

Végvári Zsolt¹ 

Optikai elemek 3D-nyomtatással történő előállításának lehetőségei²

Possibilities of Producing Optical Elements by 3D Printing

A 3D-nyomtatás napjainkban már nem számít rendkívülinek. A gyors prototípusgyártáson és az egyedi vagy kis szériás gyártáson túl a 3D-nyomtatók már részei a tömegtermelés infrastruktúrájának is. A 3D-nyomtatható anyagok palettája az elmúlt időszakban a számtalan műanyag mellett sok fémmel is gazdagodott. A 3D-nyomtatású elemek legfontosabb tulajdonsága a prototípusgyártás esetén a forma- és alakhűség, egyéb esetekben általában a mechanikai tulajdonságok számítanak. Jelen cikk azt vizsgálja, hogy az additív gyártástechnológia felhasználható-e olyan termékek előállítására, ahol azoknak az optikai tulajdonságai számítanak elsősorban.

Kulcsszavak: 3D-nyomtatás, optikai alkatélemek, lencse, prizma, tükör

3D printing is no longer an extraordinary thing. In addition to rapid prototyping and one-off or low volume production, 3D printers are now part of the mass production infrastructure. The palette of 3D printable materials has recently expanded from a myriad of plastics to include many metals too. The most important feature of 3D printed components is their dimensional and shape accuracy for prototyping, while in other cases it is usually the mechanical properties that matter. This paper investigates whether additive manufacturing technology can be used to make products where their optical properties are primary important.

Keywords: 3D printing, optical elements, lens, prism, mirror

¹ Tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: Vegvari.Zsolt@uni-nke.hu

² A TKP2021-NVA-16 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Bevezetés

Az additív, vagyis az anyag-hozzáadásos gyártástechnológia nem azonos a 3D-nyomtatással, ez utóbbi csak az egyik lehetséges megvalósítása az additív gyártásnak. Az azonban tény, hogy a 20. század végéig a legtöbb ipari termék előállítása alapvetően szubsztraktív jellegű volt, azaz az anyageltávolításon alapult. Különösen jól látszik ez a jelleg a gépelemek esetében. Itt a hagyományos gyártási módszerek az esztergálás és marás, a nevükben is jelzik, hogy minden esetben egy alpanyagtömbből mechanikus úton addig távolítunk el kisebb-nagyobb darabokat, amíg az a kívánt méretet és formát el nem éri. Egy másik jellemző gyártástechnológia, az öntés (műanyagok esetében a fröccsöntés) nem egyértelműen additív eljárás, hiszen nem az anyag folyamatos hozzáadásával épül a késztermék, hanem egyetlen mozzanat eredményeként jön létre. Léteznek persze igen régi hagyományos és viszonylag széles körben alkalmazott additív technológiák is, mint például a laminálás, ám ezek aránya a teljes termelésen belül korábban igen kicsi volt.³

A 3D-nyomtatás alkalmazási lehetőségei

A múlt század nyolcvanas éveinek végén jelentek meg az első műanyagok olvasztásos réteglekötésére alkalmas eszközök, amelyeket ma már 3D-nyomtatónak nevezünk (az első kiemelkedő szabadalmat Hideo Kodama japán feltaláló nyújtotta be 1981-ben, a találmányát „gyors prototípus-készítő eszközként” nevezte meg).⁴ Ezek az eszközök igen drágák voltak és rendkívül lassan dolgoztak, ám alkalmasak voltak teljesen egyedi, de pontos méretezésű munkadarabok előállítására, amivel nagyban elősegítették komplex termékek, például gépek, gépjárművek fejlesztését. Ezek fejlesztése során igen gyakran előfordul, hogy a mérnökök próbát tesznek egy-egy gépelem, például egy fogaskerek méretének és/vagy formájának átalakításával, ám ehhez minden esetben elő kellett állítani az új fogaskereket. Ehhez nyilvánvalóan nem programozták át a szubsztraktív gyártósorokat, hanem többnyire kézzel készítették el a szükséges alkatrészt, ami nemcsak időigényes volt, de fokozottan kellett figyelni a mérethelyességre is. Az első 3D-nyomtatók ezt a fejlesztést segítették elő a gyors prototípusgyártás (*rapid prototyping*) képességével, amely máig az ilyen eszközök egyik fő alkalmazási területe,⁵ de oktatási céllal is jól használhatók.⁶

A 2000-es évek elején jelentek meg az első, fémek nyomtatására is alkalmas nyomtatók, amelyek nagy lökést adtak az additív gyártástechnológia elterjedésének, hiszen az ezekkel előállított alkatrészek nemcsak méretpontosak voltak, de már mechanikus terheléses próbákra is lehetőséget nyújtottak. Napjainkra a fémek nyomtatása terén már több technológia is versenyben van, némelyik a nyomtatás sebességét tekintve van előnyben a többivel szemben, némelyik a nyomtatás minőségében vagy más paraméterben. A nyomtatható anyagok

³ ZENTAY–HEGEDŰS–VÉGVÁRI 2022.

