

A 3D nyomtatás egészségügyi és építészeti alkalmazásai

A prototípuskészítés mellett a 3D nyomtatást egyre inkább használják személyre szabott implantátumok és, a képalkotó diagnosztikai berendezések információt közvetlenül felhasználva, olyan anatómiai modellek elkészítésére, amely segíti a sebészeket a bonyolult műtétek megtervezésében és végrehajtásában. A műanyagokat más anyagokkal is kombinálják. Várható, hogy az egyes kórházak saját 3D nyomtatókat helyeznek üzembe, vagy/és szolgáltatásként veszik azokat igénybe. Az anatómiai modellek az orvospépzést és a betegek jobb tájékoztatását is segítik. 3D nyomtatással épületeket is lehet készíteni, elsősorban a katasztrófa sújtotta területeken és ott, ahol nem áll megfelelő munkaerő rendelkezésre.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; additív gyártástechnológia; PEKK; PEI; PUR; 4D nyomtatás; bionyomtatás.

Az általában 3D nyomtatásnak nevezett additív gyártástechnológia különböző módszereit egyre nagyobb mértékben használják az egészségügyi ellátás különböző területein. Így például különböző képalkotási diagnosztikai módszerekkel (pl. CT, NR) kombinálva segítségével egy adott betegnél lehetőség nyílik egy olyan anatómiai modell elkészítésére, ami a bonyolult operációknál nagyon megkönnyíti és fel is gyorsítja a sebész munkáját. A 3D modellek segítik az orvosok képzését, illetve a betegek felkészítését. A különböző, egyedül formában kialakított implantátumokat is egyre nagyobb számban alkalmazzák. A 3D nyomtatás alkalmazásának jogi környezete is fejlődik, 2017. december 4.-én az amerikai hatóság (FDA) végleges formában kiadta a 3D nyomtatásra vonatkozó iránymutatásait. Ennek elkészítéséhez több mint 100 3D nyomtatással készült egészségügyi alkalmazás tanulságait vették figyelembe (a 2016-os előzetes anyagban még csak 85-öt). Ezek az alkalmazások a térdpótlásoktól az arc rekonstrukciós implantátumokig terjedtek. A szabályozás felöleli az ilyen eszközök bevizsgálását, validálását, a komplex eszközfájlok kezelését, és a betegre szabott eszközök kiberbiztonságát is.

Az egészségügyi alkalmazások területén nagyon dinamikus fejlődés tapasztalható, a versenyben részt vesznek mind a nagy szereplők, mint a General Electric Co., Medtronic plc és Mayo Clinic, mind pedig új, kis cégek, mint az Additive Orthopaedics (2015), Carbon Inc. (2013) és az Oxford Performance Materials Inc. új, biomedikális divíziója, amely 2015-ben kapta meg működési engedélyét.

Anyagok és módszerek az egészségügyben

Az Oxford Performance Materials (OPM) cég *OsteoFab* elnevezésű, lézerszinterezésen alapuló eljárását alkalmazza, az EOS cég berendezéseit és *OXPEKK* alapanyagát, amely, egyéb kedvező tulajdonságai mellett, antibakteriális hatású, arra, hogy koponya és gerinc implantátumokat állítson elő (1. ábra). Az OPM ezt az anyagot 2015-ben vezette be és árulta gerinc implantátumok formájában Európában.



1. ábra Az OXPEKK alapanyagból készült OsteoFab termékek balról jobbra: in vitro csontnövesztő vázak, koponyacsont pótlás, masztoid csontszerkezet, szemüreg rekonstrukciós- és gerinc implantátumok

Ismeretes, hogy a tisztán műanyagból készült implantátumok nem teszik lehetővé a csont növekedését hozzáadott anyagok, mint amilyen a titán bevonat, nélkül. Az OPM cég poli(éter-ke-ton-ke-ton) alapú eljárása kombinálja a fém titán és a PEEK polimer előnyeit, mivel az ilyen termékek az emberi csonthoz nagyon hasonló mechanikai jellemzőkkel rendelkeznek és lehetővé teszik a radiológiai képalkotási módszerek használatát is az implantátum mögött. A PEKK felületi polaritása (felületi feszültsége) olyan, hogy lehetővé teszi, hogy a szükséges fehérjék lerakódjanak a felületén. A 3D nyomtatás során olyan felületi topográfiát alakítanak ki, ami elősegíti ezt a képességet. *Az elmúlt öt évben az OPM több, mint 4400 koponya, arc és gerinc implantátumot állított elő 3D nyomtatással.* Olyan eset is előfordult, hogy a koponyacsont 70%-t pótolták egyetlen darabbal, ami korábban csak több részből volt lehetséges. Egy implantátum elkészítése átlagosan 12–14 óráig tart, ami kiegészül az segédműveletekkel, mint a nyomtatás utáni por eltávolítás, bevizsgálás, csomagolás, stb. Általában a végleges kialakítást tartalmazó adatfájl beérkezését követő 5 napon belül szállítanak, de sürgős esetekben ez 2–3 napra csökkenthető. A 3D nyomtatáshoz használandó anyagot az adott eset követelményeinek megfelelően választják ki, illetve modifikálják. Az OPM kiterjedten vizsgálja termékei tulajdonságait, különösen a gerincimplantátumok esetében (fáradásos, torziós, nyomó vizsgálatok) és a mérési eredményeket egy megfelelően kialakított és szigorúan védett adatbázisban tárolja.

