

# Új gyártástechnológia kifejlesztése folytonosszál-erősítéses, hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitokhoz

## Development of a Novel Hybrid Manufacturing Technology for Continuous Fiber-Reinforced Thermo-Plastic Composites

Tóth Csenge,<sup>1</sup> Kovács Norbert Krisztián<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország

<sup>2</sup> MTA–BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország, kovacsnp@pt.bme.hu

### Abstract

In this study, we present a novel approach for the production of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites by combining injection molding and additive manufacturing. After exploring the design requirements, we manufactured inserts via continuous fiber-reinforced 3D printing, then we used them as reinforcement for injection-molded samples. Improper fiber placement can cause warpage as the continuous fibers prevent shrinking; however, warpage can be compensated with the insert geometry. The reinforcement resulted in an increase of about 30% in the properties tested.

**Keywords:** *additive manufacturing, injection molding, fiber-reinforced polymer composite.*

### Összefoglalás

Munkánkban egy új, hibrid eljárást mutatunk be folytonos szál, fröccsöntött kompozitok előállítására. Szál-erősített betéteket készítettünk 3D-s nyomtatással, majd ezekre polimer mátrixanyagot fröccsöntöttünk. A befroccsöntött polimer ömledék áramlását és a gyártási paraméterek (kiemelten a szerszámhőmérséklet) hatását fröccsöntési szimulációkkal ellenőriztük. Kísérleteinkkel bemutattuk, hogy aszimmetrikus szálelhelyezés esetén az erősítőszálak és a polimer zsugorodása közti különbség vetemedést okoz. A vetemedés kompenzálását követően 30%-os növekményt értünk el a fröccsöntött kompozitok hajlítószilárdsága és modulusa esetén az erősítetlen referenciához képest.

**Kulcsszavak:** *additív gyártás, fröccsöntés, folytonos szálak kompozit.*

### 1. Bevezetés

A hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitok fejlődő iparágának kiemelt szegmense a 3D-s nyomtatás. Az additív gyártás előnye, hogy a termékben kialakuló szálorientáció akár több irány mentén is, rétegenként tervezhető [1]. A nyomtatott kompozitok mechanikai tulajdonságai azonban még elmaradnak a hagyományos (nem hőre lágyuló műanyag mátrixú) szerkezetektől, továbbá a 3D-s nyomtatás termelékenysége is inkább a

kisszériás gyártást, mintsem a tömeggyártást támogatja [2, 3].

A tömeggyártás tekintetében a fröccsöntés vezető szerepe megkérdőjelezhetetlen. A fröccsöntött kompozitok körében a rövidszálak anyagok dominálnak, bár már számos olyan technológiai fejlesztésről számoltak be a szakirodalomban, amelyek a szálhossz növelését célozták meg [4, 5]. A kívánt mechanikai tulajdonságok eléréséhez a szálhossz mellett a megfelelő szálorientációt is biztosítani kell. Fröccsöntés esetén a szálak irá-

nyát az ömledékáramlás alakítja ki, ez azonban kevés esetben azonos a várható igénybevételi irányokkal [6, 7]. Felmerült tehát az igény olyan technológiai fejlesztésre, amely által a fröccsöntött kompozitok szálorientációja tervezhetővé és szabályozhatóvá válik.

Folytonos erősítőszálak alkalmazására is vannak már példák fröccsöntés esetén [8, 9]. A folytonos szálal előgyártmányt (jellemzően előimpregnált lemezek vagy textíliák, vagy akár nem hőre lágyuló mátrixú kompozitok [10]) a szerszámba helyezik, majd erre fröccsöntik rá a mátrixanyagot [11, 12]. A folytonos szálal előgyártmánnyal készült kompozitok szilárdsága és merevsége kimagasló, azonban a geometria bonyolultságának tekintetében az eljárás továbbra is korlátozott.

A 3D-s nyomtatás megoldást jelenthet az említett problémákra. 3D-s nyomtatással egyedi igények szerint tervezett erősítőstruktúrák hozhatók létre, és ezek a termék igénybevételnek kitett részeibe ágyazhatók, ezáltal potenciálisan csökkenthető a termék tömege és a felhasznált erősítőszálak mennyisége is [13].

