

**Az additív technológiák
terméktervezési és technológiai
sajátosságai**



Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 111.

**Az additív technológiák terméktervezési és
technológiai sajátosságai**

MMK FAP azonosító:
2023/125-GPT

Gödöllő, 2023. október

A sorozat szerkesztője:
WAGNER ERNŐ
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Gépészeti Tagozatának gondozásában, a 2023. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva

Szerzők:
Zsidai László Dr.
Sarankó Ádám Dr.
Szabó Péter

Lektorálta:
Koperniczky Ferenc

Kiadó:

Magyar Mérnöki Kamara
1117 Budapest, Szerémi út 4.
fap@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

1. Vezetői összefoglaló.....	8
2. Bevezetés	9
2.1. A 3D nyomtatási eljárások rövid áttekintése	10
3. A 3D nyomtatás alapanyagai.....	12
3.1. Bevezetés.....	12
3.2. Alapanyagok megjelenési formái	12
3.3. Filamentek	13
3.3.1. Általánosan elterjedt filament anyagok.....	13
3.3.2. Egyéb filament anyagok.....	21
3.3.3. Támasztó és tisztító filament anyagok.....	23
3.4. Műgyanták (resin-ek).....	26
3.5. Polimer porok, mint alapanyagok.....	31
3.6. Fémek nyomtatása.....	32
3.7. Papír, fa-, műanyag- és egyéb lemezek	37
3.8. Összefoglaló táblázat a megfelelő anyag kiválasztásához	37
3.9. Adalékok	42
4. Geometriai és technológiai tervezési irányelvek.....	45
4.1. A hagyományos és AM tervezési elvek eltérései.....	45
4.2. A 3D nyomtatáshoz tervezés alapfogalmai	48
4.2.1. A 3D nyomtatott modell alapelemei.....	48
4.2.2. Technológiai sajátosságok	51
4.3. Tervezési irányelvek, technológiai korlátok.....	63
4.3.1. Kiemelkedések és hornyok optimálása.....	63
4.3.2. Furatok, csapok nyomtatása	67
4.3.3. Menetes furatok kialakítása	71
4.3.4. Inzertek alkalmazása.....	74
4.3.5. Osztott geometriák alkalmazása.....	76
4.3.6. Lekerekítések, élettörések	80
4.3.7. A munkaasztal-munkadarab tapadás növelése	85
4.3.8. Áthidalók „hidak” és „födémek” tervezése.....	87
4.3.9. Támaszok csökkentési megoldásai.....	90

4.3.10.	Technológiai üritő nyílások tervezése	92
4.3.11.	Alkatrész kapcsolatok, csatlakozások tervezése.....	94
4.4.	DfAM – Design for Additive Manufacturing	99
4.4.1.	Új tervezési módszertan	99
4.4.2.	Generatív tervezőeszközök	100
4.4.3.	Szerkezet-optimalizálás,topológia-optimalizálás	102
4.4.4.	Gyártás-optimalizáció.....	103
4.4.5.	Anizotróp szerkezeti validáció és optimalizáció FEM-szimulációval	104
5.	Technológiai tervezés.....	107
5.1.	Szeletelő szoftverek és az AM gyártás fájlformátuma	107
5.2.	Kitöltés	108
5.2.1.	A kitöltés százalékos mértéke	108
5.2.2.	Kitöltési geometriák.....	109
5.2.3.	Kitöltés szabályozott inhomogenitása	110
5.3.	Támaszok technológiai optimalizálása.....	111
5.3.1.	Támaszok típusai.....	111
5.3.2.	Támaszok technológiától függő sajátosságai	112
5.4.	Orientáció hatása a nyomtatott anyagminőségre	113
5.5.	Munkatérbe helyezés, darabszámok optimalizálása.....	114
5.6.	Utómunkálatok technológiai csoportonként.....	117
5.6.1.	FDM nyomtatás utómunkálatai	118
5.6.2.	SLA/DLP nyomtatott elemek utómunkálatai	120
5.6.3.	SLS nyomtatott elemek utómunkálatai	122
5.6.4.	DMLS	125
5.7.	3D nyomtatott anyagok ragasztása.....	127
5.8.	Monitoring megoldások az additív gyártásban	128
5.8.1.	Alapanyagok felügyelete	130
5.8.2.	A nyomtatási folyamat felügyelete	130
5.8.3.	Alapanyag áramlása, nyomtatási környezet.....	131
5.8.4.	Elkészült nyomat, utólagos ellenőrzése	132
5.9.	Az AM műhely kialakítása.....	134
6.	Előírások, gazdasági szempontok és jövőkép.....	138
6.1.	Digitális átalakulás: a jövő gyárának (FoF) perspektívái az AM tükrében...	139

6.2.	Előírások és minősítések a nemzetközi gyakorlatban	141
6.2.1.	Alapanyagok	141
6.2.2.	Additív gyártási folyamat minősítése	142
6.2.3.	Késztermékkel szembeni előírások	145
6.3.	Munkavédelmi szempontok	146
6.3.1.	Alapanyagok	146
6.3.2.	3D nyomtató üzemeltetése	147
6.4.	Üzleti szempontok értékelése, additív kontra hagyományos gyártás	149
MELLÉKLETEK (esettanulmányok)		153
1. Melléklet:.....		154
<i>Egyszerű FDM nyomtatási példa.....</i>		154
<i>(forrás: Zsidai László, MATE-MI, Gödöllő, [104])</i>		154
2. Melléklet:.....		157
<i>TÍZEZRES DARABSZÁMOK SLS TECHNOLÓGIÁVAL.....</i>		157
<i>(AGC Glass Hungary Kft.)</i>		157
3. Melléklet:.....		159
<i>KOMPOZIT 3D NYOMTATÁSI EREDMÉNYEK.....</i>		159
<i>(DANA HUNGARY KFT.)</i>		159
4. Melléklet:.....		169
<i>FUNKCIONÁLIS PROTOTÍPUSOK SLA NYOMTATÁSSAL</i>		169
<i>(Wöhler)</i>		169
5. Melléklet:.....		172
<i>3D NYOMTATOTT MESTERMINTÁK, KIS- ÉS KÖZEPES SZÉRIAGYÁRTÁSA</i>		172
<i>(Technoplast Group Kft.).....</i>		172
6. Melléklet:.....		177
<i>HATÉKONYABB GYÁRTÁS 3D NYOMTATÁSSAL</i>		177
<i>(SCHOTT Hungary Kft.).....</i>		177
Irodalomjegyzék.....		180

1. Vezetői összefoglaló

A szerzők a Magyar Mérnöki Kamara FAP pályázati anyagát a témakiírás szerint megvalósították. A pályamű elsősorban az additív technológiák megfelelő használatát megalapozó, műszaki termék és technológiai tervezési sajátosságainak a bemutatására irányul. Az elmúlt évtizedben világszerte rohamos mértékben terjedő 3D nyomtatási technológiák miatt egyre sürgetőbbé válik az újragondolt műszaki tervezési irányelvek és módszerek bemutatása. Hazánkban a világtrendeknek megfelelően szintén egyre szélesebb körben használja az ipar 3D nyomtatás különböző típusait, polimer, fém és különböző kompozit anyagok esetében. A technológiai fejlődést megkésve - csak az elmúlt években fellendülve - követi a kapcsolódó szakoktatás (tanfolyamok, szakképzések) ezért a hazai ipari gyakorlat és a képzések jogos igényrel lépnek fel a pályázat keretében készült tanulmány iránt. Ebben a tanulmányban nem pusztán szakmai leírásokat és útmutatásokat találunk, hanem több ipari esettanulmányt is a jelenlegi additív gyakorlati tapasztalataikról. A pályázati anyagban kidolgozott szakmai ismeretek kellőképpen rávilágítanak a lényeges eltérésekre a hagyományos- és az additív technológiák között, számos additív tervezési és technológiai sajátosság bemutatásra kerül, és ezt gazdag illusztrációs háttér, részletes leírások és műszaki paraméterek kísérik. A tagozat szakmai továbbképzéséhez is használható szakanyag, az additív területen dolgozó mérnökök szakmai felkészültségét is hatékonyan segítheti.

A tárgyalt főbb témakörökhöz az additív tervezési sajátosságok mellett az anyagkiválasztás, a folyamat monitoringozás, az additív munkahely kialakítása, a munkavédelmi, üzemeltetési és üzleti szempontok is hozzá tartoznak. A könyv kitekintést nyújt a generatív tervezés és a különféle termék- és gyártás optimalizálások additív tervezésben játszott megnövekedett szerepére és lehetőségeinek a bemutatására a 3D nyomtatás előkészítésében. Az így bemutatott DfAM (Design for Additive Manufacturing) módszerek az additív 3D nyomtatás által nyújtott tervezési és technológiai szabadságnak köszönhetően ma már megkerülhetetlen jelentőséggel bírnak. A pályamű szakmai törzs anyagához szorosan kapcsolódó mellékletek konkrét esettanulmányokon keresztül adnak segítséget, ötleteket a technológia alkalmazására és felhívják a figyelmet annak ipari alkalmazhatóságára.

2. Bevezetés

A korszerű 3D nyomtatás gyökeresen új gyártási és termék tervezési lehetőségeket nyit meg a mérnökök előtt, azonban ezeknek a felismerése és kihasználása ma még nem teljes körű, ez mind az alkatrészek anyagmegválasztásánál mind a topológiai (alak, kitöltés, támasz) lehetőségek kihasználásánál még korlátozóan hat. Ez elsősorban a megfelelő új módszerek ismeretének a hiányára vezethető vissza,

Munkánk célkitűzése az, hogy a mérnökök, géptervezők és technológusok kezébe egy olyan anyagot adjon, aminek segítségével mind több, olyan lényeges feladatot el tudjanak látni, amelyek a 3D nyomtatáshoz tervezett termék minden szempontból optimális kialakításához és gazdaságos gyártásához elengedhetetlen.

A szakmai útmutató az anyag és technológia kiválasztását követően részletes tervezési irányelveket mutat be a terméktervezéshez, amelyek lényegesen eltérnek a hagyományos gyártási eljárások által korlátozott tervezési lehetőségektől. Kitérünk a 3D nyomtatás speciális szoftver és fájlformátum specifikációira és az AM-szempontról formatervezésre, alaksajátosságokra, topológiai, szilárdságtani és nyomtatási szempontból történő optimalizálásra, a DfMA a FEM az AI és a generatív tervezési módszerekre. Külön tárgyaljuk a támaszrendszereket és struktúrákat, a rétegvastagságok és a kitöltések szerepét, csökkentési lehetőségeiket. Felhívjuk a figyelmet a vetemedésekre és törésveszélyekre. Külön fejezet csoportban mutatjuk be az AM gyártástervezési irányelveit és a megoldási lehetőségeket, kitérve a gyártási rendszerbe integrálhatóságra (hibrid gyártás) és az optimalizálásra is, hivatkozva a vonatkozó előírásokra. Fontosnak tartjuk az additív gyártás Ipar 4.0-ban növekvő szerepének, felügyeleti rendszereinek, és az additív gyártási környezet kialakításának a bemutatását. A szakmai anyag az additív technológiák zászlóshajóját képező 3D polimer és kompozit nyomtatás alapvető műszaki kiszolgálását helyezi az előtérbe, de kitér a fémnyomtatás tervezési sajátosságaira is.

A könyv számos útmutatóval, hasznos tervezési tanáccsal, több mint 150 db ábrával, a 100 db-ot meghaladó irodalmi hivatkozással, gyakorlati mintapéldával a gyakorlatban is használható segédanyagot kíván nyújtani a tervezők és a gyártók termék és technológiai tervezéseikhez. A mellékletben, valós ipari esettanulmányokban bemutatott tapasztalatokon és alkalmazási ötleteken keresztül jellemezzük az additív 3D nyomtatás növekvő jelentőségét. A könyv megírásához részben az additív technológiák oktatásában és anyagismereti kutatásában szerzett tapasztalatunk, ötvözve ipari partnerünk széleskörű gyakorlati tapasztalatával alkotják a szakmai hátteret, számos szakirodalmi forrásra támaszkodva.

Megjegyzés: A könyvben található javaslatokat, adatokat és információkat igyekeztünk naprakészen és szakmailag pontosan összeállítani, ugyanakkor a folyamatosan változó technológiák, alapanyagok és az eltérő felhasználási körülmények miatt a szerzők nem vállalnak semmilyen jogi felelősséget vagy garanciát az itt leírtak alkalmazása nyomán bekövetkező esetleges hibákért és károkért.

2.1. A 3D nyomtatási eljárások rövid áttekintése

A 3D nyomtatási eljárásokról részletes leírást nyújt az MMK Kiadványsorozatában megjelent „Dr. Borbás Lajos: Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben” című könyv (MMK-Kiadványsorozata 4. Gépészeti Tagozat FAP-15/2017-GT) [1], amelyet ajánlunk minden szakembernek áttekinteni, a jelen kiadványban leírtak jobb megértése érdekében is. Az előbbiekre alapozva, röviden tekintsük át a 3D nyomtatási eljárásokat, és emeljük ki azokat, amelyek az iparban elterjedtek és jó reprezentálják az eltérő technológiai csoportokat.

A 3D nyomtatási folyamatok ma már számos eltérő típust képviselnek és az egyre-másra megjelenő újabb technológiáknak köszönhetően ez folyamatosan bővül. Az 1. táblázatban számos eljárást láthatunk, amelyek az iparban napjainkban elterjedtek, ugyanakkor a táblázat nem lehet teljes körű, hiszen számos speciális nyomtatás, például az üveg, élelmiszer, beton (épület) és a bioprinting eljárások sem szerepelnek a felsorolásban. Másrészt a technológia újdonság jellege és a napjainkban tapasztalható ugrásszerű elterjedése miatt folyamatosan újabb és újabb altípusok jelennek meg. A szakmai anyagunkban ezt a túláradó technológiai sokszínűséget úgy tartjuk keretek között, hogy három főcsoportra fókuszálunk, amelyek kellőképpen lefedik a legtöbb technológiát. Ezt a három csoportot az alapanyag jellege alapján határoltuk be, amelyek a következők:

- extrudációval filament alapanyag felhasználásával történő nyomtatás, továbbiakban FDM névvel jelöljük (a gyakorlatban használatos a RepRap által adott FFF-Fused filament fabrication megnevezés is),
- folyékony műgyantából (VAT) történő nyomtatás, a továbbiakban SLA/DLP névvel jelöljük,
- és a harmadik a porágyas technológia (polimer és fém alapanyag, amelyet a továbbiakban SLS névvel jelölünk).

1.táblázat. Elterjedt 3D nyomtatási eljárások a technológiai főcsoportok szerint [2] [3] [4] [5]

Főcsoport	Elterjedt név	Angol név/magyar szabad fordítás		Energia	Alapanyagok
Extrudálás	FDM/FFF	Fused Deposition Modeling	olvadék lerakó modellezés	fűtés	polimer/kompozit filament
Műgyanta (Vat) fotopoli-merizáció	SLA	Stereolithography	sztereolitográfia	lézer	polimer gyanta
	DLP	Digital Light Processing	digitális fényfeldolgozás	projektált fény	polimer gyanta
	CDLP	Continuous Digital Light Processing	folyamatos digitális fényfeldolgozás	projektált fény	polimer gyanta
Porágyfúzió	SLS	Selective Laser Sintering	szelektív lézer szinterezés	lézer	polimer por
	DMLS/SLM	Direct Metal Laser Sintering/Selective Laser Melting	közvetlen fém lézer szinterezés	lézer	fémpor
	EBM	Electron Beam Melting	elektron sugaras olvasztás	elektron sugár	fémpor
	MJF	Multi Jet Fusion	színes kötő folyadék kikeményítéssel	kötő folyadék és keményítés	polimer por
Sugaras kötőanyag bevitel	BJ	Binder Jetting	sugaras kötőanyag bevitel	ragasztó cseppek/hőkezelés	fém, homok, gipsz, ásvány porok
	CJP	Color Jet Printing	színes ragasztó sugaras nyomtatás	ragasztó cseppek/UV fény	kompozit por, homok
Csepplerakó eljárások	MJ	Material Jetting	anyagszórás	UV fény	polimer cseppek
	MJP/MJM/Polyjet	Multijet printing	anyaglerakó nyomtatás	lézer	polimer mikro cseppek
	NPJ	Nano Particle Jetting	nano részecske lerakás	hősugárzás	fém, kerámia nanoszemcsék
	DOD	Drop On Demand	csepp lerakás	forma anyag-tárgy anyag	oldható forma anyag, tárgy anyag (viasz, műgyanta)
Közvetlen fémlerakás	EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing	elektron sugaras anyag lerakás	elektron sugár	fém huzal
	LENS/DMD	Laser Emgineering Net Shape	lézer háló formázás	lézer	fémpor, fém huzal
	DED	Directed Energy Deposition	közvetlen energiával rétegezés	lézer	fémötvözet por
Laminációs eljárás	LOM	Laminated Object Manufacturing	laminált rétegeképzés	lézer, vágópenge	papír, kompozit, fa, polimer fólia

3. A 3D nyomtatás alapanyagai

Az alábbi fejezetben a 3D nyomtatás alapanyagait részletezzük az alkalmazástechnikát helyezve az előtérbe. Részletesen foglalkozunk az iparban és mindennapokban leggyakrabban használt alapanyagokról. Fontos tisztában lennünk azonban azzal a ténnyel, hogy manapság a nyomtatható anyagok skálája rendkívül széles, az alapanyag kiválasztásának szinte csak a képzeletünk szabhat határt.

Az alapanyag kiválasztásának számos szempontja van, mely a szakmában kevésbé jártas érdeklődőknek zavaros lehet. Ennek a fejezetnek a fő célja az, hogy mindenki számára érthető módon ismertessük azt, hogy melyik nyomtatási technológiához az egyes alapanyagok melyik megjelenési formája választható (pl. filament, műgyanta vagy por), illetve az, hogy mely technológiához milyen alapanyag választható. Ezen felül említésre kerülnek az anyagok főbb tulajdonságai, illetve, hogy egy bizonyos anyagból nyomtatott objektumot mire tudunk használni, mire alkalmasak.

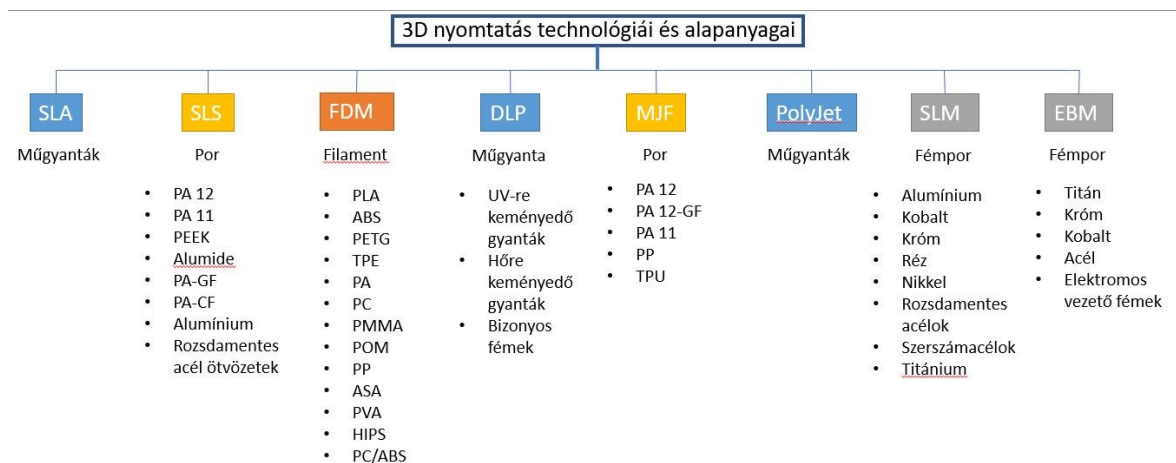
3.1. Bevezetés

A 3D nyomtatás alapanyagainak tárháza rohamos fejlődést mutatott az elmúlt néhány évben, és mutat napjainkban is. Ebben az alfejezetben láthatjuk, hogy műanyagokon és fémeken kívül már szinte minden fő anyagcsoportból választhatunk nyomtatásra alkalmas anyagot. A következő alfejezetekben ismertetésre kerülnek a még manapság is legtöbbször használt polimer, illetve fém alapanyagok. Ezután néhány különleges alapanyag típusra vetünk egy pillantást, mert mindenképp érdemes legalább tudomást szereznünk arról, hogy mi mindent nyomtatnak additív technológiákkal az élet minden területén.

3.2. Alapanyagok megjelenési formái

Az, hogy az adott alapanyagot milyen formában kell beszerezni, az 3D nyomtatás technológiájától függ. Az *3.1. ábra* mutatja, hogy mely technológiákhoz milyen típusú alapanyagot használhatunk. A továbbiakban kitérünk a leggyakrabban használt filamentek anyagaira, a polimer és fémporok anyagaira, valamint a műgyantákra. Ismertetésre kerülnek az alapanyagok tulajdonságai, illetve az adott anyag előnyei és hátrányai egyaránt.

Az alapanyagok megjelenési formái 3D nyomtatás esetén lehet polimer por, fémpor, filament (azaz huzal) és valamilyen folyékony formában beszerezhető műgyanta.



3.1. ábra A legelterjedtebb 3D nyomtatási technológiák és alapanyagai

A továbbiakban az alapanyagok bemutatása megjelenési forma szerint történik kezdve a filamentekkel. Fontos azonban megjegyezni, hogy egyéb anyagokat is használnak 3D nyomtatásra, mint például a kerámia, valamilyen étel (például csokoládé), beton, viasz, papír, bio- és egyéb anyagok.

3.3. Filamentek

3.3.1. Általánosan elterjedt filament anyagok

A filament az FDM (Fused Deposition Modeling) típusú technológia alapanyaga. A technológia igen elterjedt mind az iparban, mind pedig a háztartásokban, kisebb üzemekben. Az FDM technológia hobbi célokra is kiválóan alkalmas a berendezés megfizethető ára, illetve a filament alapanyagok beszerzésének egyszerűsége miatt. Számos hazai és külföldi weboldalon vásárolhatunk magunknak különböző anyagú, méretű (átmérőjű) és színű filamentet (3.2. ábra), aktuális igényeinknek megfelelően.



3.2. ábra Különböző színű és átmérőjű filament tekercsek [6]

A filamenteket általában egy doboz tekercselve vásárolhatjuk meg, melyet a 3D nyomtató berendezés extrúder egységébe kell befűzni, a tekercset pedig egy, általában

erre a célra kialakított rúdra tehetjük. Fontos, hogy az extrúder egység könnyedén tudja húzni, vagy tolni a filamentet, ezért a dobknak könnyedén el kell tudni fordulnia, hogy a filament továbbítása ne legyen akadályozva. Amennyiben a dob megszorul, úgy a filament elszakadhat és a nyomtatás sikertelen lehet, az addig eltelt idő, illetve az addig felhasznált alapanyag kárba mehet. Ha időben észleljük a filament szakadását, akkor a nyomtatási folyamatot szüneteltethetjük, a szakadt szálát eltávolíthatjuk, majd a filament újrafűzése után folytatható a nyomtatási folyamat.

A filamentek kétféle szabványos átmérőben kaphatók. A kisebb átmérő 1,75 mm, a nagyobb pedig 2,85 mm. Utóbbit gyakran 3 mm-nek tüntetik fel, azonban az átmérő szinte mindig kisebb, mint 3 mm. Az, hogy számunkra melyik átmérőre van szükség, az FDM nyomtatónk függvénye. A berendezés leírásában meg kell keresnünk, hogy a gépünk milyen átmérőjű filamenteket tud kezelni. Rendkívül ritka eset az, hogy mindkét mérettel megbirkózik egy berendezés, így gondosan ügyelni kell a megfelelő méret kiválasztására.

A továbbiakban a filamentek anyagai kerülnek ismertetésre részletesen, azonban a teljesség igénye nélkül, hiszen egy-egy anyagról többszáz oldalas dokumentumok lelhetők fel az idegen nyelvű szakirodalomban. Célunk, hogy egy átfogó képet adjunk arra vonatkozólag, hogy a gyakorlatban használt anyagoknak mely tulajdonságaira kell odafigyelnünk, hogy a nyomtatott alkatrész megfelelően elláthassa kívánt funkcióját.

PLA (Polylactic acid)

A PLA, azaz politejsav az FDM technológia egyértelműen legelterjedtebb alapanyaga. Prototípus gyártáshoz, hobbicélokra, illetve dizájnelemek nyomtatására kiválóan alkalmas.

A PLA legfontosabb tulajdonságai közé tartozik, hogy biológiailag lebomló és felszívódó, újrahasznosítható, komposztálható anyag. Nem fosszilis, hanem újrahasznosított anyagokból készül. Szilárd állapotában lehet amorf vagy részben kristályos szerkezetű. Ár/tömeg aránya rendkívül kedvező, ezért is ennyire kedvelt 3D nyomtatási alapanyag. Könnyen nyomtatható, mert olvadáspontja alacsony. Alacsonyabb, mint a szintén rendkívül népszerű ABS-nek, továbbá kevésbé deformálódik hőmérséklet hatására [7].

A PLA főbb tulajdonságai [8], [7]:

- Üvegedési hőmérséklet: 40-70 °C
- Olvadáspont: 130-180 °C
- Nyomtatási hőmérséklet: 190-210 °C
- Melegágy hőmérséklete: 50-60 °C

- Szakítószilárdság: 48-53 MPa
- Rugalmassági modulus: 3500 MPa
- Szakadási nyúlás: 30-240 %

A PLA-nak számos felhasználási területe van. Általában tömegtermékek esetén választják alapanyagnak, mint például élelmiszer- (chipszacskók, tálcák fagyasztáshoz sajt, hal, hús) és italcsomagolás (vizes, joghurtos és gyümölcsleves palackok, joghurtos poharak), pelenkák, eldobható evőeszközök és étkezészetek, ivópoharak (a PLA a PS tulajdonságaihoz hasonló tulajdonságai miatt), samponos flakon, kozmetikai csomagolás, teafilterek, textíliák és szőnyegek, ajtókárpitos díszítések, koptatólemezek, burkolatok, padlóburkolatok, szerszámoszláda, pótkerék burkolatok, padlószőnyegek, műszerfal, ajtókárpit stb. A felsorolt esetekben azért nem a nyomtatás technológiáját alkalmazzák elsősorban, mert ezek tömegtermékek, a nyomtatási folyamat pedig meglehetősen lassú és emiatt nem gazdaságos, de kisebb darabszámban természetesen ezek mind nyomtathatók [7].

PLA nyomtatásakor nem kötelező a munkaasztal melegítése, de célszerű kb. 60 °C hőmérsékletre melegíteni [9].

Nyomtatni olyan objektumokat célszerű, melyekhez szükség van az anyag tulajdonságaira, összetett a nyomtatni kívánt test, illetve a darabszám alacsony. Ilyen alkalmazások például az orvosi implantátumok, egyedi dísztermékek (mobiltelefon tokok stb.) (3.3. ábra).



3.3. ábra PLA anyagból nyomtatott színes játék [10]

A PLA előnyei az alábbiakban foglalhatók össze: sokoldalú felhasználhatóság, környezetbarát anyag, PS-hez és PET-hez hasonló merevség és közel azonos tulajdonságok, biokompatibilitás, könnyen változtatható mechanikai tulajdonságok (a

nyomtatási irány és hőmérséklet változtatásával), illetve energiatakarékosság nyomtatás esetén (a viszonylag alacsony olvadáspont miatt).

Előnyei mellett természetesen bizonyos hátrányokkal is számolnunk kell. Ezek közé tartozik az alacsony üvegedési hőmérséklet (ezt elérve drasztikusan megváltoznak a mechanikai tulajdonságai) és gyenge hőállóság, törékeny, dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállása gyenge (ütésre könnyen törik), lassú bomlási sebesség (teljes lebomlás körülményektől függően 2-8 év implantátumok esetén), csekély hőstabilitás (hőmérséklet hatására mechanikai tulajdonságai romlanak) [7].

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

A PLA mellett az ABS is egy előszeretettel használt filament alapanyag, főleg otthoni és hobbicélú nyomtatás esetén. Általánosságban elmondható, hogy az ABS mechanikai tulajdonságai jobbak, viszont nehezebb nyomtatni. A melegágyas nyomtatás, illetve a jól tapadó felület elengedhetetlen. Ezek hiányában a nyomtatott test deformálódni fog, a nyomtatás alsó síkjai felhajlanak [11].

Az ABS fő tulajdonságai [8], [12]:

- Nyomtatási hőmérséklet: 210-270 °C
- Melegágy hőmérséklete: 80-110 °C
- Szakító szilárdság: 30-43 MPa
- Rugalmassági modulus: 1790 – 3200 MPa
- Szakadási nyúlás: 10-50 %
- Nyomtatási sebesség: 30-60 mm / másodperc
- Ajánlott ágyanyag: üveg + ragasztó

Amennyiben a nyomtató berendezésünk extrúder egysége rendelkezik ventillátorral, úgy ajánlott azt az első réteg nyomtatásakor kikapcsolni, majd ezután legfeljebb a maximális fordulatszám 30%-át alkalmazni.

Az ABS nyomtatásakor mérgező gázok szabadulhatnak fel, így erősen ajánlott a nyomtatás helységében szellőztetni, vagy elszívó berendezést használni [12].

Főként prototípusok, játékok (a LEGO is ABS-ből készül), háztartási eszközök és csőszerelvények nyomtatására használják. Biológiaiilag nem lebomló, azonban újrahasznosítható anyag. Magas olvadáspontja miatt viszonylag jó hőállóságot mutat az olcsóbb anyagok között. Előnyös tulajdonságai ezek mellett a tartósság, rugalmasság, könnyű megmunkálhatóság. Aceton használatával a nyomtatási felület szebbé tehető, a nyomtatott rétegek közötti látható vonalak eltüntethetők.

Hátrányai a korábban említetteken kívül, hogy UV sugárzás hatására hamar elszíneződik, öregedik és rideggé válik, ezért nem ajánlott a nyomtatott termékek kültéri használata. Az ABS termékek könnyen karcolódnak. A nyomtatás közbeni deformáció jelentős, ha nem tartjuk be az ajánlásokat a hőmérsékletértékek megadását illetően. Ekkor a rétegek könnyen felhajlanak, hullámossá válnak, mert a kinyomtatott réteg gyorsan kihűl és a tapadása a következő réteggel nem lesz megfelelő. Az ABS nem használható az élelmiszeriparban, azaz nem érintkezhet élelmiszerrel, ellentétben a PLA-val [13], [12].

PETG (Polyethylene Terephthalate – Glycol)

A PET a világ leggyakrabban használt polimere. Elég csak az üdítő flakonokra gondolnunk máris el tudjuk képzelni, hogy milyen sokszor találkozunk ezzel az anyaggal a mindennapjainkban. A PET ritkán használt 3D nyomtatási alapanyag, azonban a PETG (glikolmódosított PET) igen elterjedt ezen a területen.

Tulajdonságait tekintve valahová a PLA és az ABS közé tehető. Tartósabb és rugalmasabb, mint a PLA és könnyebben nyomtatható, mint az ABS [8].

A PETG fő tulajdonságai [8], [14]:

- Nyomtatási hőmérséklet: 220-250 °C
- Melegágy hőmérséklete: 50-75 °C
- Üvegedési hőmérséklet: 81 °C
- Nyomtatási sebesség: 30-50 mm/ másodperc
- Szakadási nyúlás: 5,9-7,8 %
- Rugalmassági modulus: ~1200 MPa

A PETG felhasználási területei közé tartoznak a különféle élelmiszercsomagolások, érintésvédelmi eszközök, elektronikai szigetelők, hirdetőtáblák. Orvosi felhasználásra is nyomtathatók eszközök, valamint mérsékelt igénybevételű gépelemeket is készíthetünk. Az anyag előnyei közé tartozik az alacsony ár, illetve kiváló kémiai ellenállás. Élelmiszerrel érintkezhet, azonban a gyártóval mindenképp konzultálnunk kell, hogy milyen jellegű élelmiszerről van szó. Könnyen nyomtatható anyagként tartják számon, azonban rugalmasabb, mint a PLA és hővel szembeni ellenállása jobb (kb. 90 °C). Szinte víztiszta termékek is nyomtathatók, a rétegek jól tapadnak egymáson. Dinamikus igénybevételekkel szemben ellenálló, nem rideg.

A PETG legfőbb hátránya, hogy megköti a levegő nedvességtartalmát, mely károsan hat a nyomtatás minőségére. Ajánlott a filament 65 °C-on való szárítása a nyomtatás előtt legalább 6 órán át, a legjobb nyomtatási minőség érdekében. A PETG könnyen karcolódik, könnyebben, mint az ABS [8], [14].

TPE és TPU

A TPE (Thermoplastic Elastomer) egy rendkívül rugalmas, gumyszerű anyag. Olyan objektumok nyomtatására használjuk, melyeknél elvárás a könnyű hajlíthatóság (3.4. ábra). Rugalmasságuk miatt előszeretettel készítenek belőle ütközés- és rezgéselnyelő elemek. Élelmiszerrel érintkezhet, ezért élelmiszer tárolására alkalmas eszközök, illetve gyógyászati segédeszközök is készíthetők TPE-ből. Rugalmasságából adódóan tömítő elemek nyomtatására is használják. Elektromos szigetelőképessége révén vezetékek szigetelésére is jól használható.

Ezeken felül közepesen magas kémiai ellenállóságot mutat, jól tűri a szélsőséges hőmérsékleteket, abráziónak ellenáll, fáradásos igénybevételekkel szembeni ellenállása kiváló. Mérsékelt vízálló anyag, magas szilárdság jellemzi [15], [16].



3.4. ábra TPE anyagból nyomtatott tárgy rugalmasságát szemléltető ábra [8]

Általánosan elmondható azonban, hogy minél rugalmasabb egy alapanyag, annál nehezebb vele dolgozni. Ez a 3D nyomtatás esetén sincs másként. A TPE nehezen nyomtatható anyag [17].

Nyomtatásnál ajánlott betartani a következőket [16]:

- Lassú és egyenletes nyomtatási sebesség
- Közvetlenül a munkaasztalra nyomtassunk (ne használjuk az alátét nyomtatása opciót)
- Használjunk negatív tűréstartományt (nyomtassuk kisebbre a terméket néhány század vagy tized milliméterrel)
- A nyomtató fej és a munkaasztal távolságát állítsuk kisebbre

- Ügyeljünk arra, hogy a filament továbbító egység ne húzza túl nagy erővel a filamentet, mert akkor az megnyúlik és nem lesz megfelelő az átmérője, mire az extrúderhez jut.

TPE fő tulajdonságai [17]:

- Nyomtatási hőmérséklet: 210-260 °C
- Nyomtatási sebesség: 5-30 mm / másodperc
- Melegágy hőmérséklete: max. 60 °C
- Bowden előtolású berendezésekhez nem ajánlott

A TPU (Thermoplastic polyurethane) anyag hasonló a TPE-hez mind tulajdonságaiban, mind pedig nyomtatási beállításait illetően (egyetlen lényeges különbség, hogy TPU esetén az ajánlott nyomtatási hőmérséklet 210-230 °C). A TPU a TPE-nél könnyebben nyomtatható anyag, tulajdonképpen a TPE egy bizonyos fajtája. Manapság, ha FDM rendszerű nyomtatóval flexibilis anyagot szeretnénk nyomtatni, a TPU-t ajánlják, mivel nyomtathatósága közepesnek mondható, keménysége magasabb mégis rugalmas.

PA (Polyamide)

A PA tulajdonképpen egy anyagcsoport neve, melyen belül számos anyagtípus van, mint például a PA 6, PA 66, PA 11 vagy PA 12. 3D nyomtatáshoz nem minden típust használunk a mindennapi gyakorlatban, legalábbis filament formában. Érdeemes tudni, hogy a „Nylon” elnevezés a PA anyagot jelenti, gyakran így találkozhatunk vele idegen nyelvű szakirodalmakban [7].

A PA anyag az egyik legnépszerűbb a poros 3D nyomtatási technológiák körében, azonban filamentként is találkozhatunk vele. A többi anyaghoz képest magas szilárdságú, rugalmas és tartós anyag. Többféle színben elérhető, így játékok, valamint sokszínű objektumok nyomtatására alkalmas. Ehhez szükség van egy olyan berendezésre, mely több filament szálat képes egyszerre kezelni, vagy cserélnünk kell a filament tekercset, ha egyik színről váltanánk a másikra. A PA anyagok egyik fontos tulajdonsága, hogy nedvesség hatására jelentős méret- és mechanikai tulajdonság változások következnek be az anyagban. Épp ezért, csak úgy, mint a PETG esetén, a filamentet száraz, hűvös helyen ajánlott tárolni.

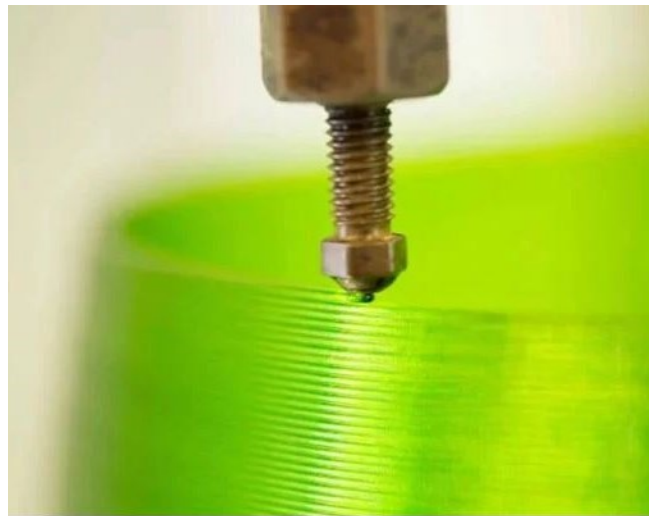
Nyomtatási tulajdonságok:

- Nyomtatási hőmérséklet: 240-260 °C
- Melegágy hőmérséklete: 70-100 °C

Nyomtatásáról elmondható, hogy közepesen nehéz, mivel az alsó nyomtatott rétegek hajlamosak vetemedni, meghajlani. A PA érintkezhet bizonyos élelmiszerekkel, de erről bővebb tájékoztatást célszerű kérnünk az alapanyag gyártójától [8].

PC (Polycarbonate)

A PC-t gyakran összekeverik a PMMA-val (közismertebb nevén plexi), azonban ez két különböző anyagot jelent. A hasonlóságuk abban rejlik, hogy fényáteresztő anyag mindkettő. Általánosságban elmondható, hogy a PC jobb mechanikai tulajdonságokkal bír (3.5. ábra).



3.5. ábra Lámpabúra nyomtatása zöld színű PC filamentet használva [18]

Az eddig felsorolt polimerek mind a tömegtermékek csoportjába tartoztak. Ez összességében azt jelenti, hogy szilárdságuk és egyéb mechanikai tulajdonságaik nem elegendőek ahhoz, hogy teherviselő elemeket készítsünk belőlük. Főleg igaz ez, ha 3D nyomtatással állítunk elő egy alkatrészt. A forgácsolt polimereknek egyelőre jobb mechanikai tulajdonságaik vannak nyomtatott társaikhoz képest, legalábbis az eddig felsorolt anyagok esetén. Ez persze nem azt jelenti, hogy a nyomtatott anyagoknak ne lenne létjogosultsága, viszont főleg dizájnelemek, komoly igénybevétel nélküli tartóelemek stb. nyomtatására a legalkalmasabbak.

A PC, mint anyag már egy belépő szintű műszaki anyagnak minősül, mechanikai tulajdonságai jobbak. Jól ellenáll a dinamikus igénybevételeknek, viszonylag magas szakítószilárdságú, tartós, jó hőálló tulajdonságú anyag. Élelmiszerekkel nem érintkezhet. Leggyakoribb felhasználási területek közé tartozik a kijelzővédő burkolatok, búvármaszkok, egyéb sisakok átlátszó részei, továbbá ütés és golyóálló burkolatok is készülnek belőle.

Nyomtatási tulajdonságai [8]:

- Nyomtatási hőmérséklet: 270-310 °C
- Melegágy hőmérséklete: 90-110 °C

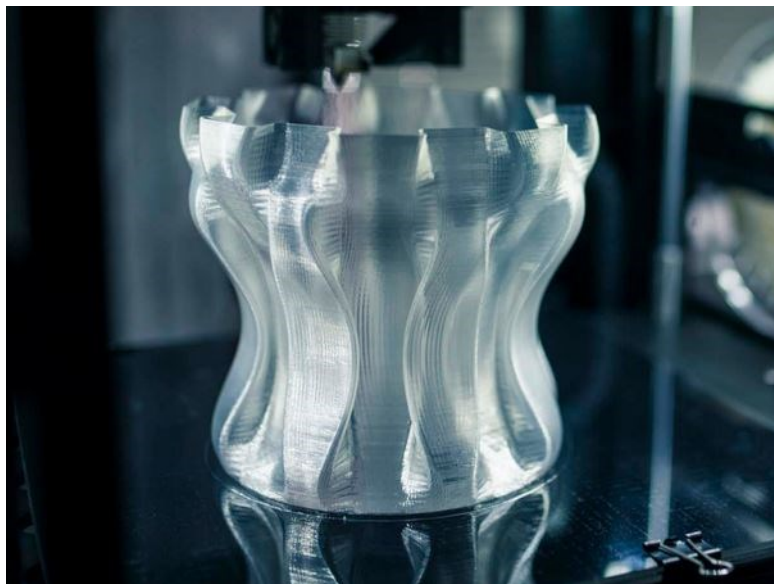
Mint látható, nyomtatási hőmérséklete igen magas, ezért a közepesen nehezen nyomtatható anyagok körét bővíti. Az alsó rétegek vetemedhetnek.

3.3.2. Egyéb filament anyagok

Ebben az alfejezetben a korábbi anyagokhoz képest ritkábban használt filament anyagok kerülnek bemutatásra áttekintő jelleggel. Amennyiben valamely anyagot ezek közül szeretnénk megvásárolni, úgy a kereskedésben vagy a weboldalon érdemes utána érdeklődni az ajánlott nyomtatási paramétereknek, melyeket a gyártók is előszeretettel feltüntetnek a filamenteken, ezzel segítve a felhasználókat.

PMMA (Polymethyl Methacrylate)

A PMMA, közismertebb nevén plexi/plexiüveg egy áttetsző anyag. Felhasználásának jellege főként e tulajdonságából fakad. Ütésálló képessége jelentősen jobb, mint az üvegnek, nem „kardosan” törik. Védőburkolatok, szélvédők, áttetsző panelek, betekintő nyílások készítésére használjuk ezt az anyagot (3.6. ábra).



3.6. ábra PMMA váza nyomtatása FDM technológiával [19]

Nyomtatása kissé nehézkes, hiszen a hagyományos (nem nyomtatott) PMMA megmunkált felülete matt, továbbá nagy előtolás (sebesség) esetén a felület kipattogzik. Nyomtatáskor komoly figyelmet és türelmet igényel azon paraméterek felfedezése, mellyel elérhető a víztiszta felület. Ehhez el kell kerülni a vetemedést, az

extrúziós folyamatnak folyamatosnak kell lennie, magas nyomtatási hőmérséklet szükséges.

Nagyon könnyen karcolódik, illetve rideg anyag. Hajlítással szembeni ellenállása gyenge, rugalmassága kicsi. Nem ajánlott használata akkor, ha hajlító igénybevételnek van kitéve [8], [20].

PP (Polypropylene)

A PP az olcsó tömeganyagok közé tartozik. Élelmiszerrel érintkezhet, továbbá biokompatibilis anyag (emberi szervezet befogadja). Viszonylag jó szilárdságú (szakító szilárdsága: 25-40 MPa). Kémiai ellenállása rendkívül jó. További nagy előnye, hogy a háztartásokban használt PP anyagú eszközök (konyhai eszközök például) újrahasznosíthatók filament formájában.

Előnyös tulajdonságai mégsem emelik a leggyakrabban használt filament anyagok közé, hiszen hátrányos tulajdonságai is vannak. Nevezetesen az, hogy rendkívül nehézkes a nyomtatása. Az alsó rétegek vetemedése jellemzően jelentős, továbbá a rétegek egymáshoz tapadása sem valósul meg minden esetben sikeresen [8], [21].

POM (Polyoxymethylene)

A POM további elnevezései az acetál és a delrin. A POM a műszaki polimerek közé tartozik. Az iparban olyan helyeken terjedt el, ahol fontos a méretpontosság, illetve mérettartósság. Jól megmunkálható anyag, mechanikai tulajdonságai olcsóbb társaihoz képest jók (3.7. ábra). Kopásálló, rideg, jó súrlódási tulajdonságokkal rendelkezik, így súrlódó elemeket, siklócsapágyakat és fogaskerekeket, sőt cipzárat is gyakran készítenek belőle. Kémiai ellenálló képessége jó, mérsékelt hőálló anyag. Abrázióknak ellenáll ridegsége révén. A mérettartó tulajdonsága abból fakad, hogy nedvességre, illetve hőhatásra kevésbé változik a térfogata.



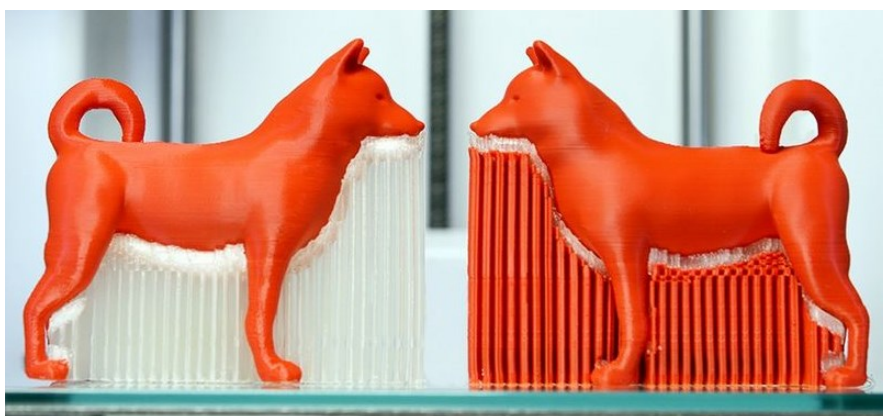
3.7. ábra Nyomtatott POM fogaskerekek [22]

Számos kiváló tulajdonsága mellett azonban említést kell tenni a negatívokról is. A POM nagyon nehezen tapad meg a nyomtató ágyzatán, munka asztalán. A rétegek közötti delamináció jelentős. Ragasztása nehézkes, nagy nyomtatási hőmérséklet esetén mérgező gázok, gőzök szabadulnak fel. UV fényre könnyen öregedik, azaz mechanikai tulajdonságai romlanak, tartóssága csökken [22].

3.3.3. Támasztó és tisztító filament anyagok

Ebben az alfejezetben néhány különleges filament anyag kerül bemutatásra. Azért számítanak különlegesnek, mert használatuk nem a 3D nyomtatott termékek tulajdonságait teszik jobbá, hanem a nyomtatási folyamatot könnyítik meg, vagy épp teszik lehetővé. Vannak anyagok, melyek szinte kizárólag olyan feladatokat látnak el, mint a támasztás vagy a tisztítás. Az alábbiakban ezekből ismertetünk néhány jellemzően használt típust.

Támaszanyagok használata sok esetben elkerülhetetlen. Az, hogy mennyi támaszanyag szükséges egy nyomtatott objektum esetén, függ annak a geometriájától és orientációjától. Az 3.8. ábra olyan helyzetet mutat, ahol a nyomtatott objektum geometriájából adódóan támaszanyagot kellett használni. A bal oldalon egy olyan megoldási módszer látható, melynél a támaszanyag valamilyen oldószerben oldódó anyagból lett nyomtatva. A jobb oldalon ugyanaz az objektum oly módon lett megtámasztva, hogy a támasz nagy része magából az objektum anyagából lett felépítve, míg azokon a részeken, ahol csatlakozik a támasz az objektummal, ott egy oldható anyagot használtak. Ez a megoldási módszer azért kedvező, mert gyakran ezek az oldható anyagok drágábban beszerezhetők, így a jobb oldali kép egy költséghatékonyabb megoldást ábrázol.



3.8. ábra Eltérő oldható anyag megoldások támasztásra [23]

HIPS (High Impact Polystyrene)

A HIPS tipikusan az oldható támaszanyagok közé sorolható. Limonénben oldódik, így könnyedén eltávolítható a késztermék alól, vagy körül. A limonén egy természetes alapú, biobomló oldószer, melyet a 3D nyomtatásban tipikusan HIPS oldására használnak. A HIPS önmagában is használható termékek nyomtatására, de ez kevésbé jellemző felhasználási területe. Amennyiben így kívánjuk felhasználni, akkor egy rugalmas, de kemény anyagot kapunk eredményül.

A HIPS támaszanyagként való felhasználásának hátránya, hogy kizárólag ABS filament támaszaként használható, mert a limonén az ABS-en kívül minden más filament anyagot is károsít. A limonén kisebb mennyiségben alkalmas a HIPS objektumok felületének egyenletesebbé tételére is [8], [24].

PVA (Polyvinyl Alcohol)

A PVA egy széleskörűbben használható oldható támaszanyag, mely vízben oldódik. Az ilyen jellegű filamenteket kizárólag támasztási célra fejlesztették olyan esetekre, ahol a nyomtatási folyamat után, az alkatrész bonyolultsága miatt a támasztékokat csak nagyon nehezen, vagy egyáltalán nem lehetne eltávolítani a késztermékről. Mivel a PVA vízben oldódik, így a levegő nedvességtartalma is káros hatással lenne egy tisztán csak PVA anyagból nyomtatott objektumra, így ez a felhasználási mód egyáltalán nem használatos.



3.9. ábra Bonyolult geometria támasztása PVA filament használatával [25]

Az 3.9. ábra egy rendkívül összetett 3D nyomtatással készült geometriát szemléltet. Látható, hogy az objektum kialakítása miatt támasztékokat kell használnunk nyomtatás során. Az is megállapítható, hogy a támasztásokat kézzel eltávolítani (csípőfogó, csiszoló berendezés stb.) szinte lehetetlen, vagy túl sok időt igényelne. Az

ilyen esetekben válik elengedhetlenné a könnyedén és egyszerűen oldható támaszanyagok alkalmazása, mint amilyen a PVA.

A PVA hátránya az előnyéből fakad, miszerint a levegő nedvességtartalmi kikezdi az anyagot. Ebből adódóan csak rövid nyomtatási folyamatoknál (40 perc alatti nyomtatási idő) használható. Amennyiben ennél tovább tart a nyomtatás folyamata, mely igen gyakran előfordul, úgy egy páramentesített helységben célszerű a nyomtatást végezni, mely valljuk be nem minden háztartásban fordul elő, illetve a költségeket is nagyban megnövelheti [26].

Cleaning, azaz tisztító filament

A Cleaning (magyarul: tisztító) filament, egy speciális filament típus, melyet sem támasztáshoz, sem objektumok nyomtatására nem használnak, funkcióját a neve is tükrözi. A Cleaning filament az extrúder egység tisztítására való. Különösen hasznos, amikor különböző hőmérsékleteken nyomtatunk különböző színű vagy fajtájú filamenteket. Ha az előzően nyomtatott filament nyomtatási hőmérséklete magasabb, az utána befűzött, teljesen más színű filamenté pedig alacsonyabb, akkor a színek könnyedén keveredhetnek, továbbá eltömődés is előfordulhat. A Cleaning filamentet ennek elkerülése érdekében tudjuk használni (1,10. ábra).



3.10. ábra Cleaning filament kézi befűzése tisztítás közben [27]

A Cleaning filament 150-280 °C között nyomtatható, tehát megvannak a felhasználási korlátai. Hátránya továbbá, hogy használata a nyomtatási folyamat közben időt igényel, így növekszik a teljes nyomtatási idő [8].

Előnye, hogy a színek nem keverednek majd használatával, illetve, hogy gazdaságosnak mondható a használata, hiszen csak egy viszonylag rövid (10 cm-es) darabot kell

átnyomni az extrúderen, hogy elérjük a kívánt hatást, így egy tekercs vásárlásával sokáig nem lesz probléma a tisztítási folyamat.

Összefoglalás

Láthattuk, hogy számos filament anyag áll rendelkezésre a piacon. A filamentek azonban nem csupán polimer anyagból állhatnak, igen gyakran a polimerek csak hordozó szerepet töltenek be és az igazán lényeges funkciót valamilyen adalékanyag látja el (az adalékokat lásd egy későbbi fejezetben).

A filamentek és az ezeket használó additív technológiák igen elterjedtek, akár hobbicélú nyomtatásra is. Viszonylag olcsón beszerezhető mind a nyomtató berendezés, mind az alapanyag. Szinte minden hobbicélú alkalmazásra találunk megfelelő alapanyagot. Fontos azonban észben tartanunk, hogy a polimereknek vannak igen hátrányos tulajdonságaik is, például a fémekhez viszonyítva. Hőállóságuk és szilárdságuk jelentősen alacsonyabb és bár tömegük jelentősen kisebb, komolyabb igénybevételek esetén nem feltétlenül a polimer alapanyagok között érdemes kutatnunk.

3.4. Műgyanták (resin-ek)

A műgyantákat (angolul: resin) az SLA (Stereolithography), A DLP (Digital Light Processing) és a PolyJet 3D nyomtatási technológiák esetén használhatjuk. Csak úgy, mint ahogyan a filamenteknél is olvashattuk, a műgyanták esetén is több lehetőség közül kell kiválasztanunk a számunkra megfelelőt. Ez a fejezet a műgyanták fő fajtáit tekinti át.

Műgyanták esetén a folyadék halmazállapotú anyagot SLA technológia esetén lézerrel, DLP technológiai esetén pedig UV fény hatásával keményítik ki. A kikeményedést követően általánosan elmondható, hogy a modellek mérettartók lesznek, jól viselik az alacsony, illetve magas hőmérsékleteket. A műgyanta fajtájától és típusától függően különböző mechanikai tulajdonságúak és kémiai ellenállásúak lesznek. Általánosan elmondható, hogy a nyomtatás kellemetlen szagokkal jár, így elszívó berendezés vagy szellőztetés erősen ajánlott. A nyomtatott tárgyakat minden esetben le kell öblíteni. Erre általában alkoholt, egyes műgyanták esetén vizet használhatunk. A vízzel öblíthető műgyantákra általában ráírja a gyártó, hogy „water washable”, azaz vízzel mosható. Ilyen esetekben azonban nem szabad például konyhai lefolyóban mosni a nyomtatott objektumot, hiszen a műgyanták mérgező hatással lehetnek az emberi szervezetre. Mindig körültekintően járunk el és ügyeljünk arra, hogy műgyanta ne kerüljön a szervezetünkbe [28].

A műgyantákat nem anyag szerint, hanem típus szerint szokás csoportosítani. A továbbiakban e csoportokról olvashatunk.

Standard műgyanták

Ez a legelterjedtebb típus a műgyanták közül. A leggyakoribb színek a szürke, fehér, fekete, áttetsző, türkiz és kék. Általános célú tárgyak nyomtatására használják, nem elterjedt használata speciális esetekben. Főleg vizualizációs célból nyomtatnak ezzel a típusú műgyantával [29].

A standard műgyanták közé tartozik a „clear” (víztiszta) típusú és az ún. „draft” műgyanták. E két gyantatípust egyes szakirodalmak külön csoportba sorolják. A clear gyanták különlegessége a színe, pontosabban víztiszta mivolta (3.11. ábra). A draft műgyanták tulajdonságai hasonló a standard gyantákéhoz. A különlegessége ennek a típusnak az, hogy a kikeményedési idő negyed- vagy ötödrésze a standard típuséhoz képest. Épp ezért ezeket prototípus gyártáshoz használják, de van egy számottevő hátrányuk, mégpedig a nyomtatási felbontás. A rétegek magassága körülbelül 0,3 mm, ami ún. lépcső-effektust eredményez. Ez azt jelenti, hogy a rétegek elhelyezkedése egymáson szemmel látható és kézzel könnyedén kitapintható, mely precíziós nyomtatás esetén kizáró tényező.



3.11. ábra SLA technológiával nyomtatott dísz tárgyak „Clear” műgyantából [30]

Tartós, erős műgyanták (Tough resins)

Ha funkcionális objektumot szeretnénk nyomtatni, akkor ebből az anyagcsoportból érdemes választanunk. Általában PP vagy PE alapú műgyanták tartoznak ide, de szokás ezeket az anyagokat ABS vagy PC szerű anyagoknak is nevezni. Nagyobb szilárdság, dinamikus igénybevételekkel szembeni ellenállás, jó megmunkálhatóság jellemzi a tartós műgyanták csoportját. Homokfűvás során sem sérül a nyomtatott objektum és utómunkáláshoz is kiválóan használható, mint például a fűrés vagy menetvágás (a standard műgyantából készült tárgyak az ilyen típusú megmunkálásokra érzékenyebbek, pl. fűrés közben megrepedhet az anyag). Fárasztó igénybevételekkel szembeni ellenállása a műgyanták között remek.