A 3D nyomtató berendezéseket gyártó Stratasys cég képviselője szerint is nagy piaci lehetőségek kínálkoznak a módszer egészségügyi alkalmazásai számára, amit az engedélyezési eljárás felgyorsulása is elősegít. A cég FDM platformja a műanyag hu-

zal megolvasztásos modellezést (FDM®) módszert használja funkcionális darabok elkészítéséhez. A prototípusgyártáshoz ideális eljárást a gyógyászati termékeket gyártó vállalatok arra is használják, hogy kis darabszámú terméket gyártsanak le vele, a fejlesztéshez szükséges kezdeti klinikai vizsgálatokhoz, mielőtt a termék végső formáját kialakítanák a sorozatgyártáshoz. A kísérletek eredményei alapján optimált termékkialakítást tükröző végleges adatfájlt könnyen alkalmazhatják a hagyományos műanyagfeldolgozó eljárások (pl. fröccsöntés) gyártószerszámainak előállításához. A 3D nyomtatással készült termékek növekvő pontossága, reprodukálhatósága és egyre jobb minősége következtében egyre több vállalat alkalmazza azt, a prototípus elkészítését követő fejlesztési lépések során is.

A Stratasy cég *Polyjet 3D Printer* elnevezéssel kínálja termékeit, mint a *J750* típust, amely több színnel képes dolgozni és többféle textúrát képes előállítani. Ez különösen hasznos az élethű anatómiai modellek készítésénél, amelyek felhasználásával az orvosi berendezéseket gyártó cégek kipróbálhatják új termékeiket. Így például a Medtronic cég mind az *FDM*, mind pedig a *Polyjet* nyomtatókból is vásárolt, hogy fejlesztő részlege képes legyen gyorsan és pontosan elkészíteni olyan darabokat, amelyeket felhasználva információkat nyerhetnek azok illeszkedéséről, formájáról és működéséről a berendezések prototípusainak kialakítása során. Ha egy vállalat elkezd használni a 3D nyomtatási eljárást, gyorsan ki szokott derülni, hogy az eredeti elképzeléseken túl mennyi mindenre alkalmas még ez a technológia. Így például lehetőséget ad arra, hogy ha egy korábban gyártott berendezés meghibásodik, a problémás alkatrészt helyettesítésére többféle kialakítású új megoldást próbálhassanak, vagy pedig egy alkatrész kipróbálásához alkalmas kis sorozatok készítésére képes fröccsöntő szerszámot nyomtathassanak vele. Fontos, hogy a fejlesztő mérnökök „együtt nőjenek fel” ezzel az új technológiával, mivel lehetőségeinek alapos ismerete új megoldások kidolgozását teszi lehetővé.

Az additív gyártástechnológia segítségével egyre több orvosi modellt gyártanak. A Stratasy nemrég jelentette be új, *BioMimics Service* nevű szolgáltatását, amely arra szolgál, hogy megrendelésre anatómiailag pontos, biomechanikailag realiztikus és nagymértékben funkcionális modelleket állítsanak elő. E modelleket fel lehet használni arra, hogy a sebészeket kiképezzék nehezen elvégezhető, vagy ritkán előforduló műtétekre, illetve az orvosi berendezéseket gyártó cégek fejlesztői kipróbálják és validálják az új készülékeket. E szolgáltató központ először a csontokra és a szívre koncentrált, de 2018 tavaszától már elérhetők az érrendszer modellek is és a rendszert más anatómiai szerkezetekre is ki fogják terjeszteni. Ez az új szolgáltatás többféle technológiai fejlesztést kombinál, mint amilyenek az új lágy, könnyen alakítható anyagok és az új anyagok feldolgozására alkalmas berendezések. Egy új, *Voxel Print* szoftvercsomagot használnak (a voxel a 2D ábrázolásoknál használt pixel 3D megfelelője). A *Voxel Print* programcsomagot minden Stratasy gyártmányú, több anyaggal dolgozni képes *Polyjet* berendezés tulajdonosa használhatja, hogy voxel szinten legyen képes változtatni a termék színét és az anyag tulajdonságait. A precíz kontroll lehetővé teszi olyan komplex, integrált mikrostruktúrák kialakítását, mint amilyenek a gerinccsigolyák közötti korongok. A tintaágyús nyomtatókhoz elvéhez hasonlóan a berendezés

