

## Politejsav anyagú lemezek hegesztési és ragasztási lehetőségeinek vizsgálata

### Absztrakt magyar:

Cikkünkben fröccsöntéssel készült politejsav (PLA) lemezek hegeszthetőségét és ragaszthatóságát elemeztük különböző technológiákkal. Hegesztési módszerek közül a lézersugaras, ultrahang, kavaró dörzshegesztett (friction stir welding), valamint hőlégfúvós módszereket vizsgáltuk. Ragasztási kísérleteinkben 16 féle ragasztóanyagot alkalmaztunk. Az elkészült kötésekből jósági fokokat határoztunk meg és bemutattuk, hogy a PLA kötésére számos ígéretes alternatíva létezik.

### Abstract:

In this article we analysed different technologies to weld and glue the injection moulded polylactic-acid (PLA) sheets. The examined welding methods were the laser, ultrasonic and friction stir welding. We tried out 16 different adhesives during the experiments. As a result we defined different quality factors that show there are a lot of promising alternatives to PLA joining.

### 1. 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 és amelyek mennyisége kielégítő és állandó minősége fenntartható. Manapság a bioműanyagok alapanyagának legnagyobb része mezőgazdasági eredetű (burgonya, kukorica, cukornád), amelyek bár korlátozottan, de elméletileg végtelen ideig elérhetőek (remélhetőleg az élelmiszeripart nem fenyegetve) [1].

Biopolimereknek nevezzük azokat a polimereket, amelyeknek építőelemei valamilyen élő szervezetből származnak, előállításuk nem terheli a környezetet, valamint megfelelő körülmények között képesek lebomlani (biodegradábilis) és szerves összetevőire esve visszakerülni a természeti körforgásba úgy, hogy a környezetet nem terhelik a bomlás során keletkezett káros, mérgező anyagokkal [2]. Az egyik legintenzívebben kutatott biopolimer a politejsav (PLA, polylactic-acid), amely tulajdonságaiban a poliészter és a polisztirol vetélytársa [3]. Kitűnően használható termékek csomagolására, mivel nem ereszt 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 [4].

A polimer szerkezeteinknél az utóbbi időben észrevehető egyre dinamikusabb fejlődés szükségessé teszi, hogy az új fejlesztésű anyagainkat új, a korábbiaknál termelékenyebb és gazdaságosabb módszerekkel dolgozhassuk fel. A különböző kötési módok a mérnöki konstrukciók tervezhetőségében és alakíthatóságában szintén nagy fejlődés alatt állnak. Polimerek kötéstípusait sokféleképpen lehet csoportosítani, például vannak oldható és nem oldható kötések (csak roncsolással oldhatók) [5]. A leginkább alkalmazható csoportosítás a kötést létrehozó fizikai elv szerinti felosztás: erővel, alakkal, anyaggal záró kötések. Az erővel záró kötések tipikus fajtája az önmetsző csavarok, vagy a metrikus menetek alkalmazása. Az alakkal záró kötéseknel a bepattanó kötés tipikusan a hőre lágyuló polimereknél alkalmazott megoldás, míg a szegecselés a hőre nem lágyuló mátrixú kompozitoknál gyakran használt kötéstípus. Az anyaggal záródó kötések családjába tartoznak a ragasztott és a hegesztett kötések, de míg a térhálós mátrixú kompozitoknál a ragasztás, addig a termoplasztikus mátrixú kompozitoknál a hegesztési technológiák is alkalmazhatók [6].

### **1.1. Hegesztett kötések**

Csak a **hőre lágyuló** polimerek hegeszthetők (lineáris, illetve elágazott óriásmolekulákból állnak). Ezeknél az anyagoknál van arra lehetőség, hogy a molekulák az őket összekötő másodlagos kötések felszakadásával egymás közé diffundáljanak [5, 6].

