

Anyagextrúzió alapú additív gyártástechnológiával készült termékek anizotróp
viselkedésének elemzése

Kiss B., Párizs R. D., Tóth Cs., Török D., Kovács N. K.

Accepted for publication in Polimerek

Published in 2023

DOI:

KISS BÁLINT¹, PÁRIZS RICHÁRD DOMINIK¹, TÓTH CSENGE¹, TÖRÖK DÁNIEL^{1,2},
KOVÁCS NORBERT KRISZTIÁN^{1,2}

ANYAGEXTRÚZIÓ ALAPÚ ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL KÉSZÜLT TERMÉKEK ANIZOTRÓP VISELKEDÉSÉNEK ELEMZÉSE

ANALYSIS OF ANISOTROPIC BEHAVIOUR OF PRODUCTS MADE BY MATERIAL EXTRUSION BASED ADDITIVE MANUFACTURING

Az anyagextrúzió alapú additív gyártástechnológia (AM) térhódítása jelentős az ipar szinte minden területén. A technológia alkalmazhatóságának azonban gátat szab a termékeknek a megfigyelhető nagymértékű anizotrópia a mechanikai tulajdonságok tekintetében. Az építési irányban mérhető mechanikai jellemzők értékei a gyártási paraméterektől függően esetenként 50-70%-kal kisebbek lehetnek, mint az arra merőleges irányokban. Ebből fakadóan munkánk célja a jelenség okainak mélyebb megértése mellett az anizotrópia lehető legnagyobb mértékű csökkentése. Ennek érdekében a szakirodalom alapján kiválasztott, a rétegek közötti tulajdonságok szempontjából releváns gyártástechnológiai paraméterek értékeit optimalizáltuk kísérlettervezési módszer segítségével. Az optimalizálást építési irányban mért húzószilárdsági értékek alapján valósítottuk meg.

The uptake of additive manufacturing (AM) based on material extrusion is significant in almost all areas of industry. However, the applicability of the technology hinders the expansion by the high degree of anisotropy in mechanical properties observed in products. Depending on the manufacturing parameters, the mechanical properties measured in the building direction can sometimes be 50-70% lower than in the perpendicular direction. Our work aims to reduce anisotropy as much as possible while gaining a deeper understanding of the interlayer bonding process. To this end, we optimized the values of selected fabrication parameters relevant to the interlayer properties based on literature using an experimental design method. The optimization was performed on the basis of tensile strength values measured in the building direction.

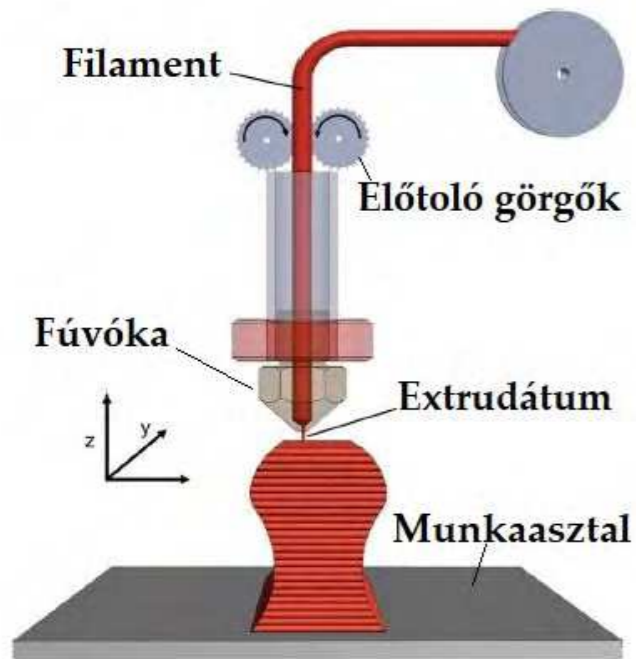
1. BEVEZETÉS

A 3D nyomtatás technológiája napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvend, köszönhetően az alacsony üzemeltetési költségnek, a könnyű kezelhetőségnek, a relatív alacsony árak és nem mellesleg a hatalmas tervezői szabadságnak. A 3D nyomtatás kifejezés valójában nem egy konkrét eljárást, hanem elvűkben hasonló eljárások összességét foglalja magába, amelyek közös vonása az anyaghozzáadás, másnéven addíció jellegű gyártás. A fogalomkör legnagyobb potenciállal és fejlesztési lehetőséggel rendelkező típusa az anyagextrúzió alapuló eljárás. Az angol szakirodalomban jellemzően Fused Deposition Modeling (FDM) vagy Fused Filament Fabrication (FFF) névvel emlegetett technológia lényege, hogy egy termoplasztikus polimer szálát

(másnéven filamentet) egy extruder rendszer segítségével fűtött fűvókán átsajtolunk, így juttatva alapanyagot a munkatérbe (1. ábra). Ezzel a módszerrel többféle termoplasztikus polimer is feldolgozható, jellemzően politejsav (PLA), akrilnitril-butadién-stirol (ABS), polietilén-tereftalát-glikol (PETG), polikarbonát (PC), poliamid (PA). A gyártás folyamán a nyomtatófej rögzített magassáérték mellett elkészíti a termék adott vízszintes síkmetszetét, ezt követően a fej elmozdul függőleges irányban, majd elkezdődik a következő réteg felépítése. Ez a folyamat egészen a termék elkészültéig ismétlődik. A rétegről rétegre történő építkezés

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.



