

## 3D nyomtatás fejleményei

A Carbon cég additív gyártási eljárása fény és oxigén hatására folyékony gyantából ipari mennyiségekben készít termékeket. Az Arburg cég Freeformer berendezése normál műanyag granulátum megömlesztésével állít elő parányi cseppeket, amelyekből rétegenként építi fel az adott alkatrészt. Az erre alkalmas műanyag típusok körét folyamatosan bővítik. Szelektív lézer szinterezéssel, rozsdamentes acélporból előállított formahabosító szerszám segítségével drasztikusan lecsökkenthető volt egy EPP termék ciklusideje, energiafelhasználása és a szerszám tömege.

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; additív gyártástechnológia; ABS; PC; PA; TPE; PP; EPP; PEI.*

## 3D nyomtatás Szilikon-völgy stílusban

Közismert, hogy a Szilikon-völgy az új technológiák, a műszaki haladás bölcsője. Ezért volt értelme egy új, innovatív vállalatot – amely a 3D nyomtatást (az additív gyártástechnológiát), a prototípus készítés felhasználási körén túl kívánja juttatni – a világ jövőjét formáló környezetbe helyezni.

A Szilikon-völgybeli Carbon cég az ipari mennyiségekben készülő alkatrészekre fókuszál. A cég szlogenje szerint: hagyjunk fel a prototípus-készítéssel és kezdjünk gyártani. A 2013-ban alapított Carbon egy olyan additív gyártási eljárásnál játszott úttörő szerepet, amely fény és oxigén hatására folyékony gyantából készít gyorsan termékeket.



1. ábra Az Adidas cég *Futurecraft* 4D futócipőjének betétrétege eltérően alakuló hálós szerkezeteket tartalmaz

A cég egyik társalapítója szerint a 3D nyomtatásnál alkalmazott, rétegenkénti termékfelépítés korlátozza az eljárás hatékonyságát tömeggyártási eljárásaként, ezért azt elsősorban csak a prototípusok elkészítésének részügyára fókuszálták. A Carbon cég *DLS* (*digitális fény szintézis*) technológiája, amely a *CLIP* (*folyamatos folyadék interfészes gyártás*) eljárással dolgozik, kiküszöböli a hagyományos 3D nyomtatás gyengeségeit azáltal, hogy folyékony gyantából fény és oxigén felhasználásával készít gyorsan alkatré-

szeket egy lépésben, szó szerint folyamatosan felfelé kihúzva azokat a folyékony fázisból (1. ábra), mint a híres Terminátor 2 filmbeli jelenetnél, ahol a T-1000 gyilkos robot kiemelkedik a folyékony fémtócsából. A növekvő alkatrész alsó részét folyamatosan UV fényel megvilágítva keményítik ki. Az így előállított termékek kiváló mechanikai tulajdonságokkal, felbontással és felületi minőséggel rendelkeznek. Miután egyetlen rétegből állnak, jellemzőik sokkal inkább izotróp jelleget mutatnak, mint a 3D nyomtatású alkatrészek, amelyeket egymásra helyezett rétegekből építenek fel. A Carbon technológiával nemcsak közvetlen használatra alkalmas darabok készülnek, hanem alkalmazása nagy, más 3D nyomtatási eljárásokhoz képest akár százszoros gyártási sebességet is elér. Tulajdonságai javítása érdekében az alkatrészeket megformálásuk után egy légkeveréses kemencében utóhőkezelésnek kell alávetni.

A Carbon cég 3D nyomtató rendszerei gyakran a DLS technológiát elsőként alkalmazó M1 nyomtatót használják, amely rétegmentes, nagy felbontású, jó felületi minőségű darabokat állít elő. Az M2 nyomtató kétszer akkora termék térfogatot tesz lehetővé, vagyis nagyobb alkatrészeket, gyorsabb gyártást és alacsonyabb alkatrész költségeket biztosít, ugyanolyan nagy felbontással (75 µm pixelméret), mint az M1. A Smart Part Washer berendezésük optimált kimosási eljárásokat kínál, így az összes alkatrész konzisztens minőségben, minimális élőmunka ráfordítással megtisztítható.

