

MŰANYAGOK FELDOLGOZÁSA, ADDITÍV TECHNOLÓGIÁK

Szálerősített hőre lágyuló műanyagok 3D nyomtatása

A hőre lágyuló műanyagok nyomtatásában új fejezetet jelentett az üveg- szén- és aramidszálakkal erősített hőre lágyuló anyagok bevezetése, amelyek a nem erősített típusokhoz képest jelentősen megnövelték a nyomtatott anyag modulusát és szilárdságát. A szálerősítés javítja a termikus jellemzőket is, de vannak hátrányai is, elsősorban a nagyobb porozitás. Az alábbiakban a rövidszállal és a folyamatos szálakkal erősített nyomtatás előnyeit és hátrányait hasonlítjuk össze a szakirodalom alapján.

Tárgyszavak: 3D nyomtatás; FFF (fused filament fabrication); folyamatos szálerősítés; rövidszál erősítés; feldolgozási paraméterek; mechanikai jellemzők

A 3D nyomtatás általános alapelvei

A hőre lágyuló műanyagok 3D nyomtatása nagyon divatossá és népszerűvé vált az elmúlt évtizedekben és az egyre inkább elérhetővé váló nyomtatók megjelenése nemcsak a prototípus gyártók figyelmét ragadta meg, hanem olyan piacokra dolgozó műanyag-feldolgozókat is, akik kis számban, egyedi termékeket kívánnak előállítani. Közismert azonban, hogy a 3D nyomtatott termékek mechanikai szilárdsága ritkán éri el a megegyező alakú fröccsöntött termékekét, ugyanis az egymásra épülő rétegek homogenitása kisebb, mint az ömledékből öntött vagy préselt tárgyaké, mindig marad egy kis porozitás, és a már megszilárdult rétegre épülő újabb réteg és az eredeti réteg közötti határfelületi szilárdság sem azonos a folyamatos anyag kohéziójával. A mechanikai szilárdság fröccsöntött termékek esetében is jelentősen növelhető szálerősítéssel, tehát várható, hogy rövid erősítőszálak (pl. üvegszálak, szénszál) hozzáadása jelentősen javítja a 3D nyomtatott termékek mechanikai jellemzőit. Itt a 3D nyomtatásnak csak azzal a fajtájával foglalkozunk, amelyben egy „zsinór” vagy nyomtatószál megolvasztásával és megszilárdításával állítják elő a rétegeket (*Fused Filament Fabrication* – FFF technológia). Az FFF technológiával készített, szálerősített rendszerek sokban emlékeztetnek a hagyományos rétegelt kompozitokra, és arra is van lehetőség, hogy a szálorientációt rétegenként változtassuk. Vannak olyan 3D nyomtatógyártók, akik folyamatos szálerősítésű rendszerekhez is kínálnak megoldásokat, míg mások olyan feltekereselt, extrudált szálakat kínálnak, amelyek már tartalmazzák a kompaundált rövid erősítőszálakat és azokat a hagyományos technológiához hasonló módon dolgozzák fel. Természetesen a folyamatos szálal tartalmazó rendszerek nagyobb erősítést tesznek lehetővé, hiszen rövid szálak esetében a szilárdságot behatárolja az, hogy a legtöbb esetben a kompaundált szálak átlaghossza jóval rövidebb annál a kritikus szálhossznál, ami ahhoz szükséges, hogy húzó igénybevételkor az erősítőszál szakadjon, nem a határfelület. Ugyanakkor a folyamatos erősítőszálak esetében jóval korlátozottabb a tervezhető formák köre és nagyobb a visszamaradó porozitás. De még a rövid erősítőszálakat alkalmazó megoldások esetében is jóval nehezebb hibamentes, homogén szerkezeteket létrehozni, mint erősítetlen hőre lágyuló műanyagok nyomtatásával, mert a szálerősített ömledék viszkozitása sokkal nagyobb, mint a mátrixpolimeré. Ezen felül a szálerősített rendszerek hővezető képessége nagyobb, mint a mátrixpolimeré, a megömlesztett

„zsinór” hülése jóval gyorsabb, hamarabb megszilárdul, és adott esetben gyengébb lesz a kötés a két réteg között, ezért hiába nagyobb magának az erősített mátrixnak a szilárdsága, mint a mátrixé, a termék szilárdságát a leggyengébb hely határozza meg.

