

Szálkisajtolással készült munkadarab anyagréteg- vastagságának vizsgálata

Examination of Layer Thicknesses of a Model Produced by Fused Filament Extrusion

Dezső Gergely,¹ Dezső Gergely²

¹ ifj., Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, gergelydsd@gmail.com

² Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártás-technológia Tanszék, Nyíregyháza, Magyarország, dezso.gergely@nye.hu

Abstract

Nowadays additive manufacturing continues to gain more and more space in industrial technology. In particular, FDM (fused deposition modelling) machines have become easily available to the public. Quality of parts is impacted by several factors. In this study we investigate layer thicknesses of a prototype manufactured from PLA, and we pay special attention to the thickness of sequentially deposited layers.

Keywords: *additive manufacturing, material extrusion, 3D printing, fused deposition modeling.*

Összefoglalás

Napjainkban a 3D nyomtatás egyre nagyobb teret hódít. A kereskedelmi forgalomban egyre könnyebben elérhetőek az FDM (fused deposition modelling) technológiát alkalmazó nyomtatók. Az elkészült munkadarab minőségét több tényező is meghatározza. Jelen tanulmányban PLA anyagból készült testeket felépítő rétegek vastagságát vizsgáljuk.

Kulcsszavak: *additív gyártás, anyagkisajtolás, 3D nyomtatás, szálkisajtolás.*

1. Bevezetés

Napjainkban az additív gyártási (AM, additive manufacturing) eljárások fejlesztése és az ipari termelésbe való bevonása töretlenül zajlik. Az AM-eljárások sokfélesége miatt szinte minden területen van lehetőség az alkalmazásra. Kihívást jelent az, hogy az ilyen módon előállított termékek versenyképesek legyenek a piacon [1].

Az anyagkisajtolásos AM-eljárások közül elterjedt a szálkisajtolás (fused deposition method, fused filament fabrication). Nem csupán műanyagok alakíthatók ilyen eljárással [2, 3], de sikeres kísérleteket valósítottak meg tömbös fémüvegekkel [4] és kerámiatartalmú szálakkal [5] is.

A versenyképes termék előállításának egyik fontos feltétele a méretpontosság és alakhelyesség biztosítása [6]. Jó eredményeket lehet elérni

állandó hőmérséklet mellett, a pálya görbületétől függően változó, szabályozott tömegárammal végzett kisajtolással [7].

A gyártott modellek tulajdonságai és a gyártási eljárás közötti összefüggések vizsgálatokor gyakran figyelembe vett paraméterek a rétegvastagság, a nyomtatási hőmérséklet, a raszter irányszöge, a nyomtatási sebesség és a modell munkatéren belüli orientációja. Kimutatható, hogy ABS (akrilonitril-butadién-sztirol) esetén a rétegvastagság jelentősen befolyásolja a szakítószilárdságot, a hajlítószilárdságot és az ütőmunkát is [8, 9].

Az additív gyártási eljárásokra kidolgozott szimulációs módszerekben szintén fontos szerephez jutnak a feldolgozási paraméterek, köztük a rétegvastagság is [10].

Több tanulmány megerősíti, hogy a PLA (politejsav, polylactic acid) anyagból additív gyártással

készült testek mechanikai tulajdonságait lényegesen befolyásolja az alkalmazott rétegvastagság [11, 12].

Fontos és érdekes tendencia, hogy számos AM-eljárás egyre szélesebb körben elérhető szinte minden ember számára. Ezek közül kiemeljük az FDM (fused deposition modelling) eljárást, melyet magyar nyelven szálkiszajtolásos eljárásnak is neveznek.

A piacon igen nagy számban kaphatók gyártóberendezések. Arról egyelőre keveset lehet tudni, hogy pontosan milyen szerkezetűek azok a testek, amelyek ezekkel a 3D-s nyomtatókkal készülnek.

Ebben a tanulmányban szálkiszajtolásos 3D-s nyomtatással készült testek rétegvastagságára összpontosítunk.

2. A próbatetek gyártása

Az additív gyártással készített műanyag testek mikroszerkezetének tanulmányozására egy egyszerű és hatékony módszer a Charpy-féle ütővizsgálathoz készített próbatetek töretfelületének elektronmikroszkópos vizsgálata [16].

A szabványos méretű próbatesteket a kereskedelmi forgalomban kapható, Creality Cr-10 típusú, FDM-eljárást alkalmazó 3D-s nyomtatóval gyártottuk (1. ábra). A próbatetek mérete $80 \times 10 \times 4$ mm. A próbatetek egyik oldalán, középen 45 fokos bemetszés található, melynek lekerékítési sugara 0,25 mm. Ez a bemetszés nem utólagos megmunkálással (anyageltávolítással), hanem a próbatest gyártásával egyidejűleg készült el.

