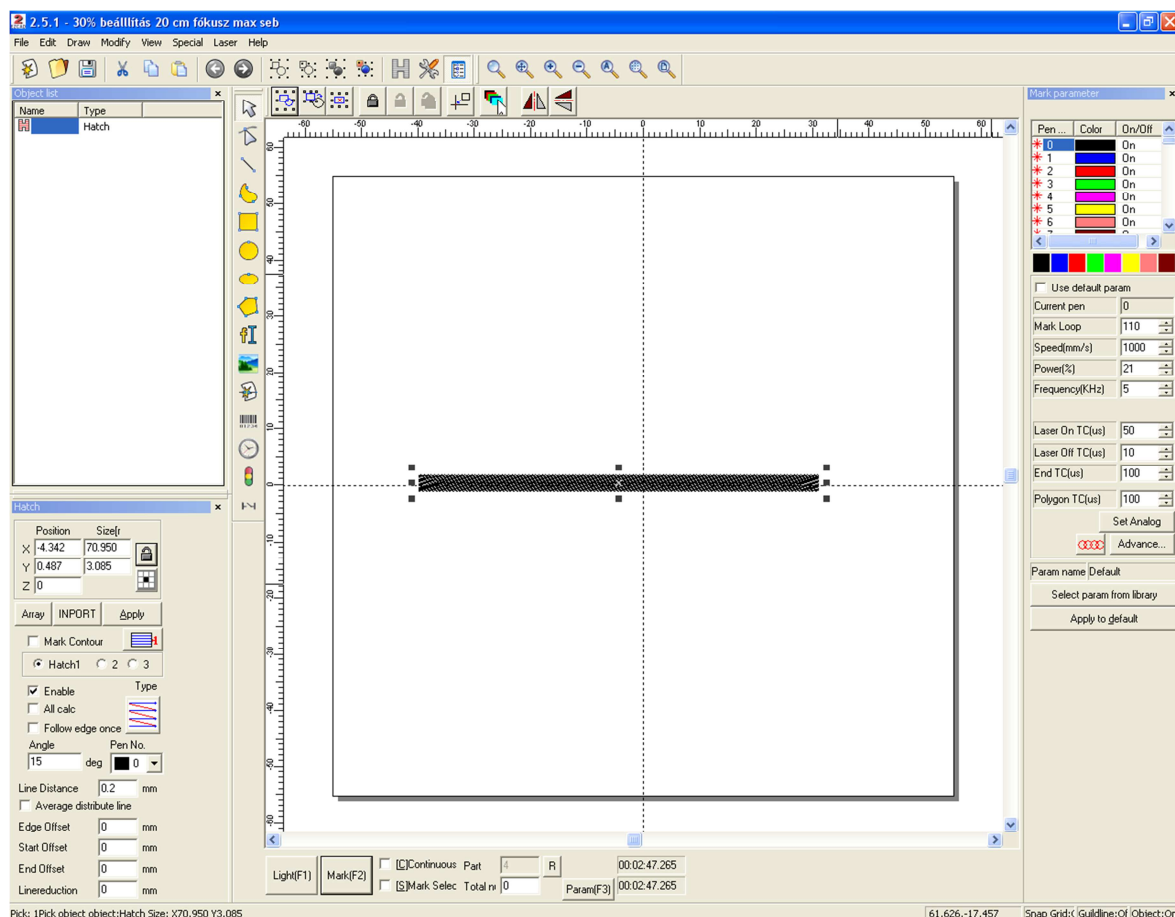
Erősített, 30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA: A bazaltszállal erősített politejsav előállítását az erősítetlen PLA-val azonos szárítási és extrudálási beállításokkal végeztem. Az extrudálás megvalósítási módjában viszont eltérések voltak az erősítetlen politejsavhoz képest, mivel ebben az esetben az előre kimért arányú mátrixanyagot és szálat kézzel kellett adagolni az ikercsigás extruderbe. Az extrudátumot itt is a berendezés után elhelyezett granulálóba vezettem, fröccsöntésre alkalmas formára hozva azt.

Az extrudálást és granulálást követően a próbatestek fröccsöntése következett. A PLA fröccsöntési beállításaihoz képest különbség mutatkozott a nagy száltöredezés elkerülése miatti lassabb befroccsöntési sebességben ($40 \text{ cm}^3/\text{s}$) és az erősítőszál jelenléte okozta nagyobb fröccsnyomásban (1600 bar).

3.5. Előkísérletek

Az előkísérletek során célom az volt, hogy a lézersugaras, valamint kavaró dörzshegesztés és forrógázos hegesztés paramétereinek változtatásának a kötésre gyakorolt hatását vizsgálva találjak olyan beállításokat, amelyekkel nagy szilárdságú hegesztett kötések tudok létrehozni a próbatestek között. Feladatom szépsége és nehézsége is volt egyben, hogy viszonyítási alapom nem volt, mivel tudomásom szerint a politejsav bazaltszállal erősített kompozitjait még nem hegesztették ezekkel a módszerekkel. A fent említett anyagok ultrahangos hegesztésével Kaponya Tamás kollégám foglalkozott részletesen diplomamunkájában [42], az ő eredményeire alapozva és azokból kiindulva vontam le következtetéseket a ragasztással való összehasonlítás (szakítás) során.

Lézersugaras hegesztés során [43] a számítógép működtette a lézerforrást. A vezérlő szoftver neve EzCAD2.0. A kezelőfelület, ahol a hegesztési paramétereket változtatni tudtam, a 21. ábrán látható.



21. ábra: A lézersugaras hegesztőberendezést vezérlő program kezelőfelülete

A program segítségével lehetett beállítani a különböző hegesztési paramétereket. Ezek a paraméterek a következők voltak:

A hegesztési varrat alakja, mérete, mintája: A program a hegesztési varrat formáját, nagyságát és mintáját tekintve lehetőségek széles tárházát nyújtja a hegesztő személy számára. A program segítségével a legkülönbözőbb alakzatok, formák hozhatók létre, mivel a (manapság már) viszonylag kis teljesítményűnek számító berendezés hegesztésen kívül jelölésre, gravírozásra is használható. Munkám során igyekeztem a „Hegesztés” nevű tárgy során megszerzett tudásomat kamatoztatni: a hegesztési varrat mintájának az ott tanult és ideálisnak tekintett lengető mozdattal, „félhold alakú vezetés” által létrehozott mintához minél inkább hasonlólt igyekeztem választani a program által felajánlott lehetőségek közül. Így esett a választásom a 22. ábrán látható mintára.



22. ábra: A hegesztések során alkalmazott varratminta egy jellemző részlete

A minta méretei és jellemzői: 80 x 3,5 mm területet pásztázott a lézersugár. A párhuzamos vonalak egymástól 0,2 mm-re voltak, a vízszintessel bezárt szögük 15° volt. A kiválasztott varratmintával sikerült azt elérnem, hogy a lézernyaláb már egyszer végighaladva a mintán homogén ömledéket képez az anyagban, ezzel egyenletes átolvadást biztosítva az egész varrat mentén.

Ismétlésszám: Az ismétlésszám esetünkben azt jelenti, hogy a kiválasztott hegesztési mintán a lézersugár hány alkalommal haladjon át.

Sebesség: Ez a paraméter a lézernyaláb varratmintán való áthaladási sebességét mutatja meg. Mértékegysége [mm/s].

Teljesítmény: Megadja, hogy a hegesztő berendezés maximális teljesítményének (25 W) hányad részével történjen a hegesztés. Értékét százalékban lehet megadni.

Frekvencia: A frekvencia állításával a hegesztés során képzett pontok sűrűségét lehet befolyásolni. Minél alacsonyabb a frekvencia, annál távolabb képezi egymástól a pontokat, így a varrat annál egyenetlenebb lesz. Munkám során végig 5 kHz frekvenciával végeztem a hegesztéseimet.

További két beállítási paraméter, amik nem a vezérlő program keretein belül állíthatók be:

Rugó: A rugó és ezáltal az összeszorító erő a 3.4-es fejezetben leírtaknak megfelelően állítható. Egy egyszerű kísérlettel, a rugóra különböző tömegű súlyokat aggatva meghatároztam a rugó lineáris karakterisztikáját és a rugóállandót. Így már tudtam, hogy a hegesztés előtt beállított rugóhossz változás mekkora összenyomó erőnek felel meg.

Fókuszáló lencsétől való távolság: A lencsétől való távolság egy gomb tekerésével és az ezáltal működtetett emelő szerkezet magasság-változtatásával állítható.

A különböző paraméterek beállítási tartományai a 5. táblázatban találhatók.

Paraméter	Minimum	Maximum
Ismétlésszám	1	-
Sebesség [mm/s]	1	10000
Teljesítmény [%]	1	100
Frekvencia [kHz]	1	5
Rugó [mm]	35	100
Rugóerő [N]	0	55
Lencsétől való távolság [mm]	10	250

5. táblázat: A paraméterek beállítási tartományai

A kavaró dörzshegesztés során beállítható paraméterek a fordulatszám és az előtolás voltak. A forrógázos hegesztésnél a kifűjt levegő sebessége (térfogatárama), valamint a hőmérséklete szabályozható egy-egy potenciométer segítségével, azonban pontos értékek meghatározására ebben az esetben nem volt lehetőség, ki kellett tapasztalni, hogy melyik az a beállítás, amellyel (első közelítésben ránézésre) jó varratot tudunk létrehozni.

Az ultrahanghegesztésnél a vezérlési mód (idő-, energia-, út-, erővezérlés), a hegesztési erő és idő, kapcsolóerő és –idő, bevitt energia, tartóerő és –idő paraméterek voltak állíthatók.

3.6. Kísérletek, vizsgálati módszerek

Lézersugaras hegesztés: A kísérletek elvégése során célom volt a két különböző (az erősítetlen és a bazaltszállal erősített) anyag esetén olyan hegesztési beállításokat találni a CO₂ lézerrel, amelyekkel jó minőségű kötést tudok létesíteni a próbatestek között. Dolgozatomban a kötések összehasonlítása során a szakdolgozatom [43] lézersugaras hegesztésének beállításait és eredményeit használok fel, ami a következőkben olvasható:

A kísérletek során kétoldali hegesztéseket készítettem, mivel egyoldali hegesztés esetén vagy nem volt olyan mértékű az alapanyagok megömlése és így a hegesztett kötés erőssége, mintha mindkét oldalról hegesztve lett volna, vagy mire az alapanyag lézersugártól legtávolabbi része is megfelelően megolvadt, addigra a közelebbi része már füstölt, elszíneződött vagy elégett.

A 6. táblázatban láthatók azok a tartományok, amelyekben belül választva a paramétereket hegesztett kötést tudtam létrehozni az alapanyagomon.

