

Megújuló erőforrásból előállított lebontható polimerek alkalmazása a gyors prototípusgyártásban

Dr. Tábi Tamás^{*,}**, tudományos munkatárs, **Dr. Balázs Csaba^{**}**, osztályvezető, **Petrik Attila^{**}**, MSc hallgató, **Dr. Kovács József Gábor^{***}**, egyetemi docens, laborvezető, **Kovács Norbert Krisztián^{***}** PhD hallgató, **Rákos Katalin^{***}** MSc hallgató

1. Bevezetés

A napjainkban megfigyelhető kiélesedett gazdasági verseny, valamint az évek óta elhúzódó gazdasági válság egyre inkább megköveteli a termékek piacra jutási idejének csökkentését. Mindez magával hozta, hogy a klasszikusnak számító, egymást követő gyártási folyamatok helyét az ezredfordulótól kezdődően fokozatosan átvette az egyidejű, ún. szimultán gyártástervezés. Ennek legfontosabb pillérei a közbenső ellenőrzés, valamint a gyártásban résztvevők közötti hatékony kommunikáció. A gyors prototípusgyártás (RPT – Rapid Prototyping) megjelenése ebben hatalmas előrelépést eredményezett [1, 2]. Megnyílt a lehetőség a tervezőmérnökök előtt, hogy a hagyományos gyártási módok korlátait megkerülve közvetlenül a 3D-s modellből állítsák elő a valós fizikai modellt, rétegről rétegre, anyaghozzáadás útján. Napjainkban a prototípus készítésnek alapvetően három célja lehet. Az első, amikor csupán a termék geometriáját (formáját) szeretnék megvizsgálni (vizuális modell). A második a funkció vizsgálata (funkciós modell), ahol nem csak a küllem, hanem a fizikai tulajdonságok (merevség, szilárdság stb.) is számítanak. A harmadik pedig, amikor a prototípus egy előzetes gyártás alapja, tehát egy olyan minta, amelyből az adott terméket előállító szerszám készül [3–5].

Mindezek alapján beláthatjuk, hogy a gyors prototípusok a korszerű terméktervezés és termékfejlesztés elengedhetetlen részévé váltak, ugyanakkor az adott termék, alkatrész tesztelését, valamint tömeggyártásba vitelét követően a prototípusok funkciójukat veszítik, feleslegessé válnak. Ezek újrahasznosításáról pedig ugyanúgy gondoskodni kell, mint az összes többi műanyag termék újrahasznosításáról. A gyors prototípusgyártásban az FDM (Fused Deposition Modelling) technológia ad leginkább lehetőséget a prototípusok újrahasznosításra, tekintve, hogy ez a technológia hőre lágyuló műanyag szálát ömleszt meg, és ennek segítségével rétegenként építi fel a terméket, így, köszönhetően a hőre lágyuló alapanyagának, a késztermék újra ömledék, és ezáltal pedig alakítható állapotba vihető hő segítségével. Továbbá, közel

atomi szintű újrahasznosítási forma is rendelkezésre áll, amennyiben hőre lágyuló lebontható polimer szálát alkalmaznak.

A lebontható polimerek és a belőlük készített termékek az elmúlt évtizedben kezdtek jelentősebb mértékben elterjedni, mivel a mérnökök felismerték, hogy rövid használati idejű termékeket (pl. egyszer használatos evőeszköz), vagy olyanokat, amelyek újrahasznosítása kis fajsúlyuk miatt nem gazdaságos (pl. térkitöltő hab), célszerű olyan polimerekkel helyettesíteni, amelyeket egyrészt megújuló erőforrásból lehet előállítani, csökkentve ezáltal a műanyagok kőolaj függését, másrészt életciklusuk végén gombák, algák vagy baktériumok enzimatisuk bontó képességének hatására biológiai úton lebonthatók (komposztálhatóak) természetes, nem toxikus anyagokra, mint a víz, a humusz, a szén-dioxid [6–9]. Tekintve, hogy egy lebontható polimer előállításához megújuló erőforrásra (pl. keményítő, cukor) van szükség, valamint életciklusuk végén teljes mértékben visszaforgathatók, így beilleszthetők a természet körforgásába.

