

# Rétegek közötti hegedés vizsgálata FFF típusú 3D nyomtatott termékeken

## Investigating the interlayer bonding on FFF 3D printed specimens

Kiss Bálint<sup>1</sup>, Lukács Norbert László<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar  
Témavezető: Dr. Kovács Norbert Krisztián, adjunktus, BME Polimertechnika Tanszék  
Konzulens: Tóth Csenge, doktorandusz, BME Polimertechnika Tanszék

### Abstract

*To be able to make mechanically functional 3D-printed products, we should decrease the anisotropy. Because of this, we need deeper understanding of the interlayer bonding and welding processes. In our work, we investigated the effect of the printing parameters on interlayer bonding. Based on the literature, we examined the impact of print speed, printing temperature and layer height. After we evaluated the results, we even tried out a new technique, with which we achieved way better mechanical properties and better interlayer strength in our specimens.*

### Összefoglalás

*Az anizotróp viselkedés ismerete, valamint a jelenség hatásainak csökkentése kulcsfontosságú lehet abban az esetben, ha műszaki funkciókat ellátó alkatrészeket szeretnénk FFF technológiával gyártani. Kutatásunk során az anizotrópia mélyebb megismerése céljából felderítettük a rétegek közötti kapcsolatokat leíró hegedési folyamatokat és a hegedés minőségét meghatározó gyártási paramétereket. Ezek mellett egy saját módszerrel is végeztünk kísérleteket, mellyel a kötőszilárdság a közel 160%-ra nőtt.*

### Kulcsszavak

additív gyártástechnológia, 3D nyomtatás, FFF, interlayer bonding, anisotropy

## 1. BEVEZETÉS

Az additív gyártástechnológiák már az 1980-as évek óta léteznek, az azóta eltelt negyven év alatt pedig rohamos fejlődésen mentek keresztül. Kezdetben ezeket az eljárásokat prototípusok gyors és költséghatékony létrehozására használták, amelyek egyedüli feladata az ötletek, koncepciók valós modellel történő szemléltetése volt, más követelmények szempontjából (például alapanyag, mechanikai tulajdonságok stb.) a prototípusoknak nem kellett egyezniük a végtermékkel [1,2]. Manapság a technológia már funkcionális alkatrészek, késztermékek gyártására is alkalmas, így az ipar több területén is kihasználják a benne rejlő lehetőségeket, mint például az autóipar, a repüléstechnika, vagy az orvostechika. Az additív gyártási eljárásokkal az alapanyagok széles skálája felhasználható, a fémektől és polimerektől kezdve a kerámiákon át egészen a kompozitokig [3].

Az FFF (Fused Filament Fabrication) vagy másnéven FDM (Fused Deposit Modeling) az egyik leggyakrabban alkalmazott additív gyártástechnológia. Bár a technológia hátrányai, mint az anizotrópia vagy az egyéb műanyagipari gyártástechnológiákhoz képesti (például fröccsöntés, extrúzió) gyenge termelékenység ismertek, könnyű hozzáférhetősége, egyszerű kezelhetősége és a relatív alacsony beruházási, valamint üzemeltetési költségei miatt népszerű mind az iparban, mind a hobbihasználók körében [4,5].

Az anizotrópikus viselkedés elsősorban építési irányban, z-irányban jelentkezik. Ennek hátterében az áll, hogy a korábban lerakott, megszilárdult és lehűlt rétegre rányomtatva az új réteget a rétegek határfelületén nem alakul ki a megfelelő rétegek közötti hegedési kapcsolat. Az elégtelen hegedés akár 50-70%-os csökkenést is előidézhet például a z-irányú húzási tulajdonságokban (húzószilárdság, húzó rugalmassági modulus stb.). A hegedési kapcsolat minőségét a szakirodalom szerint befolyásolja a fűvóka hőmérséklet, a rétegek között fellépő összenyomó erő (ami a gyártási paraméterek közül a rétegvastagsággal függ össze), illetve a nyomtatási sebesség [6-9]. Annak érdekében, hogy a lehető legjobb hegedési kapcsolatot alakíthassuk ki, munkánk során vizsgáltuk az imént említett paraméterek hatásait a rétegek közötti kapcsolatokra. További célunk, hogy a lehető legnagyobb mértékben csökkentsük az anizotrópiát, melyet egy saját módszerrel próbáltunk megvalósítani.

