

In-situ habképzéssel előállított biopolimer kompozitok additív gyártástechnológiája

Additive manufacturing technology for in-situ foaming of biopolymer composites

LUKÁCS Norbert László¹, Dr. KOVÁCS Norbert Krisztián², TÓTH Csenge³

1. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 5, MT épület, lukacs@pt.bme.hu
2. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 5, MT épület, kovacs@pt.bme.hu
3. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 5, MT épület, tothcs@pt.bme.hu

Abstract

With the evolution of extrusion-based (MEX) additive manufacturing technologies, such as Fused Deposition Modelling (FDM) additive manufacturing, available devices can now use multiple materials in a single production run. The different materials together open up new possibilities in component design: for example, some printed objects may be made of flexible materials, while others may be made of lightweight foam or reinforced composite materials.

Keywords: in-situ foaming, additive manufacturing, FDM technology, composites

Kivonat

Az extrúzió alapú (MEX) additív gyártástechnológiákkal, például a Fused Deposition Modeling (FDM) additív gyártástechnológia fejlődésével ma már a rendelkezésre álló berendezések akár több alapanyagot is fel tudnak használni egy gyártáson belül. A több anyag együttes felhasználása új lehetőségeket nyit az alkatrésztervezésben: például a nyomtatott tárgyak egy része lehet rugalmas anyagból, míg más helyeken könnyített habos, vagy erősített kompozit anyagok kerülhetnek felhasználásra.

Kulcsszavak: in-situ habképzés, additív gyártás, FDM technológia, kompozitok

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, azonban az elmúlt években tapasztalható ugrásszerű fejlődés miatt ma már többkomponensű, több alapanyagból álló összetett modellek gyártása is megoldható költséghatékonyan, ezért kutatásunk során kompozitok és habok 3D nyomtatással való társíthatóságát vizsgáltuk. A kompozit alapanyagok és in-situ habosodó alapanyagok együttes felhasználásával akár szendvicsszerkezeteket is előállíthatunk. Szendvicsszerkezetek alkalmazására az ipar több területén is található példák. Fő ismervük a rendkívül nagy fajlagos szilárdságuk, energiaelnyelő képességük, kis súlyuk és nagy fokú variálhatóságuk az egyes speciális esetekre. Egy általános szendvicsszerkezet leírható két külső héjréteg, valamint egy középső, sok esetben könnyű mag által alkotott szerkezetként.

Az összetett magszerkezetek gyártása hagyományos gyártástechnológiákkal, mint a melegsajtoltásos formázás (hot-press molding) drága és hosszadalmas lehet, hiszen a magszerkezet, valamint a héjrétegek külön, több lépésben készülnek el [1]. A szendvicsszerkezetek tulajdonságainak meghatározására legtöbbször nyomó, hárompontos hajlító valamint ejtődárdás vizsgálatokat alkalmaznak.

A szendvicsszerkezetek tulajdonságai nagyban függhetnek a gyártástechnológiától is. Aneta és társai [2] az alkalmazott gyártástechnológiának a hajlítószilárdságra gyakorolt hatásait vizsgálták. Munkájukban kézi laminálással, préseléssel és autoklávus eljárással készült minták mechanikai tulajdonságait vetették össze.

Eredményeik alapján a leggyengébb hajlítoszilárdsággal a kézi laminálással előállított minták rendelkeztek, amíg az autoklávban elkészült minták minden esetben felülmúlták a többit.

Az additív gyártással előállított szendvicsszerkezetek egyik előnye lehet, hogy emberi beavatkozás, emberi munka hiányában számos hibalehetőséget kiküszöbölhetünk, valamint mind a héjszerkezet, mind a maganyag mintája és kitöltése is a felhasználáshoz igazítható, akár lokálisan megerősíthető vagy módosítható lehet. Az extrúzió alapú technológiák használata során azonban számos hibalehetőség van jelen, például a nyomtatott tárgyak vetemedése, amely a kritikus esetben a nyomtatott tárgynak tárgyasztaltól való elválását okozhatja nyomtatás közben ezzel meghúsvítva a gyártást. Ennek a problémának a kiküszöbölésére a 3D nyomtatott in-situ habszerkezetek megoldást jelenthetnek. Dileep és társai [3] HDPE alapanyag felhasználásával állítottak elő szintaktikus hab maggal rendelkező szendvicsszerkezeteket 3D nyomtatással. Kutatásukhoz saját maguk állították elő a filamentet. A héjszerkezethez töltetlen HDPE alapanyagból készült filamentet használtak, míg a magszerkezet 20-40-60 tömegszázalék üveg mikrogyöngyöt tartalmazó HDPE filament felhasználásával készült. Az üveggyöngyök jelenléte miatt a HDPE alapanyag egyébként szignifikáns vetemedése csökkent a nyomtatás során, amely tulajdonság más nagy vetemedésre hajlamos alapanyagoknál is felhasználható lehet.