Paraméter	Hegesztésre használható tartomány
Ismétlésszám	50-150
Sebesség [mm/s]	500-10000
Teljesítmény [%]	15-100
Lencsétől való távolság [mm]	5-250 (kompozitoknál 150 mm-nél nem lehet)

6. táblázat: A paraméterek hegesztésre alkalmas tartományai [43]

Az első hegesztéseket az alábbi beállításokkal végeztem: ismétlésszám: 50-120, sebesség: 500-700 mm/s, teljesítmény: 30-40%, lencsétől való távolság: 200 mm. Ezután egy paramétert kiemelve és állandó értéken tartva, a többi paraméter változtatásával igyekeztem a legjobb hegesztési kötést létrehozni. A paraméterek változtatása úgy történt, hogy egyrészt az elkészült varratot alaposan szemrevételezve és átvizsgálva, másrészt magát a hegesztési folyamatot figyelve igyekeztem következtetéseket levonni, hogy a létrejött varrat minőségéért melyik paraméter vagy paraméterek lehetnek felelősek, majd azokat fizikai és mérnöki megfontolások alapján megváltoztattam.

Az elkészült hegesztési varrat jóságának megítélése azonban nemcsak szemrevételezéssel történt, hanem a hegesztés végeztével a hűlési időt követően kézi töréssel is vizsgáltam a varratok szilárdságát, hajlásra való képességét. A kézzel való törésekből levont következtetések határozták meg, hogy melyik beállításokkal készült varratok lettek azok, amelyeket később gépen, hárompontos hajlítással vizsgáltam, és amik közül kikerült az anyagonkénti legnagyobb hajlítószilárdsággal rendelkező hegesztett kötés.

Célom az volt, hogy találjak anyagonként három olyan eltérő paraméterekkel rendelkező beállítást, amellyel készült hegesztett kötések kézi törésnél már nem mutatnak egymáshoz képest lényeges eltérést és nehezen törnek, további vizsgálatuk gépet igényel. Ennek érdekében összesen 210-230 hegesztési varratot készítettem a két különböző anyagon. A kézzel való törés során voltak olyan kötések, amiknek eltöréséhez nagy erő kellett, illetve olyanok is, amiknél a törés során nem a varrat, hanem az alapanyag (is) tört (a kilenc kiválasztott beállítással hegesztett kötés közül hat esetben ez történt). Az anyagonkénti három kiválasztott hegesztési beállítás paraméterei a 7. táblázatban láthatók. (A táblázatban a beállítások anyagonként lettek csoportosítva, a beállítás száma pedig a ciklusidő csökkenésével nő).

Próbatest típusa	Beállítás száma	Ismétlésszám	Sebesség [mm/s]	Teljesítmény [%]	Fókusz távolság [mm]	Rugóerő [N]	Ciklusidő [s]
Erősítetlen PLA	17	80	600	16	200	10	181
Erősítetlen PLA	24	70	600	17	200	10	159
Erősítetlen PLA	26	100	10000	90	200	10	50
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	3	50	700	21	200	10	100
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	8	150	10000	100	200	10	76
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	11	100	2000	33	200	18	95

7. táblázat: A különböző próbatestek legjobbnak talált hegesztési beállításai [43]

Mint az a táblázatból is látható, a lencsétől való távolság végig állandó volt. Ennek oka, hogy a kompozit lemezek hegesztése mindenképpen a lencse fókuszán (150 mm) kívül történt, különben a hegesztés során az alapanyagban lévő erősítőszál fényjelenséget produkált (szikrázott) a varrat mentén. A lencsétől való különböző távolságra elhelyezett darabok varratai egymástól számottevően sem esztétikailag, sem szilárdságilag nem különböztek.

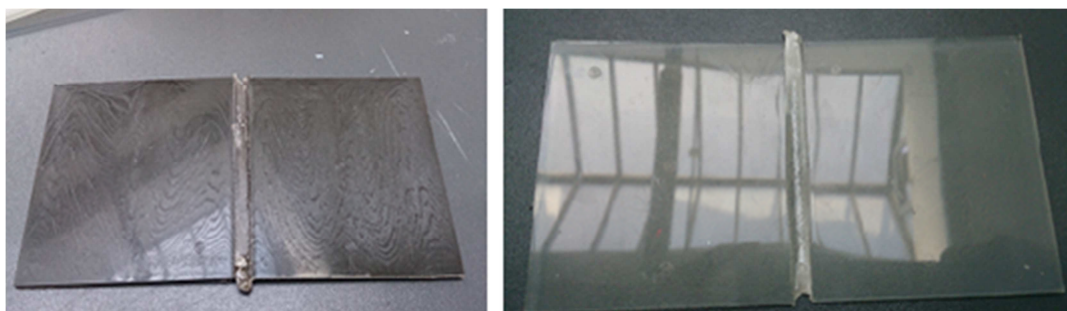
Kavaró dörzshegesztés:

Kavaró dörzshegesztés során a próbatesteket a készülékbe befogva, az előre beállított fordulatszámmal és előtolási sebességgel létrehoztuk a hegesztett kötéseket. Ezen hegesztés végrehajtásához Apatóczyki Bernát kollégám volt segítségemre. A hegesztés során beállított paraméterek az 8. táblázatban láthatók, mindegyik beállítással 3-3 próbatest készült:

Próbatest típusa	Beállítás száma	Fordulatszám [1/perc]	Előtolás [mm/perc]
Erősítetlen PLA	1	2700	63
Erősítetlen PLA	2	2700	84
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	3	2700	84
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	4	2700	105
30 tömeg% bazaltszál tartalmú PLA	5	2850	105

8. táblázat: Kavaró dörzshegesztés során beállított paraméterek

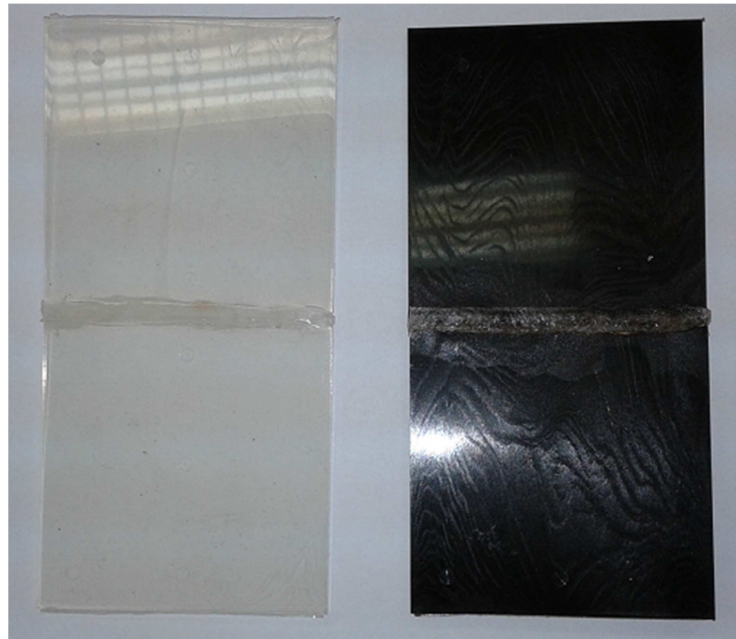
Kavaró dörzshegesztéssel létrehozott próbatestek az alábbi ábrán láthatók:



23. ábra: Kavaró dörzshegesztéssel létrehozott próbatestek

Forrógázos hegesztés: Ezen hegesztés során a varrat létrehozása nehézkes volt, mivel a kifűjt levegő térfogatáramának, valamint a hőmérsékletének szabályozása potenciométerek segítségével történt. A potenciométereket 1-6 közötti skálán tudtam mozgatni, de a különböző szintekhez tartozó térfogatáram (sebesség), valamint hőmérséklet ismeretlenek voltak. Az ily módon létrehozott varratok esetén csupán a szemrevételezés és a szubjektív vélemény alapján tudtam megítélni (hajlítás nélkül) azok minőségét. A forrógázos hegesztéssel létrehozott varratok minősége nagymértékben függnek a hegesztő személy tapasztalatától, ügyességétől, gyorsaságától, így rendkívül változatos eredmények születhetnek a hegesztő személytől

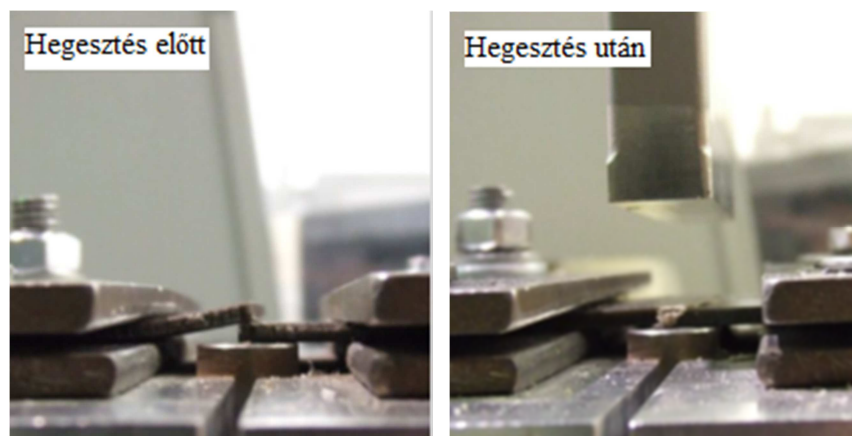
függően akár azonos alapanyagok, beállítások és hegesztési körülmények esetén is. Forrógázos hegesztéssel létrehozott hegesztett kötésekről kép az 24. ábrán található:



24. ábra: Forrógázos hegesztéssel létrehozott próbatetek

A hegesztés során PLA, valamint PLA+30BF extrudált huzalt alkalmaztam hozaganyagként.