Ebben a tanulmányban 3D-s nyomtatott kompozitból készült szerkezetek betétként való alkalmazhatóságát vizsgáljuk, fröccsöntött termékek erősítése érdekében. Bemutatjuk a betétek tervezési irányelveit és a hibrid gyártási eljárást lépésről lépésre, majd vizsgáljuk a folytonos szálal tulajdonság-módosító hatásait is.

## 2. Alapanyagok és technológiák

### 2.1. Alapanyagok

A 3D-s nyomtatású betétek mátrixanyaga a Markforged „Tough Nylon” (később „End of life Nylon”) típusú polimer nyomtatószál, amelyet szárítódobozban tárolunk. Az erősítőanyag a Markforged cég folytonos szénszálat tartalmazó nyomtatószála [14], amely 1000 elemi szénszálat tartalmaz [15].

A ráfröccsöntéshez Alphalon 27 típusú, PA6 mátrixanyagot alkalmaztunk a Grupa Azoty ATT Polymers gyártótól [16]. Fröccsöntés előtt szárítószekrényben 80 °C-on, 4 órán át szárítottuk a granulátumot a feldolgozáshoz szükséges nedvességtartalom elérése érdekében.

### 2.2. Próbatestek készítése és vizsgálati módszerek

A betéteket Mark Two (Markforged, USA) típusú, ömledékáramlásra alapuló 3D-s nyomtatóval készítettük. A szeletelést a Markforged cég felhőalapú szoftverével végeztük (Eiger). A fő

### 1. táblázat. Nyomatási paraméterek

Paraméter	Érték
Kitöltési mintázat	Tömör
Kitöltési fok	100%
*Kitöltési orientáció	45°
Szálkitöltés mintázata	Koncentrikus
*Fúvókaátmérő	0,4 mm
*Fúvóka-hőmérséklet	270 °C

nyomatási paramétereket az 1. táblázat mutatja, ahol a csillaggal jelölt paraméterek rögzítettek a szoftverben, nem módosíthatók. A mátrixanyagra vonatkozó paraméterek (kitöltési mintázat és a kitöltés foka) kiválasztásánál a célunk tömör szerkezet létrehozása volt, minimális üregtartalommal. Az erősítőszálakat a külső falak mentén, a kontúrral párhuzamosan helyeztük el.

Arra törekedtünk, hogy maximalizáljuk a száltartalmat a lehető legkisebb falvastagság esetén. Így az egyes betétgeometriák száltérfogatának részaránya különbözött. A száltérfogati arányokat az (1) képlet alapján határoztuk meg.

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}, \quad (1)$$

ahol  $V_f$  (cm<sup>3</sup>) a száltérfogat és  $V_c$  (cm<sup>3</sup>) a teljes kompozit térfogata.

A ráfröccsöntés előtt szimulációkat futtattunk az U és a K típusú inzertek esetén, Moldflow (Autodesk, 2016) szoftverrel. A szimulációk célja a betétek körül várható ömledékáramlás vizsgálata volt, továbbá kerestük azt a szerszámhőmérsékletet, amely elméletileg biztosíthatja a polimerek hegedéséhez szükséges körülményeket. A háromdimenziós modelleket Autodesk Inventor Professional (Autodesk, 2020) programmal készítettük, a hálózást pedig Hypermesh (Altair Hyperworks, 2017.1) szoftverrel végeztük.

A fröccsöntött mintákat Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 típusú fröccsöntőgéppel készítettük, 255, 260, 265, 270 °C zónahőmérsékletekkel és 80 °C szerszámhőmérséklettel, 1500 bar nyomással. A paraméterek kiválasztását a szimulációk eredményeire és a gyártói ajánlásokra alapultuk [16].

Kvázi statikus hajlítóvizsgálatot végeztünk Zwick Z005 típusú szakítógéppel, az MSZ EN ISO 178 szabvány [17] alapján, 64 mm alátámasztási távolsággal, 5 mm/min vizsgálati sebesség mellett. Típusonként 5 mintát vizsgáltunk.