⁴ RÁKOSI et al. 2023.

⁵ ZENTAY–HEGEDŰS–VÉGVÁRI 2022.

⁶ HEGEDŰS–GYARMATI–GÁVAY 2022; GYARMATI 2023.

palettája is jelentősen bővült. Több tucatnyi eltérő tulajdonságú műanyag alapanyag kapható,⁷ és a 3D-nyomtatásra alkalmas fémek és ötvözetek száma is – technológiától és gyártótól függően – 50 körülire tehető. Ezek alkalmazása azonban számos esetben új nyomtatási eljárás kifejlesztését is igényli.⁸

Bár a 3D-nyomtatás a sebessége miatt, részben a jelentős energiaigényéből fakadóan, általában nem versenyképes a tömeggyártásban, bizonyos esetekben mégis jelen van, mert általa olyan komplex formák is kialakíthatók, amelyek hagyományos szubsztraktív eljárással csak több lépcsőben, több alkatrész kombinációjában, vagy egyáltalán nem hozhatók létre. A 3D-nyomtatók ipari szintű alkalmazásának egyik tipikus terepe a gázturbinák gyártása, ahol a modern hajtóművek olyan bonyolult geometriájú elemeket tartalmaznak, amelyeket korábban csak tucatnyi külön-külön is több lépcsőben előállított alkatrész összeillesztésével gyártottak le, így a 3D-nyomtatás nemcsak gyorsabb, de jobb minőséget is nyújt. A bonyolult geometria alkalmazásának másik előnye, hogy alkalmazásával elhagyható az az anyagmennyiség, amely korábban csak gyártástechnológiai okok miatt volt jelen, de nem vett részt a mechanikai terhek viselésében. Ezzel a módszerrel jelentős tömegcsökkenés is elérhető, ami nemcsak a repülőgép- és űrtechnikában kiemelkedően fontos, de egy-egy alkatrész akár 20%-os lehetséges tömegcsökkenése már az autógyártók érdeklődését is felkelti.

Különösen érdekes kérdés a 3D-nyomtatás katonai, azon belül is a műveleti logisztikában történő alkalmazhatósága. A jelenlegi technológia még mindig nem teszi lehetővé, hogy a 3D-nyomtatók megjelenjenek a katonai műveleti területeken, de a hadseregek élénken figyelik a fejlődést, és maguk is részt vesznek terepi próbákon.⁹ Ugyanis a digitális raktárkészlet filozófiája, ha a gyakorlatban is megvalósul, az hatalmas áttörést jelenthet a katonai műveletek logisztikai támogatása terén.¹⁰

Összességében elmondható, hogy a 3D-nyomtatók ma már egyáltalán nem űrtechnikás berendezések, hanem az iparban széles körben alkalmazott eszközök, amelyeknek további terjedése is előrejelezhető. A már említett gyors prototípus-előállításon túl nagy mennyiségben gyártanak ezzel az eljárással egyedi orvosi implantátumokat, de már a tömegtermelésben is alkalmaznak fém és kompozit 3D-nyomtatókat például különféle járműalkatrészek gyártására,¹¹ sőt katonai célú robbanóeszközök, úgynevezett idomtöltetek előállítására,¹² vagy robbantástechnika oktatására is.¹³ Ugyanakkor a már hagyományosnak tekintett műanyag és fém alapanyagok nyomtatásánál a munkadarab pontos mérete mellett szinte kizárólag a megfelelő mechanikai tulajdonságai (keménység, kopásállóság stb.) számítanak. Viszont léteznek az ipari termelésnek olyan szegmensei, ahol ezek kevésbé lényegesek. Ilyen terület az optikai ipar.

⁷ KALSOOM–NESTERENKO–PAULL 2016.

⁸ LEE–AN–CHUA 2017.

⁹ VÉGVÁRI 2023.

¹⁰ GÁVAY 2023.

¹¹ HEGEDŰS 2023.

¹² EMBER 2023.

¹³ KOVÁCS 2022.