Az FFF módszer esetében az alap- vagy nyomtatólemezen (build plate) egy lépésben kb. 100–120 μm vastag rétegek alakulnak ki. A leggyakrabban nyomtatáshoz használt polimerek az ABS (akrilonitril-sztirol-butadién kopolimer) és PLA (polilaktid), amelyek tömbanyag szilárdsága 30–100 MPa, rugalmassági modulusa az 1,3–3,6 GPa tartományban van, de a termék lokális szilárdsága ettől jóval elmaradhat. A termék szilárdságát olyan tényezők befolyásolják, mint az ömledék viszkozitása, hülése, az ömlesztési folyamat paraméterei és a nyomtatott csíkok, illetve rétegek közti adhézió erőssége. A megolvasztandó szálat vagy zsinórt görgők továbbítják az ömlesztőfejbe, amely az ömledéket egy szűkített nyíláson keresztül nyomva hozza létre az ömledékcseppet (ez az ömledékrugalmasság miatt az extrúziós szerszámduzzadáshoz hasonló módon kitágul a nyílás elhagyása után), amelyet a felülethez nyomott fej mozgás közben ellapít és elliptikus keresztmetszetű csíkokká alakít. Az, hogy mekkora nyomás alakul ki az ömledék-képző fej nyílásánál, függ a betáplálás sebességétől, a szűkület mértékétől (a fűvóka geometriájától), a hőmérséklettől és a polimer viszkozitásától. Az első réteg az alaplemezhez tapad, a többi réteg egymáshoz. Tekintettel arra, hogy a megömlesztett csíkok egymással párhuzamosan alakulnak ki (az adott réteg szélén a nyomtató fej visszafordul), az ömledék részben megszilárdul, mire a mellette levő, vele érintkező csík létrejön, és még inkább ez a helyzet, mire a következő, felette levő réteg kialakul. Természetesen mivel a nyomtatófej meleg (és többnyire az alaplemez is), a már részben megszilárdult csík is újra puhul, mikor a párhuzamos csíkok vagy az egymás fölötti rétegek közti kapcsolat kialakul, a réteg szerkezete soha nem éri el azt a homogenitást, mint pl. extrudált vagy fröccsöntött termékek esetében tapasztalunk, a csíkok között többnyire kisebb nyílások maradnak. A mechanikai szempontból kritikus irányok a párhuzamos, egy síkban levő csíkokra síkban merőleges irány és a rétegekre merőleges irány, itt a modulus akár 10%-kal, a szilárdság 50%-kal is kisebb lehet, mint a tömbanyag hasonló jellemzői. Ezek az összefüggések jól ismertek a egytengelyű (uniaxiális) rétegekből felépített szálerősítésű kompozitok esetében, de itt erősítőanyagot nem tartalmazó, tiszta hőre lágyuló polimerek esetében is jelentkeznek. Megint csak a rétegelt kompozitoknál ismert módszerhez hasonlóan csökkenteni lehet az anizotróp (irányfüggő) mechanikai jellemzők kialakulását, ha rétegenként változtatjuk a csíkok irányát (síkban izotróp, ún. ortotróp kompozitok). Természetesen ezzel a módszerrel nem javítható a rétegekre merőleges mechanikai szilárdság. Ezek a problémák csökkenthetők, ha megfelelően választjuk a nyomtatási paramétereket, pl. az egymást követő rétegekben a nyomtatott csíkokat nem pontosan egymás fölé, hanem egymáshoz képest eltolva alakítjuk ki úgy, hogy a következő csík az előző csíkok közeibe kerüljön, mert így nő a köztük létrejövő felület és csökken a porozitás. A porozitás egy rétegen belül kb. 5%, míg a rétegek között akár 27% is lehet. Ahhoz, hogy a nyomtatott csíkok között jó adhézió alakuljon ki, arra van szükség, hogy a két szomszédos csíkban levő polimer láncok diffúzió útján bizonyos mértékig keveredjenek. Az, hogy ez sikerül-e, függ a viszkozitástól, a hővezető képességtől, a hőkapacitástól, a nyomtatás és a hűtés sebességétől. A magasabb nyomtatási hőmérséklet csökkenti a viszkozitást, javítja a diffúziós folyamat hatékonyságát, a szintereződést. Ha azonban túl magas a hőmérséklet, degradációs folyamatok lépnek fel és az erősebb folyás miatt csökken a méretpontosság, szóval kompromisszumot kell találni. A nagyobb hővezető képesség javítja a homogenitást, de gyorsítja a lehűlést. Az eddig említett anyag- és feldolgozási paramétereken túl az ömledék felületi feszültsége is fontos. Minden egyes anyagra külön kell optimalizálni a feldolgozási paramétereket. A modellszámítások azt mutatják, hogy teljes összeolvadásra nem lehet számítani