Ultraszónikus hegesztés: Az ultraszónikus hegesztés során 80x40x2 mm méretű próbatetek között hoztuk létre a kötéseket. A kötés módja többféle lehet, esetünkben nagyon kis (1,5 mm) átlapolással tompavarratot hoztunk létre az 25. ábrának megfelelően:



25. ábra: Tompavarrat létrehozása ultraszónikus hegesztéssel [42]

A 30 tömeg% bazaltszálát tartalmazó próbatestek ultrahanghegesztési beállításai az alábbi táblázatban láthatók:

Beállítás száma	Energia [J]	Hegesztési erő [N]	Amplitúdó [%]
2	300	200	100
4	300	200	35
6	40	200	100
8	40	200	35
9	300	60	100
12	40	60	100
14	300	60	35
16	40	60	35

9. táblázat: PLA+30 tömeg% bazaltszál ultrahanghegesztés beállításai [42]

Ragasztás: Ragasztás során Henkel (Loctite, Pattex, Technomelt, Terokal, Teroson, Chemical Metal) és 3M ipari, ill. háztartási ragasztókat használtam fel. A vizsgálandó és összeragasztandó próbatesteket 1 inch szélesre vágtam fel. Átlapolt kötéseket hoztam létre, ahol az átlapolás 0,5 inch volt. Ragasztónként 3-3 kötést hoztam létre mindkét alapanyag esetén. Mivel az irodalomkutatásom során nem találtam arra vonatkozó adatokat, hogy a PLA, illetve a bazalttal erősített PLA a különböző ragasztóanyagokkal milyen jósági fokkal ragasztható, ezért különböző típusú ragasztókkal próbálkoztam. A következőkben a felhasznált ragasztóanyagok listája látható:

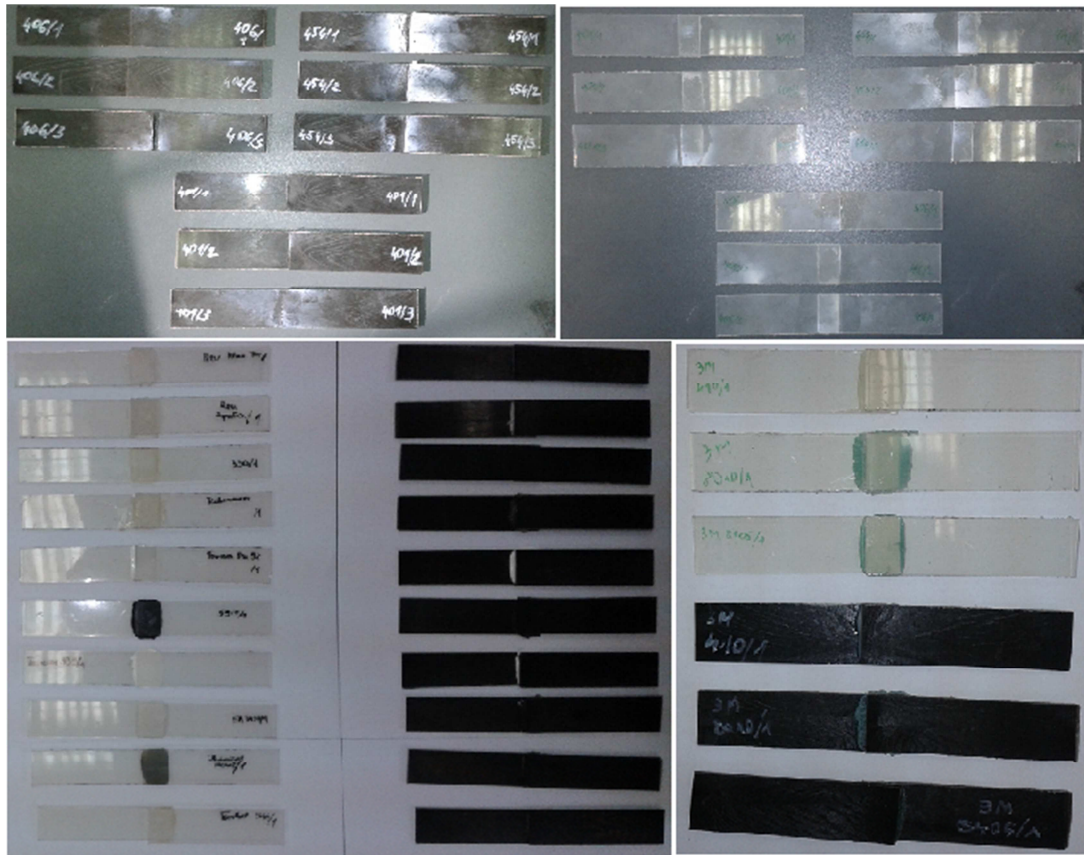
- Loctite 401 – pillanatragasztó általános felhasználásra,
- Loctite 406 – pillanatragasztó műanyagok és gumik ragasztásához,
- Loctite 454 – gél pillanatragasztó általános felhasználásra,
- Loctite EA 3430 – kétkomponensű szerkezeti epoxi ragasztó általános felhasználásra,
- Loctite 330 + 7386 aktivátor – akrilát ragasztó általános felhasználásra,
- Loctite 5910 – szilikon ragasztó fémekhez és műanyagokhoz,

- Pattex Super Fix – diszperziós építési-szerelési ragasztó,
- Pattex Palma Tex – normál faragasztó,
- Chemical Metal – kétkomponensű poliészter ragasztó általános felhasználásra,
- Terokal 2444 – oldószeres (polikloroprén bázisú) ragasztó karosszéria- és alkatrészragasztáshoz,
- Technomelt 5355 – ömledékragasztó,
- Teroson 939 – MS polimer szerkezeti ragasztó,
- Teroson PU92 – PUR ragasztó általános felhasználásra,
- 3M DP410 – kétkomponensű epoxi ragasztó jól ragasztható felületekhez,
- 3M DP8010 – kétkomponensű epoxi ragasztó rosszul ragasztható felületekhez,
- 3M DP8405 – kétkomponensű akril ragasztó jól ragasztható felületekhez.

A tizenhat féle ragasztóval alapanyagonként összesen 96 lapka között 48 ragasztott kötést hoztam létre, ami a kétféle alapanyag esetén 192 lapkát és 96 ragasztott kötést jelent. A ragasztás menete a következő:

- próbatestek vágás utáni sorjáltatása,
- a ragasztandó felületek megtisztítása Loctite 7063 nevű tisztító és zsírtalanító folyadékkal,
- a ragasztóanyag felhelyezése a ragasztási felületre,
- aktivátor alkalmazása esetén az egyik ragasztási felület aktivátorral való kezelése, másik felületre a ragasztóanyag felvitele,
- kétkomponensű ragasztó esetén, ha a kinyomóhoz nem tartozik keverőszár, a két komponens összekeverése,
- a ragasztandó felületek összeillesztése és összenyomása (minimum) a ragasztó csomagolásán jelzett időtartamig,
- olyan ragasztók esetén, ahol a ragasztóanyag távtartót (pl. üveggyöngy) nem tartalmaz, de szükséges lenne az optimális rétegvastagság biztosításához, ott távtartó külön behelyezése (esetemben vékony réz huzalt alkalmaztam a DP 410-nél),
- ragasztó megkötéséhez szükséges idő kivárása.

A ragasztott próbatestek az 26. ábrán láthatók:



26. ábra: Ragasztott próbatestek

Vizsgálati módszerek

Annak megállapítására, hogy a lézerrel, illetve forrógázos, valamint kavaró dörzshegesztéssel összehegesztett próbatestek kötése mennyire ellenállóak a hajlításra nézve, illetve a két anyag összehegedése mennyire volt sikeres, a szabad szemmel és kézzel történő vizsgálódáson kívül szükség van pontos és dokumentálható mérést biztosító gépi vizsgálatra is. Esetemben ez a hárompontos hajlítás volt. Az ultrahanghegesztés és a ragasztás során kialakított kötések vizsgálatára pedig szakítópróbákat végeztem.

Hárompontos hajlítás: Lézeres hegesztés során beállításonként 4-4, kavaró dörzshegesztés és forrógázos hegesztés esetén 3-3 hegesztett kötést hoztam létre, ezzel elősegítve, hogy a méréseim minél pontosabb eredményt adjanak. A hegesztés után a próbadarabokat egy Zwick Z020 berendezéssel (hárompontos hajlítógép) vizsgáltam. A vizsgálat során a hajlítószilárdságot mértem, majd ezt hasonlítottam össze a különböző kötési móddal készített varratok esetén.

Szakítás: A ragasztott és az ultrahanghegesztett próbatestek kötéseinek vizsgálatára szintén a Zwick Z020 berendezést használtam. Az ultrahanggal hegesztett próbatestek vizsgálata 5 mm/perc sebességgel és 60 mm befogási hosszal történt, míg a ragasztott próbatestek esetén a vizsgálat 2,5 mm/perc sebességgel és 60 mm befogási hossz mellett ment végbe.

A kísérletek, vizsgálatok során felmerülő problémák:

- A lézerhegesztések elején azt tapasztaltam, hogy a szigetelő PTFE sínek pontatlan gyártása miatt a mozgó pofa által nyomott lemezek részben egymás fölé csúsztak, ahogy a lézersugár megolvasztotta az alapanyagot. A jelenség mértékét és gyakoriságát a befogó készülék állításával mérsékelni tudtam, azonban néhány esetben ennek ellenére is előfordult.
- A hárompontos hajlítás során, ha túl magas volt a varratdudor, a nyomófej esetenként leugrott a varratról, ezzel rontva a mérés pontosságát.
- Az erősítetlen politejsav próbatestek lézerhegesztésénél az elkészült varratban sok kis buborék volt látható. A levegő, ami a buborékokat okozta, már alapanyaggyártás során is az alapanyagba kerülhetett, de a lemezek szabad levegőn való tartása alatt is felvehetett vizet a levegő nedvességtartalmából. Feltételeztem, hogy a kis buborékok gyengítik a kötést, így az alapanyagokat kiszárítva is meghegesztettem a feltételezett (alapanyagonkénti három) legjobb beállítással. A próbatestek szárítása 24 órán át 40 °C-on történt szárítókemencében. A szárított próbatestek hegesztésénél nem tapasztaltam buborékokat a varratban, ami azt mutatta, hogy a szárítás sikeres volt. A szárított és szárítatlan hegesztett próbatestek vizsgálati eredményei a 4. fejezetben olvashatók.
- A hajlítás során volt olyan eset, amikor a lézerrel hegesztett próbatestek nagymértékű lehajlás ($s=47$ mm) esetén sem törtek el. Ezekben az esetekben a hajlítást leállítottam, hogy a berendezésben ne tegyek kárt, mivel a nyomófej $s=55$ mm lehajlás értéknél az alátámasztási távolságot beállító menetes orsót eltörhette volna. Ennek elkerülésére és az érintett alkatrészek törésig való hajlítására másik berendezés használata lehet megoldás. Forrógázos hegesztésnél a hegesztési paraméterek (levegőáram, levegő hőmérséklet) pontos, számszerű és reprodukálható beállításának hiánya a mérés kiértékelését nehezékké és szubjektívvá tette.

3.7. Kiértékelés alapösszefüggései

A kísérletek kiértékelésének célja volt azt kideríteni, hogy a különböző hegesztési és ragasztási módszerekkel milyen minőségű kötések lehet létrehozni a PLA, illetve a 30 tömeg%-ban bazalttal erősített PLA lapkák között. Ennek érdekében vizsgáltam a lézerhegesztéssel, kavarázó dörzshegesztéssel, valamint forrógázos hegesztéssel létrehozott kötések hárompontos hajlítással, továbbá az ultrahanghegesztett és a ragasztott kötések minőségét a próbatestek szakításával vizsgáltam. Ragasztás és ultrahangos hegesztés esetén a kötés minőségének mérőszáma a kötés által elviselt maximális erő volt (szakítás esetén), valamint hajlítás során vizsgáltam a hajlítószilárdságot.

Maximális erő: Ultrahanghegesztés és ragasztás kiértékelése során a jellemző mennyiség a szakítópróba során mért maximális erő. A próbatestek méretbeli különbségéből adódó eltérést lapka szélességére fajlagosított erővel kompenzálva összehasonlíthatóvá vált a kétféle kötési módszer. Jósági fok számolható a hegesztett kötés és a hegesztetlen alapanyag vizsgálata során mért maximális erejének a hányadosából.