Az optikai elemekkel szemben támasztott követelmények

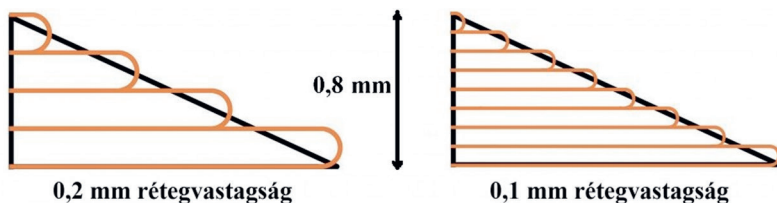
Az optikai eszközöket igen széles körben használjuk, bár a jelenlétük sokszor nem szembetűnő. A korszerű mobiltelefonok és egyéb digitális mobil eszközök szinte mindegyikében van kamera, és abban egy, kettő vagy több lencse. Az optikai eszközök alkalmazása megkerülhetetlen a csillagászatban, de az orvostudományban is. Különösen nagy a jelentősége az optikai eszközöknek a haditechnikában, hiszen nyilvánvaló, hogy például egy korszerűbb, pontosabb irányzóberendezéssel ellátott harckocsi komoly műveleti előnyt élvez a harctéren. Az ilyen eszközök lelke függetlenül attól, hogy hagyományos (például távcső) vagy elektrooptikai (például infravörös) eszközről van szó, az optikai elemek, amelyeket pontosan azért helyezünk a fény útjába, hogy azok a számunkra kívánt hatást (például a távolabbra látást) biztosítsák. Természetesen ezeknek az optikai elemeknek is fontosak a mechanikai vagy egyéb környezetállósági tulajdonságaik, de ezeknél sokkal nagyobb jelentőségűek az optikai jellemzőik.

Az optikai elemeket alapvetően három nagy csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy a működésük a fény milyen tulajdonságán alapul. A fény visszaverődésén, azaz a reflexión alapulnak a tükrök, a fénytörésen (refrakció) a lencsék és prizmák, míg a fényelhajláson (diffrakció) az optikai rácsok. Ez utóbbiak nem hétköznapi eszközök, jobbra csak a fizikusok kísérleti eszközeiben, illetve nagyon drága mérőeszközökben, például lézerdiffrakció elvén működő nm-es tartományú részecskenagyság-mérőben találhatunk belőlük, így gyártásuk volumene sem jelentős. Tömeggyártásuk nehezen is lenne technológizálható, mivel a rácsok távolsága az alkalmazástól függően a μm -es vagy az alatti tartományba esik, miközben nagyon fontos, hogy ez a távolság állandó legyen.

Egészen más a helyzet a tükrökkel, lencsékkel és prizmákkal, amelyekkel gyakran találkozni a mindennapok során is. A legkézenfekvőbb ilyen eszköz a hagyományos síktükrő, amelyet olcsón lehet gyártani az egyszerű táblaüvegből. A domború és homorú gömbtükrök, illetve a paraboloid tükrök előállítása már sokkal nehezebb, itt gyakori, hogy egy hordozó anyagra gőzöléssel viszik fel a tükröződő réteget, amely az esetek nagy részében ezüst, ugyanis ennek az anyagnak a legjobb a reflexiós tényezője, a ráérkező fény mintegy 98%-át visszaveri, és csak 2% veszteséget okoz az elnyelődés. Széles körben használják még az alumíniumot is, ami a némileg rosszabb reflexiót az olcsóságával kompenzálhatja bizonyos esetekben. Ilyen tükröződő réteget sík felszínen is alkalmaznak, ha különösen fontos a jó reflexió. A legtöbb fejtörést a lencsék és prizmák gyártása okozza, amelyeket több lépcsőben, lassú és nagy pontossággal végzendő művelet révén állítanak elő a hagyományos módokon.

Könnyű elképzelni, hogy milyen előnyökkel járna, ha ezt az igen hosszú gyártási folyamatot le lehetne rövidíteni például a 3D-nyomatás segítségével. Az optikai elemek egylépcsős előállítása ugyanakkor valószínűleg még a legkorszerűbb additív technológiák alkalmazásával sem érhető el, mert a gyakorlatban jelenleg elérhető legkisebb rétegvastagságok, azaz 0,05–0,1 mm mellett is szükség van valamilyen utómegmunkálásra,¹⁴ ugyanis az optikai elemek elvárt felületi pontossága akár a néhány μm -es nagyságrendbe is eshet. Ilyen eltérések mérése mechanikus eszközökkel már nem is lehetséges, csak lézeres interferométerrel.

¹⁴ ZENTAY–HEGEDŰS–VÉGVÁRI 2023.



1. ábra: Az alkalmazott rétegvastagság hatása a felület pontosságára
 Forrás: ZUZA 2018

A nem reflexió elvén működő optikai elemek sajátja, hogy azokat a fény útjába tesszük, így ezek legfontosabb tulajdonsága az átlátszóság (transzparencia), ami nem keverendő össze az áttetszőséggel (transzlucencia). Közismert, hogy a fény, amikor egyik közegből átlép a másikba, akkor a Snellius–Descartes-törvény szerint megtörik. Az áttetsző tárgyak átengedik ugyan a fényt, de az anyag egyes részecskéi eltérő törésmutatóval rendelkeznek, így az ilyen anyagból álló tárgyakban a fény szórttá válik, a kép elmosódik. Az átlátszó anyagok törésmutatója homogén, a rajtuk áthaladó fény megtörik ugyan, de a kép éles marad. Az átlátszóságot %-ban szokás megadni, és általában 3–5 mm vastagságú mintákon mérik.¹⁵ Ennek az az oka, hogy az alkalmazott optikai elemek többsége is ebbe a mérettartományba esik, másrészt a nagyobb vastagságú mintákon nem arányosan csökkenne az átlátszóság, ugyanis a jó átlátszóságú anyagoknál a veszteség nagyobb részét okozza a felülethatáron tapasztalható reflexió és csak kisebb részét a közegben történő elnyelődés (abszorpció).