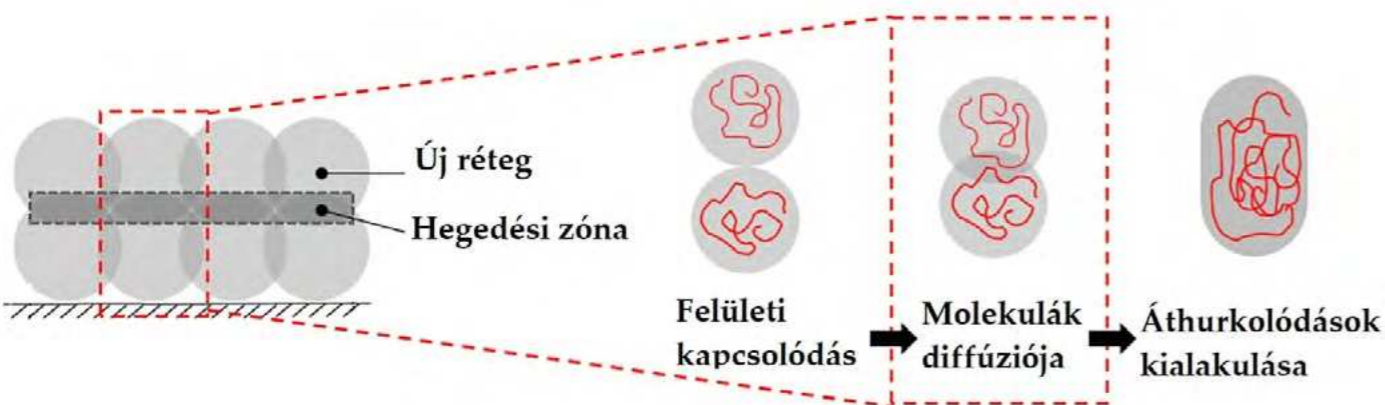
△ 1. ábra: Rétegről rétegre való építkezés [1]

hatására a termékünk olyan mechanikai tulajdonságai, mint a húzószilárdság, szakítószilárdság, rugalmassági modulusz az egyes irányokban eltérőek lesznek. Ennek oka, hogy az egyes rétegek elkészültéhez szükséges idő alatt az aktuálisan lerakott réteg lehűl, így a következő elkészítendő réteg már erre a lehűlt alanyra épül rá. Ebből fakadóan a rétegek közötti kapcsolat (ezt gyakran rétegek közötti hegedésnek is nevezik) jellemzően gyengébb, amely a fent említett tulajdonságok építési irányú csökkenését eredményezi. Szakirodalmi adatok alapján a függőleges gyártási irányban megfigyelt csökkenés mértéke a síkban mért tulajdonságokhoz viszonyítva meglehetősen nagy, akár 50-70% is lehet [1-3]. A megfelelő minőségű terméktulajdonságok elérése érdekében az anizotrópia csökkentése, vagyis a rétegek közötti hegedés javítása meglehetősen nagy szereppel bír. Gyakorlati szempontból egy lehetséges megoldást jelenthet a problémára a gyártási paraméterek optimalizálása. Ennek megvalósításához azonban szükség van a hegedés alatt lejátszódó molekuláris szintű folyamatok ismeretére és megértésére.

A rétegek közötti kapcsolat minőségét sok tényező befolyásolja, ezek közül kiemelt jelentőségű a hőmérséklet és a molekuláris szintű orientációt kiváltó nyíró hatás [4, 5]. Az egyes rétegek makromolekuláinak rétegek közötti mozgását a reptáció segítségével írhatjuk le. A reptációs elmélet alapján tudjuk, hogy egy molekulalánc mozgását az azt körülvevő láncok által képzett topológia korlát, az úgynevezett reptációs cső akadályozza. A lánc reptációs csőben való mozgását és abból történő távozását nevezzük reptációs mozgásnak. Maga a molekula akkor képes elhagyni az őt korlátozó cső szerű rendszert, ha a molekulaláncokat nem terheli nyírás (ellenkező esetben a reptáció csakis a láncok relaxációja után mehet végbe). A megfelelő rétegek közötti kapcsolat akkor alakul ki, amikor a két réteg határán a molekulaláncok elhagyják az őket körülvevő reptációs korlátot, egy adott mélységig behatolnak a szomszédos rétegbe (ezt nevezzük behatolási mélységnek), majd áthurkolódásokat alakítanak ki a szomszédos réteg molekulaláncaival, létrehozva így az egyensúlyi állapotra jellemző, áthurkolódásokat tartalmazó molekulaszervezetet (2. ábra). Fontos megjegyezni, hogy az elmélet szerint a molekulamozgások (amelyek makro-Brown mozgásnak tekintendők) csakis az adott alanyra jellemző üvegesedési hőmérséklet (T_g) felett játszódhatnak le [4, 7-10].