Polimerek hegesztésénél minél nagyobb szilárdságú, kohéziós kapcsolat létrehozása a cél. A polimerek és fémek jól ismert anyagszerkezeti eltérése azonban számos problémát vet fel. A polimerek hegesztésén kizárólag a hőre lágyuló polimerek olyan kötését értjük, amely **hő és nyomás** együttes hatására jön létre hegesztőanyag alkalmazásával vagy anélkül [5, 6].

Polimerek esetében alapvetően öt technológiai paraméter optimuma biztosítja a jó hegesztett kötés létrejöttét, ezek [7]:

1. az összeférhető (kompatibilis) anyagok,
2. a megfelelő viszkozus és rugalmas fizikai állapotot biztosító hőmérséklet,
3. a hegesztendő felületek molekuláris közelségét és a folyamat optimális lefutását biztosító nyomás,
4. a hegedés bekövetkeztét biztosító időtartam a 2. és 3. feltételeinek érvényesítésére,
5. a hegesztett kötés lehűtése a kezelhetőségi állapot bekövetkeztéig.

Két azonos polimer anyag összehegesztésekor a varrat szilárdságára jellemző jósági fok (a varrat és az alapanyag szilárdságának aránya) ideális esetben közelít 1-hez (illetve 100%-hoz), azaz a két alkatrészt elválasztó határ eltűnik. Ezt a jelenséget autoadhézióknak nevezik, és a hegesztendő polimer anyagok molekulaláncainak egymásba diffundálásán alapul [5].

A műanyag hegesztési technológiákat három fő csoportra lehet osztani a hőközlés módja szerint, úgymint sugárzásos (pl. lézersugaras), hővezetési (pl. forrógázos) és súrlódási (pl. ultrahanggal). Hővezetési elvű működésmódok esetén egy közvetítő anyagon keresztül viszik át a hőt az összeerősítendő alapanyagok kötési helyeire. A közvetítő anyag lehet szilárd halmazállapotú, vagy légnemű. Sugárzásos hegesztés esetén a hőenergiát nem valamilyen közeg viszi át, hanem az elektromágneses hullámokon terjedő energia a hegesztendő anyagokhoz jutva ott abszorbeálódik és hővé alakul. A súrlódási hegesztéseknél a szükséges hőt nem valamilyen külső forrásból hozzák létre, hanem mechanikai rezgésekkel magában a hegesztendő anyagban gerjesztik. Súrlódási hőt hasznosítanak a különféle dörzshegesztő technikák lineáris vagy rotációs mozgásokkal [5-7].

A súrlódási hegesztési technológiák közé lehet sorolni az ún. kavarási dörzshegesztést is, amelyet a 90-es években szabadalmaztattak, elsősorban alumínium és egyéb könnyűfémek hegesztésére [8]. Nagy előnye a technológiának, hogy hozaganyagot nem igényel, egyszerű és nagy lemeztávolságok esetén is jól alkalmazható. A hegesztés során egy forgó szerszámot süllyesztenek az összehegesztendő lemezek közé, ahol a forgás hatására hő képződik. Az előrehaladó szerszám környezetében megolvadt (illetve fémek esetében az olvadáspont alatt 10-20%-kal) anyaggal a lemezek összeillesztése mentén varrat hozható létre. A szerszám orsója hornyokkal ellátott speciális geometriával rendelkezik, amelyek feladata a megfelelő súrlódás mellett az anyag áramlásba hozása, homogenizálása. A forgó szerszámot kiegészíti

egy simító papucs is, amelynek feladata, hogy a varratban lévő anyagot a lemezek közül ne engedje távozni, illetve a hegesztési varratnak sima, esztétikus felületet adjon, így a varrat utólagos megmunkálást nem igényel [9]. A kavaráó dörzshegesztés alkalmazása polimer szerkezeti anyagoknál csak nagyon kevés publikációban érhető el, pedig az eljárás a már bemutatott polimer hegesztési módszerekhez képest számos előnnyel rendelkezik. Polimerek esetében is lehetőség van nagy lemezvastagságú lemezeket összehegeszteni, hegesztőrobot alkalmazásával akár bonyolult térbeli alakzatok esetében is [10].