Az egyik legjelentősebb képviselője a megújuló erőforrásból előállítható és egyben biológiai úton lebontható polimereknek (röviden lebontható polimerek) a politejsav (PLA) [10–12]. A tejsavat keményítőtől és cukorból fermentációs eljárással lehet létrehozni, a tejsavból PLA-t vagy direkt polikondenzációval, vagy pedig a tejsav dimerjének, a laktidnak gyűrűfelnyitásos polimerizációjával lehet létrehozni. A PLA kiindulási alapanyaga a keményítő, amely a széleskörűen termesztett gabonafélék legfőbb összetevője, és így az évenként sokmillió tonna nagyságrendben termelődő biomassza része. A keményítő megtalálható többek között a búzában, kukoricában, burgonyában, rizsben, ezért a Földön ez a második legnagyobb nagyságrendben rendelkezésre álló szénhidrát (az első a cellulóz). A keményítőtől, mint megújuló erőforrásból előállítható PLA hőre lágyuló polimer, ezért fröccseníthető, extrudálható, vákuumformázható. Csekély feldolgozási zsugorodással (0,4–0,6%), kiváló szilárdsággal (60–65 MPa), merevséggel (~3 GPa) rendelkezik, ugyanakkor rideg (~3% szakadási nyúlás), de

*MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

**MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Kerámia és Nanokompozitok Osztály

***Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

ütőszilárdsága jobb, mint a polisztirolé (3 kJ/m² bemetszett, 23 kJ/m² bemetszés nélküli Charpy-féle ütőszilárdság), ennek alapján a PLA az egyik legígéretesebb lebontható polimer. Jelenleg a piacon leginkább csomagolótechnikához kapcsolható alkalmazásait találjuk meg, mint pl. a különböző fóliák, egyszer használatos evőeszközök, virágcserepek, irodai eszközök burkolata, joghurtos doboz, ásványvizes palack, ugyanakkor orvostechikai implantátumok, mint pl. az emberi szervezetben fel szívódó, inak rögzítésére szolgáló interferenciacsavar [13], vagy szálerősítéssel akár műszaki termékek teherviselő alkatrészének anyagaként [14] is teret hódíthat, és alkalmas arra is, hogy belőle gyors és környezetbarát prototípusokat hozzanak létre. Az egyik legkülönlegesebb alkalmazás lehet a csontpótlásra szoruló betegről vett CT (komputertomográf) felvétel alapján, FDM technológiával való, tipikusan egyedi geometriájú implantátum nyomtatása és beültetése. Hogy egy ilyen alkalmazás lehetségessé váljon, az implantátum megtervezéséhez ismerni kell az FDM technológiával nyomtatott PLA termék tulajdonságait a homogén, például fröccsöntéssel előállított PLA tulajdonságaihoz képest.

Mindezek alapján, kutatásunk célja az FDM technológiával nyomtatott PLA termékek, próbatetek mechanikai tulajdonságainak összevetése volt a homogén, fröccsöntött PLA alapanyagával, hogy jellemezhesük az FDM technológiával létrehozott PLA prototípusok vagy implantátumok alkalmazhatóságát.

2. Mérési elrendezés

Kísérleteink során referenciaként ARBURG *Allrounder 370S 700-290* fröccsgépen szabványos szakító-, hajlító- és Charpy-féle ütőhajlító próbateteket fröccsöntöttünk NATUREWORKS *3152D* típusú PLA granulátumból, amelyet a gyártó előírása szerint, feldolgozás előtt 85°C-on 6 óráig szárítottunk. Ugyanebből az alapanyagból LABTECH *Scientific* kétszigás extruderrel 2,5±0,2 mm átmérőjű szálát képeztünk (*1. ábra*) az FDM technológiával való további feldolgozáshoz.