Az elmélet alapján belátható, hogy a hőmérséklet növelése minden esetben javítja a rétegek közötti hegedést, ezért a megfelelő hőmérséklet megválasztása kulcsfontosságú feladat az anyagextrúziós AM technológiák esetében.

Ezzel szemben a nyírás előidézhethet pozitív és negatív hatást is. Amennyiben nagymértékű nyírásnak tesszük ki a lerakott polimerszálat a gyártás során, úgy a rétegeket alkotó extrudátumban található makromolekulák jelentős mértékben orientálttá válnak. Ez a korábbiakban leírtak szerint megnehezíti a rétegek közötti hegedést, a reptációs mozgások időszükséglete az orientáció miatt megnő, így elképzelhető, hogy az anyag még a megfelelő behatolási mélység és áthurkolódás elérése előtt a T_g alá hűl. Abban az esetben, ha a kiindulási anyagban a makromolekulák nagyszámú áthurkolódást alakítanak ki egymással, a fúvókán való átsajtáláskor fellépő nyírás csökkenti az áthurkolódások mennyiségét, amely könnyíti a molekulaláncok reptációs mozgását, ezáltal elősegíti a rétegek közötti megfelelő minőségű kötés kialakulását. A gyártás során ezeket a hatásokat közvetve vagy közvetlenül a gyártási paraméterek segítségével tudjuk szabályozni, befolyásolni, így ezek optimális értékre való beállítása elengedhetetlen



△ 2. ábra: A hegedés folyamata vázlatos ábrán [11]

a lehető legkisebb anizotrópia biztosításához. Ezek ismeretében a rétegek közötti hegedést befolyásoló gyártási paraméterek és az imént ismertetett folyamatok közötti kapcsolatok a következők: a fúvókahőmérséklet meghatározza a lerakott szálak hőmérsékletét, amíg a nyomtatási sebességnek és a rétegvastagságnak nemcsak a nyírásra, de a hűlési tulajdonságokra is hatása lehet [2, 4, 6-10]. Munkánk céljával a fúvókahőmérséklet, a nyomtatási sebesség és a rétegvastagság rétegek közötti hegedésre gyakorolt hatásának felderítését tűztük ki. Itt szeretnénk megemlíteni, hogy ezeknek a paramétereknek a hatásával több kutató is foglalkozik, azonban ezeknek a kutatásoknak a megállapításai nem minden esetben vannak összhangban. A fúvókahőmérséklet és a rétegvastagság tekintetében a kutatások egységesen azt mutatták, hogy amíg a fúvókahőmérséklet növelése [12-14], addig a rétegvastagság csökkentése [14, 15] növeli a rétegek közötti szilárdságot. A nyomtatási sebesség tekintetében azonban a kutatások eredményei eltérőek, vannak, akik szerint a nyomtatási sebesség növelése, mások szerint annak csökkentése hat kedvezően a rétegek közötti szilárdságra. Ami azonban minden kutatásnál azonos, hogy ennek a paraméternek nem olyan jelentős az önálló hatása, mint a rétegvastagságnak és a fúvókahőmérsékletnek [6, 16].

A paraméterek hatásának vizsgálatához faktoriális kísérlettervezést alkalmaztunk. Ezt a módszert széleskörben alkalmazzák a folyamatokat befolyásoló különféle hatásokat azonosítására, elemzésére, a hatásokat kiváltó paraméterek optimalizálására [17-20]. A módszer vitathatatlan előnye, hogy az így kapott mérési eredményekre alapozva képesek vagyunk valamilyen függvényekkel közelíteni a paraméterek mért jellemzőre gyakorolt hatását. Esetünkben a paraméterek vizsgálatához összesen $3^2 \times 2^1 = 18$ beállítás mellett gyártottunk mintákat, ugyanis 2 paraméter (más szóval faktor) hatását 3 szinten, amíg egy faktor hatását 2 szinten vizsgáltuk. Itt érdemes pár szót ejteni a vizsgálati szintek számának jelentőségéről: amennyiben nem vagyunk biztosak az adott faktor hatásának linearitásában, akkor célszerű 3 szinten elvégezni a vizsgálatokat (ebben az esetben a vizsgálati tartományból jellemzően két szélsőértéket és egy középpértéket tekintünk vizsgálandó pontnak). Így kvadratikusan jelleget is lehet írni a megalkotott összefüggéssel, ennek hiányában viszont csak lineáris összefüggés adható, amely adott esetben torzíthatja a függvény pontosságát és használhatóságát [17-20].