## 1.2. Ragasztott kötések

A ragasztás két szilárd test összeerősítését jelenti ragasztó segítségével. A ragasztott kötések szilárdságát döntően két erőtípus adja: a ragasztandó anyagok, valamint a ragasztó belső szilárdsága, kohéziója, és a ragasztandó anyag és ragasztó határfelületén fellépő erőhatások, az adhézió. Jó ragasztott kötésben az adhéziós erők legalább olyan nagyok, mint a kohéziós erők, azaz a ragasztott kötés szétszakadása a ragasztott darabok anyagában vagy magában a ragasztóban bekövetkezett szakadás (kohéziós szakadás) miatt következik be, nem pedig a ragasztó és valamely felület elválása miatt (adhéziós szakadás). A ragasztási technológiákat alapvetően két nagy csoportba lehet sorolni: ragasztószalagos (öntapadó ragasztós) technológiák, illetve folyékony ragasztós technológiák. Ez utóbbi csoporton belül beszélhetünk térhálósodó és nem térhálósodó ragasztókról [5, 11].

A nem térhálósodó ragasztók csoportjába tartoznak az alábbi ragasztók [11]:

- *Oldószeres*: Az oldószeres ragasztók kétféle típusban fordulnak elő. A *kötőanyag nélküli* oldószeres ragasztásnál interdiffúzió jön létre az összeragasztandó polimerek felületei között és csak saját anyag ragasztható az összeférhetőség miatt. Az oldószeres ragasztók másik csoportját a *kötőanyagot tartalmazó* (általában polimer alapú) ragasztóanyagok alkotják. Jellemzően a felhordott ragasztó oldószerének kipárolgását követően, még a ragasztó aktív idején belül kell a ragasztást végre hajtani, azaz a két felet zárni, kötésbe hozni.
- *Ömledékragasztó* (hot-melt): Az ömledékragasztók esetében a kötés a ragasztóanyagnak megfelelő hőmérsékletre való melegítése után hozható létre. Az ömledékragasztók előnye a gyors, termelékeny, oldószermentes ragasztás.

A térhálósodó ragasztók csoportjába tartoznak az alábbi ragasztók [11]:

- *Kétkomponensű ragasztók*: A ragasztó két komponensét (ragasztó + edző) felhasználás előtt megfelelő arányban kell összekeverni, mely során elindul a térhálósodás. Ilyenkor a ragasztást egy térhálósodó műanyag polimerizációja hozza létre. Ilyen típusú ragasztók pl.: epoxi, poliuretán, akril 2K ragasztók stb.

- *Ciano-akrilátok („pillanatragasztók”)*: A ragasztó kikötéséhez, nedvesség szükséges, mely a polimerizáció beindulását blokkoló anyagok „semlegesítéséhez” kell.

Az itt felsoroltakon kívül természetesen számos más kötési mechanizmus is létezik, amelynek hatására a kötés kialakul, például a fénysugárzás (UV ragasztók), emelt hőmérséklet (1K szerkezeti ragasztók), vagy a levegő kizárásának hatására (anaerob ragasztók) kötő rendszerek.

A jó ragasztott kötés létrehozásához – csakúgy, mint a hegesztésnél – adott feltételek teljesülése szükséges. Ezek a paraméterek [11]:

- 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.

## 2. Kísérleti rész

### 2.1. Felhasznált anyagok és berendezések

A politejsav alapanyagának a NatureWorks LLC amerikai biopolimer-gyártó cég Ingeo TM Biopolymer 4032D illetve 3251D típusú granulátumát használtuk fel.

**ARBURG Allrounder Advance 370S 700-290** típusú fröccsöntőgéppel készítettük el a 80x80 mm méretű, 2 mm vastagságú próbatesteket, amelyeken a kötési módszereket vizsgáltuk.