A SpeedCell az összekapcsolt gyártóegység működések rendszere, amely lehetővé teszi az alkatrészek reprodukálható gyártását bármilyen méretben. Az M1 és M2 nyomtatók és az automatikus Smart Part Washer a moduláris felépítésű rendszerkínálat első elemei, ami számos iparágban alkalmazható lesz megtervezni, méretezni és felépíteni alkatrészeket egy közös gyártási munkafolyamattal.

A Carbon kínálata más tekintetben is egyedülálló. Sajátos, előfizetési modellt kínál 3D nyomtató rendszereihez. A cég megközelítése kombinálja az adatcentrikus hardvert a rendszeres, rádióhullámok által továbbított szoftverfrissítésekkel, ami átlagosan hathetes időközönként történik. A cég képviselője szerint ez az előfizetési modell a vállalat üzletpolitikájának egyik legfontosabb eleme, mivel így a felhasználók egy nagyon nagy teljesítményű gépet kaphatnak olcsón és nem kell azon aggódnuk, hogy az elavul. E megközelítés egészen új a 3D nyomtatók iparágánál, de újdonságnak számít a legtöbb más gyártóberendezésnél is.

Az interneten át történő szoftverfrissítés nem véletlenül az elektromos autókat gyártó Tesla Motors céget juttatja eszünkbe. A Carbon főmérnöke és több munkatársa ugyanis korábban a Teslánál dolgozott. Innen ered az az alapelv, hogy olyan berendezéseket kapcsoljanak össze, amelyekre az emberek általában nem is gondolnak, mint a Tesla esetében az autókat. A gyártó berendezések ilyenét összekapcsolása is számos előnnyel járhat, ami a terméktervezőket, mérnököket is újfajta gondolkodásmódra serkentheti.

Jelenleg a Carbon legnagyobb ipari partnere az oregoni adidas cég, együttműködésüket 2017-ben jelentették be. A két cég ekkor mutatta be a Futurecraft 4D futócipőt, az első nagy teljesítményű lábbelít, amelyet a Carbon cég DLS technológiájával gyártanak.

A Carbon cég *M* sorozatú nyomtatói és az általuk nyomtatható folyékony gyan-  
ták nagy száma lehetővé teszi, hogy olyan térbeli hálós szerkezeteket állítsanak elő,  
amelyek helyettesíthetnek olyan anyagokat, mint amelyek a cipőtálpak középső rétegét  
alkotják. Ezzel a megoldással lehetséges a végfelhasználó igényei szerint hangolható  
hálós szerkezeteket tervezni és gyártani. A mérnökök számára először vált lehetővé 3D  
nyomtatással előállítani többféle sajátos funkcionális zónát egyazon monolitikus alkat-  
részen belül és úgy hangolni ezek mechanikus jellemzőit, hogy azok az adott alkalma-  
zás igényeinek feleljenek meg.

Az adidas cég a komoly futók által igényelt teljesítményt és kényelmet szolgáló  
cipők előállítása érdekében lépett szövetségre a Carbon céggel. Olyan megoldást ke-  
restek, amely lehetővé teszi az eltérő mértékű párnázhatóságot a cipő egészében, és  
végső soron kimondottan atletikus lábbelit eredményez. Az alkalmazott *DLS* eljárás  
minden egyes atléta számára biztosítja igényei precíz kielégítését a mozgás, kipárná-  
zás, stabilitás és komfort tekintetében egyetlen alkatrész segítségével, amelynek fel-  
használásával az adidas több, mint 100 000 pár futócipőt remél 2018 végéig értékesí-  
teni.