megolvadt műanyag cseppeket nyomtat. A *VoxelPrint* alkalmazásával minden egyes csepp esetében szabályozható a csepp nagysága, így ezáltal a különböző tulajdonságok, mint amilyen pl. a merevség, gradiense állítható elő a terméken belül.

3D nyomtatás a kórházakban

A 3D nyomtatás előnyeit nem csak az orvosi berendezések gyártói használhatják ki. A Royal Philips NV cég nemrég kötött egy olyan megállapodást a Stratasys és a 3D Systems cégekkel, ami arra irányul, hogy könnyebbé tegyék a kórházak számára a 3D nyomtatás alkalmazását a betegellátásban és a klinikai gyakorlatban. A beteg specifikus, 3D nyomtatott modelleket arra akarják használni a kórházakban, hogy jobban tájékoztathassák a betegeket és megkönnyítsék a bonyolult műtéteket végző sebészek munkáját. Noha 3D nyomtatással készült anatómiai modelleket már évtizedek óta használnak, de nagyon kevesen vannak azok, akik képesek a modern képalkotó diagnosztikai eszközökkel (pl. CT, MR) készült felvételek adathalmazát a 3D nyomtatáshoz szükséges adatfájlokká alakítani. Ezt a feladatot látja el az a programcsomag, amelynek kidolgozásában megállapodtak.

A *Philips IntelliSpace Portal 10* szoftver használatával a kórházi orvos egyszerűen kinyomtathatóvá teheti a beteg CT, vagy MR felvételét. Ezután a gombnyomásra elindíthatja pontos anatómiai modell 3D nyomtatását az intézeten belüli Stratasys 3D nyomtatón, vagy pedig a Stratasys szolgáltató központjában olyan anyagok felhasználásával, amelyekre az adott feladathoz szükség van.

A Philips és a 3D Systems együttműködése lehetővé teszi a páciens specifikus anatómiai modellek elkészítését a 3D Systems cég Healthcare Technology Centerében. A kórházakban történő nyomtatáshoz a cég új *D2P* szoftverét, egy tervező szoftvert és egy 3D nyomtatót használnak. Egyre több kórház vásárol 3D nyomtatót, hogy elősegítsék a betegellátást, vagyis a kórházak ezáltal eszközgyártókká is válnak. Az ily módon előállított anatómiai modellek leggyakoribb felhasználói a radiológusok és a sebészek. Az ilyen 3D nyomtatót tartalmazó kórházi rendszerek kialakításánál a legnagyobb kihívást az jelenti, hogy megtanítsák az orvosoknak az olyan, a gyártással összefüggő elveket, mint a jó gyártási gyakorlat, a minőségmenedzsment-rendszerek, és az általános gyártási koncepciók. A kórházi használatra szánt berendezéseknek kompaktoknak, könnyen használhatóknak és hatékonyknak kell lenniük. Ha olyan feladattal kerülnek szembe, ami a helyi lehetőségeket meghaladja, használhatják a 3D Systems cég Healthcare Technology Centere által nyújtott szolgáltatásokat.

A Johnson & Johnson cég szintén felállított egy központi, 3D nyomtatással foglalkozó részleget (3D Printing Center of Excellence), amelynek az a feladata, hogy a cégcsoporton belüli üzletágaknál támogassa a 3D nyomtatás alkalmazásokat, illetve hogy a 3D nyomtatásnál használt anyagok és eljárások terén fejlesztő munkát végezzen. Az új anyagok terén pl. a testben később felszívódó implantátumokat lehet előállítani, vagy olyan polimereket, amelyek gyógyszereket hordozó vázanyagok lehetnek. Emellett 3D nyomtatással előállítható, személyre szabott sebészeti eszközöket és implantátumokat fejlesztenek a beteg CT és MR felvételeinek alapján. 3D nyomtatással

emellett elő lehet állítani olyan segédeszközöket, amelyek megvezetik a sebész szikéjét, hogy pontosan ott és úgy vágja el a csontot, ahol arra szükség van. Ezáltal lerövidítik az operációt és hatékonyságát is megnövelik.