A hegesztett kötés létrehozásához egy 150 mm-es fókusztávolságú lencsével felszerelt **Universal Laser Systems UL 25 OEM típusú CO<sub>2</sub>** lézerforrást használtunk. A hegesztőgépbe a fröccsöntött 80x80 mm-es lapkákat tudtuk behelyezni és a 2 mm vastagságú élüknél fogva tompán összehegeszteni, folyamatos összenyomó erő biztosítása mellett.

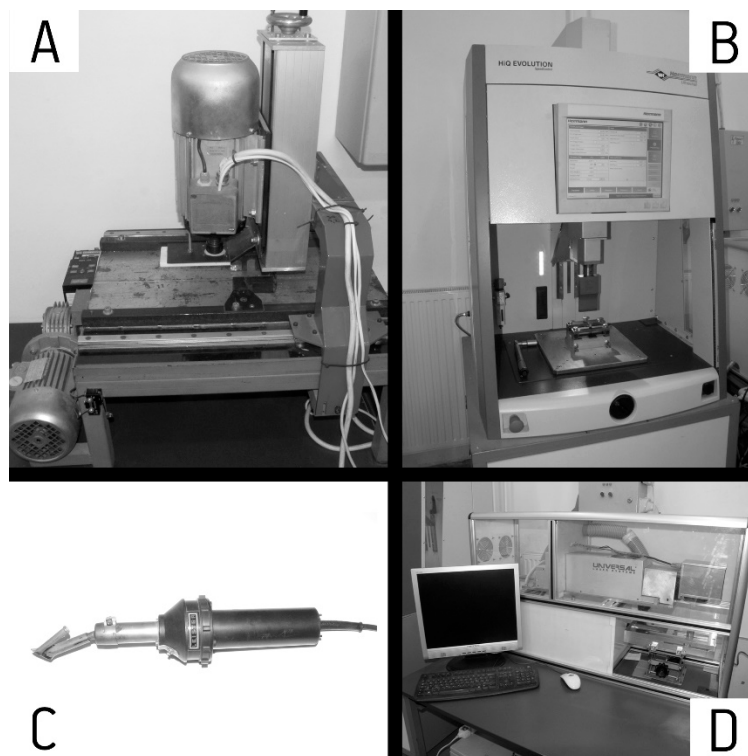
Az egyedi építésű kavarázó dörzshegesztő berendezéssel a PLA lemezek között szintén tompavarratokat lehet létrehozni.

Az ultrahanghegesztéseket egy **Herrmann HiQ Evolution 20 kHz**-es hegesztőgépen, átlapolt elrendezésben végeztük el. Az alkalmazott szonotróda 70x11 mm munkafelületű, a hegesztett próbatestek szélessége 25 mm volt, az átlapolás hossza a szonotróda szélességével egyezett meg, azaz 11 mm volt.

A forrógázos hegesztésekhez Leister gyártmányú hőlégfúvót alkalmaztunk, PLA hozaganyag segítségével két oldalról hegesztett „X” varratot hozva létre.

A mechanikai vizsgálatok elvégzéséhez egy **Zwick Z200**-as típusú berendezést alkalmaztunk, amellyel a hegesztett kötés és a ragasztás minőségét vizsgáltuk hárompontos hajlítással, illetve szakítással.

A hegesztő berendezések az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Hegesztési kísérletekhez felhasznált berendezések (A: egyedi építésű kavaráó dörzshegesztő berendezés, B: Herrmann HiQ Evolution 20 kHz-es ultrahanghegesztő, C: Leister gyártmányú hőlégfúvó, D: Universal Laser Systems UL 25 OEM típusú CO<sub>2</sub> lézer)

Mint az egyes berendezéseknél is ismertettük, a kötések létrehozására kétféle elrendezést alkalmaztunk, átlapolt vagy tompakötést. Átlapolt elrendezésben, a két munkadarabot egymással átfedésben, lapoldaluknál kapcsoltuk össze. Ez az elrendezés a ragasztásnál és az ultrahanghegesztésnél az egyedüli megoldás, ami szóba jöhet. A CO<sub>2</sub> lézersugaras és a