2. ALAPANYAGOK ÉS ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Vizsgálatainkhoz Filaticum transzparens PLA filamentet használtunk, amelynek adattapi húzószilárdsága az ISO 527 szabvány alapján 60 MPa, húzómerevsége 3,8 GPa, üvegesedési átmeneti hőmérséklettartománya 55-60 °C. A választásunk azért esett erre az anyagra, mert alacsony feldolgozási hőmérséklettel rendelkezik, illetve széles nyomtatási sebesség tartományban is feldolgozható. Emellett a PLA másik előnyös tulajdonsága, hogy a nyomtatás során bekövetkező nagyon gyors hűlés hatására csak igen kis mértékben kristályosodik, ebből fakadóan csekély zsugorodási és vetemedési hajlam jellemzi. A próbatetek gyártásához Craftbot Plus típusú FFF nyomtatókat használtunk.

A méréseink során a fúvókahőmérsékletet, a rétegvastagságot és a nyomtatási sebességet vizsgáltuk, a vizsgált paramétereket

az 1. táblázat foglalja össze. A nyomtatási sebességet és a fúvókahőmérsékletet 3 szinten, míg a rétegvastagság hatását 2 szinten vizsgáltuk. A paraméterek számszerű értékét a berendezésünk technológiai korlátai, illetve az alanyhoz tartozó ajánlások alapján választottuk ki, ügyelve arra, hogy a lehető legszélesebb skálát lefedjük.

1. táblázat: A vizsgálatokhoz használt paraméterek ($T_{fúvóka}$ - fúvókahőmérséklet, $v_{nyomtatás}$ - nyomtatási sebesség, l_h - rétegvastagság).

Kísérletterv	Kísérleti faktorkok			
	$T_{fúvóka}$ [°C]	$v_{nyomtatás}$ [mm/s]	l_h [mm]	
Kísérleti szintek	Alacsony (-1)	200	20	0,1
	Közepes (0)	215	50	-
	Magas (+1)	230	80	0,3

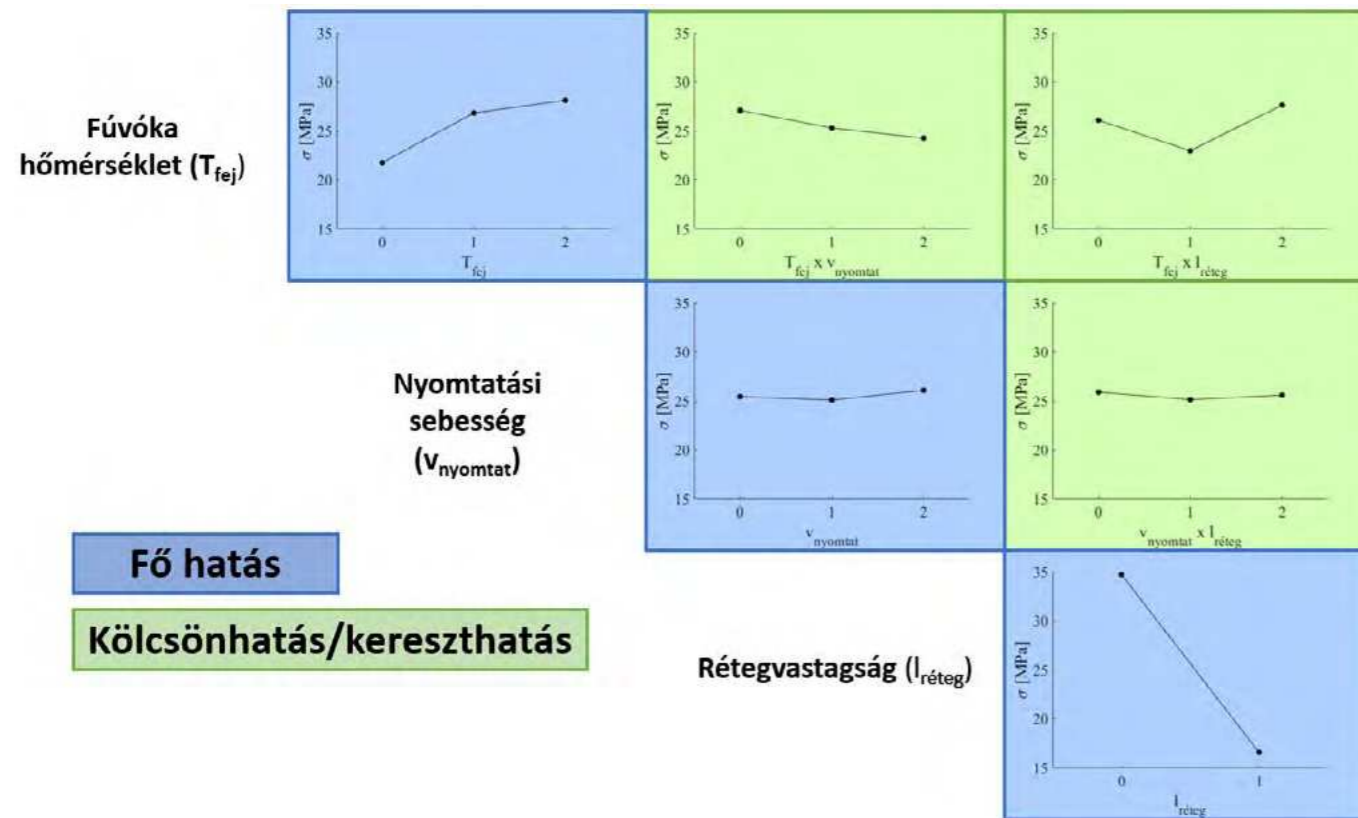
A rétegek közötti hegedés vizsgálatához az MSZ EN ISO 527 szabvány 5A típusú próbatestgeometriát használtuk. A függőleges orientációban gyártott próbatesteken húzóvizsgálatokat végeztünk. A minták gyártása két lépcsőben valósult meg, előgyártmányként egy 79x79x80 mm méretű dobozt alkalmaztunk 2 mm-es falvastagsággal, amelyből második lépésként vízvágással munkáltuk ki a szabványos próbatesteket. Az előgyártmány használata azért előnyösebb a direkt próbatestgyártásnál, mert így sokkal stabilabb a gyártási folyamat, illetve egy rétegen belül a nyomtatási sebesség is állandó értéken tartható.