Az optikai elemek alapanyagai és hagyományos megmunkálásuk

A fentieknek megfelelően függetlenül a megmunkálás fajtájától jelentősen leszűkül az alkalmazható anyagok köre. Ezek lényegében a néhány kristály, a különféle üvegek és néhány műanyagfajta. Az optikai eszközökben a kristályok alkalmazása marginális, és a kristályrács mint struktúra okán ezek 3D-nyomatása egyetlen jelenleg ismert eljárással sem megoldható, így lényegében az üvegek és műanyagok állnak a rendelkezésünkre.

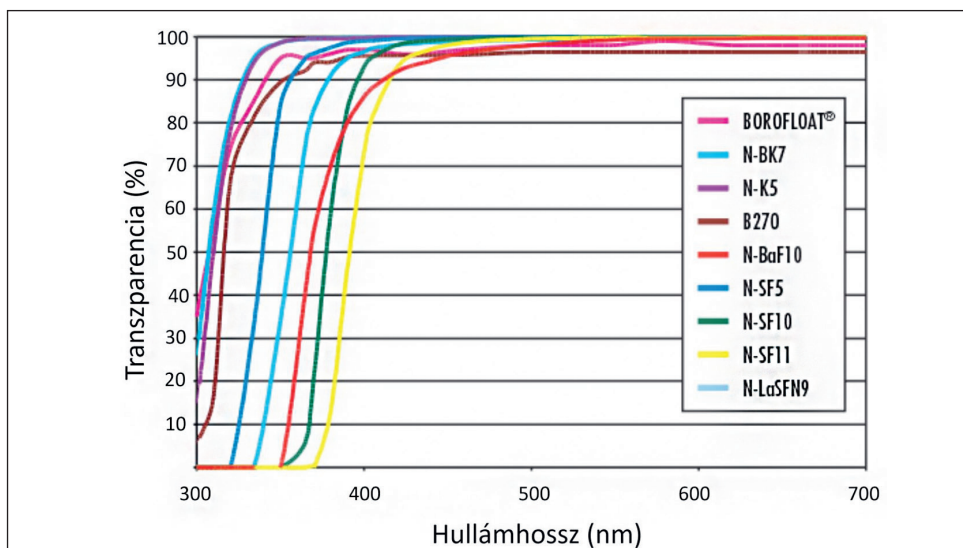
Az üvegeknek számtalan típusa van; a legegyszerűbb a kvarchomok alapanyagból készülő közönséges ablaküveg, ami lényegében szilícium-dioxid némi karbonát és fémoxid adalékkal, amelyek csökkentik a kvarchomok olvadáspontját, egyben javítják a kész üveg kémiai ellenálló képességét. A közönséges ablaküveg átlátszósága a szennyeződés (leggyakrabban vasoxid) mértékétől függően 80–90% körüli,¹⁶ a törésmutatójuk körülbelül 1,45.

Lényegében az optika feltalálása óta gyártanak speciális adalékolással és gyakran ipari titoknak számító eljárásokkal olyan üvegeket, amelyek a hagyományosnál jobb átlátszóságúak, miközben a törésmutatójukat tekintve is rendkívül homogének. Ezeket fénytani üvegeknek nevezzük, két klasszikus fajtájuk a flintüveg és a koronaüveg. A flintüvegeket nehézfémek

¹⁵ WEBER 2003.

¹⁶ WEBER 2003.

(ólom, bárium) oxidjaival és sóival adalékolva gyártják, a törésmutatója 1,75 is lehet (a nagyobb törésmutató kedvezőbb az optikai elemek esetében, mert több lehetőséget biztosít az eszközök tervezése során). A koronaüvegek jellemző törésmutatója 1,6 körüli, ezeket alkálifémek (nátrium, kalcium, kálium) oxidjaival készítik.¹⁷ Már a 18. században is tudtak előállítani olyan üvegeket, amelyek törésmutatója két tizedesjegyre állandó, míg a mai korszerű technológiával előállított fénytani üvegek törésmutatója akár öt tizedesjegyre állandónak tekinthető.



2. ábra: Gyakran használt fénytani üvegek transzparenciája a látható fény tartományában

Forrás: Optical Glass [é. n.]