Az MTA TTK MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI INTÉZET KERÁMIA ÉS NANOKOMPOZITOK OSZTÁLYÁN RAP-



2. ábra. Politejsav szakító próbatetek nyomtatása

MAN 3.2 típusú, oktatási célú FDM berendezéssel 2 × 6 mm keresztmetszetű szakítóvizsgálatra, valamint 4 × 10 mm keresztmetszetű hajlító- és Charpy ütőhajlító vizsgálatra alkalmas próbateteket nyomtattunk 0,125, 0,25 és 0,5 mm ömledék szálátmérő (rétegvastagság) beállítással (*2. ábra*).

A próbateteket a *3152D* típusú, általunk extrudált PLA szálból, valamint egy gyári, kifejezetten FDM technológiával való feldolgozáshoz kapható, *4032D* típusú PLA szálból hoztuk létre. A szakító- és hajlító jellemzőket az MSZ EN ISO 527-1:1999, valamint az MSZ EN ISO 178:2003 szabvány szerint, ZWICK *Z020* típusú univerzális szakítógépen határoztuk meg. A vizsgálati sebesség mindkét esetben 5 mm/perc volt. A szakítóvizsgálatnál 115 mm a befogási hossz fröccsöntött próbatestnél, az FDM technológiával előállított próbatetek esetén 50 mm, a hajlítóvizsgálatnál az alátámasztási távolság 64 mm volt. A Charpy-féle ütőhajlító jellemzőket MSZ EN ISO 178:2003 szabvány szerint mértük CEAST *RESIL Impaktor* ütőművel 62 mm alátámasztási távolság mellett, 15 J-os kalapácsot alkalmazva. Szobahőmérsékleten és 40–60%-os páratartalmú környezetben dolgoztunk. A mechanikai vizsgálatok során kapott töretfelületeket JEOL *JSM-638OLA* típusú elektronmikroszkópon elemeztük 15 kV gyorsító feszültséget használva. A töretfelületeket az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése érdekében Au/Pd ötvözzel vontuk be.

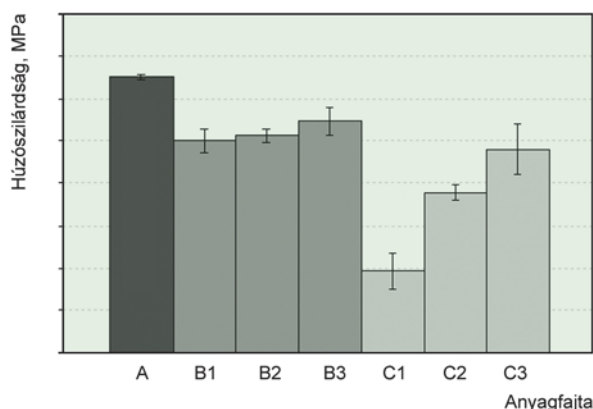
3. Kísérleti eredmények

Az FDM technológiával nyomtatott PLA próbatetek alkalmazhatósága akár a mérnöki gyakorlatban, akár orvostechikai implantátumként leginkább attól függ, hogy a nyomtatott próbatetek, a termékek a homogén PLA nagy szilárdságához és merevségéhez képest milyen mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és ezek a tulajdonságok a nyomtatás paramétereinek beállításával mennyire tervezhetők. Tekintve, hogy az FDM technológia során a hőre lágyuló szálát megömlesztjük, így az egymásra rétegezett szálak közti kapcsolat fogja leg-



1. ábra. Politejsav szál extrúziója

inkább meghatározni a nyomtatott termék mechanikai tulajdonságait. A szakítóvizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk, hogy a homogén PLA-hoz képest ugyan elmarad a nyomtatott PLA szilárdsága és merevsége, de csak kis mértékben (3. és 5. ábra). Amíg a fröccsöntött, homogén PLA próbatest 65 MPa szilárdsággal rendelkezett, addig a gyári, 4032D típusú nyomtatott PLA próbatest 54 MPa, az általunk extrudált szálból nyomtatott próbatest pedig 48 MPa szilárdsággal.