### 3. A kompozitbetétek tervezése

#### 3.1. Geometria

Először két, majd egy harmadik típusú betéogeometriát terveztünk a fröccsöntött termékek hajlítási tulajdonságainak javítása érdekében. A követelményeket három fő szempont szerint határoztuk meg, amelyek a nyomtathatóság, a fröccsöntéssel való alkalmazhatóság és a kompozitszerkezet minősége. A 3D-s nyomtatásra vonatkozó irányelveket az alkalmazott berendezés határai és a szeletelőszoftverben rögzített paraméterek határozzák meg. Ilyen jellemzők például a minimális falvastagság, a maximális száltartalom és a rétegvastagság. A fröccsöntéssel való alkalmazhatóság egyrészt a geometriát korlátozza (hiszen a betétet el kell helyezni a szerszámban), továbbá befolyásolja az alapanyag-választást is. A betét mátrixanyaga kompatibilis kell legyen a fröccsöntéshez használt polimerrel, továbbá el kell viselnie a fröccsöntés során fellépő nyomást és nyíróerőket is. Végül a termék minőségét a betét és a fröccsöntött mátrixanyag közti megfelelő hegedéssel kell garantálni, amely a tervezett tönkremenetelig fennáll.

Először tehát két betétet terveztünk (1a–b. ábra), majd az első ráfröccsöntések tapasztalatai alapján egy harmadik geometriát alakítottunk ki, amely az 1c. ábrán látható. Mindegyik típus esetén a hossz tengellyel párhuzamosan helyeztük el az erősítőszálakat, úgy, hogy a húzott vagy a nyomott oldalra essenek, tehát a termék igénybevételnek leginkább kitett részét erősítsék. A betétek szerszámba illesztését a 2. ábra mutatja be. Annak érdekében, hogy a betétek ne essenek ki a szerszámból, szoros illesztést alkalmaztunk. Az egyes geometriák száltérfogati arányait a 2. táblázat foglalja össze.

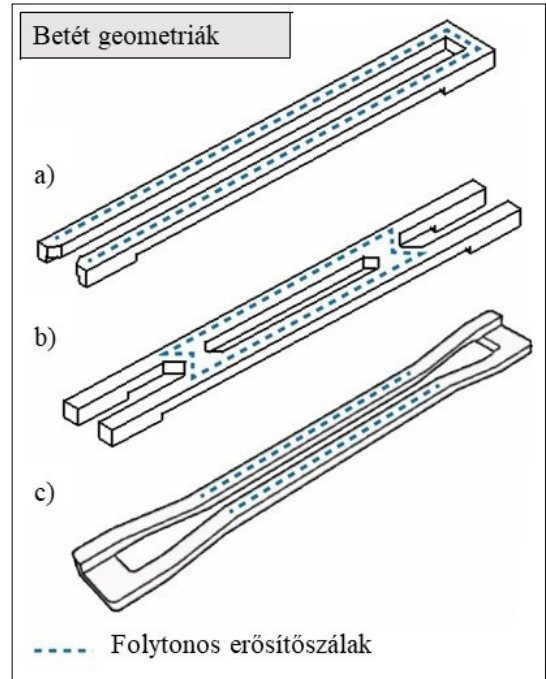
#### 3.2. Fröccsöntési szimulációk

A próbatestek gyártása előtt fröccsöntési szimulációkkal vizsgáltuk az ömledék útját a betétek körül. A szimulációk célja továbbá a különböző szerszámhőmérsékletek hegedésre gyakorolt hatásainak elemzése volt.

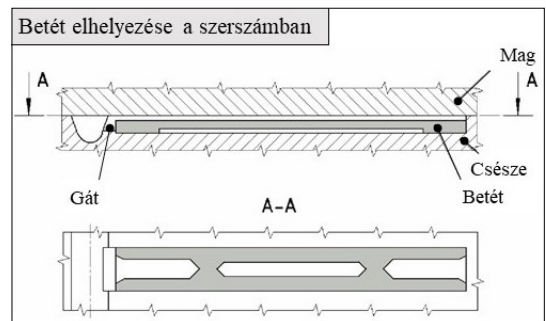
A 3. ábra a betétek visszaolvadt felületeit mutatja különböző szerszámhőmérsékletek esetén. Azt feltételezzük, hogy ha nagyobb a befröccsöntött polimer által megömlesztett felületek aránya a betét falai mentén, akkor potenciálisan jobb hegedés érhető el a mátrixanyag és a betét között. A szimulációk eredményei azt mutatják, hogy a visszaolvadt felületek nagysága a szerszámhőmérséklet növelésével nő. Látható továbbá, hogy a