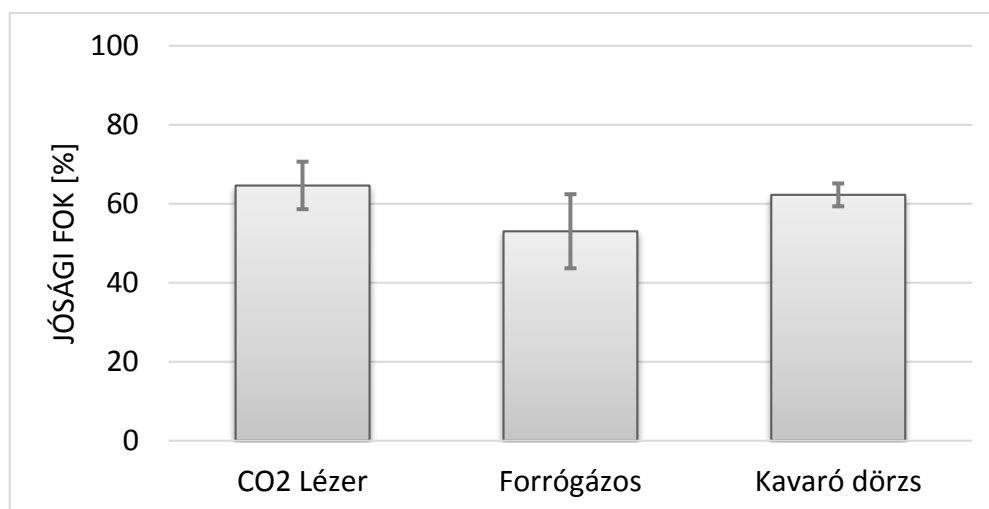
forrógázos hegesztéseknél, illetve a kavaró dörzshegesztésnél a tompakötés a lehetséges kötési mód.

## 2.2. Eredmények

Cikkünkben az egyes módszerek költség- és időszükségletét nem vizsgáltuk, kizárólag az elérhető kötésszilárdságot, illetve ezt az alapanyaghoz hasonlítva az elérhető jósági fokokat elemeztük. Terjedelmi okokból jelen cikkünkben nem közöljük, hogy az egyes technológiákon belül milyen beállítások vezettek a „legjobb” szilárdsághoz. Ez egyébként is csak az egyes technológiákon belül értelmezhető, de az összehasonlításukat nehézkesé teszi. A felhasználó (vagy gyártó) szempontjából leginkább érdekes, hogy az alapanyag szilárdságához képest milyen a kötés szilárdsága, amit a jósági fok tud legjobban kifejezni.