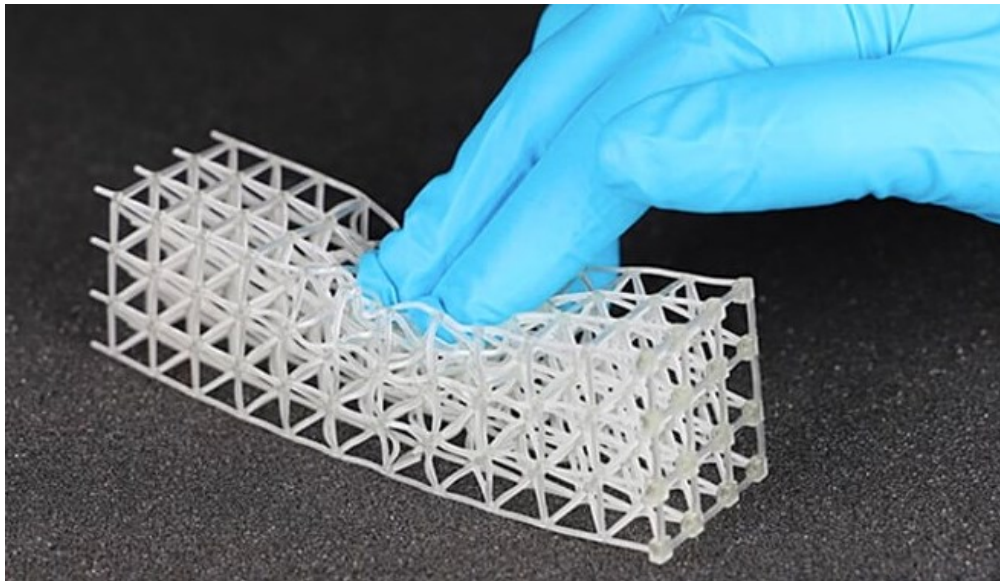
Az anyag hátrányai közé sorolható a relatív magas ár, illetve a szokásosnál intenzívebb szaghatás [29], [28].

Nyomtatáskor ajánlott betartani a következőket [31]:

- Ne nyomtassunk közvetlenül a nyomtató munkaasztalára. Először egy alapréteget nyomtassunk, majd erre készítsük el a készterméknek szánt objektumot. Ajánlott melegágyas nyomtatási technikát alkalmazni.
- A késztermék mosását izopropil alkohollal végezzük, maximum 20 perc időtartamig.
- A nyomtatott objektum rugalmassági szilárdsága növelhető, ha utólagos kikeményítést eszközölünk.

Rugalmas műgyanták (Flexible resins)

Ebbe a csoportba tartoznak a rendkívül rugalmas műgyanták. A kinyomtatott termékek gumiszerűek, azaz deformálhatók. Deformáció után visszanyerik eredeti formájukat, így hosszú használati idő érhető el velük. Tartósan összenyomhatók és hajlíthatók (3.12. ábra).



3.12. ábra Rugalmas, összenyomható 3D nyomtatott test [32]

A rugalmas műgyanták alapanyagai általában az EPU (Elastomeric Polyurethane), illetve az FPU (Flexible Polyurethane). Az EPU a fröccsöntött poliuretánhoz hasonló tulajdonságú. Széles hőmérséklet tartományban megtartja rugalmasságát, hajlékonyságát. Emiatt ortopédiai eszközök, mint például talpbetétek nyomtatására kiválóan alkalmas. Az FPU azonban némileg rideg, de dinamikus igénybevételekkel szemben ellenálló. Jól ellenáll a fárasztó igénybevételeknek is. Tulajdonságaiban leginkább a fröccsöntött PP-hez hasonlítható. Szakadási nyúlása igen magas, mintegy 280 % [28].

Fogászati műgyanták (Dental resins)

A fogászati műgyantákat első sorban biokompatibilitást igénylő alkalmazások esetén használják. Ahogyan a neve is mutatja, főleg fogászatban terjedt el (3.13. ábra).

Ez a gyantatípus nem tartalmaz mérgező, emberi szervezetre ártalmas komponenseket. Jellemzője, hogy bonyolult formák (mint például egy emberi fog) nyomtathatók nagyon magas precizitással, sima felülettel [32].



3.13. ábra 3D nyomtatással készült emberi fogak [33]

Összefoglalás

Mint láthattuk, a műgyanták körében is széles a kínálat. Többféle alkalmazáshoz választhatunk ebből a csoportból. A csoportokon belül is nagy kínálat mutatkozik a piacon, számos gyártó termékét megtalálhatjuk. Ahhoz, hogy ki tudjuk választani a céljainknak megfelelő műgyantát, érdemes véleményeket olvasni az adott gyantáról.

Általánosan elmondható, hogy a műgyantát használó 3D nyomtatási technológiákkal sokkal jobb nyomtatási minőség érhető el, mint például az FDM technológiával. Vannak ún. 8K műgyanták, melyeknél a 8K egy LCD képernyő nagyon magas felbontására utal. Ezeknél az anyagoknál rendkívül komoly nyomtatási minőség érhető el, de a nyomtató berendezésünknek is tudnia kell a magas felbontást. Mindig győződjünk meg arról, hogy berendezésünk képes-e garantálni az elvárt minőséget.

Előnyeik kívül hátránya a műgyantáknak a magasabb ár, illetve, hogy általában mérgező komponenseket is tartalmaznak az alapanyagok. Bőrre kerülve égési sérüléseket produkálhat, illetve allergiás tüneteket válthat ki. A műgyantás nyomtatás mindig nagyon veszélyes, így különösen óvatossá kell lennünk. Műgyantás technológiával nyomtatott objektum - a fogászati műgyanták kivételével - nem érintkezhet élelmiszerrel!

A műgyantából készült objektumoknak kétféle kikeményedési fázisa van. Az első fázis a nyomtatási technológiából ered. A nyomtató térben megtörténik a kikeményedés. Mikor azonban a nyomtatási folyamat befejeződött, a késztermék gyakorlatilag úszik a ki nem keményedett műgyantában (a technológia jellegéből adódóan). A terméket a nyomtatóból minden esetben gumikesztyűben vegyük ki. Kivételt követően izopropil alkohollal (legalább 90 %-os) le kell öblíteni. Ezzel tudjuk eltávolítani a ki nem keményedett, még folyékony állapotban lévő műgyantát.

Az öblítési folyamat után ajánlott egy második kikeményedési fázist biztosítani a nyomtatott objektumnak. Erre a legjobb megoldás, ha egy UV kamrába helyezzük a tárgyat.

A folyékony műgyanta kezelése is komoly odafigyelést igényel. Mindig gumikesztyűt és munkavédelmi szemüveget használjunk, amikor a folyékony műgyantát kezeljük nyomtatás előtt vagy után. Fokozottan ajánlott elszívó berendezést használni a mérgező gázok miatt.

Végezetül: A folyékony műgyantát olyan helyen kell tárolni, hogy azt UV fény ne érje, hiszen ebben az esetben beleköt a tároló edénybe és használhatatlan lesz nyomtatásra [34].

3.5. Polimer porok, mint alapanyagok

A polimereket beszerezhetjük filament és műgyanta formájában is. Vannak azonban olyan 3D nyomtatási technológiák, melyek alapanyagai polimer porok. A polimer porok alapanyagként való felhasználása erősen korlátozott. Egyes nyomtatótípusok csupán a legalapvetőbb porokat képesek feldolgozni, más gyártók berendezései viszont kizárólag a gyártó által előállított, egyedi porokat képesek kezelni.

A műanyag porokat tekintve az ipar 90 % -ban a PA (polyamide) porokat alkalmazza. A maradék 10 % -ban használnak még TPU, PEEK (Polyether ether ketone), PP és PE anyagokat is, de elmondható, hogy a polimer porok tekintetében a PA az egyeduralkodó.

A poliamidok több fajtája létezik, melyből a poros technológia főként két alapanyag fajtát használ, melyek a PA 11 és a PA 12 [24]. Ezt a két alapanyag típust gyakran keverik szén- és üvegszállal, valamint alumíniummal.

PA 11

A por formában beszerezhető PA 11-ből nyomtatott objektumok szilárdsága eléri, sőt meghaladja a legjobb PLA filamentből készült testek szilárdságát. Azoknál kevésbé merev, sokkal kevésbé hajlékony, dinamikus igénybevételeket jobban bírja, sűrűsége 20-25 %-kal alacsonyabb, ezért szilárdság / sűrűség viszonya jobb [7].

A PA 11 teljes mértékben bio alapú poliamid, amelyet megújuló forrásból szintetizálnak. Tömegéhez képes magas szilárdságú, jól ellenáll fárasztó igénybevételeknek, kiváló vegyszerállósággal rendelkezik és jól ellenáll az öregedés folyamatának. Teljesen újrahasznosítható, jó súrlódási tulajdonságokkal rendelkezik és mérettartó (3.14. ábra).

A bioalapú PA 11 por fő tulajdonságai a következők [7]:

- Sűrűség: 0,96-1,07 g/cm³
- Szakítószilárdság: 45-54 MPa
- Szakadási nyúlás: 38-47 %
- Rugalmassági modulus: 1392-1800 MPa



3.14. ábra PA 11 polimer porból SLS technológiával előállított járműalkatrész [35]

A PA 11-t prototípus gyártásban, repülőgép- és autógyártásban, élelmiszeriparban, orvosi területeken, háztartási cikkek esetén és minden olyan egyéb területet használják, ahol szükség van előnyös tulajdonságaira [36].

PA 12

A PA 12 polimer por tulajdonságai szinte teljesen megegyeznek bioalapú társáéval. A PA 12 azonban 12 szénatomot tartalmaz, az anyagot kémiai úton állítják elő. A PA 12 szakadási nyúlása kisebb, csupán 6-11 % [37], [38].

Alkalmazzák élelmiszeriparban, műszaki gyakorlatban gépelemként (például fogaskerék alapanyagként), és prototípus gyártásban.

3.6. Fémek nyomtatása

A fémnyomtatás alapanyaga lehet fémpor vagy huzal. Fémporokat használnak alapanyagként például az SLM, a DMLS (Direct Metal Laser Sintering) és az EBM technológiák. Általánosságban elmondható, hogy a fémnyomtató berendezések költsége magasabb, illetve általában az alapanyag is drágább. Cserébe viszont jelentősen magasabb szilárdságú termékeket nyomtathatunk. Minden olyan igaz az additív technológiák esetén is, mint ami alapvetően a polimerek és fémek különbségére

igaz, többek között nehezebbek, drágábbak, nagyobb szilárdságúak, a hőt jobban viselik.

Szerszámacél

A szerszámacélok (martenzites acél) általában meglehetősen drágák, a magas ötvözettségük miatt. Tartalmaznak ~0,03% korbont, ~17-19 % nikkelt és ~8-12 kobaltot. Ezáltal magas szakítószilárdságuk van, de emellett szívósak. A szerszámacélok rendelkeznek a legjobb szilárdság / tömeg aránnyal. Hőkezelhető anyagok, melyekkel tulajdonságaik tovább változtathatók a felhasználástól függően. Nevükből adódóan főleg szerszámok készülnek belőlük. A szerszám kifejezés nem a kézi szerszámokat foglalja magába, hanem például hajlító-, mélyhúzó-, fröccsöntő- és öntő szerszámszámokat. Előszeretettel használják az autó- és repülőgépiparban is.

A leggyakoribb szerszámacél anyagok anyagjelöléssel az MS1, 18Ni1400, 18Ni1700, 18Ni1900, 18Ni2400 és az öntött 17Ni1600. Ezeket az anyagokat főként por és filamentek formájában találhatjuk meg a piacon [39].

Rozsdamentes acél (angolul: Stainless Steel, röviden: SS)

A titán és a nikkel legolcsóbb alternatívája a rozsdamentes acél, mely tulajdonságaiban megközelíti az említett két anyagét. Rendkívül kemény, szívós, kiváló korrózióállósággal rendelkezik, jól hegeszthető, jól hajlítható. Alkalmazása rendkívül sokrétű. Repülőgépiparban, olaj és gázvezetékek esetén, élelmiszeriparban (például evőeszközök, tálcák, serpenyők, ételmelegítők, tárolók), és orvosi célokra is használják (3.15. ábra).

A két leggyakrabban használt rozsdamentes acél a 17-4PH és a 316L.

A 17-4PH anyag mágnesezhető, hőkezelhető, kemény anyag, jól hegeszthető, kiváló korrózióálló. Nyomtatási sebessége lassú másik társához viszonyítva, mely nyomtatáskor növelheti a költségeket [39], [40].

17-4PH főbb tulajdonságai [40]:

- Szakító szilárdság: 930-1030 MPa
- Folyáshatár: 450-550 MPa
- Keménység: 210-250 HV (Vickers keménység)
- Rugalmassági modulus: 150-190 GPa
- Max hőmérséklet üzem közben: 550 °C
- Szakadási nyúlás: 20-30 %



3.15. ábra 17-4PH rozsdamentes acél 3D nyomtatott megfogó [41]

A 316L nem mágnesezhető, nem hőkezelhető, hajlékonyabb anyag. Korrózióálló képessége előző társánál is magasabb, kitűnően hegeszthető és gyorsabban nyomtatható. Társához viszonyítva alacsonyabb a szakító szilárdsága (590-690 MPa), viszont folyáshatára valamivel magasabb (470-590 MPa), szakadási nyúlása jelentősen magasabb (25-55 %) [40].

Alumínium

Az alumínium a könnyűfémek csoportjába tartozik (sűrűsége $2,7 \text{ g/cm}^3$). E tulajdonsága rendkívül széleskörű felhasználhatóságot biztosít. Az acél után az alumínium a legtöbbet használt fém az iparban. Tömege az acélhoz viszonyítva jelentősen kisebb, míg egyes ötvözetek szilárdsága hőkezeléssel megközelítheti az acélokét. Tömeg/szilárdság aránya kiváló, az egyik legjobb a fémek között. Korrózióálló, kémiai ellenálló anyag. Jó hő- és elektromos vezető. Viszonylag olcsó. A tiszta alumíniumot ritkán használják. Leggyakoribb ötvözetek anyagjelöléssel az AlSi10Mg, AlSi12, AlSi12Mg, AlSi7Mg, Al 6061, Al 7075, AU4G1. Az additív gyártás területén por és huzal formájában van jelen [39].



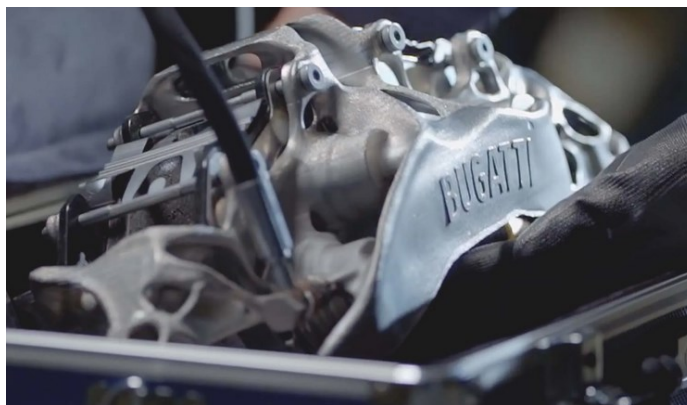
3.16. ábra Alumíniumból készült 3D nyomtatott dugattyúk Porsche 911 GT2 RS sportautóba [42]

A felsoroltakon kívül számos speciális alumínium típussal találkozhatunk, de azok használata sok esetben nyomtató specifikus.

Az AlSi10Mg a leggyakoribb alumínium ötvözet. Jó szilárdságú, kemény, dinamikus igénybevételt jól viseli. Kis tömege mellett jól viseli a hőhatásokat. Viszonylag könnyen nyomtatható, így összetett alakzatok nyomtatására is alkalmas. Motorok alkatrészeit, burkolatokat és szerszámokat nyomtatnak belőlük (3.16. ábra). Az AlSi7Mg0.3 vagy 0.6 jellemzője hasonló előzőleg említett társához. Kiváló tömeg/szilárdság arány jellemzi, hőálló, könnyen nyomtatható összetett formák esetén is. Az Al 6061 és az Al 7075 anyagok még újak a nyomtatás területén, de egyre több sikerrel nyomtatják ezeket. A 6000-es csoport a legtöbbit használt hagyományos alumínium anyag a megmunkálás tekintve. Főleg hő és elektromos vezetőket készítenek ebből, A 7000-es csoportba tartozó ötvözet porai cinket tartalmaznak, mely közismert kiváló mechanikai tulajdonságairól, mint a magas szilárdság és hőkezelhetőség. A 7075 típus a leggyakrabban használt ezek között. Nagy igénybevételt elviselő szerkezeti anyag. Szilárdsága magasabb, mint az általános szerkezeti acéloké [42].

Titán

A titán (titánium) egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy az emberi szervezet befogadja, azaz biokompatibilis. Ezen felül rendkívül magas szilárdságú, könnyű ($4,5 \text{ g/cm}^3$), kiváló korrózióállósággal rendelkező anyag. Autóipar, repülőgépipar használja, de fogászati és orvosi anyagként is találkozhatunk vele (térd, gerinc, csípő és fogászati implantátumok) (3.17. ábra).



3.17. ábra Bugatti sportautó fékrendszerének egy eleme titánból nyomtatva [39]

Rendkívül előnyös tulajdonságai miatt a titán a fémnyomtatás legtöbbit használt alapanyaga. Több fajtáját, ötvözetét használják az additív gyártási technológiák.

A Ti6Al-4V (5-ös osztály) a leggyakrabban használt alapanyag additív gyártásban. Prototípusgyártásra, autóiparban, repülőgép iparban és hadászatban használják. A

Ti6Al-4V (23-mas osztály) magasabb szilárdságú, rendkívül jól ellenáll az oxidációnak és kúszási ellenállása is kimagasló. A Cp-Ti (tisztá titán) (1-es és 2-es osztály) az orvosi területen használatos. Az emberi testtel biokompatibilis. A TA15 egy alumíniumot és cirkóniumot tartalmazó ötvözet. Magas szilárdságú, magas folyáshatárú, hőálló anyag [43].

Nikkel

A nikkel az alapja több, piacon elérhető úgynevezett szuperötvözetnek. Ezeket azért nevezik szuperötvözeteknek, mert kiváló tulajdonságokkal rendelkeznek. A leggyakrabban használt ilyen szuperötvözet az Inconel625 (vagy IN625). Magas szilárdságú, hő és korrózióálló anyag. Versenycélú felhasználása mellett gázturbinák elemeit, repülőgép alkatrészeket készítenek belőle, de a hajóipar is használja alapanyagként.

Az IN625 fő tulajdonságai [44]:

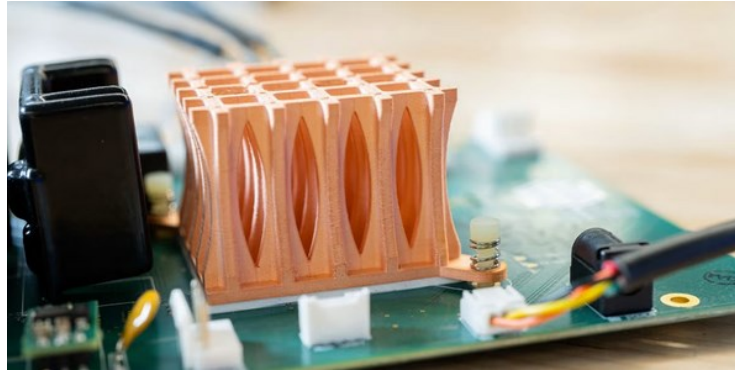
- szakítószilárdság: ~920 MPa
- folyáshatár: ~670 MPa
- szakadási nyúlás: ~40 %

Jól bírja a hőmérséklet ingadozásokat és hőállóságának határa elérheti akár az 1000 °C értéket is. Rendkívül drága anyag. Olyan helyeket alkalmazzák, ahol nagy hőmérséklet ingadozások és zord körülmények vannak, mint amilyen az oxidáló környezet, magas hőmérséklet [45].

Az IN625 mellett találkozhatunk az IN718-cal (szakító szilárdság: ~1020 MPa, folyáshatár: ~710 MPa, szakadási nyúlás: ~ 29 %), az IN939-cel (szakító szilárdság: ~1510 MPa, folyáshatár: ~1115 MPa, szakadási nyúlás: ~ 12 %), melyet szintén kitűnő oxidációállóság és korrózióállóság jellemez. Az IN939 anyagú alkatrészek öregedésálló, repedésálló [44].

Réz

Korábban a rézet ritkán használták 3D nyomtatásra, mert a felülete tükröződő és rendkívüli hővezető képessége nehézkessé tette a nyomtatási folyamatot. Manapság már képesek vagyunk a réz nyomtatására és kihasználhatjuk remek tulajdonságait. Elektromos motor alkatrészeit, töltőket, napelemes rendszerek elemeit, akkumulátor alkatrészeket nyomtathatunk rézből.



3.18. ábra Rézből nyomtatott egyedi CPU hűtőborda [46]

Nagy előnye a rendkívüli hő- és elektromos vezető képesség, mely lehetővé teszi, hogy egyedi hőcserélőket, vagy hűtőbordákat nyomtassunk belőle, ezzel is növelve például a számítógépek processzorainak teljesítményét (3.18. ábra). Ellenáll a korróciónak, és megöli a baktériumokat és vírusokat [46].

3.7. Papír, fa-, műanyag- és egyéb lemezek

A LOM (Laminated Object Manufacturing) technológiák egy eddig nem említett, a többi technológiától eltérő folyamat. A technológia magyar megfelelője a „lemezelt darabgyártás” vagy a „laminált objektumgyártás”.

A technológia sajátosságából adódóan, az alapanyagoknál az eddigiekkel ellentétben itt nem feltétlenül az anyag a fő szempont, hanem az alak. Lemezszerű alapanyagokat használnak, mint például a papír, karton, műanyag lemez, fémlemez és minden egyéb olyan anyag, amit lézerrel vagy pengével képesek vagyunk vágni, majd hő és nyomás hatására összetapasztani vagy összeragasztani. A LOM-al készült objektumok felületi minősége az egymáshoz rögzített réteganyagok vastagságától függ. Nagy méretű objektumoknál gyakran használnak falapokat, majd a vágás és ragasztás után csiszolással érik el a megfelelő felületi minőséget. A technológia olcsó és gyors, az alapanyagok szintén viszonylag olcsónak nevezhetők a többi technológia alapanyagához képest. Szinte kizárólag prototípus gyártáshoz, vagy dizájnelemek gyártásához használják. Kiváló megoldás nagy méretű prototípusok készítéséhez is, hogy azt különböző tesztelésnek vethessék alá (mint például karosszériaelemek szélcsatornába helyezése, ahol a légellenállást lehet vizsgálni) [47].

3.8. Összefoglaló táblázat a megfelelő anyag kiválasztásához

Az alábbi 2-5. táblázatok a leggyakoribb, különböző technológiákhoz tartozó anyagok fő tulajdonságai és alkalmazási területeit foglalja össze. A táblázatok segítségével ki tudjuk választani, hogy mely alapanyagra van szükségünk egy adott alkalmazáshoz. A táblázatok összefoglaló jellegűek, tájékoztató adatokat tartalmaznak. Ha pontosabb

információra van szükség, akkor érdemes az előző fejezetekben felkutatni az anyagra vonatkozó bekezdéseket.

Megjegyzés: A táblázatokban „+ és – „ jelekkel az előnyös és a hátrányos jellemzőket „•”-al a számadatokat jelöltük.

2. táblázat. Filament típusú anyagok főbb tulajdonságait összefoglaló táblázat

FDM technológia (Filament anyagtípus)		
Anyag	Tulajdonságok	Alkalmazás
PLA	biológiailag lebomló, felszívódó, újrahasznosítható, komposztálható kedvező ár / tömeg arány könnyen nyomtatható, kevésbé deformálódik – alacsony szilárdság – gyenge hőállóság, alacsony üvegesedési hőmérséklet, alacsony hőstabilitás – dinamikus igénybevételt nem bírja • nyomtatási hőmérséklet: 190-210 °C • melegágó hőmérséklet: 50-60 °C (nem előírás)	élelmiszer és italcsomagolás, eldobható evőeszközök, kozmetikai csomagolások, burkolatok, díszítő elemek, orvosi implantátumok
ABS	+ viszonylag jó mechanikai tulajdonságok + tartós, rugalmas, könnyen megmunkálható – nehezen nyomtatható, melegágó és jól tapadó felület elengedhetetlen – nyomtatás közben mérgező gázok – UV sugárzás tönkreteszi – könnyen karcosodik • nyomtatási hőmérséklet: 210-270 °C • melegágó hőmérséklet: 80-110 °C	hobbicélú felhasználás, prototípusok, háztartási eszközök, csőszervények, játékok
PETG	+ tartós, rugalmas, könnyen megmunkálható + könnyen nyomtatható + viszonylag olcsó + kiváló kémiai ellenállás + dinamikus igénybevételeket jól bírja + víztiszta termékek is nyomtathatók – nagyon könnyen karcosodik – megköti a levegő nedvességtartalmát – filament tárolása körülményes, előkészítést igényel • nyomtatási hőmérséklet: 220-250 °C • melegágó hőmérséklet: 50-75 °C	élelmiszer csomagolások, érintésvédelmi eszközök, elektronikai szigetelők, orvosi eszközök, alacsony igénybevételű gépelemek
TPE és TPU	+ rendkívül rugalmas, gumyszerű anyag + élelmiszerrel érintkezhet + közepes kémiai ellenállóság + jó hőmérsékletállóság + abrázióálló + fáradásos igénybevételnek jól ellenáll + mérsékelten vízálló – nagyon nehezen nyomtatható anyag – nyomtatási sebességre érzékeny – mérettartás nagyon nehezen megvalósítható • nyomt. hőm.: 210-260 °C (TPE), 210-230 °C (TPU) • melegágó hőmérséklet: MAX 60 °C	olyan objektumok, melyeknél elvárás a nagy rugalmasság, könnyű hajlíthatóság, ütközés és rezgéselnyelő elemek, tömítőelemek, gyógyászati segédeszközök, elektromos szigetelők

PA	+ viszonylag magas szilárdságú, tartós, rugalmas + többféle színben elérhető + bizonyos élelmiszerekkel érintkezhet – színváltás körülményes – nedvességre rendkívül érzékeny – filament tárolása körülményes – alsó rétegek vetemednek, hajlanak • nyomtatási hőmérséklet: 240-260 °C • melegágy hőmérséklet: 70-100 °C	bizonyos élelmiszerek csomagolóanyaga lehet, játékok, több színű objektumok
PC	+ fényáteresztő + viszonylag jó mechanikai tulajdonságok, jól ellenáll dinamikus igénybevételeknek + viszonylag magas szakítószilárdság, tartósság, jó hőállóság – közepesen nehezen nyomtatható – magas hőmérsékletigény – alsó rétegek vetemedhetnek • nyomtatási hőmérséklet: 270-310 °C • melegágy hőmérséklet: 90-110 °C	dizájnelemek, kisterhelésű konzolok, kijelző védő burkolatok, sisakok, bűvármáskok átlátszó részei, ütés- és golyóálló burkolatok
PMMA	+ fényáteresztő + nem „kardosan” törik, mint az üveg – víztiszta felület elérése körülményes – nyomtatási felület általában matt – nehezen nyomtatható – nagyon könnyen karcosodik – rideg, rugalmassága kicsi, hajlítást nem viseli	védőburkolatok, szélvédők, áttetsző panelek, betekintő nyílások
PP	+ olcsó + élelmiszerekkel érintkezhet, biokompatibilis + viszonylag jó szilárdságú + újrahasznosítható + kémiai ellenállása rendkívül jó – nagyon nehezen nyomtatható – alsó rétegek vetemednek – a rétegek nehezen tapadnak egymáshoz	orvosi segédeszközök, konyhai eszközök, élelmiszer csomagolások
POM	+ magas méretpontosság, mérettartósság + jól megmunkálható, jó ár / szilárdság viszony + kopásálló, jó súrlódási tulajdonságok + kémiai ellenállása jó + mérsékelten hőálló + rideg, ezért abráziónak ellenáll – nagyon nehezen tapad meg az ágyazaton – rétegek közötti delamináció jelentős – nehezen ragasztható – mérgező gőzök, gázok szabadulhatnak fel – UV tönkreteszi, könnyen öregedik	súrlódó elemek, siklócsapágys, fogaskerekek, egyéb nem komoly igénybevételű gépelemek

3. táblázat. Műgyanta típusú anyagok főbb tulajdonságait összefoglaló táblázat

SLA / DLP technológia (műgyanta anyagtípus)		
Anyag	Tulajdonságok	Alkalmazás
Standard	• többféle színben elérhető (szürke, fehér, fekete, áttetsző, türkiz, kék) • a „draft” típussal rendkívül alacsony kikeményedési idő érhető el, de a nyomtatási felbontás rendkívül alacsony, így nem alkalmas precíziós nyomtatásra	általános célú használati tárgyak, vizualizációs célú nyomtatások, prototípusok
Tough	+ funkcionális objektumok nyomtathatók + általában PP, PE alapú gyanták + nagy szilárdság, dinamikus igénybevételt jól viselik + jól megmunkálható + homokfújható + fűrhető, menetvágás megvalósítható + fárasztó igénybevételekkel szemben ellenáll – magas ár – nyomtatás közben intenzív szaghatás	funkcionális objektumok, melyek megkövetelik a viszonylag nagy szilárdságot, utólagos megmunkálást
Flexible	+ nagyon rugalmas, gumyszerű végtermékek + deformáció után eredeti formájukat visszanyerik + összenyomható, hajlíthatók + EPU és FPU alapú gyanták + széles használható hőmérséklet tartomány (EPU) + némileg rideg, dinamikus igénybevételnek jól ellenál, magas szakadási nyúlás (FPU)	talpbetétek, ortopédiai eszközök
Dental	+ biokompatibilis + nem tartalmaz mérgező, emberi szervezetre ártalmas komponenseket + nagyon magas precizitás érhető el	orvosi alkalmazás, főként fogászat

4. táblázat. Polimer por típusú anyagok főbb tulajdonságait összefoglaló táblázat

SLS / MJF technológia (polimer por anyagtípus)		
Anyag	Tulajdonságok	Alkalmazás
PA 11	• szilárdsága magasabb, mint a PLA termékeknek • kevésbé merev, nem hajlik • dinamikus igénybevételeket jobban viseli • szilárdság / sűrűség viszonya jobb • bio alapú alapanyag • vegyszerálló, öregedésálló • újrahasznosítható • jó siklási tulajdonságok • mérettartó	prototípus gyártás, repülőgép ipar, autóipar, orvosi eszközök, háztartási eszközök
PA 12	• tulajdonságaiban jellemzően megegyezik a PA 11-gyel • de szakadási nyúlása kisebb, mint a PA 11-é	élelmiszeripar, műszaki gépelemek, prototípus gyártás

5. táblázat. Fémpor típusú anyagok főbb tulajdonságait összefoglaló táblázat

SLM / DMLS technológia (fémpor anyagtípus)		
Anyag	Tulajdonságok	Alkalmazás
Szerszámacél	- MS1, 18Ni1400, 18Ni1700, 18Ni1900, 18Ni2400 és öntött 17Ni1600 anyagok - nagyon magas ár - magas szakítószilárdság - szívósság - kiváló szilárdság / tömeg arány - hőkezelhetők	hajlító-, mélyhúzó-, fröccsöntő-, és öntőszerszámok, autóipar, repülőgépipar
Rozsdamentes acél	- mágnesezhető, hőkezelhető, magas keménységű (17-4PH) - jól hegeszthető, kiváló korrózióállóság (17-4PH) - lassú nyomtatási sebesség, magasabb nyomtatási költségek (17-4PH) - nem mágnesezhető, nem hőkezelhető, hajlékony (316L) - kitűnő korrózióállóság, hegeszthetőség (316L) - alacsonyabb szakítószilárdság, magasabb folyáshatár, magasabb szakadási nyúlás (316L)	repülőgépipar, olaj és gázvezetékek, élelmiszeriparban rendkívül széles alkalmazás, orvosi célú felhasználások
Alumínium	- leggyakoribb ötvözetek az AlSi10Mg, AlSi12, AlSi12Mg, AlSi7Mg, AlSi7Mg0, Al 6061, Al 7075, AU4G1 - tömeg/szilárdság aránya kiváló (könnyűfém) - jó keménység, dinamikus igénybevételt jól viseli - korrózióálló, kémiai ellenállása magas - jó hő és elektromos vezetőképesség - viszonylag olcsó - a 7000-es csoport magas szilárdságú, hőkezelhető - az Al7075 rendkívül magas szilárdságú	motoralkatrészek, burkolatok, szerszámok alkalmazása kiválthatja az acélokat olyan területeken, melyeknél a magas szilárdság mellett a kisebb tömeg is szempont
Titán	- Ti6AL-4V, Cp-Ti, TA15 anyagok - biokompatibilis, emberi szervezet befogadja - könnyűfémek csoportjába tartozik - rendkívül magas szilárdság - kiváló korrózióállóság - nagyon magas ár - kúszási ellenállás, oxidáció-állóság (Ti6Al-4V) - hőálló (TA15)	autóipar, repülőgép ipar, fogászat, orvosi anyag, főleg implantátumok, prototípus gyártás, hadászat
Nikkel	- IN625, IN718, IN939 szuperötvözeteknek nevezett anyagok alapanyaga a Nikkel - magas szilárdság, hőállóság, korrózióállóság - nagyon magas ár	versenycélú felhasználás, gázturbinák, repülőgépipar, hajóipar
Réz	- rendkívül jó hővezető képesség - rendkívül jó elektromos vezető képesség - korrózió ellenáll - megöli a baktériumokat és vírusokat	elektromos motor alkatrészei, töltők, napelemes rendszerek, akkumulátor alkatrészek, egyedi hőcserélők, hűtőbordák

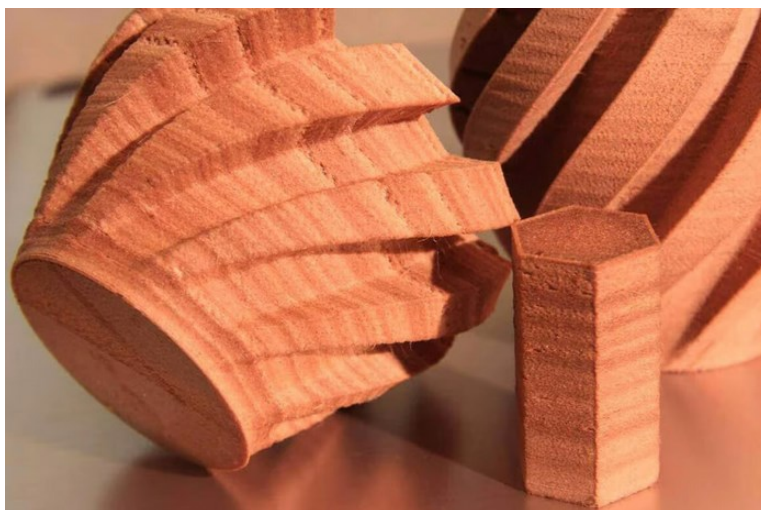
3.9. Adalékok

Láthattuk, hogy számos polimer anyag használható önálló alapanyagként is 3D nyomtatásra. Viszont, bizonyos tulajdonságok megváltoztathatók, ha az alap polimer hordozóként funkcionál, és valamilyen adalékot kevernek a hordozóba, ami jellemzően egy másik anyagfajta. Egyes adalékanyagok képesek az alapvető tulajdonságok megváltoztatására is. A leggyakrabban alkalmazott adalékokat láthatjuk ebben a fejezetben

Fa

A fa rostjait általában PLA hordozóhoz keverik és ezáltal egy fa hatású anyagot kapunk. Jelentősége főleg az esztétika, megjelenés (3.19. ábra). Az alapvető mechanikai tulajdonságokat nem javítja, sőt kissé rontja is. A szilárdság és a rugalmasság csökken fa adalék használata esetén. Használhatnak fenyő, nyír, cédrus, ébenfa és fűzfa rostokat, de ritkábban előfordulhatnak kevésbé gyakori fajták is, mint például a bambusz, a cseresznye, a kókusz és a parafa.

Fa adalékot tartalmazó filamentek nyomtatásakor óvatosan kell bánni a nyomtatási hőmérséklettel, hiszen a filamentben lévő fa megéghet, vagy karamellizált, égett hatást eredményezhet a magas hőmérséklet.



3.19. ábra Fa adalékot tartalmazó filamentből nyomtatott tárgyak [48]

Ezen kívül hátránya, hogy a farostok abrazív, azaz koptató hatással lehetnek az extrúder egységre, főleg a rézből készült alkatrészekre [48].

Fémpor adalék

A fémpor polimerek adalékaként is felhasználható. A polimer mátrixhoz „vaspor” adalékot keverve a nyomtatott termék mágnesezhetővé tehető. A fém csillogása miatt

a nyomtatott objektum fényes felületűvé tehető. Általában PLA és ABS mátrixok adalékként szokás fémport használni. A leggyakoribb fémpor adalékok az alumínium, réz, nikkel, bronz és rozsdamentes acél. A fémpor jelentős kopást eredményezhet a nyomtató extrúder egységében, így annak cseréje gyakrabban javasolt. A fémpor aránya 50-85 % is lehet, ami jelentősen megnövelheti a nyomtatott objektum tömegét.

Polírozással a felület minősége javítható, ezáltal még inkább hasonlítani fog a tiszta fém megjelenéséhez [48].

Korom szemcse

A koromszemcséket általában azért használják adalékként, hogy a nyomtatott termék elektromos vezetőképességét növeljék. A polimer mátrix ebben az esetben is általában PLA vagy ABS.

Az így kinyomtatott termékeket alacsony feszültségű nyomtatott áramkörök esetén használják [48].

Fluoreszkáló anyagok

Az ABS vagy PLA alapanyagba kevert fluoreszkáló anyagtól a termék világítani fog a sötétben, ha előtte elég fény éri (3.20. ábra).



3.20. ábra Sötétben világító filament [48]

A leggyakoribb szín a zöldes fény, de elérhető rózsaszín, kék, piros narancs és citromsárga színekben is [48].

Szén- és üvegszál

A szénszálat leggyakrabban PLA, ABS és PA mátrixokhoz keverik vagy rövid, vagy hosszú szálak formájában. Ez nagyobb szilárdságot, ridegséget és kis tömeget eredményez a termékénél.

A szén- és üvegszál rendkívül abrazív anyagok, így ilyen adalékot tartalmazó filamentek nyomtatásakor fokozottan számolnunk kell a fúvóka kopásával [48].

Az, hogy rövid vagy hosszú szálakat kevernek az alapanyagba, más tulajdonságot kölcsönöz az anyagnak. A vágott szálak lehetnek apró erősítőanyag-szálak, mint a szén vagy a kevlár. Ezek a jellemzően egy milliméternél rövidebb szálak, melyek könnyen keverhetők hőre lágyuló mátrixba (PLA, ABS stb.), így a hagyományos műanyagoknak megnövelt szilárdságot és merevséget biztosít. Az apróra vágott szálak hihetetlenül hasznosak, mert rendkívül sokoldalúak: sokféle hőre lágyuló műanyaggal keverhetők, és az így kapott kompozitokat közönséges 3D nyomtatókon lehet nyomtatni. Ha azonban aprított szálakat keverünk az alapanyagba, minden egyes szál véletlenszerű orientációt vesz fel, ami kevésbé erőssé teszi az anyagot, mint a folytonos szálakat tartalmazó anyagot.

A folytonos szálak ezzel szemben hosszabb, egyirányú erősítőanyag-szálak, amelyek hőre lágyuló mátrixba integrálva jelentősen jobb szilárdságot biztosítanak a vágott szálakhoz képest. Ennek az az oka, hogy egy szál teljes hosszában képes felvenni és elosztani a terhelést, így a hosszabb folyamatos hossz nagyobb teherbírást ad, mint egy apró darabolt szál. A hosszú, folytonos szálakat tartalmazó anyagok drágábbak, mert előállításul nehezebb [49].

Az üvegszál a leggyakrabban használt adalékanyag. A nyomtatott termékre jellemző a fényes csillogás, mely az üvegnek köszönhető. Az üveg kifejezetten koptató anyag, így a fúvókát érdemes rozsdamentes acélra cserélni réz helyett.

Az üvegszál termékek jobban ellenállnak a dinamikus igénybevételnek és hőállóbbak, emellett üvegszál adalékkal növelhető a szilárdság [48], [49].

4. Geometriai és technológiai tervezési irányelvek

Ahogy korábban már említettük a 3D nyomtatás egyik legnagyobb előnye számos korábbi technológiákkal (pl. forgácsolás) szemben, hogy lehetővé teszi a funkcionalitás előtérbe helyezését a gyárthatósággal szemben. A következőkben olyan geometriai modellezési irányelveket és javaslatokat mutatunk be, amelyek segítenek új vagy letöltött/átvett 3D-s modellek kialakításában. Az előbbiek mellé több a gyárthatóságot javító javaslatot is mellékelünk.

A fejezetet, a saját gyakorlati tapasztalatainkat a következő szakirodalmi források és internetes elérhetőségek hasznos információval kibővítve állítottuk össze [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58].

4.1. A hagyományos és AM tervezési elvek eltérései

A korszerű 3D nyomtatás gyökeresen új gyártási és termék tervezési lehetőségeket nyit meg a mérnökök előtt, azonban ezeknek a felismerése és kihasználása ma még nem teljes körű, ez mind az alkatrészek anyagmegválasztásánál mind a topológiai (alak, kitöltés, támasz) lehetőségek kihasználásánál még korlátozóan hat. A legnehezebb a tervezőknek talán a hagyományos terméktervezési szempontok háttérbe szorítása és a 3D nyomtatás adta tervezési szabadság mind széleskörűbb kihasználása.

A hagyományos terméktervezést a funkcionális/teherbíró kialakításon túl, elsősorban a gyárthatóság a szabványos alkatrészekhez való illeszthetőség és nem utolsósorban a költségek határozták meg. Ennek megfelelően a gyártási technológiák által támasztott szigorú szabályoknak kell megfeleltetni a tervet, erre utalnak a műszaki gyakorlatban elterjedt kifejezéseink, mint pl.:

- forgácsolásnál-forgácsolhatóság
- hegesztésnél-hegeszthetőség
- öntésnél-önthetőség

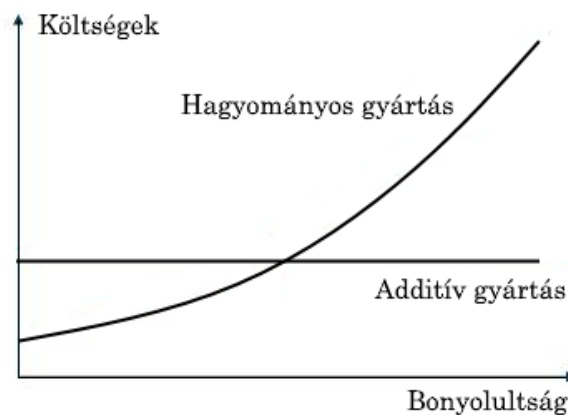
A hagyományos gyártási eljárásoknál az alkalmazott technológiákat gyakran a gyártandó darabszámok határozzák meg (egyedi-széria-tömeggyártás). Legtöbbször ezek között kevés az átjárhatóság, nézzünk is ezekre néhány példát:

- Gondoljunk egy nagy darabszámban gyártott hajtóműházra, amelynél az öntés (kokilla) a kedvező technológia, de ez csak nagy darabszámnál gazdaságos. Ha ugyanebből a szerkezetből egy, vagy csak „pár” darabra van szükség már teljesen más technológiának megfelelő kialakításra van szükség, pl. egyedi

csavarozással vagy hegesztéssel összeállítás, esetleg homokformába öntés választható.

- Egy másik példát tekintve, a lépcsős hajtómű tengelyek szinte minden esetben többnyire forgácsolást igényelnek (hengerelt vagy kovácsolt előgyártmányból), itt a forgácsolási szabályok, mint pl. primitív geometriák (henger, gömb, kúp, sík, stb.) az előnyösek, csak kis alámetszések lehetségesek a belső kimunkálások szinte teljes nélkülözésével. Az így nyert alkatrész homogén anyagkitöltésű lesz, amelynek a tömege nem mindig optimalizálható kellőképpen (keresztmetszetek miatt).
- Hegesztett konzol esetében csak a kiindulási elemekből gazdálkodhatunk és egy átgondolt hegesztési művelettervezés esetén is csak igen korlátozott a belső terek hegeszthetősége. Nem beszélve a lokális hőbevitel miatti deformációkról, amelyek legtöbbször forgácsolási utómunkálatokat igényelnek.

Az additív eljárások legfőbb előnye az, hogy nem egy előgyártmányból anyageltávolítással készülnek el a darabok, hanem a rétegek egymásra építésével készül a végleges darab, ráhagyás nélkül. Ebből kifolyólag az additív technológiák gyártási költségeire a termék bonyolultsága kevésbé van hatással, mint hagyományos gyártási eljárások esetében, ahogy látható a 4.1. ábrán.



4.1. ábra Hagyományos és additív gyártás költsége a bonyolultság függvényében [59]

A következő 4.2. ábrán és a 6. táblázat alapján összehasonlíthatjuk a hagyományos gyártást jól képviselő forgácsolást az additív gyártással.

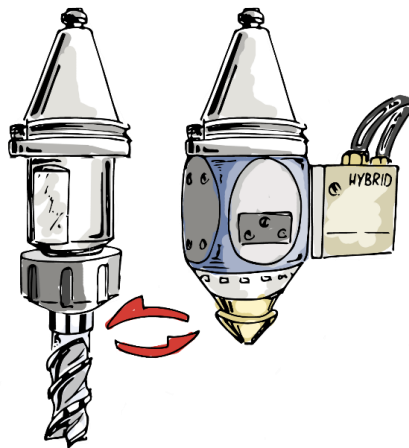


4.2. ábra A hagyományos (bal) és az additív (jobb) gyártási folyamatok összehasonlítása az alapanyag a technológia és a késztermék/veszteség szempontjából [60]

6. táblázat. A szubtraktív és az additív gyártás főbb jellemzőinek összehasonlítása

A szubtraktív gyártás jellemzői	Az additív gyártás jellemzői
- A legtöbb alapanyagból elkészíthető az alkatrész. - A geometriai, az alak és a felületi pontosság nagyon precízen tartható. - Sorozatgyártás lehetséges, a műveletek tetszőlegesen ismételhetők. - CAM rendszerrel, megfelelő posztprocesszorral az 5 tengelyes programozás az alkatrészmodell változtatása után is módosítható. - A forgács és az emulzió kezelése veszteség, amely környezetszennyező is lehet, - Belső üregek, bonyolult geometriák nem munkálhatók meg. - A szerszámozás költséges. - A megmunkálógép merev szerkezetű és nagy tömegű.	- Szerszám nélküli gyártás (nincs szerszámkezelési költség). - Kész termék egy lépésben (viszonylag rövid idő alatt), akár összeszerelési műveletek nélkül. - Bonyolult és komplex külső és belső geometriák is elkészíthetők. - Új geometriák alkalmazását teszi lehetővé a gyakorlatban („form follows fiction”). - Forgács nem keletkezik, de esetenként a támaszanyag veszteséggel számolni kell. - 90 %-ban már meglévő, ismert, standard alapanyagokat használ fel. - Tartós vagy kevésbé tartós termékek előállítására egyaránt képes. - Prototípus, modell és késztermék gyártó folyamat is egyben. - Irodai és otthoni alkotást tesz lehetővé. - Hatékony eljárás, anyagtakarékos és tömegcsökkentési lehetőségeket is rejt. - Újdonsága miatt még sok a kérdés (anyagtudomány-technológia).

A jellemzőket áttekintve belátható, hogy a két technológia leginkább együtt, egymást kiegészítve alkalmazható, ezzel megújítva a gyártást, és ez a hibrid technológiák irányába mutat. Ezt a gépgyártók is felismerték és már kaphatók az úgynevezett hibrid CNC központok. Ezek vagy kettős megmunkálófejjel váltva nyomtatnak és forgácsolnak, vagy ahogyan a 4.3 ábrán látható, a szerszámtárba helyezett nyomtatófejjel hagyományos CNC gépen is végezhetünk additív gyártást, csak egy szerszámcserét kell végrehajtanunk.



4.3. ábra Hagyományos SK (slope-cone) kúpos főorsó csatlakozással szerelt forgácsoló szerszám befogó (bal) és kompatibilis nyomtatófej (jobb) alkalmazása [60]

4.2. A 3D nyomtatáshoz tervezés alapfogalmai

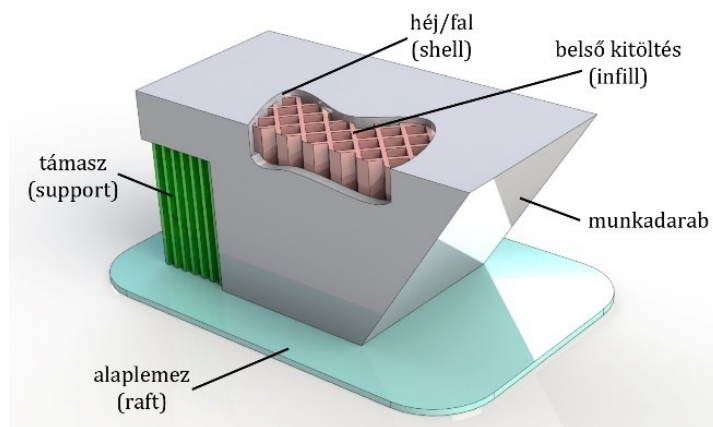
Fontos felhívni a figyelmet a hagyományos tervezői gondolkodástól merőben eltérő új lehetőségek kiaknázására. Gondoljunk pl. a hengeres furatok/lyukak szerepére, amelyek a forgácsolástechnológiában szinte minden esetben körkörösek voltak, mivel ez volt gyártható fúrással, furatesztergálással, örvénymarással, stb. 3D nyomtatásnál ezek a korábbi gyárthatósági szempontok nem mérvadók, ugyanakkor néhány új nyomtatási „ökölszabályra” itt is fel kell hívni a figyelmet, ezek a következők.

4.2.1. A 3D nyomtatott modell alapelemei

Ahogyan a korábbiakban megismertük a 3D nyomtatás lehetőséget ad egy alkatrészmodellen belül is eltérő kitöltések, falvastagságok, és belső üregek létrehozására, ugyanakkor a szubtraktív technológiákkal szemben új elemként jelennek meg a különféle alátámasztások (support) és rögzítő rétegek, ezekről láthatunk áttekintést a következő 4.4.-4.7. ábrákon.

Az FDM nyomtatás egyik legfontosabb sajátossága az üreges belső struktúra lehetősége, amely számos előnyt (pl. változó merevséget, súlycsökkentést) hordoz magával (4.4. ábra). A belső üregek kitöltésére (infill) számos mintázat áll

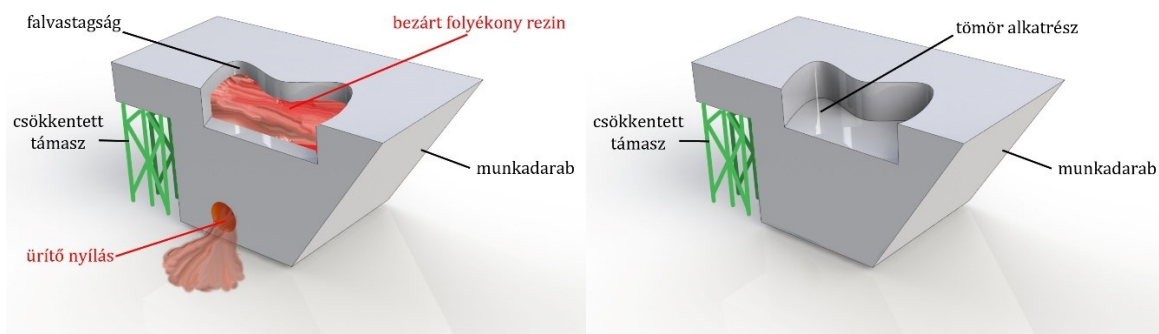
rendelkezésünkre, ezekről később még lesz szó. A másik fontos jellemző a túlzott alámetszések támasztási (support) igénye, amelyek külső, de akár belső furat felületeken is megjelenhetnek.



4.4. ábra. Az FDM technológiával készült nyomtatott munkadarab jellegzetes elemei

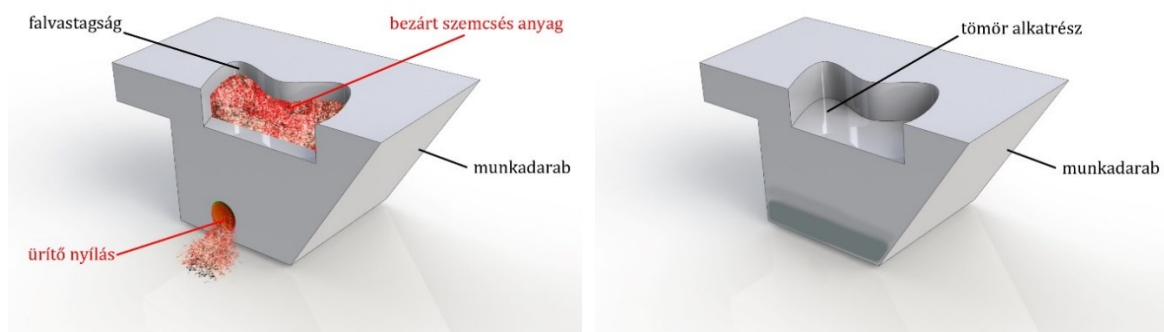
A nyomtatott test munkalapon maradásának (tapadásának) a biztosítására, az érintkezési felület növelésére célszerű (nem feltétlen kötelező, geometriától és anyagtól függ) alaplemezt alkalmazni, amely egy vékony a modell anyagával megegyező anyagú nyomtatott lap, és amely a nyomtatás után a kész munkadarabról eltávolítható.

Az SLA technikával készült modellek lényegesen eltérnek az FDM-től, hiszen itt homogén műgyanta fürdőben készülnek a modellek. E miatt SLA technika alkalmazása esetén a belső üreges kitöltés nem valósítható meg, ezért itt elsősorban tömör kivitelben nyomtatunk. Ettől valamennyire eltér a DLP technológia, ahol a fejjel lefelé „függesztett” tárgy elrendezés elősegíti a műgyanta kifolyását a belső üregekből, de ez nem teljes. Természetesen, ha az alkatrész tartalmaz belső tereket (pl. zárt műszerdoboz) lehetőség van ennek a belső funkcionális üregnek a kialakítására, de ehhez ürítő nyílások szükségesek. A támasztás szempontjából kedvezőbb a helyzet, mint az FDM esetében mivel itt, bár még ezek szükségesek, de kisebb mértékben (4.5. ábra).



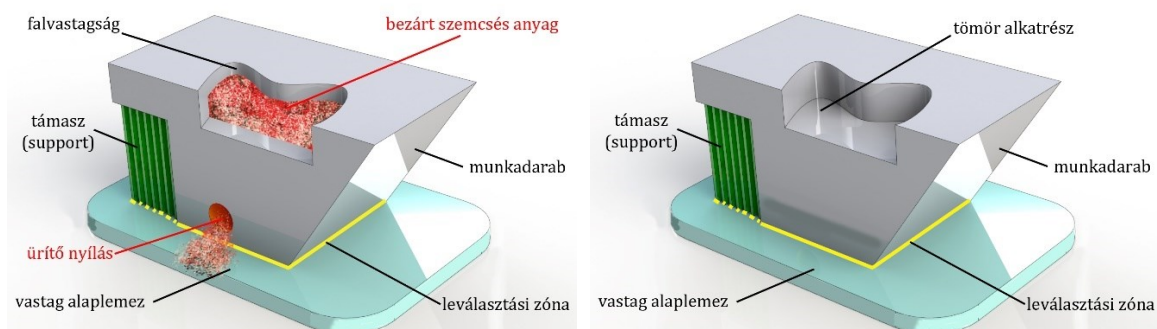
4.5. ábra. Az SLA technológiával készült nyomtatott üreges (bal) és tömör (jobb) munkadarab jellegzetes elemei

Az SLS poranyagból nyomtató technológia, hasonlóan az SLA technikához nem teszi lehetővé a tömör alkatrészek belső kitöltéssel történő nyomtatását, ezért itt is a tömör nyomtatás a jellemző. A belső funkcionális terekkel rendelkező munkadarabok nyomtatásánál itt is gondoskodni kell ürítőnyílásokról, hogy a bent csapdába került por anyag ki juthasson a belső térből (4.6. ábra).



4.6. ábra. Az SLS technológiával készült nyomtatott üreges (bal) és tömör (jobb) munkadarab jellegzetes elemei

Az SLS technológia egyedüli a támasztások nélkülözhetősége terén, mivel itt a porágy megfelelő alátámasztást biztosít a műanyag nyomtatás esetén. Ezzel szemben a DMLS (ábra lent) fémpor nyomtatás a nagyobb energiával és hővel járó vetemedések és a hűtés növelése miatt igényli a támasztást/horgonyyzást. Ezen kívül a DMLS munkadarab és a nyomtató platformja között fontos szerepe van az alaplapnak, amelyről a kész munkadarab huzalszikra vagy hagyományos forgácsolás útján választható le (4.7. ábra).



4.7. ábra. A DMLS technológiával készült nyomtatott üreges (bal) és tömör (jobb) munkadarab jellegzetes elemei

Az ábrán felsoroltak a 3D nyomtatás legfontosabb elemei. Ezek külön-külön is állíthatók a legtöbb szeletelő szoftverben, így az elterjedt ingyenesen használható (free-ware) CURA-ban is.