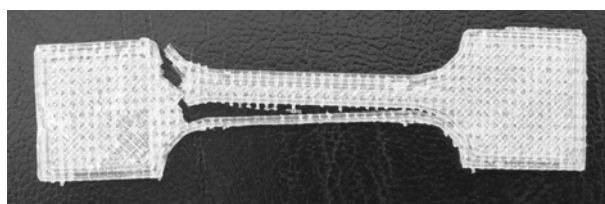


3. ábra. Fröccsöntött és FDM technológiával nyomtatott politejsav próbatestek húzószilárdsága különböző nyomtatási rétegvastagság esetén.

A – fröccsöntött PLA (3251D), B1 – 4032D_eredeti_0,5 mm, B2 – 4032D_eredeti_0,25 mm, B3 – 4032D_eredeti_0,125 mm, C1 – 3251D_0,5 mm, C2 – 3251D_0,25 mm, C3 – 3251D_0,125 mm

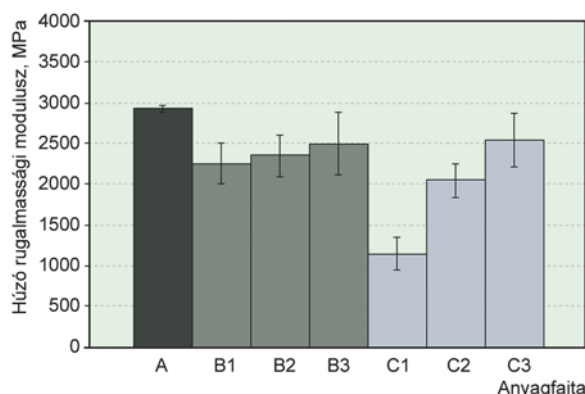
A hegesztési szakterületen, a hegesztési varrat minősítésére általánosan használt jósági tényezőt vagy jósági fokot – amely megmutatja a hegesztési varrattal ellátott alkatrész vizsgált mechanikai jellemzőjének százalékos arányát a varratot nem tartalmazó alkatrészhez képest – a nyomtatott PLA termékek esetében is lehet definiálni, hiszen esetünkben sok egymásra ömlesztett hőre lágyuló polimer szál együtdolgozását minősítjük a homogén alapanyaghoz képest. A húzószilárdsági értékeket tekintve, a gyári PLA szálból nyomtatott próbatest 83%-os, az általunk létrehozott PLA szálból nyomtatott próbatest pedig 74%-os jósági tényezővel rendelkezik, amelyek jó értékeknek mondhatók. Az FDM berendezés rétegvastagságának állításával, elsősorban az ömledék szálátmérőjének és ezáltal a rétegvastagságnak a csökkentésével nagyobb szilárdsági értékek érhetők el, mivel így csökkenthető a szálak közti hézag, utóbbi a terhelésselvevő keresztmetszetet csökkenti. Megfigyelhető továbbá, hogy a gyári és az általunk létrehozott szálból a nagyobb rétegvastagságok esetén (rosszabb „felbontás”) jelentősen eltérő szilárdságú próbatesteket tudunk nyomtatni, annak ellenére, hogy a felhasznált anyagok adatlapja szerint mindkettő közel azonos szilárdsággal rendelkezik

homogén, tömör formában. Ez a folyóképességbeli és adalékanyagbeli különbségekre vezethető vissza, tekintve, hogy a gyári PLA szál világítóan fehér színű, ami titán-dioxid töltőanyagra utal, addig az általunk extrudált PLA szál gyárilag tartalmaz csúsztatót a könnyebb feldolgozhatóság érdekében. E különbségek jelentős mértékben befolyásolták a megömlesztett szálak összetapadását a gyártás során, és ennek eredményeképpen a 0,5 mm rétegvastagságú, 3251D alapanyagból nyomtatott próbatestek esetében a szálak nem a próbatest adott keresztmetszetében, hanem azok egymástól való elválásával szakadtak el (4. ábra).