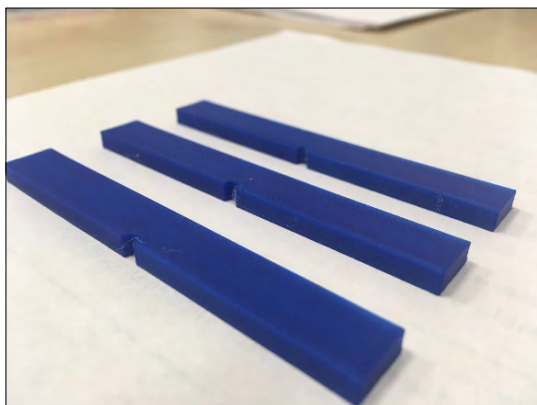


1. ábra. A próbatetek gyártásához használt 3D nyomtató, a Creality Cr 10

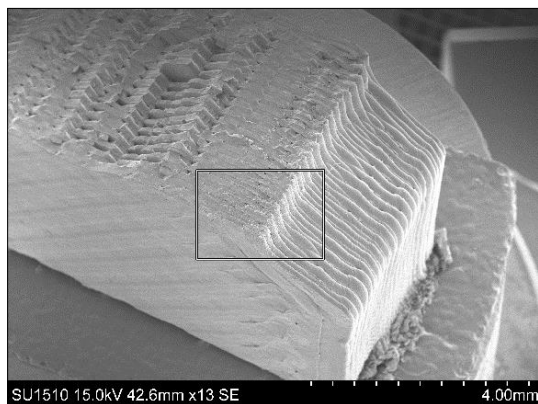
A próbatetek elkészítésére használt gyártóeszköznek a befoglaló méretei 615×600×490 mm, amelyből a nyomtatási tér 300×300×400 mm. A fúvóka átmérője 0,4 mm. Használható benne 0,3 és 0,2 mm átmérőjű fúvóka is. A réteg magassága 0,05 mm-től 0,4 mm-ig változtatható 0,05 mm nagyságú lépésekkel. A gyártás méretpontossága ±0,1 mm. A legnagyobb nyomtatási hőmérséklet 250 °C. Fűthető asztala van, melynek vízszintbe való állítását manuálisan kell elvégezni.

A berendezés többféle műanyagból képes gyártani. Ilyenek például a PLA, ABS, TPU (termoplasztikus PUR-elasztomer).

Az előzetesen elkészített 3D-s testmodellt STL-formátumba mentettük el. Ezt a Cura, ingyenes és napjainkban igen elterjedten alkalmazott, előkészítő szoftverrel dolgoztuk fel. Ez a szoftver rétegekre bontja a testmodellt, és felületet biztosít a geometriai, a gyártási és a gyártó berendezést jellemző változók megadásához. A Cura kimenete egy olyan fájl, amelyet a 3D-s nyomtató irányítására lehet használni (G-kód).



2. ábra. A kinyomtatott próbatetek



3. ábra. A töret felületének áttekintő képe

A próbatetek anyaga PLA (sötétkék színű), a főbb gyártási adatok a következők voltak: fejhőmérséklet 205 °C, asztalhőmérséklet 70 °C, rétegvastagság 0,1 mm, nyomtatási sebesség 60 mm/s, a kitöltöttség 100%.

A próbatetek szálalrendezése 45 fokos volt. Ez a 3. és a 6. ábrán is megfigyelhető.

3. Elektronmikroszkópos vizsgálat

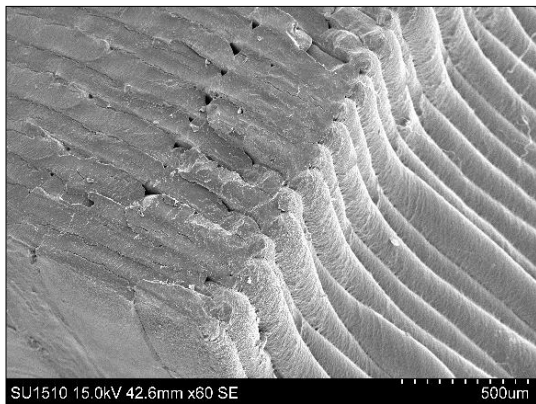
3.1. Az elektronmikroszkóp

A Nyíregyházi Egyetem elektronmikroszkópai laboratóriumában HITACHI SU-1510 pásztázó elektronmikroszkóp található. Ennek gyorsítófeszültsége legfeljebb 15 kV, a nagyítása 10 és 10 000 között változtatható. A mintatartójába legfeljebb 150 mm nagyságú tárgy helyezhető el. Minél kisebb a minta, annál több lehetőség van arra, hogy több oldalról is meg lehessen vizsgálni.