az érintkező csíkok és rétegek között, de a tulajdonságok javíthatók a megfelelő paraméterek megválasztásával.

A nyomtatott polimerek erősítése szálakkal

A szálak hozzáadása a polimerhez javítja a mechanikai szilárdságot, növeli a hővezető képességet és szénszálak esetében a villamos vezetőképességet is. A legtöbb kereskedelmileg elérhető nyomtató és nyomtató-szál rövid (kb. 100 µm hosszúságú) szálakkal töltött hőre lágyuló műanyag, amelyekből kompaundálással és extrúzióval alakítanak ki nyomtatásra alkalmas szálakat. Ezzel a megoldással a mátrixpolimerekhez képest mintegy 65%-os javulás érhető el, de tekintettel arra, hogy az ömledék kompaundálás és extrúzió során fellépő nyíróerők hatására a szálak tördelődnek, az így elérhető tulajdonság-javulás meg sem közelíti azokat az eredményeket, amelyeket hagyományos kompozitkészítési módszerekkel (laminálás, prepreg stb.) el lehet érni. A rövid szálak hozzáadása eleinte csökkenti a nyomtatott termékek porozitását, de ha a száltartalom 10 tömeg% fölé nő, a porozitás is kb. 10%-ra emelkedik.

A rövid szállal erősített anyagok esetében eleinte elsősorban ABS és epoxigyanta mátrixokkal próbálkoztak – az utóbbi esetben injekciós tűkkel adagolva a szálakat tartalmazó, még nem térhálós gyantát, amelyet a gyorsan kötő típusok közül választottak. Az ABS esetében, ahol a mátrix hőre lágyuló, a hagyományos technológiát alkalmazzák azzal a különbséggel, hogy a nyomtató szál már tartalmazza az elosztatott szénszálat. Az erősítő anyag lehet örölt szál (kb. 100 µm), lehet vágott szál, amely pl. ABS esetében kompaundálás előtt több mm hosszúságú is lehet, ennek maradéka a kompaundálás és extrúzió után is 150–250 µm körül lehet, de lehet szén-nanoszál is. Természetesen vágott és örölt szálat üvegből is lehet készíteni. A szálakat sok esetben a kompaundálás előtt vagy során speciális íréssel látják el a mátrix-erősítő anyag adhézió javítása érdekében. A száltartalom többnyire 5–15 tömeg%, de pl. ABS esetben 10–40 tömeg% is lehet. A nagyobb száltartalom esetében erős a nyomtatás során kialakuló szálorientáció, ami nagyobb szilárdságot, de nagyobb anizotrópiát is jelent. A száltartalmú csíkok esetében különbséget kell tenni a csíkok közti porozitás (üregek) és a csíkokon belüli porozitás között. Az elsőfajta porozitás jelen volt már az erősítőszál mentes hőre lágyuló anyagokból nyomtatott termékekben is – ez valamelyest csökken a hozzáadott erősítőszálak hatására, mert javul a hővezető képesség és csökken a duzzadás az olvasztófejből történő kilépés után, viszont megjelenik egy másik fajta porozitás a csíkokon belül, ami a gyenge mátrix-erősítőszál adhézió (szálkihúzó) miatt alakul ki. A szálak hozzáadása miatt megnőtt hővezető képesség javítja a hőátadást az ömledék és az olvasztófej között, de a már kinyomtatott anyagcsíkok között is.