4.2.2. Technológiai sajátosságok

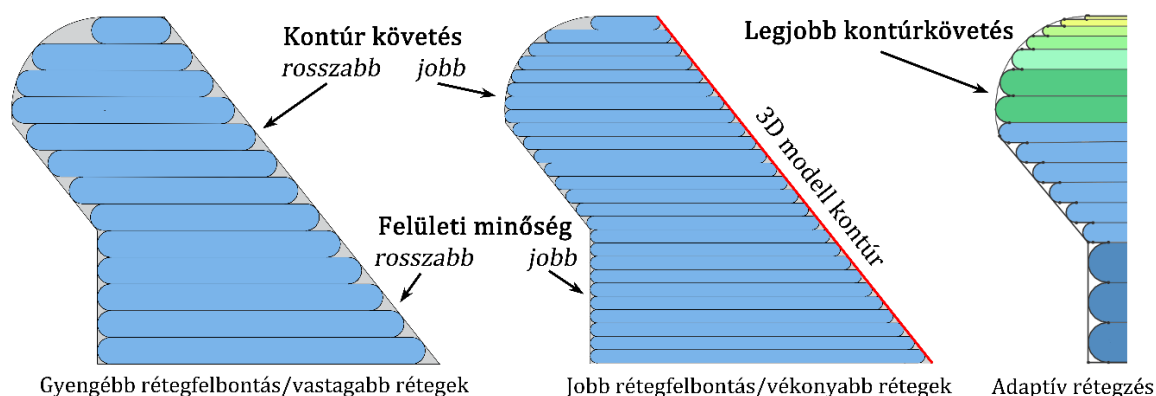
Térfogat-felület értelmezése

A számítógépen a CAD vagy más modellező rendszerben létrehozott 3D modell felülete nem értelmezhető valószerű vastagsággal rendelkező geometriaként, hanem vastagság nélküli elméleti felület (pontfelhő). Ezzel szemben a 3D nyomtatás során az elkészült tárgyat, mint tömör testet (beleértve a kitöltést is) adott rétegvastagságokkal értelmezzük. A 3D nyomtatáshoz bizonyos falvastagság szükséges a munkadarabhoz (nem képes fólia nyomtatásra), azaz felületmodellt nem tudunk kinyomtatni.

Rétegvastagságok

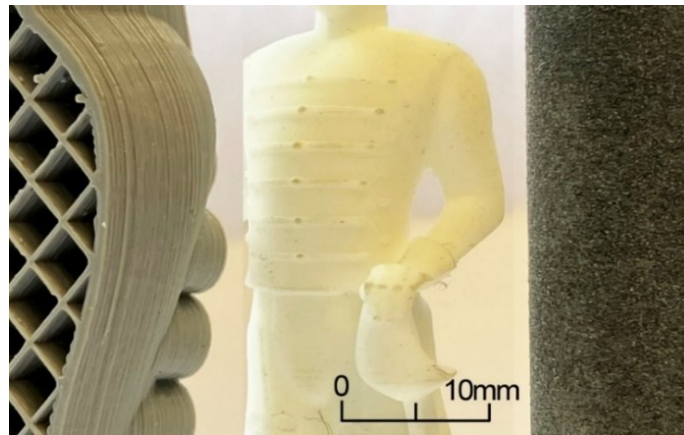
A nyomtatott rétegek vastagsága az alkalmazott nyomtató egyéni lehetőségeitől függ (pl. közép kategóriás FDM nyomtatóknál gyakori a 0,06-0,25 mm-ig változtatható rétegvastagság). Ez lényegében a folyamat során egymásra rakódott anyagrétegek vastagsága. A nagyobb vastagság kisebb felbontású, de gyorsabb, míg a kisebb vastagság több részletet rögzít, de lassabb nyomtatást eredményez, amint ezt a következő 4.8. ábrán is láthatjuk.

Korszerű megoldás az adaptív rétegvastagság alkalmazása, ahol az intelligens szeletelő szoftverek már dinamikusan optimalizálják a rétegvastagságot a modell geometria topológiai sajátosságai alapján, a minőség és a sebesség tökéletes egyensúlya érdekében (pl. Simplify 3d szeletelő szoftver, forrás: www.simplify3d.com).



4.8. ábra. Az eltérő rétegvastagságok hatása a nyomtatott felületi minőségre: balról-jobbra a gyorsabban nyomtatható rosszabb, a lassabban nyomtatható jobb és az adaptív rétegekkel előállítható felületi minőségek láthatók

Rétegvastagság és felületi minőség tekintetében jelentős eltérések adódhatnak a különböző technológiák esetében. Az FDM, SLA/DLP és SLS nyomtatott felületi minőségekre és a rétegzés láthatóságára mutat be példákat a következő 4.9. ábra.



4.9. ábra. Az SLA/DLP nyomtatással (középen) simább és részletesebb nyomatok készíthetők, mint az FDM-mel (balra), az SLS közepes minőséget biztosít (jobbra), [forrás: fotó, Zsidai László]

Fontos, hogy az elérhető rétegvastagságot a nyomtatófej kapacitása is befolyásolja. Ezt FDM-nél a fúvókaméret, SLA-nál és SLS-nél a lézerpont DLP-nél a projektált képpontméret határozza meg.

Nagyítás/kicsinyítés, részletesség

Az előbbi rétegvastagság alapvetően meghatározza az optimális méretarányokat is, amelyet a nyomtatandó modellek méreténél használunk. Ugyanazon modell eltérő méretarányú nyomtatási eredményei láthatók a következő 4.10. ábrán.



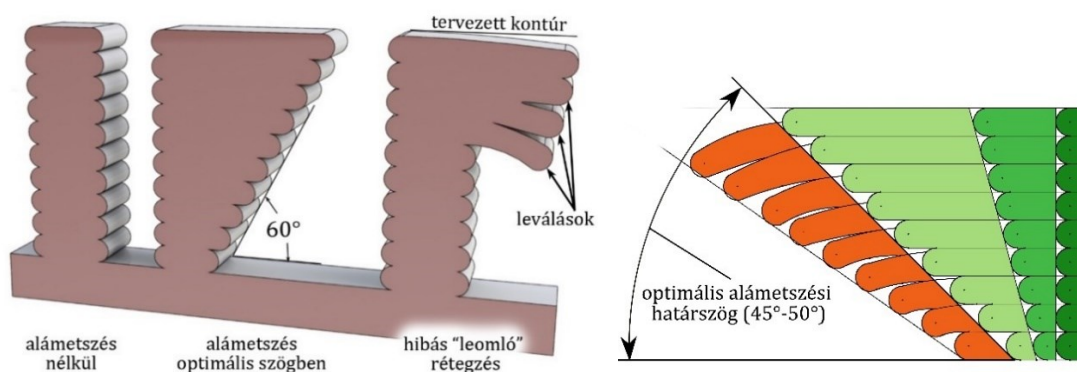
4.10. ábra. Azonos modellek eltérő méretarányú 3D nyomtatott termékei, a bal oldalon nagy méretben 0,25mm-es, a jobb oldalon ugyanaz a modell kicsinyített 0,06mm-es rétegvastagsággal láthatók [forrás: fotó, Zsidai László]

Célszerű a modellt a valós méretarányon tervezni így kezelhetőbbek a jobban és a kevésbé részletezett felületelemek. A nyomtatás előtti nagyítás kicsinyítés is bevett szokás, de ezt a munkadarab jellege erősen korlátozza. Természetesen méretarányos funkcionális gépelemet nem tudunk nagyítani vagy kicsinyíteni, hiszen ennek méretei a beépítés méreteihez igazodnak, ezekenél áttervezés indokolt a méretarányok változtatásával. Szabad vagy szobor felületek, bemutató eszközök, díszítő elemek esetén jóval szabadabban használható a nagyítás kicsinyítés, de kicsinyítéssel geometriai részletek is elveszhetnek.

A rétegvastagságok és az alkalmazott méretarány alapvetően meghatározza az elérhető modell részletességet is. Mindig válasszunk optimális méretarányt és rétegvastagságot a megkívánt részletességhez, akár a korábbi tervek felülbírálatával is. Az egy modellen belüli eltérő részletesség (pl. épület modell, ahol sík falak és cizellált kapubejárók, ablakok váltakozhatnak) speciális tervezéssel külön választhatunk, ezzel a későbbiekben külön foglalkozunk.

Alámetszések szerepe

Talán a legfontosabb 3D nyomtatási korlát az alámetszés kérdése. Az alámetszéseken/túlnyúlásokon olyan geometriákhoz (konzolokhoz) tartozó rétegeket értünk, amelyek az előző rétegen túlzottan túlnyúlnak (konzolok), amint ez a 4.11. ábrán is látszik.



4.11. ábra. Rétegek túlnyúlása eltérő hatásai (bal oldal) és a megengedett szög értelmezése, támaszok alkalmazása (jobb oldal)

A túlnyúlások megtámasztások nélkül lefelé görbülve deformálódnak, de akár le is omolhatnak, ezért mindenképpen meg kell támasztanunk őket. Ilyen helyzetekben, amikor túlnyúlás szükséges, és a támasztékok beépítése akadályozza a sikeres eredményt, javasolt vagy mesterséges hidak beépítése (az utófeldolgozás során ki kell küszöbölni), vagy a gyakorlatban elterjedt minimális 45°-os alámetszési szög megtartása, illetve a megfelelő modell orientáció biztosítása. A következő 7. táblázat az alapvető nyomtatási eljárások támaszigényét mutatja be.

7. táblázat Alátámasztások(horgonyok) szükségessége minimális határszög értéke

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
IGEN, <45°(50°)	IGEN, <45°	NEM	IGEN (vetemedés)

A 7. táblázatban látható, hogy az FDM nyomtatásnál minden 45°-nál (más vélemények szerint 50°-nál) kisebb szögnél alátámasztás szükséges. A folyékony műgyantás nyomtatások esetében is célszerű alkalmazni, bár itt azért kevésbé szigorú a gyakorlat. Itt meg kell jegyezni, hogy a fordított platform és munkadarab helyzet miatt az SLA-nál az FDM-hez hasonló támasz szabályok érvényesek, amíg a fentről lefelé függesztett munkadarab pozíció a DLP esetében ez húzásnak kitett függesztőket jelent. SLS polimer nyomtatásnál a porágy elegendő megtámasztást igényel, itt nem kell alátámasztás. Ugyanez a szintén porágyas DMLS fémpornyomtatásnál már nem igaz, itt nem a gravitáció eredményezte leomlás a veszély, hanem a nagy energiabevitel miatti hődeformáció igényel támaszokat és merevítőket, amelyeknek az elsődleges célja inkább a rétegek lehorgonyzásával és fokozott hűtésével az elgörbülések megakadályozása.

Támasztások (szupportok)

Az előbbieken említett túlnyúlások alátámasztásokat igényelnek. A támasztékok szükséges anyag és időveszteségnek minősülnek, mivel eltávolítandók a nyomtatás után. Alapvető feladatuk, hogy megtámasszák a gravitáció által lehajlásra kényszerített képlékeny polimer rétegeket. A 3D nyomtatás tervezésének alapvető feladata a támaszok csökkentése, ehhez szükséges a támasz szögek, túlnyúlások és áthidaló hidak megfelelő kezelése.

A támasztékok alkalmazásának legfőbb hátrányai a következők:

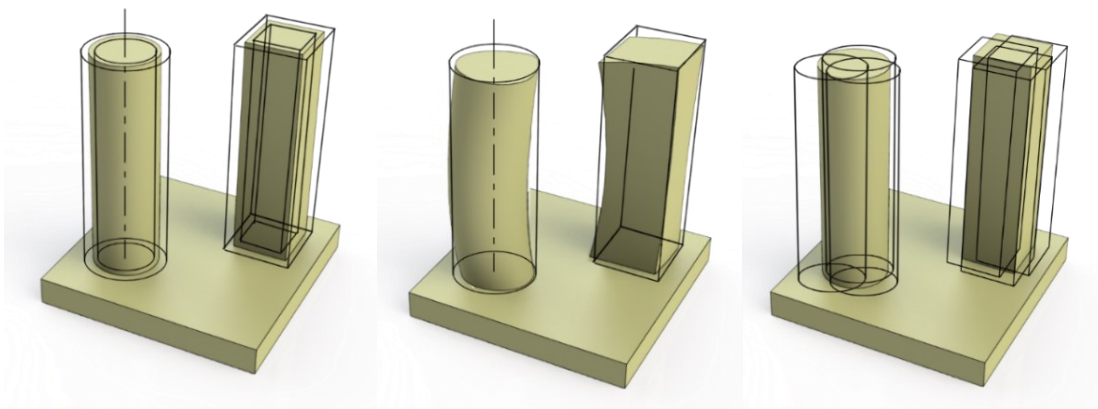
- anyagtöbbletet (veszteséget) igényelnek, mivel a leválasztott támaszok általában nem használhatók fel újra,
- megnövelik a nyomtatás idejét, így idő és energia veszteséget jelentenek, ez a tervezési szakaszra is vonatkozik (bár ez a tervező programokkal nagyrészt automatizálható),
- utómunkálatot igényelhetnek (forgácsolás, vágás, tördelés vagy vegyi maratás), ez növeli a technológiai időt, és a szerszámfelhasználást,
- a támaszokhoz érintkező felületek minősége romlik, ez még a folyadékban feloldódó támaszokra is részben igaz, a felület minőségén túl a méretpontosság is romolhat, illetve a támaszok eltávolításakor akár maga a modell is sérülhet (pl. a felszínből is részek szakadhatnak ki),
- a tervezési szabadságot korlátozzák, hiszen a technológiától és filament anyagtól függően akár lehetetlenné is tehetik a nyomtatást, (pl. belső zárt

üregekben lévő támaszok eltávolítása), és a leválasztandó támaszok szerszámokkal való hozzáférhetősége is egy jelentős korlát.

A tervezés során nem minden esetben kerülhetők el az alámetszések és a túlnyúlások, ilyen esetekben speciális tervezési megoldásokat kell alkalmaznunk. Számos megoldás kapcsolódik a támasztékok csökkentésére, ezekre a későbbi fejezetekben külön kitérünk.

Pontosság, felületi minőség, részletezettség

Az elterjedt mérnöki gyakorlat szerint az alkatrészek pontossága több oldalról közelíthető (méret-, alak- és helyzet) és eltérő módokon adható meg (százalékban pl. $\pm 1\%$ vagy milliméterben pl. $\pm 0,1$ mm). Szabados megfogalmazásban az alkatrész pontossága egy jellemző, amely megmutatja mennyire sikerült megközelíteni a tervezett (elméleti) méretet, alakot és az alkatrész elemek helyzetét. Az abszolút 100%-os pontosságot vagyis a normál méretre való gyártást nem tudjuk elérni sem a hagyományos gyártásokkal, sem az új technológiákkal. A pontosságot a már régóta alkalmazott forgácsolásnál is sok minden befolyásolja, ezek közül néhány: szerszám élgeometria/állapot, forgácsolási paraméterek, szerszámgép állapot/pontosság, gépalapozás, alapanyag állapota, felületi kéreg minősége, stb. A 4.12. ábra segít értelmezni az eltérő pontossági csoportokat, a határoló vonalak jelképezik az eltérések jellegét.



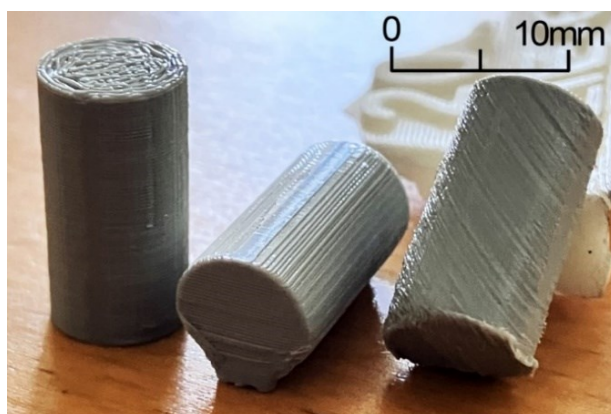
4.12. ábra. A 3D nyomtatott alkatrészek tipikus méret- (bal), alak-, (közép) és helyzetpontossági (jobb) hibáinak értelmezése

A különböző 3D nyomtatási technológiák eltérő pontossággal rendelkeznek, amellyel kapcsolatban az alábbiak a legfontosabbak.

FDM technológia: Az FDM nyomtatás méretpontosságát az alkalmazott gép hobby vagy ipari kialakításától függetlenül, a következők befolyásolják leginkább:

- A szobahőmérsékletre kijutó olvadt műanyag hűlés közben zsugorodik, ennek mértékét nem lehet pontosan előre meghatározni.
- A nyomtatófej mozgás közben a tehetetlenség következtében (ami a forgácsolásnál is ismert jelenség) az éles sarkokat (irányváltásokat) nem tudja pontosan lekövetni, gyakran „túlszalad rajtuk, így ezek kevésbé követik a tervezett méreteket.
- A paraméterek beállításának pontossága, amelyet gyakran próbálgatással (méret, sebesség, rétegvastagság) fokozatos változtatásokkal módosítva tudunk csak optimalizálni.

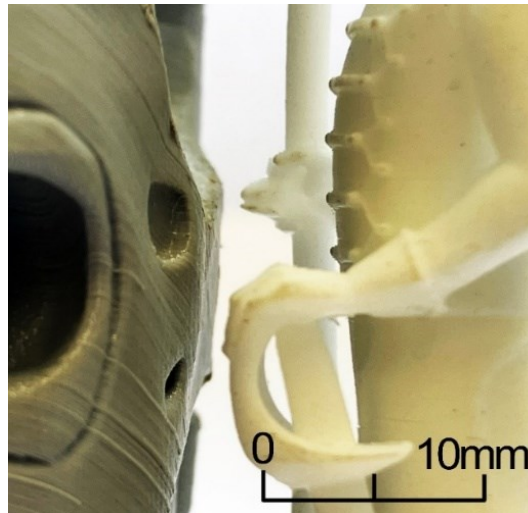
Az FDM 3D nyomtatásról elmondható, hogy (a képlékeny alapanyag nyomtató fúvóka közepéhez mért szétterülése miatt) a nyomat eleve kissé nagyobb lesz, mint ami a CAD-ben készített terven megadott méret. Ezt a jelenséget nevezzük „felülnyomásnak”, aminek döntő szerepe van, amikor egymáshoz illeszkedő alkatrészeket tervezünk, amiről külön fejezet részben olvashatunk később. Az FDM nyomtatott felület minőségére alapvetően kihat a munkadarab elhelyezkedése (orientációja) a nyomtatási platformon, ezt láthatjuk a következő 4.13. ábrán.



4.13. ábra Kisméretű csap alkatrészek, függőleges, vízszintes és 45°-ban döntött orientációval végzett nyomtatási eredményei, [forrás: fotó, Zsidai László]

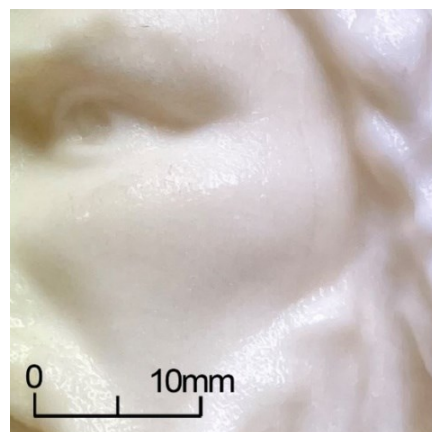
SLA/DLP technológia: A fotopolimerizációs elven működő nyomtatási technológiák, valamilyen fényforrást, (lézert vagy projektort) használnak a fényérzékeny gyanták kikeményítésére. Ezen technológiák pontossága a legjobbak közé tartozik a 3D nyomtatásokon belül. Az általános célú, olcsóbb gépek pontosság is körülbelül $\pm 0,1$ mm-re tehető, amíg, a professzionális drága ipari gépek akár a $\pm 0,01$ mm-es pontosságot is elérik. [58]

Az SLA/DLP technológia jó pontosságát a folyékony gyantából képzett jó rétegminőségeknek (felületi érdesség) és a hideg technológia miatt erősen lecsökkent vetemedésnek köszönhetjük. A fotopolimerizációs eljárás jó felületi minőségét szemben egy FDM nyomtatottal a 4.14. ábrán hasonlíthatjuk össze.



4.14. ábra. Középkategóriás FDM (bal) és DLP (jobb) nyomtatókkal készített struktúrált felületi minőségek összehasonlítása, [forrás: fotó, Zsidai László]

SLS technológia: A műanyag (gyakran PA) por ágyon történő szelektív lézeres szinterezés pontosságát alapvetően befolyásolja a porszemcse mérete, aminek függvényében az elérhető pontosság körülbelül $\pm 0,3$ mm-re tehető. Az SLS-el elérhető felületi minőség és részletezettség sokat javult az elmúlt 15 évben, és lényegesen jobbnak mondható, mint amit az FDM-el el tudunk érni, ezt mutatják be a következő 4.15. és 4.16. ábrák.

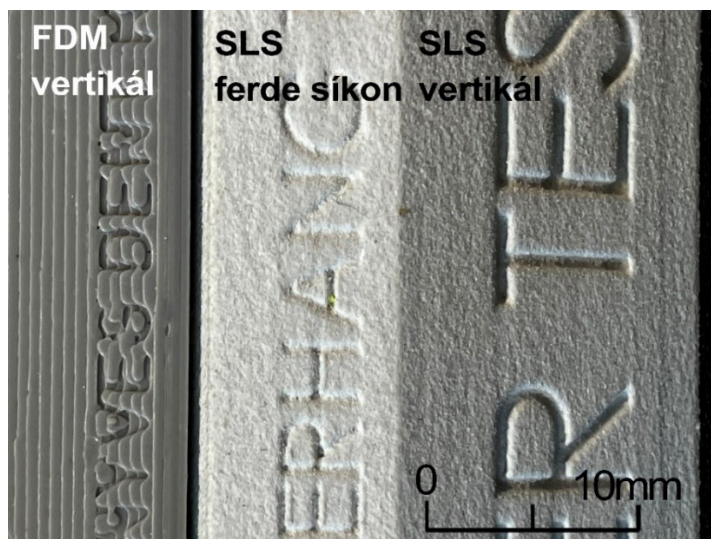


SLS (2000-es évek)



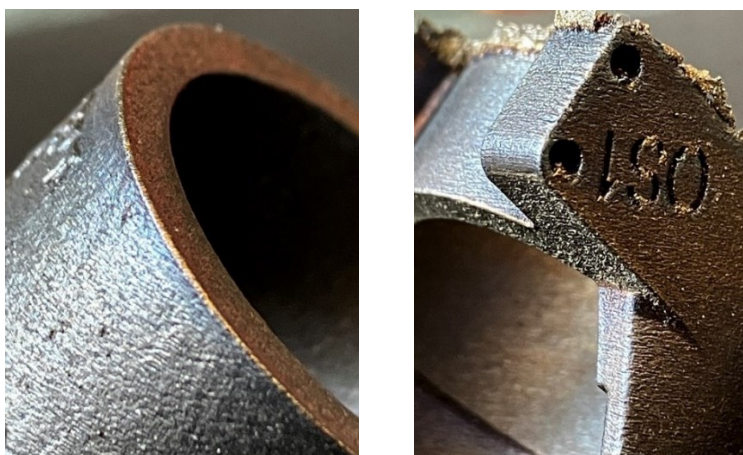
SLS (2020-as évek)

4.15. ábra 15 évvel ezelőtti (bal) és napjaink (jobb) ipari SLS technikájával elérhető felületi minőségek és részletezettség összehasonlítása, [forrás: fotó, Zsidai László]



4.16. ábra FDM függőleges síkon (fent) SLS alámetszett síkon (középen) és SLS függőleges síkon nyomtatott felületi minőségek és részletezettségek összehasonlítása, [forrás: fotó, Zsidai László]

DMLS technológia: A fémpor-fúziós eljárások, mint például a DMLS, lézert használnak a fémpor-részecskék körülbelül $\pm 0,1$ mm pontosságú szinterezésére (4.17. ábra).



4.17. ábra DMLS fémpor nyomtatott nyers alkatrész felületi minősége és részletezettsége, [forrás: fotó, Zsidai László]

Összefoglalva az előbbieket, elmondható, hogy a 3D nyomtatásnál ma még nem számolhatunk olyan jó pontossági értékekkel, mint CNC forgácsolásnál, vagy egyéb precíziós megmunkálásnál. 3D nyomtatásnál az pontosságot befolyásoló általános tényezők a következők (forrás: saját tapasztalat, és [58]):

- a 3D nyomtatási technológia típusa (filament, gyanta, por alapanyag és a megszilárdítás módja „meleg vagy hideg” technika alkalmazása)
- a nyomtatóban számos mozgó alkatrészek együttese, ezek illeszkedése és a mozgáshoz szükséges hézagok szerepe,

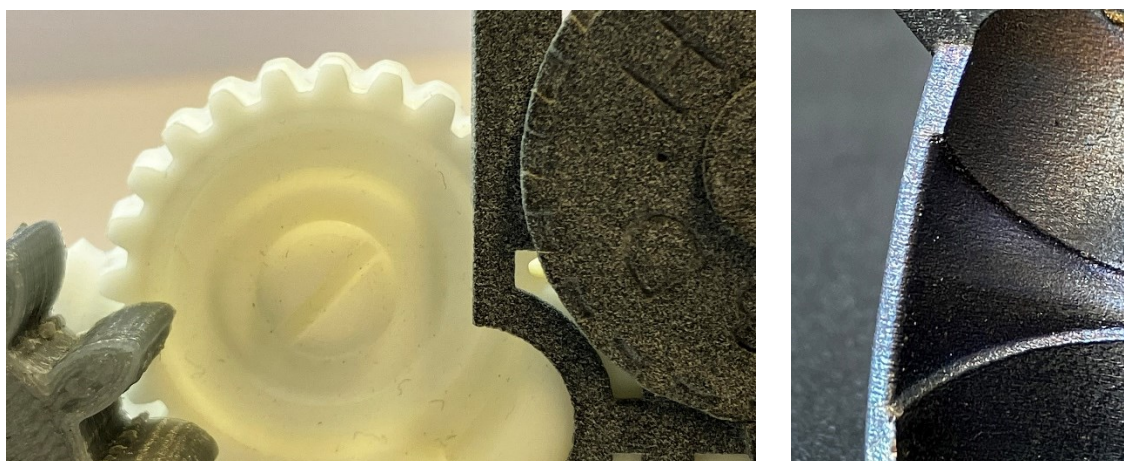
- a nyomtatott anyag állapota (pl. por anyag szemcsemérete, fúvóka átmérőre extrudált polimer),
- az anyagok nyomtathatósága, (például a rugalmas PLA, és a nemesfémeket tartalmazó ötvözetek gyakran feláldozzák a nyomtathatóságot az egyéb előnyeikért cserébe),
- a megszilárdítás módja (szabad hűlés, polimerizáció, ragasztás és főleg a későbbi vetemedések),
- a nyomtatási paraméterek (rétegvastagság, nyomtatási sebesség, pl. minél gyorsabb a nyomtatási sebesség, annál rosszabb a pontosság, hűtés módja, stb.),
- az alkatrész hibás CAD tervezése (pl. nagy felületek, túl karcsú forma, nem kellően támasztott alámetszések).

A következő 8. táblázat tapasztalati és irodalmi értékekre alapozva hasonlítja össze az eltérő alap technikák által nyújtott legjobb elérhető pontossági értékeket.

8. táblázat Az elérhető legjobb körülbelüli pontosságok összehasonlítása

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
$\pm 0,5$ mm	$\pm 0,15$ mm	$\pm 0,3$ mm	$\pm 0,1$ mm

A következő 4.18. ábra pedig az előbbi alap eljárások által nyújtott felületi minőségeket helyezi egymás mellé, azonos méretarányokban.



4.18. ábra Eltérő nyomtatási technológiák által biztosított felületi minőségek és részletesség (balról-jobbra: FDM-világos szürke, SLA-fehér, SLS-sötét szürke, DMLS-fémes), [forrás: fotó, Zsidai László]

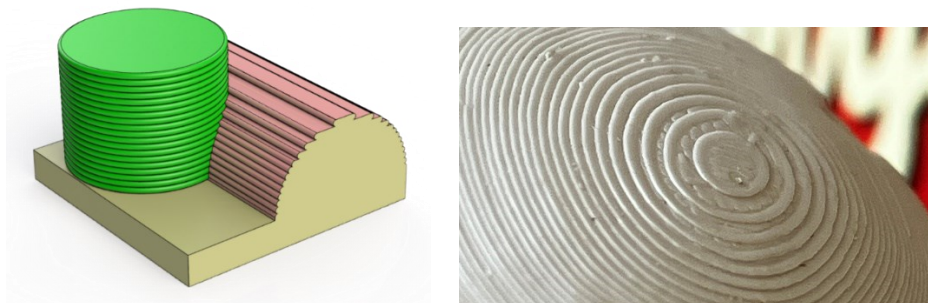
A pontosság javítására legelterjedtebb megoldások a következők:

- elterjedt módszer a forgácsolással történő utómunkálás (hibrid gyártás), amely történhet szabályos élű szerszámmal (fúrás, marás, esztergálás), de szabálytalan élű polírozó, vagy csiszoló szerszámmal is. Fémnyomtatásnál a

köszörülés is alkalmazható. Ugyanakkor számolni kell az ilyen utómunkálatok többlet idő, szerszám és munka igényével. Az utólagos forgácsolás további veszélye a felületi rétegek/falak elvékonyítása esetleges átszakítása extrém esetben a kitöltés is szabadon láthatóvá válhat.

- kedvező eredményt érhetünk el, ha már tervezésnél ellensúlyozzuk a felülnyomást úgy, hogy az alkatrészeket együttesen 0,5 mm-rel alulméretezzük. (Például, csap-furat illesztésnél, ha mindkét fél 3D FDM nyomtatással készül, akkor célszerű, kombinált módon a csap átmérőjét 0,25 mm-rel csökkenteni a furat átmérőjét pedig 0,25 mm-rel növelni. [56]

A felületi minőség javításának a leghatékonyabb módja a munkadarab nyomtatás közbeni orientációjának a helyes megválasztása, amelyet a következő ábrán láthatunk.



4.19. ábra A felületi minőség szempontjából előnyös (zöld) és előnytelen (lila) felületi orientációk, gömbsüveg felület rétegzése (jobb oldal).

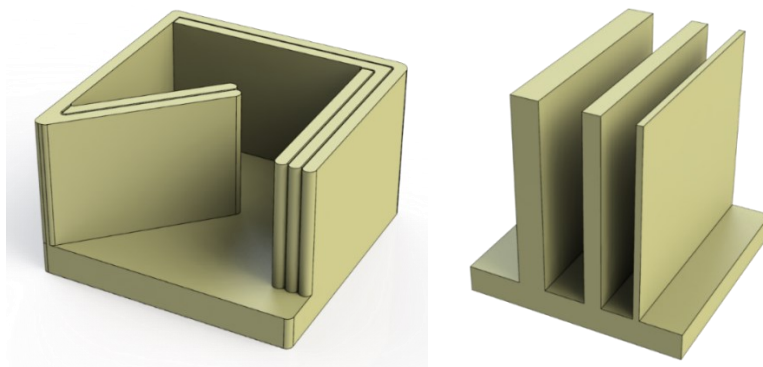
A 4.19. ábrán látható orientációk előnye és hátránya a pontosságnál tárgyalt rétegeképzéssel azonos eredetű. A nyomtatandó geometria egyértelműen meghatározza a megfelelő orientációt, látható az ábrán is, hogy egyenletes felületi minőséget biztosít a henger függőleges elhelyezése a vízszintessel szemben. Azonban lehet olyan eset, amikor nem lehet egyértelmű jó orientációt találni ehhez a feltételhez, tipikus példa erre a gömb geometria (4.19. ábra jobb oldal).

Fal/réteg vastagság

A nyomtatott alkatrész falvastagsága (kivétel, ha tömör kitöltéssel nyomtatunk) alapvetően meghatározza a mechanikai jellemzőket és a külső közegekkel (gáz és légnemű) szembeni tömítettséget.

A nyomtatott darab falvastagságát alapvetően meghatározza a nyomtatófej által egy menetben rögzített anyagvastagság. Ez függ a technológiától, hiszen FDM-nél a fúvóka SLA és SLS esetében a lézer DLP-nél a projektált képpontok vastagsága határozza meg. FDM nyomtatásnál ezt egyértelműen meghatározza az, hogy a

nyomtatófej hány extrudált polimer réteget helyez egymás mellé nyomtatáskor a fal mentén (ez eltérő a kitöltéstől), ahogyan ezt a 4.20. ábrán is láthatjuk.



4.20. ábra Eltérő számú (1, 2 és 3) rétegekből felépített falszerkezetek és falvastagságok

A fenti ábrákon látható rétegszámok és az általuk képzett falvastagság alapvetően függ a nyomtatófejben lévő fúvóka átmérőjétől. Az eltérő kereskedelembe kapható fúvóka átmérők és a hozzájuk kapcsolódó filament és falvastagság specifikációk a 9. táblázatban láthatók.

9. táblázat. Az FDM nyomtatóknál járatos fúvóka furatméret és a falvastagság kapcsolata [61]

	0,2 (0.25;0,3)	0.4 standard érték	(0,5) 0.6	0.8	1.0	1.2	1,5	2.0
	jó felületminőség, lassú nyomtatás		általános alkalmazás		nagy teljesítményű, gyors nyomtatás			
Ajánlott filament átmérő mm-ben	1,75	1,75 és 2,85 (3)				2,85 (3)		
Ajánlott minimum falvastagság (fúvóka átmérő x 3) mm-ben	0,6 (0,75;0,9)	1,2	(1,5) 1,8	2,4	3	3,6	4,5	6

Megjegyzések:

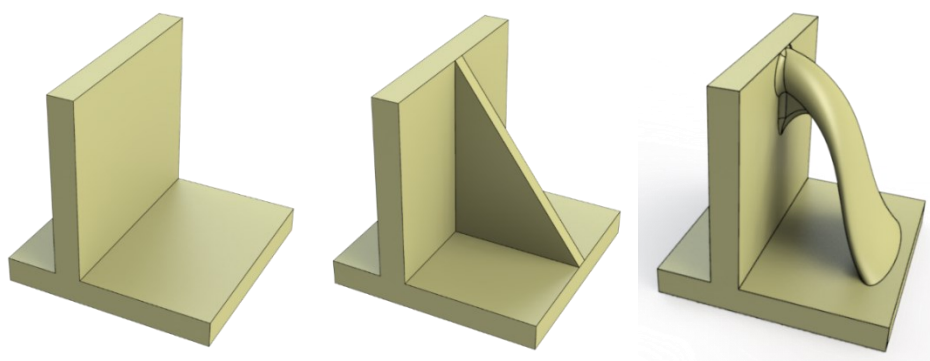
-a megadott fúvóka átmérők gyártótól függően eltérő variációkban kaphatók, a járatos méreteket jelölik az első értékek

-a filamentek átmérői kis mértékben eltérnek a gyártó és az anyagminőség függvényében, ezt minden esetben mérésel ellenőrizni, és a nyomtatási paramétereknél megadni szükséges

-a táblázat határértékei általános tapasztalati értékek ettől a gyártói előírások eltérhetnek

A 9. táblázatban látható, hogy a legelterjedtebb fúvóka átmérőnél ($\varnothing 0,4 \text{ mm}$), a falvastagság legalább háromszorosa (egyres források szerint a kétszerese) legyen a fúvóka átmérőjének. Az így kialakított falvastagság kellő szilárdságot, merevséget és jó felületet biztosít a nyomtatás során, ugyanakkor ez a falvastagság a modell minden részénél (oszlopok, belső furatok falvastagsága, stb.) betartandók.

A falvastagság értékét nem csak a fúvóka átmérő vagy a szemcseméret, de a nyomattal szemben elvárt mechanikai szilárdság és a merevség is befolyásolja. Fontos szempont, hogy egyedülálló vagy megtámasztott, vagy akár a VEM (Végesselemez szimuláció) módszerrel egyenszilárdságúra kialakított falat terveztünk, amint ezek a következő 4.21. ábrán láthatók.



4.21. ábra Támasztás nélküli (bal), megtámasztott fal (közép) és optimalizált (jobb) generatív borda geometria

A 4.21. ábra bal oldalán látható támasztás nélküli fal esetében, a következő 10. táblázatban látható minimális falvastagság értékeket javasoljuk az eltérő alap technológiák szerint.

10. táblázat. Támasztás nélküli falak ajánlott minimum falvastagságai

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
0,9 mm	1 mm	alapanyag függő	0,4 mm

SLS nyomtatás esetében a támasz nélküli falvastagság lényegesen függ az alapanyagtól, pl. homogén PA esetén a falak javasolt vastagsága $\sim 0,7 \text{ mm}$. Ha az alapanyag erősítő por komponenseket tartalmaz (pl. grafit, üveg) a minimális ajánlott vastagság megnövekszik $\sim 2 \text{ mm}$ -re.

DMLS nyomtatásnál általában a min. $0,5 \text{ mm}$ -es falvastagság ajánlott, de vékonyabb, $0,4 \text{ mm}$ is elérhető az anyagtól, az orientációtól és a nyomtatási paraméterektől függően.

A tervezésnél bizonyos mértékben csökkenthetők a falvastagságok, ha megtámasztást használunk, (4.21. ábra középső része) vagy eleve vannak csatlakozó oldalak (pl. dobozos formák), de ne feledjük, hogy a csatlakozó felületek, a hődeformációval kapcsolatban el is deformálhatják a falat. A következő 11. táblázat mutatja a javasolt minimális falvastagság értékeket, a legalább egy oldalon támasztott (4.21. ábra középső rész) falak esetében.

11. táblázat. Az egy támasztással rendelkező falak ajánlott minimum falvastagságai

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
0,8mm	0,5mm	0,7mm	0,4mm

A falvastagságok kész alkatrészre gyakorolt kritikus hatása miatt, fontos megjegyezni, hogy a tényleges falvastagság mértéke egyedi mérlegelést igényel, attól függően, hogy milyen területen alkalmazzuk a kész alkatrészt. Bemutatásra vagy vizsgálatokra készített alkatrészekenél a fenti minimális vastagság értékek megfelelőek, azonban funkcionális használatra szánt elemeknél a falvastagság növelendő. Van olyan gyakorlati tapasztalat, ahol legalább 2mm-es vagy annál nagyobb vastagságot használnak függetlenül a korábban ajánlott két és háromszoros szorzó helyett.

A 4.21. ábra jobb oldalán a fal támasz speciális optimalizált kialakítását láthatjuk, amely kifejezetten már az additív gyártáshoz készült, annak geometriai szabadság lehetőségeit jól kihasználva. Az itt látható fal-támasz azonos mennyiségű anyag felhasználása mellett nagyobb felületen osztja el a terhelést, így jóval erősebb, mint a normál támasz, ugyanakkor láthatók elvékonyítások is. Korábbi pl. fröccsöntési technológiákkal ez jóval bonyolultabb (alámetszéseknel szinte lehetetlen volt) legyártani, ezért nem is merült fel az ilyen formák használata, ami most a 3D nyomtatással lehetővé vált.

4.3. Tervezési irányelvek, technológiai korlátok

A tervezési szabadság jelentős növekedése az additív technológiáknál nem feltétlen jelenti azt, hogy bármely jól felépített 3D CAD modell alkalmas a 3D nyomtatásra. Ezt számos tényező befolyásolja, a következőkben ezeket az irányelveket és javaslatokat próbáljuk összefoglalni.

4.3.1. Kiemelkedések és hornyok optimalizálása

A nyomtatandó elemek gyakran tartalmaznak kis méretű domborított és vésett jellegű alakajátosságokat, pl. szöveg, horony, perem, ékpálya, reteszhorony stb. amint ezt a 4.22. ábra is bemutatja.



4.22. ábra Keskeny domború kiemelkedések és (vésett) hornyok előnyös és előnytelen elhelyezése a munkadarab eltérő sík oldalain és ívelt felületein (kedvező zöld, kedvezőtlen piros és elfogadható kék színjelzésekkel)

Ezeknek a finom felületelemeknek az additív gyártáshoz tervezése, külön figyelmet igényel a nyomtatási technológiától függően. Ezeknek a finom részeknek a kialakítása a nyomtatás rétegzése, a szálhúzás és a hődeformációk szempontjából korlátozott. A következőkben tekintsük át ezeket technológiák szerint.

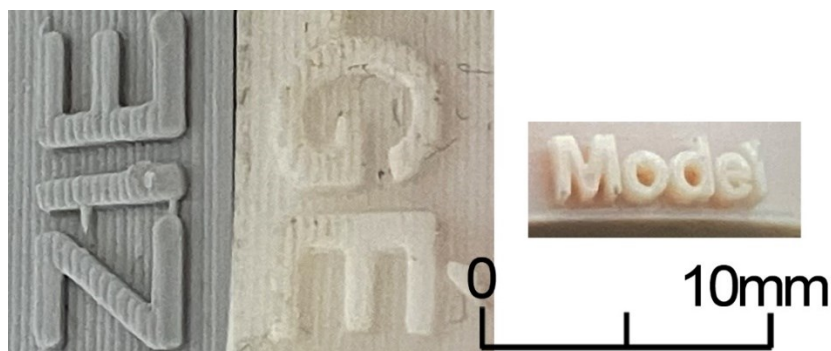
A leírásainkban szereplő alap technológiák közül talán az FDM az, amely a leggyengébb minőségben tudja kezelni a kiemelkedéseket/hornyokat. Dombornyomott és vésett FDM nyomtatott szövegezés látható a következő ábrákon.



4.23. ábra FDM nyomtatott domború és hornyolt szöveg azonos méretarányban, [forrás: fotó, Zsidai László]

A 4.23. ábrán látható FDM nyomtatott domború és hornyolt elemek a gyakorlati tapasztalatok alapján minimálisan 0,6 mm széles és 2,0 mm magas legyen, ez például szövegezésnél az olvashatóság határát is jelenti.

Az SLA/DLP nyomtatás lényegesen jobb minőséget produkál a domború és hornyolt felületelemeknél mint az FDM, amint ezt a 4.24. ábrán is láthatjuk.



4.14. ábra. DLP (középen) és FDM (balra) nyomtatott domború és hornyolt szöveg azonos méretarányban valamint kisméretű dombornyomott SLA felületelem (jobbra), [forrás: fotó, Zsidai László]

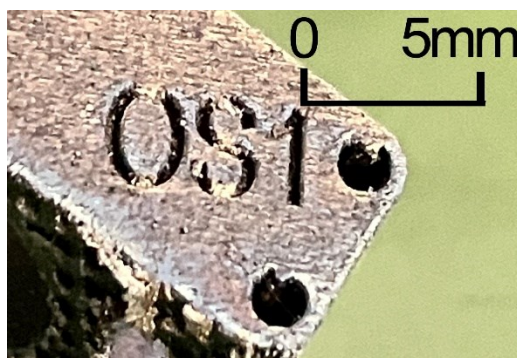
Az SLA műgyantás nyomtatás esetében eltérőek a gyakorlati tapasztalatok a domború és a hornyolt nyomatok esetében, általában a kidomborodó részek kedvezőbben nyomtathatók. Ennek megfelelően a domború elemek ajánlott szélesség/magasság értéke 0,1/0,1 mm, ugyanakkor a hornyok ajánlott szélessége/magassága már 0,4/0,4 mm-ben limitált.

SLS nyomtatásnál a domborítások és a hornyolások minimum 1 mm-rel emelkedjenek ki vagy süllyedjenek bele a felületbe, de meg kell jegyezni, hogy ha a láthatóság a lényeg (pl. az SLA-val szemben) ugyanolyan méretek mellett a hornyok jobban láthatóak SLS-nyomtatásnál, mint a kidomborodó részek. Az SLS nyomtatásnak ezeknél a felületelemeknél tapasztalható közepesnek mondható minősége a por alapanyag szemcsézettségével erősen összefügg, ez jól látható a következő 4.25. ábrán.



4.25. ábra. Eltérő méretarányú SLS nyomtatott domborítások és hornyok minősége, [forrás: fotó, Zsidai László]

A DMLS technológiánál mind a kidomborodó, mind a horony geometriánál minimálisan 0,1 mm méretekkel jó nyomtatási minőség érhető el, ezt láthatjuk az 4.26. ábrán.



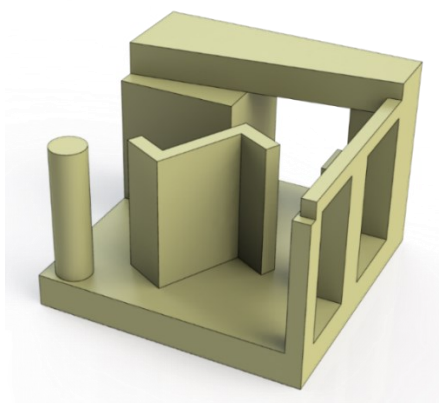
4.26. ábra. DMLS nyomtatott betűhornyok minősége, [forrás: fotó, Zsidai László]

A következő 12. táblázat összefoglalja a kiemelkedések és hornyok javasolt minimális szélességi és mélységi méreteit.

12. táblázat Kiemelkedések és hornyok javasolt minimális szélesség/mélység méretei

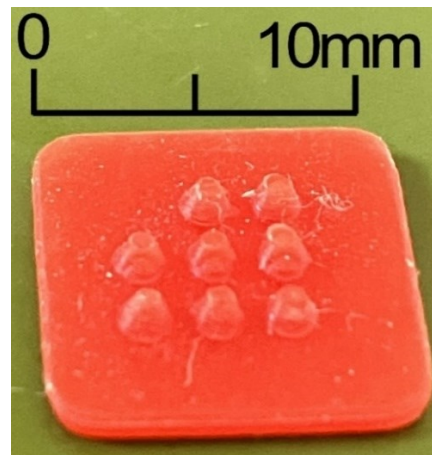
FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
0,6/2 mm	domború: 0,1/0,1 mm horony: 0,4/0,4 mm	1/1 mm	0,1/0,1 mm

A kiemelkedő és hornyolt felületelemeken túl számos más, a geometria cizelláltságát meghatározó felületelemmel számolhatunk a tervezések során, ezt nevezhetjük részletezettségnek (4.27. ábra).



4.27. ábra. Példák a munkadarab részletezettségét befolyásoló geometriai elemekre

A 4.27. ábrának megfelelő kiemelkedő részek megfelelő minőségű nyomtatása FDM technológia esetén 2-3 mm keresztmetszeti méretekben limitálható. Ugyanezek SLS nyomtatónál akár 1 mm alá is csökkenthetők. Az egyik legjobb minőség SLA/DLP nyomtatással érhető el. Az előbbiekből is látható, hogy a részletezettség minőségét alapvetően befolyásolja a nyomtatási technológia és a nyomtató minősége. A következő 4.28. ábrán SLS és SLA technológiával készített kisméretű geometriai részletek láthatók.



4.28. ábra. SLS (bal) és SLA (jobb) technológiával készült kisméretű geometriai részletek, [forrás: fotó, Zsidai László]

DMLS nyomtatás esetén a lézersugár mérete határozza meg alapvetően a gyártható minimális geometriai elemek méretét (pl. sarkok, hézagok), ezért a legtöbb DMLS esetében 0,6 mm-nél kisebb elemek nem jól nyomtathatók. A fémpornyomtatáshoz tervezés gyakorlatában gyakran alkalmazzák a 8:1 (függőleges magasság:szélesség) arányt, az így kialakított alkatrészek megfelelő stabilitással bírnak az alaplemezen a nyomtatás során.

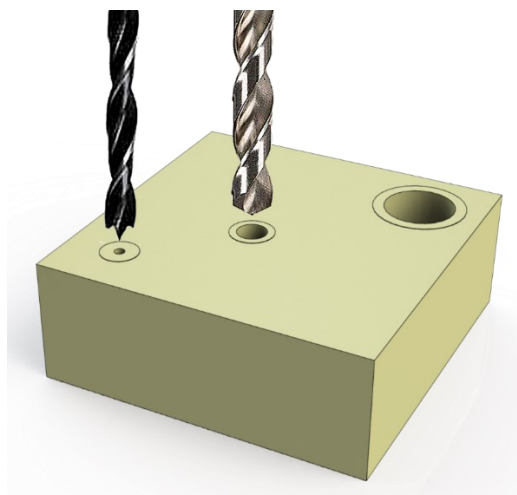
4.3.2. Furatok, csapok nyomtatása

A 3D nyomtatott elemekhez tartozó furatok (kör, egyéb szelvény keresztmetszet) nyomtatását, a technológia és az alapanyag lehetőségein túl, alapvetően befolyásolja a következő két tényező:

- a furat méret és
- a furat pozíció.

A furat átmérő hatása, furatnyomtatás

A furat 3D nyomtatásának legegyszerűbb módja a direkt furat nyomtatás. Ezt a nyomtatási platformra az alámetszést figyelembe véve (45° - 50°) bizonyos átmérő méret fölött tehetjük meg. Ha a technológiánál javasolt furat átmérőnél (13. táblázat) kisebb méretre, vagy az nyomtatásból adódó felületi minőségnél jobb és pontosabb furatra van szükségünk, forgácsolással végzett utómunkálatokat kell előre tervezni. Az utófúrások lehetnek bővítő (felfúró) jellegűek, amikor kisebb méretre nyomtatjuk majd nagyobb fúróval (nyomtatott furatot, mint vezetőfuratot használva) felfúrjuk vagy „telibefúrások”, amikor nem, vagy csak bekezdő/jelölő kúpot nyomtatunk a modell felszínére (4.29. ábra).



4.29. ábra. Eltérő furatméret kialakítások, telibe- (bal), bővítő fúrással (közép) és direkt (jobb) nyomtatással

Az FDM technológiánál, a telibe vagy felfúrásnál ügyelni kell a falvastagságra, hiszen ez a fúrással csökken, de el is tűnhet azoknál a modelleknél, amelyek nem 100%-os kitöltéssel készülnek. A 2 mm-nél kisebb átmérőjű furatok közvetlen nyomtatását kerülniük.

Az SLA/DLP technológia tömör modelleket nyomtat, így itt nem gond a falvastagság a fúrások esetében. A direkt nyomtatású furatok átmérője 0,5 mm-nél ne legyen kisebb (a furatok eltömődhetnek).

SLS technológiánál a zsugorodás miatt célszerű a furatok átmérőjét nagyobbra tervezni, ez a túlméret függ az átmérőtől is, de általában az 1,5 mm átmérőnövekmény az elfogadott.

DMLS nyomtatásnál az elfogadható furatpontosság eléréséhez a minimális furat átmérő 1,5 mm. Ha pontosabb (illeszthető) furatot akarunk előállítani, ahhoz kisebb méretre nyomtatás majd utána történő forgácsolással történő megmunkálás szükséges.

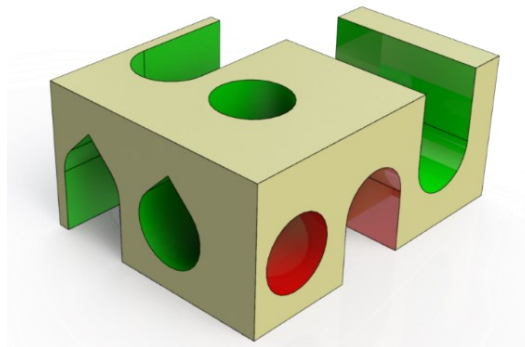
13. táblázat Minimális ajánlott nyomtatható furatméretek technológiák szerint

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
2mm	0,5mm	1,5mm	1,5mm

A vízszintesen direkt nyomtatható szabályos kör szelvényű furatok maximális mérete már nehezebben meghatározható, hiszen itt a nyomtatási beállítások játszanak nagyobb szerepet és nem a fúvóka a lézersugár vagy az alapanyag állapota, ahogyan azt a minimális átmérőknél láttuk. Például DMLS nyomtatásnál gyakori akár még a 8 mm-es átmérő is elfogadható minőségben.

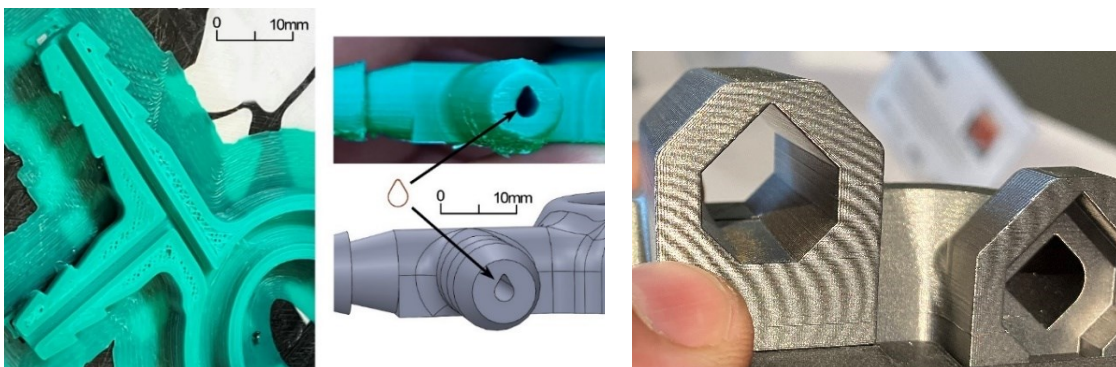
A furat pozíciójának a hatása, orientáció

A furatok nyomtathatóságát alapvetően meghatározza azok orientációja a nyomtatási síkhoz viszonyítva. Általánosságban elmondható, hogy a platformra merőleges (a 45°-os alámetszési határig bezárólag) furat tengelyek kedvezőbbek, mint az azzal párhuzamos vagy hegyes szöget bezárók. Az optimális függőleges furat orientációknál is felléphetnek hibák, ezek a pontossággal és az „elefántláb”-hatással (lásd később) kapcsolatosak. Sok esetben, azonban nem lehet elkerülni a nyomtatási platformmal párhuzamos, vagy közel párhuzamos furatokat (pl. térbeli furat csatornák), ezért erre is találnunk kell megoldást, erre láthatunk néhány példát a következő 4.30. ábrán.



4.30. ábra. Eltérő furat és horony orientációk helyes (zöld) és helytelen (piros) geometriai kialakításai

A fenti ábrán jól látható, hogy a jó vízszintes furat/horony kialakításoknál a hagyományos kör kontúrtól (FDM, SLA/DLP és DMLS esetében) el kell térnünk, így zárva ki a felső boltív egyértelmű alámetszését, amely támaszt igényelne. Ha a furat átmérője és mélysége lehetővé teszi, persze használhatunk belső támaszokat, amelyek így nyomtatás után eltávolíthatók, de sok esetben ez nem megoldható. A 4.30. ábrán zölddel jelzett vízszintes furatok csepp formája az előbbi problémát megoldja, hiszen a felső szög részek a 45°-os szöghatárnak megfelelnek, ezekre láthatunk gyakorlati példákat a következő 4.31. ábrákon.

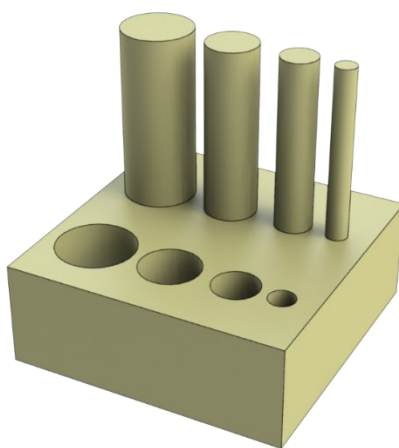


4.31. ábra. Csepp furatkontúrok alkalmazása FDM (bal) polimer és DMLS (jobb) fém nyomtatott alkatrészeknél, [forrás: fotó, Zsidai László]

A fenti ábrán látható polimer áramlási csatornával rendelkező alkatrésznél teljesen elkerülhető volt az alátámasztás, az egyébként bonyolult belső üreghrendszerrel, amíg a fém alkatrész furatai csatlakozó felületként funkcionálnak, egyező pozitív geometriával rendelkező ellendarabhoz. Fontos megjegyezni, hogy az orientáció a korábban már tárgyaltak szerint (rétegrendek, főleg FDM-nél) továbbra is jelentős hatással van a csatornafelület minőségére és gyakran lazább tűréshatárokat (illesztési hézagméreteket) igényelnek.

Csapok nyomtatása

A tradicionális, kör keresztmetszetű furatok nyomtatásához hasonlóan a csapok nyomtatása is korlátokba ütközik, itt is a minimálisan (jó minőségben) nyomtatható átmérők ismerete fontos (4.32. ábra), (14. táblázat).



4.32. ábra. Nyomtatható minimális átmérők értelmezése csapok és furatok esetében.

A 4.32. ábrának megfelelő elrendezésben, az FDM-el nyomtatott (funkcionálisan illeszkedő) függőleges csapok javasolt minimális átmérője 3 mm. A csapok pontosságával kapcsolatos fő probléma az eltérő hűtésből adódik. Gyakran nem nyomtatják az alkatrészre a csapokat, hanem inkább furatkialakítás után külön rögzítenek azokba hengeres (akár kereskedelmi forgalomban kapható) csapokat.

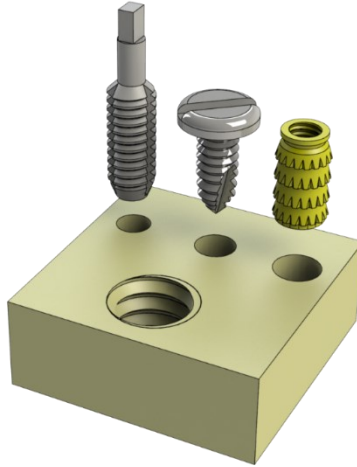
DMLS fémnyomtatásnál a javasolt minimális csapátmérő 1 mm, de ez függ a csap magasságától, amelynek növelésével csökken a pontosság. Itt is javasolható az FDM esetében említett utólagos csap beszerelés.