A flint- és koronaüvegeket is öntéssel állítják elő. Ez egy igen hosszadalmas és energiaigényes művelet, mert az olvadéknak a lehető leghomogénebbnek kell lennie. A kész tömbökből darabolással, marással vágják ki a megfelelő méretű darabot, majd következik a több lépcsőben végrehajtott csiszolás, a polírozás és a központosítás. Ez utóbbit csak a lencsénél kell elvégezni, prizmánál értelemszerűen nem. A kívánt geometriájú elemet gyakran vékonyrétegzésnek is alávetik, például polarizációs szűrőréteget képezve rajta.¹⁸

Az üveg csiszolása annak ridegsége miatt csak igen lassan végezhető el. Csiszolóanyagként a kommersz eszközöknél homokot, professzionális eszközöknél a gyémántéhoz hasonló kristályszerkezetű és hasonlóan kemény szilícium-karbidot használnak, amely ugyan nem mérgező, de rendkívül irritatív anyag, így nagy figyelmet igényel a használata. A csiszolás célja egyrészt a kívánt geometriai forma minél tökéletesebb kialakítása, másrészt pedig a felszín simává tétele, azaz az inhomogenitás csökkentése. Ez a munka rendkívüli precizitást igényel,

¹⁷ BACH-NEUROTH 2013.

¹⁸ GERHARD 2018.

mert a nem tökéletes geometriai forma torzítja a képet, másrészt a nem kellően sima felszínen szóródik a fény, ami szintén rontja a kívánt optikai tulajdonságot. Számos műanyagfajta is létezik, amely átlátszó.

1. táblázat: A közismert átlátszó műanyagok és üvegtípusok összehasonlítása

Közismert név	Teljes név	Rövidítés	Olvadáspont (°C)	Fajlagos tömeg (g/cm ³)	Átlátszóság (%)	Szakítószilárdság (MPa)
polietilén- glikol	polyethylene terephthalate glycol	PETG	250	1,27	92	50
plexi, akril	poly(methyl methacrylate)	PMMA	160	1,19	92	40
polikarbonát	polycarbonate	PC	300	1,2	91	65
ciklikus olefin kopolimerek	cyclic olefin copolymers	COP	120	1,12	93	57
ablaküveg	–	–	1500	2,5	86	7
flintüveg	–	–	1500	2,44–5	99	5–10

Forrás: KALTENBACH 2004 és Overview of Materials for Cyclo Olefin Polymer [é. n.] alapján¹⁹

A fentiekén kívül még sok átlátszó műanyag létezik, például polivinil-klorid (PVC), polietilén (PE), ám ezek optikai tulajdonságai lényegesen rosszabbak, mint a táblázatban foglaltaké. Igazán jó optikai tulajdonságot csak a táblázatban lévő műanyagokkal lehet elérni. Természetesen ezek nem a kereskedelmi forgalomból is ismert anyagok, hanem azok rendkívüli tisztaságú változatai, amelyek előállítása bonyolultabb és drágább.

Az látható, hogy a hagyományos alkalmazás területein (nyílászárók, világítástechnika) a műanyagoknak most is jelentős a piaci részesedése, és ez valószínűleg az egyébként jogos környezetvédelmi aggályok ellenére még tovább fog nőni a hagyományos ablaküvegekkel szemben. Ugyanakkor a professzionális optikai üvegekhez képest még a legjobb műanyagok optikai tulajdonságai is jelentősen elmaradnak. A rosszabb átlátszóság mellett a törésmutatójuk is gyengébb, ráadásul az a hőmérséklet függvényében is változik, mert az üveggel ellentétben a műanyagok már a szobahőmérséklethez viszonylag közeli hőmérsékleteken is meglágyulnak. Ezekből kitűnik, hogy a professzionális felhasználás tekintetében a hagyományosnak tekinthető flint- és koronaüvegek pozícióját nem veszélyeztetik a műanyagok, de a kisebb minőségi elvárásokat támaztó kommersz alkalmazásokban (például mobilszközök), az olcsó műanyagok már most is szerephez jutnak. A műanyagoknak az alacsony olvadáspontja és általában a hőre lágyuló tulajdonsága számos esetben eleve alkalmatlanná teszi őket a használatra. A keménységük sem kiemelkedő, de az üvegekhez képest sokkal kevésbé ridegek, a szakítószilárdságuk egy nagyságrenddel meghaladja az üvegekét, így jól tolerálják a mechanikai behatásokat, ami ugyancsak előnyös lehet néhány területen.

¹⁹ A források többsége eltérő értékeket ad meg, vagy eleve tartományokat. A Kaltenbach-féle könyv tartalmazza a jellemző (átlagos) értékeket, így ezeket tekintetem irányadónak.

Optikai elemek gyártására alkalmazható 3D-nyomatási eljárások

Érdekes módon a hagyományos üveg gyártásának létezik 3D-nyomatatásos eljárása, de ezt extrém formájú üvegtárgyak létrehozására használják,²⁰ aminek oka a mintegy 1500 °C környéki olvadási hőmérséklet. A szilícium-dioxid olvasztékát már képesek szabályozottan lerakni, de az elérhető felbontás csak mm-es nagyságrendű, ami meg sem közelíti az optikai elemek által igényeltet, így nem lenne megspórolható a csiszolás és polírozás nagy része, vagyis semmit sem nyernénk a hagyományos gyártási eljárásokhoz képest.