3.2. Minta-előkészítés

A Charpy-féle ütőművel eltört próbatest egyik darabjáról levágtuk azt a részt, amelyen a töret volt. Erre azért volt szükség, hogy az elektronmikroszkóp tárgyasztalára ráférjen a minta. A minta felületét vékony aranyréteggel kellett bevonni a statikus feltöltődés elkerülése érdekében, ami a jó minőségű képalkotás miatt szükséges.

A 3. ábra mutatja az elektronmikroszkóp tárgyasztalára rögzített minta áttekintő képét. Az ábra jobb oldalán látható, mélyebben fekvő rész a próbatest bemetszésének felülete, tehát ez nem része a töretfelületnek. A bal oldali rész a töret. Az ábrán négyzettel jelölt részlet felnagyított képét a 4. és 5. ábrák mutatják. Ezeken jól meg lehet figyelni és össze lehet hasonlítani az eredeti és az eltört felületek szerkezetét. Az eredeti felü-



4. ábra. A 3. ábrán téglalappal jelölt részlet nagyobb nagyításban

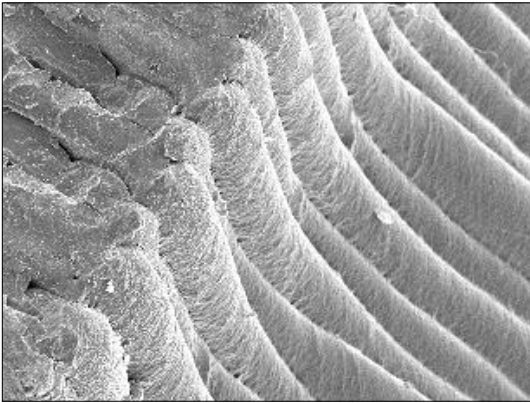
leten a rétegek kitüremkednek és egymásra torlódnak. Ez az oka annak, hogy az eredeti felület rétegvastagság mérése nem alkalmas.

A töretfelületen a rétegek jól elkülönülnek egymástól és nem deformáltak. Ezért használtuk a töretfelületet a rétegvastagság vizsgálatára.

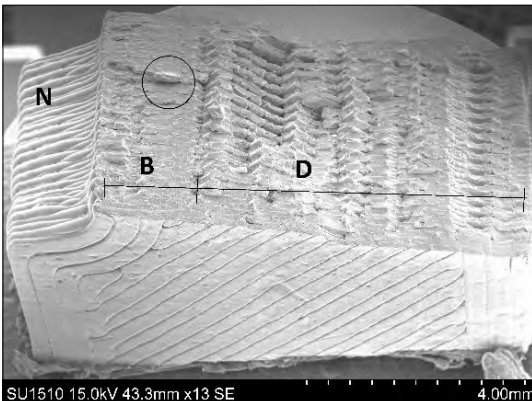
A töretfelületet érdemes megsejmelni más nézetből is, ezt mutatja a **6. ábra**.

A **6. ábrán** látható töretfelületen elkülöníthető egy olyan tartomány, amelyen a felszín simább, és egy olyan, amelyen a felszín tagoltabb. A két eltérő felszín arra utal, hogy a törés folyamata kissé eltérő a két tartományban. Módszerünkkel ez részletesen nem vizsgálható. Általában a simább felület ridegebb, a tagoltabb felület szívósabb törésre enged következtetni.

A nyomtatott rétegek közötti delamináció nem figyelhető meg.



5. ábra. A próbatest felszínén megfigyelhető réteges szerkezet, amely a rétegek egymásba nyomódása és felgyűrődése miatt nem használható mérésre



6. ábra. A töretfelület jellegzetes részei. N: a bemetszés eredeti felszíne, B: ridegebb törést mutató tartomány, D: szívósabb törést mutató tartomány

A **6. ábrán** bekarikázott rész egy olyan repedést mutat, amely merőleges a szálirányra.

Meg kell jegyezni, hogy a tagolt, lépcsős felszíni felület szerkezete emlékeztet az additív gyártás során alkalmazott szálrendezési mintázatra.