2. FELHASZNÁLT BERENDEZÉSEK ÉS ALAPANYAGOK

A próbatetek előállításához egy Original Prusa I3 MK3S+ nyomtatót és a hozzá kapcsolt MMU3 (Multi Material Unit 3) berendezést használtuk (1. ábra). Az MMU3 berendezés lehetővé teszi, hogy a próbatetek és alkatrészek gyártása során több különböző alapanyagot is felhasználjunk. A próbatetek nyomtatásához a gyári „Original Prusa i3 MK3S&MK3S+ + MMU 0.6 nozzle” beállításokat, valamint a gyári „0.2mm DETAIL” profilt használtam, azonban a kitöltöttség értékét 100%-ra és „Rectilinear” mintára állítottuk, ahol a kitöltési minta $\pm 45^\circ$ volt. A körvonalak száma 2 volt, míg a rétegmagasság minden réteg esetében 0,2 mm volt.



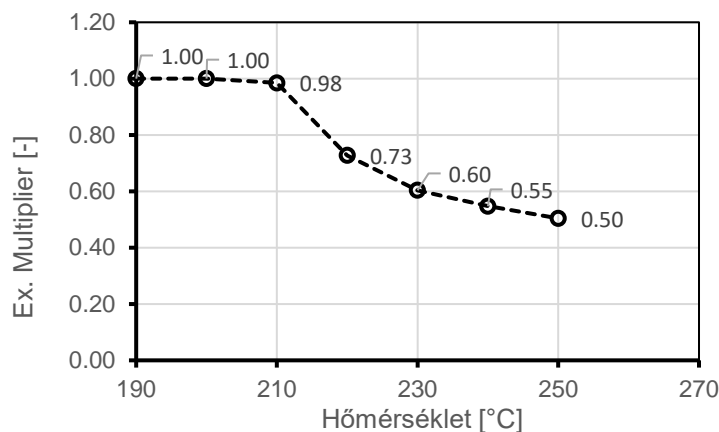
1. ábra Original Prusa I3 MK3S+ nyomtató az MMU3 egységgel [4]

A próbateteket többféle anyagból állítottuk elő: a referencia alapanyagok NatureWorks Ingeo 4060D PLA-ból készült nyomtatószálból, míg a szénszálalás kompozit alapanyagok ugyan ebből a mátrixanyagból, valamint 10 m% Zoltek PX35 Type 48 vágott szálból álltak. Az in-situ habosodásra képes alapanyag a Colorfabb által gyártott LW-PLA volt. A saját gyártású filament alapanyagának kompaundálását egy LabTech Engineering Co., Ltd-től származó LTE 26-44 típusú ikercsigás extruder segítségével végeztük el. A filamentek elkészítésében a Polimertechnika Tanszék 3Devo Precision 450-es filament extrudere volt a segítségünkre. A próbatetek hajlítóvizsgálatát egy Zwick Z050-as szakítógéppel, valamint az ehhez tartozó négyponos hajlítóvizsgálatot lehetővé tevő feltétellel végeztük el. A próbatetek ejtődárdás vizsgálatát egy Ceast Fractovis 9350 ejtőművel végeztük.

A gyártott hajlító próbatetek megfeleltek az ISO/R 178 szabványnak, befoglaló méretei 80x10x4 mm, a próbatetek alátámasztási távolsága 66 mm volt, a felső nyomófejek távolsága pedig 22 mm. Az ejtődárdás vizsgálattal a próbatetek energialeNyelő képességét határozhatjuk meg. A méréshez 80x80x4 mm-es próbateteket használtunk, az alkalmazott dárda terhelhetősége 22 kN volt. A dárдавég átmérője 20 mm volt.