A műanyag tárgyak additív előállítására a legkézenfekvőbb a szálhúzásos (*fused deposition modeling*, FDM), illetve egyéb anyagkiszajtolásos eljárások nem használhatók igazán optikai elemek gyártására. A műanyagok 3D-nyomatására széles körben alkalmazott professzionális, sőt a hobbicélú FDM-nyomatók többsége is képes ugyan a PETG-alapanyagot kezelni, de ezekkel csak áttetsző tárgyak állíthatók elő, átlátszók nem. Ennek részben oka a technológiával elérhető maximum 200 µm-es felbontás, de a legnagyobb problémát a kiszajtolt anyagban képződő légbuborékok jelentik, amelyek teljesen diszperzzé teszik a nyomatot. Bár optikai elemek gyártására a technológia alkalmatlan, a hobbifelhasználók körében népszerű alapanyag a PETG, mert tetszetős áttetsző tárgyakat lehet készíteni belőle.

A főbb 3D-nyomatási eljárások közül szintén alkalmatlan a laplaminálás (*sheet lamination*) mindegyik fajtája, elsősorban a gyenge, 100 µm-es elérhető legjobb felbontás okán, és az elégtelen felbontásból adódóan a legtöbb porágyas (*powder bed fusion*), kötőanyag- és anyagfűvászos (*binder jetting* és *material jetting*), továbbá közvetlen energiával történő anyagolvasztásos (*directed energy deposition*) eljárás sem használható jelenleg.²¹ Azonban mindegyik megoldásnál folyamatosan javítják a felbontást is. Ha a fenti technológiák bármelyike képes lenne legalább egy nagyságrenddel jobb felbontásra, az valószínűleg könnyen adaptálható lenne nemcsak műanyagok, de az üveg 3D-nyomatására is, így megnyílna az út a flintüveg vagy koronaüveg alapanyagú 3D-nyomatott optikai elemek előállítására felé.

Nagyon jól használható viszont kommersz műanyag optikai elemek előállítására az UV-polimerizáció (*vat polymerization*) egyik fajtája, nevezetesen a sztereolitográfia (*stereolithography*, SLA). Itt fényérzékeny polimergyanta az alapanyag, amely UV-sugárzás hatására megszilárdul. Egy precíz UV-lézer segítségével nagyon pontosan, akár 50 µm-es felbontással ki lehet keményíteni a gyantából a végleges formát, az úgynevezett mikro-sztereolitográfia (µSLA) segítségével pedig akár 2 µm-es felbontás is elérhető.

Még jobb pontosságot (azaz nagyobb felbontást) tesznek lehetővé azok az elmúlt, körülbelül 10 évben kifejlesztett polimerizációs eljárások, amelyek hasonlítanak a sztereolitográfiára, de azzal ellentétesen negatív fotomaszkot hoznak létre. A gyantaszerű szilárd alapanyagból az anyag molekuláihoz hasonló nagyságrendbe eső hullámhosszú infrafénnyel megvilágítva oldhatóvá teszik a felesleges részeket, így ez a módszer érdekes módon nem is tekinthető additívnak, bár mivel rétegről rétegre történik a tárgy létrehozása, egyértelműen 3D-nyomatásról van szó. Az ide tartozó eljárások közül a multifoton-elnyelődéses polimerizációval (*multiphoton*

²⁰ TOOMBS et al. 2020.

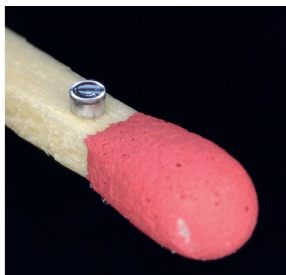
²¹ LEE-AN-CHUA 2017.

absorption polymerization) akár $1\ \mu\text{m}$ -es, a kétfotonos polimerizációval (*two-photon polymerization*) akár $0,2\ \mu\text{m}$ -es, míg az úgynevezett direkt lézerírással (*direct laser writing*) akár $0,1\ \mu\text{m}$ alatti felbontás is megvalósítható,²² ami feleslegessé teszi, vagy legalábbis nagyban leegyszerűsíti az utólagos megmunkálást. A nagy pontosság ára a sebesség, mert egyetlen cm^3 nyomat létrehozása két órát is igénybe vehet.

3D-nyomtatott optikai elemek a gyakorlatban

Amint az látható, a professzionális eszközök esetében a közeli jövőben biztosan megmarad a flint- és koronaüvegből csiszolt optikai elemek általános alkalmazása, ugyanakkor a polimerizációs eljárásoknak köszönhetően óriási lendületet vett a kommersz eszközök körében a műanyag optikai eszközök 3D-nyomtatással történő előállítása, és ma már több cég is kínál a fejlett polimerizációs eljárásokra épített termékeket.