Hajlítószilárdság:

A hajlítószilárdság számítására az MSZ EN ISO 178:2011 szabvány szerinti összefüggést (1) használtam fel:

$$\sigma_{bh} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (1), [44]$$

A összefüggésben szereplő mennyiségek:

- F – az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajláshoz vagy a töréshez tartozó erő. Mértékegysége: [N]
- L – az alátámasztási távolság. Mértékegysége: [mm]
- b – a hajlítandó próbatest szélessége. Mértékegysége: [mm]
- h – a hajlítandó próbatest vastagsága. Mértékegysége: [mm]

Hajlítószilárdságot az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajlásig van értelme számolni, mivel utána az erő komponensek irányai megváltoznak. Abban az esetben, ha a próbatest nem törik el eddig a lehajlás értékig, lehetőség van a töréshez tartozó erővel

számolni ún. határhajlító feszültséget. A kiértékelés során a 10%-os lehajláshoz tartozó erővel, a szabványnak megfelelően számoltam ki a hegesztett kötésekre jellemző hajlítoszilárdságokat. A kísérletek során a hegesztett próbatestek esetén $L=100$ mm, az alapanyagok esetén $L=60$ mm alátámasztási távolságot állítottam be.

Jósági fok:

Az alapanyag és a legnagyobb hajlítoszilárdsággal rendelkező hegesztett próbatest kiszámolt hajlítoszilárdság értékeiből anyagonkénti jósági fok (ϕ) határozható meg. Ez egy hányados, ami a hegesztett kötés minőségét mutatja a nem hegesztett alapanyag szilárdságához viszonyítva. Ideális esetben a jósági fok értéke 1 (100%).

A jósági fok számolására az alábbi összefüggést használtam fel:

$$\phi = \frac{\sigma_h}{\sigma_a} \quad (2)$$

A képletben szereplő mennyiségek:

- σ_h - adott alapanyag hegesztett kötései közül a legnagyobb elért hajlítoszilárdság. Mértékegysége: [MPa]
- σ_a - az alapanyag hajlítása során mért hajlítoszilárdság. Mértékegysége: [MPa]

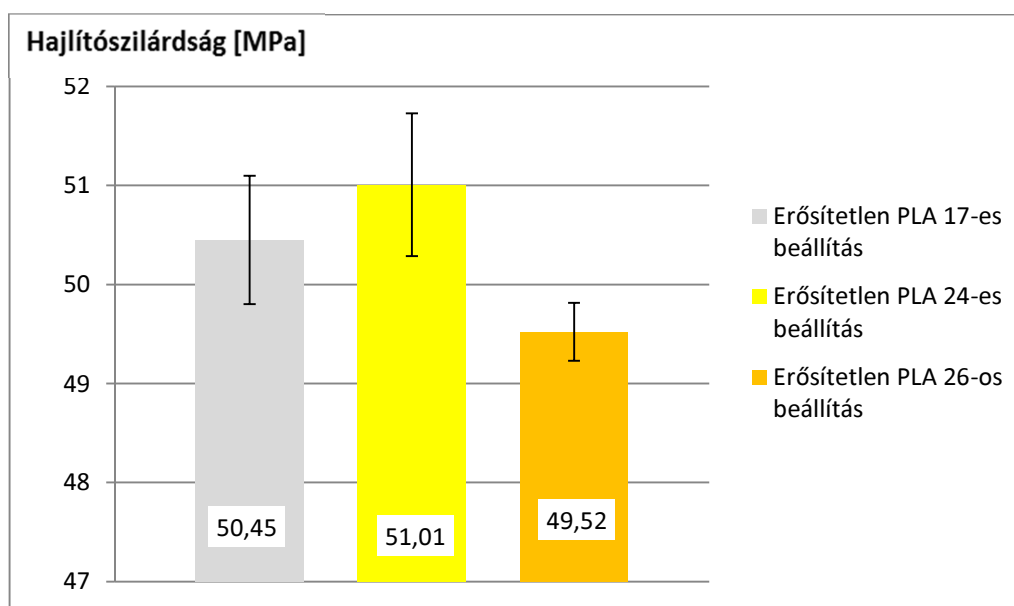
Ragasztás és ultrahanghegesztés esetén a jósági fok számolása hasonlóan, de a szilárdságok helyett maximális erők hányadosával történik.

4. Eredmények

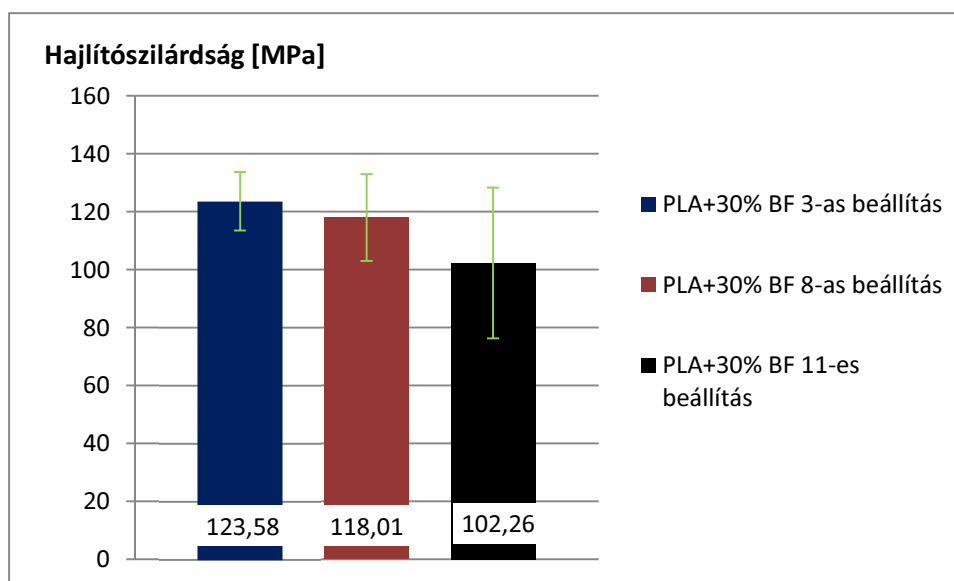
Szakedolgozatomban vizsgáltam a lézerhegesztés esetén a korona-, illetve a gyökoldali hajlítás közötti különbséget.[43] Az ottani eredményeket alapul véve lézerhegesztés és forrógáz hegesztés esetén kijelenthetem, hogy nincs jelentősége, hogy melyik oldalt választjuk a vizsgálati oldalnak hajlítás során. Kavaró dörzshegesztés esetén azonban, a technológiai megvalósításból és az egyoldali varratból következően fontos szerepe lesz, hogy korona- vagy gyökoldali-e a hajlítás. Így, Dr. Kiss Zoltán doktori disszertációjára alapozva [37] a kavaró dörzshegesztés hajlító vizsgálatait koronaoldalról végeztem el.

4.1. Lézerhegesztéssel létrehozott varratok minősítése

Szakedolgozatomban PLA és 5, illetve 30 tömeg%-ban bazaltszállal erősített PLA hegesztett kötéseit vizsgáltam. Ebben a dolgozatban az ott kapott eredményeket más szemszögből nézve, más hegesztési eljárásokkal hasonlítom össze. Az összehasonlítás alapját a varrat kötőszilárdság képezi, továbbá az alapanyag és a hegesztett kötés jósági foka szolgál a különböző kötési technológiák minél jobb összehasonlítására.

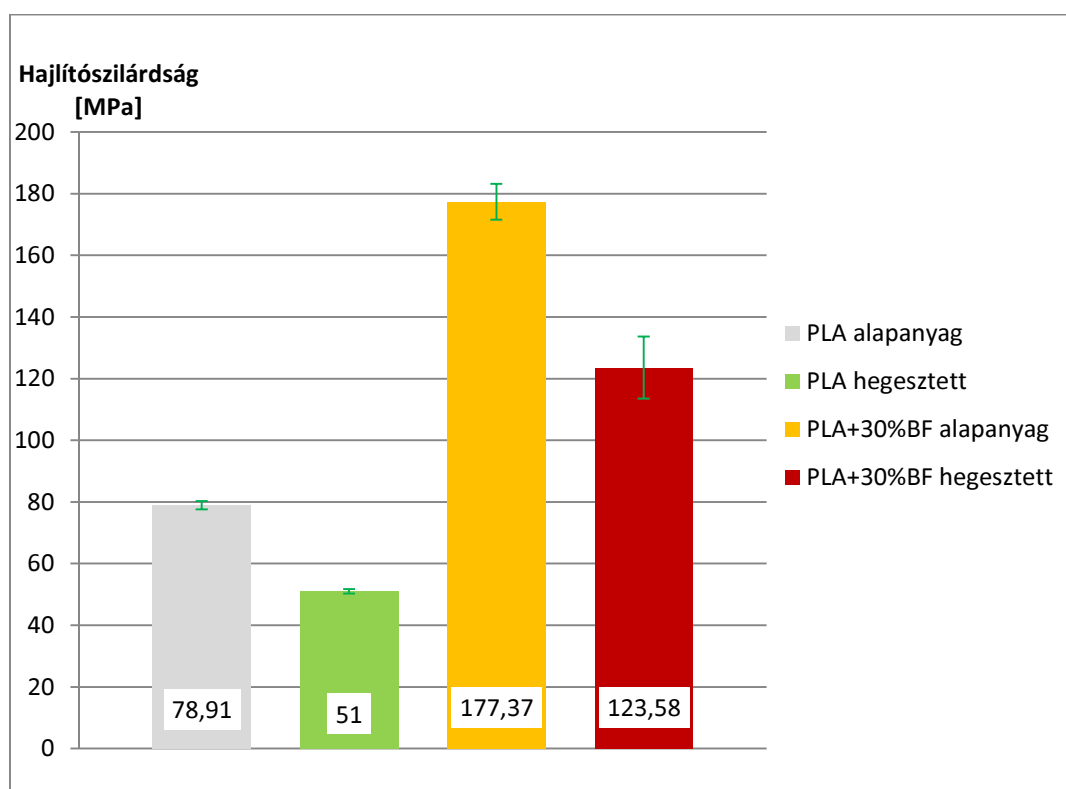


27. ábra: Erősítetlen politejsav próbatestek hajlítószilárdsága a különböző hegesztési beállítások esetén



28. ábra: 30 tömeg% bazaltszállal erősített politejsav próbatestek hajlítószilárdsága a különböző hegesztési beállítások esetén

Az anyagoként három különböző beállítással létrehozott kötések közül a legnagyobb hajlítószilárdságú hegesztett kötést összehasonlítottam az alapanyag hajlítószilárdságával a szállal erősített és erősítetlen esetben, aminek eredményeként a 29. ábrán látható diagramot kaptam.