Specifikus, egyénre szabott vágásvezetőket kínál térd sebészethez a Johnson & Johnson cég egy leányvállalatának TRUMATCH® Personalized Solution (Személyre szabott Megoldások) részlege. A CT és MR felvételek alapján elkészített számítógépes elképzelést elküldik a sebésznek, és figyelembe véve annak változtatási igényeit elkészítik a végleges változatot. A hagyományos módszerekkel egy ilyen segédeszköz elkészítése 6-8 hét, de 3D nyomtatással ez lényegesen lerövidíthető.

Újabb előrelépést jelent majd az ún. 4D nyomtatás, amikor a 3D nyomtatással előállított terméket a testbe beépítést követően víz, elektromos áram, hő, vagy fény hatására aktivizálódik, és megváltoztatja alakját vagy tulajdonságait. Nagy lehetőségeket tartogat az ún. bionyomtatás is, melynek során sejtek 3D nyomtatásával szöveteket, szerveket lehet előállítani. Így a beteg károsodott testrészeit saját sejtjeiből készült szövetekkel lehet majd helyettesíteni.

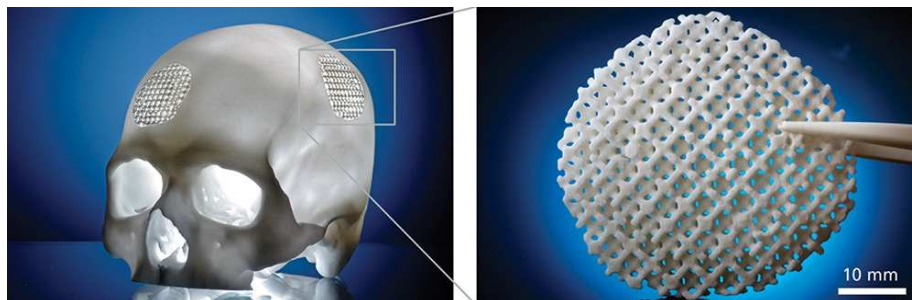
Virtuális valóságban tervezett operációk

A képképző diagnosztikai eljárások eredményeképpen létrejött adatfájlokat nem csak 3D nyomtatással előállított anatómiai modellekként lehet felhasználni, hanem a 3D Systems cég által kifejlesztett virtuális valóság program (Volume Virtual Reality) segítségével a kezelőorvosok és a sebészek közvetlen bepillantást nyerhetnek a beteg szervezetébe diagnosztikai célokból és/vagy megtervezhetik a sebészi beavatkozást. Ha az operációs terv elkészült, a sebész eldöntheti, hol van szükség a betegre szabott vágást és/vagy csontmetszést vezető, vagy pozícionáló segédeszközre, majd elküldheti ezt az információt a 3D Systems cég egészségügyi technológiai központjába (Healthcare Technology Center) kinyomtatásra. Egyelőre nincs lehetőség arra, hogy ezt a 3D nyomtatást a kórházakban végezzék el, mert az ilyen segédeszközök a II osztályú (Class II) egészségügyi termékek kategóriájába tartoznak. A 3D Systems fejlesztői arra törekednek, hogy olyan műanyagokat hozzanak létre, amelyek minél jobban megközelítik az emberi szövetek tulajdonságait, illetve arra, hogy a szoftver minél realisztikusabb képet alkosson. A cél az, hogy a létrehozandó 3D Systems eszközökkel a sebész az operáció előtt fizikálisan, vagy digitálisan minél jobban megtervezhesse a bonyolult műtéteket és a műtét előtt begyakorolhassa a végrehajtást. Mivel a modellek az adott betegre specifikusak, ezért alkalmazásukkal a sebész a műtőben tulajdonképpen már másodszor végzi el az operációt.

A 3D nyomtatás kórházi alkalmazásánál komoly problémát jelent, hogy jelenleg az egészségügyi biztosítók nem térítik meg ennek költségeit. Remélhető azonban, hogy a 3D nyomtatású anatómiai modellek rendkívüli hasznosságát felismerve a kórházak mindenképpen alkalmazni fogják azokat és előbb utóbb a jogi szabályozás is követi e változást.