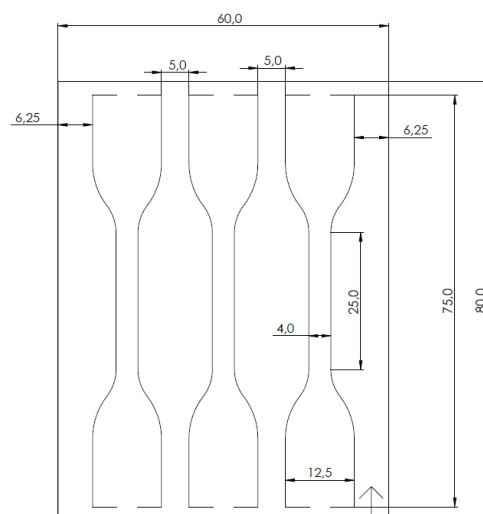
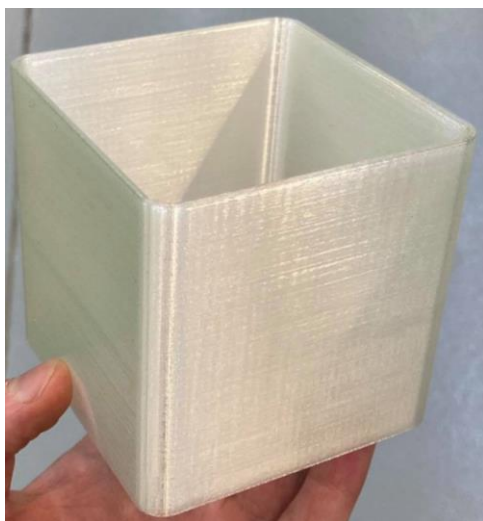
## 2. ANYAGOK, BERENDEZÉSEK, MÓDSZEREK

A próbatetek gyártását egy Craftbot Plus 3D nyomtatón végeztük el (1. ábra/a) Filaticum PLA felhasználásával. A PLA előnyös a technológia vizsgálatára, mivel zsugorodása kicsi, így vetemedésre kevésbé hajlamos, feldolgozása rendkívül egyszerű. Az alapanyag legnagyobb szakítószilárdsága a gyártói adatlap szerint 60 MPa, amelyet azonban építési irányban nem érhetünk el az anizotrópia miatt (mivel a nyomtatás során nem állnak fent az tökéletes hegedés kialakulásához szükséges optimális körülmények) [10]. A nyomtatás előkészítését a Slic3r szoftvercsaláddal valósítottuk meg, mely lehetőséget biztosított a gyártási paraméterek pontos megválasztásában. A szakítóvizsgálatokhoz egy Zwick Z005-ös szakítógépet használtunk (1. ábra).



1. ábra a) - Az alkalmazott 3D nyomtató b) - szakítóberendezés

Az egyes próbateteket nem a hagyományos módon, külön-külön gyártottuk le, hanem egy meghatározott méretű „dobozt” készítettünk, amelyből később vízvágással munkáltuk ki a próbateteket. A módszer előnye, hogy a vékony, magas próbatetek így nem billegtek gyártás közben, illetve a nyomtatási sebesség is vizsgálhatóvá vált. A kisméretű próbatetek esetében a nyomtatófej véges nagy gyorsulása miatt a fej jó eséllyel nem éri el a kívánt sebességet, ami miatt a nyomtatási sebesség nem lenne vizsgálható. A módszerünk erre a problémára ad jó megoldást (2. ábra).



2. ábra A próbatetek „doboz” előformája és szabásmintája

A nyomtatási paraméterek közül a szakirodalom alapján 3 paramétert találtunk fontosnak, emiatt vizsgáltuk a rétegmagasság, fűvókahőmérséklet és nyomtatási sebesség hatását. A rétegmagasság esetében a 0,4 mm átmérőjű fűvókával alkalmazható rétegmagasságok két szélsőértékét, 0,1 és 0,3 mm-t vizsgáltuk, nyomtatási hőmérséklet esetében három értéket (200-215-230°C-t) vizsgáltunk, amelyek a felhasznált PLA alapanyag optimális tartományába esnek. A nyomtatási sebességet szintén három értékkel, 20-50-80 mm/s-on vizsgáltuk, amelyek esetén a legnagyobb sebesség sem érte el a gyártóberendezés maximális sebességét. Az

eredmények részben látható minta megnevezések tükrözik az imént említett gyártási paraméterek adott esetben használt értékeit, így például a 215\_50\_03 jelölés 215 °C fúvókahőmérsékletet, 50 mm/s nyomtatási sebességet és 0,3 mm rétegvastagságot jelent.