29. ábra: Az erősítőszál-tartalom hatása a hajlítószilárdságra

Mint az a diagramról is jól látszik, a bazaltszál erősítőanyag alkalmazásával mind az alapanyag, mind pedig a hegesztett kötés hajlítószilárdsága nőtt. Megfigyelhető az is, hogy a hegesztés elridegítette az anyagot, mivel a hegesztett kötések tartalmazó próbatestek kisebb terhelés esetén törtek el, mint az alapanyagok.

Jósági fok:

A jósági fokot a 3.7. fejezetben leírtaknak megfelelően értelmeztem és számoltam ki. A (2)-es jelű összefüggéssel számolt hegesztett kötésekre jellemző jósági fok értékei a 10. táblázatban láthatók:

Alapanyag típusa	Jósági fok [%]
Erősítetlen PLA	64,6
PLA + 30% BF	69,7

10. táblázat: Jósági fokok a különböző alapanyagok esetén

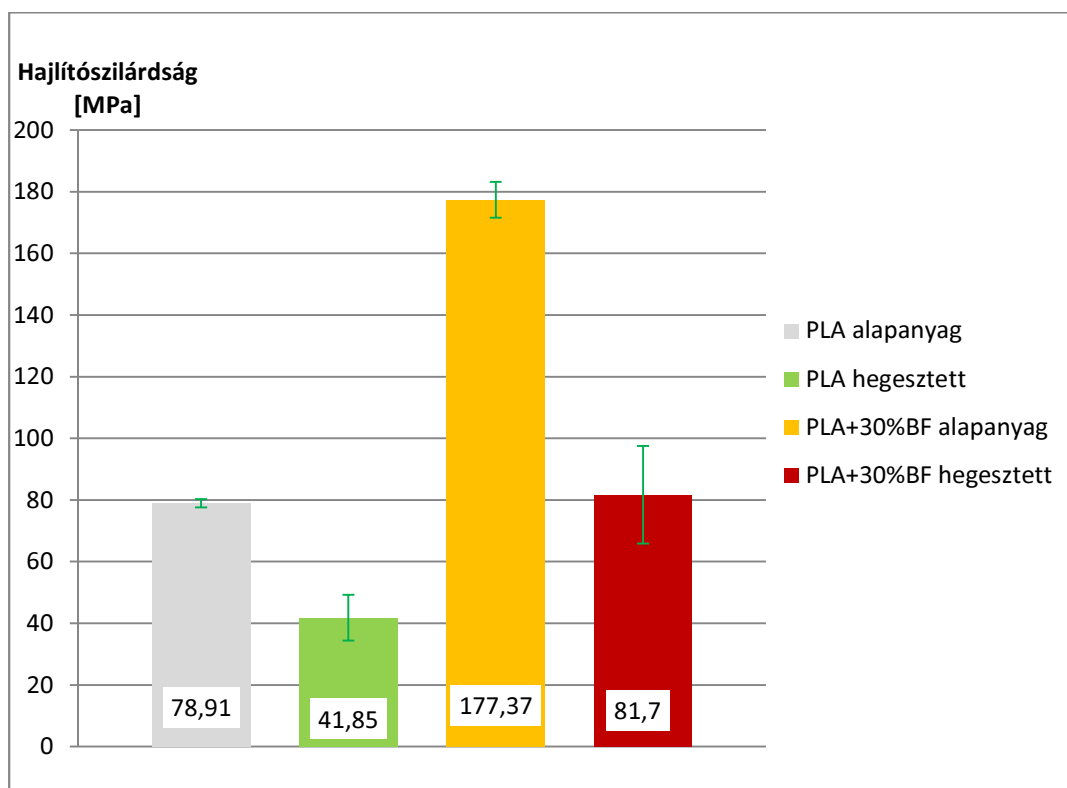
Összességében megállapítható, hogy a két anyag esetén a lézersugárral való hegesztés sikeres volt, a vártnak megfelelő jósági fokú kötést sikerült létrehozni a próbatestek között. A bazaltszállal való erősítés célját elérte: a 30 tömeg%-kal erősített esetben alapanyagnál 2,25-szörös, hegesztett kötésnél pedig 2,42-szeres növekedés tapasztalható az erősítetlen PLA-hoz képest.

4.2. Forrógázos hegesztéssel létrehozott varratok minősítése

Forrógázos hegesztéssel létrehozott kétoldali varratok vizsgálatának céljából hárompontos hajlítást végeztem a próbatesteken. A hajlítás során néztem a többi hegesztési módszerrel összehasonlítás alapjául szolgáló hajlítószilárdságot.

A kiértékelés során azt tapasztaltam, hogy a bazaltszállal erősített PLA átlagosan nagyobb terhelést képes elviselni erősítetlen társánál (30. ábra), de a diagramról az is látszik, hogy a töltött polimer esetében a szórás nagy. Ennek a már fentebb említett hegesztő személytől nagymértékben függő változó és egyenetlen varratkialakításon túl az is oka lehet, hogy az alapanyag készítése (extrudálás) mind a lapka, mind pedig a hozaganyag (huzal) esetében a bazaltszál extruderbe történő kézi adagolásával történt, aminek nagy hátránya a lehetséges pontatlanság, száltartalom-egyenetlenség, amiknek hatásai akár ennél a vizsgálatnál is jelentkezhetnek. Ennek kiderítésére és még pontosabb és hitelesebb adatok szerzéséhez nagyobb számú minta készítése és vizsgálata megfelelő megoldás lehet.

A forrógázos hegesztéssel létrehozott próbatestek hajlító vizsgálatainak alapanyagonkénti átlagos eredményeit összehasonlítottam az alapanyag hajlítószilárdságával, amiből a 30. ábrán látható diagramok rajzolhatók ki:



30. ábra: Erősítőszál-tartalom hatása a kötősszilárdságra forrógázos hegesztés esetén

Jósági fok:

A jósági fokot a 3.7. fejezetben leírtaknak megfelelően értelmeztem és számoltam ki. A (2)-es jelű összefüggéssel számolt hegesztett kötésekre jellemző jósági fok értékei a 11. táblázatban láthatók:

Alapanyag típusa	Jósági fok [%]
Erősítetlen PLA	53,03
PLA + 30% BF	46,06

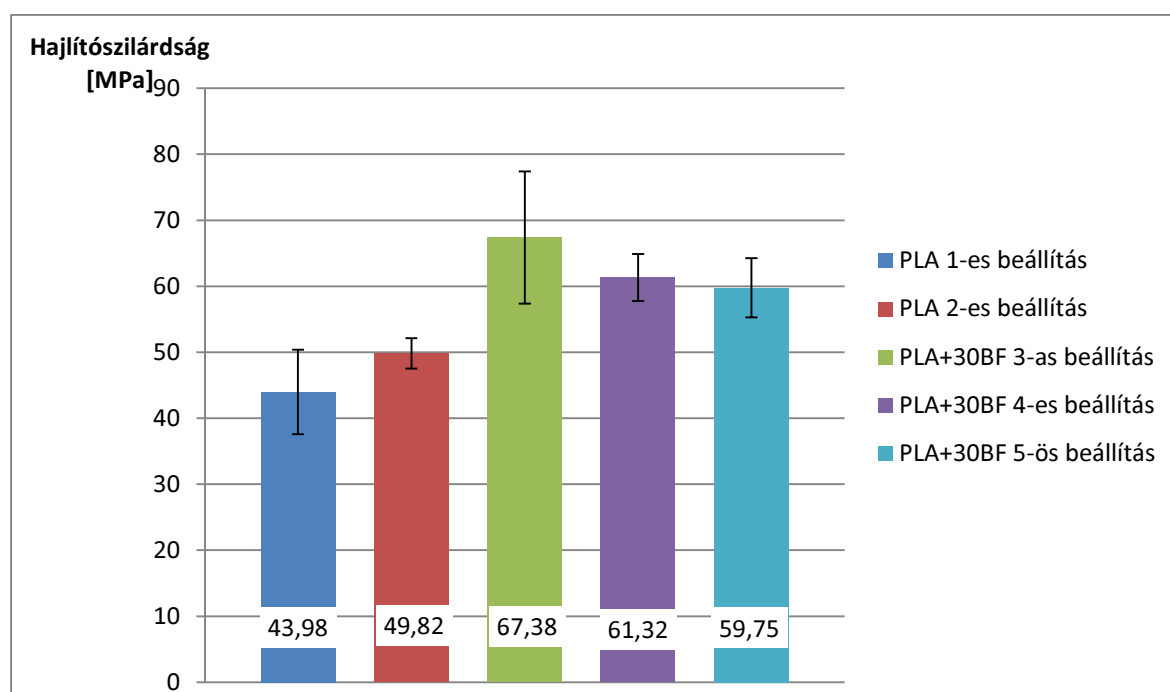
11. táblázat: Jósági fokok forrógázos hegesztésnél a különböző alapanyagok esetén

Összességében megállapítható, hogy kisebb jósági fokú kötést sikerült létrehozni a próbatestek között forrógázos hegesztéssel, mint lézersugárral. A bazaltszállal való erősítés azonban itt is megfigyelhető: a 30 tömeg%-kal erősített esetben a hegesztett kötésnél 1,95-

szőrös növekedés tapasztalható az erősítetlen PLA-hoz képest, ami szintén csekélyebb a lézersugaras hegesztéssel elért eredményhez képest.