A stuttgarti Printoptix cég már közel tíz éve tervez és gyárt egyedi megrendelésre és/vagy kis sorozatban különleges lencsákat. Specialitásuk a nagyon kis méret, akár $0,2\ \text{mm}$ átmérőnél kisebb lencsákat is képesek nagy pontossággal előállítani. Ezeket gyakran orvosi endoszkópos eszközökben alkalmazzák.²³ Ilyen, úgynevezett mikrolencsákat korábban is készítettek fénytani üvegből, de az új módszer nem csupán olcsóbb annál, hanem számottevően lerövidül az előállításhoz szükséges idő is.



3. ábra: Teljes $1,1\ \text{mm}$ átmérőjű, 90° -os látószögű lencserendszer kétfotonos polimerizációs eljárással gyártva
Forrás: HOGAN 2022

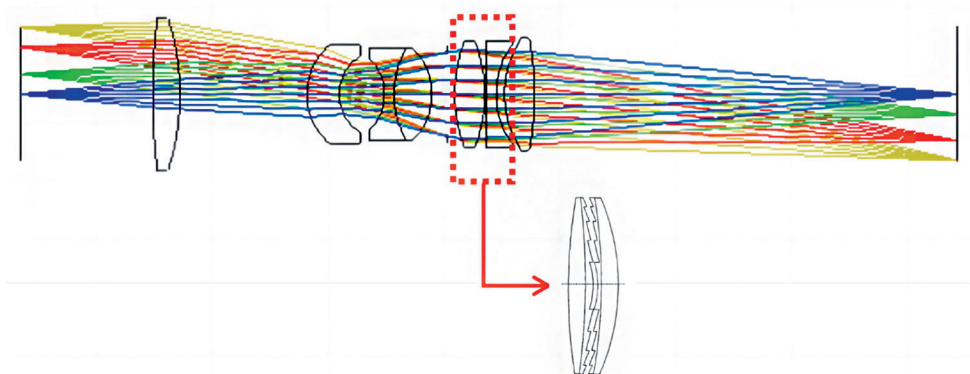
Az ohioi Bataviában székelő R&D Optics 3D-nyomtatási eljárással készít szemüveg- és kontaktlencsákat egyedi igények szerint. A Luxexcel névre hallgató lencséknek igen jó optikai tulajdonságaik vannak. A törésmutatójuk $1,53$ -as értéke megközelíti a flintüvegekéét, az átlátszóságuk is összemérhető a legjobb fénytani üvegekkel, hiszen $99,4\%$ -os, mindössze $0,1\%$ torzítás mellett. A lencsék fajlagos tömege $1,15\ \text{g}/\text{cm}^3$, és minden szükséges egészségügyi engedéllyel rendelkeznek. Kívánság szerint ellátják őket karcálló és/vagy tükröződés gátló réteggel és egyéb szűrőkkel, egyelőre egyedül a polarizációs szűrő hiányzik a lehetőségek

²² BLACHOWICZ–EHRMANN–EHRMANN 2021.

²³ Protonix [é. n.].

közül.²⁴ A cég Luxexcel VisionMaster néven optikai laborok számára teljes szolgáltatást is nyújt, amelybe beletartozik a helyszínen üzemeltetett 3D-nyomtató is. Ezzel a megoldással a korábbi többnapos átfutási idő helyett a recept átadását követő 1–2 óra alatt hozzájuthat a szükséges látásjavító eszközhöz a páciens.

A 3D-nyomtatás technológiája egyre szélesebb körben elérhető, és az orvosi ellátástól kezdve a repülőgépgyártásig már számos területen sok éve alkalmazzák nem csupán prototípusok és egyedi eszközök előállítására, hanem nagyobb sorozatok gyártására is. Eközben az optikai elemek gyártása a nagy pontosság igénye okán csak az elmúlt 10 évben vált lehetségessé. Az itt elvárt néhány nm-es pontosság ugyanis még az orvosi implantátumoknál is nagyobb gyártástechnikai kihívást jelent. Ugyanakkor az optikai elemek területén is ugyanazok az igények jelentkeznek, mint amik korábban például a gépgyártás területén mutatkoztak. Gyors prototípusgyártás, egyedi eszközök gyártása, különleges geometriai formák kialakítása. Ez feltételezi, hogy ha a 3D-nyomtatás technológiája a jövőben nagyobb pontosságot tesz lehetővé, általánossá válik a 3D-nyomtatott optikai eszközök használata.



4. ábra: Összetett ragasztott lencserendszer

Forrás: HU–HUO–CHENG 2022

Nem csupán a 3D-nyomtatás technikája fejlődik, de eközben az alkalmazható anyagok köre is egyre bővül. Az újfajta, egyelőre még többnyire titkos összetételű polimerek megjelenése is csak a sztereolitográfiai módszerek fejlődésének köszönhető. A fellelhető publikációk számából is jól látszik, hogy a területet élénken kutatják mind az anyagtechnológia, mind a 3D-nyomtatás technológiájának oldaláról, így ha áttörés nem is, de folyamatos és dinamikus fejlődés várható. Jelenleg a komplex, képfordítást, nagyítást/kicsinyítést is végző optikai eszközök még gyakran több optikai elem összeragasztásával készülnek, ahol nehéz a megfelelő törésmutatójú ragasztó létrehozása, és a nem feltétlen teljesen azonos optikai tulajdonságú egyes elemek illesztése az optikai problémákon túl mechanikusan is nehézkessé teszi ezek kialakítását.