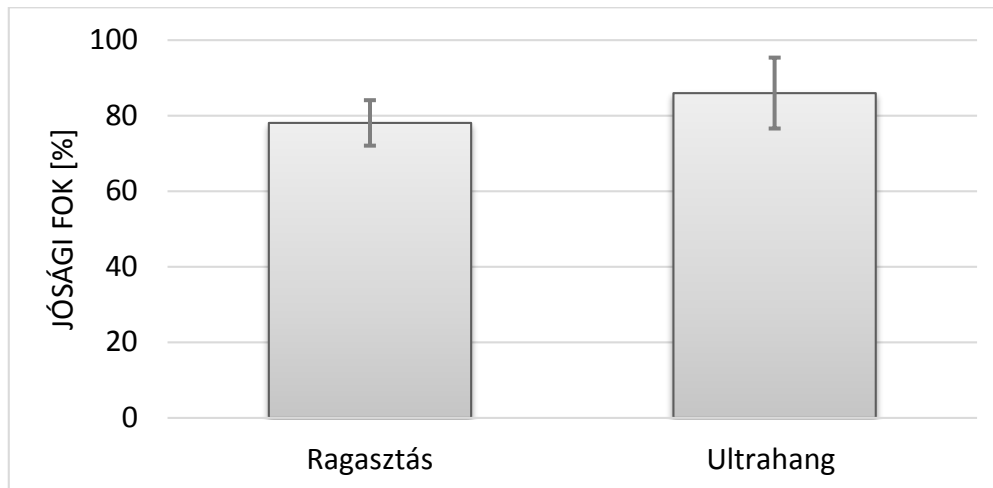
Abban az esetben, amikor tompakötést alkalmaztunk, akkor számunkra a hárompontos hajlítóvizsgálat szolgáltatott több információt, ugyanis ezzel lehetőség van a varrat alsó és felső részét megkülönböztetni (az ún. gyök és koronaoldalt). Ennek különös jelentősége van, hiszen a legtöbb hegesztési módszernél a hőbevezetés a lemezek egyik oldala felől történik. Cikkünkben vizsgált CO<sub>2</sub> lézersugaras, forrógázos és kavaró dörzshegesztés esetében az elért jósági fokok a 2. ábrán láthatóak.

CO<sub>2</sub> lézer és a kavaró dörzshegesztés esetében a jósági fokok 60% fölött alakulnak, relatív alacsony szórással. Forrógázos hegesztésnél egy kicsit kisebb értékeket kaptunk, de nem szabad elhanyagolni, hogy ez a kézi módszer meglehetősen nagy gyakorlatot igényel, így a szerényebb eredmény származhat a gyakorlatlanságunkból is.