Egészségügyi polimerek

Noha a lézer szinterezésben, mint az additív gyártástechnológia egyik módszerében érdekelt cégek közül sokan a fémek alkalmazására koncentrálnak, a német Fraunhofer intézet Lézertechnológiai Kutatóintézete (ILT) polimerek gyógyászati 3D nyomtatásával is foglalkozik. Így például olyan polimereket fejlesztenek ki, amelyek helyettesíthetik a titánból készült szemgödör, álkapocs és koponya implantátumokat (2. ábra). A megvalósításhoz idővel a szervezetben felszívódó műanyagokat használnak, mint amilyen a polilaktid és a kicsapott kalcium-karbonát (PCC). A projektben az EOS GmbH, a Schäfer Kalk GmbH a gyógyászati eszközöket gyártó KLS Martin LP és az Acheni Egyetemi Kórház egy részlege is részt vesz. A problémát az jelentette, hogy az egészségügyi engedélyekkel rendelkező polimereket csak granulátum formájában lehet megvásárolni, a lézerszinterezéshez alkalmas (<100 µm) por formátumban nem. Noha oldószerből (pl. kloroformból) történő kicsapással is lehet polimer port előállítani, a nyomokban is mérgező hatású oldószerek eltávolítása nagyon nehéz feladat. Ezért a szinterport órléssel állítják elő. A fémekhez hasonlóan, műanyagok esetében a porozitásnak is fontos szerepe van. Túl nagy energiájú lézersugár alkalmazásakor a polimer elbomlik és a fejlődő gázok pórusokat hoznak létre csökkentve az anyag szilárdságát. Az itt alkalmazott eljárással egy 50 mm átmérőjű és 10 mm vastagságú implantátumot mintegy 2 óra alatt lehet elkészíteni. A PLA kristályossági fokától függően az polimer felszívódása 1–3 évet vesz igénybe.



2. ábra. Az emberi testben idővel felszívódó betegspecifikus koponyacsont implantátuma lézerszinterezéssel polilaktid/CaCO₃ porkeverékből készül

A Carbon cég, amely négy és fél évvel ezelőtt kezdte meg működését, a 3D nyomtatás terén szinte minden területen kínál termékeket és szolgáltatásokat. Az általa gyártott berendezéseket partnerei lízingelik. A cég jelentős mennyiségű biokompatibilitási adatot gyűjtött össze az általa kínált alapanyagokról és intenzív folyamat közbeni monitorozást folytat, ami az additív gyártástechnológiával előállított termékek minőségbiztosításánál alapvető fontosságú. A Carbon által gyártott 3D nyomtatók a cég Digitális Fény Szintézis (DLS) eljárását használják. Ennek során a folyékony műgyanta fény hatására keményedik ki, kiváló mechanikai tulajdonságú és felületi minőségű termékeket eredményezve. Számos más 3D eljárástól eltérően, itt nem fedezhetők

fel rétegek, ezért a termékek minden térirányban azonos tulajdonságokkal bírnak. A kikeményített terméket ezután egy utóhőkezelési folyamatnak vetik alá, ahol olyan kémiai reakciók játszódnak le, amelyek tovább javítják a termék tulajdonságait, amelyek hasonlóak a hagyományos eljárásokkal feldolgozott műanyag (pl. ABS) termékekéhez.

Az eljárás során egy digitális fényvetítőt használnak, amellyel a egymás után következő keresztmetszeteket világítanak meg a termékben, miközben a terméket kiemelik egy meglehetősen sekély UV-aktív gyantatartályból. Ez különbözteti meg eljárásukat a többi folyadékból-szilárd 3D nyomtatási módszertől, amelyeknél ahol az egy mély gyantatartályba merülő termék felső, a levegővel érintkező rétegét világítják meg, miközben minden réteg kikeményedése után a terméket egy rétegnyivel lejjebb húzzák a tartály fenekére felé. Ahogyan a tárgy lépésenként felemelkedik, mindig friss aktív gyantát juttat a felső folyadékrétegbe, amely az inhideált réteg felett „úszik”.

A Carbon cég eljárásánál a tartály fenekén lévő gyantát (kb. 30 µm rétegvastagságban) oxigénnel telítik, hogy ebben a „holt rétegben” teljes mértékben inhideálják a polimerizációt. Így, noha a gyanta összetétele változatlan marad, nem aktiválódik az UV fény hatására. Ez tulajdonképpen a szokásos lézerlitográfias eljárás inverze, mivel itt a termék felső és nem alsó rétegét készítik el először. Ez a polimerizációs gradiens, ahogyan a fényforrás felfelé halad, egységesen összefüggő polimerizált anyagot eredményez, amiben nincsenek rétegek; a termék teljes mértékben monolitikus és izotróp. Ennek következtében mechanikai tulajdonságai jobbak, mint a rétegekből felépülő termékeket eredményező eljárások, ahol a rétegek nem tökéletes egymáshoz tapadása általában gyengébb szilárdságot eredményez a Z tengely irányába.