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. FŐHATÁSOK ÉS KÖLCSÖNHATÁSOK VIZSGÁLATA

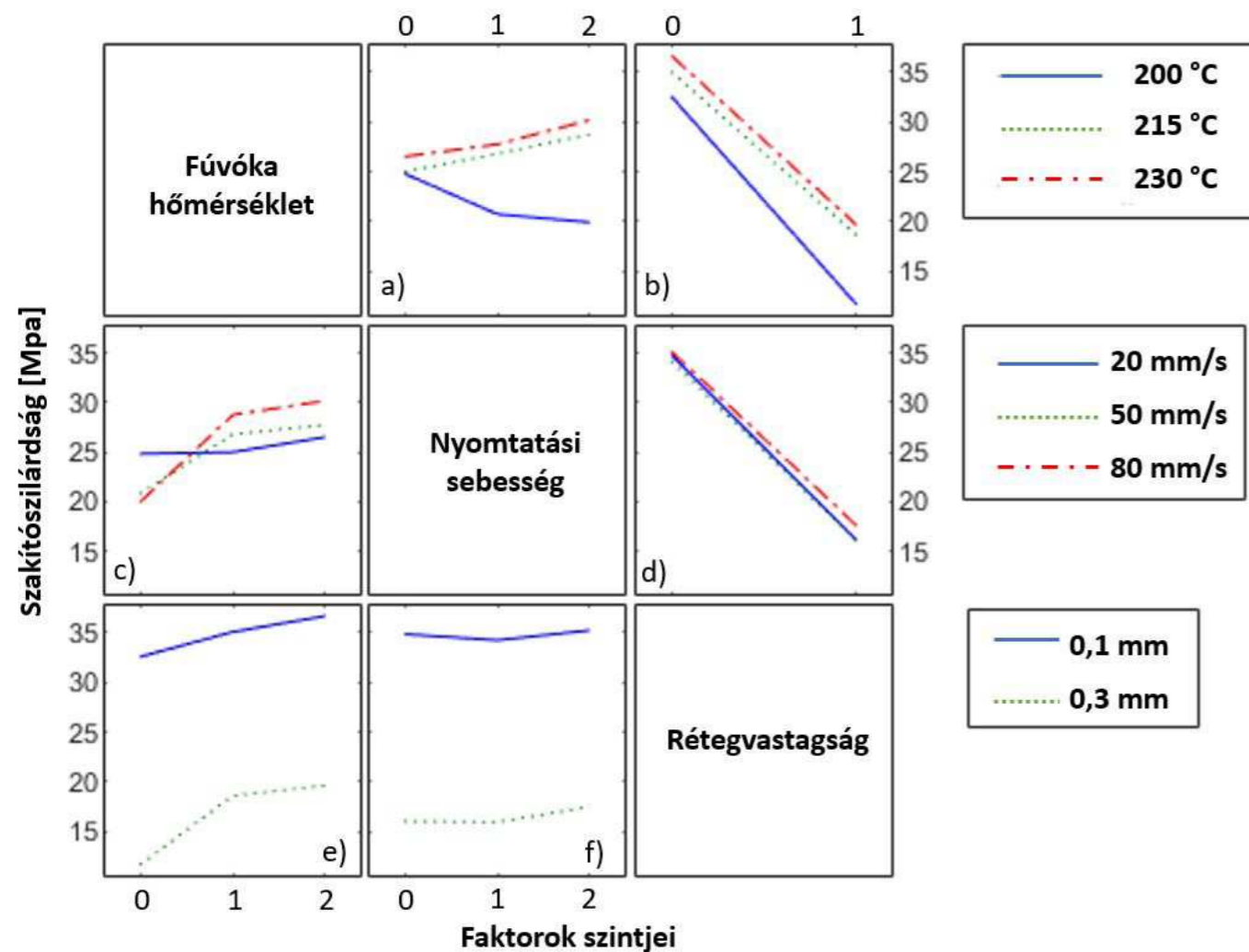
Ebben a fejezetben a húzóvizsgálat eredményeire alapozva fogjuk bemutatni az általunk vizsgált gyártási paraméterek rétegek közötti szakítószilárdságra gyakorolt hatását. Részletesen elemezzük az egyes tényezők főhatásait, illetve az alkalmazott paraméterek kölcsönhatásait is.