A digitalizált cipőkomponens gyártófolyamat feleslegessé teszi a hagyományos  
prototípus-készítést vagy a fröccsöntést. Az adidas számára lehetőséget teremtett több  
mint 50 tervezési iterációs lépésre. A partnerek mérnökei közel 150 gyantaiterációt  
vizsgáltak meg. *A végső talpbatét anyaga egy UV kikeményítésű gyanta és poliuretán  
keveréke.* Ez egy merev elasztomer, amelyet térbeli hálós szerkezetté lehet nyomtatni a  
talpbatétet előállításához. E technológia potenciális alkalmazási lehetőséget kínál pél-  
dául kerékpárülésekhez, ortopéd cipőbetétekhez vagy fejhallgatókhoz.

A clevelandi Vitamix cég keverőberendezéseket gyárt otthoni és professzionális  
használatra. Nemrég kötöttek együttműködési megállapodást a Carbonnal abból a cél-  
ból, hogy újratervezzenek és gyártsanak egy olyan speciális fúvókát, amelyet a pro-  
fesszionális berendezésekben használnak. Az ezt megelőző fúvóka kialakítása 6  
fröccsöntött alkatrész összeszerelését igényelte volna.

A Carbon technológiájának alkalmazásával a fúvóka egy darabból, 3D nyomtatás-  
sal készül, tehát nem igényel összeszerelést. A digitális gyártástechnológia révén mind a  
kialakítás, mind pedig a gyártási folyamat ellenőrzése felgyorsult, így a mérnökök hat-  
hét fúvóka kialakítási iterációt tudtak megvalósítani négy héten belül. A fröccsöntő  
technológia alkalmazása esetében egyetlen kialakítási iteráció 8–10 hetet igényelt volna.  
A 3D nyomtatás révén a fröccsöntő szerszámok költségeivel sem kell számolni.

A Carbon cég részt vett az NPE2018 kiállításon, ahol érzékeltetni tudta a poten-  
ciális alkalmazókkal, hogy technológiája egy valóban új gyártási eszköz és nem a tra-  
dicionális fröccsöntési eljárás helyettesítője. Alkalmas olyan termékek gyártására,  
amelyekről különben le kellene mondani. Több olyan szakember is dolgozik a  
Carbonnal, akiknek van fröccsöntési tapasztalata, hogy ezáltal is segítsék partnereiket  
az additív gyártástechnológia által igényelt gondolkodásmód kialakításában. Az új  
technológiával lehetővé válik azoknak a megrendeléseknek kielégítése is, amelyeket  
korábban visszautasítottak a túl rövid átfutási idő igénye vagy a kis darabszámra (pl.  
100 db) eső magas szerszámköltség miatt.

## Funkcionális alkatrészek normál műanyagokból

Az Arburg cég *Freeformer* elnevezésű berendezése normál műanyag granulátum megömlesztésével hozza létre azokat a parányi cseppeket, amelyekből azután rétegenként építi fel az adott alkatrészt. A felhasználható anyagok köre folyamatosan bővül, a termékek tulajdonságai és minősége egyre jobban közelít a fröccsöntéssel gyártottakéhoz.

A kezdeti standard granulátumok, mint az ABS, PA és PC mellett az Arburg folyamatosan bővíti a bevizsgált, az eljáráshoz kvalifikált alapanyagok körét. Jelenleg ez már kiterjed elasztikus TPE, égésgátló adalékkal ellátott PC/ABS keverék, gyógyászati minőségű PLA és a repülőgépgyártásnál használható PC típusra is. Az *AKF* eljárásnál használható standard PP típusuk (*Braskem CP 392*) felhasználásával olyan kábelrögzítőket gyártottak, amelyek filmzsánért és bepattanó kötéseket is tartalmaznak. Ebből a PP típusból emellett ivópoharakat és csavarmenetes kupakokat is gyártottak.

Az eljárás előnye, hogy a gyártási folyamatot a termékkel szembeni követelmények szerint lehet változtatni. A felhasználó által kiválasztott alapanyaggal elvégezheti a minősítési folyamatot és az adott termék elvárásai szerint optimálhatja a gyártási paramétereket, kezdve a rétegenkénti felépítés geometriai elrendezésével a hőmérsékletek beállításán át a kész darab kiemeléséig. Ezeket az adatokat el lehet tárolni és elemezni, ezáltal a kialakítás gyorsan optimálható.