A Carbon cég eljárásánál az UV fényvel történő kikeményítést egy utólagos, 12 órás hőkezelés követi, melynek során az uretán, cianát, észter vagy epoxi gyantákra jellemző kémiai reakciók zajlanak le. A prototípusgyártáshoz ajánlott két gyantatípus mellett a Carbon cég anyagkínálatába a következő típusok tartoznak:

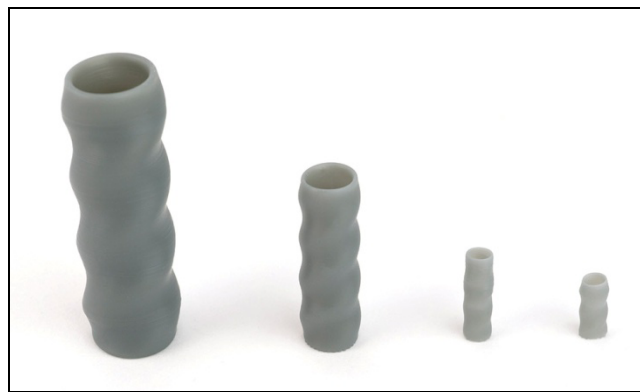
- merev, a poliamidokhoz és az ABS-hez hasonló jellegű poliuretán,
- flexibilis, a polipropilénre emlékeztető poliuretán,
- elasztikus, a kivulkanizált gumira hasonlító poliuretán.

A legtöbb fényre kikeményedő folyékony gyantáját a Carbon cég saját maga állítja elő, elkezdtek egyes, külső forrásból származó gyanták kvalifikációját is, mint amilyen a *Whip Mix* gyanta, amelyet sebészeti vágásvezető segédeszközökhöz használnak a fogászati implantátumoknál.

A gyógyászati eszközök gyártói számára különösen fontos az alapanyagok biokompatibilitása, vagyis hogy az anyag biztonságosan használható legyen az emberi testen vagy a test belsejében. A Carbon nemrég jelentette be, hogy hat gyantája megkapta a biokompatibilitási tanúsítványt, vagyis a belőlük készült termékek folyamatosan érintkezhetnek a bőrfelülettel, vagy a 24 óránál rövidebb időtartamra a száj, vagy más testnyílások nyálkahártyájával (Class I. kockázati osztály). Az ezekből a gyantákból készült termékek a sterilizést követően is megtartják mechanikai szilárdságukat és biokompatibilitásukat. Az ilyen anyagokból például hallókészülékekben és szájban alkalmazott eszközök alkatrészeit lehet előállítani. A cég nemrég dobta piacra a *SIL 30*

szilikon uretán gyantáját, amely kombinálja a szilikon és az uretán kémia elemeit. Az ebből készült termékek lágyak, tépésállóak és biokompatibilesek, ami a gyógyászati alkalmazások mellett a hordható eszközök esetében is fontos követelményegyüttes.

A Carbon cég együttműködést kezdett a Minnesotai Gyerekkórházzal, különféle területeken használt légúti sztentek 3D nyomtatása terén (3. ábra), amelyeket folyamatosan cserélni lehet, ahogyan a csecsemők/gyerekek nőnek. A nagy méretpontosságot igénylő piciny termékek anyaga egyúttal elég rugalmas és tartós ahhoz, hogy a légcsőben fellépő mozgásokat lekövesse. Kísérleteket folytatnak a cég SIL 30 szilikon alapú anyagával olyan beteg gyerekeknél alkalmazható légúti sztentek előállítására, akiknek légcsöve a légzés során összeesik. Természetesen, ahogyan a gyermek növekszik, egyre nagyobb méretű, könnyen kicserélhető eszközre van szükség. Korábban biológiailag lebomló polikaprolakton alapanyagból már készítettek 3D nyomtatással ilyen sztenteket, hogy a légcsövet kívülről megtámasszák.



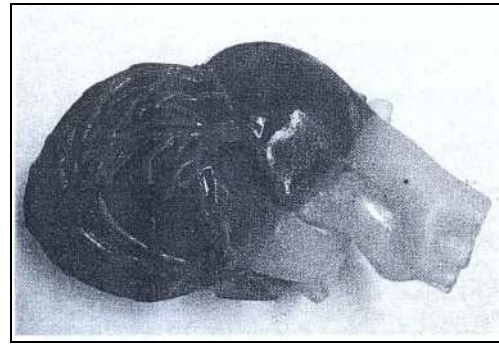
3. ábra A Carbon cég DLS eljárásával UV fényre érzékeny műgyantából nyomtatott, különböző méretű sztentek gyerekek számára

Az Additive Orthopaedics cég szintén 3D nyomtatókat használ, de egyelőre a legtöbb rács szerkezetű implantátumot titánból (és néha más fémekből) készítik, mivel a jelenleg ismert polimerek egyike sem integrálódik hasonlóan jól az emberi szervezetbe. A műanyagokat egyelőre testreszabott sebészeti segédeszközök készítésére használják.