14. táblázat Minimális ajánlott csapméretek technológiák szerint

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
3mm	0,5mm	0,8mm	1mm

4.3.3. Menetes furatok kialakítása

A nyomtatott alkatrészek menetes részeinek kialakítása, a 4.33. ábra szerint a következő lehetőségek valamelyikével történhet. A menetes furatokkal kapcsolatban leírt gyakorlati tanácsok egyaránt vonatkoznak FDM, SLA/DPL és SLS nyomtatás technológiákra is.



4.33. ábra. Menetes furatok eltérő kialakításai 3D nyomtatáskor

A fenti ábrán látható megoldások a következők.

- Közvetlenül 3D nyomtatott menet, (4.33. ábra előterében) ennél a megoldásnál a menetprofilokat nem utólagosan készítjük el forgácsolással, hanem rányomtatjuk az alkatrészekre. Az így még használhatóan elkészíthető legkisebb menet a tapasztalatok alapján FDM esetében M5. A megoldás előnye, hogy gyors és a menetek kialakításánál nem kell ragaszkodnunk a szabványos menetprofilokhoz, gyakorlatilag bármilyen geometriájú profil kialakítható válik ezáltal. Hátránya, hogy a nem megfelelően beállított nyomtatási tulajdonságok deformációkat okozhatnak az alkatrészek felületein, melyek a menetek esetében megszorulásokhoz, törésekhez vezethetnek. Az egymáson mozgó meneteknél (pl. mozgatóorsó) a támasztékok használatát célszerű kerülni, tapasztalatok szerint még az FDM-nél közkedvelt vízben leváló támaszanyagot (PVA) is.
- Menetek utólagos elkészítése menetfúróval a 4.33. ábra háttérében balra látható, itt a magfurat elkészítésénél bevett gyakorlat a menet külső átmérőjének 90%-val történő előfúrás (a fémipari gyakorlatban ez M10 menetig 80% de ott gyakran háromlépcsős menetfúrást alkalmazunk). Hátránya, hogy az éles menetfúró átvágja a furatfal nyomtatott rétegeit, ezzel csökkentve azok teherbíró képességét.

- Menetek utólagos elkészítése önmetsző csavarral (fakötésű vagy lemezcsavar), ahol a csavar saját maga metszi ki a szükséges menetet (szoros illeszkedést biztosít) a felfogó anyagba. A gyakorlatban, ha a csavarhoz egyéb utasítás nem áll rendelkezésre a csavar külső menet átmérőjének 95-96%-val készítsük el a magfuratot. A módszerrel időt spórolunk a menetfúrás kihagyása miatt és rögtön létrehozhatjuk a kívánt csavarkötést, ugyanakkor többszöri szét és összeszerelésnél gyorsan romlik a menet állapota (4.33. ábra háttérben közén).
- Menetek utólagos elkészítése menetes betéttel (4.33. ábra háttérben jobbra) is történhet, amelyek a korszerű polimertechnikában széles körben terjedtek el, és többféle kialakítása létezik. A menetes betétek kialakításait nézzük át részletesebben.

Menetes betétek

Önmetsző menetes inzerterek alkalmazása, amelyeknek az anyaga lehet acél horganyzott vagy nemesacél. Önmetszéssel és/vagy ragasztással is rögzíthetők. A betétek nagy terhelhetőségűek, de természetesen ezt igazából a hordozó anyag és a betét rögzítése határozza meg elsősorban, hiszen alacsony nyírószilárdságú anyagokhoz, egyebek mellett a műanyagokhoz is alkalmazzák. Önmetsző menetes betéteket láthatunk a következő 4.34. ábrán.



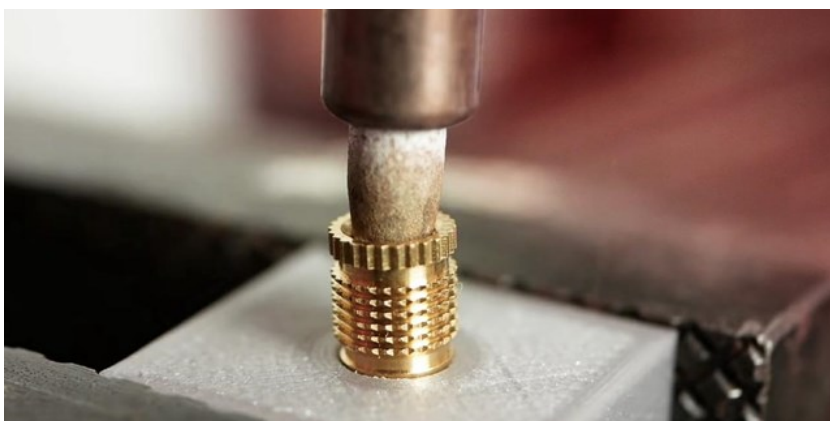
4.34. ábra Acél és horganyzott önmetsző menetes betétek [www.kipp.hu]

A következő 4.35. ábrán hőszigeteléssel szerelhető betéteket látunk, amelyek jó hővezető képességet és korrózióállóságot biztosító sárgarézből készülnek.



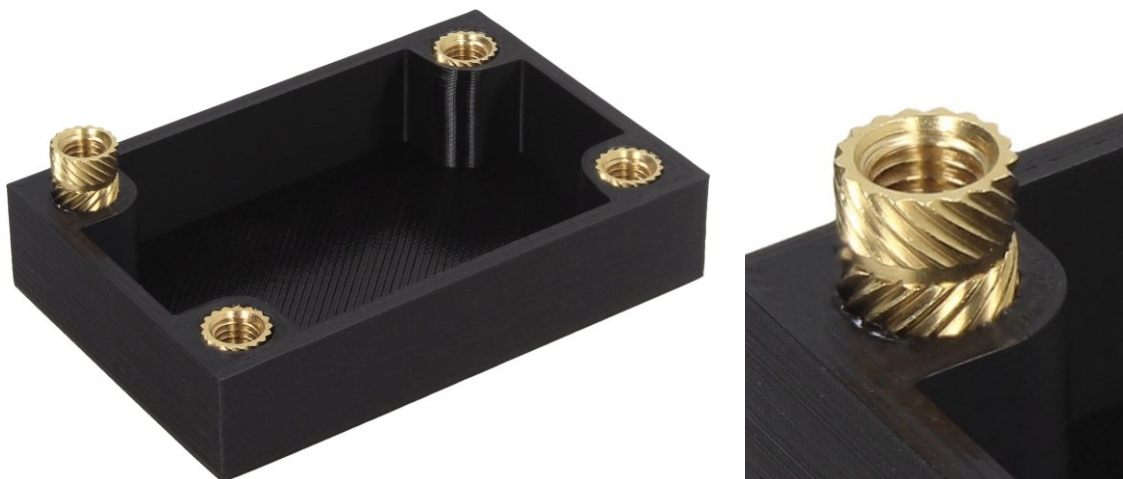
4.35. ábra Sárgaréz menetes betétek [Tappex® MULTISERT®, www.tme.eu; www.3djake.hu]

Ezeket a belsőmenetes betéteket is utólag illesztjük be az alkatrészekbe, de nem önmetszéssel, hanem préseléssel, ultrahangos beillesztéssel, és a leggyakrabban hőbeillesztéssel. Hőbeillesztésnél a betétet felhevítjük majd így nyomjuk bele a hordozó anyagba (itt 3D nyomtatott alaptest). A menetes betét megfelelő felmelegítési hőmérséklete ideális esetben megegyezik a Filament Hot-End hőmérsékletével. A felmelegítést könnyedén elvégezhetjük akár egy forrasztópákával, majd ennek segítségével bele is nyomhatjuk a felhevített betétet a nyomtatott alaptestbe, amely a hő hatására képlékennyé válik (4.36. és 4.37. ábra). Ezután az újrászilárdulás következtében kialakul a kötés az alkatrész és a menetes betét között.



4.36. ábra. Menetes betét behelyezése forrasztópákával

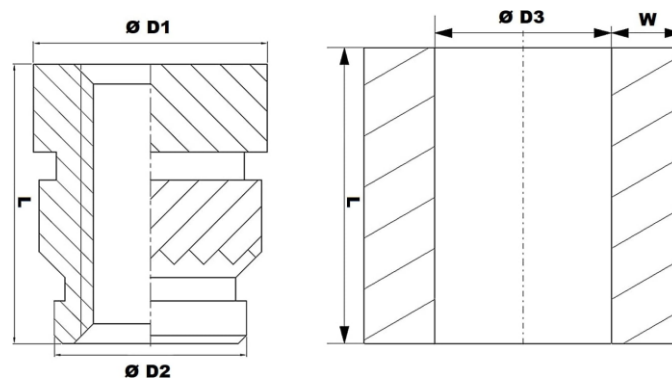
[www.extrudr.com/en/blog/gewindeeinsatze-fur-perfekte-verbindungen-von-3d-d]



4.37. ábra Hőszilárdított menetes betétek beszerelés után és közben

[www.3djake.hu/3djake/menetbetetek-50-darabos-szett]

A hőszilárdított betétek is igényelnek előfuratot, amelyet közvetlenül nyomtatunk vagy előfúrunk a hordozón, ehhez érdemes a gyártók előfúrási és a betét körüli minimális falvastagságokra vonatkozó javaslatait betartani, ezekre látunk példát a következő 4.38. ábrán (megjegyzem ezek arányai a betét külső felületén elhelyezett kapaszkodó körmök eltérései miatt különbözhetnek).



Menetméret	Ø D1	Ø D2	Ø D3	L (+1 mm)	W (min)
M3	4,6 mm	3,9 mm	4,0 mm	5,7 mm	1,6 mm
M4	6,3 mm	5,5 mm	5,6 mm	6,35 mm	2,1 mm
M5	7,1 mm	6,3 mm	6,4 mm	9,5 mm	2,6 mm
M6	8,7 mm	7,9 mm	8,0 mm	12,7 mm	3,3 mm
M8	10,24 mm	9,5 mm	9,6 mm	12,7 mm	4,5 mm

4.38. ábra, Hőszigetelt menetbetét és az előkészítő furat valamint a környező falvastagságok ajánlott értékei [www.3djake.hu/3djake/menetbetetek-50-darabos-szett]

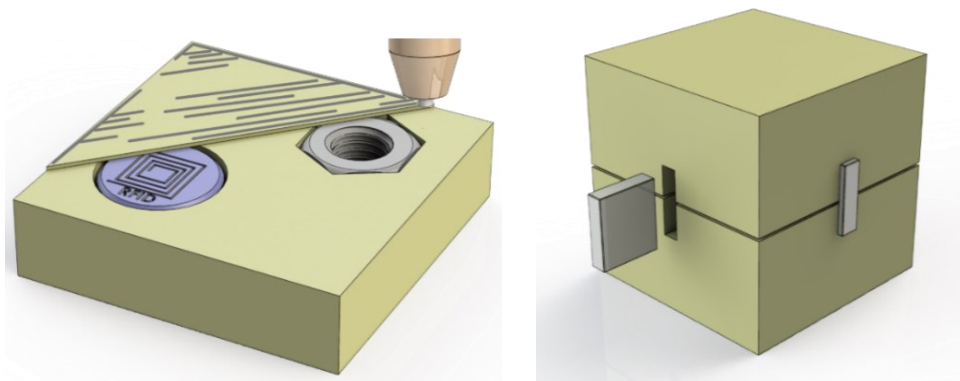
További megoldásokat a menetes kötések kialakítására az inzerterek alkalmazása témakör is tartalmaz.

4.3.4. Inzerterek alkalmazása

A 3D nyomtatás geometriákat érintő szabadsága, lehetővé teszi az anyagon belüli azonos vagy más anyagból készült belső alkatrészek elhelyezését. Ez számtalan célt szolgálhat, ezek közül néhány már a gyakorlatban bizonyított megoldás a következő:

- nagyobb szilárdság biztosítására kereskedelemben kapható menetes alkatrészek
- azonosításra szolgáló jeladók (pl. RFID)
- illesztő elemként szolgáló csapok, lapok
- rugós rögzítőelemek
- elektronikai panelek

Az előbbiek közül néhány megoldásra láthatunk példákat a következő 4.39. ábrákon.

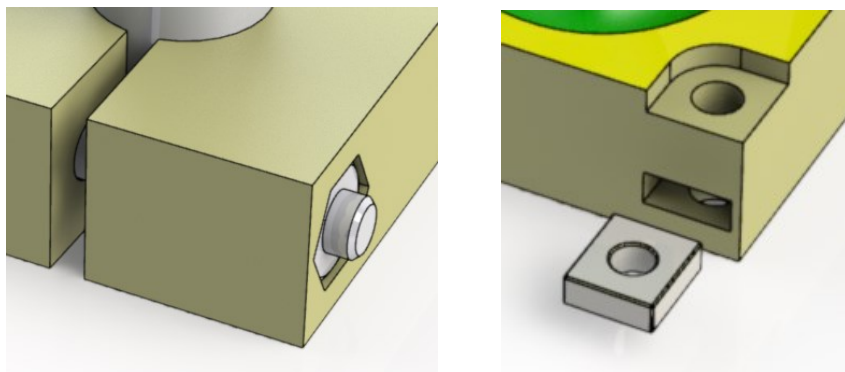


4.39. ábra. RFID jeladó és hatlapfejű acél csavar integrált elhelyezése nyomtatás közben (bal oldal) illesztő lemezek elhelyezése a nyomtatást követően (jobb oldal)

Az inzertekhez sorolhatjuk a másik alponthan bemutatott hősajtoló menetbetéteket is, ugyanakkor az itt bemutatott inzertek közös jellemzője a deformáció nélküli illesztés. Ehhez fontos a nyomtatást megelőző előtervezés, a megfelelő nyomtatási orientáció és technológia kiválasztása. Nem minden technológia alkalmas a 4.39. ábra bal oldalán látható zárt belső térbe helyezett inzertek alkalmazására. Itt előnyös az FDM technológia felfelé történő rétegeképzése, ahol van lehetőségünk üres fészkek kialakítására.

Az FDM nyomtatásnál már több szeletelő szoftver felkínálja opcióban az inzertek elhelyezéséhez szükséges megállást, majd a nyomtatás folytatását a lezáráshoz. Ügyelni kell a fészkek megfelelő mélységére, hogy a behelyezett inzertek ne emelkedjenek ki a felső réteg szintje fölé, mert károsíthatják a nyomtatófejet, ezért az orientációnál is a 4.39. ábrán látható vízszintes inzert elhelyezések az előnyösek.

A zárt térben elhelyezett inzerteket az SLS és az SLA technológia nem támogatja. Ez a gyanta és a porágy sajátosságaival magyarázható. Az SLS és az SLA nyomtatásnál az utólagos inzert elhelyezés a javasolt, amely a 4.40. ábra bal és jobb oldalán látható.



4.40. ábra. Példák nyomtatást követően elhelyezhető menetes inzertekre

A 15. táblázat áttekinti a zárt és utólagos inzert elhelyezés lehetőségeit a főbb nyomtatási kategóriákban.

15. táblázat. Inzertek alkalmazhatósága nyomtatás közben zártan vagy utólagosan

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
zártan, utólagosan	utólagosan	utólagosan	utólagosan

4.3.5. Osztott geometriák alkalmazása

A 3d nyomtatás tervezésénél gyakran kényszerülünk arra, hogy metszősíkok vagy felületek mentén szétdaraboljuk a modellt, ezek a következő esetekben indokoltak:

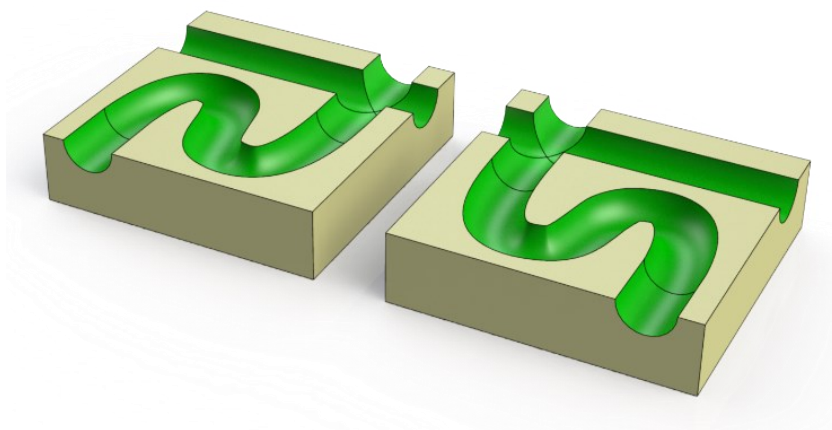
- a munkatér nem elegendő a modell méreteihez
- a modell belsejében lévő zárt üregeket alátámasztás nélkül kívánjuk nyomtatni
- több oldali alámetszésekkel tarkított felületek miatt nem tudjuk másképpen elkerülni a támasztékokat.

Modell méret nagyobb a munkatérnél

A rendelkezésünkre álló 3D nyomtató munkatere adott, ez típustól függően változó. Az egészen kicsi 40x20x90mm-től (iBox Nano 3D printer, [62]) akár az egy métert is meghaladó munkatér oldalméretekkel rendelkező nyomtatókig (pl.: Industry Magnum FDM nyomtató, [63]). Amennyiben nem fér el a munkadarabunk a munkatérbe azt több darabra kell osztanunk, célszerűen még a tervezési fázisban, és ez akár a kialakítást is befolyásolhatja. Ügyeljünk arra, hogy a szétválasztás lehetőleg ne a teherviselő részek közelébe kerüljön.

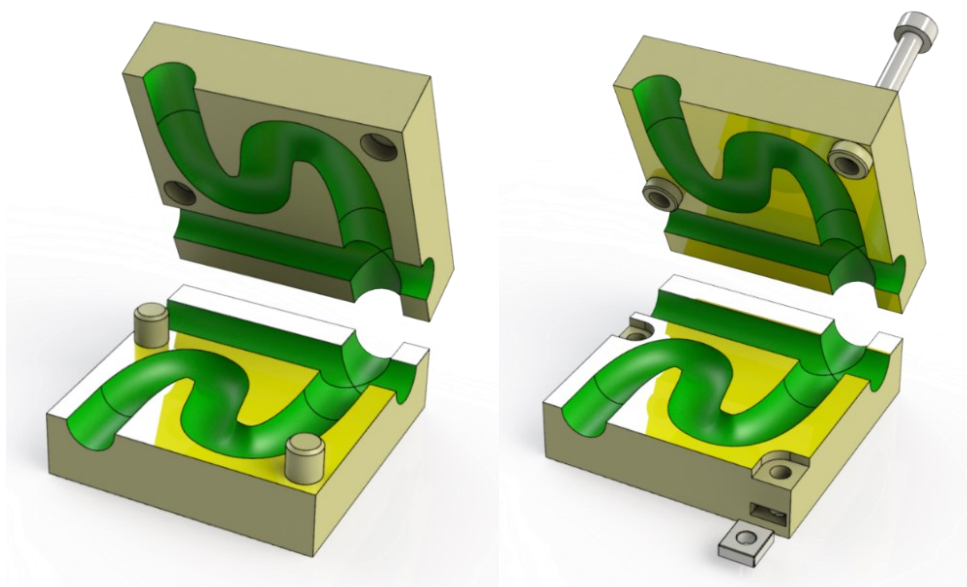
Belső zárt üregek osztott geometriával

Ahogy már többször említettük, az FDM és részben az SLA nyomtatás sajátossága az alámetszések alátámasztás igénye. Ezek részben a másik alponthoz leírt 3D nyomtatáshoz kidolgozott sajátos tervezési megoldásokkal kiküszöbölhetők, ugyanakkor ez nem mindig megoldható. Ilyen esetekben megoldás a belső felületek osztó síkjában vagy osztófelületén történő geometria darabolás, ezekre láthatunk példákat a következő 4.41-4.44. ábrákon.



4.41. ábra. Egyszerű síkbeli osztás illesztő felületek nélkül

A 4.41. ábrán látható osztás 2D sík mentén osztja két félbe a modellt. Ügyelni kell arra, hogy a belső zölddel jelölt csatornának pontosan a közepén helyezkedjen el az osztósík, így azok félkörívet alkossanak, mindenféle alámetszés nélkül. A felületek semmilyen illesztő elemet nem tartalmaznak, így egyszerű a tervezésük és a nyomtatás is rövidebb időt igényel. Hátránya az illesztések hiánya, így a két fél egymáshoz pozícionálása nagyobb körültekintést, esetleg szerelő készüléket is igényelhet. A két fél egymáshoz rögzítése ilyen esetben rögzítő/tömítő ragasztással történik. A felhasználható ragasztó anyagokról rövid leírás a "Technológiai tervezés" fejezetben található.

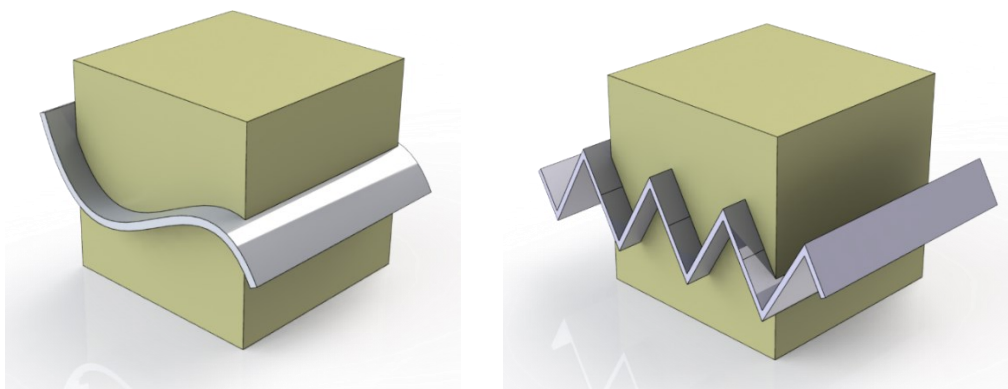


4.42. ábra. Rögzítő és vagy illesztő elemekkel ellátott síkban osztott 3D nyomtatott felek kialakítása

A 4.42. ábrán látható megoldások az előzővel azonos célú geometriákat mutatnak, azonban lényege eltérés, hogy itt már a bal oldali ábrán illesztő csapok is láthatók, amelyek a ragasztás közbeni pozícionálást biztosítják. Az illesztő csapoknak a tűrésére

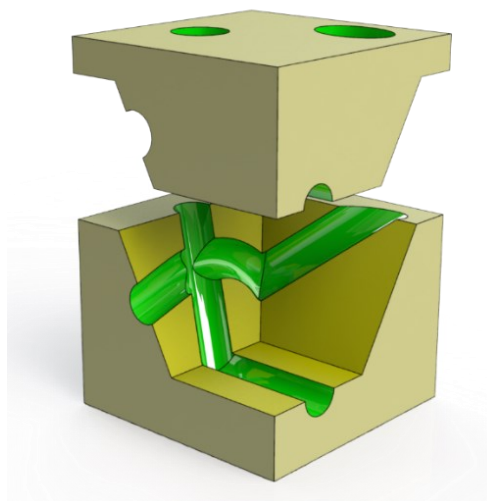
a gyakorlatban bevált érték 0,5 mm. A jobb oldali ábrán az előbbieken túlmenően pozicionálóval és az összeszorítást biztosító csavaros inzerterekkel is el van látva. Itt a ragasztás fő célja a tömítésre korlátozódik.

3D nyomtatásnál lehetőségünk van nem csak 2D metszősík, de 3D metszőfelület alkalmazására is. A 4.43. ábrán látható, hogy mind ívben görbült, mind sík elemekből összeállított, (zig-zag) metszékek alkalmazására is van lehetőség.



4.43. ábra. Ívben görbült és zig-zag 3D metszőfelületek alkalmazása a geometria osztásához

Az ilyen térbeli metszőfelületek gyakorlati alkalmazására láthatunk példát a következő 4.44. ábrán. Itt egy belső térbeli kör keresztmetszettel rendelkező csatornát láthatunk, amely síkokból álló térbeli metszőfelülettel került két darabra osztásra. Az így kialakított felek megfelelő nyomtatási platformra helyezéssel, támaszok nélkül nyomtathatók, ráadásul a térbeli osztófelület a pozicionálásban is segít.



4.44. ábra. Térbeli osztófelülettel megosztott belső térbeli furattal ellátott modell kialakítása

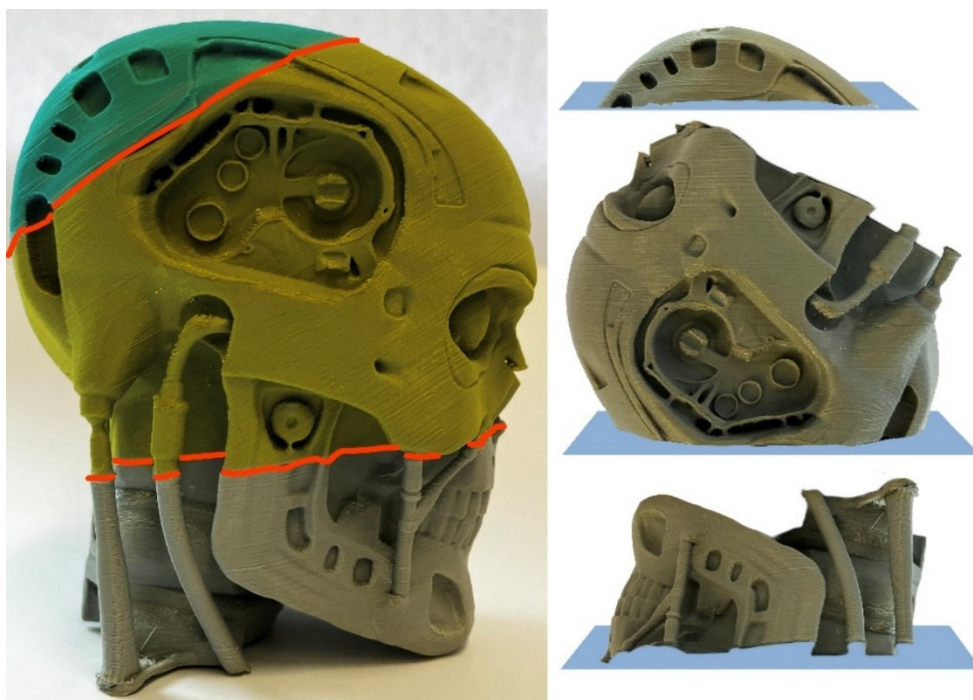
A 16. táblázat áttekinti a belső tér kialakítás miatti megosztások szükségességét.

16. táblázat Belső tér kialakítás miatti osztás szükségessége

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
szükséges	szükséges	nem	részben (hőhatás)

Komplex geometriák támasz csökkentése osztással

Azoknál a modelleknél, amelyek körkörös tartalmaznak alámetszéseket, vagy komplex geometriákat, gyakran nem lehet megfelelő orientációt találni a nyomtatási platformon úgy, hogy elkerülhessük az alátámasztást. Ebben az esetben célszerű a modellt már tervezéskor szétbontani, majd ezeket a részeket külön nyomtatni így a részekhez kedvezőbb orientációk alkalmazhatók. Erre mutat példát a következő 4.45. ábrásor.

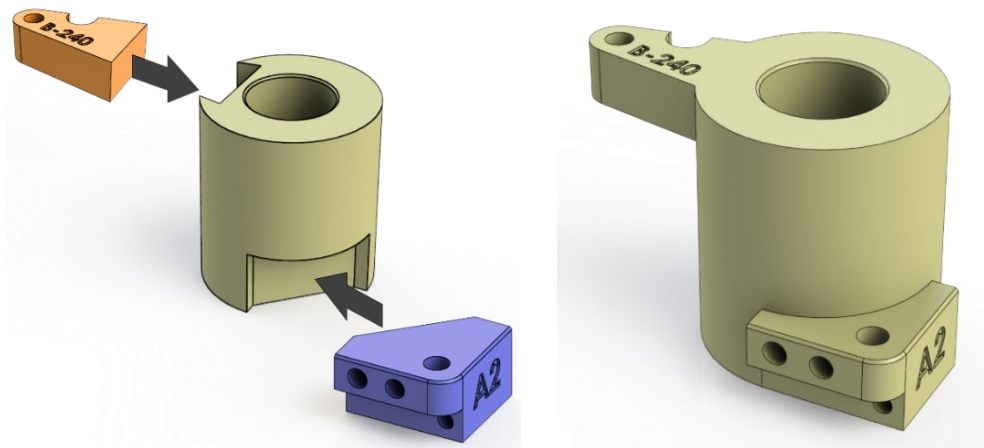


4.45. ábra. Az alátámasztások elkerülésére több darabra osztott, így jól orientálható 3D nyomtatott komplex modell, [forrás: fotó, Zsidai László]

Változó komplexitások kezelése egy modellen belül

Gyakoriak az olyan geometriák, amelyeknek csak bizonyos jól behatárolható részletei tartalmaznak bonyolultabb részleteket. Ezeket a modelleket célszerű még akkor is szétválasztani, ha egyébként megfelelő orientációval akár alátámasztás nélkül is nyomtathatók lehetnek. Ezzel a megoldással lehetővé válik az eltérő nyomtatási paraméterek (akár eltérő anyagok) alkalmazása a komplexitáshoz igazítva. Ezzel például kisebb rétegvastagsággal részletesebb, de időigényesebb kialakítás érhető el a

bonyolultabb geometriáknál, ugyanakkor nagyobb rétegvastagsággal kevésbé részletes, de gyorsabb nyomtatás érhető el az egyszerűbb geometriáknál. Természetesen az eltérő bonyolultságú részek körütekintő behatárolást és leválasztást igényelnek, erre láthatunk példát a következő 4.46. ábrán.



4.46. ábra. Komplexitás alapján megosztott és külön nyomtatott modell részek, és az egyesített kész alkatrész

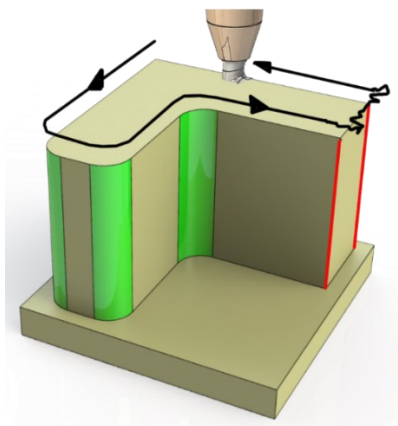
4.3.6. Lekerekítések, életörések

A 3D nyomtatás során részben eltérő céllal alkalmazzuk a lekerekítéseket/életöréseket mint a gépipari forgácsolások során, ezek a célok a következők:

- Nyomtatófej tehetetlenségből származó rezgéseinek csökkentése
- Hődeformációk, vetemedések csökkentése
- Alátámasztások és az „elefánt láb” hiba csökkentése
- Szilárdság növelése

Tehetlenségből származó rezgések csökkentése

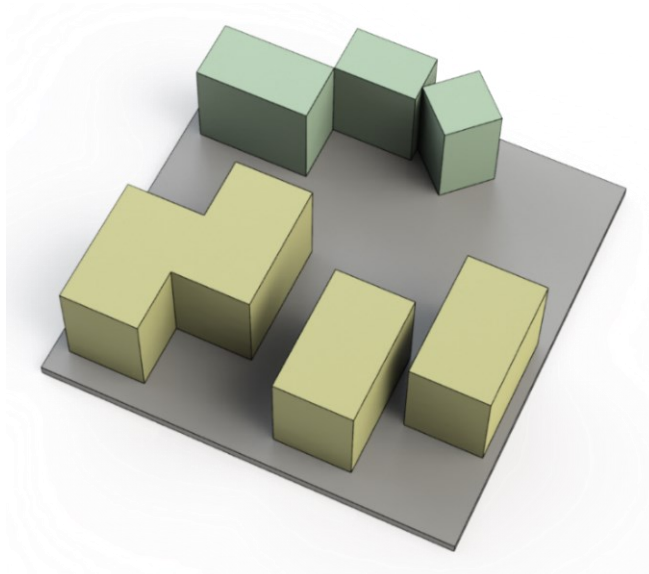
Elsőként nézzük meg a hasonló problémával küzdő CNC forgácsolást, ahol szintén ismert a szerszám hirtelen, éles irányváltásának a problémája, amelyek a mozgó tömeg tehetetlensége és a szerszám deformációk miatt kerülendők. Az éles sarkoknál a szerszám megtorpan és ez jelentős rezgéseket és akár szerszámtörést is okozhat. Ezt a problémát a CNC forgácsolásnál sebességre vagy pozícionálásra optimalizálva próbálják csökkenteni, de így is gyakran a minimális sarok rádiuszoknak századmilliméteres minimum értékei vannak. 3D nyomtatásnál a szerszámrezgések ugyan nem okoznak problémát, ugyanakkor a nyomtatófej tehetetlensége egy éles irányváltásnál már igen, ezt láthatjuk a következő 4.47. ábrán.



4.47. ábra. A nyomtatófej CNC vezérelt pálya menti elmozdulása során létrejövő rezgések az éles sarkoknál

Az előbbieket miatt a 3D nyomtatási technológiák jelentős részénél, ahol a nyomtatófej (extrúder, lézer, UV stb.) pályamenti elmozdulást „pásztázást” végez, számolni kell a hirtelen irányváltások okozta rezgésekkel. Ezek megfelelő nyomtatási paraméterek megválasztásával (pl. adaptív nyomtatási sebesség alkalmazása) és lekerekítések alkalmazásával orvosolhatók. Egyes 3D nyomtatási technológiáknál (pl. DLP) a nyomtatófej nem mozog, hanem projektált réteggépet vetít az alapanyag rétegre, így a tehetetlenség, mint probléma kisebb szerephez jut.

Szintén csökkenthetjük a sarkok pontatlansági hibáit, ha több alkatrész együttes nyomtatásánál elkerüljük a vékony érintkezéseket (közös éleket, sarkokat) a különböző modellek között. Célszerű 2-3 mm-es rést vagy átfedéssel érintkezést hagyni a testek között, ezekre láthatunk jó és rossz példákat a következő 4.48. ábrán.

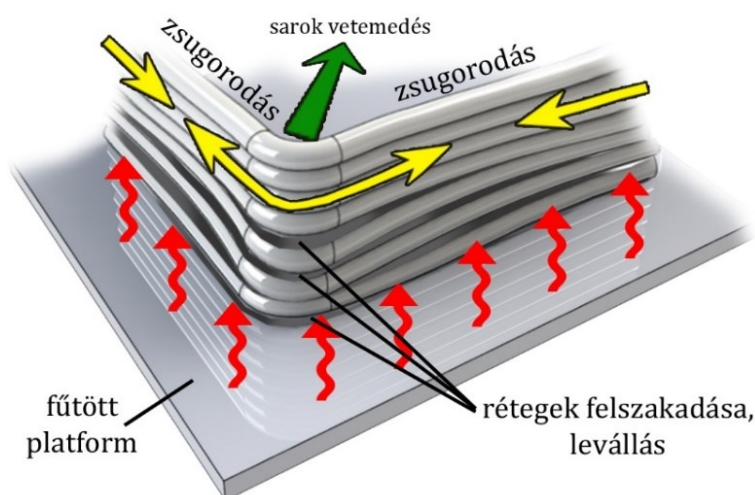


4.48. ábra. Közös élek és sarkok elkerülése több objektum között jó megoldás (alsó világos színű elem sor) és helytelen érintkezések bemutatása a felső (kék) elemsor között

Hődeformációk, vetemedések csökkentése

A hődeformációkból származó vetemedések és görbülések kifejezetten a 3D nyomtatás egyik legnagyobb technológiai hiba forrásai. Ezek elkerülésére több ú.n. hidegtechnológiás nyomtatást is kifejlesztettek, ahol az alapanyagot UV fénnel, vagy ragasztó anyag felvitelével szilárdítják meg (pl. DLP, BJ, MJ technológiák). Ugyanakkor az extrúderes és lézeres hevítési eljárások nagymértékű elterjedése az iparban, mindenképpen megkövetelik a hődeformáció tárgyalását.

3D nyomtatáskor a vetemedést az eltérő hőmérsékletű rétegek egyenetlen zsugorodási sebessége okozza, ez különösen igaz az éles sarkokra, ahol így nagy feszültségek koncentrálnak. Ennek megfelelően az éles sarkok rétegei, a hozzá tartozó hosszanti rétegek zsugorodása miatt elcsúsznak egymáshoz képest és akár szét is válhatnak egymástól (4.49. ábra).



4.49. ábra. A nyomtatott sarokra ható zsugorító erők és hőhatások okozta deformáció és rétegleválás értelmezése

A sarkok lekerekítése segíthet a vetemedés hatásának csökkentésében. mivel így jobban eloszlik a felhalmozódott feszültség (17. táblázat).

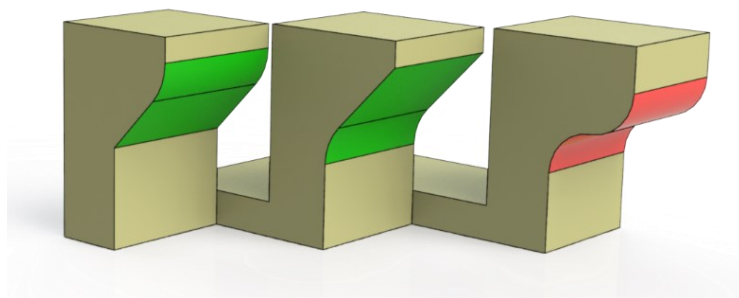
17. táblázat Letörések szükségessége hődeformáció elkerülésére

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
szükséges	részben szükséges	szükséges	szükséges

Ez a szélek körül kialakuló húzófeszültség és az egymásra épülő eltérő hűlésű réteg összehatása a teljes alkatrész görbülését okozhatja. Ez különösen gyakori a hosszú, karcsú modelleknél, és akár a következőkben tárgyalt „elefántláb” kialakulásához is hozzájárulhat.

Alátámasztások és az „elefánt láb” hiba csökkentése

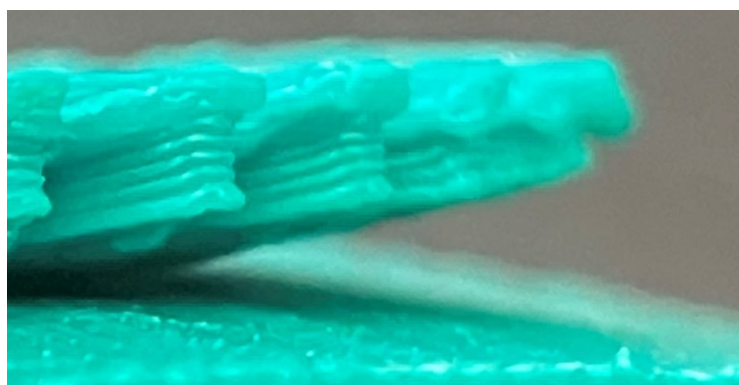
A lekerekítések alkalmazásával hatékonyan csökkenthető az alátámasztás igénye is. A következő 4.50. ábrán látható megoldások között a zöld színnel jelöltek, a határértéknek számító 45°-os dőlésszöggel (45°-os élettörés esetén) vagy azt meghaladó értéken biztosítják az alámetszést, ugyanez nem igaz az utolsó pirossal jelölt megoldásra.



4.50. ábra. Lekerekítések és letörések kombinált használata jól (zöld) és rosszul (piros)

A fenti ábrán szintén látható, hogy kombinálhatjuk is a letöréseket és lekerekítéseket, ennek a 3D nyomtatás nem szab határt. A lekerekítések megfelelő használatával akár az alátámasztás nélküli „hidak” és „födémek” alkalmazásának a lehetősége is kibővül.

A lekerekítések szintén csökkentik az ún. elefántláb hibát amikor a modell alapja enyhén kifelé domborodik. Az elefántláb hiba elsősorban a fűtött munkaasztalok esetében jellemző, és a legalsó rétegek felsőkkel szemben korlátozottabb hűléséből és abból adódik, hogy a felsőbb rétegek súlya terheli ezt az így lassabban visszahúló alsó réteget (4.51. ábra).



4.51. ábra. Az úgynevezett „elefántláb” hiba, a modell alsó rétegei kifelé domborodnak,
[forrás: fotó, Zsidai László]

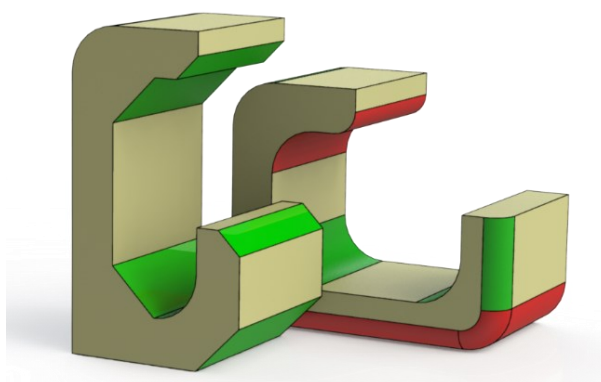
Ez a kitüremkedés, „elefántláb” rontja a szerelés közbeni illeszthetőséget és növeli az utómunka igényt. Ezt elkerülhetjük az alsó élekre tett lekerekítéssel és csak az alsó rétegek óvatos többlet hűtésével (18. táblázat).

18. táblázat Letörések szükségessége az alámetszések elkerülésére

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
szükséges	részben szükséges	nem	részben (hőhatás)

Szilárdság növelése

A lekerekítések és élettörések alkalmazása azon kívül, hogy nagymértékben javítják a nyomtatás minőségét, nagymértékben növelik az alkatrész terhelhetőségét is, mivel az éles feszültséggyűjtő helyek elősegítik a repedés és törés kialakulását. A lekerekítések és élettörések jobban elosztják a terhelésekből származó feszültség koncentrációkat, így növelik a nyomtatott alkatrész terhelhetőségét. A forgácsolással szemben, ahol a lekerekítések alkalmazását alapvetően korlátozta a gyártás közbeni hozzáférhetőség, nyomtatásnál ez jóval kevésbé akadály, így alkalmazhatjuk ezeket zárt belső terekben is. Különböző elhelyezésű lekerekítéseket és élettöréseket mutat be a következő 4.52. ábra.



4.52. ábra. Belső és külső, jól (zöld) és rosszul (piros) alkalmazott lekerekítések és letörések

A 4.52. ábrán, a jó és a rossz megoldások itt is felhívják a figyelmet az alámetszések elkerülésére, amely a pirossal jelzett megoldásoknál nem valósul meg.

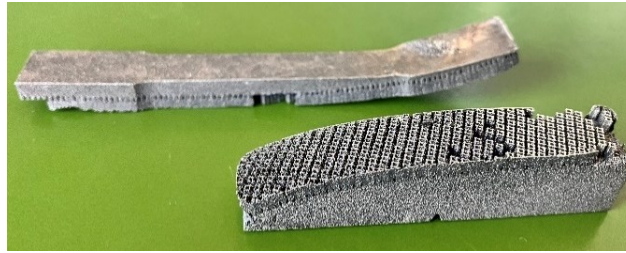
A 19. táblázat bemutatja, hogy minden nyomtatási technológia esetén kedvező lehet a letörések alkalmazása.

19. táblázat Szilárdság növelő letörések szükségessége

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
szükséges	szükséges	szükséges	szükséges

4.3.7. A munkaasztal-munkadarab tapadás növelése

Nyomtatás során, ahogyan korábban írtuk (lásd elefántláb, sarkok problémája) elsősorban a hőemelkedés miatt (FDM és más lézeres nyomtatás) fellépő eltérő húzó- (zsugorodások) és feszítő- (tágulások) igénybevételek hatására, geometriai deformációk léphetnek fel a nyomtatott modellben. Erre láthatunk példát a következő 4.52. ábrán, DMLS nyomtatott szakító és törő próbatestek esetében.



4.52. ábra. Deformálódott DMLS nyomtatott szakító és törő próbatestek (jól láthatók a deformációk és a DMLS-re jellemző leválasztást segítő közbülső ritkás kitöltésű réteg),
[forrás: fotó, Zsidai László]

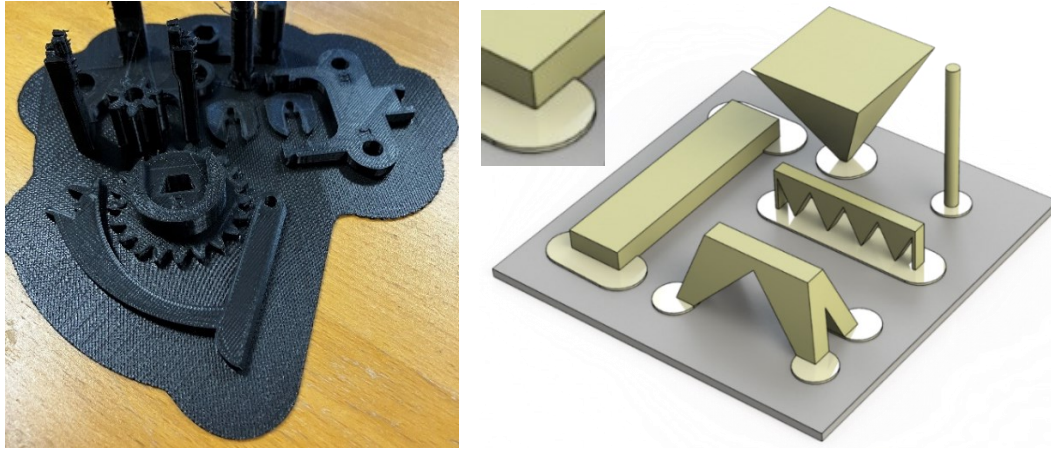
Ezeknek a deformációknak a csökkentése alapvető fontosságú a nyomtatások során, ami elsősorban a modell és a platform tapadásának növelésével oldható meg. A tapadás növelésére két fő területen nyílik lehetőségünk:

- Technológiai beállítások (pl. nyomtatási hőmérséklet, asztalfűtés, réteghűtés, rétegvastagság, nyomtatási sebesség, asztal tapadás növelő bevonata)
- Tervezési megoldások (pl. modell orientáció, geometriai karcsúsági arányok, speciális modell felület kialakítás, tapadó tappancsok tervezése, modell több darabban történő nyomtatása)

Most részletesebben a tervezési megoldásokat tekintjük át, ezek a következők:

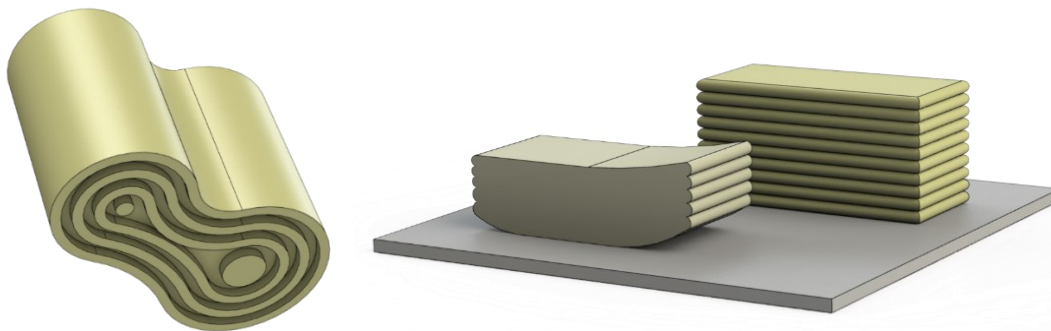
- A deformáció (vetemedés) veszélye a nyomtatott modell méretének növekedésével növekszik, ez elsősorban a nyomtatási platformhoz illeszkedő felületének méretére vonatkozik.
- A korábban tárgyalt sarkok lekerekítése is elősegíti a vetemedés csökkentését.
- Az egyik legcélravezetőbb megoldás a modell kisebb részekre osztása és a részek több darabban külön nyomtatása (ezt a megoldást korábban az eltérő komplexitások kezelésénél is már tárgyaltuk)
- Alaplemez használata az egyik legelterjedtebb megoldás, a szeletelő szoftverek ezt automatikusan is felkínálják a nyomtatási beállítások között (4.53. ábra, bal oldal). Ez a megoldás egyszerű, de gazdaságtalan mivel nem veszi figyelembe az eltérő geometriák különböző tapadási igényeit (idő és anyag veszteséggel jár). Az alaplemez megbízhatóságát tovább növelhetjük, ha a méretét növeljük, de ez

további veszteséggel jár. Gyakran csak az alaplemez széleit vastagítják meg (pizzaszélek-pl. Makerbot Print szoftverben) így a szélek ugyan felválnak a platformról, de ez kevésbé terjed tovább, a tutaj szélei felemelkedhetnek, a részt nem érintheti a vetemedés, ugyanakkor ez megnöveli a nyomtatási időt. A margók szélessége (általában 4 mm) természetesen módosítható.



4.53. ábra. Egybefüggő alaplemez (bal) és szeparált tappancsok (jobb) alkalmazása a tapadás növelésére különböző geometriák esetében

- Tapadás növelő „tappancsok” alkalmazása (4.53. ábra jobb oldal) lényegesen hatékonyabb és kisebb veszteséggel jár, mint az előbbi egybefüggő alaplemez. Ugyanakkor a szeletelő szoftverek ezeket még nem, vagy nem megbízhatóan kínálják fel, ezért nekünk kell gondoskodni róluk a tervezés során. A fenti 4.53. ábra középső kis részletén látható, hogy a tappancs nem a modell alá, hanem annak alsó felületével egy síkban helyezkedik el. Előnyük, hogy a legkritikusabb helyekre (élek, sarkok, karcsú alkatrész végek) tervezhetjük, így a minimális idő és anyagvesztés mellett biztosíthatjuk a tapadás növelést.
- Magába a modell platformra illeszkedő felületére is tervezhetünk feszültségcsökkentő redős kialakítást, ahogyan a következő 4.54. ábra bal oldalán láthatjuk. Ezek a kikönnyítések megakadályozzák a káros húzófeszültség összeadódását, így csökkentve a vetemedést.



4.54. ábra. A modell lapfelületének feszültségcsökkentő redőzése a húzófeszültségek csökkentésére (bal) és a geometria karcsúságának kedvezőtlen és a merevebb/vastagabb modell kedvezőbb hatása (jobb) a leválás csökkentésére

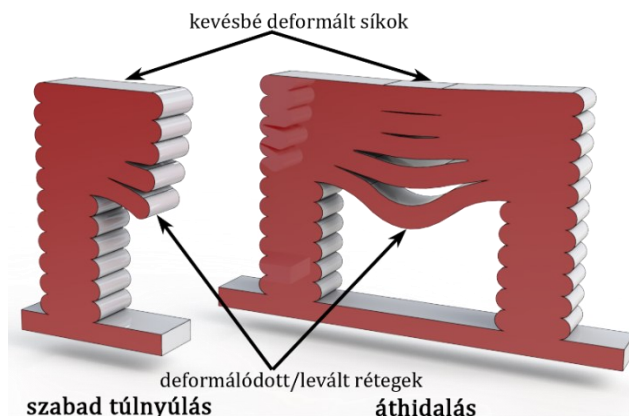
- A fenti 4.54. ábra jobb oldalán kevésbé hatékony, de könnyen kivitelezhető megoldás láthatunk, amely a modell merevségét használja fel a deformáció csökkentésére. Vékonyabb modell keresztmetszetnél a keletkező húzóerők nagyobb hatást fejtenek ki, mint a zömökebb test esetében.

4.3.8. Áthidalók „hidak” és „födémek” tervezése

A modell geometriák között igen elterjedtek a különböző áthidalások, boltívek, záró felületek és födémek, természetesen az alátámasztások „szupportok” alkalmazásával ezek könnyen megoldhatók. Ezzel szemben, ha a felületi minőség javítására, a nyomtatási idő és anyag megtakarítására helyezzük a hangsúlyt, vagy a támaszok eltávolítása akadályozott (zárt belső üregek) akkor más megoldásokat kell alkalmaznunk.

Áthidalók „hidak” és „födémek” tervezése, 3D nyomtatása

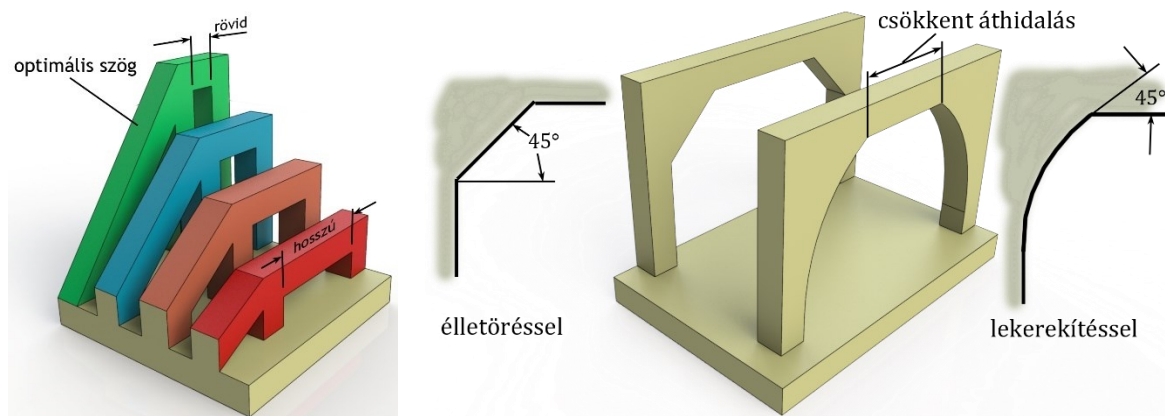
3D nyomtatáskor áthidalásról akkor beszélünk, ha vízszintes irányban helyezzük el a rétegeket, amelyek két pillér (konzol, fal, oszlop stb.) között szabadon alátámasztás nélkül helyezkednek el bizonyos hosszon. Ez némiképpen ellentmond a korábban az alámetszésekkel (túlnyúlással) kapcsolatban elmondottakkal, hiszen ott alap követelmény az alátámasztás. Ugyanakkor ne feledkezzünk meg az áthidaló/túlnyúló távolságok a velük összefüggő feszültség koncentrációk a nyomtatási sebességek és a hűtés mértéke közötti különbségekről. Az oldalferdeséghez kapcsolódó túlnyúlások, mint egy oldalon befogott (konzolos) tartók működnek, ezért jobban igénylik az alátámasztást, mint a két oldalon megtámasztott hidak (4.55. ábra).



4.55. ábra. Szabad túlnyúlás és híd deformációs és rétegelvási problémáinak megjelenítése a modellek metszeteiben

Ahogy a 4.55. ábrán is látható a hidak sem lesznek teljesen tökéletesek, elkerülhetetlen bizonyos mértékű megereszkedés a híd közepén, főleg az alsó szálaknál.

A következő 4.56. ábra bal oldala, felhívja a figyelmet a még elfogadható (nem látható) megereszkedéssel járó áthidaló hosszra, amelyek FDM nyomtatásnál a tapasztalatok szerint maximálisan 10-20 mm vízszintes szabad áthidalást jelent. A 4.56. ábra jobb oldala, ennek a távnak a növelésére mutat megoldást letörések alkalmazásával.



4.56. ábra. Maximális áthidalási hossz ferde áthidalások (zöld jó, piros rossz megoldás) és vízszintes híd formák esetén (bal oldal), ennek növelési lehetősége letöréssel és lekerekítéssel (jobb oldal)

DMLS nyomtatásnál a megengedett áthidalási távolság a többi technológiához képest rövid ~2,0 mm, ez a gyors felmelegedések és lehűlések okozta igénybevételekkel magyarázható.

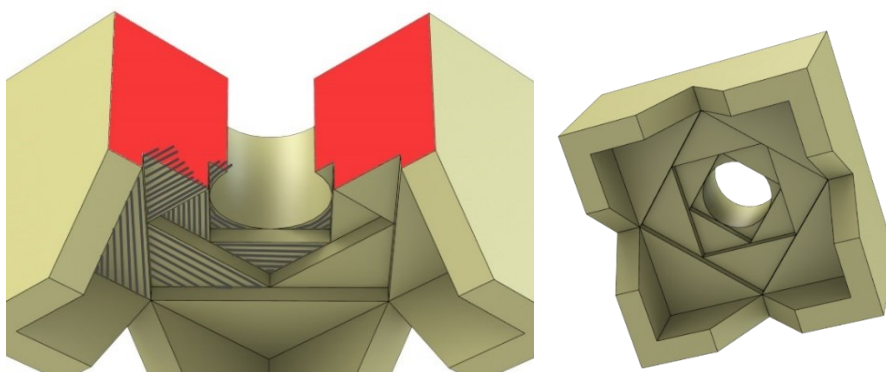
A 20. táblázat összefoglalót ad az áthidalások mértékéről, az alap technológiák szerint.

20. táblázat. Javasolt maximális szabad áthidalási hosszak, technológiák szerint

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
10mm	-	nincs korlátozva	2mm

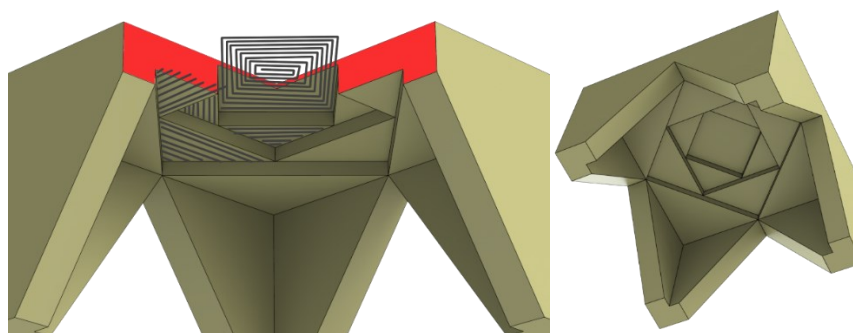
Gyakori problémát jelent nyitott, vagy zárt terek fentről történő síklappal (födém) való lezárása. Az alulról nyitott dobozok esetében bár kerülendő, de még alátámasztással megoldható, ugyanakkor teljesen zárt terekben ez már komolyabb problémát jelent, már az alkatrész tervezésénél figyelembe kell venni.