Az *AKM* eljárásnál a cseppméret és a folyamat vezérlése célzottan befolyásolható, ezáltal a fröccsöntött termékekhez hasonló tulajdonságok érhetők el. A paraméterek optimalizálásával javítható a felület minősége, amit az Arburg egy poliamidból készített mobiltelefon-burkolat példáján mutatott be. A *Grilamid BTR 600* alapanyagból gyártott terméknel a darab sűrűsége elérte a fröccsöntött változat 95%-át, húzószilárdsága pedig annak 97%-át, míg ugyanakkor a szakadási nyúlás értéke a többszörösére nőtt. *Makrolon 2804* alapanyagból készített húzó próbatestek az X és az Y irányban azonos értéket szolgáltattak, mint a fröccsöntöttek, a Z irányban pedig 83%-os értéket sikerült elérni, ami a legtöbb alkalmazásnál bőven megfelelő érték.

Az *AKM* eljárással és a fröccsöntéssel készülő termékek költségszámítását az Arburg fröccsöntő gépek egyik alkatrészén, a 0,09 g tömegű PEI-ből készülő távtartó példáján mutatták be. Ebből az alkatrészből évente 1200 darabra van szükség. Ezt a mennyiséget a *Freeformer* egyszerre 70 darab előállításával, összességében 3 óra alatt képes elkészíteni. Egy fröccsöntő géppel a ciklusidő 8 másodperc, így a gyártási idő 40 perc. Ugyanakkor az ehhez szükséges fröccsszerszám ára kb. 8000 EUR. A kalkuláció szerint a fröccsöntés 5540 db/év legyártásánál lenne gazdaságos. Az *AKF* eljárás fix költségei 1792 EUR-ra rúgnak a szükséges 1.200 darab esetében, ami lényegesen alacsonyabb, mint a fröccsöntési alternatívánál.

A *Freeformer* technológia számos termékcsoport előállítására számításba jöhet, mint pl. a háztartási eszközök, gyógyászati termékek, vagy ipari pótalkatrészek. Kiemelt figyelmet érdemelnek a könnyű szerkezetek és a funkciók integrálását igénylő megoldások. Így például jól alkalmazható a bionikusan optimált alkatrészek gyártásához anélkül, hogy a gyártástechnológia okozta megszorításokat (mint pl. a fröccsön-

tésnél) figyelembe kellene venni. A Freeformer eddigi alkalmazásainak példái a következő főbb termékcsoportokra terjednek ki:

- implantátumok, mint a koponya- arc- vagy ujjcsontok előállítása gyógyászati minőségű politejsavból (PLA), amelyek egy idő után a szervezetben felszívódnak, sebészeti beavatkozásoknál használatos, testreszabott vágósablonok (PA),
- a robotok egy adott alkatrész megragadására szolgáló megfogó ujjainak kialakítása kemény/lágy kapcsolatokkal (PA+TPE) a gépkocsigyártás automatizálásához,
- egy ízületekkel mozgatható 61,5 g tömegű kötéltkereselő, burkolattal és rögzítő-kampókkal, vegyszerálló biopoliamidból (Grilamid BTR 600), amely 100 kg terhelést képes elviselni,
- mozgatható bolygó-fogaskerekes görgők kemény/lágy anyag kombinációval TPU és PHA (*Arboblend*) kombinációja (2. ábra), amelyek nem igényelnek összeszerelést,
- a Fraunhofer ICT által a Freeformerrel előállított „Fény-pálcák”, amelyek alapanyagát úgy készítik el, hogy elektromosan vezető szén nanocsöveket (CNT) kevernek be PC/ABS ötvözetbe és így az áramforrástól a pálcába beépített LED fényforráshoz vezethető az energia; ez jó példa arra, hogy a funkcionális anyagokkal megcélzott plusz tulajdonságok integrálhatók egy termékbe.