A rövid szálak hozzáadása mellett léteznek olyan technikák is, amelyekben folyamatos szálakat impregnálnak hőre lágyuló műanyaggal, és ezzel végzik a nyomtatást. A **MarkForged** cég kifejlesztett egy olyan technológiát és nyomtató berendezést, amely lehetővé teszi, hogy szén, üveg vagy Kevlar szálakat ágyazzanak poliamid mátrixba. Szénszálak használata esetén 500 MPa nagyságrendű szilárdság és 50 GPa nagyságrendű modulus érték érhető el a nyomtatott tárgyban. A szállal impregnált, kb. 0,4 mm átmérőjű nyomtató-szál, amelynek eredeti keresztmetszete kör alakú, négyzetűre változik a nyomtatás során fellépő nyomóerők hatására – ennek eredményeként javul a nyomtatott csíkok és az egymást követő rétegek közti adhézió és csökken a porozitás. Mások kifejlesztettek olyan nyomtatófejet is, amelyben a szénszál-pázmát ABS ömledéken vezetik át a nyomtatás előtt – ez 2–5-szörös mechanikai tulajdonság-javulást eredményez, de a rétegek közti szilárdságon még javítani kell. Létezik olyan megoldás is, ahol pl. a

folytonos szénszál-pásmát hőre lágyuló PLA szállal együtt vezetnek be a nyomtatófejbe azt remélve, hogy megtörténik a szálak impregnálása. Sajnos azonban a hosszú szálakkal erősített hőre lágyuló granulátumok (ún. *LFT* – long fiber thermoplastic technológia) fejlesztése során kiderült, hogy a szálpásmák impregnálásához ekkora tartózkodási idő és nyíróerő nem elég, ezért még viszonylag kis száltartalom esetén (<10 %) is elég egyenetlen lesz a száleloszlás.

A MarkForged berendezés két nyomtatófejet is használ, az egyiket a szállal erősített, a másikat a szálerősítést nem tartalmazó poliamid nyomtatására, amelyek szimultán működnek. Az utóbbira azért van szükség, mert a folyamatos szálerősítésű fejjel önmagában nem alakíthatók ki a nyomtatott tárgy külső felületei, vagy a bonyolultabb, vékonyabb részei, és vannak egyéb olyan felületek is, amelyek nem tölthetők ki folytonos szálakkal – itt a nem erősített poliamid fejet kell használni. A nyomtatót csak saját „szeletelő” szoftverével együtt lehet használni, amely azonban „fekete dobozként” működik, a felhasználó nem alakíthatja szabadon a feldolgozási paramétereket (hőmérséklet, nyomtatási sebesség, betáplálás sebessége). A folytonos szálakat spirál alakban nyomtatják a peremtől befelé, ezért a szálak mindig az adott síkmetszet kerületével lesznek párhuzamosak, nem fektethetők a feldolgozó tetszése szerint. Az egyes rétegek vastagsága 0,125 mm. Az a tény, hogy a felületi rétegek nem tartalmaznak szálerősítést, javítja ugyan a felület minőségét, de csökkenti a teljes száltartalmat a nyomtatott termékben. A nyomtatási hőmérséklet 260 °C, a tiszta poliamid komponens esetében az anyagáram több mint kétszerese a szálerősítetthez képest. A poliamid mátrix használata viszont azt is jelenti, hogy nem lehet elhanyagolni a fokozatos vízfelvételt, amely a szilárdságot akár harmadrészével is csökkentheti.