A főhatások elemzéséhez vizsgáljuk meg a 3. ábra úgynevezett főhatásábráit (ezeket kék háttérrel jelöltük). Az ábrák vízszintes tengelyén mindig az adott változó szintjei jelennek meg (a szintek számszerű értékeit az 1. táblázat tartalmazza), míg a függőleges tengelyen az összes, adott rögzített paraméterhez tartozó szakítószilárdsági értékek átlaga látható. Ennek az ábrázolási módszernek a célja, hogy láthatóvá váljon egy-egy paraméter önálló hatása, függetlenül attól, hogy a többi paraméter hogyan változik. A 3. ábrán jól látható, hogy a három paraméter közül legnagyobb hatása a rétegvastagságnak van, növelésével csökkennek a szakítószilárdsági értékek. A rétegvastagsággal ellentétben a nyomtatási sebesség hatása minimális, míg a fúvókahőmérséklet hatása a főhatás ábra alapján meglehetősen nagy. Láthatjuk, hogy a fúvókahőmérséklet emelésével növekszik az átlagos szakítószilárdság, azonban a tendenciában egy törés figyelhető meg, ami arra enged következtetni, hogy a magasabb hőmérsékletszinten csökken a hatás intenzitása.



△ 3. ábra: Az egyes paraméterek főhatásai és kölcsönhatásai

▽ 4. ábra: Fő- és kölcsönhatások, összesített ábra



A főhatások mellett a kölcsönhatások (más néven kereszt-hatások) is fontos szerepet játszanak a technológia elemzésében. A kölcsönhatások jellegéről és mértékéről a kölcsönhatás ábrák hordoznak információt. Amennyiben ezeken az ábrákon a pontok közel vízszintes egyenest alkotnak, az azt jelzi, hogy a két paraméter egymásra hatása nem befolyásolja a mért jellemző változását. Ennek fényében a nyomtatási sebesség és a rétegvastagság között szinte egyáltalán nem fedezhető fel kölcsönhatás, a nyomtatási sebesség és a fúvókahőmérséklet esetén észlelhetünk kisebb mértékű kölcsönhatást, míg a fúvókahőmérséklet és a rétegvastagság kölcsönhatása nem elhanyagolható.

A kölcsönhatások mélyebb megértéséhez vizsgáljuk meg az eredményeket kicsit részletesebben (4. ábra). A táblázat egyes mezői a sorban és oszlopban megjelenített változók alapján mutatják a szakítószilárdsági értékek átlagát, méghozzá oly módon, hogy a vízszintes tengelyen az adott oszlop változója látható, míg az adott sor paramétere külön szintekben jelenik meg. Itt az egyes görbék pontjai (a korábbiakhoz hasonlóan) az adott paraméterpárhoz tartozó összes beállítás átlagát jeleníti meg. Az ábra mezőit párosával (a főátlóra tükrözve) érdemes vizsgálni a kölcsönhatások megértéséhez.

A kiértékelést a nyomtatási sebesség és a fúvókahőmérséklet vizsgálatával kezdtük. A nyomtatási sebesség függvényében vizsgálva a szakítószilárdságot (4. ábra „a” mező) megállapítottuk, hogy míg a magasabb hőmérséklet szinteken a sebesség növelése a szilárdság növekedését eredményezi, addig kis hőmérséklet szinten ez a hatás teljesen ellentétes. A görbék kiderül, hogy alacsony sebesség mellett az eltérő hőmérséklet szintek elhanyagolható mértékben változtatják meg a szakítószilárdságot (ez onnan látható, hogy ebben a pontban a görbék közel vannak egymáshoz). Növelve a sebességet, a két magasabb hőmérséklet szintet jellemző görbék kis távolságra vannak egymástól és szinte párhuzamosak, ez azt jelzi, hogy ezeken a hőmérséklet szinteken a hőmérséklet megváltoztatása nem eredményez komolyabb hatást. A legkisebb hőmérséklet szintet vizsgálva látható, hogy megváltozik a tendencia, a sebesség növelése itt már csökkenő szilárdságot okoz, tehát a hőmérséklet és a nyomtatási sebesség kölcsönhatásban van egymással, amely az alacsonyabb hőmérséklet szinteken okoz jelentős hatást. Nagyon hasonló megfigyeléseket tehetünk, ha a fúvókahőmérséklet függvényében vizsgáljuk az eredményeket (4. ábra „c” mező). Szembetűnő, hogy a legkisebb sebességszint esetén a szilárdság szinte független a hőmérséklettől (a pontok közelítően vízszintesen helyezkednek el). Nagyobb sebességszinteken viszont a hőmérséklet emelése növeli a szilárdságot. Érdemes kiemelni, hogy a magasabb sebességszinteken a hőmérséklet emelése eltérő mértékű változást okoz (a görbék nem párhuzamosak, inkább széttartóak), illetve magas hőmérsékleten a szilárdság növekedésének mértéke csökken (a tendenciákban törés van, meredekségük csökken).