A rétegek közötti hegedés javítása céljából a szokásostól eltérő gyártási stratégiával is készítettünk próbatesteket, a módszer az open-source szeletelőprogramok használatánál ismert „ironing” funkció kibővített felhasználásán alapszik. Az ironing (magyarul vasalás) a legfelső réteg felületminőséget hivatott javítani. Lényege, hogy a nyomtató fúvókája az utolsó réteg lefektetése után még egyszer elhalad a réteg felett úgy, hogy minimális anyag extrudálása történik csak meg. A fej és az utolsó réteg közötti távolság ilyen esetekben nem több, min 0,05 mm. Ennek hatására a felső réteg egy része újra megömlik, a lefektetett szálak összeolvadnak.

Amennyiben ezt a funkciót minden egyes rétegre felhasználjuk, (lényegében rétegenkénti hőkezelést hajtunk végre, ezért a későbbiekben így hivatkozunk az eljárásra), úgy minden réteg esetében elérhetjük az újbóli megömlést és összeolvadást, ezáltal javíthatjuk a rétegek közötti kapcsolatot.

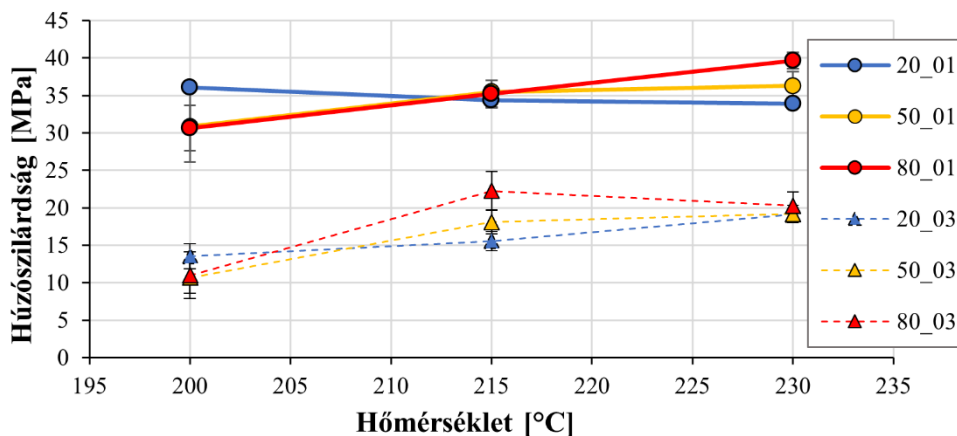
### 3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az előzőekben bemutatott beállításokkal készített próbatesteken végzett szakítóvizsgálatok eredményeit ismertetjük. Először a gyártási paraméterek hatásáról lesz szó, majd a rétegenkénti hőkezelés módszerével elért hatásokat mutatjuk be.

#### A gyártási paraméterek hatása

A rétegmagasság hatása nagy mértékben megmutatkozott a szakítóvizsgálatok során. A paraméterek hatásának felderítéséhez tekintsük át a húzószilárdsági értékeknél megfigyelt változásokat, ezeket az adatokat 3. ábra szemlélteti. A legszembetűnőbb különbség az eltérő rétegmagasságok esetén figyelhető meg. Az eltérés különösen kisebb nyomtatási hőmérsékleteken volt jelentős, ahol a 0,1 mm-es és 0,3 mm-es rétegvastagságok között akár 270%-os eltérés is fellépett a kisebb rétegvastagság javára.

A nyomtatási sebesség tekintetében (ahogy az előre várható volt) nem fedeztünk fel egyértelmű, független hatást. A 0,3 mm-es rétegvastagságú mintákat elemezve észrevehetjük, hogy 215 °C-os feldolgozási hőmérsékleten a nyomtatási sebesség növelése emeli a húzószilárdsági értékeket, míg 200 °C esetén ellentétes hatást, 230 °C-on pedig semmiféle hatást sem fejt ki. Ezzel szemben 0,1 mm-es rétegvastagságnál a javuló tendencia 230 °C-on figyelhető meg, 215 °C és 200 °C esetén nem fedezhető fel változás a mért értékekben. A szórások tekintetében alapvetően elmondható, hogy nagyobb gyártási sebesség nagyobb szórásmezőt okozott. A feldolgozási hőmérséklet hatása a vártnál kisebb mértékben alakította a próbatestek húzószilárdsági értékeit. A kapott eredményekből kiderül, hogy észrevehető különbséget 0,3 mm-es rétegvastagságnál csak a 200 °C-on gyártott próbatestek mutattak a többi próbatesthez képest. A 215 °C és 230 °C-on gyártott próbatestek húzószilárdsági értékei nagyon hasonlóak voltak, jelentős eltérést nem tudunk megállapítani. Az egyes hőmérséklet értékek nem okoztak jelentős változást a szórásmezők tekintetében (3. ábra).