A folyamatos és rövid szállal erősített nyomtatott termékek összehasonlítása

Ha össze szeretnénk hasonlítani a MarkForged technológiával készült és a rövidszállal erősített poliamid termékek mechanikai tulajdonságait, célszerű a folyamatos szállal erősített próbatesteket „ovális” spirál mentén nyomtatni, majd a lekerekített végeket levágva csak a központi részt vizsgálni, ahol a nyomtatott csíkok (és a bennük levő erősítőszálak) egymással párhuzamosak. A folyamatos szállal erősített minták esetében a száltartalom mikroszkópos mérések alapján kb. 27 tf% volt. A szakítószilárdság méréshez üvegszálal véglemezeket erősítettek a szakító próbatest végéhez, hogy a törés ne a befogásnál következzen be, de végeztek hajlító és nyíró igénybevétel melletti méréseket is. A vágott szállal erősített rendszerek esetében téglalap, háromszög és kör alakú nyomtatott próbatestek is készültek. Az erősítő szálak mindkét esetben szénszálak voltak, de a rövidszálal rendszerekben a száltartalom csak kb. 6 tf% volt. A rövidszálal rendszereknél használt nyomtató (szemben a MarkForged nyomtatóval) széles körben változtatni engedte a feldolgozási paramétereket. A rövidszállal erősített rendszereknél a nyomtatott standard piskóta próbatest középső szakaszán nyomtatott csíkok párhuzamosak voltak (0°). A nyíró tulajdonságok méréséhez ugyancsak piskóta próbatestek készültek, de itt a középső szakaszon ±45°-os orientációt alkalmaztak a rétegek között. Az összehasonlíthatóság érdekében a mért mechanikai jellemzőket 15%-os száltartalomra normálták, és az *1. táblázatban* bemutatott eredményeket kapták.

A folyamatos szállal erősített rendszerek húzóvizsgálatának részletesebb elemzése azt mutatta, hogy 200 MPa terhelés környékén voltak szálszakadásra utaló zajok, utána azonban a minta tönkremeneteléig semmi nem történt (ez valószínűleg néhány deformált szál szakadásával magyarázható a kezdeti fázisban). A hajlítószilárdság kisebb a szakítószilárdságnál, ami a kompozit minták nem tökéletes szerkezetére utal – a laminált kompozitokban fordított arány a megszokott. A hajlításánál a terhelés felőli oldalon nyomásnak, a vele szemben levő oldalon húzásnak van kitéve a

Rövid- és folyamatos szénszállal erősített poliamid próbatesteken mért mechanikai jellemzők valós száltartalom mellett és 15%-os száltartalomra normálva.

		Rövidszálas nyomtatás		Folyamatos szálas nyomtatás	
Nyomtató		Nylforce		MarkForged	
Száltartalom	[tf%]	6		27	
Porozitás	[%]	1,1			
		Mért	15% Normalizált	Mért	15% Normalizált
Húzómodulus	[GPa]	1,85	4,6	62,5	46,9
Szakítószilárdság	[MPa]	33,5	83,8	968	726
Hajlítómodulus	[GPa]	3	7,5	41,6	31,2
Hajlítószilárdság	[MPa]	55,3	138,3	485	363,8
Nyírómodulus	[GPa]	0,31	0,80	2,26	1,7
Nyírószilárdság	[MPa]	19	47,5	31,2	23,4

minta – itt a tönkremenetel a nyomott oldal felül indult, az ok valószínűleg a nem tökéletes szálmátrix adhézió és/vagy a porozitás jelenléte. A folyamatos szállal erősített nyomtatott objektumok esetében, ha viszonylag hirtelen változik a nyomtatott csík iránya (pl. sarkoknál igen, lekerekített éléknél kevésbé), amit a folyamatos szál nem tud követni, viszonylag jelentős üres tér keletkezne, amit a MarkForged szoftvere érzékel és szálmentes poliamiddal egészíti ki. Ezek a helyek azonban így is viszonylag gyengék, és hibahelyként jelentkeznek. A mikroszkópos felvételek a nyomtatott csíkokon belül és egy rétegen belül is kimutattak száleloszlási egyenetlenségeket.

A rövidszállal erősített minták esetében a szakítószilárdság nem éri el a tiszta poliamidra vonatkozó értéket, ami annak tudható be, hogy a szálak nem érik el a kritikus hosszát, amely fölötti igénybevételnél a szál szakad és nem a határfelület. A hajlítószilárdság azonban meghaladja a szakítószilárdságot, ami jobban megfelel a kompozitokra általában jellemző tendenciának. A keresztmetszet mikroszkópos vizsgálata itt is kimutatott réseket a nyomtatott csíkok között, de a porozitás csak 1% körüli volt. A szakító próbatestek kimunkálásakor megfigyelhető volt, hogy viszonylag sok a száلكihúzóadás, ami nem túl erős határfelületi adhézióra vall.