2. táblázat. Az egyes betéttípusok száltérfogati arányai

Betéttípus	vf (%)
U	26,9
K	8,3
W	10,5

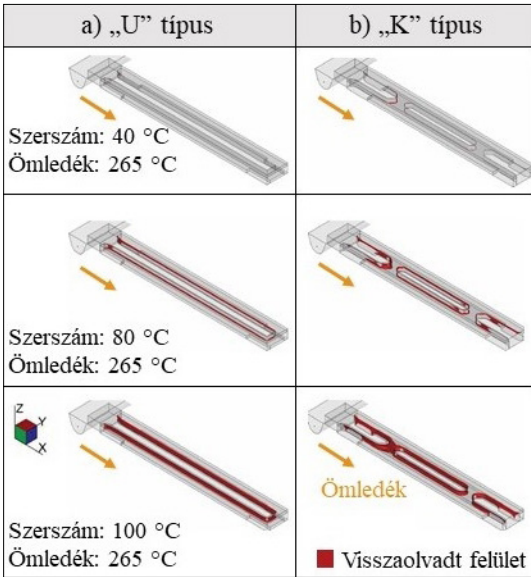


1. ábra. Betéogeometriák vázlata: a) U típus, b) K típus, c) W típus. A szaggatott vonalak a folytonos erősítőszálak helyét jelölik

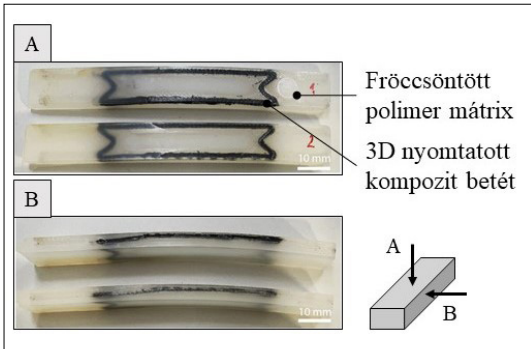


2. ábra. Vázlat a K típusú betét pozíciójáról a fröccsöntőszerszámban

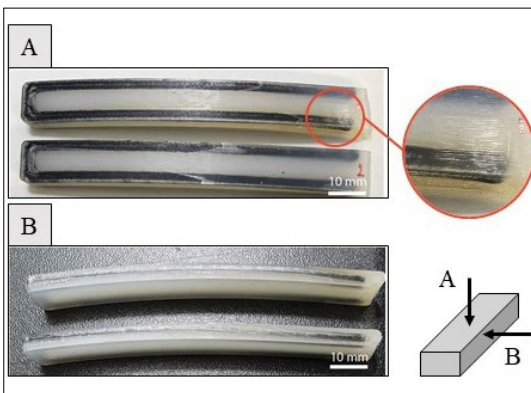
befröccsöntött anyag várhatóan zárványmentesen ki fogja tölteni a szerszámüreget a betét körül. Ez nagy jelentőséggel bír, hiszen a részleges kitöltés esetén kialakult üregek hibahelyet jelentenek.



3. ábra. Visszaolvadt felületek aránya különböző szerszámhőmérsékletek esetén



4. ábra. K típusú betéttel erősített próbatetek



5. ábra. U típusú betéttel erősített próbatetek

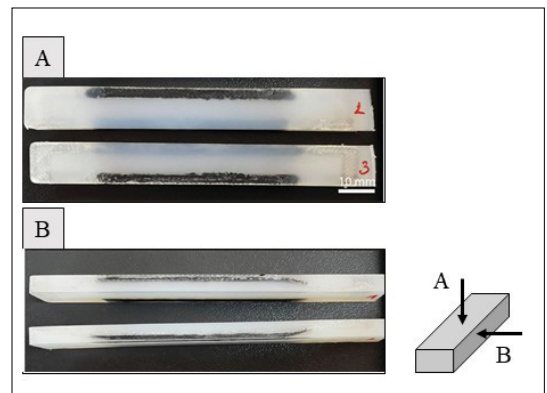
#### 4. Kompozitminták készítése

A betéteket a 2.2. fejezetben leírtaknak megfelelően, 3D-s nyomtatással készítettük, majd a fröccsöntőszerszámba manuálisan helyeztük el őket. A szerszámüreg üresen maradt részébe poliamid mátrixanyagot fröccsöntöttünk úgy, hogy a kitöltést a maximális fröccsnyomással korlátoztuk.