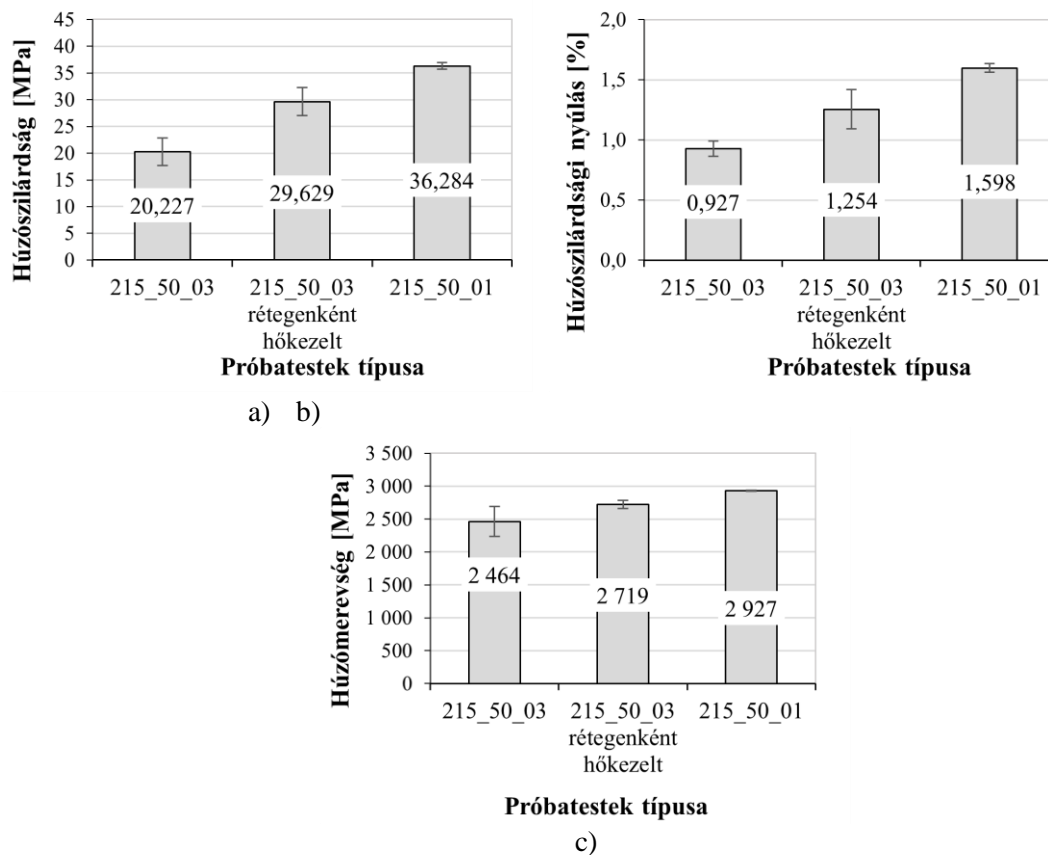
3. ábra

*Az átlagos húzószilárdság értékek a nyomtatási hőmérséklet függvényében*

Az eredményeink alapján elmondható, hogy a húzószilárdságra a nyomtatási rétegmagasság van a legnagyobb hatással, amíg a nyomtatási hőmérséklet csak az alapanyag feldolgozási hőmérséklettartományának alsó részében okozhat problémát. A nyomtatási sebesség a méréseink alapján nincs nagy hatással a húzószilárdságra.

### Rétegenkénti hőkezelés hatása

A rétegenkénti hőkezeléssel gyártott próbatést minden gyártási paramétere megegyezett a 215°C-os fűvókahőmérséklettel, 50 mm/s-al és 0,3 mm-es rétegvastagsággal készült próbatestével, emiatt közvetlenül mérni tudtuk a hőkezelés hatását. A rétegenkénti hőkezelés alkalmazásával nemcsak a húzószilárdságban, hanem a húzószilárdsági nyúlásban, sőt, a húzómerevségben is növekedést érhetünk el, megközelítettük a 0,1 mm-es rétegvastagsággal gyártott próbatestek értékeit (4./a-b-c ábra). További mérésekkel igazoltuk, hogy a módszer használata a merevség és szilárdságbeli növekedés ellenére sem váltotta ki a próbatestek ridegedését. A hatások hátterében a rétegekben megfigyelhető hőmérsékletnövekedés áll, amely feltételezéseink szerint megnöveli a rétegek közötti diffúziót, amely nagyobb behatolási mélységet eredményez, illetve elősegíti az áthurkolódások kialakulását. A megfelelő mértékben áthurkolódott molekulaláncoknak köszönhetően a próbatestek nem mutatnak rideg viselkedést.