A General Electric 2016-ban jelentette be a Concept Laser cég és az elektronsugárral dolgozó Arcam cég felvásárlását abból a célból, hogy amellyel, hogy vállalatnál globális szinten használja a 3D nyomtatást, ilyen berendezéseket értékesíthessen is. Jelenleg a GE egészségügyi részlege (GE Healthcare) komoly kutatómunkát végez az USA-ban és Svédországban működő 3D additív gyártástechnológiai laboratóriumában. Így például kifejlesztettek egy a fejre alkalmazható, *komplex MRI antennát*, amit 3D nyomtatással (FDM) poliéterimid (PEI) alapanyagból készítettek (4. ábra), megtakarítva a fröccsöntéses megoldásnál szükséges jelentős szerszámgyártási költséget és átfutási időt. Miután ilyen antennából nincs szükség nagy darabszámba, a 3D nyomtatás ideális megoldást jelent.



4. ábra A GE Healthcare cég PEI alapanyagból 3D nyomtatással (FDM) készült MRI fejrész antennái



5. ábra. Polyjet 3D nyomtatóval készült Medtronic anatómiai szívmodell különböző színű és eltérő keménységű területek alkalmazásával

A Medtronic cégnél, amely 1957-ben elsőként kezdte meg a saját áramforrással ellátott hordozható *pacemakerek* gyártását, szintén komolyan foglalkoznak a 3D nyomtatás lehetőségeinek kiaknázásával. A vállalat szívritmus és szívelégtelenség kezelő készülékeket fejlesztő laboratóriumaiban kilenc FDM, lézersztereolitográfias és Polijet 3D nyomtatót használnak arra, hogy hónapok helyett napok alatt állítsák elő a szükséges prototípusokat. A cég termelő vállalatainál pedig további 3D nyomtatók üzemelnek. Az utóbbi négy év során több mint 2200 prototípust és alkatrészt készítettek el segítségével, és több, mint 100 orvos továbbképzését támogatták a 3D nyomtatású anatómiai modellekkel (5. ábra).

A vállalatnál 5–10 évvel ezelőtt már használták a módszert prototípus gyártáshoz, de ez akkor még meglehetősen nehézkes eljárás volt. Ma már két napon belül képesek egy prototípus elállítására, bevizsgálására, majd ennek eredményeit még a hét folyamán beépíteni a fejlesztési folyamatba. Számos implantátum és sebészeti segédeszköz szerszámának prototípusát készítik el ezzel a módszerrel, a valósághű modellek pedig, amelyeknél a szövetek tapintását, behatásokkal szembeni ellenállását is érzékelni lehet, segítik a klinikai munkát. A készen vásárolható szoftvercsomagok mellett a cég saját fejlesztésű programokkal is rendelkezik.

Ahogy a 3D nyomtatás használata terjed, a 21. század mérnökei számára szükségessé vált, hogy képesek legyenek az *additív gyártástechnológia elvei szerint is gondolkodni*, vagyis elszakadni a korábbi, az anyag egyes részeinek eltávolításán alapuló technológiák igényelte gondolkodásmódtól. A Medtronic cégnél dolgozik az USA-ban első doktori fokozatot szerző egészségügyi mérnökök egyike. Korábban a különböző tudományokat felölelő, interdiszciplináris tudományos fokozatok ritkaságnak számítottak. Ma már a rendszer szintű gondolkodás a szakemberképzés integrált része. Az amerikai egyetemek ma már jól felkészültek a képalkotó eljárások, mechanikai ismeretek és a mesterséges, vagy kiegészített valóság ötvöztetésén alapuló képzésre.

3D nyomtatással készülő épületek

A 3D nyomtatást épületek elkészítéséhez Kínában már 2005-ben elkezdték, ahol gyorsan kötő betonból 24 óra leforgása alatt készítettek el egy lakóházat, mindössze 10 ezer USD-nek megfelelő költséggel. Ezt követően a kínai WinSun Decoration Design Engineering Co. *egyetlen nap alatt 10 lakást épített fel betonból.*

Az amerikai Massachusetts Institute of Technology egyetem (MIT) kutatócsoportja nemrég egy olyan önjáró 3D berendezést (6. ábra) fejlesztett ki, amely alkalmas épületek additív gyártástechnológia segítségével történő elkészítésére. Programozható robotok és 3D nyomtatás alkalmazásával egy 3,6 m magas és 16 m átmérőjű épületet (7. ábra) készítettek 14 óra alatt.