A nyomtatási sebesség és a rétegvastagság kölcsönhatásának elemzéséhez tekintsük át a rétegvastagság függvényében bekövetkező szilárdságváltozást több nyomtatási sebességszinten (4. ábra „d” mező). A diagramot vizsgálva láthatjuk, hogy az egyenesek párhuzamosak, vagyis mindhárom sebességszinten ugyanakkora hatást kelt a rétegvastagság megváltozása. Megállapítható, hogy a rétegvastagság növelésével nagymértékben lecsökken a szakítószilárdság. Érdekes, hogy a sebességszinttől gyakorlatilag függetlenül alakulnak az eredmények,

ez abból látható, hogy az egyes görbék rendkívül közel vannak egymáshoz. Ez utóbbi megfigyelést az 4. ábra „f” mező is alátámasztja, ugyanis a görbék közel vízszintesek, ami azt jelzi, a nyomtatási sebesség ebben a tekintetben nem okoz kölcsönhatást. A két görbe jelentős távolsága a rétegvastagság erőteljes hatását szemlélteti.

A fúvókahőmérséklet és a rétegvastagság kölcsönhatásának elemzését a 4. ábra „b” mező vizsgálatával kezdtük. Az ábrán látható, hogy a görbék jellege közel azonos, meredekségük negatív (tehát a rétegvastagság növelésével csökken a szakítószilárdság) és magasabb hőmérsékleteken közel párhuzamosak egymással. A közepes és magas hőmérsékletre tartozó egyenesek közti távolság kicsi, azonban az alacsony hőmérsékletre tartozó egyenes ezektől viszonylag távol helyezkedik el, továbbá a másik két egyenessel nem párhuzamos. Ebből arra lehet következtetni, hogy a hőmérséklet szint megváltoztatása nem befolyásolja a rétegvastagság hatásának jellegét, viszont annak erősségét igen. Ez azt jelenti, hogy alacsonyabb hőmérsékleten a rétegvastagság hatása jelentősebb, mint a magasabb hőmérsékletek esetében, bár ott is jelentős ez a hatás. Ezeket a jelenségeket a 4. ábra „e” mezője is jól szemlélteti: a két görbe meglehetősen távol van egymástól (a két rétegvastagság szint távolsága a rétegvastagság intenzív hatását mutatja), illetve azt is láthatjuk, hogy a hőmérséklet növelése a szilárdság növekedését eredményezi. Fontos kiemelni, hogy kis rétegvastagság esetén a hatás lineáris, míg nagy rétegvastagságnál a tendenciában egy töréspont figyelhető meg, vagyis magasabb szinteken a hőmérséklet emelésére bekövetkező szilárdságnövekedés mértéke lecsökken.

A fentiekben ismertetett hatásokat a rétegek közötti hegedést leíró elmélettel és a szakirodalommal párhuzamba állítva megállapítható, hogy eredményeink egybevágnak a korábban ezen a téren végzett kutatások eredményeivel. Kísérletsorozatunk segítségével ezenfelül bizonyítottuk, hogy a nyomtatási sebességnek nincs jelentős főhatása, azonban a többi paraméterrel alkotott kölcsönhatása miatt nem elhanyagolható.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kísérleteink során vizsgáltuk a nyomtatási sebesség, fúvókahőmérséklet és a rétegvastagság gyártási paraméterek hatását több, az első két paraméternél 3, az utolsó paraméternél 2 szinten. A hatásvizsgálatokhoz szakító próbatesteket gyártottunk, amelyeken építési irányban szakítóvizsgálatokat végeztünk. A kapott szakítószilárdsági értékekre alapozva minősítettük az egyes paraméterek rétegek közötti kapcsolatokra gyakorolt hatását. A kiértékelés során vizsgáltuk a főhatásokat, így megállapítottuk, hogy a rétegvastagság növelésével jelentősen csökken a rétegek közötti kapcsolat erőssége, a fúvókahőmérséklet emelése növeli a rétegek közötti szilárdságot (a szakítószilárdságra gyakorolt hatás erőssége magasabb hőmérséklet szinteken csökken), illetve a nyomtatási sebesség nem mutat jelentős főhatást (ezek az eredmények összhangban vannak a szakirodalommal). A kölcsönhatásokat vizsgálva megállapítottuk, hogy a fúvókahőmérséklet mind a nyomtatási sebességgel, mind a rétegvastagsággal kölcsönhatást vált ki, a nyomtatási sebesség és a rétegvastagság között viszont nem jelentkezik kölcsönhatás. Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a lehető legnagyobb rétegek