4.3. Kavaró dörzshegesztéssel létrehozott varratok minősítése

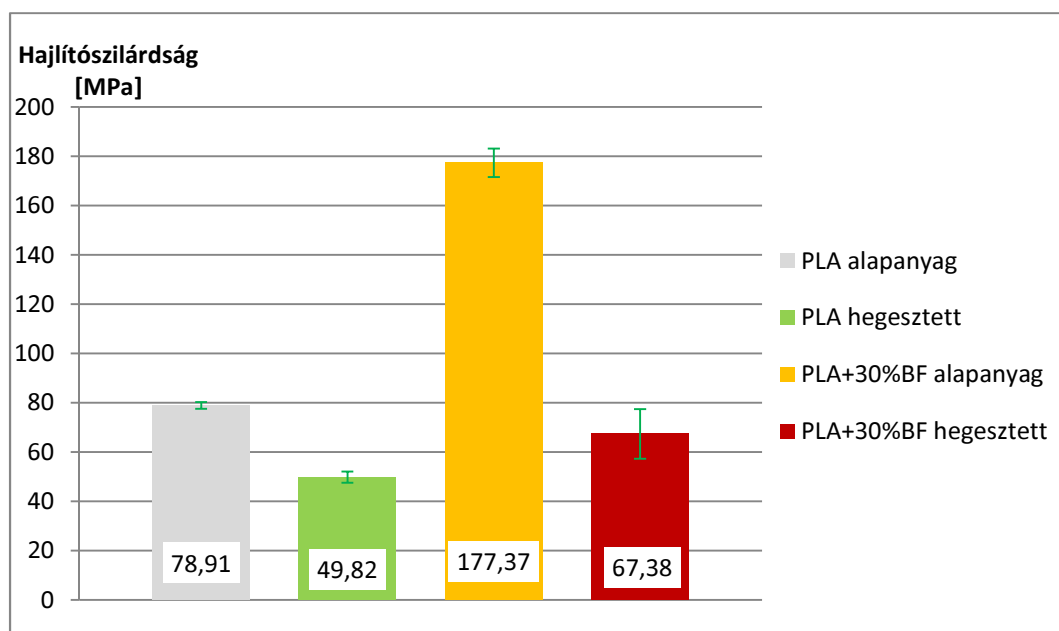
Kavaró dörzshegesztéssel egyoldali varratokat hoztunk létre a 3.6. fejezetben leírt beállításokkal. A hegesztett próbatesteket hárompontos hajlítással eltörtük. A 4-es beállításnál az egyik mérést hibásnak tekintettem és a számolásokba nem vettem bele, mivel gyökoldali volt a hajlítás, aminek következtében az eredmény a vártnál sokkal kisebb erő lett. A kavaró dörzshegesztés hajlítása során számolt hajlítószilárdságok diagram formájában a következő ábrán láthatók:



31. ábra: Kavaró dörzshegesztés hajlítása során számolt hajlítószilárdságok

A diagramról jól látszik a létrehozott kötés egyenletessége, ami a különböző beállításokkal elért alapanyagonként közel azonos szilárdságban figyelhető meg. Látható továbbá, hogy a szálerősítés ebben az esetben is kifejtette a hatását: az erősítetlen PLA legnagyobb erőt bíró varrata sem éri el a „leggyengébben” sikerült erősített PLA maximális erejét.

A kavaró dörzshegesztéssel létrehozott próbatestek hajlító vizsgálatainak alapanyagonkénti átlagos eredményeit összehasonlítottam az alapanyag hajlítószilárdságával, amiből az alábbi diagramok rajzolhatók ki:



32. ábra: Erősítőszál-tartalom hatása a kötőszilárdságra kavarási dörzshegesztés esetén

Jósági fok:

A jósági fokot a 3.7. fejezetben leírtaknak megfelelően értelmeztem és számoltam ki. A (2)-es jelű összefüggéssel számolt hegesztett kötésekre jellemző jósági fok értékei a 12. táblázatban láthatók:

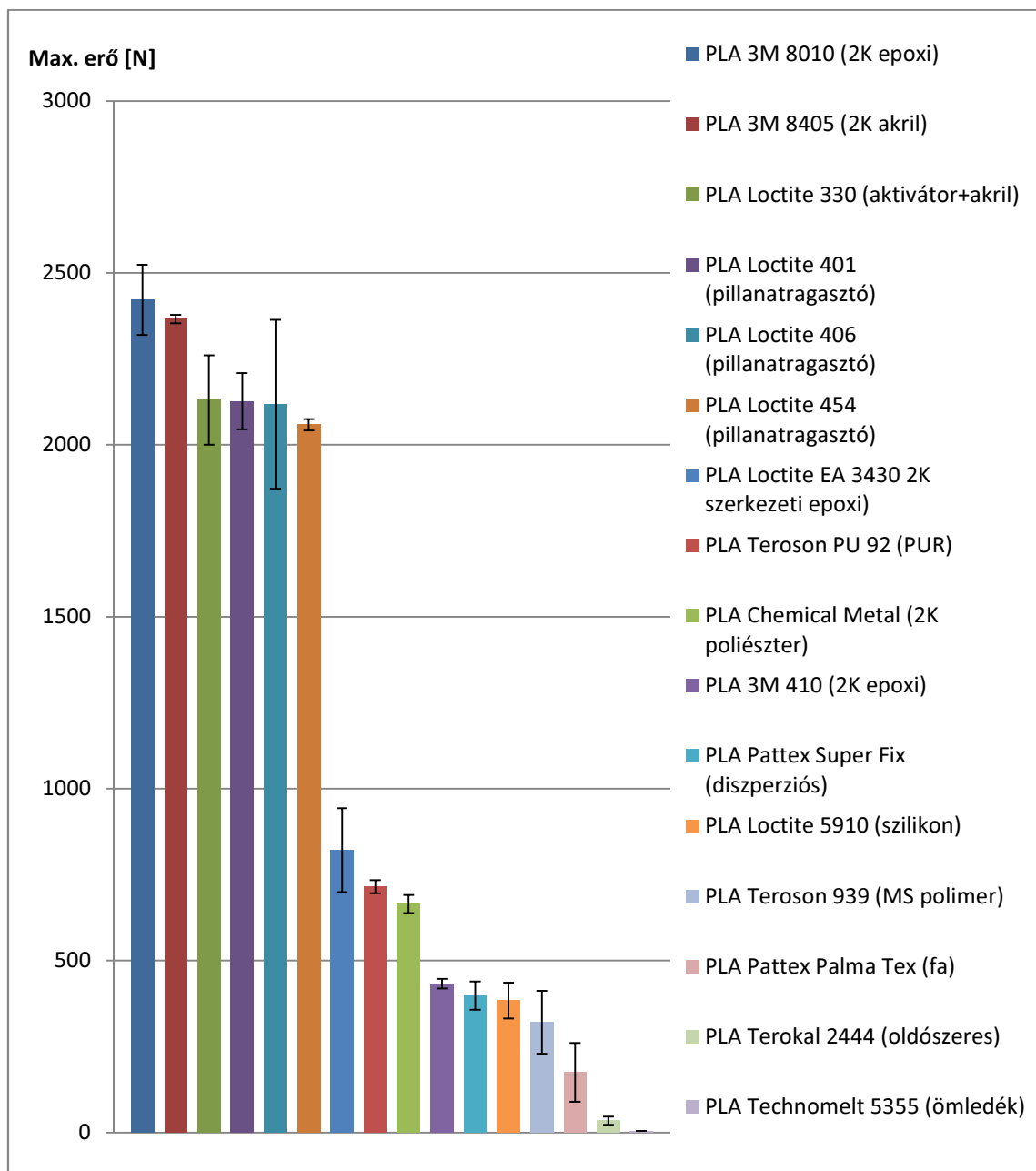
Alapanyag típusa	Jósági fok [%]
Erősítetlen PLA	63,13
PLA + 30% BF	37,98

12. táblázat: Jósági fokok kavarási dörzshegesztésnél a különböző alapanyagok esetén

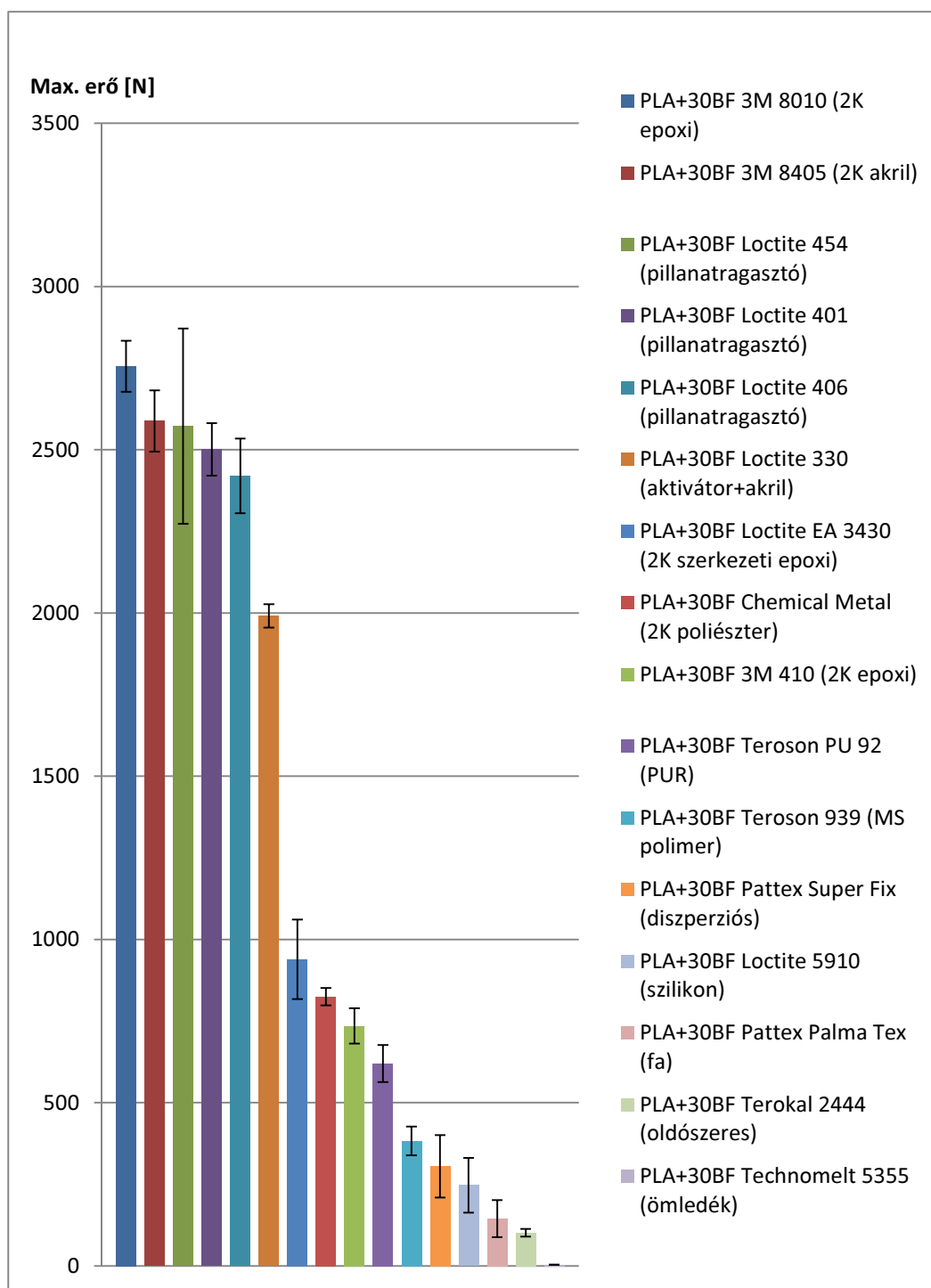
Összességében megállapítható, hogy erősítetlen PLA kavarási dörzshegesztésével közel azonos jósági fokú kötést sikerült létrehozni a próbatestek között, mint lézersugaras hegesztéssel, azonban az erősített PLA esetében mind a lézersugaras, mind pedig a forrógázos hegesztésnél rosszabb jósági fokú hegesztett próbatestet sikerült létrehozni. A bazaltszállal való erősítés azonban itt is megfigyelhető: a 30 tömeg%-kal erősített esetben a hegesztett kötésnél 1,35-szörös növekedés tapasztalható az erősítetlen PLA-hoz képest, ami szintén csekélyebb a lézersugaras hegesztéssel elért eredményhez képest.