6. ábra. Az MIT egyetem önjáró 3D nyomtató berendezése



7. ábra. Az MIT berendezés munka közben felül- és oldalnézetben

A berendezés elkészítéséhez a MIT szakemberei által kifejlesztett *Digital Construction Platform (DCP)* intelligens platformot használták fel, amely az egész berendezést irányítja és a jól kezelhető robotrendszert működteti. A 3D nyomtatónak egy nagyméretű robotkarja van, amely egy olyan kisebb robotkart hordoz, amelyhez különböző eszközöket lehet csatlakoztatni. Így például egy fúvókát, amelyen át folyékony betont lehet önteni, vagy egy szórófejet, amellyel bevonatokat lehet felvinni és poliuretán habot lehet öntőformák és/vagy szigetelés céljából előállítani. Egy marófejet is fel lehet rá szerelni, amivel különböző vágási feladatok végezhetőek el. Emellett a

berendezés földmunkák elvégzésére alkalmas eszközzel is fel van szerelve, tehát saját maga képes az építő munka megkezdésekor a talaj megfelelő előkészítésére. Lehetséges bizonyos helyszíni erőforrások felhasználása. A berendezés elektromos meghajtású, és lehetséges napaelemekkel vagy más megújuló energiaforrásokkal is működtetni.

A 14 óra alatt előállított kísérleti épület elkészítése tulajdonképpen arra szolgált, hogy lendületet adjon a tervezőmérnökök fantáziájának, és elősegítse az additív gyártástechnológia új, innovatív alkalmazását az építőiparban olyan helyeken, ahol az építkezés nagyon nehéz vagy szinte lehetetlen lenne.

A DCP technológia abban is segít, hogy az épületen szabványos méretű ablakoknak és más beilleszthető szerkezeteknek megfelelő méretű nyílásokat alakítsanak ki. A kísérleti épületnél poliuretán öntőformákat készítettek és ezeket fokozatosan betonnal töltötték meg, lépésről-lépésre alakítva ki a kupolaszerű formátumot.

A 3D nyomtatás elsősorban ott lehet nagyon előnyös, ahol gyors megoldásokra van szükség, mivel órák alatt lehet elvégezni azt a munkát, amire egyébként hetekre, hónapokra lenne szükség. Előnyösen használható olyan félreeső vidékeken, ahol nincs megfelelő szakképzett építőipari vagy éppen semmilyen munkaerő. Egy másik kézenfekvő alkalmazást a katasztrófa sújtotta területeken felépítendő ideiglenes szálláshelyek létrehozása jelenti. További előnyt jelentene, ha a hab szerkezeti anyagú ideiglenes épületeket használatuk után gyorsan és környezet kímélően el lehetne „tüntetni” pl. úgy, hogy egy alkalmas oldószerben feloldanak azokat.

Az épületek 3D nyomtatással történő elkészítése a normál körülmények között is számos előnnyel járhat, különösen a kisebb épületek esetében:

- gyorsaság: az amerikai statisztikák szerint egy átlagos családi ház felépítése 6–7 hónapig tart, egy többlakásos házé pedig 11–12 hónapig,
- költségek: a 3D nyomtatásnál a munka- és anyagköltségek jelentősen lecsökkennek; jóval kevesebb szaktudásra van szükség, mivel a gépet kezelő operátor tevékenysége számos különböző szakmunkás közreműködését helyettesíti,
- biztonság: az építőipar veszélyes; az amerikai statisztikák szerint 2016-ban minden ötödik halálos kimenetelű munkahelyi baleset az építőiparban történt; a 3 D nyomtatás esetén jóval kevesebb emberre van szükség, és sokkal kevesebb esetben kell olyan helyeken munkát végezni, ahol a lezuhanás, vagy más jellegű sérülések veszélye fenyeget.
- Egyszerűség; az, hogy így elkerülhető a sokféle anyag, felszerelés helyszínenre vivése és nincs szükség a számos szakma (és a releváns szakszervezetek) közötti nehézkes koordinációra, szintén forradalmasíthatja a kisebb épületek elkészítését.

Az additív gyártástechnológia építőipari alkalmazása még gyerekcipőben jár, közeljövőben számos új gondolat és eljárás kipróbálása várható.

Összeállította: Dr. Füzes László

Giordano G., Lamontagne N.D.: The heart of 3D printing = Plastics Engineering, 74. k. 2. sz. 2018. p.16–26.

Romeo J.: Building the future: How 3D printing will revolutionize the construction industry = Plastics Engineering, 74. k. 3. sz. 2018. p. 16–21.