szilárdság elérése érdekében célszerű magas hőmérsékletet és kis rétegvastagságot alkalmazni. Bár a nyomtatási sebesség nem okoz kiemelkedő főhatást, eredményeinkre alapozva egyértelmű, hogy a kölcsönhatások miatt fontos szereppel bír, értékét a kísérleteink alapján célszerű nagyra választani.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336 és K 138472) pályázata támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Osswald, T. A.; Puentes, J.; Kattinger, J.: Fused filament fabrication melting model. *Additive Manufacturing*, 22, 51-59 (2018).
- [2] Gao, X.; Qi, S.; Kuang, X.; Su, Y.; Li, J.; Wang, D.: Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. *Additive Manufacturing*, 37, 11658 (2021).
- [3] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: *Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Second edition, Springer (2015).
- [4] Mclroy, C.; Olmsted, P. D.: Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. *Polymer*, 123, 376-391 (2017).
- [5] Costanzo, A.; Spotorno, R.; Candal, M. V.; Fernandez, M. M.; Muller, A. J.; Graham, R. S.; Cavallo, D.; Mclroy, C.: Residual alignment and its effect on weld strength in material-extrusion 3D printing of polylactic acid. *Additive Manufacturing*, 36 (2020).
- [6] Coogan, T. J.; Kazmer, D. O.: Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35 (2020).
- [7] Yang, F.; Pitchumani, R.: Nonisothermal healing and interlaminar bond strength evolution during thermoplastic matrix composites processing. *Polymer Composites*, 24, 263-278 (2003).
- [8] Srinivas, V., van Hooy-Corstjens, C. S.; Harings, J. A.: Correlating molecular and crystallization dynamics to macroscopic fusion and thermodynamic stability, in fused deposition modeling: a model study on polylactides. *Polymer*, 142, 348-355 (2018).
- [9] Wang, S-Q.: Nonlinear rheology of entangled polymers at turning point. *Soft Matter*, 11, 1454-1458 (2015).
- [10] Snijkers, F.; Pasquino, R.; Olmsted, P. D.; Vlassopoulos, D.: Perspectives on the viscoelasticity and flow behavior of entangled linear and branched polymers. *Condens. Matter*, 27 (2015).
- [11] Tóth, Cs.; Kovács, N. K.: Comparison of the accuracy of analytical models for basalt fiber-reinforced poly(lactic acid) composites prepared by injection molding and fused filament fabrication. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 3999-4010 (2022).
- [12] Jatti, V. S.; Jatti, S. V.; Patel, A. P.; Jatti, V. S.: A Study On Effect Of Fused Deposition Modeling Process Parameters On Mechanical Properties. *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 8, 689-693 (2019).
- [13] Vicente, C. M.; Martins, T. S.; Leite, M.; Ribeiro, A.; Reis, L.: Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts. *Polym. Adv. Technol.*, 31, 501-507 (2020).
- [14] Syrlybayev, D.; Zharylkassyn, B.; Seisekulova, A.; Akhmetov, M.; Perveen, A.; Talamona, D.: Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts - A Critical Review. *Polymers*, 13, 1587 (2021).
- [15] Shubham, P.; Sikidar, A.; Chand, T.: The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. *Key Engineering Materials*, 706, 63-67 (2016).
- [16] Allum, J.; Gleadall, A.; Moetazedian, A.; Silberschmidt, V. V.: The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. *Additive Manufacturing*, 34, (2020).
- [17] de Paiva Cota, F.; Panzera, T. H.; Schiavon, M. A.; Christoforo, A. L.; Ribeiro Borges, P. H.; Bowenc, C.; Scarpa, F.: Full Factorial Design Analysis of Carbon Nanotube Polymer-Cement Composites. in *Materials Research* 15 (4), 573-580 (2012).
- [18] de Aguiar, K. L. N. P.; Pereira, K. A. B.; Pedrosa, M. S.; e Silva Neves, M. A. N.: Factorial design to obtain magnetized poly(ethyl acrylate co-divinylbenzene). *Polimeros*, 29 (2) (2019).
- [19] Barghash, M. A.; Alkaabneh, F. A.: Shrinkage and Warpage Detailed Analysis and Optimization for the Injection Molding Process Using Multistage Experimental Design. *Quality Engineering*, 26, 319-334 (2014).
- [20] Babcock, L. M.; Altekár, M.: Use of statistical design to develop flame retardant polymer formulations. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 29, 141-146 (1995).

Tekints a jövőbe!

HUNGEXPO



2023. május 16-19.



IPAR NAPJAI Nemzetközi ipari szakkiallítás

Társrendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiallítás

Látogasson el Ön is Magyarország legnagyobb és legjelentősebb üzleti eseményére és találkozójára az iparban! Tekintse meg a széles kiállítói kínálatot, vegyen részt a szakmai programokon!

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ



Látogatók részére előzetes online regisztráció az ingyenes belépésért:
www.iparnapjai.hu/polimerek

Töltse le a HUNGEXPO applikációt és tájékozódjon könnyen és egyszerűen a programokról és a helyszíni tudnivalókról!

Bővebb információ: www.iparnapjai.hu