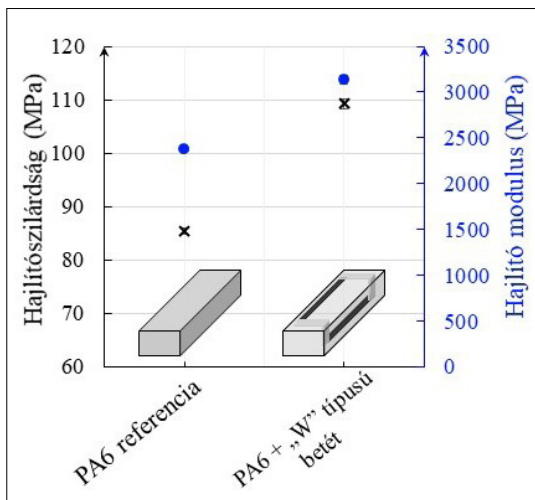
Az első gyártási tapasztalata az volt, hogy az U és a K típusú betétekkel erősített minták nagymértékben vetemedtek. Ennek oka, hogy a kilökést követően a polimer hűl és zsugorodik, a szénszálkötegek azonban jóval kisebb mértékben zsugorodnak, így gátolják a környezetükben lévő polimer deformációját. Aszimmetrikus szálelhelyezés esetén így a minta eltérő mértékben deformálódik, ami vetemedést okoz (4. és 5. ábra).

A kompozitminták gyártását követően a betétek falai mentén helyenként a polimer elszíneződését, a dízelhatáshoz hasonló beégési nyomokat is tapasztaltuk (5. ábra). Ennek több oka is lehet. Egyrészt a betétek akadályozhatják a szerszám kilevegőzését, így a befröccsöntés során légbuborékok ragadhatnak bent, amelyek a nyomás hatására felhevülnek, és a molekulaláncok lokális tördelődését okozzák. Másrészt előfordulhat, hogy a betétek mátrixanyagának molekulaszervezete a betét környezetében megnövekedett nyíróerők hatására roncsolódik.

A vetemedés kompenzálása érdekében egy harmadik (W típusú) betéttel terveztünk. Ennél a geometriánál egyenlő mennyiségű szálát helyeztünk el a minta szemközti oldalai mentén. A szimmetrikus szálelhelyezés következtében a minták egyforma mértékű zsugorodást szenvedtek a hossz tengely mentén, így a vetemedés szemmel is jól látható mértékben csökkent (6. ábra).



6. ábra. W típusú betéttel erősített, fröccsöntött próbatetek



7. ábra. A hajlítóvizsgálatok eredményei erősítetlen, illetve a W betéttel erősített minták esetén

## 5. A hajlítóvizsgálatok eredményei

A 3D-s nyomtatással készített kompozitbetétek tulajdonságmódosító hatását hárompontos hajlítással vizsgáltuk, amely során erősítetlen fröccsöntött mintákkal végeztünk összehasonlítást. Az eredményeket a 7. ábra mutatja be.

Az U és a K típusú betéttel erősített próbatesteket a vetemedés miatt nem tudtuk vizsgálni. A 10% száltérfogat arányú kompozitok hajlítószilárdsága és modulusa 30%-kal növekedett az erősítetlen mintákhoz képest. Megfigyelhető továbbá, hogy a méréseket igen kis szórás terheli, ami a gyártási eljárás jó reprodukálhatóságára utal.