4. ábra. 3251D politejsavból, 0,5 mm rétegvastagsággal nyomtatott szakító próbatest tönkremenetele

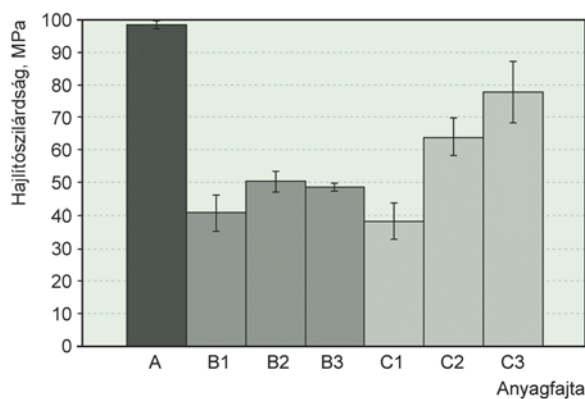
A szilárdsági értékekhez hasonlóan alakultak a próbatestek húzó rugalmassági modulusz értékei is (5. ábra).



5. ábra. Fröccsöntött és FDM technológiával nyomtatott politejsav próbatestek húzó rugalmassági modulusza különböző nyomtatási rétegvastagság esetén

A – fröccsöntött PLA (3251D), B1 – 4032D_eredeti_0,5 mm, B2 – 4032D_eredeti_0,25 mm, B3 – 4032D_eredeti_0,125 mm, C1 – 3251D_0,5 mm, C2 – 3251D_0,25 mm, C3 – 3251D_0,125 mm

A húzó rugalmassági moduluszt tekintve, a jósági tényező a gyári, valamint az általunk extrudált szálból létrehozott próbatestre 85%-ra, valamint 86%-ra adódott. A hajlítóvizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk, hogy továbbra is célszerű kisebb rétegvastagságot választani a nyomtatáshoz, ugyanakkor ebben az esetben már jelentősen rosszabb jósági tényezőket mértünk (6. ábra).

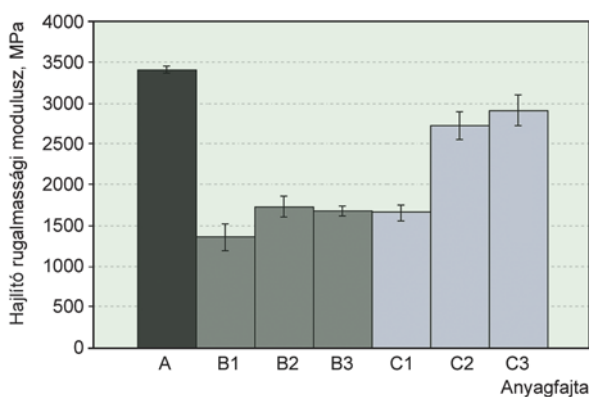


6. ábra. Fröccsöntött és FDM technológiával nyomtatott politejsav próbatetek hajlítószilárdsága különböző nyomtatási rétegvastagság esetén

A – fröccsöntött PLA (3251D), B1 – 4032D_eredeti_0,5 mm, B2 – 4032D_eredeti_0,25 mm, B3 – 4032D_eredeti_0,125 mm, C1 – 3251D_0,5 mm, C2 – 3251D_0,25 mm, C3 – 3251D_0,125 mm