A vizsgálatok elvégzéséhez meg kellett vizsgálni, hogy a felhasznált berendezésen milyen módon függ az LW-PLA habosodása a nyomtatási hőmérséklettől. Az LW-PLA filament habosodási jellemzőinek

vizsgálata azért fontos, mert a habosodással járó térfogatváltozást a szeletelőszoftverben kompenzálni kell. Ehhez a habosodásvizsgálathoz szakirodalom nem áll rendelkezésre, azonban a 3D nyomtatás folyamatosan növekvő közösségén belül több módszer is megtalálható. Az alkalmazott módszer lényege, hogy 20x20x20 mm-es, egyetlen fallal nyomtatott kockákat nyomtatunk különböző hőmérsékleten, majd ezek falvastagságának összehasonlításával megkapjuk a töltetlen filamenttől való eltérést. A filament habosodásának kompenzáció az „extrusion multiplier” (extrúziós együttható) beállítás módosításával történik, melynek gyári értéke 1.00. Ez a technológiai paraméter megadja, hogy az egyes esetekben a gyári kalibrált értéknél mennyivel szükséges több vagy kevesebb anyagot adagolnia a nyomtató extruderének (2. ábra).

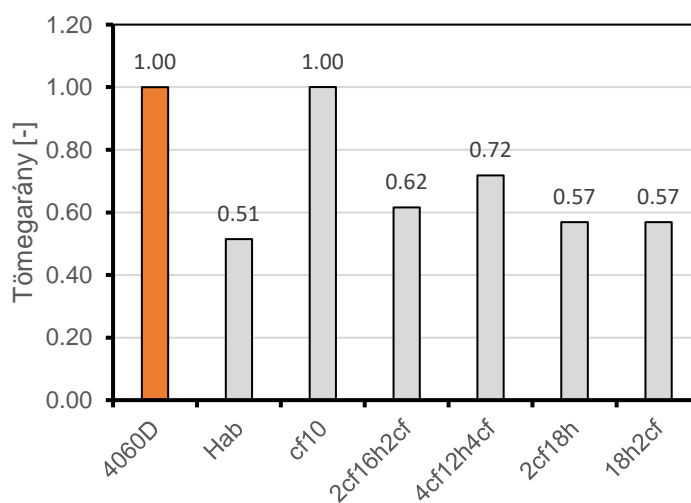


2. ábra A habosodó filament sűrűségének változása a nyomtatási hőmérséklet függvényében

Az egyes gyártott próbatest típusokat a következő módon neveztük el:

- 4060D: a kiinduló (referencia) alapanyag,
- CF10: 10% szénszálat tartalmazó alapanyag,
- Hab: 50%-os kitöltöttségű habszerkezet,
- 2CF16H2CF: 2-2 szénszálalás héjréteget és 16 réteg habmagot tartalmazó próbatest,
- 4CF12H4CF: 4-4 szénszálalás héjréteget és 12 réteg habmagot tartalmazó próbatest,
- 2CF18H: 2 szénszálalás héjréteget és 18 habréteget tartalmazó próbatest,
- 18H2CF: 18 habréteget és 2 réteg szénszálalás hátfalréteget tartalmazó próbatest.

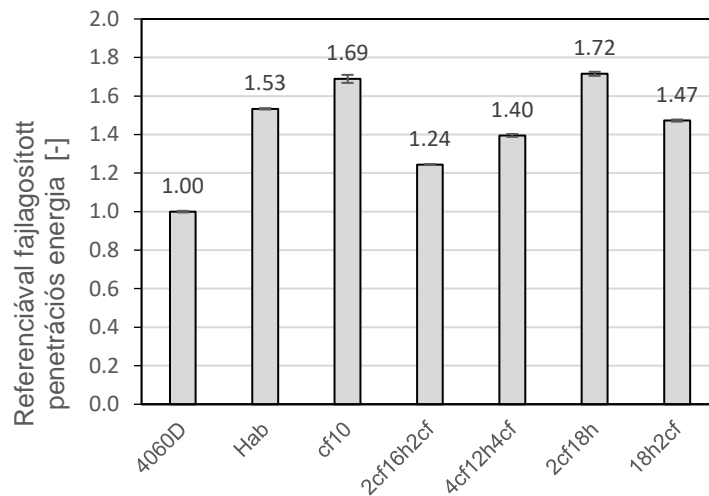
Az elkészült próbatestek tömegét megmértük, és a referencia 4060D mintához viszonyítottuk (3. ábra)



3. ábra Az elkészült próbatestek tömegaránya

3. EREDMÉNYEK

Ha a kapott perforációs energia értékeket elosztjuk az erősítetlen (4060D) minták perforációs energia értékével, akkor megkapjuk, hogy a vizsgált szerkezetek milyen mértékben javították vagy épp rontották az értékeket (**4. ábra**).