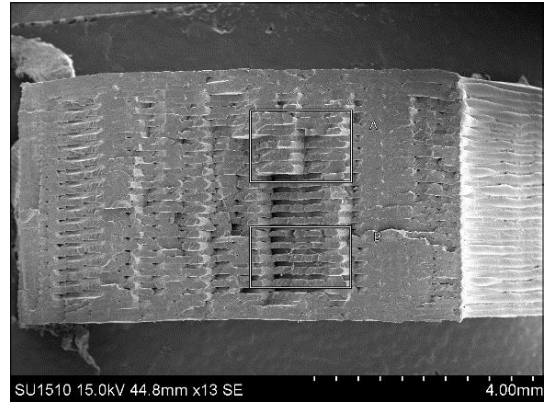
A rétegvastagság mérésére a felületnek az a része alkalmasabb, amely tagoltabb, mert ott könnyebb felismerni a rétegek határait.

Vizsgáltuk a mintában a rétegvastagságot.

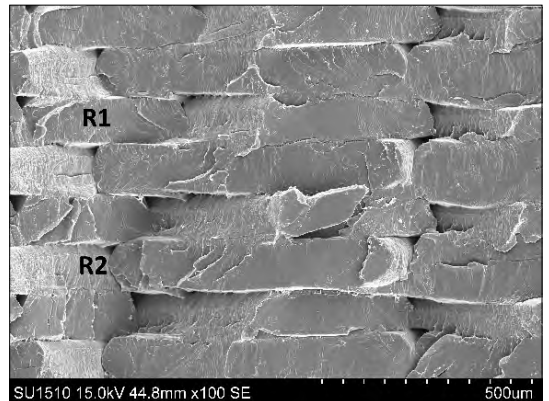
3.3. A rétegvastagság vizsgálata

A nyomtatás névleges rétegvastagsága 0,1 mm, a próbatest vastagsága 4 mm, tehát 40 réteg építi fel azt.

A **8. ábra** a töretfelület egy részletét mutatja, amelyben 8 réteg látható. A törési kép alapján meg lehet különböztetni az egymás alatt elhelyezkedő, eltérő száliránnyal felépített rétegeket.



7. ábra. A töretfelület két részlete, melyeket a rétegvastagság mérésére használtunk (A és B)



8. ábra. A töretfelület egy részlete, amelyet a rétegvastagság mérésére is felhasználtunk (A)

Ez alkalmat ad a rétegvastagság mérésére.

Olyan részleteket választottunk a töretfelületen, amelyeken jól megfigyelhető a rétegek határa. Ez elengedhetetlen feltétele az optikai információk alapján történő adatfelvételnek. A **7. ábra** mutatja a töretfelületnek azt a két részletét, melyeket kiválasztottunk erre a célra.

Már a mérés előtti szemrevételezéssel is megállapítható, hogy a rétegek nem azonos vastagságúak, és az is, hogy egy rétegen belül is változhat a vastagság. Ezért több rétegen végeztünk méréseket.

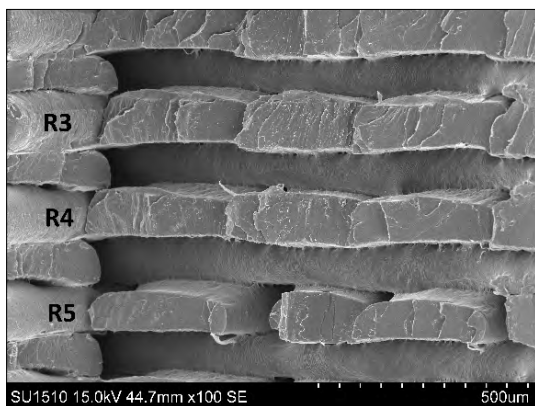
Három olyan réteget választottunk ki, amelyekben látható az eltört szálak keresztmetszete.

1. táblázat. Az 5. ábrán látható struktúra rétegeinek vastagságára vonatkozó mérési eredmények mikrométer egységekben

	a (μm)	b (μm)	c (μm)	d (μm)	e (μm)	Átlag (μm)	Szórás (μm)
R1	117	113	121	124	106	116	7,05
R2	119	129	130	119	126	125	5,32
R3	128	116	128	118	122	122	5,55
R4	108	106	100	116	105	107	5,83
R5	97,2	91,3	116	120	94,2	104	13,26

2. táblázat. Az 1. táblázatban látható adatok próbat statisztikai

Réteg jele	u
R1	5,07
R2	10,51
R3	8,86
R4	2,68
R5	0,67



9. ábra. A töretfelület másik részlete, amelyet a rétegvastagság mérésére is felhasználtunk (B)

Minden rétegen öt, egymástól egyenlő távolságban elhelyezkedő mérési pontot választottunk ki. A vastagság leolvasására az elektronmikroszkóp feldolgozó szoftverét használtuk, amely a kiválasztott pontok távolságát közvetlenül megadta, mikrométer egységekben.