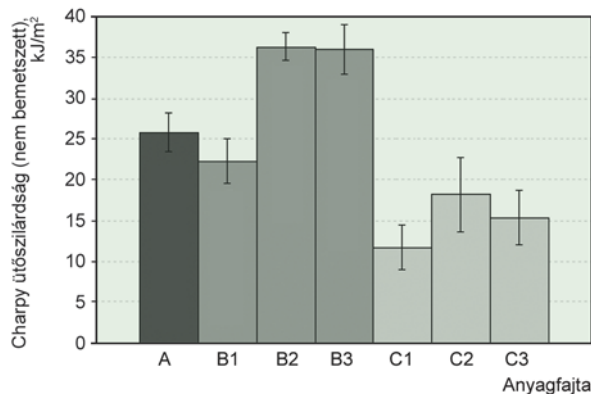
Az eredeti, 4032D típusú PLA-ból nyomtatott termék hajlítószilárdságára 49%-os, amíg az általunk extrudált 3251D PLA alapanyagból nyomtatott termékekre 79%-os jósaági tényezőt mértünk. Ebben az esetben a különbséget a két alapanyag között azok nyomóigénybevételre való eltérő viselkedése adhatja, hiszen a hajlítóvizsgálat során a keresztmetszet közel felében nyomóigénybevétel lép fel. A hajlítószilárdság értékekhez hasonlóan alakultak a hajlító rugalmassági modulusz értékek is (7. ábra), ebben az esetben 49% és 85%-os jósaági tényezők adódtak a gyári, valamint az általunk extrudált PLA szálból nyomtatott próbatetek esetében.

A gyári PLA szálból nyomtatott próbatest ütőszilárdsága



7. ábra. Fröccsöntött és FDM technológiával nyomtatott politejsav próbatetek hajlító rugalmassági modulusza különböző nyomtatási rétegvastagság esetén

A – fröccsöntött PLA (3251D), B1 – 4032D_eredeti_0,5 mm, B2 – 4032D_eredeti_0,25 mm, B3 – 4032D_eredeti_0,125 mm, C1 – 3251D_0,5 mm, C2 – 3251D_0,25 mm, C3 – 3251D_0,125 mm

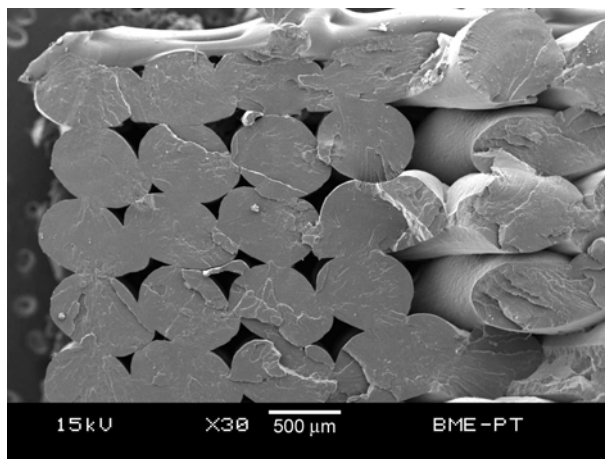


8. ábra. Fröccsöntött és FDM technológiával nyomtatott politejsav próbatetek ütőszilárdsága különböző nyomtatási rétegvastagság esetén

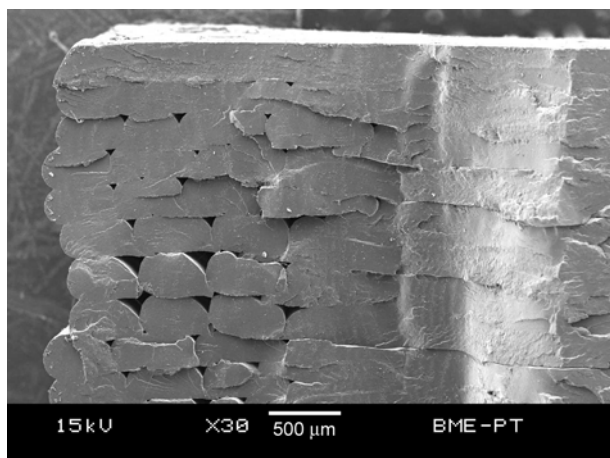
A – fröccsöntött PLA (3251D), B1 – 4032D_eredeti_0,5 mm, B2 – 4032D_eredeti_0,25 mm, B3 – 4032D_eredeti_0,125 mm, C1 – 3251D_0,5 mm, C2 – 3251D_0,25 mm, C3 – 3251D_0,125 mm

a kisebb rétegvastagságok esetében jelentős mértékben felülmúlta a homogén PLA ütőszilárdságát, ami önmagában rideg anyag (8. ábra).