4. ábra Az egyes próbatetek által elnyelt energia a penetrációs vizsgálat során

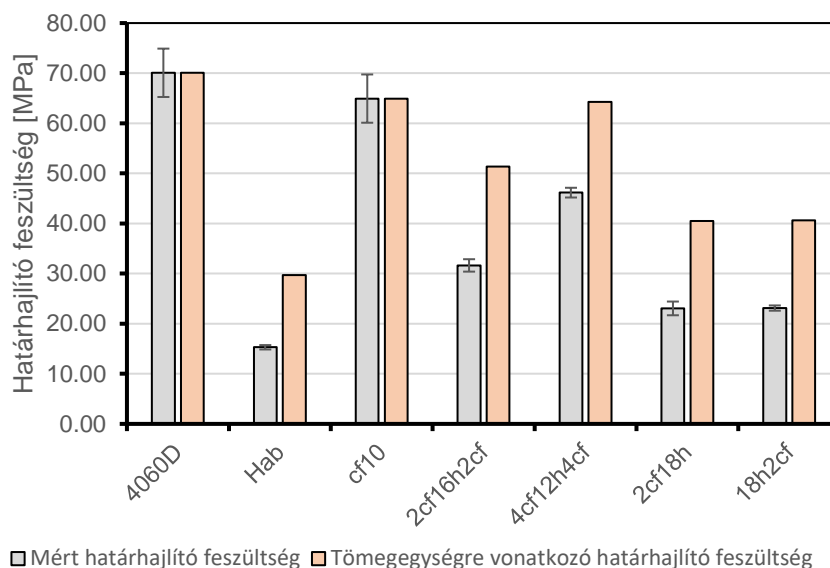
Az eredmények alapján a legjobb fajlagos energiaelnyeléssel a 2CF18H minta rendelkezett, ahol a legfelső két szénszárléteget kivéve csak habrétegek kerültek alkalmazásra. Ezeknél a mintáknál előfordult, hogy a teljes átszakadást követően a szakadt részek nem váltak le teljesen a próbatestről, azok több réteggel továbbra is kapcsolódtak hozzá. Hasonló energiaelnyeléssel, de más törési felülettel rendelkeztek a CF10 minták. A tönkremenetelt vizsgálva megállapítható, hogy a CF10 minták esetében az átszakadás minden esetben teljes volt, azonban a töretfelület nem a 2CF18H mintához a felületen nem mutatkoztak a megnyúlás jelei, hanem a rétegről rétegre való, a rétegek közötti rideg kitöredezés jelent meg.

A hajlítóvizsgálatokat tönkremenetelig vagy addig végeztük, amíg a hajlító feltét geometriája ezt ütközés nélkül lehetővé tette, azonban az eredmények kiértékelése a szabványos mérési tartományon történt. A referencia minták közül a vizsgált tartományon egyik sem szenvedett katasztrofális tönkremenetelt. A tisztán hab minták rendelkeztek a legkisebb hajlítószilárdsággal és tömegarányosan nézve sem volt számottevő a szilárdságuk. A CF10 minták hajlítószilárdsága nem tért el szignifikánsan a referenciaanyagétól, azonban a modulus 13,83 MPa-ról 20,15 MPa-ra növekedett átlagosan, ami körülbelül 45%-os erősítést jelent. A CF10 mintáknál több esetben is előfordult rideg törés, ahol jól elkülöníthető volt a keresztmetszet szívós és rideg törést szenvedett területe (**5. ábra**).



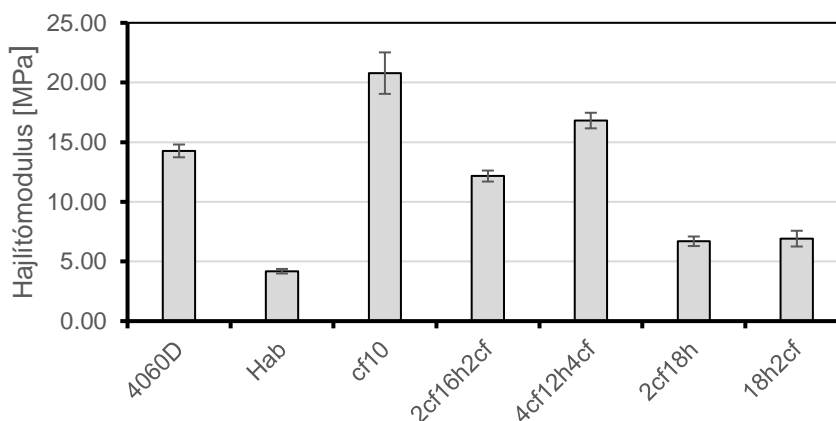
5. ábra A CF10 minta törési felülete

A minták határhajlító feszültségeire vonatkozó adatokat a **6. ábra** tartalmazza. Látható, hogy ha a minták határhajlító feszültségét elosztjuk azok tömegarányával, akkor nagyban megváltozik a diagram jellege. Tömegarányra levetítve a 4cf12h4cf minta megközelíti a 4060D és CF10 anyagok mechanikai tulajdonságait (62,33 MPa), de a minta tömege a referenciaminta tömegének csak a 72%-a.