4.4. Ragasztott kötés minősítése

A 3.6. fejezetben említett ragasztókkal létrehozott kötések szakítópróbával minősítettem. Ebben az esetben is a minőség megítélésének mérőszáma a kötés (vagy alapanyag) által bírt maximális erő volt. A szakítás szintén a 3.6. fejezetben, „Szakítás”-nál leírtaknak megfelelően történt. A különböző ragasztók esetén mért maximális erők az 33. és 34. ábrán láthatók. A könnyebb átláthatóság érdekében külön választottam a PLA és az erősített PLA ragasztott kötéseit:



33. ábra: PLA kötése különböző ragasztókkal, a maximális szakítóerő szerinti csökkenő sorrendben



34. ábra: PLA+30BF kötése különböző ragasztókkal, a maximális szakítóerő szerinti csökkenő sorrendben

A fenti diagramokról az látható, hogy a különböző ragasztók az erősítetlen PLA és a 30 tömeg%-ban bazaltot tartalmazó PLA lapkákat is hasonló jelleggel ragasztják jól illetve kevésbé jól. Dolgozatomban „jó” minősítést kapott az a ragasztó, amellyel a kötést létrehozva a szakítópróba során az alapanyag tört (szakadt) el. Jól látható a diagramról ezen ragasztók

elkülönülése: a hatodik oszlop után (PLA esetén Loctite 454, PLA+30BF esetén Loctite 330) sokkal kisebb erőket mértem. A kétkomponensű akril (3M 8405), illetve epoxi (3M 8010), a pillanatragasztók (Loctite 401, 406, 454) és az aktivátorral együtt használt akrilát (Loctite 330) ragasztók esetében a diagramok az alapanyag által bírt maximális szakítóerőt mutatják, míg az ezt követő diagramokon vagy a ragasztó ment tönkre kohéziós tönkremenetellel, vagy a ragasztóanyag a felülettől elválva adhéziós tönkremenetelt produkált.

Jósági fok:

Jósági fokot határoztam meg az alapanyagnál mért szakítóerő és a legjobb ragasztott kötés szakítópróbája során mért maximális erő hányadosából, aminek eredménye a következő táblázatban található:

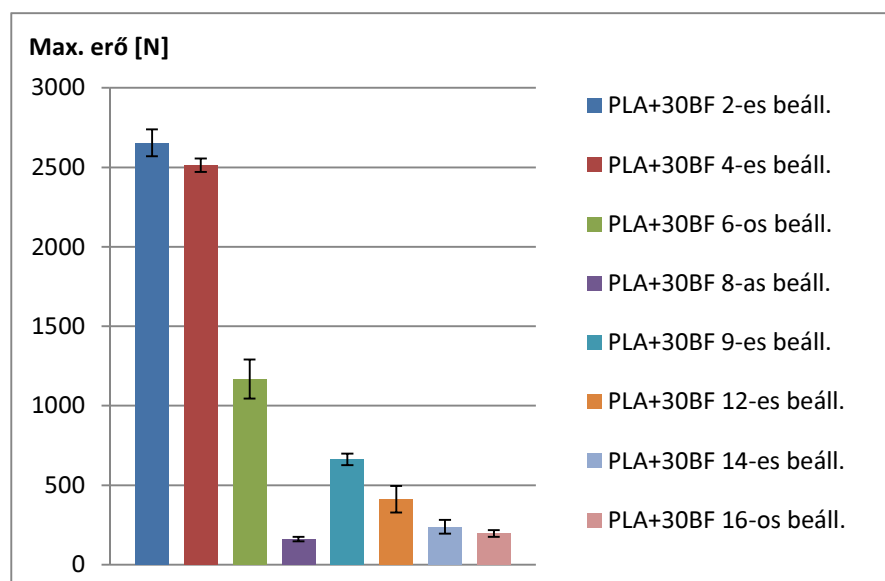
Alapanyag típusa	Jósági fok [%]
Erősítetlen PLA	76,11
PLA + 30% BF	61,04

13. táblázat: Ragasztás jósági foka

A táblázatból látszik, hogy jó minőségű ragasztott kötések hozhatók létre mind PLA, mind bazalttal erősített PLA próbatestek esetén – a megfelelő ragasztóanyag kiválasztásával. Munkám során ipari és háztartási ragasztókat volt lehetőségem kipróbálni. Mivel a PLA biológiailag lebomló polimer, érdemes lenne megvizsgálni a ragaszthatóságát részben biobázisú [45] ragasztóanyaggal is, de munkám során ilyen típusú ragasztóhoz sajnos nem tudtam hozzájutni.

4.5. Ultrahanghegesztéssel létrehozott varratok minősítése

Az ultrahanggal hegesztett próbatestek kötéseit szakítással minősítettem, hasonlóan a ragasztott próbatestekhez. A szakítás során mért kötésre jellemző maximális erőkkkel és az alapanyagra vonatkoztatott jósági fokkal vizsgáltam az ultrahanghegesztéssel létrehozott varrat minőségét. Ultrahanghegesztéssel 30 tömeg% bazaltszálat tartalmazó próbatestek lettek hegesztve, ezek szakításából és jósági fokából vontam le következtetéseket. A szakítás során mért eredmények a következő ábrán láthatók:



35. ábra: Ultrahanggal hegesztett próbatestek szakítása során mért erők

A diagramról leolvasható, hogy a legnagyobb szakítóerővel jellemezhető kötés a maximális amplitúdóval, 300 J energiával és 200 N hegesztési erővel létrehozott varrat. Akár az energiát, akár a hegesztési erőt vagy az amplitúdót alacsonyabb értékre állítjuk, gyengébb kötés jön létre. Azonban a ragasztással való jobb összehasonlíthatóság érdekében itt is jósági fokot határozunk meg a 3.7. fejezetben leírtaknak megfelelően (a legnagyobb szakítóerővel rendelkező próbatest esetén):

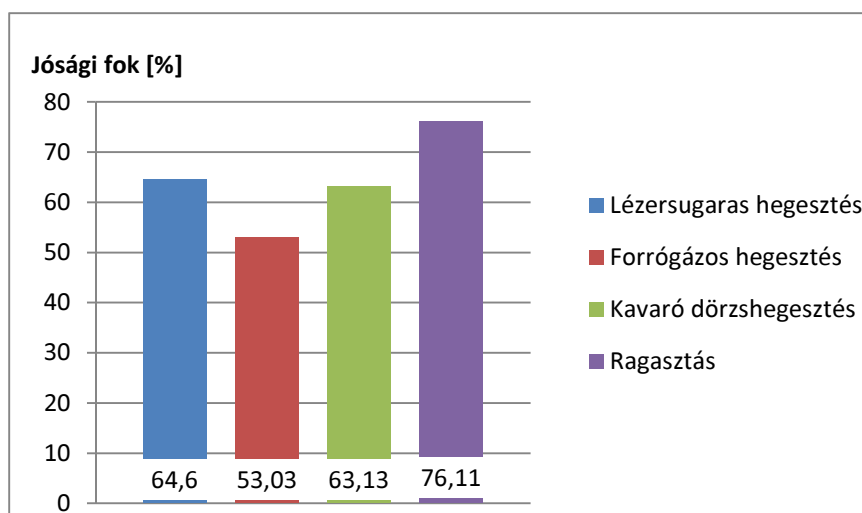
Alapanyag típusa	Jósági fok [%]
PLA + 30% BF	58,81

14. táblázat: Ultrahanggal hegesztett PLA+30BF próbatest jósági foka

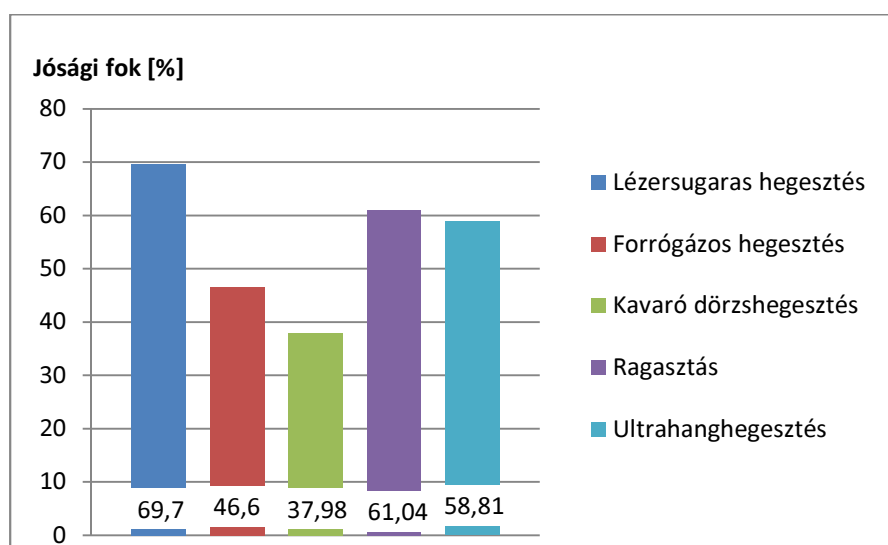
A táblázatból látható, hogy a ragasztással közel azonos jósági fokú kötést tudtunk létrehozni ezzel a technológiával.

4.6. Kötéstechnológiák összehasonlítása

A fent említett kötéstechnológiák összehasonlítására az elvégzett hegesztések és ragasztások kiértékelése során kapott jósági fokok vannak segítségünkre. Ezeket közös diagramba foglalva átfogó képet kaphatunk arról, hogy a (hőre lágyuló) polimereknél leggyakrabban alkalmazott kötéstechnológiák közül a PLA, illetve bazalttal erősített PLA anyag esetén milyen lehetőségek közül, milyen eredményeket várhatunk.



36. ábra: Jósági fokok PLA különböző kötéstechnológiái esetén



37. ábra: Jósági fokok PLA+30BF különböző kötéstechnológiái esetén

A fenti két diagramon látható, hogy a bazalttal erősített politejsav kavaró dörzshegesztésének kivételével, a többi technológiával 40-76 %-os jósági tényezőjű varratokat lehetett létrehozni. A kavaró dörzshegesztés többi kötéshez képesti alacsony jósági fokának oka lehet, hogy ott a technológia sajátosságaiból adódóan csak egyoldali varrat készíthető, ellenben a lézersugaras, valamint a forrógázos hegesztéssel. Az erősítetlen és erősített alapanyagot együttesen nézve, ragasztással, illetve lézersugaras hegesztéssel sikerült a legjobb minőségű kötések létrehozni. A két technológia már a megvalósításában, elvében, így alapjaiban eltér egymástól, azonban úgy gondolom, hogy ennek ellenére mégis összehasonlítható egymással. Mivel az alapanyag későbbi felhasználását tekintve előfordulhat olyan eset, hogy mindkét (vagy akár a többi) technológia (is) elérhető és használható egy

bizonyos feladat megvalósítására, ilyen esetben megkönnyítheti a választást az, ha tudjuk, hogy a tervezett kötési módszerrel milyen minőségben és milyen kompromisszumok árán tudunk varratot (kötést) létrehozni.