Erre magyarázatként az szolgálhat, hogy a repedés terjedése a nyomtatott szálak határfelületén megállt, és újabb mechanikai energiabefektetésre volt szükség a törés szempontjából következő szálban az új repedés megindításához. Ugyanakkor az általunk extrudált 3251D típusú PLA esetében az ütőszilárdság a kisebb rétegvastagságot tekintve is csak 60%-os jósaági tényezőt ért el, így ebben az esetben ez a hatás nem érvényesült. Elektronmikroszkóppal megvizsgálva a töretfelületeket megállapítottuk, hogy a rétegvastagság, azaz a nyomtatás során alkalmazott szálátmérő csökkentésével jobb kapcsolat jön létre az egyes szálak között, azok jobban összehegednek (9–11. ábrák).



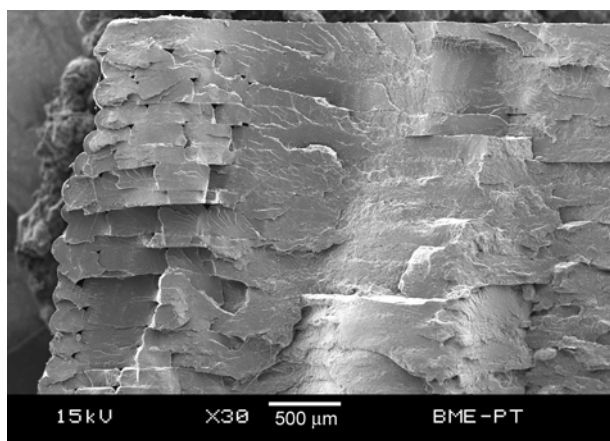
9. ábra. A gyári 4032D PLA szálból 0,5 mm rétegvastagsággal nyomtatott hajlítópróbatest keresztmetszete



10. ábra. A gyári 4032D PLA szálból 0,25 mm rétegvastagsággal nyomtatott hajlítópórbatest keresztmetszete



12. ábra. A gyári 4032D PLA szálból 0,5 mm rétegvastagsággal nyomtatott hajlítópórbatest felülete



11. ábra. A gyári 4032D PLA szálból 0,125 mm rétegvastagsággal nyomtatott hajlítópórbatest keresztmetszete

Az elektronmikroszkópos felvételek alátámasztják az előzőekben tapasztalt tendenciát, miszerint a rétegvastagság csökkentésével lényegében az összes mechanikai jellemző javult. Jól megfigyelhető továbbá az FDM berendezés építési algoritmusa is, miszerint a 4×10 mm-es keresztmetszetű hajlítópórbatest esetében minden rétegnél a gép előbb egy keretet épített, és utána következett a belső mag kitöltése, „sátirozása” átlós szálakkal, ennek eredményeképpen a keret és a belső mag határán található szálak között jelentős hőmérsékletkülönbség lépett fel a nyomtatás során. Ez az építési algoritmus a hajlító próbatestek felületén is megfigyelhető (12. ábra), és a szálak nem kellő mértékű kohéziós kapcsolata esetén megmagyarázza a 4. ábrán bemutatott törési módot.

Összegzésként elmondható, hogy az FDM technológiával, PLA alapanyagból nyomtatott termékek mechanikai tulajdonságai összevethetőek a homogén PLA alapanyagból gyártottakéval, a jósági tényezők az esetek többségében 60–80% körül adódtak. Mindezek alapján

az FDM technológiával nyomtatott PLA prototípusok a mérnöki, vagy az orvostechikai gyakorlatban is alkalmazhatók.