6. ábra Az egyes minták határhajlító feszültsége

Amennyiben megvizsgáljuk a minták hajlítómódusát láthatjuk, hogy a legnagyobb értékkel a CF10 minta rendelkezik, míg ettől némileg elmarad a 4cf12h4cf minta. A referencia, valamint a nagyobb habarányal rendelkező minták modulus értékei jelentősen elmaradtak ezekétől (7. ábra).



7. ábra Az egyes minták hajlítómódulusa

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt években a többkomponensű extrúzió alapú 3D nyomtatás nagy fejlődésen ment keresztül, ma már néhány száz dollártól vásárolhatók olyan berendezések, amik akár 16 színt vagy anyagot is képesek egy gyártáson belül felhasználni. Ezekkel a rendszerekkel helyes tervezési irányelveket követve megoldható az anyagok kombinálása.

Kutatásunk célja, hogy a kereskedelmi forgalomban elérhető és az általunk létrehozott alapanyagokkal kombinálva megvizsgáljuk a több komponensű extrúzió alapú additív gyártásban rejlő lehetőségeket. Kutatásunkban átfogó szakirodalomkutatást végeztünk a 3D nyomtatható szendvicsszerkezetek területén. A habszerkezet alkalmazása növeli az energiaelnyelő képességet, amíg a szálerősített kompozit héj merevséget és szilárdságot biztosít; kevés kutatásban készítették ilyen szendvicsszerkezeteket 1 lépésben. Célunk ennek megvalósítása volt, illetve az 1 lépésben gyártott kompozit szendvicsszerkezetek mechanikai jellemzőinek vizsgálata a rétegtrend és a rétegvastagság függvényében. Megvizsgáltuk a piacon elérhető alapanyagokat és a kutatásunkhoz a piacon elérhető, a gyártási paramétereiktől függően habosodó alapanyaggal és saját készítésű, 10 m% szénszálat tartalmazó alapanyaggal, valamint az FDM gyártástechnológia legújabb módszereit felhasználva egy nyomtatófejjel rendelkező 3D nyomtatóval többkomponensű szendvicsszerkezeteket gyártottunk. Referenciaanyagként a szénszálas alapanyag mátrixanyagát használtunk fel (PLA 4060D), valamint megvizsgáltuk a habszerkezet és a szénszálas alapanyag önálló tulajdonságait is. Az elkészült

próbatesteket hajlító és ejtődárdás vizsgálatoknak tettük ki. Az eredmények alapján elmondható, hogy az FDM technológia alkalmas lehet könnyű, több komponensű szendvicsszerkezetek gyártására, az egyes alapanyagokat egymás mellett használva azok tulajdonságait a hagyományos kompozitokhoz hasonlóan kombinálhatjuk. Eredményeink alapján részben habosodó filamenttel gyártott modellek esetén akár 30%-os súlycsökkentést is elérhetünk úgy, hogy a fajlagos mechanikai tulajdonságok nem csökkennek számottevően. A többkomponensű extrúzió alapú 3D nyomtatással egyedi tervezésű, tömegcsökkentett energiaelnyelő szerkezetek hozhatók létre, amelyek egy lépésben gyárthatóak és újrahasznosíthatóak vagy lebomlók, lebonthatók lehetnek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Bartók Györgynek a labormunkában nyújtott segítségéért. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-III-BME-293 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-II-BME-140 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-466 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A kutatás Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

A kutatás az OTKA FK134336 számú projekt keretein belül, a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zhenzu Wang, Yaohui Wang, Jian He, Ke Dong, Gouquan Zhang, Wenhao Li, Yi Xiong: *Additive Manufacturing of Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composite Sandwich Structures with Multiscale Cellular Cores*. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers 2 (2023)
- [2] Aneta Krzyzak, Michal Mazur, Mateusz Gajewski, Kaizmierz Drozd, Andrzej Komorek, Pawel Przybylek: *Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties*. International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7816912>
- [3] Dileep Bonthu, H.S. Bharath, Suhasini Gururaja, Pavana Prabhakar, Mrityujay Doddamani: *3D printing of syntactic foam cored sandwich composite*. Composites Part C: Open Access 3 (2020) 100068