Az előzőekben az áthidalások tárgyalásánál láthattuk, hogy a jelentős deformációt elkerülendő a szabadon elhelyezkedő vízszintes hidak hossza limitált. Ezt kihasználva a födémeket ne egyszerre egy áthúzással tervezzük, hanem a következő 4.57.-4.58. ábrákon látható keresztirányú szakaszolásokkal, így csökkentve az áthidalások szabad hosszát.



4.57. ábra. Középen furatos födém kialakítása (metszet), egymásra szögben álló fedő rétegekkel

A 4.57. ábrán láthatjuk, hogy a szabad áthidalások hosszát sikerrel csökkenthetjük, ha azokat egymásra szögben elforgatott vékony vízszintes lépcsőzésekkel alakítjuk ki. A középső furat köríves formájának is kellő alátámasztást adnak a körülötte lévő rövid sarok áthúzások.



4.58. ábra. Teljesen zárt födém kialakítása (metszet) a födém rétegek lépcsőzésével

A 4.58. ábrán teljesen zárt födémet láthatunk, amelynél a szélső sarkok a korábban említett szabad hossz minimalizálással készültek. Ugyanakkor a középső záró elemnél, amelynek még így is jelentős a felülete, kívülről induló szögletes spirál nyomvonal mentén tervezve a nyomtatást, folyamatosan rövidülő áthúzásokat kaphatunk. Ne feledjük a már megszilárdult oldalsó rétegek is megtámasztást jelentenek a melljük épített szálakra nézve (21. táblázat).

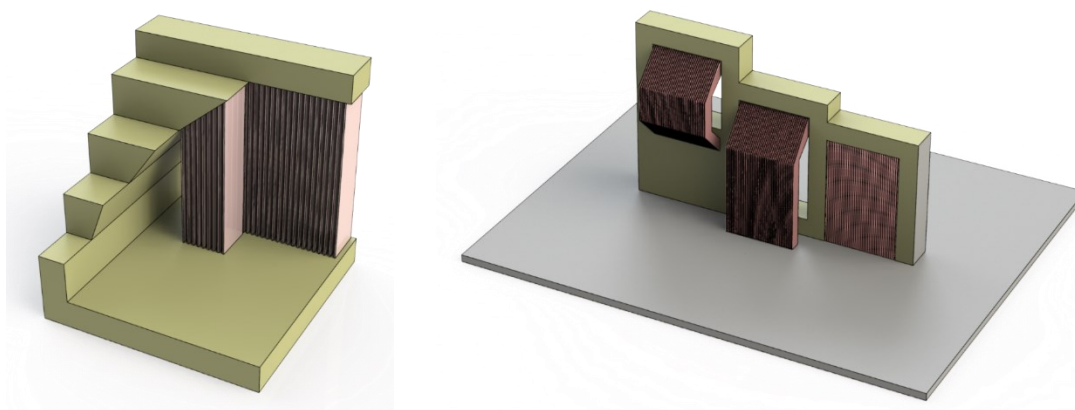
21. táblázat Födémek egymásra szögben álló rétegzésének szükségessége

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
szükséges	szükséges	nem szükséges	szükséges

4.3.9. Támaszok csökkentési megoldásai

A támaszok csökkentéséről már sokat olvashattunk az előzőekben, hiszen az alámetszések, hidak, földemek, furatok javasolt tervezési megoldásai mind ezt a célt szolgálják, ezek közül a legelterjedtebb módszer a modell orientáció (tájolás) helyes megválasztása. Ennek egyszerű példája volt korábban tárgyalva a furat, amely tengelyével vízszintesen a platformra helyezve kedvezőtlen belső támaszokat igénylő orientáció, ezzel szemben függőlegesen elhelyezve támasz nélkül nyomtatható.

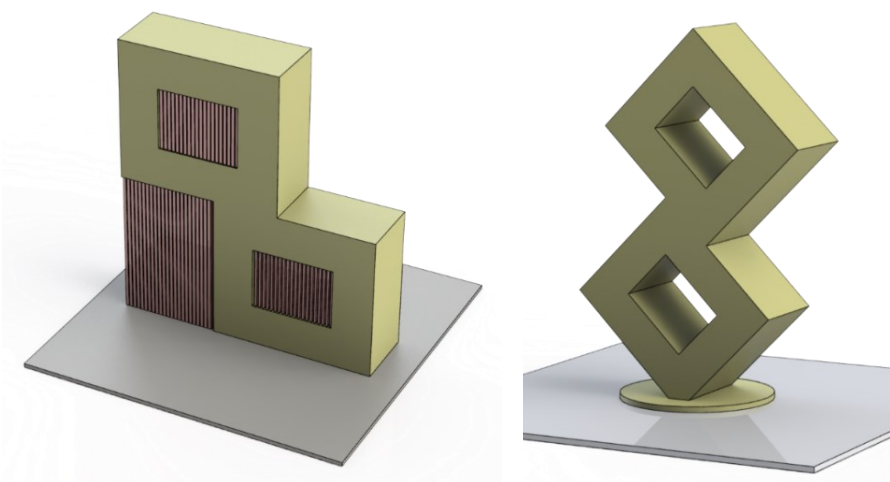
A következőkben további konkrét a teljes modell kialakítást célzó megoldásokat mutatunk be. A 4.59. ábra bal oldalán a már korábban ismertetett 45°-os alámetszési határ értelmezése támasz és támasz nélküli geometriákhoz.



4.59. ábra. A 45°-os alámetszési határ feletti támasz nélküli és az alatti támasszal kialakított geometriák (jobb), felületkímélő külső támasz kialakítások (bal)

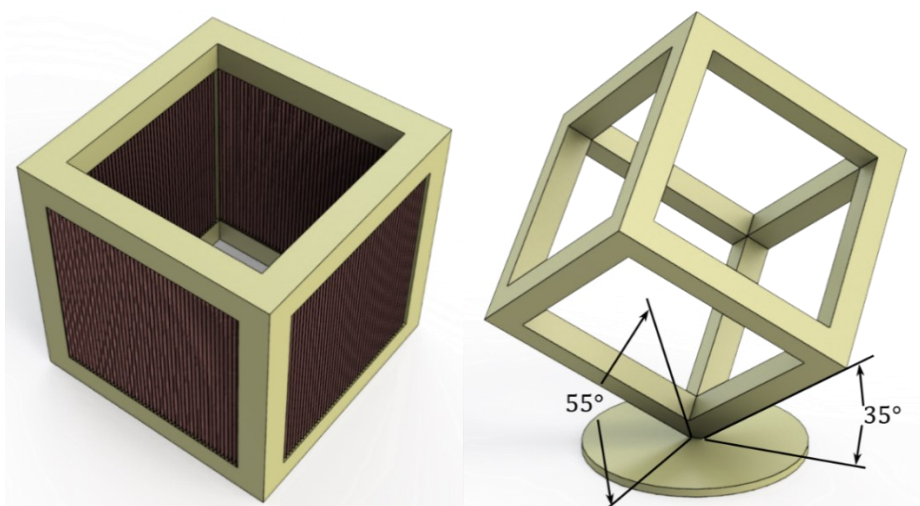
A fenti ábra jobb oldalán speciális támasz kialakítást láthatunk, amely csak a lentről nyitott szögletes híd esetében hagyományos, a másik két ablakszerű geometria esetében nem. A két külső támasztás célja, hogy a támaszok modellt érintő felületeit csökkentse, mert ezek rontják azok felületi minőségét, így leválasztásuk után gyakran utómegmunkálást kell végeznünk.

A következő 4.60. ábrákon azonos modell hagyományos, sok támaszt és utómunkát igénylő és speciális támasz nélküli elhelyezését láthatjuk. Mindig érdemes átgondolni a geometriai lehetőségeihez mérten azt, hogy van-e lehetőség az itt látható optimális elhelyezésre.



4.60. ábra. Ugyanazon síklapú modell hagyományos gazdaságtalan (bal) és a 45° -os alámetszési határt jól kihasználó támasz nélküli (jobb) orientációi

Az előbbtől már bonyolultabb feladat a következő 4.61. ábrán látható térbeli kocka keret optimális elhelyezése.

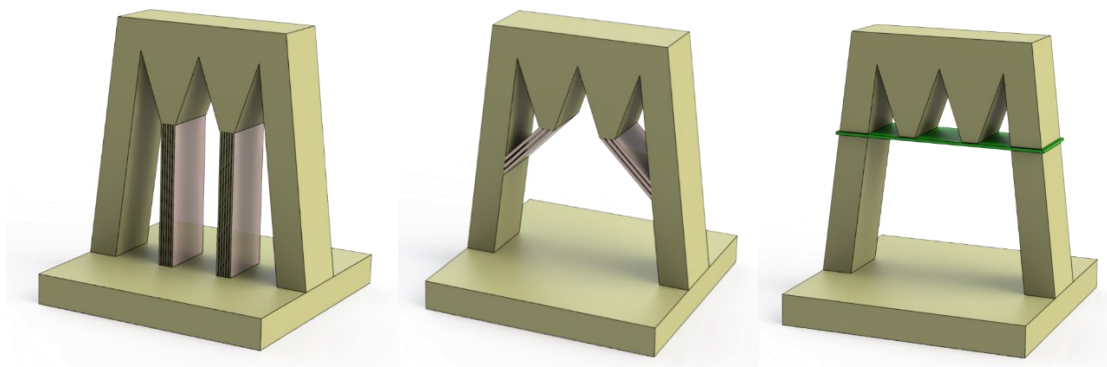


4.61. ábra. Ugyanazon térbeli kocka modell hagyományos gazdaságtalan (bal) és az alámetszési határt közelítő támasz nélküli (jobb) orientációi

A fenti ábrán látható, hogy a kocka keret hagyományos elhelyezése nagy támaszigényű és sok felületi hibát rejt magában. Ebben az esetben is megpróbálhatjuk a modell sarkára helyezést, bár itt már adódhatnak a 45° -os szabályt nem teljesítő élek. A minőség biztosítására a kisebb szöget bezáró élekhez rendelhetünk alátámasztást, így is jelentős anyagmegtakarítást érhetünk el.

Külön megfontolást igényelnek azok a szabad élek és sarkok, amelyek nem érintkeznek a platformmal, hanem szabadon lógnak a térben, amint ezt a következő ábrán látható hídszerű modell belső fogazásainál látjuk. A 4.62. ábra bal oldalán egyszerű, a platformról indított támaszokkal is megoldható ez a feladat, ugyanakkor a középső

ábrán magából a modellből növesztett, az alámetszési szabálynak eleget tevő támaszok nyomtatása jóval kisebb anyagot és időt igényel.



4.62. ábra. A platformmal nem érintkező szabadon álló geometriai elemek hagyományos (bal) és csökkentett (középső) támaszai, valamint a modellbe tervezett kiegyenlítő sík geometria (jobb)

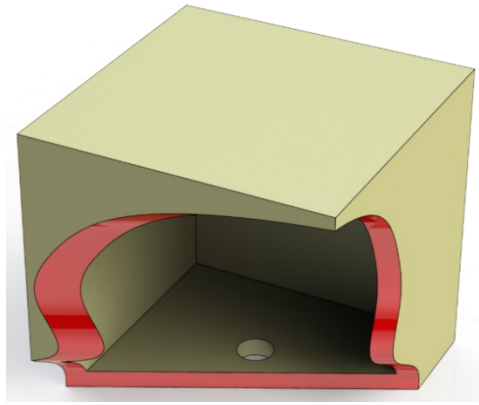
A fenti ábra jobb oldalán speciális, nem támaszt felhasználó megoldást láthatunk. Ha a híd szélessége a korábban leírtaknak megfelel (Áthidalók „hidak” és „födémek” tervezése, 3D nyomtatása alcím) akár már a tervezésnél elhelyezhetünk a modellbe egy plusz áthidaló elemet, amely megtámasztja a szabad fogazott részek alsó éleit, így egyáltalán nem kell támaszt használnunk. Természetesen az így megmaradó plusz geometriát később el kell távolítani.

4.3.10. Technológiai ürítő nyílások tervezése

A 3D nyomtatási technológia típusától függően, vagy csak az építési rétegekben jelenik meg az alapanyag (FDM tipikusan ilyen), vagy valamilyen por, vagy folyadéktartályban jön létre a rétegtépzés. Ennek hatására az SLS és SLA technológiák a belső üregekbe bezárva tartják a szükségtelen, de ott csapdába került port vagy folyadékot. Meg kell jegyezni, hogy a fejjel lefelé a műgyanta ágyból fölfelé mozduló munkadarab a DLP nyomtatásnál részben mentesül ettől a problémától, de itt is kisebb mennyiségben bent maradhat nem megszilárdult alapanyag a modell belsejében.

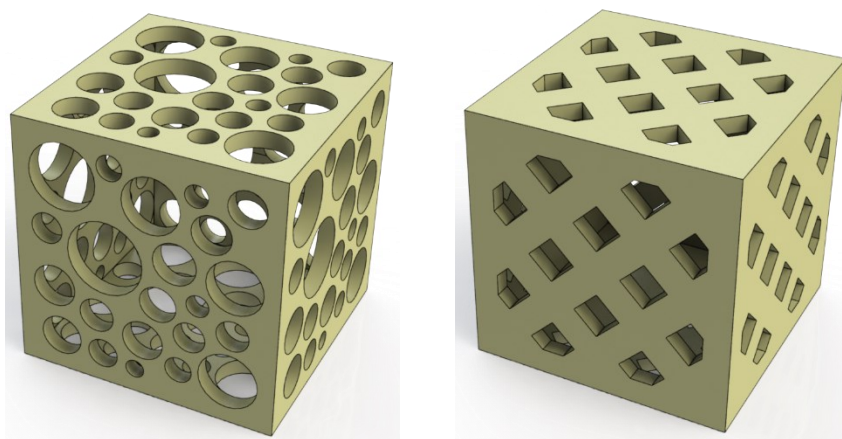
Ezeknek a szükségtelen anyagmaradványoknak a kijuttatása fontos, hiszen tömegnövekedést, alapanyag veszteséget okozhatnak, de szélsőséges esetben hosszú ideig tartó kellemetlen, a működési körülményeket rontó, pl. szivárgás (műgyanta esetében) is felléphet.

A következő 4.63. ábrán egyszerű, egy oldalon egy furattal kialakított nyílás látható.



4.63. ábra. Egyszerű furatos kialakítású ürítőnyílás (metszet)

Az 4.63. ábrán látható megoldás akkor javasolt, ha valamilyen okból (lég és vízzárás) később is zárt teret akarunk biztosítani a modell belsejében, az ilyen egyszerű furat később könnyen zárható ragasztással vagy dugózással. Ez a megoldás azonban nem biztosít tökéletes tisztíthatóságot a por vagy folyadék anyagmaradványoktól, nem teszi lehetővé az átöblítést vagy a levegőnyomással történő kifújást. A minimális furat átmérő a gyakorlati tapasztalatok alapján SLA-nál, 4-5 mm-es értékre tehető és a gyanta hatékony kifolyásának elősegítésére célszerű, az ürítő furatokat az építmény legalacsonyabb pontján elhelyezni. Problémát okozhat az úgynevezett „negatív búvárharang” jelenség is főleg DLP nyomtatásnál, amely a folyadékok hidrosztatikai alapelvén működik. Vagyis a felfelé emelkedő zárt edények nem engedik visszafolyni a bennük csapdába került folyékony gyantát. Ezért ilyen esetekben felső légzőnyílást is kell biztosítani, lehetőleg a belső zárt üreg legmagasabb pontján. A következő 4.64. ábrákon látható megoldások az előbbi hátrányokat küszöbölik ki, viszont nem biztosítanak zárt teret.



4.64. ábra Könnyű tisztíthatóságot és tetszetős külsőt biztosító üreges, rácsos formák

Az fenti ábrákon átható megoldások csak példák a számtalan megoldás közül, érdemes figyelembe venni a mechanikai szilárdság és a tömeg összhangját is.

SLS és DMLS nyomtatás esetében (az SLA-hoz hasonlóan) az alkatrészeket gyakran üregesen nyomtatják, itt az üritőnyílások méretének a min. 5 mm átmérő az elfogadott. Több üritő nyílás alkalmazása tovább javítja a laza finom por eltávolítását.

A következő 22. táblázat az üritőnyílások szükségességét, és javasolt méreteit mutatja be a 3D nyomtatási technológiák függvényében.

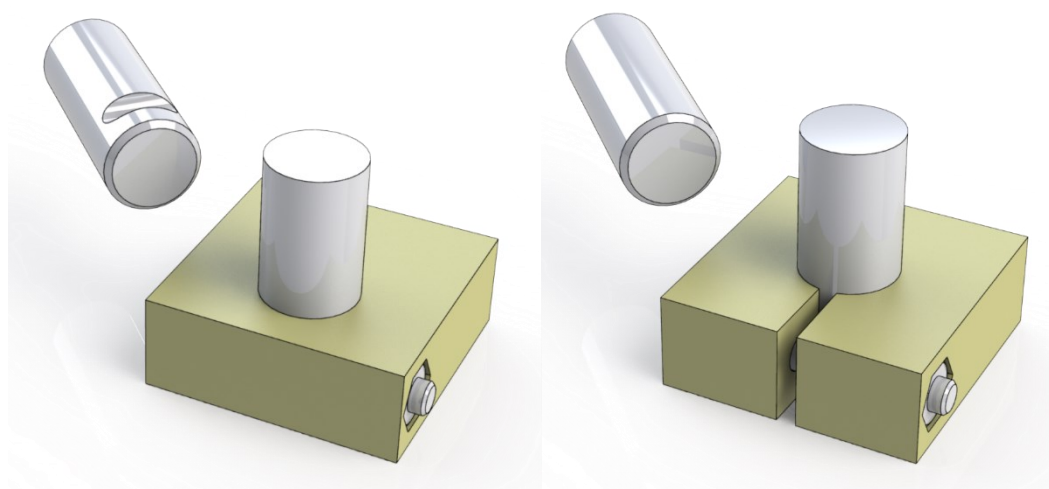
22. táblázat Technológiai üritő nyílások szükségessége

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
nem szükséges	szükséges 4-5mm	szükséges 5mm	szükséges

4.3.11. Alkatrész kapcsolatok, csatlakozások tervezése

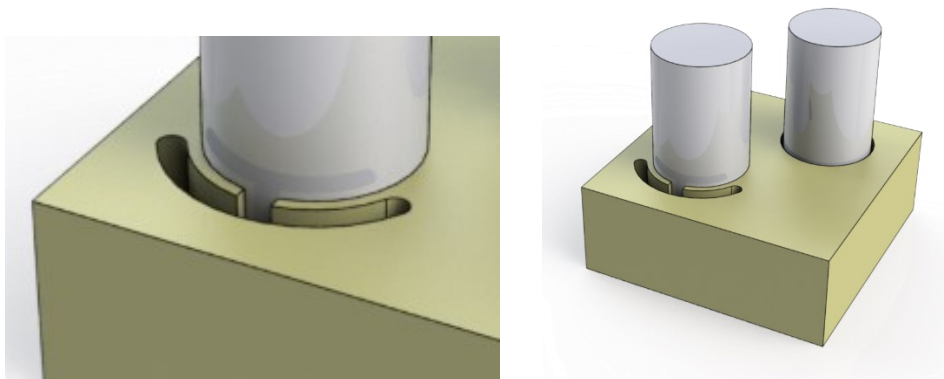
A 3D nyomtatással készült egymáshoz szerelt/illesztett alkatrészek, a hagyományos szerelés tervezéstől eltérő mérnöki gondolkodást igényelnek. A polimer nyomtatással elérhető pontosság és felületi minőség lényegesen elmarad a forgácsolt felülettől, ezért a hagyományos illesztési rendszerek itt nem használhatók. Ezért célszerű utólagos forgácsolást vagy hibrid technológiát (fémnyomtatás és forgácsolás kombinálása) alkalmaznunk, amellyel a tradicionális tűrés értékek beállíthatók. Az előbbieket miatt speciális csatlakozásokat alkalmazunk a 3D nyomtatott szerelt alkatrészeknél, ezekre láthatunk megoldásokat a következőkben.

A 3D nyomtatott alkatrészek méretpontossági hiányai miatt, már eleve szorítható kötések tervezünk, vagy biztosítunk alakzárást a kapcsolatok között, amint ezt a következő 4.65. ábrákon láthatjuk.



4.65. ábra Csavarkötéssel elért alakzáró (bal) és erőzáró (jobb) szorítókötések megoldásai 3D nyomtatott alkatrészekhez

A technológia gazdaságossági megfontolásai során ne feledjük, hogy bár pontos illesztést nem tudunk elérni, ugyanakkor sokkal nagyobb geometriai szabadságunk van a gyárthatóság terén. Erre láthatunk példát magában az alkatrészben kialakított rugalmas elemek általi erőzárás létrehozásáról a következő 4.66. ábrán.



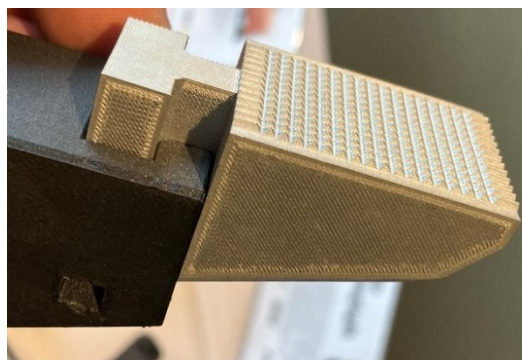
4.66. ábra Az alapanyagban kialakított rugalmas erőzáró „clips-ek” alkalmazása (bal ábra), hagyományos illesztés rögzítés nélküli mozgó kapcsolatokhoz (jobb oldal)

Az előbbihez hasonló egyszerű csap furat illesztést szoros kapcsolattal is kialakíthatjuk, ehhez FDM esetében 0,1-0,15 mm-es SLS esetében 0,1 mm hézag kialakítása a javasolt, ugyanakkor így nem növelhető vagy csökkenthető a szorítóerő, szemben az előbbi megoldásokkal. A 4.66. ábrán mozgó/forgó illesztést is láthatunk, ahol semmilyen rögzítő megoldást nem alkalmaztunk. Az ilyen kapcsolatokhoz ajánlott hézagok értékei a nyomtatási technológiától függően a következő 23. táblázatban láthatók.

23. táblázat Mozdó elemek közötti hézagok javasolt értékei

FDM	SLA/DLP	SLS	DMLS
0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm	-

A szerelt alkatrészek esetében célszerű, az igénybevételnek megfelelő anyagot és technológiát választani a komponensekhez. Az előző ábrákon is próbáltuk szemléltetni, hogy az egyszerű hengeres alkatrészt, célszerű szabványos rúdanyagból tervezni, és csak a komplikáltabb formát nyomtatni. A gyakorlatból mutat be példát a következő 4.67. ábra, ahol egy ipari szorító ujj „clamp vagy gripper” nyomásnak és koptatásnak jobban kitett jobb oldali részét fém nyomtatással, amíg a bal oldali tartó részét polimer nyomtatással készítették. Érdeemes megfigyelni a T-hornyos csatlakozó sínt, amelynek a végén négyzetes „klikkelős” rögzítőelem is található a gyors cserékhez.

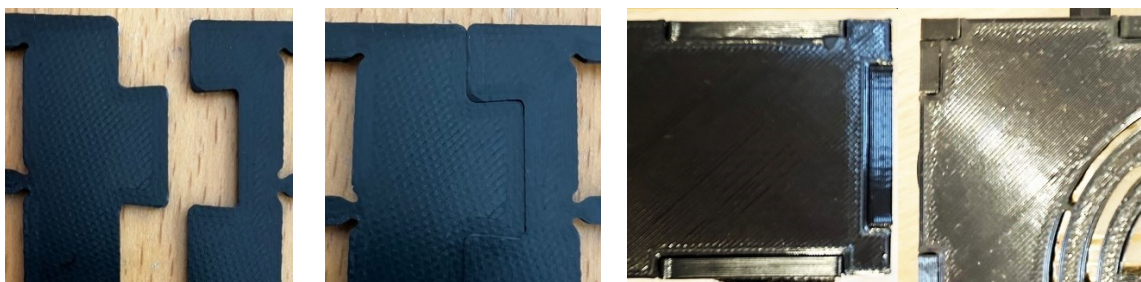


4.67. ábra Eltérő fém és polimer nyomtatással kialakított egymásba csúsztható elemek, effektor ujjban. [forrás: NEXT3D konferencia 2023-FREEDDEE]

A 3D nyomtatás geometriai szabadsága számos új csatlakozási megoldást tesz lehetővé, ezek közül láthatunk két példát FDM nyomtatott lapok egymáshoz rögzítéséről a következő 4.68.-4.69. ábrákon.



4.68. ábra Egymásba pattintható dugós-körmös FDM nyomtatott lap kapcsolódás [forrás: fotó, Zsidai László]



4.69. ábra Egymásba pattintható trapéz-körmös FDM nyomtatott kapcsolódás szét és összeállított állapotban, illetve alkalmazása készülék doboz sarkain [forrás: fotó, Zsidai László]

A 4.69. ábrán látható megoldásoknál is a már korábban említett FDM nyomtatott szoros illesztésekhez ajánlott 0,15 mm-es illesztési hézagot használtuk mind a dugós-, mind a trapéz-körmös csatlakozásoknál. Az ilyen bontható kapcsolatok megfelelő tervezéssel sok esetben (pl. kapcsolódobozok, burkolatok) szükségtelenné tehetik a költségesebb és többlet szerelési időt igénylő hagyományos oldható kötések, pl. csavarozás alkalmazását.

„Bennszülött” szerelvények nyomtatási lehetősége

A 3D nyomtatás új, egyedülálló megoldást is jelent a szerelt egységek terén, az ún. bennszülött alkatrészek (egymásba tervezett nem szétszerelhető szerelvények) tekintetében. Ilyen megoldást eddig egyik korábbi technológia sem tett lehetővé, vagyis egymásba kapcsolódó vagy egymást körülzáró, ugyanakkor egymástól fizikailag elkülönülő (akár még eltérő anyagú) alkatrészek együtt szerelt egységként gyártását. Ilyen megoldásokra láthatunk példákat a következő 4.70. ábrákon.



4.70. ábra Egybe nyomtatott bennszülött alkatrészek (bal kép) komplex csukló mechanizmus félig kinyomtatott állapotban (jobb kép), [forrás: fotó, Zsidai László]

A 4.70. ábra bal oldalán a felső lánc és rácsos gömb, amelynek belsejében hasonló kisebb méretű gömb helyezkedik el SLS nyomtatással, amíg az alsó hengergörgős csapágyszerű alkatrész és a színes bolygómű FDM nyomtatással készült. Ez utóbbinál lehetőségünk van eltérő anyagból készíteni a komponenseket, ha az FDM nyomtatónk több nyomtatófejjel van szerelve, ilyen lehetőség SLS és SLA nyomtatóknál nem áll rendelkezésre.

A fenti 4.70. ábra jobb oldalán egy több tagból álló komplex csuklórendszer félig kinyomtatott állapotban látható, itt jól megfigyelhetők az egymáshoz kapcsolódó, az elfordulást igen, de a szétcsúszást nem megengedő ún. „piskóta” és „hordós” ízületek.

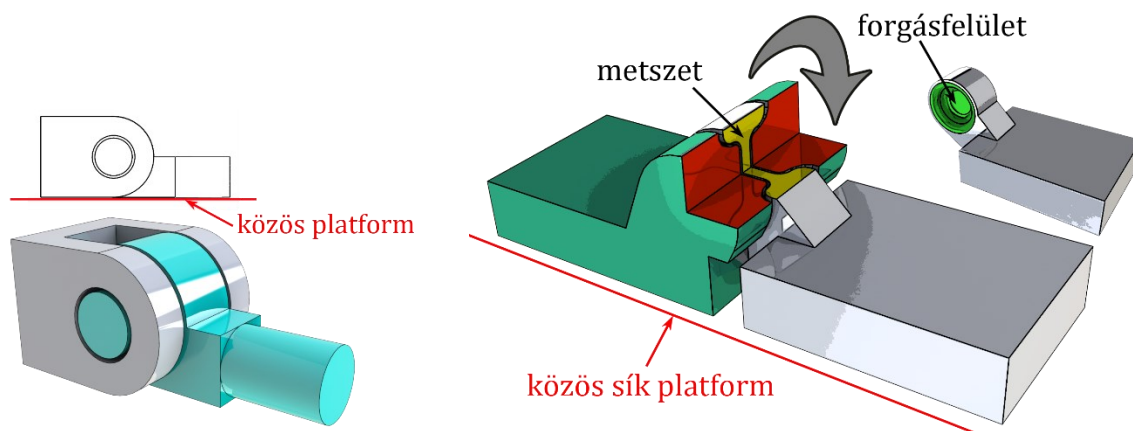
A következő 4.71. ábrán teljes hajtókar egységet láthatunk egybe nyomtatva, amely egy bonyolult kinematikai szimuláció bemutató eszköz részeként, egy fordulat alatt három különböző mechanizmust mozgat.



4.71. ábra *Benzülött hármashajtókar egység (bal oldal) és leválasztása az alaplapról (jobb oldal) amelyet maximális felület illeszkedéssel terveztek, [forrás: fotó, Zsidai László]*

A 4.71. ábra bal oldali részén a nyomtatott hajtókar egységet láthatjuk a nyomtatott alaplapon. Itt fontos megjegyezni, hogy az egyébként időigényes és költséges alaplemez nyomtatás, itt az asztalhoz való tapadás növelésén túl a mozgó egység elemeinek pozícióba tartását is biztosítja, ezért különösen fontos.

A 4.71. ábra jobb oldali részén, az alaplapról könnyen leválasztható szerelvényt láthatjuk. Itt érdemes megfigyelni a hajtókarok kialakítását, amelyek a hagyományos formától eltérve aszimmetrikus kialakításúak, így a maximális felületükön fekszenek fel az alaplagra. Ezzel elkerülhető az alátámasztás, és biztosított a mozgó illeszkedések egyenletes körkörös hézagja, a hajtott tengely hengeres mozgó csapjai körül. Ez már tervezési szempont, a következő 4.72. ábra ilyen tervezési példákat mutat be.



4.72. ábra *Alakhelyes tervezési példák bennszülött alkatrészként nyomtatható elmozduló egységekhez*

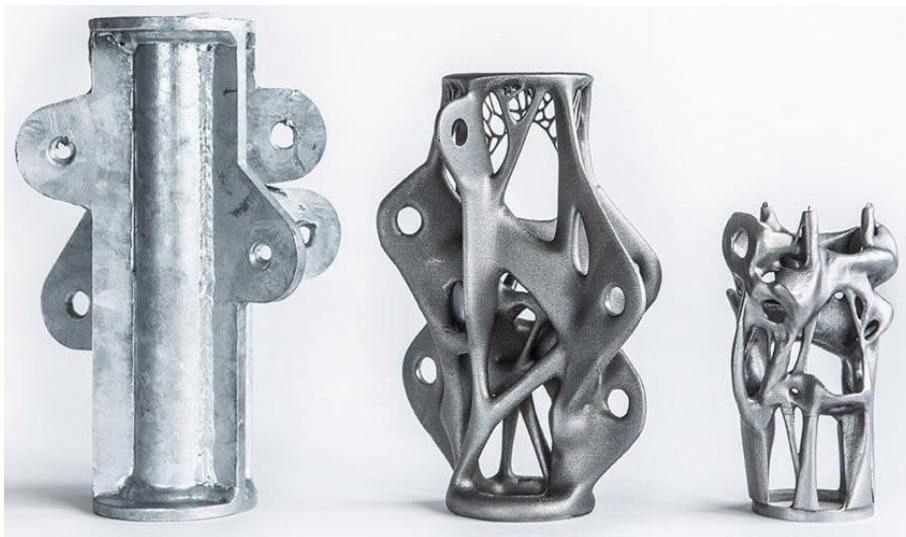
A fenti ábrán, mozgó alkatrészek egymásba nyomtatásának tervezéséhez láthatunk jó megoldásokat, ehhez két fő tényezőt kell figyelembe venni:

- a résméretet, amelyet a nyomtatási technológia, a paraméterek, a nyomtató típusa és műszaki állapota határozza meg és
- a körkörös egyenletes rés elhelyezkedés biztosítását, amelynek helyességét már tervezés során is elősegíthetjük.

A 4.72. ábrán látható, hogy az elforduló csukló elemeket az alsó lapjukon a nyomtatási platform síkjához kell igazítani. Ezzel a megoldással (ez hagyományos gyártásnál nem volt szempont) egymástól független támasztással egyenletes körkörös hézag érhető el. Gondolkozhatunk teljesen új megoldásokban is, mint amit az ábra jobb oldalán láthatunk, így nem korlátoznak minket a hagyományos csapos, gömbfejes csuklópontok, hanem a terhelés irányára és eloszlására optimalizálva tervezhetjük meg a csukló elemeket.

4.4. DfAM – Design for Additive Manufacturing

Egy új gyártástechnológia, mint a 3D nyomtatás, akkor tud igazán hozzáadott értéket képviselni, ha a technológiában rejlő lehetőségeket már a tervezőasztalon alkalmazzuk. Az új eljáráshoz éppen ezért újfajta tervezési módszertan is társul, amely a rétegről rétegre történő additív építkezésnek köszönhetően sokkal nagyobb geometriai szabadságot tesz lehetővé (4.73. ábra).



4.73. ábra. Arup: Generatív tervezésű 3D nyomtatott csomópont [64]

4.4.1. Új tervezési módszertan

Sokkal vékonyabb falak, sokkal összetettebb térbeli szerkezetek készíthetőek additív módon fémből, polimerekből, kompozitokból – sokkal nagyobb szerepe van tehát a

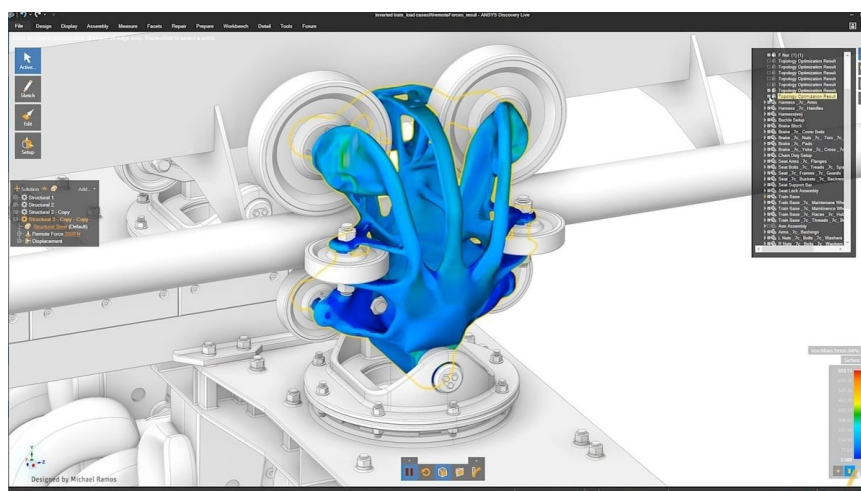
szerkezeti optimalizációnak, topológia-optimalizációnak. A végeselemes (FEM) módszerekkel végzett tartószerkezeti és topológia-optimalizáció segíti a tervezőt az ideális tartóforma felé vezető úton, hogy a lehető leghatékonyabb szerkezeteket lehessen 3D nyomtatással legyártani, és hogy tényleg csak ott kerüljön beépítésre az alapanyag, ahol az igénybevételekből eredően feszültségek keletkeznek a keresztmetszetben. A kikönnyített szerkezetek pedig nemcsak gazdaságosabban gyárthatóak és hatékonyabban üzemeltethetőek, de a teljes életciklusuk alatt kisebb a környezeti terhelésük, beleértve az újrafelhasználhatóságukat is.

A 3D nyomtatásra fejlesztett 3D tervező célszoftvereket (DfAM) az alábbi csoportokba sorolhatjuk:

- generatív tervezés (formfinding)
- topológia- és szerkezetoptimalizálás
- 3D lattice térrács kitöltés
- alkatrész megerősítése, konszolidáció
- gyárthatósági optimalizáció

4.4.2. Generatív tervezőeszközök

A generatív tervezési folyamatban a hagyományos tervezési módszertanhoz képest megváltozik a tervező feladatkör. A tervezőmérnök nem a végeredményt, hanem a keretrendszer peremfeltételeinek megfelelő megoldási lehetőségeket generáló algoritmus tervezésével foglalkozik, paraméterezi, kiértékeli, finomhangolja azt. A forma így a funkció egyenes következménye lehet, a szoftveres optimalizációs folyamat során gyakran használnak genetikai algoritmusokat (4.74., 4.75. és 4.76. ábra). A különböző matematikai algoritmusok vagy a mesterséges intelligencia által generált formák és geometriák, a 3D nyomtatásnak köszönhetően gazdaságosan kivitelezhetőek.



4.74. ábra. Generatív topológia az Ansys szimulációs szoftverben [65]

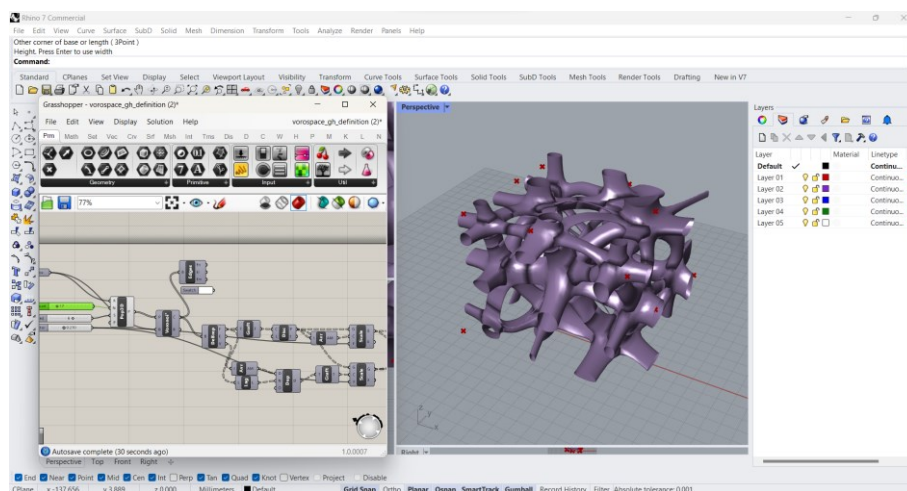
Ma már a hagyományos gépészeti, ipari- és formatervező szoftverek, de még az építészeti tervezőszoftverek is használnak beépített generatív, parametrikus tervezőeszközöket. Az így generált, ún. komputációs geometriákat azután rendkívül hatékonyan lehet olyan programkódra fordítani, amelyet a digitális gyártástechnológiákkal, additív módon közvetlenül le is lehet gyártani.



4.75. ábra. nTop: Generatív kikönnyítések [66]

Legnépszerűbb generatív tervezőszoftverek és kiegészítők a következők:

- Rhino – Grasshopper – Kangaroo
- Autodesk Fusion 360 – Generative Design
- Altair
- CATIA – Generative Design Engineering



4.76. ábra. Generatív térkitöltés Grasshopper plug-innel a Rhinoceros 3D szoftverben [forrás: képkimentés, Szabó Péter]

4.4.3. Szerkezet-optimalizálás, topológia-optimalizálás

A szimuláción alapuló szerkezettervezést az additív gyártástechnológiával kombinálva végelelemes (FEM) számításokkal optimálisan tudjuk kikönnnyíteni az alkatrészeinket (4.77. ábra).



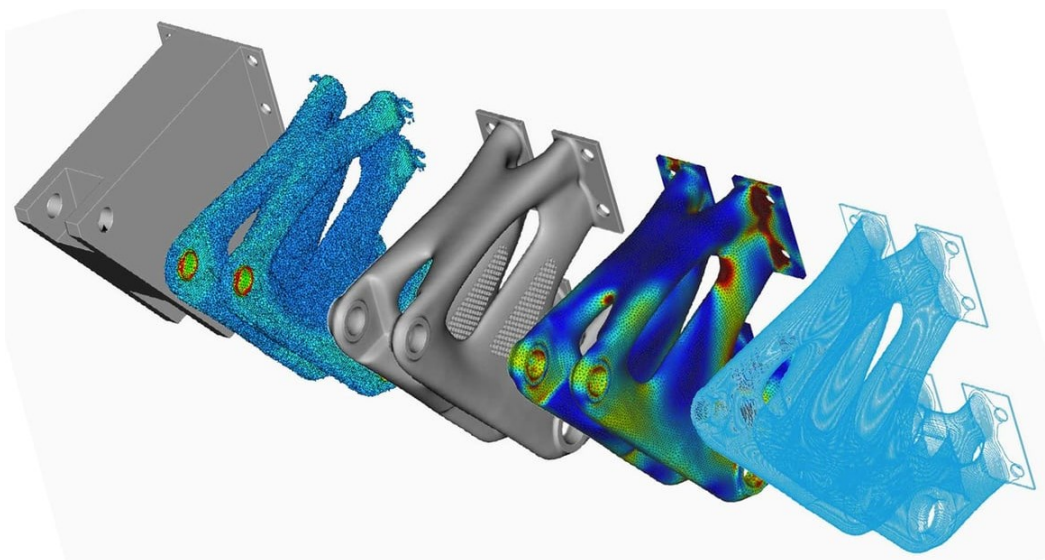
4.77. ábra. Konzol topológia-optimalizációja a Siemens NX szoftverben [67]

A repülőiparban, hadiiparban, űrkutatásban, egészségügyi iparban, de az autóiparban is egyre nagyobb szerepet kapnak a könnyűszerkezetek, a fémeket kiváltó ultrapolimerek és kompozitok, amelyek formái speciális tervezőeszközökkel készülnek. Ezek lehetnek önálló szoftverek, vagy a CAD-be épülő modulok, kiegészítők. A topológia-optimalizálás során a kiinduló geometriából (amely sokszor generatív módon „született”), minden felesleges térbeli pontból (ún. voxel-ből) elvesszük az anyagot, hogy a kényszerekből eredő mechanikai erőknek megfelelően, csak a szükséges helyen használjunk fel anyagot. Leegyszerűsítve, a 3D nyomtatási technológia lehetővé teszi a szerkezet 3D-s nyomatékábrájához közelítő, ideális tartóforma legyártását (4.78. ábra).



4.78. ábra. Tartószerkezeti csomópont kikönnnyítése az Altair szoftverben [68]

A 3D térrácsokkal, ún. *lattice szerkezetekkel* történő zárt vagy nyitott kikönnyítést is topológia-optimalizáló szoftverekkel végzik. A lattice szerkezetek rudakból és csomópontokból álló, repetitív vagy szabálytalan helyzetű térbeli rácsostartó-szerű szerkezetek, amelyekkel hatékonyan lehet akár kívülről zárt szerkezeteket belülről kikönnyíteni (4.79. ábra). A 3D nyomtatási technológia lehetővé teszi, hogy egy rétegen belül is változtassuk az anyag sűrűségét, optimalva ezzel a szerkezet egyedi mechanikai tulajdonságait.



4.79. ábra. Tartókonzol kikönnyítése az nTop szoftverben [69]

Népszerű topológia-optimalizáló szoftverek:

- nTop
- Materialise Magics
- Ansys Additive Suite
- Altair Inspire

4.4.4. Gyártás-optimalizáció

Bár az additív gyártástechnológia a hagyományos, szubtraktív vagy formatív eljárásokhoz képest sokkal nagyobb geometriai szabadságot ad a tervezőnek, a gyárthatósági szempontokat ezen gyártástechnológia esetében is figyelembe kell venni. A szakirodalomban, különféle blogokon és a gyártói honlapokon számos tervezési segédlet érhető el, amelyek az adott additív gyártástechnológiához és alapanyaghoz tartozó tervezési szabályokat összefoglalják, de jelen szakmai anyagunk is foglalkozott már korábban ezekkel a témakörökkel.

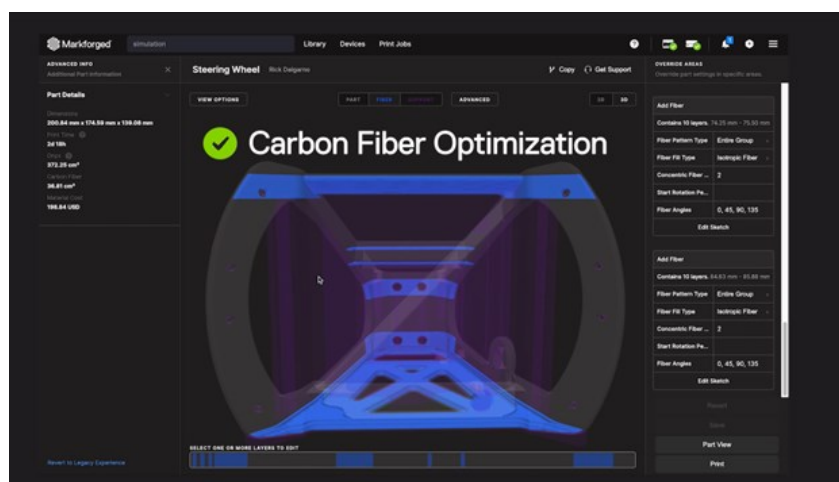
A gyárthatósági szempontok közé tartozik az alkatrész gyártásközi alakváltozásainak figyelembevétele, az esetleges deformációk tervezési fázisban való kompenzálása. Ebben (különösen a fém és ultrapolimer 3D nyomtatási technológiáknál) komoly

segítséget nyújthat a szimuláción alapuló geometria-módosítás (hődisztribúció, zsugorodás és utólagos, anyag leválasztásos megmunkálás figyelembevételével), de megemlítendőek az egyszerű, műanyagszálas 3D nyomtatás során generált támasz és a tapadást segítő szerkezetek is.

4.4.5. Anizotróp szerkezeti validáció és optimalizáció FEM-szimulációval

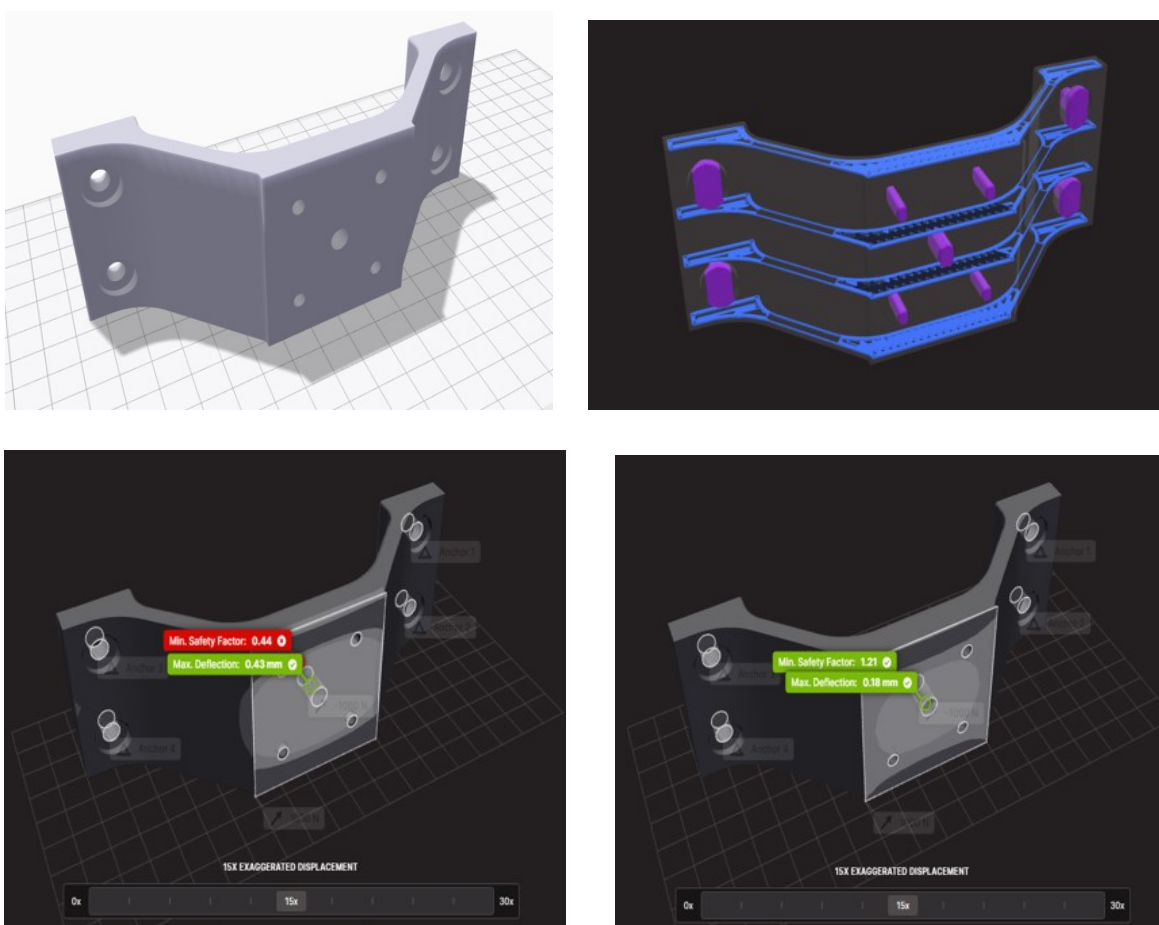
A 3D nyomtatott szerkezetek szilárdságtani méretezése régóta kihívást jelentő feladat, a szokásos méretezési módszerek egyszerűen nem alkalmazhatóak az anizotróp szerkezetekre. A rétegről rétegre történő 3D nyomtatás során a felhasznált alapanyag nem homogén módon kerül beépítésre, ráadásul bizonyos eljárások esetében a horizontális rétegek között csak fizikai kötés létesül, ezáltal az anyagszerkezet eltérő szilárdsági értékeket mutat a térbeli tengelyek mentén. A hagyományos, keresztmetszeti határfeszültségeken alapuló méretezési gyakorlat nem, vagy csak korlátozottan alkalmazható 3D nyomtatott szerkezeteken, azok ugyanis homogén, izotróp szerkezeti modelleken használhatóak megfelelő pontossággal.

A végelelemes szimuláción (FEM) alapuló szilárdságtani méretezés az egyetlen útja a 3D nyomtatott szerkezetek precíz, mérnöki tervezésének; ennek segítségével bizonyosodhatunk meg afelől, hogy a tervezett geometriával, a 3D nyomtatással elkészült alkatrész a beállított nyomtatási paraméterekkel teljesíti a funkcióból eredő szilárdságtani követelményeket. Különösen komplex ez a folyamat, ha változó belső szerkezettel, esetleg két különböző anyag kompozit szerkezetével készül a munkadarab (4.80. ábra). Az ilyen komplex számításokat hagyományos módon lehetetlen lenne elvégezni. Az ipari alkalmazással párhuzamosan megjelentek a 3D nyomtatók felhőben futó szoftverébe integrált FEM-alapú alkalmazások.



4.80. ábra. Folyamatos szénszál-erősítésű polimerkompozit kormánykerék optimalizációja a Markforged Eiger Simulation szoftverben [70]

Például a Markforged Eiger Simulation szoftvere még a nyomtatás megkezdése előtt képes ellenőrizni, hogy az alkatrészünk alul- vagy túlméretezett-e. Első lépésként, bemeneti adatként meg kell adnunk az alkatrészre ható erőket és nyomatékokat, amely értékeket az alkatrészre ható igénybevételekből kapjuk meg. Ezek után el kell helyeznünk a munkadarabot a nyomtatási platformon (orientáció), valamint definiálnunk kell a befogások és támaszok helyét és típusát. Ezután a nyomtatási paraméterek megadása következik: a szokásos előkészítési munkafolyamatnak megfelelően meg kell adnunk a kívánt rétegvastagságot, belső kitöltést, kéregvastagságot, illetve a nyomtatáshoz használt alapanyag típusát (a szoftver a felhőben tárolt műszaki adatlapból veszi az alapanyag mechanikai tulajdonságait, 4.81. ábra).



4.81. ábra. Tartókonzol optimalizációja Eiger Simulation szoftverben [forrás: képkimentés, Szabó Péter]

Ezekén felül meg kell határoznunk a megengedett maximális alakváltozást, és a szükséges biztonsági tényezőt. Ezek függvényében a rendszer a felhőben elvégzi a végelem-számítást, és megmondja nekünk, hogy az általunk beállított paraméterekkel a nyomtatott alkatrész az adott igénybevételnek megfelel-e. A validáción kívül a szoftver optimalni is tudja a nyomtatási paramétereket, hogy azok

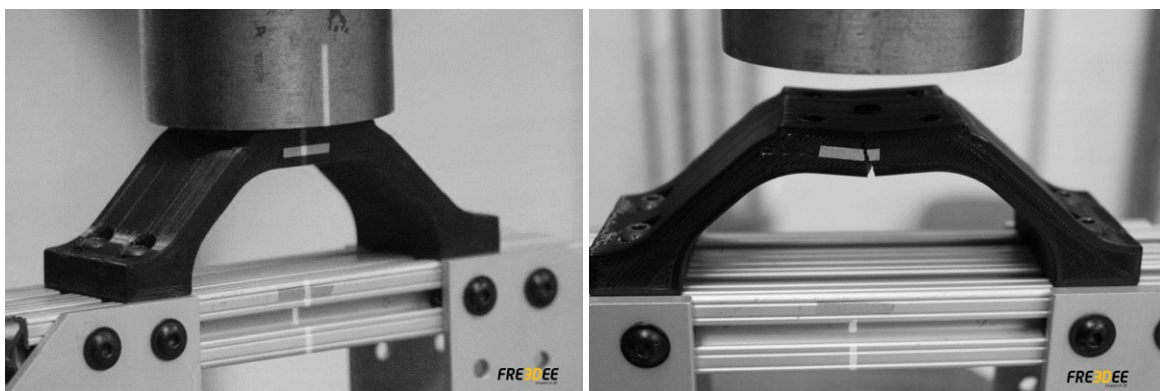
kielégítsék a szilárdságtani feltételeket. Különböző súlyozással választhatjuk ki a beállítás-csoportokat, majd a következő tényezőkre optimalizálhatunk (4.82. ábra):

- gazdaságos gyártási időre
- minimális alapanyagköltségre
- minimális tömegre
- minimális támaszfelhasználásra

OPTIMIZATION RESULTS										
Name	Safety Factor	Deflection	Fiber Layers	Layer Height	Infill	Shells	Mass	Print Time	Cost	Modified
Current	0.44	0.43	ISO • 8L	125 µm	TRI • 37%	2W • 4F • 4R	50.3g	9h 36m	\$15.66	Applied
Onyx Only (Time)	0.87	0.32	None	100 µm	RECT • 100%	2W • 4F • 4R	81.5g	13h 36m	\$16.61	Apply
Onyx Only (Cost)	0.87	0.32	None	100 µm	RECT • 100%	2W • 4F • 4R	81.5g	13h 36m	\$16.61	Apply
Isotropic Fiber	1.24	0.09	ISO • 374L	125 µm	TRI • 37%	2W • 4F • 4R	86.2g	18h 24m	\$98.42	Apply
Concentric Fiber OPTIMIZED	1.21	0.18	CON • 392L	125 µm	TRI • 37%	2W • 4F • 4R	67.78g	14h 3m	\$79.87	Apply

4.82. ábra. Különböző súlyozással készült optimalizált nyomtatási paraméterek Eiger Simulation szoftverben [forrás: képkimentés, Szabó Péter]

A szimuláción alapuló számításokat természetesen fizikai környezetben, anyagvizsgáló laborokban is ellenőrzik, szakító-, hajlító- és nyíróigénybevételeknek teszik ki a nyomtatott szabványos próbatesteket. Az alábbi 4.83. ábrán, például a méretezett tartót a határfeszülésig, majd a tönkremenetelig terhelve láthatjuk.



4.83. ábra. Eiger Simulation szoftverben optimalizált tartószerkezet töréstesztje [forrás: fotók, Szabó Péter]

5. Technológiai tervezés

A nyomtatás technológiai tervezése szorosan összefügg a geometriai tervezéssel, ezért már sok ide kapcsolódó információt az előző fejezetben ismertettünk. A következőkben a nyomtatáshoz, annak optimális feltételeihez közvetlenül kapcsolódó tervezési szempontokat mutatjuk be.

5.1. Szeletelő szoftverek és az AM gyártás fájlformátuma

Az adatok továbbítása a CAD szoftverből a szeletelő szoftver számára STL formátumban történik. Az STL egy olyan adatforma, amely háromszögekkel írja le a geometriai forma felületét. A fájl minden háromszög csúcspontjainak koordinátáit (x,y,z) eltárolja. Továbbá minden háromszög normál vektora meghatározandó, amelyek mindig kifelé mutatnak, ez alapján határozza meg a szoftver a nyomtatandó keresztmetszeteket. [59]

Gyakori hiba szokott lenni az .stl fájlba konvertálás során, hogy a nyomtatandó modell nem lesz zárt felületű. Ez akár eredetileg jó CAD modell konvertálása során is előfordulhat, (pl. túl vékony falvastagság, vagy bonyolult felületi áthatások lekerekítése). Ennek ellenőrzése fontos, hiszen a nyomtatást akadályozó modellhibáról van szó.