2. ábra Tompahegesztett kötések hárompontos hajlításából kapott jósági fokok

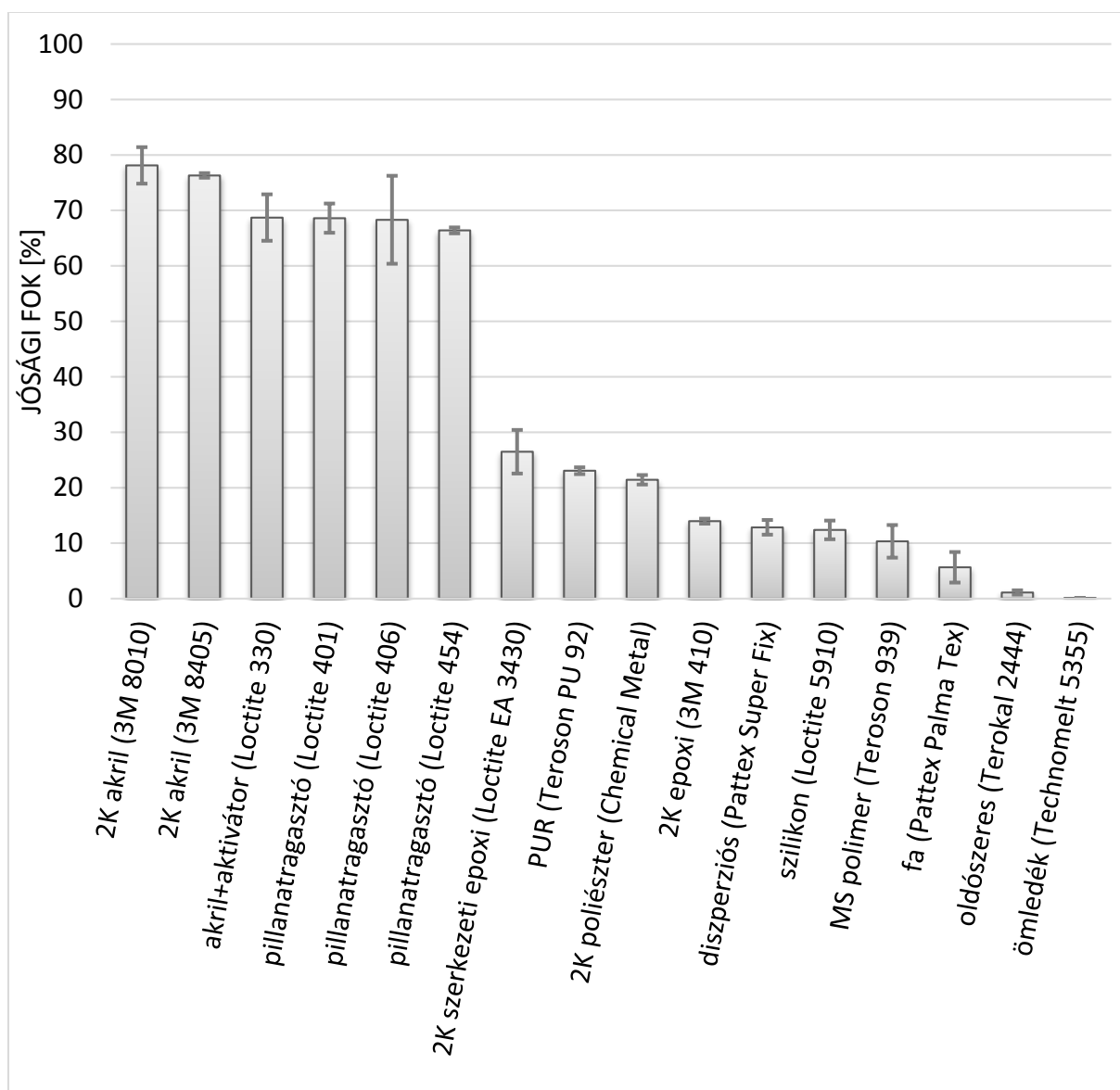
Átlapolt kötések vizsgálatához húzó vizsgálatot alkalmaztunk, amikor is a kötés síkjában (a lapoldalak mentén) nyíró igénybevétel alakul ki. Ezt az igénybevételi formát kell előnyben részesíteni ragasztásnál és tulajdonképpen az ultrahanghegesztéssel készült kötések vizsgálatakor is nyíró igénybevétel alakult ki. A 3. ábrán az átlapolt kötések húzóvizsgálatából származó jósági fokok láthatóak, ahogy a korábbiakban is, most is az általunk elért „legjobb” értékek feltüntetésével. Látható, hogy az ultrahanghegesztéssel kicsit jobb, de mindkét esetben 80% körüli jósági fokokat értünk el.



3. ábra Átlapolt kötések húzóvizsgálata alapján kapott jósági fokok

Természetesen a ragasztási technológiától és az alkalmazott alapanyag típusától jelentősen függhet a ragasztott kötés szilárdsága. A 3. ábrán az általunk elért legjobb eredményt ábrázoltuk, amelyet egy kétkomponensű akrilbázisú ragasztóanyaggal értünk el. Kísérleteinkben alkalmazott ragasztók, illetve a velük elérhető jósági fokok a 4. ábrán részletesebben is láthatóak. A ragasztások egységes átlapolással készültek el és mindenhol betartottuk a gyártó előírásait a technológia kapcsán. Bár ragasztások vizsgálatát előíró szabványokban más-más elhúzási sebességek szerepelnek, mi a kísérletünkben azonos 2,5 mm/perc-es sebességet alkalmaztunk. Megfigyelhető, hogy a pillanatragasztók és a kétkomponensű akril bázisú ragasztók hozták a legjobb eredményeket.





4. ábra Ragasztott kötések húzóvizsgálata alapján kapott jósági fokok.

### 3. Összefoglalás

Cikkünkben a politejsav kötéstechológiai lehetőségeit és azok vizsgálatát tűztük ki célul.

A biopolimerek jellemzőinek, felhasználási módjainak és jelentőségének rövid áttekintése után a manapság egyre népszerűbb hőre lágyuló politejsav próbatesteknek a hegeszthetőségét, ragaszthatóságát vizsgáltuk.