5. Összefoglalás

Munkánkban a politejsav (PLA – PolyLactic Acid), mint megújuló erőforrásból előállítható és egyben komposztálható biopolimerből FDM (Fused Deposition Modeling – ömledékrétegezés) gyors prototípus gyártási technológiával létrehozott prototípusok alkalmazhatóságát elemeztük annak érdekében, hogy a termékfejlesztésben használt, és az adott termék tömegtermelésbe vitelét követően sok esetben feleslegessé váló, többségében térhálós szerkezetű prototípusok kiválthatóak legyenek komposztálható, környezetbarát prototípusokkal. Kísérleteink során egy homogén, fröccsöntött referencia PLA-hoz képest vizsgáltunk egy gyári PLA szálból, valamint egy általunk extrudált PLA szálból FDM technológiával létrehozott próbatestek mechanikai tulajdonságait. Megállapítottuk, hogy a szakító, hajlító, valamint ütvehajlító tulajdonságokat tekintve 60–80%-os jósági fok érhető el a homogén, fröccsöntött referencia PLA tulajdonságaihoz képest, valamint, hogy előnyös kisebb rétegvastagságot alkalmazni, mivel így jobb kohézió alakul ki a szálak között. Kísérleteinkkel igazoltuk, hogy az FDM technológiával nyomtatott, megújuló erőforrásból előállított, és egyben komposztálható PLA prototípusok sikeresen alkalmazhatóak a mérnöki, vagy akár az orvostechikai gyakorlatban is.

A cikk a BOLYAI JÁNOS KUTATÁSI ÖSZTÖNDÍJ támogatásával készült. A szerzők köszönetüket fejezik ki az ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS KUTATÁSI ALAP (OTKA K105355 és OTKA K105257) anyagi támogatásáért. Ezúton szeretnénk továbbá köszönetet mondani az ARBURG HUNGÁRIA

KFT-nek, hogy rendelkezésünkre bocsátotta az ARBURG Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő gépet, köszönjük továbbá a LENZKES GMBH-nak a szerszámfelfogókat. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” című projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚJ SZÉCHENYI TERV TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A munka szakmai tartalma kapcsolódik továbbá az „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetemen tudományos műhelyeiben” című projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 programja támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Czvikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [2] Dunai, A.; Macskási, L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003.
- [3] Rosochowsky, A.; Matuszak, A.: Rapid tooling: the state of the art, Journal of Materials Processing Technology, 106, 191–198 (2000).
- [4] Upcraft, S.; Fletcher, R.: The rapid prototyping technologies, Assembly Automation, 23, 318–330 (2003).
- [5] Cheah, C. M.; Chua, C. K.; Lee, C. W.; Feng, C.; Totong, K.: Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting, Advanced Manufacturing Technologies, 25, 308–320 (2005).
- [6] Flieger, M.; Kantorová, M.; Prell, A.; Rezanka, T.; Votrubá, J.: Biodegradable plastics from renewable resources, Folia Microbiologica, 48, 24–44 (2003).
- [7] Bastioli, C.: Handbook of biodegradable polymers, Rapra Technology Limited, Shawbury, 2005.
- [8] Yu, L.; Dean, K.; Li, L.: Polymer blends and composites from renewable resources, Progress in Polymer Science, 31, 576–602 (2006).
- [9] Czigány, T.; Romhány, G.; Kovács, J., G.: Starch for injection moulding purposes, 3. fejezet, 81–108, Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends, and Composites, Hanser Publishers, Munich-Cincinnati, 2007.
- [10] Martin, O.; Averous, L.: Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems, Polymer, 42, 6209–6219 (2001).
- [11] Kulinski, Z.; Piorkowska, E.: Crystallization, structure and properties of plasticized poly(L-lactide), Polymer, 46, 10290–10300 (2005).
- [12] Lim, L.; T.; Auras, R.; Rubino, M.: Processing technologies for poly(lactic acid), Progress in Polymer Science, 33, 820–852 (2008).
- [13] Oroszlány, Á.; Kovács, J. G.: Lebomló interferencia csavarok fröccsöntése Objet/Polyjet eljárással készült szerszámba, Műanyag és Gumi, 48, 54–58 (2011).
- [14] Tábi, T.; Tamas, P.; Kovács, J. G.: 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, 7, 107–119 (2013).