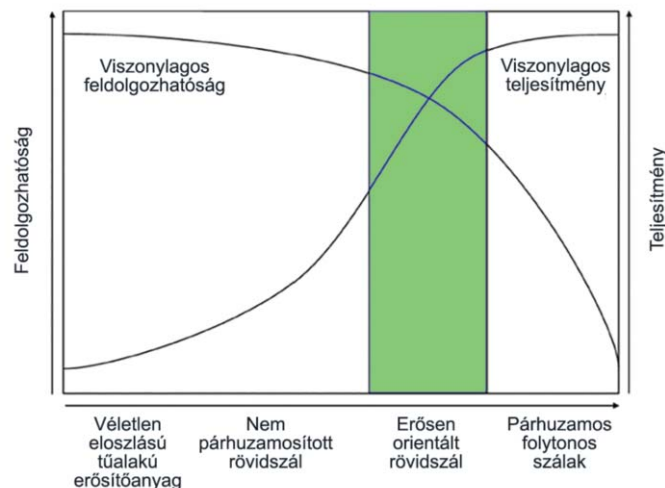
A folyamatos szállal nyomtatott rendszerek 15% száltartalomra normált adatai húzó igénybevételnél kb. egy nagyságrenddel nagyobbak a folyamatos szálak esetében, a különbség kisebb a hajlító és nyíró igénybevétel esetében. Ami azonban a nyomtatott minták minőségét, porozitását illeti, a rövid szálas nyomtatott minták jobbak.

A korábbi folyamatos szállal működő gyártástechnológiák, mint amilyen az ATP (automated tape placement – automatikus szalag lerakó) bonyolultabbak voltak, mint a MarkForged nyomtató technológiája, de lehetőség volt arra, hogy a lehelyezett szalagokat utólagos nyomással tömörítsék, és így javítsák a termék minőségét. A jelenlegi folyamatos szállal nyomtatott darabok még nem versenytársai a hagyományos kompozittechnológiával készült termékeknek, ehhez mind a szilárdság abszolút értékének, mind a minták homogenitásának, reprodukálhatóságának növekednie kell.

A 2. táblázat foglalja össze 3D nyomtatáshoz használt nyomtatószálak optimális jellemzőit. Jelenleg mind a folyamatos, mind a rövidszálas nyomtatásnak megvannak a maga korlátjai, talán az lenne optimális, ha ki lehetne dolgozni olyan technológiát, amelyben a szálhossz meghaladja a kritikus értéket, de nem végtelen. Ezt a jelenleg nem létező, illetve csak az ún. LFT (long fiber thermoplastic) fröccsenhető granulátum technológiában megvalósított állapotot mutatja be az 1. ábra.

3D nyomtatható, szálerősített hőre lágyuló szálak optimális jellemzői

Feldolgozhatóság	Ömledéviszkozitás	Kis ömledéviszkozitás, jó gyanta-folyóképesség
	Felületi energia	Nagy felületi energia – javítja a polimer sziterezhetőségét
	Ömledékhőmérséklet	Az alacsonyabb ömledékhőmérséklet csökkenti a befagyott feszültséget
	Hőkapacitás	A nagyobb hőkapacitás tovább tartja fenn a magas hőmérsékletet nyomtatás után
	Hővezető képesség	A nagyobb hővezető képesség segíti a nyomtatott darab részei közötti hőátadást
Mechanikai jellemzők	Modulus/szilárdság	Minél nagyobb modulusra és szilárdságra van szükség
	Határfelületi szilárdság	Az erősítőszál és a mátrix között minél nagyobb határfelületi szilárdságra van szükség
	Működési hőmérséklet	Minél nagyobb működési hőmérsékletre van szükség az üvegesedés előtt



1. ábra. Az erősítőszálak hosszának és orientációjának hatása a mechanikai teljesítőképességre kompozitokban.