A hegesztésekhez CO<sub>2</sub> lézert, kavarázó dörzshegesztő- és forrógázos hegesztőgépet, valamint az ultrahanghegesztő gépet használtunk, ragasztásokhoz pedig 16-féle ragasztóanyagot használtunk fel. A lézerral, forrógázos hegesztéssel kétoldali, a kavarázó dörzshegesztéssel pedig egyoldali varratot készítettünk. Ultrahang hegesztéssel és ragasztással átlapoltt kötéseket

hoztunk létre. A lézerrel, forrógázzal és dörzshegesztéssel hegesztett próbatesteket hárompontos hajlító berendezéssel a varrat mentén hajlítottuk, míg az ultrahanghegesztés és ragasztás esetén a vizsgálati módszer húzás (nyírás) volt. A kiszámolt hajlítószilárdságokból és mért maximális erőkből a hegesztetlen alapanyagra viszonyított jósági fokot határoztuk meg, amivel a különböző kötéstechológiákat jellemeztük és összehasonlítottuk.

A kiértékelés során azt az eredményt kaptuk, hogy a CO<sub>2</sub> lézersugaras, kavarázó dörzshegesztett és forrógázos technológiáknál 60%-os jósági fokokat értünk el, tompakötések hárompontos hajlítóvizsgálata alapján. Az átlapolásos ultrahanghegesztett és ragasztott kötéseknél a húzóvizsgálatból számolt jósági fokokat tekintve 80% körüli kötéseket tudtunk létrehozni, a legmagasabb jósági fokkal rendelkező kötéstechológia az ultrahanghegesztés volt. Bár a különböző módon alkatrészeket egymáshoz csatoló kötéstechológiák összehasonlítása nehézkes, úgy gondoljuk, hogy ezekkel a jósági fokkal egy, az alapanyag későbbi felhasználását és technológia kiválasztását segítő paramétert határoztunk meg.

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

## **Köszönetnyilvánítás**

A cikk a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. Szeretnénk köszönetet mondani az alapanyagokért, valamint hegesztő és ragasztó eszközökért támogatóinknak: ARBURG Hungária Kft., Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co., HERZ Hungária Kft., TRUMPF Hungary Kft., Henkel Magyarország Kft., 3M Hungária Kft.

### **Szerzők**

Fehér Máté, MSc hallgató\*

Dr. Kiss Zoltán, PhD, adjunktus\*

\*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

## Irodalomjegyzék

1. Mohanty A. K., Misra M., Hinrichsen G.: Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview, *Macromolecular Materials and Engineering*, 276/277, 1-24 (2000).
2. Bastioli C.: *Handbook of biodegradable polymers*, Rapra Technology Limited, Shawbury, (2005).
3. Gupta A. P., Kumar V.: New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – Polylactide: A critique, *European Polymer Journal*, 43, 4053-4074 (2007).
4. Bánhegyi Gy.: Hőformázott csomagolóeszközök politejsavból, *Műanyagipari Szemle*, 1, (2004).
5. Rotheiser J.: *Joining of plastics*. Hanser Gardner, USA, Ohio (1999).
6. Marczis B., Czigány T.: Polymer joints. *Periodica Polytechnica, Ser. Mech. Eng.* 46, 117-126 (2002).
7. Molnár I., Almásiné Pető E., Seder J., Csikai I.: Műanyagok hegedési folyamatai és a hegesztési eljárások problémái. *Műanyag és Gumi*, 33, 339-348 (1996).
8. Nelson T.M.: Friction stir welding of polymeric materials. US 6,811,632 B2, Provo, UT(US) (2004).
9. Mishra R.S., Ma Z.Y.: Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, 50, 1-78 (2005).
10. Kiss Z.: Polimerek kavarázó dörzshegesztése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2011).
11. Farkas F., Farkas F.J.: *A ragasztás kézikönyve*. Műszaki Könyvkiadó, 23-27, 293 (1997).