A modellalkotás során másik fontos szempont a felületek irányultsága és értelmezése, ezt legjobban a felület normálisa (merőlegese) határozza meg. Az így meghatározott belső és külső felületek egyértelműen megadhatók, ugyanakkor hibalehetőséget is tartalmaz (inverz normális). A külső és belső felületek hibás értelmezését komplex geometriáknál célszerű ellenőrizni, erre alkalmas szoftverek vannak, ilyen például a „netfabb Basic”, amely ingyenes szoftver alkalmas az .stl fájl hálószerkesztési, javítási és elemzési munkáihoz. [71]

A sikeresen előállított .stl modell fájlt a nyomtatási rétegtképzés miatt szeletelnünk kell, erre szolgálnak az ún. „slicer” szeletelő szoftverek. Ezek között több is ingyenesen elérhető. A napjaink elterjedt szeletelő és a nyomtatási paraméterek beállítására is alkalmas szoftverei a teljesség igénye nélkül:

- UltiMaker Cura (www.ultimaker.com)
- Prusa Slicer (www.prusa3d.com)
- Simplify3D (www.simplify3d.com)
- Repetier (www.repetier.com)
- SLIC3r (www.slic3r.org)
- KISSlicer (www.kisslicer.com)

5.2. Kitöltés

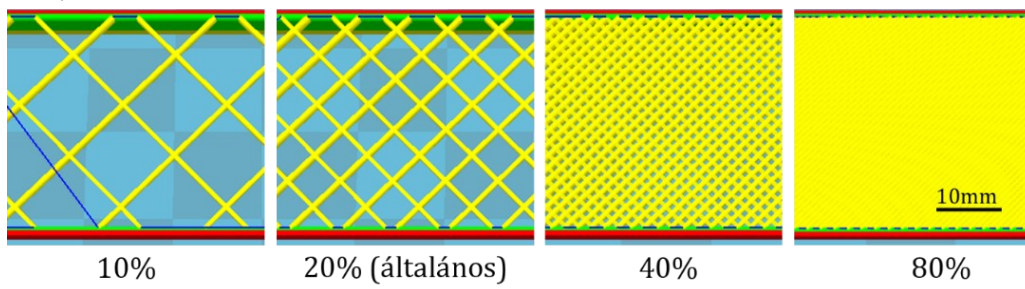
Az eltérő nyomtatási technológiáknál eltérő a kitöltések jelentősége, FDM-nél igen elterjedt a használatuk, ugyanakkor SLA és SLS esetében kevésbé, amelyet a kitöltésben maradó folyékony/laza anyagmaradvány eltávolításának nehézsége okoz. Ugyanakkor a geometriától is függ érdemes-e használni kitöltést. Vékony falaknál, merev csapoknál, nagyobb falréteg vastagságoknál célszerűbb tömörre nyomtatni a modellt vagy részeit.

Elsősorban az FDM szálhúzási technológia esetében azonban a nyomtatási idő, az alapanyag, valamint a súly (ami DMLS-nél kiemelt szempont) megtakarítás miatt célszerű a munkadarabot belső kitöltéssel készíteni. A belső kitöltés lényegében az anyag belső sűrűségét csökkenti és a homogenitását is megváltoztatja. Erre a korábbi technológiák egyikénél sem volt lehetőség ezért nagy lehetőségek rejlenek benne, amelyet az autó és repülőgépipar, súly/szilárdság arányos alkatrészgyártásainál fokozottan szem előtt tart. A kitöltést három fő paraméterrel jellemezhetünk, ezek a következők:

- kitöltés százalékos mértéke
- kitöltési geometria
- kitöltés szabályozott inhomogenitása

5.2.1. A kitöltés százalékos mértéke

A kitöltési százalék könnyen beállítható paraméter, amelyet a legtöbb szeletelő szoftver automatikusan lekezel, csak a %-os arányt kell megadnunk. Ezt a %-os kitöltést szabadon változtathatjuk, mértékének hatásait a következő 5.1. ábrán tekinthetjük át.



5.1. ábra. Eltérő %-os sűrűségű kitöltések négyzetes kitöltési geometriánál

A kitöltések %-os értékének kiválasztásánál, célszerű néhány szempontot figyelembe venni, ezek a következők:

- modell geometriai méretei kicsi vagy nagy,
- modellel szembeni tömeg elvárások,

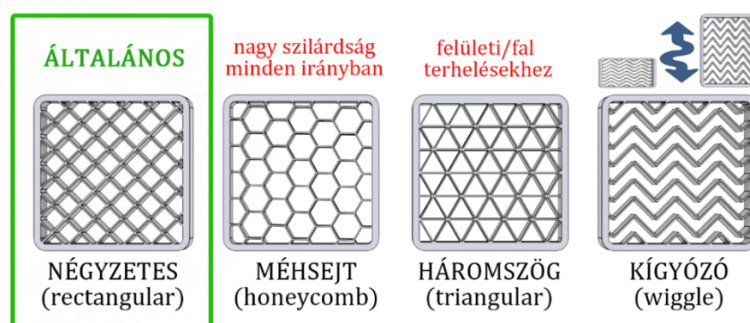
- modellel szembeni szilárdsági és merevségi/rugalmassági elvárások,
- folyadék/gáz tömítettséggel (vízzárással) szembeni elvárások, és a
- gazdasági (gyártási idő és anyagköltség) szempontok.

Az előbbiekhez kapcsolódva a nagy méretek (pl. szobrok, légtérrelő burkolatok, áramlási csatornák, épület makettek) és a nem funkcionális, csak bemutatásra szánt alkatrészek esetében a ritkább, akár a 10%-ot sem meghaladó kitöltési százalék is elterjedt (5.1. ábra), aminek előnye a gyorsabb és olcsóbb nyomtatás. Az ilyen csekély kitöltésnél azonban ügyelni kell a vízszintes vagy ahhoz közeli nagyobb kiterjedésű felső zárófelületekre, hiszen itt a beomlás veszélye is fennállhat a kevés alátámasztás miatt. Ezeknél célszerű a korábban a födémek és hidak részben tárgyalt ismereteknek az alkalmazása.

A szilárdság növelésére célszerű növelni a kitöltést, amely 80%-os értéknél már szinte tömörnek tekinthető (5.1. ábra). A merevség növelésére már nem egyértelmű a % arány növelésének kedvező hatása, ott inkább a falvastagságok növelése, és azok tömör kitöltése lehet célszerű (gondoljunk a hagyományos tömör fémrúd és azonos külső átmérőjű vastagfalú cső merevségbeli eltéréseire). A legáltalánosabban elterjedt kitöltés a 20%, főleg az FDM nyomtatások esetében (5.1. ábra).

5.2.2. Kitöltési geometriák

A kitöltés geometriája, vagy mintázatának műszaki jellemzőkre gyakorolt hatása könnyen belátható. Ma már számos mintázattal találkozhatunk, egyre újabb és újabb formációk bukkannak fel (spirális, twist, lattice, giroid, stb.). Ezek közül a leggyakoribbak a következő 5.2. ábrán láthatók.



5.2. ábra. A legelterjedtebb kitöltési geometriák és legfontosabb jellemzőik

Az ábrán látható kitöltési geometriák rövid jellemzői a következők:

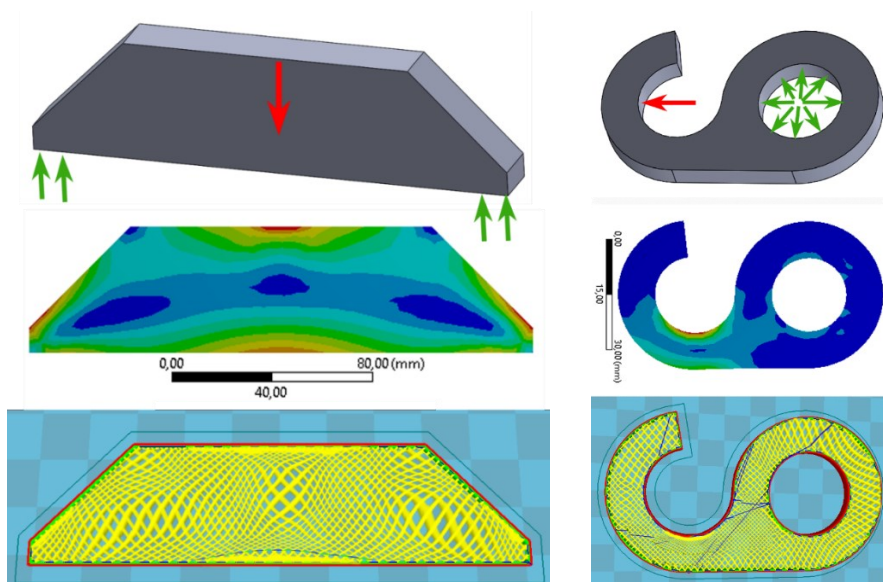
- Négyzetes (rectangular): A legáltalánosabb kitöltései minta, gyorsan nyomtatható és kielégítő szilárdságot biztosít.
- Méhsejt (honeycomb): Nagy szilárdságot biztosít, amely hasonló hatást fejt ki minden irányba.

- Háromszög vagy átlós (triangular): Lassúbb nyomtatást eredményez, de kedvező, nagyobb felületi terhelések felvételére.
- Kígyózó (Wiggle): Rugalmas, összenyomható, csavarható anyagjellemzőket biztosító kitöltés. Célszerű rugalmas anyagminőségű (pl. TPC-Flexible Thermoplastic Copolyester) filamentet használni.

5.2.3. Kitöltés szabályozott inhomogenitása

Az alkatrészek belsejében a mechanikai igénybevételek hatására eltérő feszültségek jönnek létre, például hajlított rúd alkatrészénél külső hajlított oldalon húzott szál, és a másik belső oldalon nyomott szálak képződnek. Ezek leginkább a külső felületi rétegre vannak hatással (persze lehetnek kivételek pl. összenyomódás, nyírás egyes esetei). Az előbbi példa jól jellemzi azt a gyakori feszültség eloszlást, ahol a legnagyobb terhelést az alkatrész külseje veszi fel, a test belsejében lényegesen eltérő feszültségek keletkeznek, tehát a test belsejében a feszültség eloszlás nem homogén, hanem inhomogén (pl. sarkoknál, furatoknál, eltérő keresztmetszeteknél).

A 3D CAD vagy organikus modell, amellyel dolgozunk, felület vagy tömör test modell lehet. Az additív 3D modell gazdaságos nyomtatásához a kitöltés új lehetőségeket teremt a hagyományos anyagtechnológiákkal szemben, vagyis lehetőség van az inhomogenitás beállítására. Ezt a lehetőséget legcélszerűbben a feszültség/terhelés eloszlások szerinti kitöltés optimalizálásra használhatjuk, amely összeköthető a különféle szimulációs módszerekkel (VEM más néven FEM - végeselemes módszer), erre láthatunk példákat az ún. gradiens kitöltésen keresztül a következő 5.3. ábrán.



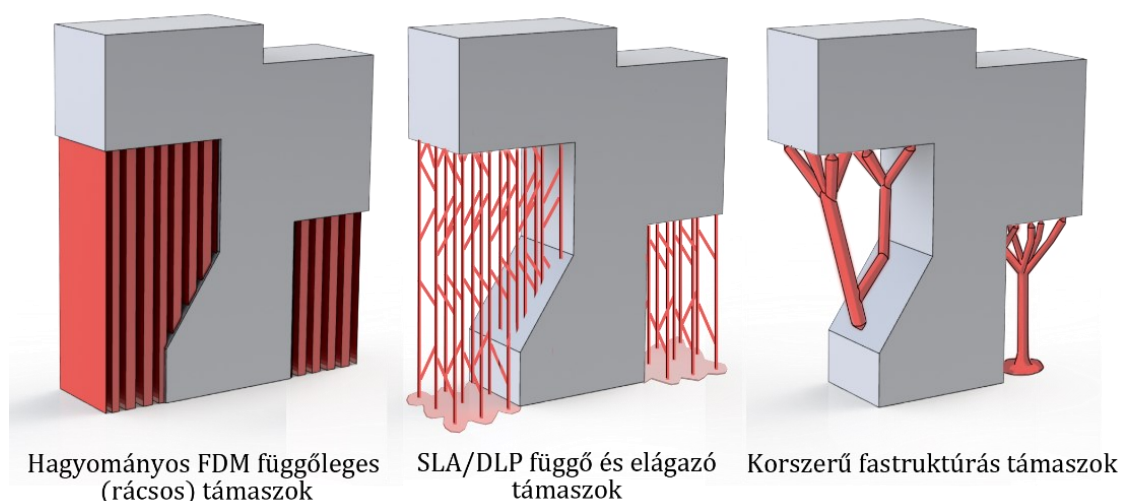
5.3. ábra. Áthidaló elem (bal) és emelő horog (jobb) CAD modellje, VEM szimulációja és az inhomogén kitöltései a 3D nyomtatást megelőzően.

5.3. Támaszok technológiai optimalizálása

A tervezési fejezetben, már sokat olvashattunk a támaszokról és főleg azoknak a csökkentési lehetőségeiről (modell orientációk), most nézzük meg magukat a támaszokat és technológiai jellemzőit.

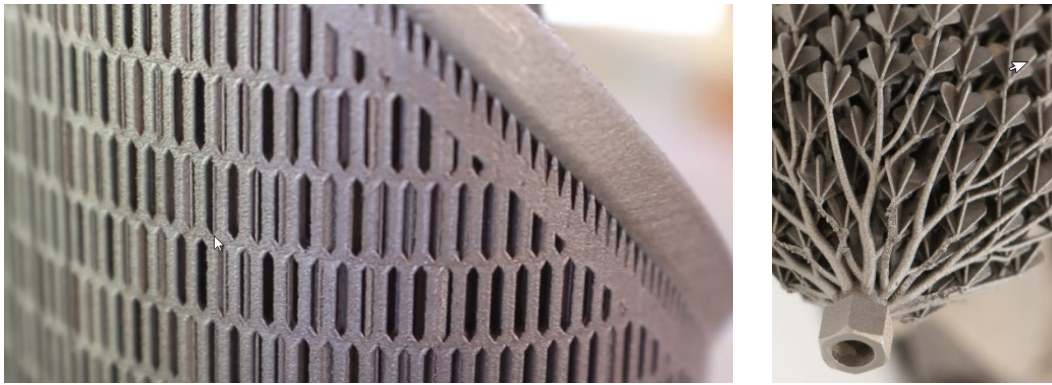
5.3.1. Támaszok típusai

Ha a modell sajátosságai nem teszik lehetővé az ismertetett támasz csökkentési módszerek mellett sem a támaszok elkerülését, akkor is törekedni kell a lehető legkevesebb anyag felhasználásával, a nyomtatási idő minimális megnövelésével elvégezhető nyomtatásra. Lehetőség van a technológiához és a felülethez optimalizált fastruktúrált támaszok használatára a következő 5.4. ábra alapján.



5.4. ábra. Technológiához és felülethez optimalizált támaszok szerkezete

A fenti ábrán látható, hogy a hagyományos támaszrendszerek függőleges elrendezésűek, bár sűrűségük változhat a technológiától függően, mégis sok anyagtöbbletet (főleg magas alkatrészek esetén), nyomtatási és leválasztási időt igényelnek. Az ábra jobb oldalán egy új generációs fastruktúrált támaszrendszert láthatunk, amely minimalizált, a legközelebbi alapfelületről (nem feltétlen a munkasztalról) kiindulva szerte ágazva éri el az alámetszett felületet. Ezen támaszok felülethez érő pontjai is túszerűek így kevesebb nyomot hagynak leválasztás után. A fastruktúrált támaszok alkalmazásával akár harmadára is csökkenhet a támaszanyag igény és egyaránt használható FDM, SLA/DLP, és DMLS technológiák esetén is. A fastruktúrált támaszok fejlesztés alatt állnak, ugyanakkor több, a hagyományos támaszrendszereket optimalizáló megoldás is elterjedt, ilyen a DMLS fémpornyomtatásban használt, homogenizált támasz látható a következő 5.5. ábrán.



5.5. ábra. Homogén (bal) és fastruktúrával (jobb) támasztott fémnyomtatott alkatrészcsoport támaszstruktúrái [forrás: www.amfg.ai/2017/07/28/support-structures-3d-printing-metal/]

5.3.2. Támaszok technológiától függő sajátosságai

A következőkben tekintsük át a szakmai anyagunkban kiemelt négy fő nyomtatási típus támaszokkal kapcsolatos technológiai jellemzőit. A saját tapasztalatokon túl az AMFG/3D Printing Support Structures: A Complete Guide, 17 October 2018, [72] forrás hasznos információit is felhasználtuk a leíráshoz.

FDM nyomtatás támasz jellemzői

Már jól tudjuk, hogy az FDM nyomtatáshoz minden 45° -nál nagyobb túlnyúláshoz és áthidaláshoz támaszokra van szükség. Már elterjedt megoldás a több nyomtatófej esetén használható, vízben vagy egyéb vegyi anyagban feloldható speciális támaszanyag használata. Ez a folyamat akár teljesen automatizálható is ezért lényegesen lecsökken az utómunkálatok (levágás, forgácsolás, felületsimítás) mértéke. Ugyanakkor a több extrúderfej együttes használatára nem minden FDM nyomtató alkalmas, és a leoldás jelentős többlet időt vehet igénybe. Fejlesztések történtek az egyszerűen akár kézzel vagy vibrációval leválasztható támasz kialakítások irányába is, itt azonban a felületi minőség kis mértékben romolhat és támaszanyag maradványok maradhatnak a támasztott felszínen (tisztítás szükséges lehet). A támaszanyagok leoldására polivinil-alkohol (PVA) esetén egyszerűen a víz is alkalmas, de a folyamatot (időben és a leoldás mértékében) nagymértékben befolyásolja a hőmérséklet. A polisztirol (HIPS) leolvadása kevésbé függ a hőmérséklettől, ugyanakkor speciális oldószert igényel a folyamat és ennek vannak költség vonzatai.

SLA/DLP nyomtatás támasz jellemzői

Az SLA nyomtatás bár tartalmaz folyékony közeget az alámetszett részek alatt ez kevés a megtámasztáshoz (deformáció, tapadás növelése az asztalhoz, DLP gravitáció fokozott hatása). Az FDM-el szemben mégis van annyi előnye ezeknek a támaszoknak,

hogy vékonyabbak és kisebb felületen érintkeznek a modellel és könnyebben távolíthatók el. Ugyanakkor az SLA anyagjellemzők miatt (lágyabb, puhább felületek, még az UV keményítés előtt) fokozottabban kell ügyelni az utómunkálatokra. Az SLA fő előnye a többi eljárással szemben, hogy simább felületet hagy, ezért ennek kihasználására a fontosabb felületek tájolásánál ügyelni kell a támasz érintések elkerülésére, erre a tervezési résznél ismertetett, osztott több darabból, majd ezek összeállítását tartalmazó megoldás alkalmas lehet.

SLS nyomtatás támasz jellemzői

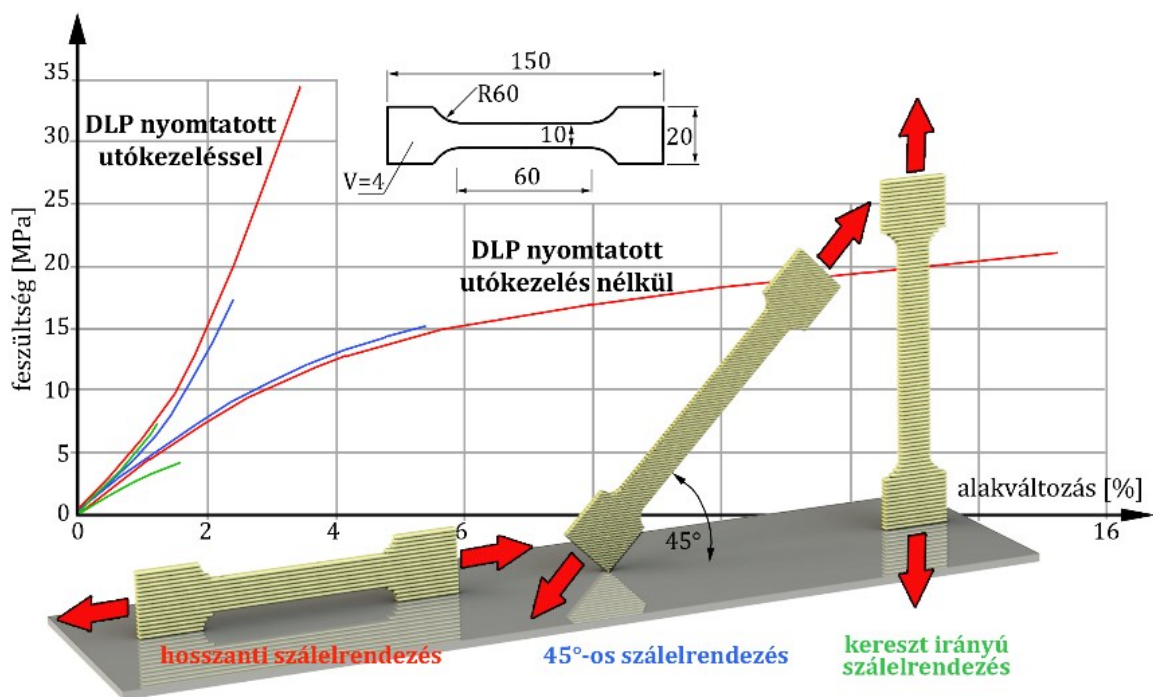
Az SLS nyomtatás esetén nincsen szükség hozzáadott támaszokra a porágy megfelelő támasztóképesége miatt. Itt a poros közeg sajátosságaiból adódó tisztíthatóság lényeges szempont a tervezéskor (tömör kivitel vagy üritő nyílások megfelelő elhelyezése). Szintén fontos lehet a tisztítási mód (sűrített levegős fújás vagy porelszívás, tisztító kefék használata stb.) az utómunkálatok során.

DMLS nyomtatás támasz jellemzői

Lényegében az összes porágyas fémnyomtatásra igaz, hogy az SLS-el szemben szükséges a támaszok alkalmazása a megnövekedett hődeformációk veszélye miatt, amelyek ellensúlyozására a fémpor ágy nem elegendő. A támaszok fontosak az alkatrész és a munkadarab tartó platform közötti hűtőhatás (hőelvezetés) miatt is.

5.4. Orientáció hatása a nyomtatott anyagminőségre

A modell orientációja nem csak a támaszok csökkentésére, hanem a mechanikai jellemzőkre is hatással van. A következő 5.6. ábrán, amely valós szakítóvizsgálati mérési eredményeken alapul (MATE-MI, Additív technológiai labor), jól látható a DLP utókezelésének szilárdságnövelő hatása, amíg kezeletlen állapotban egy nyúlós, nagy alakváltozásra képes anyagot kaptunk. Ezen kívül megfigyelhetők az eltérő orientációk hatásai is, ahol a vízszintes platformon történő elhelyezés közel nyolcszorosára növelte a szakítószilárdság értékét a kedvezőtlen függőleges orientációhoz képest utókezelt próbatesteknél.



5.6. ábra. Szakítóvizsgálatok eredményei DLP nyomtatott utókezelt és kezeletlen mintáknál eltérő orientációk mellett [forrás: MATE-MI, Gödöllő, Additív technológiai labor]

A fémnyomtatások terén az orientációnak a mechanikai jellemzőkre gyakorolt hatását sokan kutatják, például Amir Hadadzadeh és munkatársai (2018). AlSi10Mg ötvözet rúd alakú minták függőleges és vízszintes irányú, DMLS nyomtatással készített próbatestek dinamikus terhelésével a következő eredményeket kapták. Annak ellenére, hogy ugyanazon eljárási paramétereket alkalmazták, csak az orientációban volt eltérés (vízszintes és függőleges) a minták eltérő mikroszerkezetűek voltak. A nyomtatás irányának vízszintesről függőlegesre változtatása a diszlokáció sűrűségének háromszoros növekedéséhez vezetett. [73]

5.5. Munkatérbe helyezés, darabszámok optimalizálása

A nyomtatandó modell munkatérbe helyezésénél a következő fő szempontokat kell figyelembe venni.

A modell és a munkatér méreteinek összehangolása

A 3D nyomtatók egyik legfontosabb jellemzője a munkatérük mérete. Korábban írtuk, hogy ez az egészen kicsi (ékszerész, fogászati nyomtatók) az egészen nagy (karosszéria és épületelemek) méretekig terjedhet, a modellnek minden esetben bele kell férnie a rendelkezésre álló munkatérbe. Ha ez nem valósítható meg akkor vagy kicsinyítéssel, ha ez nem járható út, akkor a modell több részre bontásával lehet ezt a technológiai problémát kiküszöbölni. Ma már megjelentek a futószalaghoz hasonló platformmal

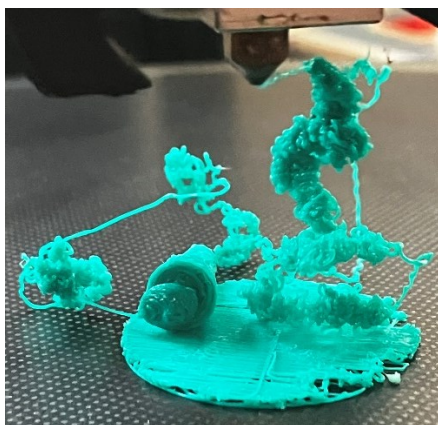
rendelkező nyomtatók, amelyeknél elvileg korlátlan a vízszintes irányú nyomtatás lehetősége. Ilyen berendezésre láthatunk példát a következő 5.7. ábrán.



5.7. ábra. Folyamatos alkatrész sorozatok vagy hosszú modellek nyomtatására alkalmas gumihevederes platformú Crealty CR-30 „PrintMill” berendezés
[www.crealty3dofficial.com/products/cr-30-infinite-z-belt-3d-printer]

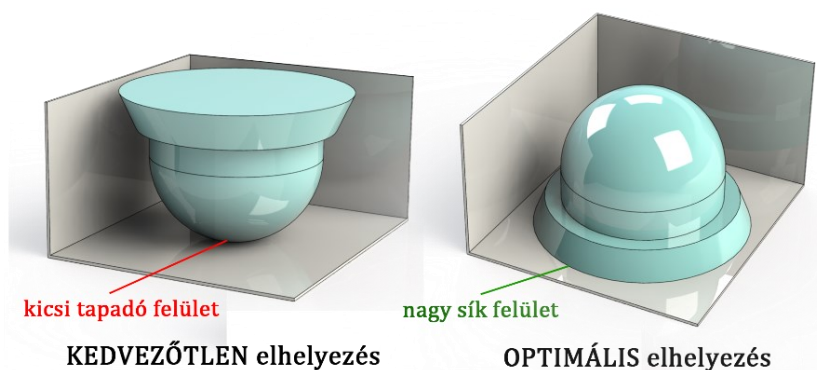
A modell legnagyobb sík felülete legyen a platformon

A geometriai tervezésnél tárgyaltuk a modell asztalhoz tapadásának fontosságát (leválások, elefántláb effektus), ezt nem lehet eléggé hangsúlyozni, számos hiba adódik a rossz tapadásból, ezekre láthatunk két példát a következő 5.8. ábrán.



5.8. ábra. Az alappal kis felületen érintkező, a nyomtatás közben eldőlt kúpos alkatrész (bal) és a nyomtatás közben levált és elcsúszott hengeres alkatrész (jobb) nyomtatási hibái [forrás: fotó, Zsidai László]

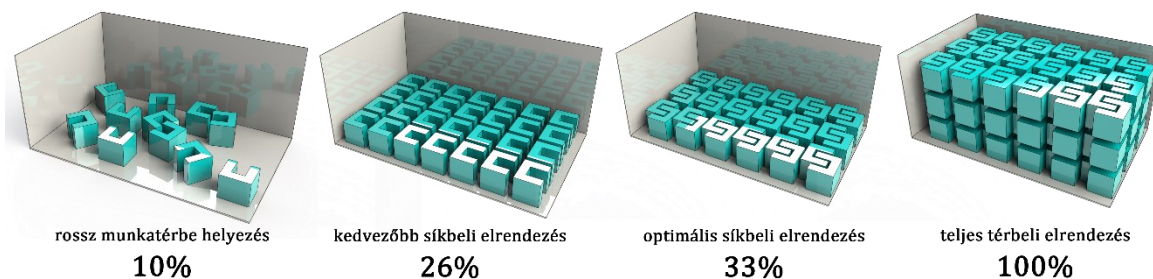
Az az ideális, ha a modell rendelkezik megfelelő sík felülettel. Ez esetben ezt kell választani a nyomtatás kiindulási rétegenként, még akkor is, ha ez egyébként nem a modell alja (5.9. ábra).



5.9. ábra. Kedvezőtlen és jó elhelyezés síklappal rendelkező modell esetében

Munkatér optimális kitöltése

A 3D nyomtatás már régen kitört a korábbi egyedi darabok és a gyors prototípus gyártás kategóriáiból és egyre inkább terjed a kis és középszeriás gyártások területén. Ezért, ma már beszélnünk kell a munkatér optimális kitöltéséről, és az alkatrészek egymáshoz képest történő elhelyezéséről a nyomtatás során. A következő 5.10. ábra bemutatja, hogy milyen gazdaságtalan és gazdaságos kitöltések érhetők el a munkadarabok átgondolt elhelyezésével.

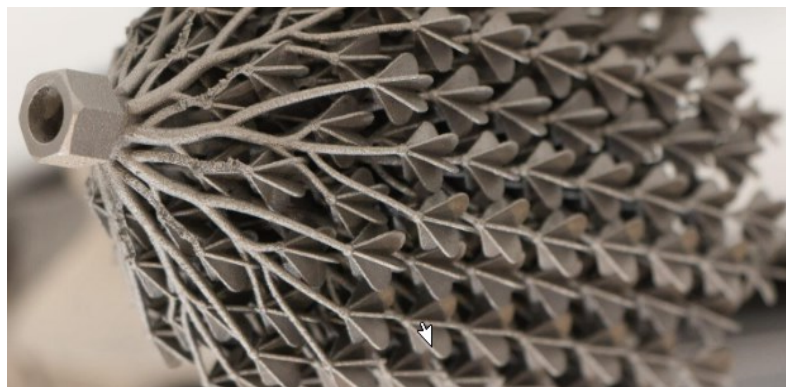


5.10. ábra. Munkadarabok elhelyezése síkban az alaplapon és térben teljes kitöltésben és példaként a velük járó %-os kapacitás veszteségek

A modellek munkatérbe helyezésénél természetesen ügyelni kell arra, hogy ne kerüljenek átfedésbe/keresztelésbe és a szükséges támaszok struktúrája is illeszkedjen az alkatrész csoport/köteg által képzett akadályokhoz. Az előbbi feladatokat már a nyomtatáshoz használt szoftverek, „támasz generátorok” egyre jobban megoldják (pl. MESHMIXER). A térkitöltést a következő parametrizálási lehetőségek jellemzik (forrás: autodesk, [74]):

- Transzformációk: A modellek alaplapon történő külön-külön, vagy együttes mozgatásával/forgatásával a legjobb síkbeli kitöltés elérése (ezt több szintre is helyezhetjük így elérhetjük a 3D térkitöltést)
- Térkitöltés minősége: a szoftvertől és a rendelkezésre álló időtől függően gyors, de kevésbé optimalizált vagy lassan, de jobban optimalizált térkitöltés.
- Térkitöltés kiindulópontja: Ez lehet a munkatér közepén a sarkán vagy bármely kijelölt részén.
- Térkitöltés stílusa: a csoportba helyezett alkatrészeket behatároló forma (henger, gömb, hasáb, stb.).
- Platform szegély szélesség: annak a szabadon maradó szélső felületi margónak a mérete, amelyet a munkadarab tartó asztal külső szélén meghagyunk (pl. hűtés biztosítására)

A megfelelően parametrizált, számítógépes térkitöltő szoftverrel végzett munkatér kitöltés hatására a legtöbb alkatrész és a hozzájuk optimalizált támaszrendszerek is nagyon jól kialakíthatók, erre láthatunk példát a következő, fémporágyas nyomtatással készült alkatrész csoportról a következő 5.11. ábrán.



5.11. ábra. térkitöltéssel kiosztott fastruktúrával támasztott fémpnyomtatott alkatrészecsoporthoz támaszstruktúrái [forrás: www.amfg.ai/2017/07/28/support-structures-3d-printing-metal/]

5.6. Utómunkálatok technológiai csoportonként

A nyomtatási technológia egyik fontos, ugyanakkor gyakran elhanyagolt része a nyomtatást követő utómunkálat. A következőkben az eddig is tárgyalt alapvető nyomtatási technológiákhoz általánosan elvárt és elterjedt utómunkálatok főbb technológiáit tekintjük át. Megjegyzem ezek nem kizárólagos ajánlások, más hagyományos technológiák is bevonhatók és a leírtak is kombinálhatók egymással. A leíráshoz, saját szakmai tapasztalatainkon túl többek között a [50], [75], [76], [77] szakmai leírásokban szereplő ismeretek is hozzájárultak.

5.6.1. FDM nyomtatás utómunkálatai

Az FDM nyomtatást követően, a gyakori alátámasztási igények miatt alapvető utómunkát a támaszanyag leválasztása. Könnyű helyzetben vagyunk, ha több fejes nyomtatóval külön eltérő anyagokból nyomtattuk a modellt és a támasz, ebben az esetben a korábban bemutatott HIPS és PVA támaszanyagok folyadékban könnyen leoldhatók, és nem hagynak különösebb felülethibákat a modell felszínén.

Ha a nyomtatónk egy fejjel egyszerre csak egy anyagtípust képes nyomtatni, akkor egyszerűbb esetben a támasz letörhető, de gyakori a levágás is, éles szike, csípőfogó stb. segítségével. Ezt követően gyakori a felületjavítás igénye, amely a következőkben látható.

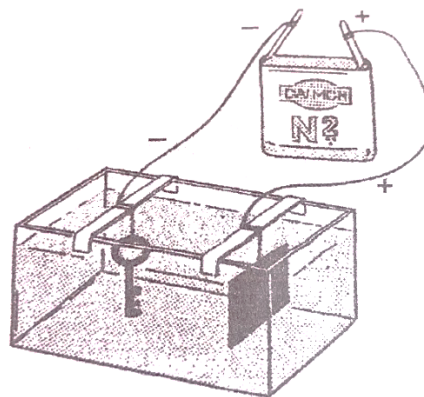
Felületminőség javítása (finiselés)

FDM-nél öt fő módszer terjedt el:

- **Csiszolás/polírozás:** Ezt a felület függvényében célszerű a kereskedelemben kapható csiszolóvásznak segítségével elvégezni. Ügyelni kell a csiszolószemcsék méretére, mivel a túl finom vászon nem ad jó eredményt (általában a műanyagok esetében azok puhasága és a gyors eltömődés miatt), a javasolt szemcseméret maximum 600-as. Nem célszerű nagy fordulatszámú gépi csiszolást sem alkalmazni a felület elkenődése és megolvadása miatt, gyakori az enyhe kézi csiszolás elvégzése. Ha további felületi javulást akarunk elérni, a csiszolást polírozás is követheti, amelynek során műanyag polírozó keveréket használnak a felületre (egyszerűbb esetekben akár fogkrém alkalmazására is van példa). Ezeknek az eljárásoknak a korlátja a modell mérete, hiszen kisméretű és/vagy belső felületeknél nem mindig használhatók.
- **Glettelés:** A felületi hibákat valamilyen jól tapadó anyag felkenésével egyenlítjük ki. Alkalmazhatunk ragasztó anyagot (pl. epoxigyanta), de nagyobb hibák esetén, az autó karosszéria javításában a műanyag burkolatok „kittelésére” szolgáló kenhető vagy felszórható anyagok is szóba jöhetnek. Az epoxigyantát gyakran a modell teljes felületére megfelelő előcsiszolást követően mint bevonatanyagot is használják, így kemény sima réteget kaphatunk. Ugyanakkor, ne feledkezzünk meg az epoxi réteg mérettorzító hatásáról!
- **Aceton gőz kezelés:** Ez főleg ABS anyagból nyomtatott modellek esetében használatos. A modellt zárt kamrába helyezik, amelyben melegítéssel acetongőzt fejlesztenek. Az aceton, mint oldószer feloldja a modell felszíni rétegeit, így ezek képlékennyé válnak és elsimulnak, tetszetős felületet eredményezve. Fontos, hogy az acetongőzben eltöltött optimális időtartam

döntő, hiszen túl sok idő jelentős rongálódásokat, egyes modell részletek teljes elvesztését eredményezheti.

- Festés: Gyakori FDM nyomtatást követő művelet. Az előkészítést a csiszolás/polírozás részénél leírtak szerint javasolt elvégezni, majd ezt követi az alapozás, amelynek a felületkiegyenlítésen túl feladata a megfelelő tapadóhíd létrehozása az alapfelület és a festékréteg között. A festést ecseteléssel vagy szórással is végezhetjük.
- Galvanizált fém bevonat felvitele: Ez egy speciális felület bevonatolási technika, amellyel a nyomtatott polimer alkatrészünk felületét különböző fém (pl. réz, horgany, nikkel) bevonatokkal tudjuk ellátni (5.12. ábra). Ezt a kedvező esztétikai hatás mellett a modell elektromos vezetőképességének, felületi teherviselő képességének és kopásállóságának a javítására szokták alkalmazni. Fontos, hogy az eljárás a polimer nem elektromos vezető jellege miatt részben eltér a fémeknél alkalmazott technikától. A polimer nyomtatott alkatrészt elsőként vezetővé kell tenni, ezt ezüst vezetőlakk felületre felvitelével biztosíthatjuk, és ennek száradása után savas fürdővel rezezzük, ezt követheti a nikkelezés vagy más fém felvitele.



5.12. ábra. Egyszerű galvanizálás elve, egyenfeszültség, elektrolit, bevonandó kulcs munkadarab (anód) és a bevonat anyagot biztosító katód lemez [forrás: Conrad Electronic-termékkatalógus 2001]

FDM nyomtatott elemek egyesítése

Ahogy korábban írtuk, az alkatrész szétbontásának számos minőségi és gazdasági előnye van, ezért beszélnünk kell a nyomtatást követő (kötőelem nélküli) anyag egyesítés lehetőségeiről. Ezek lényegében a műanyagiparból átvett már régóta széles körben használt eljárások:

- Ragasztás, amelynek lehetőségeiről a következő részben külön leírást adunk.

- Műanyag hegesztés: hőlégfúvás (5.13. ábra) segítségével a fémipari hegesztéshez hasonlóan a két fél illeszkedő éleinek megolvasztásával kohéziós kötés hozható létre. Ehhez gyakran azonos vagy eltérő hozaganyagot (polimer pálca formájában) is alkalmazhatunk. A hegesztés nem pontos eljárás, ezért a méretpontosság nehezen tartható. Ezt gyakran a hegesztést követő utólagos megmunkálással biztosítják, de ezt már a tervezésnél is figyelembe kell venni.



5.13. ábra. Ipari hőlégfúvó (Leister) műanyag hegesztéséhez [forrás: fotó, Zsidai László]

5.6.2. SLA/DLP nyomtatott elemek utómunkálatai

Az FDM technológiával szemben, a rezines SLA/DLP nyomtatással lényegesen jobb felületi minőség érhető el, ezért a szükséges utómunkálatok is kisebb mértékűek és részben eltérnek az FDM-nél látottaktól. Az alátámasztást itt sem tudjuk mindig elkerülni, ezek szintén nyomot hagynak (kis tüskéket) a felszínen, ezért felületsimításra itt is szükség lehet. Itt nincs lehetőség eltérő (leolvasztható) anyagból készíteni a támaszokat, ezért ha vannak, azokat le kell választani az FDM-nél tárgyalt mechanikus módszerekkel.

A lényeges eltérés a tisztításban és a nyomtatott rezin utólagos kikeményítésében rejlik, amely a mechanikai jellemzőket javítja. Az előbbieknél megfelelően nézzük át az ide vonatkozó utómunkálatokat.

Tisztítás/szárítás

Az SLA technológiából adódóan, nem megszilárdult rezin maradhat a modell belsejében, főleg az SLA esetében. A DLP előnye, hogy a fordított, fejjel lefelé elrendezés megkönnyíti a fölös gyanta kifolyását még nyomtatás közben, de a korábban leírt „búvárharang” effektus miatt lehetnek maradványok. A tisztításhoz ki kell folytatni a tárgyból a fölösleget, majd célszerű szárítókamrába (5.14. ábra) helyezni a munkadarabot és a gyártó által előírt ideig (pl. 30 perc) és hőmérsékleten (pl. 60°C) tartani azt.



5.14. ábra. Szárítókamra, anyagvizsgálati célú próbatestek kondicionálására [forrás: MATE-MI, Gödöllő, Additív technológiai labor]

Felületminőség javítása (finiselés)

SLA/DLP-nél négy fő módszer terjedt el:

- Csiszolás: Alapvetően kisebb mértékben szükséges, mint az FDM esetében és elsősorban csak az alátámasztási nyomok helyén. Ehhez a legmegfelelőbb a vizes csiszolás, ehhez erre a célra forgalmazott finom szemcsézetű (pl. 1000-es) vízüveg csiszolóvásznak alkalmasak.
- Polírozás: Ezt az SLA/DLP nyomtatott részek esetében célszerű különválasztani a csiszolástól, mivel munkaigényes és nem mindig szükséges eljárás. Ha mégis polírozni akarjuk az alkatrészünket az legyen egyszerű, nagyobb kiterjedésű, síkfelületekkel rendelkező geometria. Polírozáshoz elsőként használjunk legalább 2000-es szemcsenagyságú csiszolóvásznat, majd a végső felület műanyag polírozó keverékkel alakítsuk ki, ezzel akár tökéletes átlátszó felület is létrehozható az átlátszó rezinnel nyomtatott alkatrészek felületén.
- Olajkence használata: A csiszolási folyamat után a közben kialakult foltosodás csökkentésére használják, szép egyenletes felületet hoz létre. A felvitel törülőkendővel is történhet, de ügyelni kell a kendő és az olaj tisztaságára. A szép felület biztosításán túl javulnak az alkatrész súrlódási jellemzői is, ezért elsősorban súrlódó gépelemek estében alkalmazzák.
- Festés: Az összefüggő festékréteg itt nem csak a felületminőségét javítja, de megvédi az alkatrészt az UV sugárzás degradáló és elszínező hatásától is. A festékfelvitelhez javasolt a festékszórás, a festék típusának pedig az akril festékek a megfelelők. Rugalmas alkatrészek festése a későbbi repedezettségek és leválások miatt nem javasolt.

Mechanikai jellemzők javítása

A legjobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében az SLA alkatrészeket utólagos keményítésnek kell alávetni, mégpedig úgy, hogy intenzív UV-fényben egy keményítő kamrába helyezzük őket (5.15. ábra). Ez nagymértékben javítja az SLA alkatrész keménységét és hőállóságát, de törékenyebbé is teszi őket.



5.15. ábra. UV fény kezelő kamra DLP próbatestek kikeményítése közben [forrás: MATE-MI, Gödöllő, Additív technológiai labor]

Az 5.15. ábrán látható UV keményítést adott időtartamú előmelegítés is megelőzheti az alapanyaggyártó előírásai szerint (például: Formlabs, [75]).

Az utó-keményítési folyamat eredményei elsősorban a következőket jelentik [76]:

- SLA nyomtatóval, standard gyantával nyomtatott alkatrészek tesztadarabjai majdnem kétszer akkora szakítószilárdsággal rendelkeznek a kikeményítés után.
- Az alkatrészek magasabb hőmérsékleten is terhelhetők.
- A szakítószilárdsága csaknem a felére esik vissza.

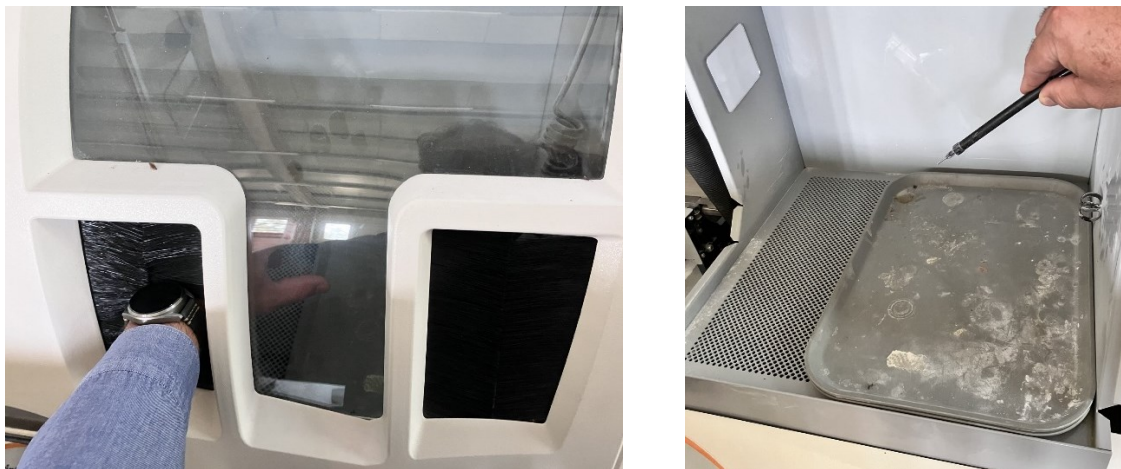
5.6.3. SLS nyomtatott elemek utómunkálatai

Az előző FDM és SLA technológiákkal ellentétben, SLS-nél lényeges különbség, hogy a porágy miatt nincsen szükség támaszanyagra, ezért lényegesen egyszerűsödik az utómunkálatok köre, gyakran az alkatrészeket direkt késztermékként is gyártják. Az SLS utómunkálatainak három fő célcsoportja van, ezek a következők:

Tisztítás

A nyomtatást követően az üreges munkadarabok a porágy miatt laza porral telítettek, ezeket el kell távolítani. A porágyas nyomtatók általános tartozéka (beépítve, vagy

külön egységként) egy tisztítókamra, amely sűrített levegős rendszerrel van ellátva, ezzel lehet kifúvatni a modellben maradt port (5.16. ábra).



5.16. ábra. SLA nyomtató (ZPrinter 350) beépített tisztítókamrája zárt ajtóval és porvédett kezelőnyílásokkal (bal ábra), a tisztítókamra nyitott állapotban a rácsos porgyűjtővel és a finom por leválasztó sűrített levegős kézi fúvókával (jobb ábra). [forrás: MATE-MI, Gödöllő]

A durva porleválasztás után gyakran a felületre, annak pórusaiba tapadt port is le kell távolítani, erre szolgálhat a szemcse vagy porszórás, amelyet célszerű műanyagporral végezni. Az SLS tisztított felülete szemcsézett jellege miatt kiválóan alkalmas festésre.

Felület javítás

- Rezgő csiszolás, elterjedt nevén rezgő sorjázás: Ez a módszer kisebb forgástest, vagy prizmatikus munkadarabokra alkalmazható. Az alkatrész (legtöbbször több alkatrész egyszerre) adott közegbe kerül, amely lényegében egy kerámia golyókkal vagy szemcsékkel töltött vibrációs tálcás tárolót jelent (5.17. ábra). A kerámia közeg mérete nagymértékben függ a sorjázandó alkatrész típusától, méretétől és anyagától. Amint az alkatrész bekerül a tálcába (szállítópályán keresztül), a tálcá gyorsan előre és hátra rezeg (excentereken keresztül állítható módon), ez a mozgás az alkatrészt a kerámia közeghez dörzsöli, amely a sorjákat letördeli és az alkatrészt is polírozza.

A módszer hátránya, hogy csökkentheti a munkadarab méreteit, lekerekíti az éles sarkokat és elsimítja a kisebb részleteket. Szintén ügyelni kell a belső üreges alkatrészeknél, ahol beszorulhatnak a kerámia részecskék ezért azokat a modell kritikus méreteihez kell kiválasztani.



5.17. ábra. Rezgő sorjázó (finiselő) berendezés (www.tekdeburr.com) és az Eltérő méretű és formájú abrazív kerámia szemcsék sorjázó töltelék részek [www.best-b2b.com]

- Festés/lakkozás: Az SLS nyomtatott felületek porozitása megfelelő alapot biztosít a festéshez, amelynek felvitele két módon javasolt. Gyors eljárás a bemártás (megfelelő hőmérsékletre melegített festékanyagba), ezzel a modell minden felülete bevonható. A festékanyag és hőmérsékletének optimális megválasztásával kb. 0,5 mm-es felületi mélységbe történő behatolást is elérhetünk. A másik megoldás a szórás, ezt gyakran lakkozáshoz használják. A lakkozás a felület minőségén túl javítja a felület mechanikai jellemzőit (kopásállóság, nedvességállóság, keménység). A felület porozitása miatt több vékony réteg (akár 6 réteg is) felvitele a célszerű, mert pl. kopásnak kitett alkatrészeknél a felületi porréteg a felszínre kerülhet.

Alkalmazás függő utómunkálatok

- Szivárgásmentesítés (folyadékzárás): Az SLS nyomat porozitása a folyadékmegtartó funkció mellett problémákat okozhat. A bevonatolás megfelelő eredménnyel járhat a kívánt szigetelés eléréséhez. A korábban leírt lakkozáson túl, a szilikonok és a poli-vinil-akrilát diszperziók felületre felhordása adhat jó eredményt. Ha teljes vízállóságra van szükség azt bemeztetéssel javasolt elvégezni.
- Galvanizálás: Az FDM utómunkáknál leírtak szerint az SLS nyomtatott elemek is bevonhatók különböző fém bevonatokkal, amelyek növelhetik a szilárdságot és az elektromos vezetőképességet. Itt sem feledkezzünk meg a polimerek fém bevonatolásának korábban leírt speciális szabályairól.

5.6.4. DMLS

A DMLS fémpornyomatás sok mindenben hasonlít az SLS technológiához, ugyanakkor a lényegesen nagyobb hőmérsékletek miatti deformációk ellen nem elegendő csak a porágy támasztása, külön támaszokat kell alkalmaznunk (ezeknek hűtőcsatorna szerepük is van). Ennek megfelelően az utómunkálatok jelentős része a támaszanyagok eltávolítására vonatkozik. Ugyanakkor a porágy miatt itt is meg kell említenünk a tisztítási műveleteket.

Tisztítás

A nyomtatást követően az üreges munkadarabok a porágy miatt az SLS-hez hasonlóan laza porral telítettek, ezeket el kell távolítani. Az alkalmazott megoldások az SLS-nél tárgyaltakhoz hasonlóak.

Támasz eltávolítás

A fémpornyomatás nagy szilárdsága miatt, a támaszanyagok eltávolítása jóval idő és költség igényesebb feladat, mint azt az FDM vagy SLA nyomtatásnál olvashattuk. Itt leggyakrabban nem lehet kézi úton a támaszt eltávolítani, hanem csak gépi úton, forgácsolással, lézer vagy huzalszikra (EDM) vágással. A támaszok eltávolítását követően itt is jelentős felületi hibák maradnak (ez függ a támaszleválasztás típusától és pontosságától) ezért utómunkálatokra van szükség.

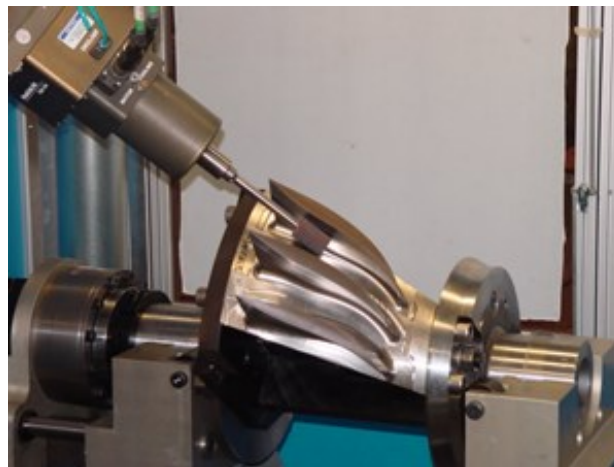
Felület javítás

- **Forgácsolás:** A fémipari forgácsolásnál alkalmazott szerszámgépek (eszterga-, maró-, fúró-, fűrészgépek) széles skálája áll rendelkezésre, beleértve a CNC technológiát is. A nyomtatott fém alkatrészek forgácsolhatóságának legfőbb korlátja a hozzáférhetőség, ezt a modell munkatérbe helyezésével és magával a tervezésével oldhatjuk fel. A forgácsolásnál a sorjázásra használt szerszámok is hatékonyan használhatók elsősorban a sarkok, furatszélek simítására, erre láthatunk példákat a következő 5.18. ábrán.



5.18. ábra. Példák az iparban alkalmazott sorjázó marókra: Sorjázás szabályos élű (sorjázó) maróval (bal), [www.acmemfg.com], sűrített levegővel hajtott marófej (jobb), [news.thomasnet.com]

- Polírozás/mikroforgácsolás: Lényegében a szabálytalan forgácsoló élű csiszoló és köszörűgépek vagy a szabályos élű mikromarók felhasználását jelenti. A felületi érdesség jelentősen csökkenthető általuk és akár az R_a 0,8 μm -nél finomabb felületi minőség is elérhető. A következő 5.19. ábra csiszoló szerszámot, ún. „lepkekorongot” mutat be bonyolult geometria felületsimítása közben.



5.19. ábra. Sorjázás rugalmas szárnyas csiszoló koronggal [www.acmemfg.com]

- Rezgősorjázás: Az SLS technológiáknál megismert módon.
- Hősorjázás: Ennél a módszernél intenzív hő alkalmaznak a munkadarab sorjázására. A sorjázandó alkatrészeket egy gyúlékony gáz és oxigén keverékével túlnyomásos kamrába helyezik. Ez a gázkeverék teljesen beborítja az alkatrészt és a sorját is, tekintet nélkül, hogy a sorja külső, belső vagy vakfuratban helyezkedik el. Majd ezt a gáz keveréket begyűjtik, ami intenzív hő, pillanatok alatt lejátszódó égést produkál, és a sorják (vékony keresztmetszetük miatt) elégnak. A folyamat kb. 25-30 másodpercen belül

lejátszódik, a sorja azonnal oxidálódik és porrá lesz. Végül az alkatrészeket oldószerrel megtisztítják. Ez a folyamat eltávolítja a nemkívánatos anyagot minden felszínről [77].

- Elektrokémiai polírozás: Az ECD (Electro Chemical Deburring/Polishing) elektrokémiai sorjázó/polírozó alkatrész kontúrokat sorjázza le, az elektrokémiai reakció révén. Ebben a folyamatban elektrolit folyadékban helyezkedik el a munkadarab és közelében az elektróda. Az elektróda egy D.C. forrás negatívjához, a munkadarab a pozitívhoz csatlakozik. Az elektrolit áramlik az elektróda és a munkadarab között, a létrejövő elektrokémiai reakció eltávolítja (lemarja) a sorjakat. Az áramerősség közvetlenül arányos a sorja eltávolítás mértékével. A módszernek számos előnye van, pl. a szerszám sosem érinti az alkatrészt, tehát nem merül fel szerszámhasználat. Nincs hőképződés a folyamat alatt, tehát hő vagy mechanikai stressz nem torzítja az alkatrészt [77].
- Homokszórás: Ezt kézzel mozgatott porszóró pisztollyal végzik, egy megfelelően zárt kamrában. Előnye, hogy a nehezebben hozzáférhető helyek is elérhetők vele, hátránya az egyenetlen koptató (eróziós) hatás.
- Bevonatolás: Ez jelentheti a korábban tárgyalt galvanizálást, de fém-porszórást is. Elsősorban a mechanikai jellemzők (kopás- és korrózióállóság, keménység stb.) javítására alkalmazzuk, ezért célszerű csak az igénybevett felületeken alkalmazni, a többi maszkolással kizárható a folyamatból.

Feszültségcsökkentő hőkezelés

Ahogy az korábban írtuk a DMLS nyomtatás során jelentős feszültségek keletkezhetnek a fém munkadarabban, ezeknek feloldása (normalizálása) döntő a további felhasználás szempontjából. A hőkezelések a fémiparban használatos eljárások, de a gyártói ajánlások a mérvadók. A hőkezeléssel, nem csak a belső feszültségek csökkenthetők, de a keménységet is növelhetik, sőt a porozitást is csökkenthetik. A hőkezeléseket általában a finomfelületi megmunkálások előtt célszerű elvégezni, de ettől eltérések is lehetnek.

5.7. 3D nyomtatott anyagok ragasztása

Az előbbieken már többször felmerült a ragasztás, most röviden foglaljuk össze az alkalmazható ragasztó anyagokat. A felhasználható ragasztók skálája széles, de eltérő véleményekkel is találkozhatunk a felhasználhatóságukról. A legelterjedtebb ragasztóanyagok röviden a következők [78]:

- Pillanatragasztó (cianoakrilát): ABS, PLA és PETG polimerekhez, erős gyors kötés, viszont merev, könnyen törik, és a felületnek tisztának és simának kell lennie (alkoholos tisztítás javasolt).
- Aceton (más festékhígító is): ABS, HIPS polimerekhez, erős és nem látható ragasztást eredményez, fontos a tiszta felület.
- „Vízvezeték cső ragasztó” (acetonhoz hasonló oldószer alapú): ABS, HIPS és PLA-hoz alkalmas, PETG és PA-hoz nem.
- Kétkomponensű epoxigyanták: bármelyik 3D nyomtatható anyaghoz alkalmas, azonban merev rideg kötést ad. Ragasztóként és töltőanyagként is használható. Nem igényel illeszkedő sima felületeket, de tisztítást igen.
- Poliuretán és szilikon ragasztók: minden nyomtatható anyaghoz. Erős rugalmas kötést adnak, ugyanakkor vastag illesztési hézagot igényelnek, ezért a ragasztás jól látható lesz és méretpontossági gondok is adódhatnak. Sok típusuk kapható, ezért célszerűek az előzetes ragasztási próbák.
- Hevített rudas ragasztópisztoly: a merev polimerekhez (ABS, PLA, PETG, stb.) használható. A pisztolyhoz kapható ragasztórudak is használhatók, de gyakorlati tapasztalatok szerint PLA-nál, magának a PLA filament darabnak, mint megolvasztott ragasztóanyagnak a használata is bevált. Ehhez legalkalmasabbak a kereskedelemben kapható 3D tollak. Itt természetesen a tollban hevített szál alapanyagának a ragasztandó anyaggal való azonossága lényeges. A módszer hátránya itt is a vastag ragasztott réteg, amely látható és méret pontatlanságot okoz.