²⁴ 3D Printed Lenses [é. n.].

Felhasznált irodalom

- 3D Printed Lenses [é. n.]. R&D Optical (blog). Online: <https://randdoptical.com/3d-printed-lenses/>
- BACH, Hans – NEUROTH, Norbert (2013): *The Properties of Optical Glass*. Berlin: Springer.
- BLACHOWICZ, Tomasz – EHRMANN, Guido – EHRMANN, Andrea (2021): Optical Elements from 3D Printed Polymers. *E-Polymers*, 21(1), 549–565. Online: <https://doi.org/10.1515/epoly-2021-0061>
- EMBER István (2023): Additív eljárással készült lineáris vágótöltetek működésének vizsgálata. *Hadmérnök*, 18(3), 5–17. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2023.3.1>
- GÁVAY György (2023): Logisztikai járművek alkatrészpótlása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával. *Katonai Logisztika*, 33(3–4), 208–232. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-3-4-208>
- GERHARD, Christoph (2018): *Optics Manufacturing: Components and Systems*. Boca Raton: CRC Press. Online: <https://doi.org/10.1201/9781351228367>
- GYARMATI József (2023): Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(3), 51–61. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.3.5>
- HEGEDŰS Ernő (2023): Szálerősítéses anyagok 3D-s nyomtatásának hadiipari alkalmazási lehetőségei 1. rész: UAV-k és könnyű járművek a haderőben és a katonai logisztikában. *Haditechnika*, 57(4), 62–66. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.57.4.12>
- HEGEDŰS Ernő – GYARMATI József – GÁVAY György (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó: Harckocsi-sebességváltó modell kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból. *Műszaki Katonai Közlöny*, 32(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>
- HOGAN, Hank (2022): 3D Printing Creates New Optical Possibilities. *Photonics*, 2022. október. Online: www.photonics.com/Articles/3D_Printing_Creates_New_Optical_Possibilities/a68317
- HU, Yuan – HUO, Jiaqi – CHENG, Binpeng (2022): Design of a Hybrid Refractive/Diffractive Lens System for Broadband UV. *Sensors*, 23(1), 143. Online: <https://doi.org/10.3390/s23010143>
- KALSOOM, Umme – NESTERENKO, Pavel N. – PAULL, Brett (2016): Recent Developments in 3D Printable Composite Materials. *RSC Advances*, 6(65), 60355–71. Online: <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>
- KALTENBACH, Frank (2004): *Translucent Materials: Glass Plastics Metals*. Basel (Switzerland): Birkhäuser. Online: <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614320>
- KOVÁCS Zoltán (2022): Robbantás oktatás a katonai Bsc képzésben. In *Fúrás-robantástechnika nemzetközi szimpózium*. Budapest: Magyar Robbantástechnikai Egyesület, 61–75. Online: <https://drive.google.com/file/d/1rz5SiZVwu5CaNyAnpK3XoFsjqq01D7UK/view?pli=1>
- LEE, Jian-Yuan – AN, Jia – CHUA, Chee Kai (2017): Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials. *Applied Materials Today*, 7(június), 120–133. Online: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>
- Optical Glass* [é. n.]. Edmund Optics. Online: www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/optical-glass/
- Overview of Materials for Cyclo Olefin Polymer* [é. n.]. MatWeb. Online: www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=c47e16ad84a047798fc4d1f6172e48f7&n=1&ckck=1
- Protonix [é. n.]: Printoptix. Online: <https://printoptix.com/>
- RÁKOSI Sára et al. (2023): A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(1), 133–148. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.10>
- TOOMBS, Joseph et al. (2020): Volumetric Additive Manufacturing of Silica Glass with Microscale Computed Axial Lithography. *Deutsche Gesellschaft Für Angewandte Optik Proceedings*, 1(1), 1–42. Online: <https://arxiv.org/pdf/2110.01651>
- VÉGVÁRI Zsolt (2023): A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. *Katonai Logisztika*, 31(1–2), 177–198. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177>

- WEBER, Marvin J. (2003): *Handbook of Optical Materials*. Laser and Optical Science and Technology Series. Boca Raton: CRC Press.
- ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő – VÉGVÁRI Zsolt (2022): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei 1. rész. *Haditechnika* 56(6), 56–60. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>
- ZENTAY Péter – HEGEDŰS Ernő – VÉGVÁRI Zsolt (2023): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei 3. rész. *Haditechnika*, 57(2), 57–62. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.57.2.11>
- ZUZA, Mikolas (2018): Everything about Nozzles with a Different Diameter. Original Prusa 3D Printers. Online: https://blog.prusa3d.com/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter_8344/