4. ábra A rétegenként hőkezelt minta mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása más próbatestekkel.  
a) - húzószilárdsági értékek, b) - húzószilárdsági nyúlás értékek, c) - húzómerevségek

A bemutatott rétegenkénti hőkezelés előnye, hogy nem igényel külső berendezést, a kivitelezése a nyomtató és a megfelelő gyártási paraméterek segítségével történik. Hátránya, hogy a gyártási idő körülbelül 2-2,5x nagyobb. A gyártási időt egyéb szoftveres módszerekkel igyekszünk csökkenteni, ez azonban még jövőbeli terveink részét képezi.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során a legkönnyebben hozzáférhető, mindenki számára elérhető FDM/FFF additív gyártástechnológia legfontosabb paramétereit vizsgáltuk, elsődleges célunk a gyártás során fellépő anizotrópia csökkentése volt. Meghatároztuk az egyes paraméterek hatását az így gyártott termékek húzási tulajdonságaira. A megvizsgált gyártási paraméterek közül a rétegvastagság hatása volt a legjelentősebb, amely csökkentésével csökken a fűvókából kilépő anyagáram, nő a filament tartózkodási ideje és a kilépő anyag kontakt nyomása. A rétegvastagság csökkentésével azonban egyenesen arányosan nő a gyártási idő, így kompromisszumot kell kötni a jobb húzási tulajdonságok és a gyorsabb gyártás között. A nyomtatási

hőmérséklet növelésével nem kapunk arányosan jobb mechanikai tulajdonságokat, azonban a 200°C-on, az optimálisnál alacsonyabb hőmérsékleten gyártott próbatesteknél gyengébb húzószilárdság volt megfigyelhető. A nyomtatási sebesség növelésével nem értünk el gyengébb mechanikai tulajdonságokat, de a mérések alapján megnőtt az egyes próbatestek minőségének szórása, bizonytalanabb lett a gyártás. A kapott eredmények igazolják az általunk kidolgozott rétegenkénti hőkezelés módszerének hatékonyságát, melynek alkalmazásával jelentősen csökkenthető a modellek anizotrópiája. A rétegenkénti hőkezeléssel nagy mértékben tudtuk javítani a próbatestek mechanikai tulajdonságát, azonban a nyomtatási idő is jelentősen megnőtt.

### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Tóth Csengének, Dr. Kovács Norbert Krisztiánnak és Dr. Török Dánielnek a félév során nyújtott támogatásért, illetve Horváth Istvánnak a mintagyártásban nyújtott segítségért.

A dolgozat a Magyar Tudományos Akadémia Magyarország-Olaszország kétoldalú mobilitás pályázatának keretein belül készült (NKM2018-42).

A dolgozatot a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336) pályázata támogatta.

A dolgozat a 2018-1.3.1-VKE-2018-00001 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2018-1.3.1-VKE pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A szerzők konferencia részvételét a BME Gépészmérnöki Kar NTP-HHTDK-21-0051 pályázata támogatta.

### Irodalmi hivatkozások

- [1] Dr. Macskási L., Dunai A.: Műanyagok fröccsöntése. Lexica Kft., Budapest, 2003.
- [2] Urhal P., Weightman A., Bartolo P. & Diver: Robot assisted additive manufacturing: A review. In L. Wang, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 335-345 (2019)
- [3] Shahrubudin N., Lee T. C. & Ramlan R.: An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. In Procedia Manufacturing 35, 1286-1296 (2019)
- [4] L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, David Ian Wimpenny: 3D Printing and additive manufacturing technologies. Springer Ltd. (2019)
- [5] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker: Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer Ltd. (2015)
- [6] Timothy J Coogan, David O Kazmer: Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. in Additive Manufacturing 35, (2020)
- [7] C. McIlroy, P.D. Olmsted: Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts. during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. in Polymer 123, 376-391 (2017)
- [8] Chya-Yan Liaw, John W. Tolbert, Lesley W. Chow and Murat Guvendiren: Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens. in Soft Matter 17, 4775-4789 (2021)
- [9] Qiushi Li, Wei Zhao, Bingjie Niu, Yiliang Wang, Xinhui Wu, Jiawen Ji, Yongxiang Li, Tingting Zhao, Han Li, GongWang: 3D printing high interfacial bonding polyether ether ketone components via pyrolysis reactions. in Materials and Design 198 (2021)
- [10] <https://filaticum.com/wp-content/uploads/2021/03/filaticum.com-tds-filaticum-pla-20210316.pdf>