5.8. Monitoring megoldások az additív gyártásban

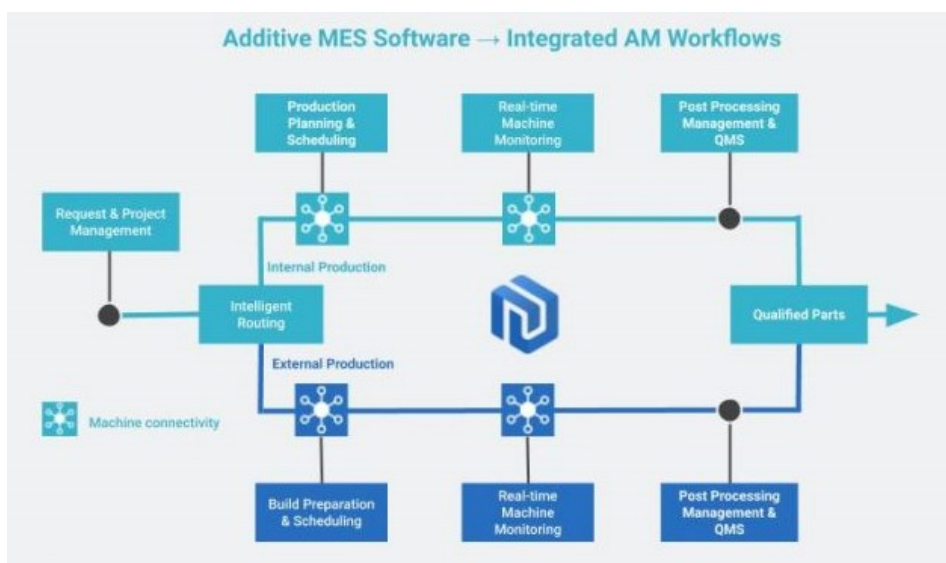
Az elmúlt évtizedben a 3D nyomtatás kilépett a prototípusgyártó technológiák sorából, és egyre nagyobb számban jelenik meg az ipari gyártást támogató, vagy azt részben vagy egészben helyettesítő eljárásként. Az autóiparban, repülőiparban, egészségügyi iparban, de az ékszer-, divat- és ruhaiparban is egyre gyakrabban találkozunk az additív gyártástechnológiával, amely akár közvetlenül végtermékek gyártását, akár a hagyományos sorozatgyártási folyamatok szerszámozását, gyártósori segédalkatrészek házon belüli 3D nyomtatását is jelentheti.

Az ipari gyártási folyamatokban azonban minden egyes szerszámnak, segédalkatrésznek és végterméknek szigorú minőségi követelmények kell megfelelniük. A minőségbiztosítási rendszernek, az eljárás ismétlődiképességének, valamint minden egyes munkadarab visszakövethetőségének éppen ezért a 3D nyomtatott alkatrészek esetében, különösen fontos szerepe van, ugyanis az eljárás gyártósorokon való alkalmazhatóságának ezek a legfőbb kritériumai (5.20. ábra).



5.20. ábra. Nyomatási paraméterek monitorozása az ExOne fémnyomtató rendszeren [79]

Az additív gyártási folyamatok felügyelete a gyártási folyamat során egyrészt azért is fontos, hogy elkerüljük az esetleges üzemzavarokat, de emellett a végső, 3D nyomtatott munkadarab jellemzőiről is fontos információkat tartalmaz a gyártási paraméterek rögzítése. Egy egyszerű, otthoni hobbinyomtató esetében még nem nagy probléma, ha valamilyen váratlan géphiba folytán az alkatrész hibásan készül el, az ipari termelésben és a megfelelő tervezhetőséghez azonban rendkívül fontos, hogy kontroll alatt tartssuk a gyártási jellemzőket. Egy esetleges üzemzavar miatti gépleállítás, vagy a kalkuláltnál nagyobb számú selejt legyártása jelentős többletidővel és magas költségekkel is járhat. Ezek elkerülése érdekében, a korszerű ipari 3D nyomtatók beépített szenzorokkal figyelik a teljes gyártási folyamatot, a hálózatra csatlakoztatott gépek pedig az MES rendszerbe integrálva távolról is felügyelhetők, így ha szükséges, gyorsan és szakszerűen tudnak beavatkozni a szakemberek (5.21. ábra).



5.21. ábra. Teljes 3D nyomtatási folyamat monitoringja az AMFG MES rendszerében [80]

Az ipari additív gyártás során minden egyes technológiai fázist monitoroznak, a kapott adatokból pedig lehetőség van finomhangolni az egyes paramétereket. Külön vizsgálják tehát:

- az alapanyag tárolását, előkészítését,
- a nyomtatási folyamatot,
- az alapanyag halmazállapotát, hőmérsékletét, áramlását a feldolgozás során,
- a berendezés munkaterének fizikai és kémiai paramétereit,
- az elkészült nyomat esztétikai, geometriai és mechanikai minőségét, és a
- szükséges utókezelő eljárásokat.

5.8.1. Alapanyagok felügyelete

A nyomtatáshoz használt alapanyagokat bizonyos esetekben elő kell készíteni a feldolgozáshoz, a végső mechanikai és kémiai jellemzők ugyanis csak így biztosítottak. Hőre lágyuló polimereknél például előfordul, hogy nyomtatás előtt szárítani, előmelegíteni kell az alapanyagot. Az erre a célra kialakított kamrák külön berendezésként, vagy a 3D nyomtatóba integrálva kerülnek kialakításra. Feladatuk az alapanyag előmelegítése, szárítása és szárazon tartása; hőmérsékletet és páratartalmat mérő szenzorokkal biztosítják az előírt értékek betartását (5.22. ábra).

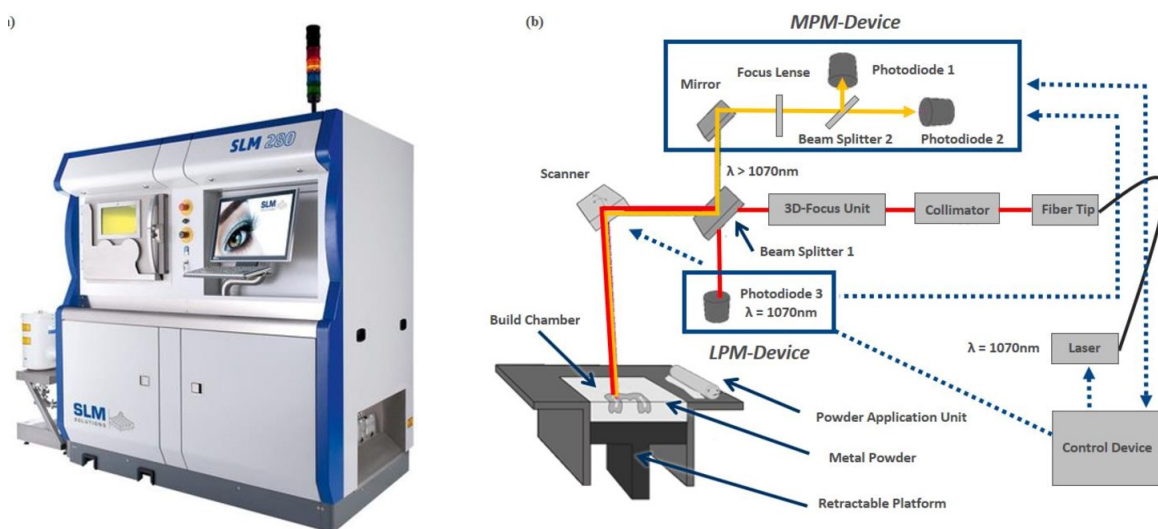


5.22. ábra. Atomizált fémpor vizsgálata szemcseméret és viszkozitás szempontjából/Sandvik [81]

5.8.2. A nyomtatási folyamat felügyelete

A nyomtatási folyamatot leggyakrabban szemrevételezéssel, illetve digitális képfeldolgozással ellenőrizzük, az ipari berendezések rendelkeznek a nyomtató

munkaterét figyelő kamerákkal. Ezen kamerák képeket készítenek az elkészült rétegekről, de képesek akár mozgóképet is rögzíteni a teljes gyártási folyamatról (5.23. ábra).

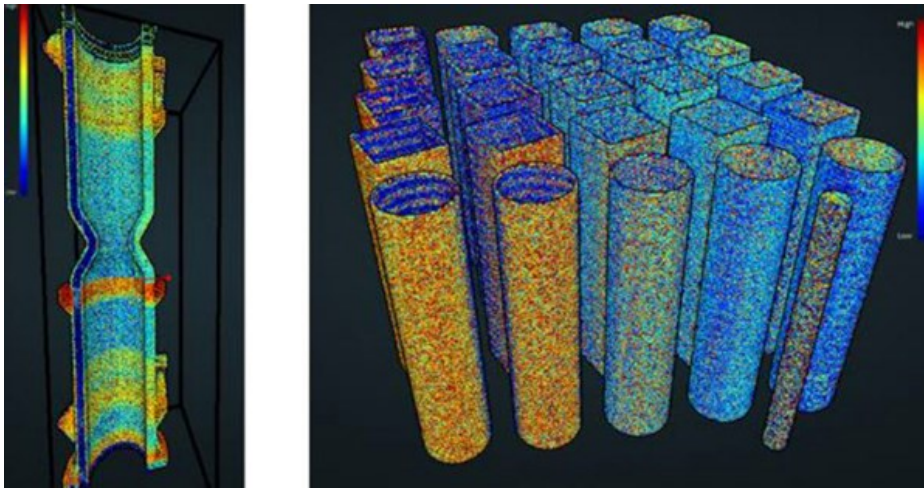


5.23. ábra. Fém porágy és lézer monitoring az SLM rendszerében [82]

Nyomtatás közben a kamerák élőképe bármilyen hálózati eszközről elérhető, így valós idejű megfigyelés biztosított távolról is. A kamerák mellett hőmérséklet- és páratartalom szenzorok is monitorozzák a munkateret, néhány gép esetében pedig a nyomtatófejbe épített lézeres 3D szkennelő tapogatja le a nyomtatott tárgy felületét, és ellenőrzi, hogy a 3D-s tervnek megfelelően készült-e el a nyomat. A korszerű berendezések zárt láncú mechanikai rendszerében pedig enkóderek figyelik, hogy a nyomtatófej a megfelelő szerszámpályát írja-e le.

5.8.3. Alapanyag áramlása, nyomtatási környezet

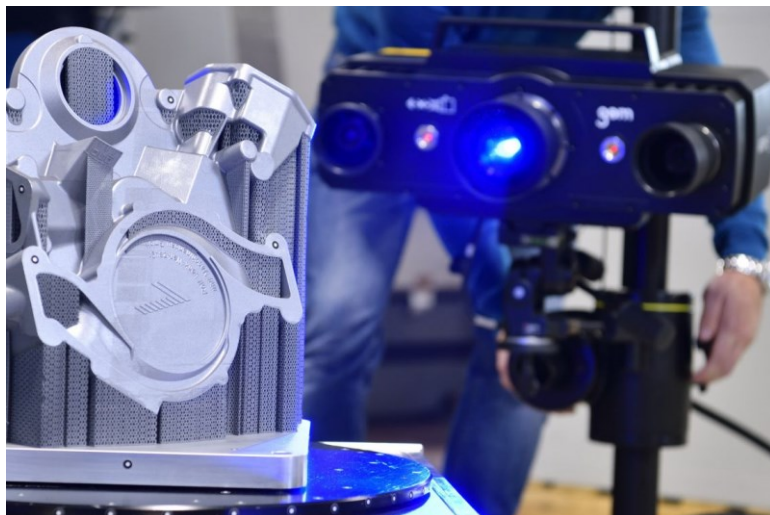
A rétegek nyomtatása közben, különös tekintettel a porágyas technológiákra, valamint a különleges, ultra-polimerek nyomtatása során az alapanyag kristályosodását, az elkészült rétegeken belüli hődisztribúciót, valamint a nyomtatófejben áramló anyag viszkozitását is az optimális tartományban kell tartani, ennek érdekében a nyomtatófejben és a munkatérben elhelyezett szenzorok (enkóderek, hőérzékelők és IR-kamerák) folyamatosan ellenőrzik, hogy mindig a megfelelő körülmények álljanak fenn nyomtatás közben. Így az esetlegesen gyártás közben megváltozott bemeneti paraméterek (megváltozott környezeti hőmérséklet, alapanyagcsere stb.) esetén is korrigálni lehet a gyártási paramétereket, ezáltal a végtermék változatlan minősége biztosítható (5.24. ábra).



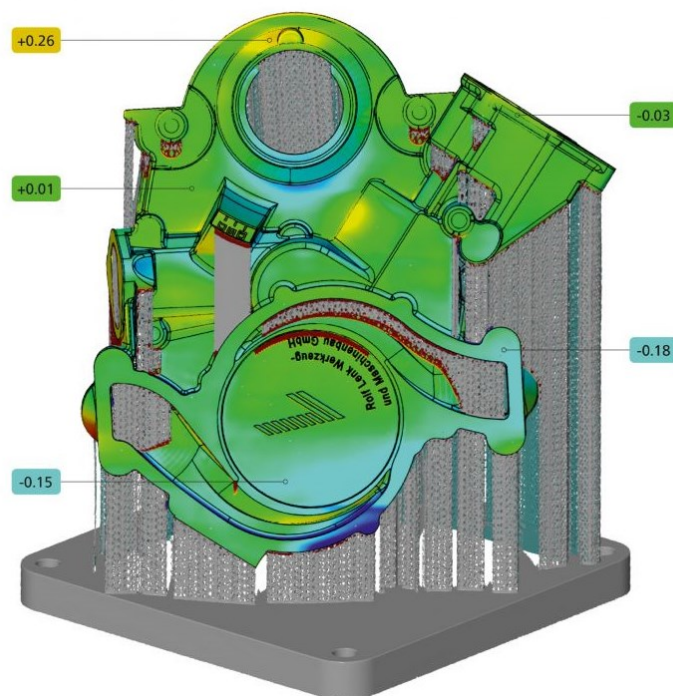
5.24. ábra. Valós idejű folyamatfigyelés a Sigma Labs rendszerében [83]

5.8.4. Elkészült nyomat, utólagos ellenőrzése

Az elkészült nyomat geometriai ellenőrzésének eredménye, a mérési jegyzőkönyv dönti el a kinyomtatott alkatrészről, hogy az előírt méretben és tűrésekkel készült-e el, vagy selejtet gyártott a berendezés. A méretek ellenőrzése során (mely történhet manuális mérőeszközökkel, vagy automatizálva 3D szkennerekkel vagy koordinátamérővel) következtetéseket vonhatunk le a selejtgyártás lehetséges okairól, valamint ha szükséges változtathatunk a megfelelő paramétereken, hogy elkerüljük az újbóli selejt gyártást (5.25. és 5.26. ábra). A kész nyomaton szokták ellenőrizni továbbá a szükséges utólagos megmunkálási ráhagyásokat, további feldolgozáshoz szükséges szerkezeteket.



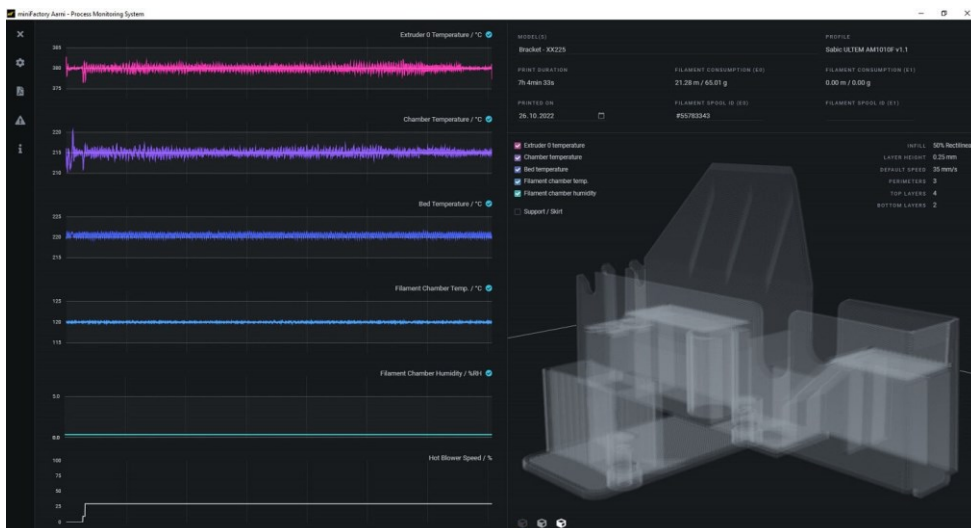
5.25. ábra. 3D nyomtatott fém alkatrész roncsolásmentes vizsgálata optikai 3D szkennerral [84]



5.26. ábra. Színtérképes mérési jegyzőkönyv a 3D szkennelt fém nyomatról [85]

Fentiekből is látszik, hogy az additív gyártási folyamat minden egyes lépése precízen monitorozható, a gyártás közben kapott adatok feldolgozása során el lehet kerülni nagyszámú váratlan üzemzavart, hatékonyabb lehet a megelőző karbantartás, és ezen adatok feldolgozása integrálható a központi gyártásirányító (MES) rendszerbe. A gyártási adatok kapcsolódnak a 3D nyomtatott termékhez, vagyis annak digitális ikerpárjához, így a PLM (Product Lifecycle Management) rendszerekben is feldolgozható.

Teljes monitoring rendszerrel rendelkezik például, a miniFactory Ultra2 ultra-polimer nyomtató és a hozzá kapcsolódó Aarni szoftver, amely érzékeli és rögzíti a 3D nyomtatási munkafolyamat minden paraméterét, az alapanyag szárításától kezdve a nyomtatási hőmérsékleteken keresztül a nyomtatás utáni, feszültségmentesítő hőkezelésig bezárólag (5.27. ábra). A teljes minőségirányítási folyamat részeként az alkatrészekhez csatolható a teljes jegyzőkönyv, így az esetleges hibák okai könnyebben és gyorsabban visszavezethetőek. A szoftver képes távfelügyeletre, rétegről rétegre történő vizsgálatra, automatikus jegyzőkönyvezésre és naplózza a gyártási folyamat minden részét.



5.27. ábra. Folyamatfigyelés a miniFactory Ultra 2 3D nyomtatón az Aarni szoftverrel [86]

Egy egészen high-tech megoldást képvisel az angliai AiBuild rendszere, amely elérhető ipari robotkarra, vagy karteziánus mechanikára szerelt nyomtatófejre telepítve (5.28. ábra). A kamerákból és térbeli érzékelőkből álló fejegység nem csupán folyamatosan monitorozza a teljes folyamatot, de képes korrigálni a nyomtatási hibákat, ütközésvizsgálatot végez, és gépi tanulással segített hibakereséssel nagy léptékben is üzembiztos nyomtatást tesz lehetővé.



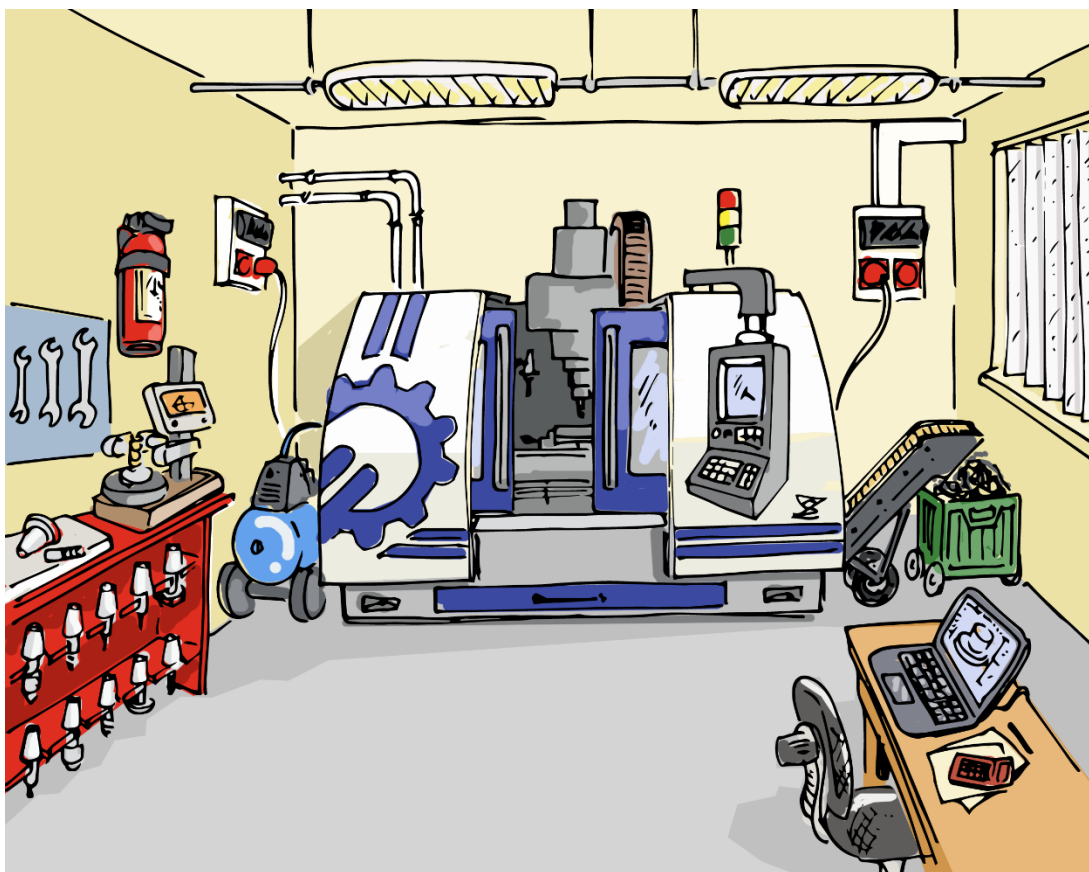
5.28. ábra. Folyamatfigyelés és visszacsatolás gépi tanulással az AiBuild rendszerben [87]

5.9. Az AM műhely kialakítása

Az additív 3D nyomtatók felhasználása sokáig egyedi, gyakran még cégen belül is egymástól elszeparáltan történik, az iroda sarkában egy asztalra helyezve különösebb körültekintés nélkül. Ez még megfelelőnek is volt mondható, amíg a 3D nyomtatást

kísérletezgetés, bemutató modell vagy gyors prototípus szintjén alkalmazták, gyakran az utómunkálatokkal sem sokat törődve. Napjainkban már egyre többen használják késztermék előállítására akár széria gyártásban is a nyomtatást, ennek megfelelően gondoskodni kell a megfelelő munkahely kialakításáról, amelyben a 3D nyomtató és a hozzá tartozó kiegészítő berendezések, (amelyek száma és lehetőségei egyre jobban bővülnek) megfelelő elrendezésbe kerülnek.

Az AM műhely kialakításához jó alapul szolgál a hagyományos CNC forgácsoló műhely tipikus kialakítása, amelynek vázlatát a következő 5.29. ábrán láthatjuk.

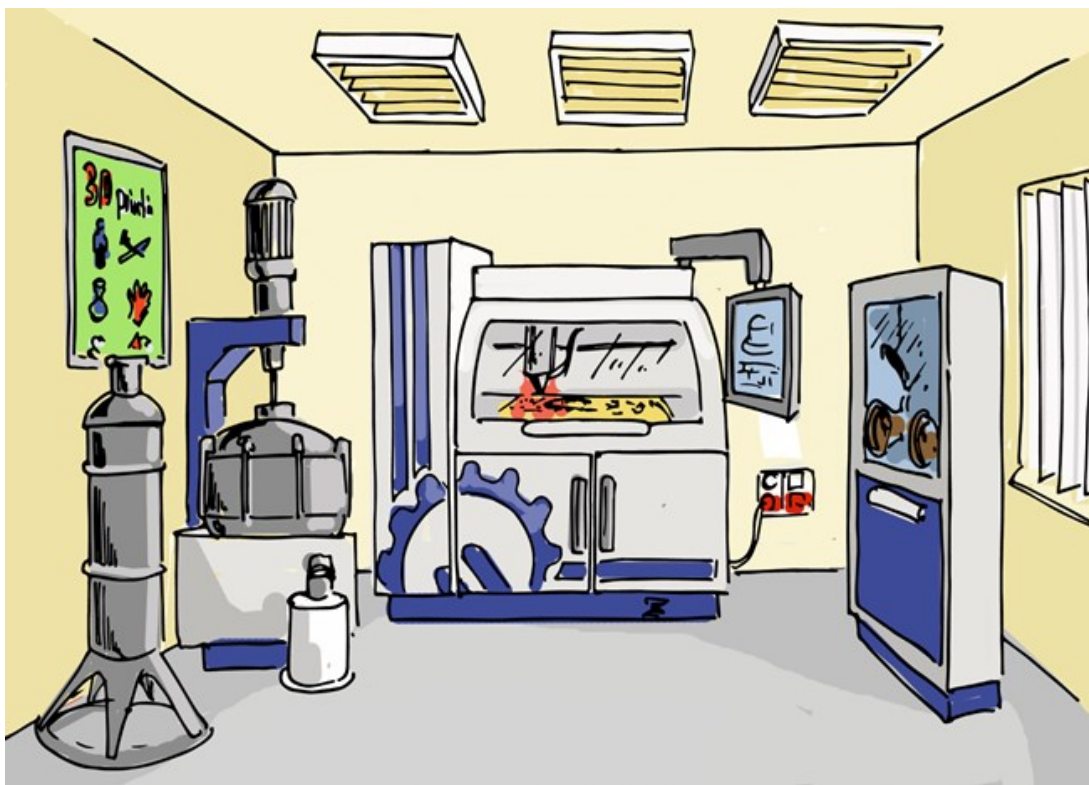


5.29. ábra. Tipikus egy állásos CNC műhely elrendezés. Balra a szerszám előkészítő bemérő állomás, középen a CNC maró megmunkáló központ, jobbra a CAD-CAM számítógépes munkaállomás látható [60]

Az 5.29. ábrán jól látható, hogy minden technológiai folyamatnak jól behatárolható egymást követő rendszere van. A CAD-CAM állomás magába foglalja a modell létrehozására szolgáló CAD (számítógéppel segített tervezés) programot és a CNC (számítógépes számjegy vezérlés) program adaptálásához szükséges CAM (Számítógéppel segített megmunkálás) programot. A forgácsolhatóság alapfeltétele a megfelelő szerszámozás, ennek megfelelően ez külön hangsúlyt kap a bal oldalon látható szerszám előkészítőn. Itt a szerszámokat megfelelő befogókba szerelik, majd bemérik és megállapítják a megfelelő szerszám korrekciókat, amelyeket felhasználnak

a CNC program létrehozásakor. A szerszámoknak, a CNC gép szerszámtárba történő elhelyezését és a munkadarab rögzítését követően, a CNC program lefuttatásával elvégzik a forgácsolást, ezzel a munkadarab elkészül. Egyszerű tisztítás, gyakran a munkatérben sűrített levegővel (kompresszor vagy kiépített levegő rendszer szükséges) vagy emulziós mosással történhet meg. A gyártás közben folyamatosan vagy azt követően szakaszosan, a forgácsot el kell távolítani a rendszerből (pl. a képen a CNC gép jobb oldalán látható ferde forgács kihordó és gyűjtő konténer) és azt megfelelően tárolni is szükséges. Az előbbieken túl a hűtő-kenő folyadékokat is kezelni (keringetni, tisztítani, cserélni) kell.

A következő 5.30. ábrán, az előző CNC forgácsoló munkaállomással jól összehasonlítható módon látható az Additív 3D nyomtató állomás vázlatos ábrája.



5.30. ábra. Egy állásos AM munkahely kialakítása, balra az alapanyag tároló és előkészítő berendezésekkel (itt poros SLA/DMLS esetére), középen a 3D nyomtató (SLS/DMLS), jobbra a tisztító/utókezelő (függ a technológiától) állomás látható [60]

A fenti ábrák segítségével az AM munkahelyet összehasonlítva a CNC forgácsolóval a technológiai sorrendben (előkészítés-gyártás-utókezelés) fedezhetünk fel hasonlóságot. Ugyanakkor lényeges eltérések is láthatók. AM munkaállomásnál a szerszám előkészítés és a szerszámozás helyett az alapanyag (filament, gyanta, por) előkészítés (tárolás, szárítás, kondicionálás, keverés/homogenizálás) játszik jelentős szerepet (bal oldali álló tartály). Gyakran a gyártók saját maguk állítanak elő egyedi alapanyag keveréket jellemzően a porágyas technológiáknál, ehhez külön keverő-

homogenizáló és adalék anyag betöltő berendezéseket alkalmazhatnak (bal oldali keverő gép). Az ábra közepén látható nyomtatóval történő gyártás után a fő szerepet a tisztító/utókezelő állomás kapja, amelynek jellege alapvetően függ a nyomtatási technológia típusától (filament, gyanta, por). Az informatikai elemeket (számítógép) szándékosan nem jelöltük az ábrán, mivel fontos szerepet kapnak a modellező és szeletelő szoftverek, ugyanakkor direkt modell nyomtatásra (akár távnyomtatásra) is van lehetőség, ezért a technológia maga nem függ alapvetően a helyben kialakított számítógépes munkaállomástól, szemben a CNC forgácsolásnál, ahol a szerszám előkészítés ezt közvetlen igényli.

Az 5.29 és az 5.30. ábrákon a fő elemek jobb megértése érdekében egy gépes munkaállomásokat mutattunk be. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a gyártási kapacitás növelése érdekében jellemzően több gép együttes használatára kerül sor mindkét technológia esetén. Az AM technológiánál már megjelentek a „nyomtató farmok” ahol sok gép összekapcsolásával eltérő de akár azonos munkadarabok nagy szériás előállítása is megvalósítható.

6. Előírások, gazdasági szempontok és jövőkép

A digitalizáció évtizedek óta zajlik nem csak a tervezőasztalokon, de a gyártósorokon is: a korszerű, mérnöki informatikai rendszerek régóta folyamatos fejlődésben tartják a különböző gyártási eljárásokat. A 3D nyomtatás korábban csak prototípusok, koncepciómodellek elkészítésével támogatta a hagyományos sorozatgyártási technológiákat, de egyéb digitális gyártástechnológiákat (ipari automatizáció, CNC technológia, robotika) már régóta nagy hatékonysággal alkalmaznak a gyártósorokon (6.1. ábra).



6.1. ábra. A HP barcelonai additív gyára Siemens rendszerintegrációval [88]

Az additív gyártástechnológiák ismétlődőképessége, a felhasználható alapanyagok kiváló műszaki tulajdonságai, valamint a 3D nyomtatási folyamatok ellenőrizhetősége lehetővé teszik, hogy a folyamatmérnökök az ipari termelésben is alkalmazzák az additív gyártást, beleillesztve ezt a meglévő digitális gyártásirányító és tervező folyamataikba. Az eljárások és anyagok validációjának köszönhetően, a technológia részaránya az ipari termelésben exponenciálisan növekszik. Az egyedi, kis szériás gyártásban már korábban is kitüntetett szerepe volt a 3D nyomtatóknak, a változó tárgykultúránk azonban már 3D nyomtatott végtermékek jövőképét vetíti elénk.

6.1. Digitális átalakulás: a jövő gyárának (FoF) perspektívái az AM tükrében

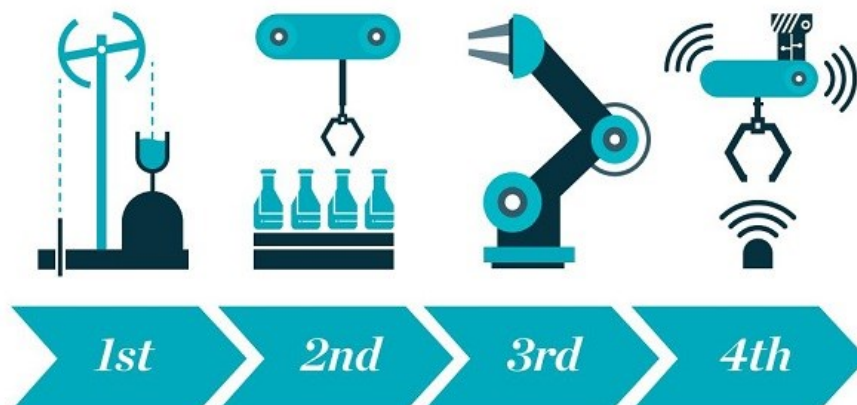
Az ipari forradalmak során mindig új elvek alapján rendeződtek és rendszereződtek a gyártási folyamatok, ezáltal megváltoztatva az emberek munkafeltételeit és életvitelét. A 18. században, az első ipari forradalom során a gyártásgépesítésnek köszönhetően a gőzgéppel működtetett szövőszékek 8-szoros termelékenység-növekedést eredményeztek, míg a 19. század végén a második ipari forradalom során az elektromosság és a gyártósorok elterjedésével Henry Ford vezényletével megalapozták a modern autógyártást, az ipari sorozatgyártást. A harmadik ipari forradalom az automatizációt, a numerikusan programozott vezérlők és gépek, a robotok korát hozta el a gyártási folyamatokba (6.2. ábra).



6.2. ábra. A jövő gyárában az adatelemzés, a digitális gyártástechnológiák és a konnektivitás játszik kiemelkedő szerepet [89]

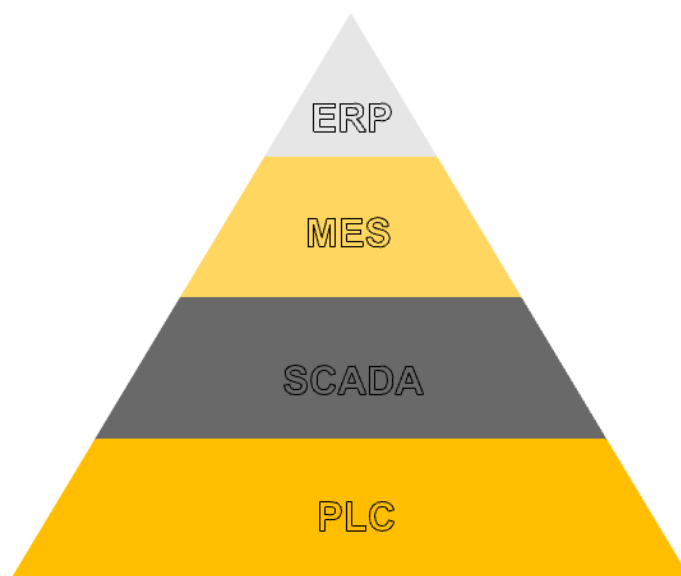
Jelenleg a negyedik ipari forradalom zajlik, a korszerű iparágak, mint az autóipar, repülőipar, és ezek kiszolgáló ágai (műanyagipar, öntészet, fémmegmunkálás, elektronikai ipar, összeszerelés stb.) éppen az elmúlt évtizedben kezdték meg a paradigmaváltást, amely napjainkban is zajlik (6.3. ábra). A jövő gyárában (Factory of the Future, FoF) a folyamatok már az Ipar4.0 elvei alapján szerveződnek, az automatizált gyártósorok és cellák hálózatban kommunikálnak egymással és az emberekkel, minden egységnek megvan az ún. digitális ikerpárja (Digital Twin), és minden egyes folyamat akár távolról is monitorozható és vezérelhető, közvetlen visszacsatolást adva ezzel a folyamatoptimalizációhoz. A gyártott termék teljes életciklusa teljes egészében nyomon követhető az IoT-n kommunikáló rendszereknek, valamint az automatikus minőségellenőrzésnek és a mesterséges intelligenciával támogatott döntés-előkészítő rendszereknek köszönhetően. Az esetleges selejtek

gyártásának esélye minimálisra csökkent, a gyártási folyamatok sokkal fenntarthatóbbak lettek.



6.3. ábra. Ipari forradalmak mérföldkövei a Sheffield-i egyetem grafikáján [90]

Az Ipar4.0 környezetbe már remekül illeszkedik az additív gyártástechnológia is, hiszen a korszerű, ipari 3D nyomtatók alkalmasak IoT kommunikációra, rendelkeznek zárt ciklusú vezérléssel, távfelügyeleti rendszerrel, felhő alapú szoftveres megoldásaik pedig könnyedén integrálhatóak a MES szoftveres környezetekbe. A 3D nyomtatási technológiához kapcsolódó szoftverek (online alkatrész-adatbázis, előkészítő- és szimulációs eszközök, gyártás-monitorozás, illetve minőség-ellenőrzés) már szerves részét képezik a teljes gyártástervező és irányító rendszereknek, az ún, ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System), SCADA (Supervisory Control And Data Aquisition) valamint PLC (Programmable Logic Controller) rendszereknek. Fentiek hierarchiája az alábbi 6.4. ábrán látható:



6.4. ábra. Gyártásirányító- és tervező rendszerek hierarchiája

A jövő gyárában tehát a 3D nyomtatók is bekapcsolódnak abba a kommunikációs hálózatba, amelynek tagjai robotok, kobotok (kollaboratív robotok), gyártócellák és gyártósorok, célgépek, szenzorok, alkatrészek 3D tervrajzai, valamint a minőség-ellenőrzési folyamatok. Nem elszigetelt gépként jelennek meg a tervezőasztalokon, mint korábban, amikor még csak a koncepciótervezés szintjén vettek részt az ipari termékek gyártásláncában, helyzetük egyre inkább áttolódik a gyártósorok szintjére, a termelő egységekben, valamint egyre több szerszámüzemben és karbantartó műhelyben is találkozunk 3D nyomtatókkal.

6.2. Előírások és minősítések a nemzetközi gyakorlatban

Az elmúlt évtizedben rohamos léptekkel fejlődtek a különböző additív gyártástechnológiák. A sorozatgyártásban már évtizedek óta validált alapanyagokkal és az ipari termelésben elvárt ismétlési pontossággal és megbízhatósággal üzemelnek a korszerű, ipari 3D nyomtató rendszerek. Ahhoz, hogy a 3D nyomtatás, mint lehetséges ipari gyártási eljárás igazolja létjogosultságát, a megjelent hozzáadott érték és a konnektivitás mellett további követelményeket is teljesíteni kellett: szükség volt a szabványosításra, valamint a teljes additív gyártási folyamat nyomon követhetőségre. Különösen igaz ez a hadiiparban, járműiparban, egészségügyben, illetve fogyasztói cikkek piacán.

Az alapanyagok műszaki dokumentációja különösen fontos és felhasználási területenként eltérő lehet: például a repülőiparban a szerkezeti alkatrészekre az EASA Part 21G tanúsítvány a kötelező, a további alkatrészekhez elegendő az EN9100 szabvány szerinti tanúsítás.

A nemzetközi gyakorlatban a minőségügyi előírások, valamint minősítések a 3D nyomtatással kapcsolatosan három csoportra oszthatóak; az alapanyagok, az additív gyártástechnológia, valamint a kész termékkel szemben támasztott követelményekre.

6.2.1. Alapanyagok

A 3D nyomtatás különböző eljárásaihoz használt alapanyagokkal kapcsolatos előírások, valamint minősítések szakterületenként, földrészenként, de akár országonként is eltérőek lehetnek. Az egyedi felhasználói igényeknek az alapanyagoknak még a feldolgozás előtt meg kell felelniük. Az alapanyagokhoz kapcsolódó (műanyagok, gyanták, kompozitok és fémek esetében egyaránt) minőségügyi tanúsítványt, az ún. műbizonylatot, valamint az ezekhez szükséges vizsgálatokat a gyártó végzi el, és mellékeli a nyersanyag mellé (6.5. ábra).

MATERIAL DATASHEET

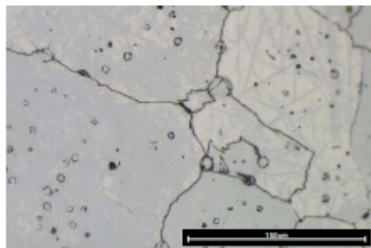


A2 Tool Steel

Other Designations: UNS T30102, DIN 1.2363, X100CrMoV5, SKD12, BA2

A2 tool steel is a highly versatile air-hardening tool steel often regarded as a "universal" cold work steel. It offers a combination of good wear resistance (between O1 and D2) and toughness. Considered relatively easy to machine in the annealed condition, it has a high compression strength and good dimensional stability during hardening and tempering. It's used for a wide variety of cold-work tools, from forming and cutting equipment to high wear parts.

Composition	Amount
Chromium	4.75-5.5%
Molybdenum	0.9-1.4%
Carbon	0.95-1.05%
Manganese	0.4-1%
Phosphorus	0.3% max
Vanadium	0.15-0.5%
Silicon	0.1-0.5%
Iron	bal



Typical Mechanical Properties	Standard	Markforged As-Sintered	Markforged Heat-Treated ¹	Wrought Heat Treated
0.2% Compressive Yield Strength	ASTM E9	900 MPa	1170 MPa	—
Elastic Modulus	ASTM E9	180 GPa	160 GPa	190 GPa
Hardness	ASTM E18	52 HRC	60 HRC	63 HRC
Relative Density	—	≥ 94.5%	≥ 94.5%	100%

Heat Treatment

A2 tool steel can be heat-treated to increase hardness and durability. Markforged recommends heat-treating A2 tool steel to optimize material properties, though it can be used as-sintered.

1. Heat A2 Tool Steel part in a standard (non vacuum) furnace to 970°C (1780°F). Hold part at temperature for 30-45 minutes.
2. Air quench part to below 65°C (150°F).
3. Double temper A2 Tool Steel part in a standard furnace. For each temper, heat part to 150-550°C (302-1022°F) and temper for 2 hours, or 1 hour per inch of thickness. If double tempering, let part cool to room temperature between tempers.

1. Markforged heat-treated A2 tool steel was heated to 970°C (1780°F) and single tempered at 200°C (392°F) for 30 minutes.
2. Tempering temperature has a significant effect on final material properties. For higher hardness, temper at low temperatures. For higher toughness, temper at higher temperatures.

These data represent typical values for Markforged A2 Tool Steel as-sintered. Markforged samples were printed as fully dense parts with 100% infill. Hardness data were tested in house, and all other data were tested and confirmed by outside sources. These representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied.

exbuild.com

REV 1.1 - 06/01/2019

480 Pleasant St, Watertown, MA 02472

6.5. ábra. Markforged szerszámacél alapanyag műszaki adatlapja [91]

Az ellenőrzések során vizsgálják az anyag összetételét, tisztaságát, fizikai és kémiai tulajdonságait, mint a szilárdsági jellemzői, hőállósága, vezető- illetve szigetelőképesége, vegyszerállósága. Az ezekre vonatkozó adatokat az alapanyagok műszaki adatlapjában, az ún. MDS-ben (Material Data Sheet) szerepeltetik. A biztonsági előírásokat pedig az alapanyaghoz mellékelt biztonsági adatlapon, az ún. SDS-en (Safety Data Sheet) találjuk. Az alapanyagok megfelelőségét anyagvizsgáló laboratóriumban, nyomtatott mintatesteken és próbadarabokon, valamint különböző termékmintákon végzik, a már létező szabványok által előírt módokon. Európában a vonatkozó ISO, az Amerikai Egyesült Államokban az ASTM az irányadó szabvány.

6.2.2. Additív gyártási folyamat minősítése

A 3D nyomtatókra, mint gépekre a szokásos követelmények érvényesek: a szabvány szerinti előírásoknak meg kell felelnie. Az Európai Unióban például kötelező a CE

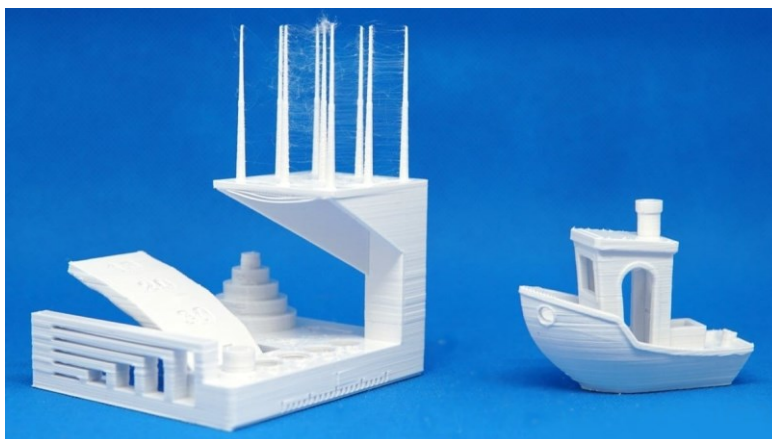
minősítés, és a biztonságos üzemeltetést, például az érintésvédelmet igazoló tanúsítvánnyal. A különböző additív gyártástechnológiákra vonatkozó előírások és minősítések attól is függenek, milyen igényeket támasztanak velük szemben felhasználói oldalról. Egészen más előírások vonatkoznak például egészségügyi készülékek, esetleg protézisek 3D nyomtatására, mint a gépészeti alkatrészekre. Azért, hogy a különböző 3D nyomtatási technológiákat egymáshoz képest, objektív szempontok alapján is össze lehessen hasonlítani, különböző vizsgálati módszereket dolgoztak ki (6.6. ábra).



6.6. ábra. Additív gyártási folyamatok minősítése a SigmaLabs rendszerében [92]

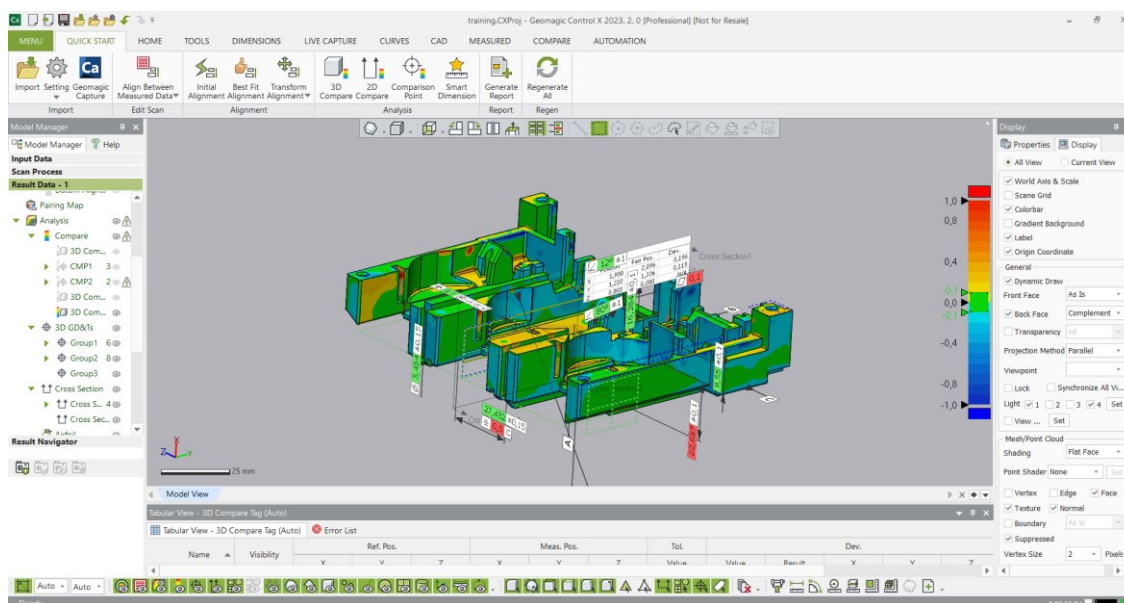
A 3D nyomtatás ipari alkalmazhatóságának egyik kritikus feltétele a szabványosíthatóság, ezen keretrendszerek nélkül ugyanis nem tudna teljes értékű tagja lenni az ipari gyártástechnológiáknak. Az amerikai szabványügyi szervezet, az NIST (National Institute of Standards and Technology) kidolgozott egy módszert, amely az érvényes ISO és ASTM szabványok mellett igyekszik magára a 3D nyomtatásra fókuszálni és osztályozni a felületi minőség, ismétlődőképesség (pontosság), gyártási sebesség és alapanyag jellemzők szerint.

Létrehoztak egy próbatestet, egy teszt modellt, amely benchmark-ként a legtöbbet árulja el az adott 3D nyomtatási technológia, sőt az adott 3D nyomtató fontos tulajdonságairól. A hobbi 3D nyomtatók közösségeiben már évek óta léteznek ilyen, a különböző berendezéseket összehasonlító teszt modellek. A legelső között volt a mára legismertebbé vált 'Benchy', amely egy kis hajó és a világ legtöbb 3D nyomtatóján elkészült modell (6.7. ábra).

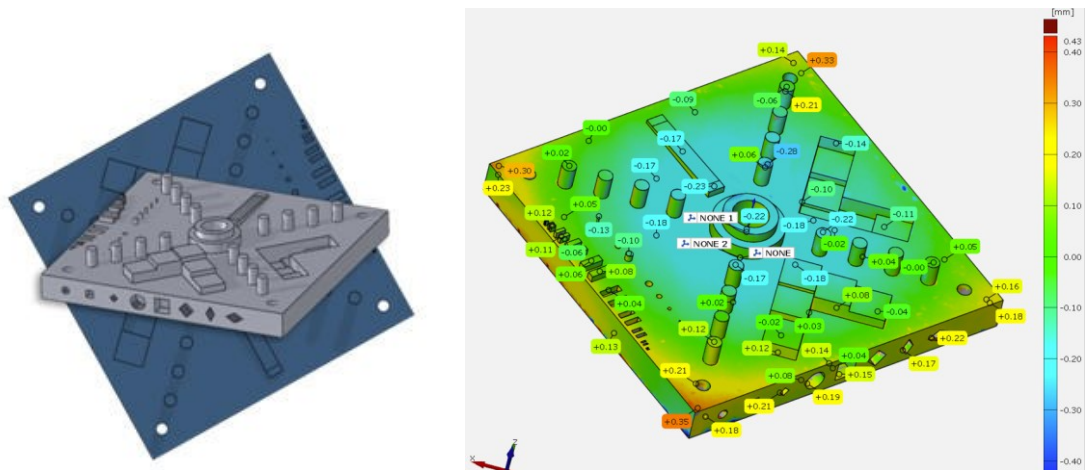


6.7. ábra. FDM hobbi 3D nyomtatók próbatestei [93]

Az NIST próbatest összetett, jól mérhető geometriai elemeket tartalmaz, amelyek névleges méretei a nyomtatáshoz használt modellen, de a modellhez készülő mérési jegyzőkönyvekben is szerepelnek. A kinyomtatott modellen precíz méréseket végeznek (sok esetben 3D szkennerekkel), majd a mért értékeket összehasonlítják a tervezett állapottal. Az ilyen méretbeli eltérések utalnak a berendezés visszaállási pontosságára, az alapanyag esetleg zsugorodására, deformációkra, amelyek a gyártási folyamatból keletkező feszültségek miatt jelentkeznek, illetve segítségükkel kalibrálni is pontosabban lehet a 3D nyomtatókat (6.8. és 6.9. ábra).



6.8. ábra. 3D nyomtatott alkatrész minőségellenőrzése 3D szkenneléssel [forrás: képkimentés, Szabó Péter]



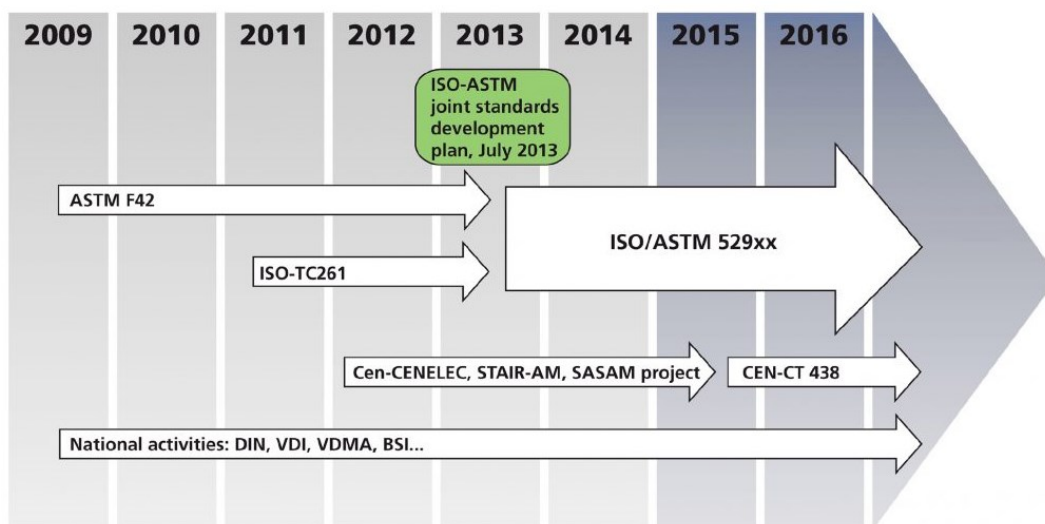
All values in millimeters unless noted otherwise									
	Nominal Value	Measured Value						Nominal Value	Measured Value
Top Surface								Pins and Holes	
Flatness	0,000			Negative Staircase				X Pins	
Center Hole				Z Positions	-7,000			Position	-50.000, 0.000
Roundness	0,000				-6,000				-40.000, 0.000
Straightness	0,000				-5,000				-30.000, 0.000
Perpendicularity with Top Surface	0,000				-4,000				-20.000, 0.000
Central Cylinders					-3,000				20.000, 0.000
Roundness of Inner Cylinder	0,000								30.000, 0.000
Roundness of Outer Cylinder	0,000				Straightness of x Vertical Surface	0,000			40.000, 0.000
Concentricity of Inner Cylinder to Central Hole	0,000				Straightness of y Vertical Surface	0,000			50.000, 0.000
Concentricity of Outer Cylinder to Central Hole	0,000				Perpendicularity of y Vertical Surface to x Vertical Surface	0,000			Average Diameter
Outer Edges					Parallelism of x surfaces	0,000			4,000
Straightness of primary surface (H)	0,000				Parallelism of y surfaces	0,000			X Holes
Parallelism of opposite surface to H	0,000				Positive Staircase				Position
Perpendicularity of adjacent surface to H	0,000				Z Positions	3,000			-60.000, 0.000
Distance from side H to opposite side	100,000					4,000			60.000, 0.000
Lateral Features						5,000			Average Diameter
						6,000			4,000
						7,000			Y Pins
									Position
						Straightness of x Vertical Surface	0,000		0.000, -50.000
									0.000, -40.000
									0.000, -30.000
									0.000, -20.000
									0.000, 20.000
									0.000, 30.000
									0.000, 40.000
									0.000, 50.000
									Average Diameter
									4,000

6.9. ábra. Részlet az NIST próbatest vizsgálati jegyzőkönyvéből [94]

A fenti paramétereknek megfelelően osztályozni tudják a 3D nyomtatási eljárásokat nem csupán a berendezés műszaki specifikációi a sebesség vagy anyagfelhasználás, de a gyártási pontosság alapján is szabványban rögzített, jól mérhető módon, ezzel alaposan vizsgálhatóak a különböző additív gyártástechnológiák.

6.2.3. Késztermékkel szembeni előírások

Amikor egy felhasználásra szánt végtermék additív gyártástechnológiával készül, ugyanazok a szabványügyi előírások vonatkoznak rá, mint az eredeti, hagyományos technológiával készült változatára. Az adott felhasználási területnek megfelelő ISO illetve ASTM szabványok egyértelműen meghatározzák az adott termékkel szemben támasztott követelményeket, így ha a 3D nyomtatott végtermék, az additív gyártástechnológia és a felhasznált alapanyag is teljesíti ezeket, a 3D nyomtatás teljes értékű gyártóeljárásként használható (6.10. ábra).



6.10. ábra. Fém additív technológiák globális szabványosításának folyamata [95]

6.3. Munkavédelmi szempontok

A biztonságos üzemeltetés, az üzemeltető biztonsága és egészsége alapvető feltétel az ipari termelésben, így az additív gyártástechnológiákra is különböző munkavédelmi előírások vonatkoznak. Érdekes külön tárgyalni az alapanyagokkal kapcsolatos, a berendezések üzemeltetésével kapcsolatos, valamint a 3D nyomtatott munkadarabbal kapcsolatos munkavédelmi előírásokat.