Szálerősített nyomtatott és hagyományos feldolgozási módszerrel készült minták összehasonlítása

A rövidszálalás nyomtatható hőre lágyuló anyagok között az ABS, PLA, a PP (polipropilén) és a PEEK (poliéter-éter-keton) a leggyakoribbak, a szálak között van a szénszál és az üvegszál mellett újabban a bazaltszál is, a töltőanyagtartalom általában 5–15%, néha ennél is nagyobb (akár 30–60% is). A nagy száltartalom azonban ritka a nyomtatófej eltömődése és a nagy viszkozitás miatt. A szálhossz és a növelése (pl. 100-ról 150 μm -re) javítja ugyan a moduluszt és a szilárdságot, de csökkenti az ütésállóságot és a szívósságot. Azonos szálhossz esetén a megnövelt száltartalom esetenként növeli a moduluszt, de csökkenti a szilárdságot a megnövekedett porozitás miatt.

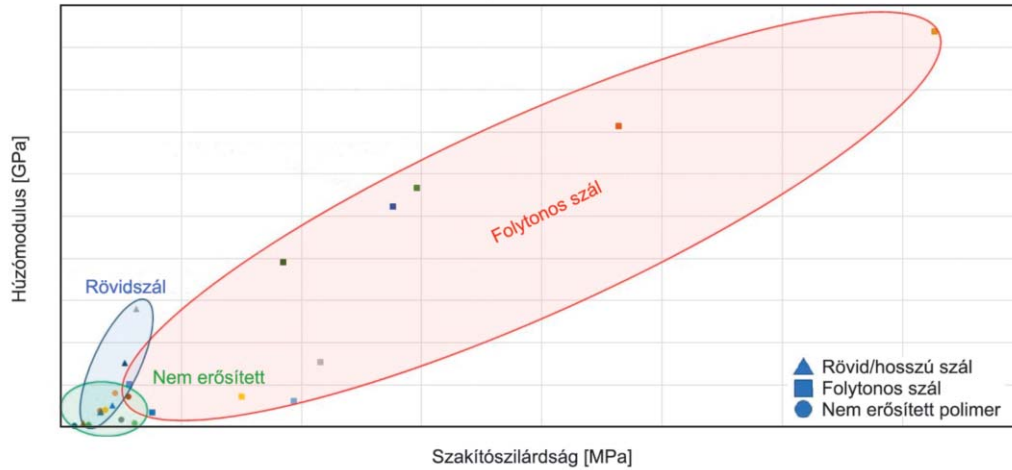
Egy tanulmány 10–40% rövidszál tartalmú ABS minták esetében vizsgálta, hogy a nyomtatott és préselt próbatesteken mért mechanikai jellemzők hogyan viszonyulnak egymáshoz.

Nagy száltartalom esetében azt figyelték meg, hogy a nyomtatott mintákon nagyobb a porozitás (akár 20–30% is) és a szálorientáció, mint a préselt mintákon. A száltartalom növelésével a szakítószilárdság és a modulus mindkét esetben nő – némileg meglepő módon hasonló mértékben. Ezt annak tulajdonították, hogy a nyomtatás esetében a nagyobb szálorientáció kompenzálja a nagyobb porozitást. Azt is érdemes megfontolni, hogy az erősítőszálak hozzáadása a nyomtatószálakhoz csökkenti azok nyomtatási rugalmasságát és felcsévelt állapotban való kezelhetőségét, ezért lágyító és kompatibilizáló szereket is szoktak adni a mátrixpolimerhez. A lágyító és kompatibilizáló szerek többnyire maguk is polimerek, amelyek azonban befolyásolják a mátrix jellemzőit is – nem mindig kedvező irányban, ezért gondosan mérlegelni kell alkalmazásukat, illetve az adalék mennyiségét. Érdekes módon a feldolgozhatóságot befolyásoló folyóképesség függ nemcsak a hozzáadott erősítőszál mennyiségétől hanem minőségétől is – PLA mátrixban például azt figyelték meg, hogy azonos mennyiségű bazaltszál és szénszál esetében a bazaltszál tartalmú kompozitok sokkal könnyebben feldolgozhatók voltak.