Az üreges testek 3D nyomtatásánál gyakran van szükség ún. alátámasztó anyagokra, amelyeket a termék elkészítése után eltávolítanak. Az Arburg a korábbi *Armat 11* alátámasztó anyaga mellé nemrég kifejlesztette a vízzel kioldható *Armat 12* típust, amelyet kifejezetten a PP termékek gyártásához ajánlanak. Az *Armat 21* támasztó anyag lúggal oldható ki.



2. ábra A Freeformerrel előállított kétkomponenses (kemény/lágy) funkcionális alkatrészek, bolygó fogaskerekes görgők

### Formahabosító szerszám készítése 3D nyomtatással

Három német cég, a szerszámgyártó Siegfried Hofmann GmbH, a felhasználó WSVK Oederan GmbH és a Fraunhofer Intézet egy részlege (IAPT) közös projektet indított, hogy felmérje az additív gyártástechnológia alkalmazásának előnyeit a formahabosítási eljárás alakadó szerszámainak gyártásánál. Erre a célra egy gőzzel kihabosítható polipropilén gyöngy-polimer típusból (EPP) gyártandó sétabot fogantyú szerszámát készítették el 3D nyomtatással és az összehasonlítás érdekében a hagyományos szerszámkészítési technológiával.

A formahabosításnál alapanyagként valamilyen alacsony forráspontú hajtóanyagot (pl. pentánt) tartalmazó polimergyöngyöket használnak. Az alakadó formát rész-

ben vagy teljesen egy gőzkamra veszi körül, amelyből a gőzt az alakadó formába számos ponton elhelyezett fűvókákkal vezetik be. Az alakadó formába beadagolt és azt kitöltő gömböcskék (gyöngyök) a forró gőz hatására felhabosodva meglágyulnak, kitágulnak és összeforrnak. Ezután a gőzt (és a kondenzvizet) el kell vezetni és a gőzkamrába vezetett hideg vízzel a darabot le kell hűteni, majd a vizet elvezetni. A szerszám szétnyitását követően a terméket kiemelik a szerszámból.

A formahabosítható termékek gyártószerszámainak alkatrészeit hagyományosan alumíniumból, forgácsolással (jórészt marással) készítik el. A szerszámok fala a megfelelő szilárdság és merevség biztosítása érdekében elég vastag. A forgácsolással általában csak a formaadáshoz szükséges anyagrészeket távolítják el, ami szintén a nagyobb falvastagság irányába hat. A forgácsolással történő megmunkálásnál az eljárás-hoz használt eszközök geometriája (pl. a marófejek rádiusza) is korlátozásokat jelent. A fentiek következtében a formaadó rész falvastagsága nem lesz egyenletes, ami ezért (a terméket tervező szándékaitól függetlenül) eltérő felületi hőmérsékleti viszonyokat és ebből adódóan eltérő sűrűségű és szilárdságú részeket hoz létre a felmelegítés és lehűtés során. Az alakadó felület strukturálása további munkafolyamatokat (pl. lézeres maratás) igényel, ami jelentősen (50–100%-kal) megemelheti a szerszám árát. A gőz bevezetésére szolgáló fűvókákat egyenként, manuálisan kell beültetni, és elhelyezésüket a gyártási eljárás gyakran korlátozza. A fűvókák nem egyenletes elhelyezése eltérő hőmérséklet- eloszlást, és ezáltal inhomogén termék jellemzőket okozhat. A fűvókák hatással vannak a termék felületének minőségére is, kedvezőtlen esztétikai hatásukat elhelyezésükkel és/vagy a felület strukturálásával lehet kompenzálni.