5. Összefoglalás

Dolgozatom témája a politejsav bazalttal alkotott kompozitjának kötéstechológiai lehetőségei és azok vizsgálata volt. Szakdolgozatomban PLA és bazalttal erősített PLA lézersugaras hegesztésével foglalkoztam, az ott elkezdett munkám folytatása ez a dolgozat. Munkámat irodalomkutatással kezdtem, ami során utánanéztem a biopolimerek jellemzőinek, felhasználási módjainak és jelentőségének. Ezek közül is elsősorban az általam alkalmazott biokompozit alkotóelemeire, előnyös tulajdonságaira fókuszáltam.

Esetemben a mátrix szerepét a manapság egyre népszerűbb hőre lágyuló politejsav töltötte be, az erősítőanyag pedig bazaltszál formájában volt jelen a kompozitban. Munkám az alapanyaggyártással kezdődött, ahol az erősítetlen politejsav lapkák fröccsöntésén kívül 30 tömeg% bazaltszállal erősített politejsav próbatesteket kellett létrehoznom. A későbbiekben ezeknek a próbatesteknek a hegeszthetőségét, ragaszthatóságát, kötésszilárdságát, maximális szakítóerejét vizsgáltam.

A hegesztéseket és ragasztásokat a Polimertechnika Tanszéken, illetve a Henkel Magyarország Kft. budapesti laborjában végeztem. A hegesztésekhez a tanszéki laboratóriumban található 25 W teljesítményű CO₂ lézert, kavaró dörzshegesztő- és forrógázos hegesztőgépet, valamint az ultrahanghegesztő gépet használtam, ragasztásokhoz pedig a Henkel és 3M jóvoltából biztosított 16-féle ragasztóanyagot használtam fel. A lézerrel, forrógázos hegesztéssel kétoldali, a kavaró dörzshegesztéssel pedig egyoldali varratot készítettem. Ultrahanggal tompavarratot, ragasztással pedig fél inch átfedéssel átlapolt kötéseket hoztam létre. Minden technológiánál egy adott beállításhoz legalább 3 minta tartozott. Így körülbelül 165 kötés vizsgálatát végeztem el a dolgozat készítése során. A lézerrel, forrógázzal és dörzshegesztéssel hegesztett próbatesteket hárompontos hajlító berendezéssel a varrat mentén meghajlítottam. Ultrahanghegesztés és ragasztás esetén a vizsgálati módszer szakítás volt. A hajlítóvizsgálatok során mértem a lehajláshoz szükséges erőt. A mért adatokból kiszámoltam az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajláshoz tartozó erővel a különböző beállításokkal hegesztett lemezek hajlítószilárdságát. Szakítóvizsgálatok esetén azt a maximális erőt mértem, amit a kötés (esetenként az alapanyag) bírt. A kiszámolt hajlítószilárdságokból és mért maximális erőkből a hegesztetlen alapanyagra viszonyított jósági fokot határoztam meg, amivel a különböző kötéstechológiákat jellemeztem és összehasonlítottam.

A kiértékelés során azt az eredményt kaptam, hogy a szálerősített anyag lézerhegesztett kötéseinek hajlítószilárdsága 30 tömeg%-os bazaltszál tartalom esetén pedig

több mint 2,4-szeresére nőtt, ez a szám forrógázos hegesztett kötés esetén 1,95, kavaró dörzshegesztés esetén pedig 1,35 volt. Emellett azonban az erősítőszál növelésével a kötés minden esetben ridegebbé vált, egyre kisebb mértékű lehajlást volt képes elviselni. A jósági fokokat tekintve 36-76 % közötti kötések tudtam létrehozni, a legmagasabb jósági fokkal rendelkező kötéstechnológiák (mindkét alapanyag esetén) a lézersugaras hegesztés és a ragasztás voltak. Bár a különböző módon alkatrészeket egymáshoz csatoló kötéstechnológiák összehasonlítása nehézkes, úgy gondolom, hogy a meghatározott jósági fokkal egy, az alapanyag későbbi felhasználását és technológia kiválasztását segítő paramétert határoztam meg.

Összességében elmondható, hogy a politejsav és kompozitjának hegesztése lézersugárral, forrógázzal, kavaró dörzshegesztéssel és ultrahanggal, valamint ragasztása (a megfelelő ragasztóanyag kiválasztásával) lehetséges és egyben sikeresnek is tekinthető, ezzel tovább segítve a biokompozitok felhasználhatóságát és további terjedését.

Irodalomjegyzék

- [1] Pál K.-né: Komolyan kell venni a biopolimereket. Műanyagipari Szemle, 71, 2011/6.
- [2] Biopolimerek alkalmazása:
http://www.pt.bme.hu/futotargyak/26_BMEGEPTAGA4_2013oszi/Biopolimerek_alkalmaz%C3%A1sa.pdf (2013.10.20.)
- [3] Biopolimerek és lignocellulózok műanyagipari alkalmazásának lehetőségei:
http://vegyeszkar2005.ch.bme.hu/Biomernoki/Zoldkemia/Bioenergia_biopolimerek.pdf (2013.10.21.)
- [4] Elég lesz-e a biomassza a bioműanyagokhoz? Műanyagipari Szemle, 80-82, 2012/2.
- [5] Borsa J.: Új szál: a politejsav, Magyar Textiltechnika LXIII. évf., 192-204, 2010/5.
- [6] Bodnár I.: Potenciálisan biodegradábilis, politejsav bázisú polimerek szintézise és vizsgálata, PhD értekezés, Debreceni Egyetem, 2002.
- [7] Hulladékgazdálkodás IV: http://www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/hulladek/hull-kmm-sc-l/hulladekgazd_4-ea-2013_muanyag%20es%20gumi_km_1.pdf (2013.10.21.)
- [8] Pál K.-né: A bioműanyagok jelene és jövője, Műanyagipari Szemle, 2007/2.
- [9] Granta's CES Edupack 2011 program (2013.10.28.)
- [10] Deák T.: Bazaltszál – az üvegszál vetélytársa, Műanyagipari Szemle, 2008/3.
- [11] <http://www.instron.co.hu/wa/solutions/Tensile-Strength-of-Basalt-Fiber-Reinfor.aspx>
- [12] <http://www.build-on-prince.com/basalt-fiber.html#sthash.VP0JqMBw.dpbs>
- [13] Pölöskei K., Czigány T.: Bazaltszál-halmazban jelenlévő szálfejek hatásának vizsgálata, Anyagvizsgálók Lapja, 57-60, 2005/2.
- [14] Singha K.: A Short Review on Basalt Fiber, International Journal of Textile Science, 19-28, 2012, 1(4).
- [15] Xi C., Yan L., Ning G.: A novel basalt fiber-reinforced polylactic acid composite for hard tissue repair, Biomedical Materials, 1-8, 2010.
- [16] Denni K., Byung S. K., Ho Y. L., Joong Y. L.: Mechanical properties of basalt fiber/polylactic acid composites-effects of various treatments, 16th International Conference on Composite Structures, 2011.
- [17] T. Tábi, P. Tamás, J. G. Kovács: Chopped basalt fibres: A new perspective in reinforcing poly(lactic acid) to produce injection moulded engineering composites from renewable and natural resources, eXpress Polymer Letters Vol.7, No 2, 107-119, 2013.
- [18] Kötések: http://www.pt.bme.hu/segedletek/b4_kotesek_v5.pdf, 2013.10.16.

- [19] Kiss Z., Czigány T.: Polimerek hegesztése és hegeszthetősége. Anyagvizsgálók Lapja, 1, 98-102, 2007/2
- [20] Jordan Rotheiser: Joining of Plastics - Handbook for Designers and Engineers. Hanser Publishers, Munich (1999).
- [21] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, Budapest, 2007.
- [22] http://www.rems.de/maint_img/R254025_Detail_1b629d62-6f90-450e-a015-877c514bbaac.png
- [23] http://biofiz.sote.hu/run/dl_t.php?id=1093&tid=3
- [24] http://www.trotec.hu/hu/lezer_ismeretek/lezer_alapok/
- [25] Diagnosztikai és terápiás módszerek biofizikai alapjai: Lézer: http://biofizika.aok.pte.hu/hu/oktatas/diagnosztika/2008-2009/08_lezer_OJ_0809.pdf
- [26] Seiji K.: Handbook of laser welding technologies, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [27] Pál K.-né: Műanyagok hegesztése lézersugárral, Műanyagipari Szemle, 2004/3.
- [28] http://www.emmk.hu/hirlevel/4/P4_Muanyagok_lezehegesztese.pdf, 2013.10.05.
- [29] Bánhegyi Gy.: Hegesztési módszerek közötti választás szempontjai, Műanyagipari Szemle, 2011/6.
- [30] R. Klein: Laser welding of plastic, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2011.
- [31] http://www.pt.bme.hu/futotargyak/26_BMEGEPTAGA4_2012oszi/RAGASZT%C3%81S_20121107.pdf (2014.09.30.)
- [32] Dr. Füzes László: Műanyagok anyag- és technológiaválasztás. Bagolyvár Könyvkiadó, 267-271 (1994).
- [33] Farkas F., Farkas F.J.: A ragasztás kézikönyve. Műszaki Könyvkiadó, 23-27, 293 (1997).
- [34] <http://www.muanyagipariszemle.hu/2011/02/muanyagok-ragasztasanak-szempontjai-12.pdf> (2014.10.01.)
- [35] Pereira da C. A., Botelho E. C., Costa M. L., Narita N. E., Tarpani J. R.: A Review of Welding Technologies fog Thermoplastic Composites in Aerospace Applications, J. Aerosp. Technol. Manag., Sao José dos Campos, Vol. 4, No 3, pp. 255-265, Jul.-Sep., 2012
- [36] Sercer M., Raos P.: Joining of Plastics and Composites, Encyclopedia of Life Support Systems (Sample Chapters)
- [37] Kiss Z.: Polimerek kavaráó dörzshegesztése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011.

- [38]http://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4032D_films_pdf.pdf
- [39]http://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3251D_injection-molding_pdf.pdf (2014.09.16.)
- [40]http://www.basfiber.com/Sites/basfiber/Uploads/BCS_TDS_KV12_eng.B5EAB8876B9C45EC84B67498C27AB6B0.pdf
- [41]http://www.pt.bme.hu/gepkepek/285_HiQ%20Evolution.jpg
- [42] Kaponya T.: Bazalttal erősített politejsav kompozit ultrahanghegesztése, Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2013.
- [43] Fehér M.: Bazalttal erősített politejsav kompozit lézersugaras hegesztése, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2013.
- [44] Hajlítás: http://www.pt.bme.hu/segedletek/a1_hajlitas_v11.pdf
- [45]http://www.henkelna.com/us/content_data/LT6363_FlexPack_SellSheet_LR_F361644.pdf