A folytonos szállal erősített nyomtatók esetében számos műszaki újítást vezettek be, pl. kopásállóbb ömledék-fűvókákat, szálvágó egységeket, szál és műanyag bevezetésére alkalmas kettős tápellátású nyomtatófejeket, szál-előmelegítő egységeket stb. A folytonos nyomtatók esetében két fő technológiasoprotot különböztetnek meg: az „in-situ ömlesztést” és az „ex-situ prepreg” technológiát. Az elsőnél a „száraz” folytonos erősítőszálat együtt vezetik be a fejbe a hőre lágyuló műanyaggal, és ott próbálják impregnálni a szálat, és rögtön nyomtatni vele. (Rendszerint mindkét komponens előmelegítve kerül a nyomtatófejbe, hogy jobb legyen az impregnálás és a nyomtatás hatásfoka). Ennek a megközelítésnek megvannak a maga előnyei, mint az egylépcsős technológia, a szál/polimer arány változtathatósága, olcsóbb alapanyagok – hátránya viszont, hogy a rövid tartózkodási idő miatt az impregnálás nem kielégítő, nem túl jó minőségű darabok készíthetők, nagy a porozitás. Ezt csak részben lehet ellensúlyozni a nyomtatási hőmérséklet emelésével. Itt is igaz, hogy a kialakuló porozitás függ az alkalmazott erősítőszáltól. Egy esetben pl. azt tapasztalták, hogy azonos mennyiségű szén- és aramidyszál esetén az utóbbinál kisebb porozitás alakult ki. Vannak olyan próbálkozások is, hogy normál hőre lágyuló polimerrel nyomtatnak, de a rétegek közé nagyon vékony erősítőszál rétegeket helyeznek, és a terméket préseléssel konzolidálják.

Az ex-situ prepreg technológia esetén a polimerrel impregnált folytonos erősítő szálat külön készítik el és ezt táplálják be a nyomtatóba. Ez sokkal jobb minőségű nyomtatószál készítését teszi lehetővé, és nincs szükség külön húzómotorra, mint az in-situ impregnálás esetében, ha egyszer a prepreget „lehorgonyozták” a nyomtatólemezre.

A 2. ábra sematikusán mutatja be, hogy milyen modulus-szilárdság eredmények érhetők el nem erősített, rövidszállal erősített és folytonos szállal erősített nyomtatott kompozitok esetében. Az ábráról az is leolvasható, hogy különösen a folyamatos szálak esetben nagyon széles tartományban változhatnak a mechanikai jellemzők, ez természetesen függ a mátrix és az erősítőszál típusától, az erősítőszál mennyiségétől és az alkalmazott technológiától. Az elérhető eredmények a nyomtatási stratégiától is függenek. Ha egyszerű oda-vissza nyomtatást alkalmazunk (ami viszonylag jól adaptálható a nyomtatandó síkszerkezethez) jó esélyünk van arra, hogy a „visszafordulásnál” a folytonos szál sérülni fog. A kerület felől történhet „spirálnyomtatás”, de ez is csak viszonylag egyszerű geometriák esetében használható. A nyílt forráskódú nyomtatóprogramok mellett vannak „fekete dobozként” működő, védett kódú szoftverek pl. a MarkForged cég fentebb említett programja, de más cégek is forgalmaztak hasonlóan működő



2. ábra. Erősítetlen, rövid szállal erősített és folytonos szállal erősített nyomtatott minták úzó modulusa és szakítószilárdsága (leegyszerűsített ábra a (2) hivatkozás alapján).

szoftvereket. Ezek maguk „szeletelik” a kívánt végső geometriát, és maguk állítják be az optimális nyomtató programot.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György

- (1) Blok L. G., Longana M. L., Woods B. K. S.: An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites – Additive Manufacturing, 2018, 22. k., p. 176–186.
- (2) Dickson A. N., Abourayana H. M., Dowling D. P.: 3D Printing of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Filament Fabrication – A Review – Polymers, 2020, 12. k., cikkód: 2188, p. 1–18.