Az additív gyártástechnológia alkalmazása a fentiekben vázolt problémák egy jelentős részét orvosolni képes. A kísérleti projekt során a szerszám tervezésénél az első nagy hatású változtatást az jelentette, hogy alumínium helyett rozsdamentes acélt (szinterport) alkalmaztak. Ennek szilárdsága és merevsége nagyobb, mint az alumíniumé, emellett kopás- és karcállósága is jobb. Jelenleg már elég nagy darabok is előállíthatók *szelektív lézer szinterézéssel (SLM)*, pl. a Concept laser GmbH cég *X Line 2000R* berendezése 800x400x500 mm terjedelemben képes dolgozni. A tervezők igyekeztek minél kisebb (az adott példa esetében 1 mm) falvastagságot használni. A kis falvastagság okozta mechanikai problémákat úgy kompenzálták, hogy a gőzkamra és az alakadó rész közötti teret rácsos szerkezetű rendszerrel töltötték ki, ami csekély anyagfelhasználással nagy szilárdságot és merevséget biztosít. *A 3D nyomtatással ugyanis filigrán szerkezetek és alámetszések is minden további nélkül kialakíthatók.* A kis falvastagság az anyagmegtakarítás mellett gyorsabb felmelegedést és lehűtést, tehát rövidebb ciklusidőt is eredményez. A rövidebb ciklusidő és a kevesebb anyag kisebb hőkapacitása természetesen energiamegtakarítással is jár. Míg a forgácsolással történő megmunkálásnál a költségek zömét a megmunkáláshoz szükséges gépidő és munkabér teszi ki, az additív technológiáknál a felhasznált anyagok mennyisége dominál. Ezért a falvastagságok csökkentését eredményező rácsos szerkezetű középső réteget tartalmazó szendvicsszerkezet költség szempontból is előnyös. A 3D nyomtatás során a fűvókák is tetszés szerinti helyre és méretre alakíthatók a folyamat részeként, nincs szükség ezek utólagos beszerelésére. Ennek következtében a tervező elvárásainak megfelelő

helyeken lehet sűrűbb és kisebb sűrűségű, tehát szilárdabb, illetve könnyedebb részterületeket kialakítani. A nagy formaszabadság révén a CAD rendszerben történő tervezésnél megfelelő szimulációk használatával lehet a termék tulajdonságait optimalni. Hasonló a helyzet az alakadó felület textúrájának kialakításával, amelyet tetszés szerinti változatokban, a gyártási folyamat részeként lehet megvalósítani, mintegy 0,2 mm-es felbontással. A gyártás pontossági toleranciája  $\pm 0,25$  mm-en belüli volt, ami az egymással érintkező, a zárást biztosító szerszámperemek esetében is elegendő pontosság a formahabosító szerszámok esetében ahhoz, hogy utólagos megmunkálásra ne legyen szükség.

Az adott kísérleti szerszámmal és egy, a hagyományos technológiával készült szerszámmal ugyanolyan geometriájú és anyagú terméket gyártottak. A 3D nyomtatást egy *M2 dual Laser* berendezéssel (gyártó: Concept Laser GmbH) végezték, támasztó anyagokra nem volt szükség. *Míg a hagyományosé szerszám falvastagsága 10-15 mm volt, a kísérleti 3D nyomtatású szerszámé 1 mm körüli.* Ennek következtében a szerszám 130 kg-os tömege 6,7 kg-ra csökkent. A tömegcsökkenés okozta hőkapacitás-csökkenés és a rövidebb ciklusidő a számítások szerint a gőzenergia-fogyasztást drasztikusan, 4,1 kWó értékről 0,1 kWó szintre csökkentte. A tényleges gyártás során a ciklusidőt csaknem felére (101 másodpercről 56 másodpercre), a szükséges gőznyomást 3,3 bar-ról 2,5 bar értékre lehetett lecsökkenteni.

Összeállította: Dr. Füzes László

Caliendo H.: 3D Printing, Silicon Valley Style = [www.ptonline.com](http://www.ptonline.com) 2018. Nov. <https://www.kunststoffe.de/produkte/uebersicht/beitrag/peek-filament-von-evonik-implantatqualitaet-fuer-den-3d-druck-7374912.html>

Neff M.: Funktionsbauteile aus Originalmaterial = K Zeitung, 4. sz. Febr. 23. 2018. p.12.

Schütz J. et.al.: Druckfrisch in die Zukunft der Partikelschaumverarbeitung = Kunststoffe, 8. sz. 2018. p.70–73.