A próbatést tört felületén kiválasztottunk egy másik részletet, ahol további két rétegre vonatkozóan olvastunk le vastagságadatokat. Ezt a felületrészletet mutatja a **9. ábra**.

A leolvasott adatokat az **1. táblázat**ban foglaltuk össze.

Az **1. és 2. táblázat** adataiból azt lehet megállapítani, hogy a rétegvastagság átlagértékben minden esetben nagyobb, mint a beállított 0,1 mm.

Azt, hogy a névleges értékétől a rétegvastagság értékek sokaságának átlaga szignifikánsan különbözik-e, statisztikai próbával lehet vizsgálni. Feltételezzük, hogy a rétegvastagság-értékek normális eloszlásúak, és az **1. táblázat** utolsó oszlopában szereplő korrigált empirikus szórásokkal közelítjük a sokaság varianciáját. Egymintás u-próbát végzünk annak vizsgálatára, hogy az átlagértékek szignifikánsan térnek-e el a névleges rétegvastagságtól. Az u próbat statisztika értékeit a **2. táblázat** mutatja be. Kétoldali ellenhipotézist alkalmazunk.

Az első négy esetben 0,005-ös szignifikanciaszinten is kijelenthető, hogy a rétegvastagság szignifikánsan nagyobb a névleges értéknél. Az ötödik rétegből felvett adatok esetén nem mutatható ki szignifikáns eltérés.

A mérési adatok rétegen belüli szórása nagy. A rétegvastagságok átlagának átlaga 114,4 μm , az átlagok szórása 7,71 μm .

4. Következtetések

Megállapítható, hogy a próbatetek törete jellegzetes lépcsős szerkezettel rendelkezik, ami a kisajtott szálak elrendezésének mintázatát tükrözi.

A rétegvastagság helyről helyre nagy szórással változik, ugyanakkor az öt minta közül négy esetben szignifikánsan nagyobb, mint a beállított 0,1 mm.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük Fecskovics Miklósnak a próbatetek gyártását.

Köszönjük a Nyíregyházi Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumának és Elektronmikroszkóp Laboratóriumának az anyagvizsgálatokban nyújtott közreműködést.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Tofail S. A. M. et al.: *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. Materials Today, 21/1. (2018) 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- [2] Wu H. et al.: *Multi-functional ULTEM™1010 composite filaments for additive manufacturing using fused filament fabrication (FFF)*. Additive Manufacturing, 24. (2018) 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.014>
- [3] Brenken B. et al.: *Fused filament fabrication of fiber reinforced polymers: A review*. Additive Manufacturing, 21. (2018) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>
- [4] Nötzel D., Eickhoff R., Hanemann T.: *Fused filament fabrication of small ceramic components*. Materials, 11/8. (2018) 1463–1468. <https://doi.org/10.3390/ma11081463>
- [5] Gibson M. A. et al.: *3D printing metals like thermoplastics: fused filament fabrication of metallic glasses*. Materials Today, 21/7. (2018) 697–702. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.07.001>
- [6] Dezső G., Százvai A., Kósa P.: *Additív gyártással készített testek alakhelyességének vizsgálata*. In: Fiala Műszakiak Tudományos Ülésszaka XVII., Kolozsvár/Cluj, Románia, Műszaki Tudományos Füzetek 2012. 99–102. <https://eda.eme.ro/handle/10598/15520>
- [7] Ertay D. S. et al.: *Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines*. Additive Manufacturing, 19. (2018) 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.011>
- [8] Huang B. et al.: *Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament*. Polymer Engineering and Science, 59. (2019) 120–128. <https://doi.org/10.1002/pen.24875>
- [9] Marat-Mendes R. et al.: *Effect of fused filament fabrication processing parameter on the mechanical properties of PLA components*. In: XVI. Portuguese Conference of Fracture, Covilha, Portugal (2018) <https://www.researchgate.net/publication/325847551>
- [10] Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G.: *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83. (2016) 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [11] Chacón J. M. et al.: *Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modeling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*. Materials and Design, 124. (2017) 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- [12] Camargo J. C. et al.: *Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2019) (online) <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>