## 6. Következtetések

Munkánkban sikeresen alkalmaztunk 3D-s nyomtatással készített kompozitbetéteket fröccsöntött termékek előállítására. Folytonos szén-szállal erősített betétgeometriákat terveztünk, majd ezeket elhelyeztük a szerszámban, és a szerszámüreg fennmaradó üres térfogatába polimer mátrixanyagot fröccsöntöttünk. A kompozitbetétek poliamid mátrixanyaggal készültek, így a fröccsöntéshez is poliamidot választottunk. A gyártást megelőzően fröccsöntési szimulációkat végeztünk a kitöltés vizsgálatára, illetve a szerszámhőmérséklet meghatározására. Kimutattuk, hogy az erősítőszálak és a polimer zsugorodása közti különbség vetemedést okoz, ami a szálak szimmetrikus elhelyezésével kompenzálható. Ezek alapján új betétgeometriát terveztünk, amely már nem okozta a fröccsöntött minták látható vetemedését. A szálerősítés által 30%-os

növekményt értünk el a fröccsöntött kompozitok hajlítószilárdsága és modulusa esetén az erősítetlen mintákhoz képest. Összességében, a bemutatott eljárással folytonos szállal erősített, hőre lágyuló polimer mátrixú kompozitok termelékeny gyártása valósítható meg, az újrahasznosíthatóság és az egyedi igények szerint kialakítható mechanikai tulajdonságok előnyeivel.

## Köszönetnyilvánítás

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

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] van de Werken N., Tekinalp H., Khanbolouki P., Ozcan S.: *Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective*. Additive Manufacturing, 31. (2020) 100962. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>
- [2] Liu S., Li Y., Li N.: *A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures*. Materials and Design, 137. (2018) 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.007>
- [3] Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D.: *3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*. Composites Part B: Engineering, 110. (2017) 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- [4] Tábi T., Égerházi A. Z., Tamás-Bényei P., Cziganý T., Kovács J. G.: *Investigation of injection moulded poly(lactic acid) reinforced with long basalt fibres*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 64. (2014) 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.05.001>
- [5] Yan X., Cao S.: *Structure and interfacial shear strength of polypropylene-glass fiber/carbon fiber hybrid composites fabricated by direct fiber feeding injection molding*. Composite Structures, 185. (2018) 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.037>
- [6] Yu S., Hwang J. Y., Hong H. S.: *3D microstructural characterization and mechanical properties determination of short basalt fiber-reinforced polyamide 6,6 composites*. Composites Part B: Engineering, 187. (2020) 107839. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107839>
- [7] Sun X., Lasecki J., Zeng D., Gan Y., Su X., Tao J.: *Measurement and quantitative analysis of fiber orientation distribution in long fiber reinforced part by injection molding*. Polymer Testing, 42. (2015) 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107839>
- [8] Valvedere M. A., Kupfer R., Wollmann T., Kawashita L. F., Gude M., Hallett S. R.: *Influence of component design on features and properties in ther-*

- moplastic overmoulded composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 132. (2020) 105823.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105823>
- [9] Schneider T.: *Lightweight construction: First composite gearbox housing with layer-optimized organo sheeting weighs 30% less than a comparable aluminum component*. Reinforced Plastics, 63/1. (2019) 40–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.11.018>
- [10] Karakaya N., Papila M., Özgoc G.: *Overmolded hybrid composites of polyamide-6 on continuous carbon and glass fiber/epoxy composites: An assessment of the interface*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 131. (2020) 105771.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105771>
- [11] Fu L., Zhang M., Zhai Z., Jiang F.: *The influence of preheating temperature on the mechanical properties of injection-overmolded hybrid glass fiber reinforced thermoplastic composites*. Polymer Testing, 105. (2022) 107425.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107425>
- [12] Andrzejewski J., Przyszczykowski P., Szostak M.: *Development and characterization of poly(ethylene terephthalate) based injection molded self-reinforced composites. Direct reinforcement by overmolding the composite inserts*. Materials&Design, 153. (2018) 273–286.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.084>
- [13] Boros R., Rajamani P. K., Kovács J. G.: *Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting*. EXPRESS Polymer Letters, 13/10. (2019) 889–897.  
<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.77>
- [14] [www.markforged.com](http://www.markforged.com) (letöltve: 2022. március 10.).
- [15] Dickson A. N., Barry J. N., McDonnell K. A., Dowling D. P.: *Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 16. (2017) 146–152.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>
- [16] <https://grupaazoty.com/en/group-s-offer/plastics/alphalon-27> (letöltve: 2022. március 10.).
- [17] MSZ EN ISO 178: *Műanyagok. A hajlítási tulajdonságok meghatározása*, 2010.