6.3.1. Alapanyagok

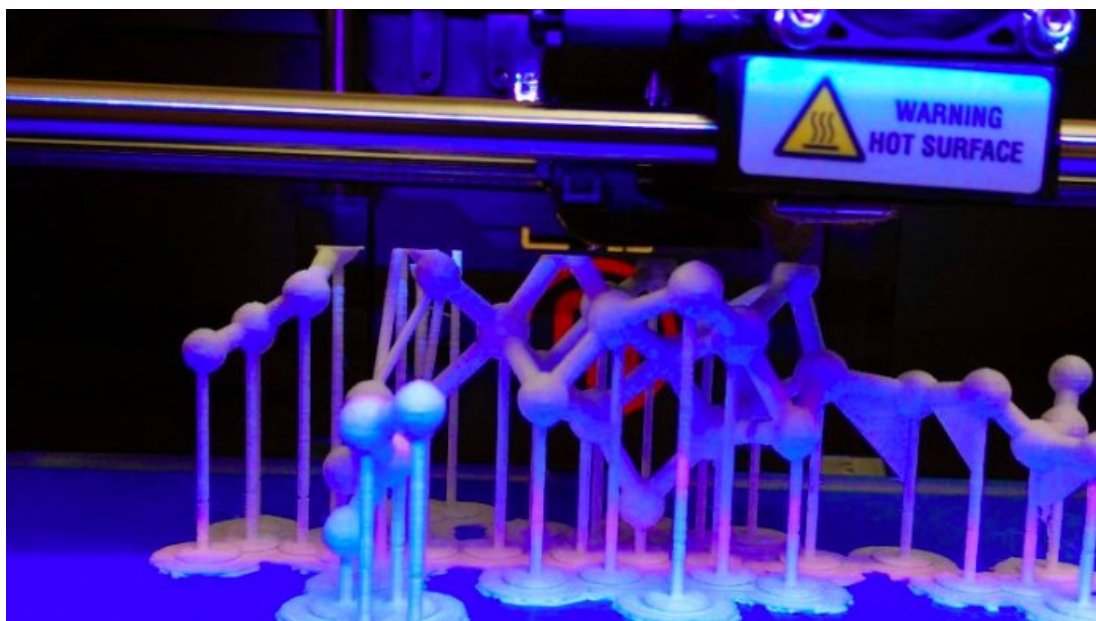
A 3D nyomtatáshoz használt alapanyagok egészségkárosító hatású, mérgező vegyületeket is tartalmazhatnak, így az azokkal való érintkezés, azok tárolása és kezelése mindig az alapanyaghoz tartozó biztonsági adatlap leírásának megfelelően kell, hogy történjen. Az alapanyagok megfelelő tárolása a munkavédelmi szempontokon túl technológiai előírás is, nem megfelelő tárolás esetén bizonyos higroszkópos anyagok nedvességet vehetnek fel a levegőből, vagy reakcióba léphetnek a levegő oxigéntartalmával. Speciális esetekben a tárolásra külön, erre a célra kialakított helyiséget kell dedikálni, fémporok esetében például antisztatikus gumipadló és teljes testes védőruha, valamint maszk viselése kötelező a fémporral való munkához. Az apró szemcséjű fém, illetve polimerpor nem csak tűz- és robbanásveszélyes, de károsíthatja a szemeket, tüdőt és a légzőszerveket is. A fotopolimerizációhoz használt műgyanták, valamint a mosásukhoz használt oldószerek, továbbá a műanyagszálas technológiában az oldható támaszok eltávolítására használt vegyszerek gumi védőkesztyű, védőszemüveg, valamint maszk használatát is szükségessé teszik (6.11. ábra).



6.11. ábra. Védőfelszerelések fémporos 3D nyomtatási technológiához [96]

6.3.2. 3D nyomtató üzemeltetése

Az ipari 3D nyomtatók komplex szerkezetek, üzemeltetésük szakképzett munkaerőt igényel. A gépet csak olyan személy üzemeltetheti, aki megkapta a szükséges munkavédelmi képzést, valamint a berendezés üzemeltetéséhez szükséges ismeretekkel is rendelkezik. Egy egyszerű, műanyagszálas hobbinyomtató is tud lakástűzet okozni egy nem megfelelően bekötött vezeték miatt, jóllehet ezekre az otthoni gépekre nem vonatkoznak az ipari munkavédelmi előírások (6.12. ábra).



6.12. ábra. Forró nyomtatófejre figyelmeztető jelzés [97]

Minden esetben a gépet a telepítés után a telephely munkavédelmi képviselője veszi át, és ellenőrzi, hogy a megfelelő előírások betartásra kerültek-e. Ezután a berendezést a

kiképzett személyzet üzemelteti, az időszakos karbantartási munkálatok egy részét az üzemeltető, egy részét általában a gyártó végzi. A 3D nyomtató munkahelyet a munka- és tűzvédelmi szabályoknak, ergonómiai követelményeknek és tűzbiztonsági szabályoknak megfelelően kell kialakítani, mely szabályok eljárásonként eltérőek. A fémporos technológiák esetében az egészségügyi kockázat mellett a tűz- és robbanásveszély, a polimertechnológiák esetében az esetlegesen felszabaduló karcinogén gázok jelentenek kockázatot. Korszerű légtechnikával felszerelt ipari környezetben a szellőzés és légkezelés könnyen megoldható, az otthoni/irodai felhasználásra szánt nyomtatókkal pedig ajánlatos kerülni a szénhidrogén alapú műanyagokat, vagy gondoskodni a szellőzésről és légszűrésről (6.13. ábra).



6.13. ábra. Markforged Metal-X fémnyomtató rendszer munkahelyi kialakítása [98]



6.15. ábra. Tömegesen személyre szabható cipőtálpak gyártására optimalizált műgyantás nyomtatófarm [99]

Az additív gyártástechnológia során a darabköltség meghatározó része a felhasznált alapanyagok és kellékek mennyiségéből, valamint a gyártási időből (gépóra) tevődik össze. Ennek megfelelően, additív gyártás során nincsen szignifikáns különbség a gyártási költségekben akkor, ha százezer darab teljesen egyforma terméket gyártunk le, vagy ha százezer hasonló geometriájú, de egymástól különböző alkatrészt nyomtatunk. Éppen ezért minden olyan esetben a 3D nyomtatás a leggazdaságosabb technológia, ahol egyedi, vagy kis szériában szeretnénk legyártani terméket (6.16. ábra).



6.16. ábra. Formlabs Form Auto automatizált sorozatgyártó 3D nyomtató farm [100]

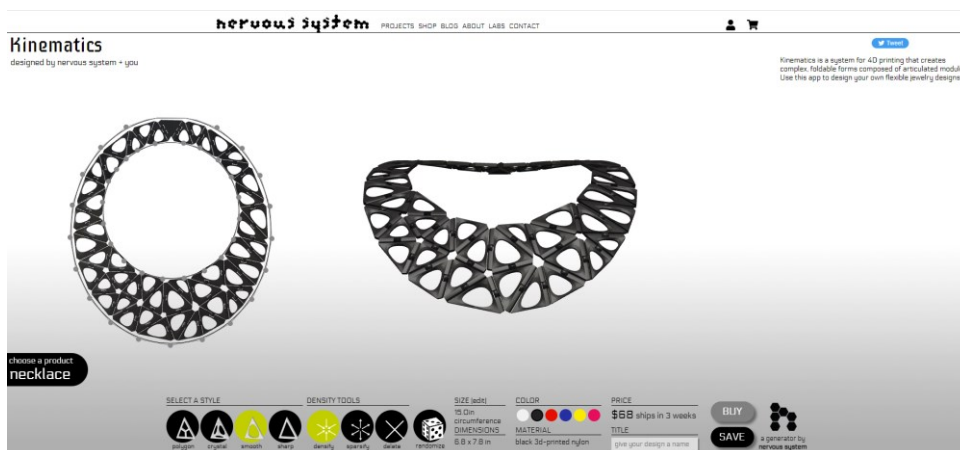
Nem véletlen, hogy a 3D nyomtatást legkorábban alkalmazó, innovatív iparágak azok voltak, ahol az egyedi vagy kis szériás gyártás rendkívül magas költségei voltak a legkritikusabbak. Az egészségügyi ipar, a repülőipar, a hadászat majd a járműipar voltak azok, akik korai adoptálóként rendszeresítették az additív gyártástechnológiákat saját folyamataikban. De ahogyan a többi diszruptív technológiával is történt, a 3D nyomtatás is megjelent a fogyasztói cikkek piacán: ma már sport- és divatruházatot, ékszereket, bútorokat, belsőépítészeti elemeket, de akár lakható épületeket is készítenek 3D nyomtatással. Közös az előzőekben, hogy a termék minden esetben additív gyártásra lett tervezve; a DfAM szellemében a nagyobb formai szabadságot kihasználva hatékonyabb megoldások születhetnek.

A sportcikk, azon belül is a sportcipők sorozatban történő 3D nyomtatására kiváló példa az amerikai Carbon 3D cég és az Adidas kollaborációja: a sportcipő gyártó 2 milliós darabszámban gyártja fotopolimeres technológiával a generatív geometriájú középtalpakot, amely termékek már elérhetőek a kereskedelmi forgalomban, és fogyasztói áru versenyképes a hagyományos gyártástechnológiákra épülő, tömeggyártott változatokéval (6.17. ábra).



6.17. ábra. Adidas Futurecraft sportcipők sorozatgyártásában Carbon 3D nyomtatással [101]

Remek példa a 3D nyomtatott ékszerek piacára, valamint a generatív designra a bostoni Nervous Systems stúdiója, akik egyedi, a felhasználó által generált geometriájú, 3D nyomtatott vagy lézervágott ékszereket, dísz tárgyakat és lámpákat kínálnak a sorozatgyártott designtárgyakkal hasonló árfekvésben. A koncepciójuk lényege, hogy az online felületen, a leendő felhasználó által személyre szabva, az ő egyedi igényeinek megfelelően születik meg a végső terv, amely a generált 3D modellből közvetlenül gyártható, és néhány napon belül a felhasználóhoz küldhető. A munkafolyamatuk tökéletesen egyesíti a matematikai algoritmusokkal generált tervezést, valamint a digitális gyártás nyújtotta előnyöket (6.18. ábra).



6.18. ábra. A felhasználó által online felületen generált, egyedi design – 3D nyomtatással [102]

A bostoni stúdió az amerikai Formlabs 3D nyomtató fejlesztőjével, valamint a New Balance sportcipőgyártóval közösen fejlesztette ki a felhasználóra generált (3D szkennelt lábforma és nyomástérkép alapján) egyedi cipőtálpakat, amelyek a Formlabs Auto sorozatgyártó rendszerével versenyképes költségeken gyárthatóak (6.19. ábra).



6.19. ábra. Data Driven Midsoles -generatív perszonalizáció additív gyártástechnológiával [103]

A fenti gyakorlati példák is jól érzékeltetik, hogy azoknál a termékeknél, ahol a személyre szabhatóság magas hozzáadott értéket képvisel – mint például a gyógyászati segédeszközök, ruházati- és divatcikkek – a különböző 3D nyomtatási technológiák automatizálása révén (3D nyomtatófarmok) a tradicionális gyártástechnológiáknál flexibilisebben lehet a piac számára elérhetővé tenni a terméket.

MELLÉKLETEK (esettanulmányok)

A következő oldalakon szereplő mellékleteket abból a célból mutatjuk be, hogy valós, az ipari gyakorlatokból vett példákon keresztül rávilágítsunk az additív 3D nyomtatási technológiák relevanciájára és egyre szélesebb körű terjedésére a műszaki területeken is.

A bemutatott példák, jól jellemzik azt az ötletességet és az új technológiák felhasználásán alapuló innovációs hajlandóságot, amely számos ipari vállalatot jellemez napjainkban. A példák többsége hazai, ez is egy jó ösztönzést adhat az olvasóknak hasonló, hazánkban is bevezethető a 3D nyomtatást alkalmazó műszaki fejlesztés megvalósításához. Ezek a fejlesztések érinthetik egy új termék, prototípus előállítását, a gyártást, karbantartás segítő eszköz fejlesztését, vagy a korábbi műszaki megoldásokat és a hagyományos anyagokat felváltó már az additív technológiát alkalmazó műszaki folyamatokat.

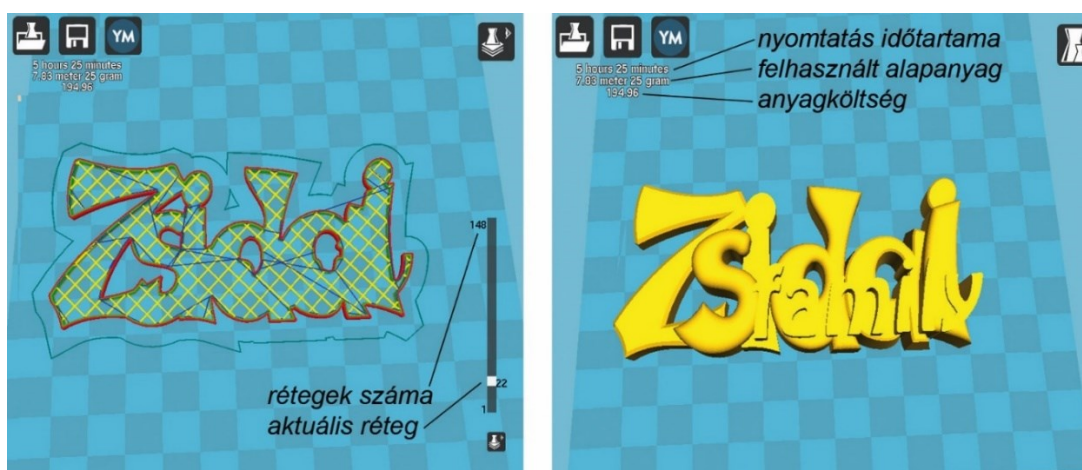
1. Melléklet:

Egyszerű FDM nyomtatási példa (forrás: Zsidai László, MATE-MI, Gödöllő, [104])

A következőkben egy egyszerű példán keresztül mutatjuk be a 3D nyomtatás folyamatát. A példa napjaink egyik legelterjedtebb, általános célú FDM módszerén keresztül enged betekintést a nyomtatás főbb fázisaiba. (forrás: [104])

A 3D modell és előkészítése

A nyomtatandó modellnek értelemszerűen 3D digitális térbeli geometriával kell rendelkeznie, amit akár mi is előállíthatunk a parametrikus vagy szabadfelület modellezési CAD módszerek valamelyikével, de akár közvetlen 3D szkenneléssel is valós objektumról. Napjainkra egyre nagyobb jelentőséget kapnak az internetről szabadon letölthető vagy vásárolható kész modellek is, amelyek akár komolyabb CAD ismeret nélkül is közvetlen nyomtathatók. A 3D nyomtatáshoz elengedhetetlen, hogy a modellünket STL formátumba konvertáljuk, ez biztosítja a modell szeletekre bontását. Az STL fájl formátum a modell háromszögekkel burkolt geometriáját írja le vektorok segítségével színek és textúrák nélkül. A szeletekből a CNC (Computer Numerical Control) technikából jól ismert g-kódok generálhatók és ezzel vezérelhető a nyomtatónk, amely így igazából egy CNC gyártó gépnek is tekinthető (vannak példák arra is, hogy kisebb forgácsoló fejek 3D nyomtatóra szerelésével, ún. „combo” üzemmódban 3D printerünk nyomtatóként és forgácsoló gépként is használható). Az 1. ábrán a nyomtatást előkészítő szeletelő „slicer” program részleteken láthatjuk a modellünket és rétegenkénti nyomtatásának a szimulációját.



1.Melléklet-1. ábra. A térbeli digitális modell nyomtatás szimulációja a szeletelő szoftverrel, alkalmazott szoftver: Cura from Wanhao [forrás: képernyőmentés, Zsidai László]

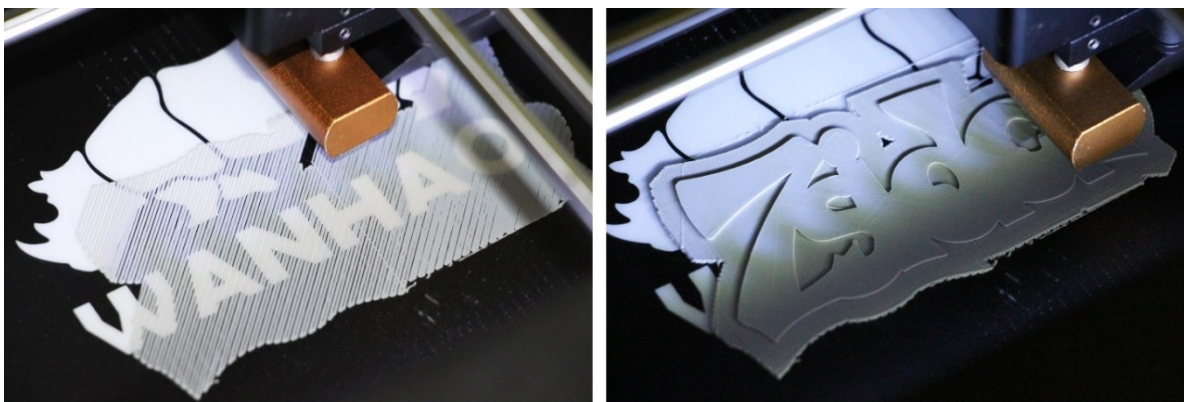
A szeletelés elvégzése és a g-kódok generálása mellett a program megadja a várható nyomtatási időt, anyagszükségletet és az anyagárat is. A rétegek és a modell

szerkezetének áttekinthetősége lehetővé teszi a hibák kiszűrését és a szükséges módosítások elvégzését, még a hosszadalmas nyomtatás előtt. Itt történnek a nyomtatási beállítások is ahol többek között lehetőségünk van a falvastagságok, kitöltések, rétegvastagságok, alapanyag specifikus hőmérsékleti, stb. beállításokra, amelyekre részletesen nem térek ki. A műveletek elvégzését követően a modell a vezérlő g-kódokkal és a nyomtatási beállításokkal együtt kerül elmentésre, majd direkt adatátvitellel vagy adathordozó segítségével juttatjuk el a nyomtatóhoz.

A 3D nyomtatás folyamata

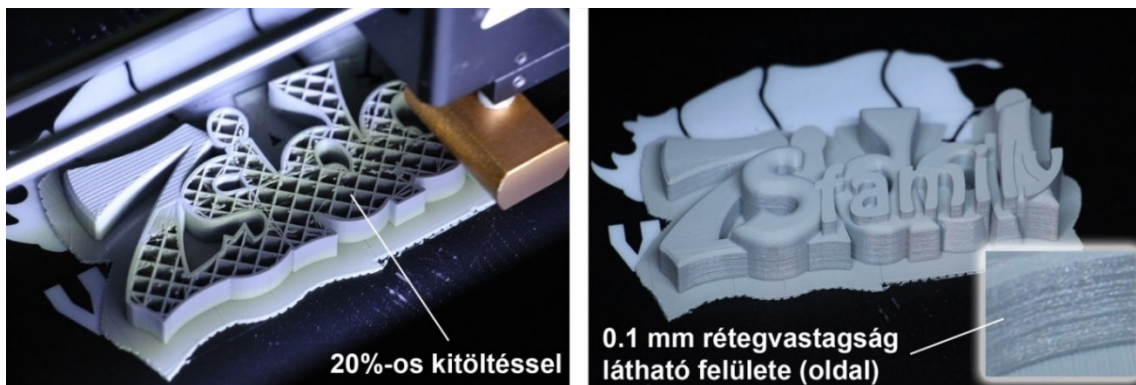
Miután a fájlt beolvastattuk a megfelelően előkészített (beállított, kalibrált) nyomtatóba, elsőként elő kell melegítenünk az extrúder fejet és a tárgytartó asztalt is az alapanyagnak megfelelő hőmérsékletre.

Nyomtatáskor elsőként mindig egy vékony nem teljes kitöltésű ún. tapadóhidat hozunk létre a nyomtatóval, amely megakadályozza a modell idő előtti leválását az asztról. A következőkben egy vastagabb alaplap készül, amelynek elsősorban akkor van jelentősége, ha csak pontokon érintkezik a modell a tárgyasztallal (pl. csúcsával lefelé fordított kúpforma). Szintén fontos az alaplap akkor, amikor alámetszésekkel dolgozunk és azok az asztalra ezen támaszkodnak. (2. ábra)



1.Melléklet-2. ábra. Elsőként a tapadó „híd” munkalapra nyomtatása, majd a többrétegű támasztólap és rajta a modell alsó lapja nyomtatás közben [forrás: fotó, Zsidai László]

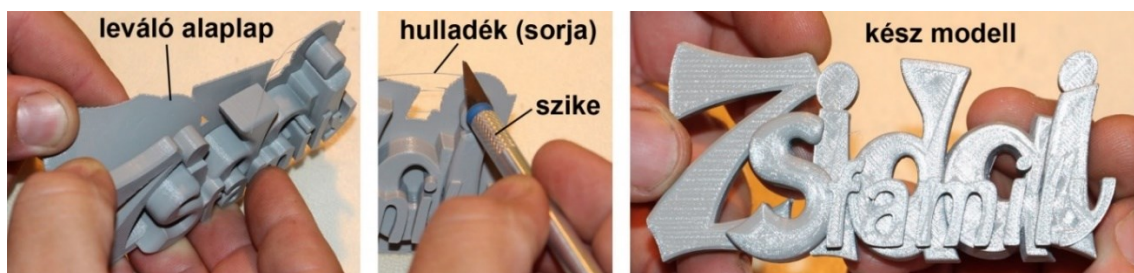
A nyomtatás ezt követően a beállított falvastagságok és a kitöltés mértékének megfelelően, rétegről rétegre történik, amely a modell méretétől a pontosságtól és a bonyolultságtól függően igen hosszadalmas is lehet. A modell tervezésekor és az asztalra helyezésekor fontos a réteg elrendezés figyelembevétele, mivel eltérő felületi minőség adódik oldalt és a vízszintes felületeken (3. ábra). Sok esetben célszerű a bonyolultabb modelleket eleve két félből tervezni és két félből nyomtatni, majd egymáshoz rögzíteni (pl. ragasztással).



1.Melléklet-3. ábra. A félig kinyomtatott modell és belső szerkezete 20%-os kitöltéssel és a kinyomtatott nyers modell az eltérő felületi minőségekkel [forrás: fotó, Zsidai László]

Utómunkálatok

A nyomtatás befejezésekor a nyomtató (extrúder fej és tárgyasztal) lehűlését követően a modellt eltávolítjuk a tárgytartó asztalról. A következő lépésekben az utómunkálatok következnek, amelyek során az alaplapot a kész modelltől leválasztjuk és az esetleges sorját, számaradványokat és a támasztókat vágószerszámmal (kés, szike) eltávolítjuk. A legtöbb esetben ezzel el is készült a nyomtatott alkatrészünk (4. ábra)



1.Melléklet-4. ábra. A támasztó lap leválasztása a kinyomtatott modelltől, sorjázás tisztítás (felületkezelés) végül a kész modell [forrás: fotó, Zsidai László]

Lehetőségünk van további „finiselő” műveletek elvégzésére is, ezek közül a leggyakoribbak a következők:

- csiszolás és forgácsolás a kívánt felület eléréséig, vagy a szerelt egységek megvalósításához,
- marató gőzben történő pácolás, amivel tetszetős sima, fényes felületek is elérhetők, de ügyelni kell arra, hogy a részletek (sarkok, finom élek, betűk) sérülhetnek, tompulhatnak,
- festés és a felület bevonás, amelynek ma már külön szakterülete alakult ki.

2. Melléklet:

TÍEZRES DARABSZÁMOK SLS TECHNOLÓGIÁVAL (AGC Glass Hungary Kft.)

Az AGC Glass Hungary Kft. (a japán központú AGC konszern globális piacvezető síküveg gyártásban és feldolgozásban) szelektív lézerszinterézéssel (SLS nyomtatás) váltott le korábban esztergálással készült kis- és közepes sorozatú alkatrészeket. A Formlabs 2021-ben megjelent és azóta népszerű kompakt SLS rendszerével, a Form Fuse 1 SLS nyomtatóval gyártanak az 1. ábrán látható primerező fejeket (a szélvédő üvegek gyártásakor szükséges, különböző átmérőjű filctartó fejek, amellyel a későbbi ragasztást előkészítő vegyszereket viszik fel az üveg felületére, ezek a velük érintkező vegyszereknek köszönhetően gyakran szorulnak cserére). A házon belüli SLS 3D nyomtatónak köszönhetően rugalmasabban tudják kezelni a raktárkészletet, miközben egyre újabb alkalmazási területeken is bevetik a technológiát.



2.Melléklet-1. ábra. Primerező fejek 3D nyomtatott szériái [105]

Megoldásként nyomtatási technológia váltás

Az AGC Glass Hungary csapata már korábban is használt FDM kétféjes 3D nyomtatót néhány primerező fej legyártására, azonban az FDM nyomtatás tempója, az alátámasztásokból adódó utómunka igény és a nem víz- és a nem légzáró szerkezet nem felelt meg a feladatnak. Az SLS technológia ezzel szemben alkalmasnak bizonyult arra, hogy termelékeny és rugalmas módon a célnak megfelelően tömítő alkatrészeket gyártsanak, megvalósítva az erős, vegyszerálló anyagból történő kialakítást.



2.Melléklet-2. ábra. A nyomtatott fejen egy távtartó is segíti a pontos használatot [105]

A Form Fuse 1 SLS nyomtató rendszer kiválasztását tesztnyomtatás és megtérülés számítás előzte meg. A Fuse 1 bekerülési költsége és az egy alkatrészre vetített alapanyagköltség alapján 2022 tavaszán a nyomtató beszerzése mellett döntöttek. Azóta több ezer primerező fejet gyártottak le, amelyeket a nyomtatásnak hála egy állítható távtartóval is kiegészítettek, amely az üveg széléhez képest segít fixen tartani a kenés távolságát (2. ábra).

Jövőbeli tervek

A közben eltelt időben, a cégen belül növekednek az igények az SLS nyomtatások más területen történő felhasználásának irányába (segéd- és gépalkatrészek). Többek között, az elkészült autóüvegekre kerülő matricák és távtartók felhelyezését segítő sablonok is 3D nyomtatással készülnek.

3. Melléklet:

KOMPOZIT 3D NYOMTATÁSI EREDMÉNYEK (DANA HUNGARY KFT.)

Az elmúlt években a robosztus járművek hajtásláncait, futóműveket, differenciálműveket és váltókat előállító győri Dana Off-Highway (DANA HUNGARY KFT.) gyára jelentős fejlődést ért el az Ipar 4.0 alkalmazások területén, amelyben az additív gyártásnak, a kompozit 3D nyomtatás által készült saját tervezésű alkatrészeknek és szerszámoknak is nagy szerep jutott. A házon belüli Markforged X7 nyomtatójukkal készült eszközök, a korábbinál költséghatékonyabb és gyorsabb megoldást jelentenek a gyár fejlesztéseihez szükséges egyedi igényekre. A nyomtatott eszközök a szemmel látható megtakarítások mellett hozzájárulnak a nagyobb termelékenységhez, a kevesebb leálláshoz, a csökkenő hibaarányhoz és a jobb munkakörülményekhez is.

A technológia bevezetése

Az additív technológia kezdeti bevezetése egy késve beérkező alkatrész 3D nyomtatott pótlásával indult, amellyel sikerült elkerülniük egy adott projekt csúszását. Ezen fellelkesülve a saját 3D nyomtató beszerzését alapos tapasztalatszerzés és megtérülés számítás előzte meg. Az előkészítés során kb. fél évig külsős szolgáltatókkal, illetve cégcsoporton belül más gyáraktól vették igénybe az additív gyártás lehetőségeit, miközben folyamatosan vezették a várható önköltséget és a hagyományos gyártással történő beszerzés alternatív költségeit. Az előzetes kutatás eredménye az lett, hogy a folyamatos szálerősítésre képes Markforged X7 ipari kompozit nyomtató (1. ábra) ára mindössze 1 év alatt megtérülhet.



3.Melléklet-1. ábra. A Dana Hungary Off-Highway gyárában jelenleg 80%-os kihasználtság fölött dolgozik a Markforged X7 nyomtató [106]

Az 1. ábrán látható Markforged X7 ipari nyomtató egy kétféjes kompozit nyomtató, amely elsődleges feje hőre lágyuló mátrix anyagot, a legtöbb esetben darabolt szénnel dúsított PA6-ot (Onyx) nyomtat, míg a másodlagos nyomtatófej folyamatos üveg-, hőálló üveg-, kevlár- vagy karbonszálat ágyaz az alkatrészekbe. Az eljárás eredményeként olyan szilárd, ellenálló alkatrészek nyomtathatók, amelyekkel leválthatók korábban forgácsolt műanyag és fém alkatrészek is.

Észrevételek és célmeghatározások a cég részéről

Az X7 nyomtatónk 80% fölötti kihasználtsággal üzemel. Jelenleg az amerikaiak után a magyarországi gyár adaptálta legmagasabb szinten a 3D nyomtatást. Ez azért is különleges teljesítmény, mert a győri Dana az egyetlen az eddigi telephelyek közül, ahol kifejezetten a gyártásban használják az additív gyártást.

A négy fő cél, amelynek elérésében a Dana Hungary a 3D nyomtatásra támaszkodik, a következők:

- a szerszámok házon belüli additív gyártásán realizálható konkrét idő- és költségmegtakarítás,
- személyre szabott megoldásainkkal a vevői reputáció megtartása, az elégedettség növelése,
- a belső hibák csökkentése, a termelékenységi növelése és a leállások elkerülése, amelyekhez szorosan kapcsolódik,
- az operátori elégedettség növelése, a jobb munkakörülmények biztosítása a gyártósorokon.

Egyedi Ipar 4.0 eszközök, tartók, bridge megoldások

A Dana Hungary gyártósorain MES (Manufacturing Execution System- szoftverekből és érzékelőkből álló integrált rendszer, amely valós idejű adatokat szolgáltat az üzemi tevékenységekről) irányítja a termelést és írja az utasításokat, hogy mit mivel és hogyan kell következő lépésként szerelni. Ehhez kapcsolódva a Dana mérnökei olyan szerszámtartókat terveztek és nyomtattak, amelyekbe jeladó kapcsolókat építettek (2. ábra). Ez a kapcsoló ellenőrzi és azonnali visszajelzést ad, hogy a megfelelő szerszám el lett-e véve és használat után vissza lett-e helyezve. Az egyik soron a jeladó kampók felszerelése után 0-ra csökkent a hibaszám.



3.Melléklet-2. ábra. Nyomtatott szerszámtartó kampók jeladóval [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

További fejlesztésként, hamarosan ezeket a tartókat fényjelzéssel is ellátják, hogy jelezze melyik szerszáomért kell nyúlania az operátornak. Ezek a fejlesztések nem csak a hibákat csökkentik drasztikusan, de gyorsítják a gyártást és az új operátorok betanítási idejét is jelentősen lerövidítik.

A késztermékek tesztelésének hatékonyságát is tudták növelni 3D nyomtatással. Például a futóművek tesztelését nyomtatott tartókra szerelt prizmák és szenzorok segítik, a hidromotorok eresztés ellenőrzését pedig nyomtatott tesztfedelek támogatják (3. ábra). Mivel az FDM nyomatok nagyobb nyomáson nem lég- és vízzárók, így az utóbbi alkalmazáshoz a fedél bevonására is szükség volt egy önterülő műgyanta anyaggal.



3.Melléklet-3. ábra. Nyomtatott prizmatartó a bal oldali és a tesztfedelek a jobb oldali ábrákon [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Teljes hajtáslánc nyomtatása valós méretben

Az egyik legnagyobb nyomtatott projektjük eddig egy teljes hajtáslánc valós méretben való nyomtatása volt. A nyomtatott prototípus segítségével a gyártási folyamat tervezése, a gyártósor előkészítése már korábban megkezdődhet, ráadásul 3D nyomtatással a korábbi becsült költségének 1%-ért tudták legyártani a modellt. A Markforged X7 nagyon sokat dobott a fejlesztéseik ütemén. Nem kis segítség volt abban sem, hogy mindössze 3 hónap alatt létre tudjanak hozni egy új gyártósort a beérkező igénytől a teljes átadásig.

Présalátét kiváltása kompozit nyomtatással

A Markforged nyomatok rendkívüli terhelhetőségét mutatja a következő példa. Az egyik gyártósor átadásánál hiányzott egy présalátét, mert a fémalkatrészre várni kellett, ami napi 20-30 ezer Euró veszteséget jelentett volna. A Dana mérnökei így ismét a kompozit 3D nyomtatáshoz nyúltak, hogy elkészítsék a présalátétet, amelyre 30 kN, azaz 3 tonnának megfelelő erő hatott. A Markforged Onyx anyagú alkatrész tökéletes bridge megoldásnak bizonyult, talán még most is működne, ha nem cserélik le az időközben beérkező fémalkatrészre (4. ábra).



3.Melléklet-4. ábra. Kompozit 3D nyomtatással készült présalátét [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Ellenőrző sablonok nyomtatása

Az elmúlt fél év során számos egyedi ellenőrző sablont is nyomtattak, amivel fő céljuk a vevői reklamációk megelőzése, és a számok is azt mutatják, hogy jó úton járnak.

Ezen a területen az egyik legnagyobb hozzáadott értéket épp egy maroknyi, kúpos ellenőrző darab jelentette (5. ábra). A nyomtatott mérősablon a kerékagy megmunkált részének ellenőrzésére szolgál. Értelemszerűen amennyiben a BENT jellel ellátott rész nem ér túl az alkatrészen, míg a KINT kilóg, akkor megfelel a darab. Normál esetben a kerékagyak ellenőrzése mérőgépen körülbelül 30 percbe telt volna darabonként, ami 3-4 napos leállást okozott volna a vevőjüknek. A nyomtatott ellenőrző darab azonban töredékére csökkentette az ellenőrzéshez szükséges időt és segített elkerülni a leállással járó idő- és költség veszteséget.



3.Melléklet-5. ábra. Kúpos ellenőrző darab [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Olyan hibrid ellenőrző alkatrészt is gyártottak már, amely nyomtatott és fém részekkel is rendelkezik (6. ábra). A tapasztalat azt mutatja, hogy ahol kiemelkedő merevségre van szükség, ott a kompozit 3D nyomtatás és a folyamatos szállal megerősített elemek sem veszik fel a versenyt a fémmel.



3.Melléklet-6. ábra. Foghézag mérésére használt alkatrész nyomtatott és fém részekkel [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Az egyik futóműnél a megfelelő távtartást kellett ellenőrizni, amely feladat megoldásához egy negyed felnit nyomtattak ki, amelyet a keréken körbe forgatva elvégezhető az ellenőrzés (7. ábra).



3.Melléklet-7. ábra. Ellenőrző sablon [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

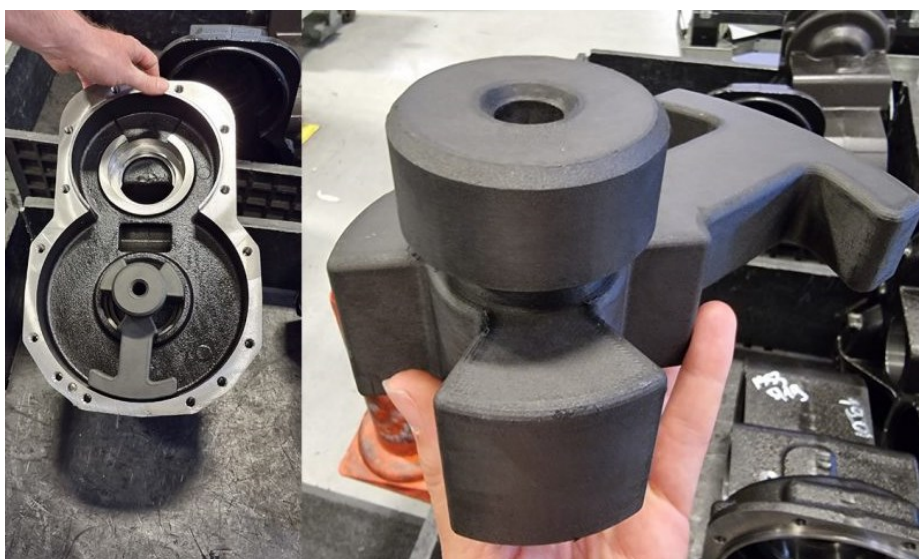
A következő 8-10. ábrákon további példákat láthatunk nyomtatott ellenőrző, segédeszközökre.



3.Melléklet-8. ábra. Tányérkerék foghézagjait ellenőrző szerszám – ez a nyomtatott eszköz pontosan 120 fokra osztja az operátornak a kereket [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]



*3.Melléklet-9. ábra. O-gyűrű ellenőrző sablon, amellyel 40-től – 220 mm-ig tudnak ellenőrizni
[forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]*



3.Melléklet-10. ábra. Öntvény átmérő ellenőrző darab [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Ergonomikusabb, könnyebb szerszámok

A Dana Hungary gyártószorain, egyre több nyomtatott szerszámmal is találkozhatunk. Az egyértelmű megtakarításon túl, amit az egyedi szerszámok házon belüli additív gyártása jelent, az ergonomikusabb kialakítás és a súlycsökkenés növeli az operátori elégedettséget és hatékonyságot is. Több esetben egy-egy kézi szerszám súlyát akár 90-95%-kal képesek voltak csökkenteni kompozit 3D nyomtatással.

A szerszámok kompozit 3D nyomtatásának lehetősége azért is kulcselőny, mert az első prototípusok után még előfordulhatnak változtatások, amelyek szerszám módosításokkal is járnak, amit a Dana nem terhel tovább a vevőire. Így a hagyományos megmunkáláshoz képest jóval kedvezőbb önköltségen nyomtatott darabokkal rengeteget tudnak spórolni a szerszámozási költségeken is.

A 11. ábrán látható, nyomtatott, kompozit csapágybeütőkkel fém szerszámokat sikerült leváltani. A korábban forgácsolással készült fém csapágybeütők nyomtatott helyettesítői 3-4 kg helyett 150-200 grammot nyomnak, ezáltal jelentősen könnyebbé teszik a fizikai munkát. A könnyebb szerszám és a nyomtatás által olcsón elérhető jobb ergonómia jobb munkakörülményeket és akár gyorsabb munkavégzést is jelent.



3.Melléklet-11. ábra. Nyomtatott csapágybeütő – könnyebb, mégis erős szerszámok kompozit 3D nyomtatással [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Egy másik példa a könnyebb és kényelmesebben használható szerszámokra az ábrán látható egyedi, fogazott dugókulcs betét. A korábbi fém változatok a súlyuknál fogva könnyen lehúzták a mennyezetről lógó pneumatikus vezetékeket, amely balesetveszélyes volt. A Markforged White Nylonból nyomtatott szerszám azonban kisebb súlyának köszönhetően nem okoz ilyen baleseteket. Emellett a hagyományos gyártás önköltségének a nyomtatás körülbelül 1-2%-a volt, az átfutási időről nem is beszélve.



3.Melléklet-12. ábra. Fogazott dugókulcs betét [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Jövőbeli fejlesztési tervek

Mivel a szerszámok súlycsökkentése nagyon pozitív eredményekkel járt, így a Dana mérnökei keresik a hasonló lehetőségeket. Terveik között szerepel például emelőszerszámok additív gyártása is, de ezt az alkalmazást már nehezíti a munkabiztonság által elvárható hitelesítés nehézsége, hiszen a nyomtatott alkatrészek méretezésére egyelőre nincsenek ipari sztenderdek. Ezáltal nincs egyértelmű forrás, ami megadja, hogy egy nyomtatott műanyagnak mit kell kibírnia, milyen terhelésekre hogyan kell tervezni, és nincs garancia, hogy egyik nyomtatott alkatrész olyan lesz, mint a másik. Ehhez kapcsolódóan a Dana Hungary a győri Széchenyi István Egyetemmél dolgozik együtt a megfelelő vizsgálatokon.

Jövőbeni tervük bevinni a tervezett megelőző karbantartás területére is a 3D nyomtatást, mivel a szálerősített kompozit alkatrészek bírják azt a terhelést is. A nyomtatás további területekre való kiterjesztése mellett a 3D szkennelés alkalmazási lehetőségeit is vizsgálják (13. ábra).



3.Melléklet-13. ábra. Futómű 3D szkennelése a Dana Hungary OH gyárában [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Eredmények összefoglalása

Mindössze fél év házon belüli 3D nyomtató használat után a Dana Hungary mérnökei jelentős megtakarításokat tudnak felmutatni, valamint mind a gyártás, mind a gyártás előkészítés területén is gyorsabbak lettek.

Amikor új termék gyártásába kell kezdeni, a prototípusgyártáshoz a szerszámoknak már 30-40 %-át előre ki tudják nyomtatni a Markforged gépével. A MES és az okos kapcsolók jelentősen csökkentik az új gyártósor operátorainak betanulási idejét és a hibákat is. A változó vevői igényekből vagy ellátási lánc problémákból fakadó leállások 3D nyomtatott alkatrészekkel sok esetben elkerülhetők. Ezek a fejlesztések, a gyors reakciókészség és a könnyebb, ergonomikusabb szerszámok együtt pedig az egész gyártási folyamatot hatékonyabbá, termelékenyebbé teszik, amely eredményeként a vevői reputációjuk is egyre növekszik.

4. Melléklet:

FUNKCIONÁLIS PROTOTÍPUSOK SLA NYOMTATÁSSAL (Wöhler)

A Wöhler vállalat (Nemzetközi gyártó mérés technika területén, Németországi központtal) célul tűzte ki olyan prototípus megalkotását a termék (Wöhler HF 5500 fa nedvességmérőt) öntésének és gyártásának előkészítésére (még a gyártás megkezdése előtt), ami úgy néz ki és úgy is funkcionál, mint a majdani kész termék.

Megoldás

A Wöhler vállalat a Form 2 SLA 3D nyomtató és két különböző Formlabs alapanyag felhasználásával funkcionális prototípusának kiemelkedő minőségű házat és rugalmas billentyűzetet készített. Ez a megoldás lényegesen pontosabb, gyorsabb és alacsonyabb költségű, mint korábbi prototípusgyártó megoldásuk, az FDM nyomtatás és az öntés ötvözése (1. ábra).

Folyamat és kihívások

A tervezési folyamatnak ez a része kiemelkedően fontos, hogy kivédhető legyenek vele a gyártás lehetséges hibái. Utólagos módosítások a fröccsöntés során és a végterméken már igen költséges, háromtól öt számjegyű euróba kerülnek.

A tervezési folyamat elején egy FDM 3D nyomtatót használtak, ami nem volt képes az általuk elvárt finomsággal és pontossággal előállítani az eszköz házat és a billentyűzet rugalmas részeit. Ekkor fordultak a nagyfelbontású SLA 3D nyomtatás felé, amivel már képesek voltak két különböző műgyanta alapanyag felhasználásával egy olyan funkcionális prototípust készíteni, amely heteket és költséget is spórolt a gyártás előkészítésére szánt időben.



4.Melléklet-1. ábra. Form 2 asztali SLA nyomtatóval készült készülékház és billentyűzet prototípus [107]

A prototípus által támasztott kihívások a következők voltak:

- A fa nedvességmérő prototípusa több különböző alapanyagot igényelt, viszont az első FDM nyomat nem volt elég precíz, hogy a belső elektronikai berendezésekkel együtt megbízhatóan tesztelhesék. Az általuk használt FDM gép nem volt képes a rugalmas elemek gyártására sem.
- Ez a folyamat rendkívül sok időt igényelt és még így sem voltak képesek megfelelő részletekkel előállni. Ezt követően leegyszerűsítették a folyamatot, közvetlenül nyomtatva részletes elemeket a Formlabs Form 2 SLA 3D nyomtatóval.”

A megfelelő megoldásig a következő folyamat vezetett:

- Ahhoz, hogy tudják tartani a határidőt, sürgősen módosítania kellett a prototípuson. Ehhez a Formlabs Form 2 3D nyomtatóra esett a választás, amely SLA technológiát használ precíziós modellek nyomtatására néhány óra leforgása alatt. “A Formlabs desktop 3D nyomtatójával, a prototípusgyártás ideje napokról néhány órára redukálódott. Azzal, hogy különböző elemeket és a házat is elő lehet állítani ezen a nyomtatón, heteket csökkentett az egész fejlesztési folyamaton.
- A Wöhler csapata a Formlabs Black Resint használta a ház, és a Flexible Resint a billentyűk gyártásához. A billentyűknek akkor kell aktiválódni, amikor a felhasználó megnyomja őket, tehát a gombok falainak nagyon vékonynak, ugyanakkor strapabírónak is kellett lenniük. Az FDM technológiával nyomtatott öntőformával és öntéssel ezt a szintű részletességet lehetetlen lett volna kivitelezni. Az FDM 3D nyomtatók egyébként flexibilis TPU anyagokkal is tudnak dolgozni, azonban a 25 mikronos felbontás, amelyet a Form 2 képvisel, a legtöbbnek kihívást jelent. Emellett az FDM technológiával szemben az SLA technológia rétegei között izotróp kötés alakul ki, és a nyomtatások felülete sokkal simább, fröccsöntött minőséget képvisel, amely a Wöhler fejlesztése esetében elvárás volt.
- Az összeszerelés és a prototípus befejezése csak egy napi munkát igényelt, míg az előző megoldásukkal a munka egy hetet igényelt volna (2. ábra).



4.Melléklet-2. ábra. Végleges, funkcionális prototípus Form 2-vel 3D nyomtatva [108]

Eredmények

- 70%-kal csökkent a gyártás előkészítésre fordított idő: 1 hétről 2 napra. Így több lehetőség maradt arra, hogy különböző anyagokkal kísérletezzon a csapat a prototípuskészítés során, ami közelebb állhat a majd legyártani kívánt termék kész állapotához. Több idő maradt új ötletekre és módosításokra, hogy tökéletes lehessen a termék tervezése.
- 75%-os költségcsökkenés a prototípus készítésben
- A házon belüli 3D nyomtatás lehetővé tette Wöhler számára, hogy precíz, funkcionális prototípussal teszteljen, ezáltal a gyártási kockázatokat is jelentősen csökkentették
- A házon belüli nagyfelbontású 3D nyomtatás funkcionális alapanyagokkal, mint a Flexible Resin lehetővé tette számomra és a csapat számára, hogy széleskörű tesztelést végezzünk a prototípusokkal anélkül, hogy rongálódás vagy funkcionális akadályok álltak volna elő egyes elemeknél.

5. Melléklet:

3D NYOMTATOTT MESTERMINTÁK, KIS- ÉS KÖZEPES SZÉRIAGYÁRTÁSA (Technoplast Group Kft.)

A Technoplast Group Kft. elsődleges tevékenysége a prototípusgyártás, de kis- és nagyszériák kivitelezését is vállalják. 2000 négyzetméteres üzemükben számos vákuum- és RIM öntő berendezés, fröccsöntő és forgácsoló gépek is dolgoznak. A cég stratégiájában mindig központi szerepet játszott a fejlesztés, az innováció és a változó vevői igényeknek való folyamatos megfelelés. Nem véletlen, hogy additív gyártásban is már több évtizedes tapasztalatot mutathatnak fel. A gyártást házon belül SLA 3D nyomtatókkal támogatják (1. ábra).



5.Melléklet-1. ábra. SLA 3D nyomtatók a Technoplast műhelyében [109]

3D nyomtatást elsősorban mesterdarabok kivitelezésére használják, amelyhez a sztereolitográfia (SLA) eljárását találták a legmegfelelőbb választásnak. Jelenleg három Formlabs SLA 3D nyomtatóval dolgoznak házon belül, nagyobb darabok esetében külső szolgáltatókra is támaszkodnak, illetve saját SLS nyomtató rendszerük is működik.

A cég érzékeli, hogy a piac és az igények jobban hullámoznak, nehezebb megjósolni, hogy mi következik és meddig fog tartani egy-egy jobb időszak. Elsődlegesen a nyugat-európai autópárnak dolgoznak, mindazonáltal az utóbbi években megnőtt az elektronikai ipar és az orvosi eszközgyártás súlya is a forgalmukban (2. ábra). Nehezen kiszámítható a piac, hullámozik a kereslet, az autópár néha háttérbe szorul, majd ismét a korábbi intenzitással vagy még nagyobb megrendelési volumennel tűnik fel.



5.Melléklet-2. ábra. Orvosi eszközgyártás a Technoplast Kft-nél [109]

Az az üzleti modelljük, hogy nem direktben szállítanak be az OEM-eknek (Original Equipment Manufacturer, kifejezés arra utal, amikor egy vállalat az eredeti gyártótól megvesz valamilyen terméket, majd mint sajátját adja tovább, gyakran valamilyen nagyobb termék részeként), hanem németországi, svájci, osztrák és olasz, hasonló profilú partnereken keresztül. Ők azok, akik direkt kapcsolatban vannak a cégekkel, begyűjtik az ajánlatkéréseket, pontosítják az igényeket és megküldik gyártásra. Elsősorban ezekkel a szolgáltatókkal való kapcsolat befolyásolta, hogy az autóipar válsága közben milyen iparágakat, milyen cégeket tudtak megszólítani.

Az ipari SLS-től a házon belüli gyártásig

A cég hamar meglátta az additív gyártástechnológia előnyeit és a benne rejlő lehetőségeket, így később keresték is a professzionális de mégis megfizethető lehetőségeket, hogyan lehetne bővíteni, de az asztali gépek megjelenése előtt nem volt olyan, amibe beruháztak volna.

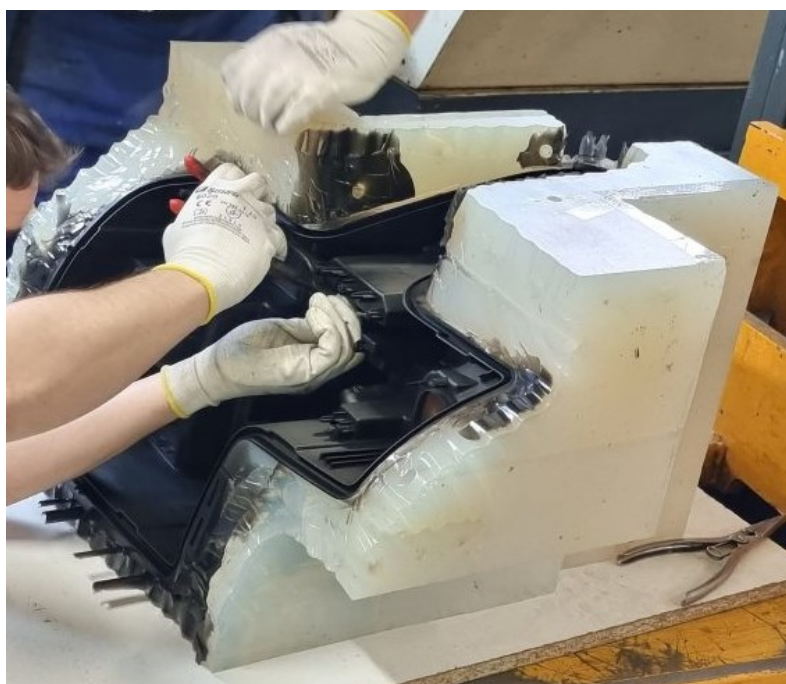
A szabadalmak lejártával az asztali, elérhető árú SLA nyomtatók megjelenése jelentette az áttörést. A Formlabs márkával 2017-ben találkoztak először, és be is szereztek egy Form 2 gépet. Az első Form 2-ük megtérülési ideje mindössze 6 hét volt, így a jó tapasztalat alapján nagyon hamar vettek egy másodikat is.

Mesterdarabok nyomtatása

„Az SLA technológiát akkor is és most is elsősorban mesterdarabok nyomtatására használják, amelyekre alapozva készítik a vákuumöntéshez szükséges szilikonszerszámokat. 1999 óta folyamatosan van SLA berendezésük és mindig a Clear gyantákat használták a mesterdarabokhoz. A használt alapanyagok köre csak akkor bővült, amikor beruháztak a Form 2 SLA nyomtatókba (3-4. ábrák).



5.Melléklet-3. ábra. 3D nyomtatott mesterdarab és vákuumöntött alkatrész egymás mellett [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]



5.Melléklet-4. ábra. Vákuumöntött alkatrész a szilikon öntőformában [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Az asztali Formlabs SLA nyomtatók egyik nagy előnye, hogy nagyon könnyű bennük cserélni az alapanyagot, összevetve a nagy ipari gépekkel, amikben 80-200 liter gyanta áll, és amelynek cseréje nehézkes és költséges is. Onnantól, hogy könnyű lett az alapanyagcsere elkezdtek direktnyomtatással is foglalkozni, most már Grey Pro, Rigid10k vagy High Temp anyagból nyomtatnak közvetlen értékesítésre is termékeket. Sokszor kifejezetten vákuumöntött alkatrészt rendelnek tőlük, de ha kisméretű

és/vagy nagyon bonyolult a forma, akkor próbálják terelni a vevőket a 3D nyomtatott tárgyak felé (5. ábra).



5.Melléklet-5. ábra. Kisméretű, nyomtatott dekorelemek Grey Pro műgyantából a Technoplast üzemében [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

Felületkezelés

Többféle felületkezeléssel foglalkoznak:

- alapvető a homokszórás,
- a felületek becsiszolása hogyha összeszerelt egységről van szó,
- marketing célra készülő darabnál, glettelik, alapozzák és festik is RAL vagy NCS kód szerint (6. ábra).



5.Melléklet-6. ábra. A Technoplast egyik festő terme, a kezelt munkadarabokkal [forrás: Szabó Péter, FreeDee Printing Solutions]

A 3D nyomtatott alkatrészek validálása

Van, ahol elfogadják a javaslatokat, vannak, akik megnézik előben, és van ahol elsőmintára és részletes dokumentációra, használati jegyzőkönyvre van szükség. Minden partnert tájékoztatnak, hogy mit várhat el az adott anyagoktól akár SLA akár SLS technológiáról van szó. Emellett az adott felhasználásnak megfelelő felületkezeléssel is tudják javítani a tulajdonságokat. Például, ha UV stabilitást szeretnének, akkor festik a darabot és UV lakkot is kapnak.”

Jövőbeli cél

Problémát jelent, amikor nagy darabokat gyártanak, például lökhárítókat. Ezeket a mesterdarabokat általában külföldről szerzik be vagy az is egyre jellemzőbb, hogy a vevő küldi. Tehát ezeket a nagy darabokat továbbra is be kell szerezniük és ez a nagyobb tétel: 5x vagy 10x annyit költünk beszerzésre, mint a saját gyártású mesterdarabokra. Ennek megfelelően a minél nagyobb és megfizethető árú gépeket keresik.

6. Melléklet:

HATÉKONYABB GYÁRTÁS 3D NYOMTATÁSSAL (SCHOTT Hungary Kft.)

Számos esetben egy gyár első 3D nyomtatójának beszerzését az additív gyártástechnológiákkal való tapasztalatszerzés motiválja, mivel a folyamatos innováció és tanulás a sikerük egyik kulcsa. A felhasználást tekintve a legelterjedtebb első cél a prototípusok házon belüli gyártása, amely azonban hamar háttérbe szorulhat, ahogy jóval nagyobb üzleti hasznot jelentő alkalmazási ötletek is felmerülnek és megvalósíthatónak bizonyulnak. A SCHOTT Hungary Kft. is alapvetően gépalkatrészek prototípusainak nyomtatása céljából ruházott be 2020 elején egy Ultimaker S5 Pro Bundle asztali FFF 3D nyomtató rendszerre. Mára azonban a legnagyobb értéket az olyan, 3D nyomtatással megvalósított fejlesztésekben látják, amelyek a vevői igények jobb kiszolgálásával járulnak hozzá a cég sikeréhez.

A kihívás: változó vevői igények

Az ampullák, karpullák és üvegcsék előállítása a gyógyszergyártási tevékenységekre érvényes GMP (Good Manufacturing Practice) azaz a Helyes Gyártási Gyakorlat követelményei alapján, magas szinten automatizált folyamatok mentén történik. A gyártás során lángnyelvek tucatjait kell hajszálpontosan beállítani, hogy elkészülhessenek a gyógyszeripari üveg csomagolóanyagok (1. ábra).



6.Melléklet-1. ábra. A SCHOTT üzemében gyártott termékminták [110]

Ebben a folyamatban és ilyen mennyiségeknél az automatizálásnak óriási szerepe van, amelyet a termékek csomagolása során is alkalmaznak. Újonnan felmerült vevői igényre reagálva kellett változtatni bizonyos termékek csomagolásán, hogy az üvegcsék a sorokra párhuzamosan és merőlegesen is elválasztva, egy szép mátrixba

rendezve kerüljenek csomagolásra. Az új csomagolási rend előnye, hogy a termékek nem érnek egymáshoz, és a precíz elrendezésből adódó pontosabb pozíció megkönnyíti a vevő oldali munkafolyamatokat, például egy töltő gépsor vagy mosóállomás munkáját.

Megoldás

Mivel el kellett kerülni, hogy a napi több ezer üvegcsét operátorok rendezzék manuálisan mátrixba, így a csomagológépet kellett fejleszteni. A SCHOTT mérnökei azt találták ki, hogy az utolsó lépés során, ahol a gép sorokban tolja a csomagolóterületre a fiolákat, 3D nyomtatott jigeekkel fogják megoldani a termékek elrendezését (2. ábra). A megoldás végül két lépcsőben bizonyult sikeresnek. Előbb egy elnagyoltabb, öblökkel rendelkező nyomtatott munkadarabbal megtolva a sort az üvegcsék elválasztódnak egymástól, majd egy hasonló, de pontosabb pozícionálást biztosító alkatrész tolja őket precízen a helyükre. Miután a gép a csomagolóterületet feltölti az ilyen módon precízen mátrixba rendezett üvegekkel, felülről kerül rájuk egy háló, amely rögzíti és védi őket a szállítás során.



6.Melléklet-2. ábra. 3D nyomtatott csomagológép alkatrészek [110]

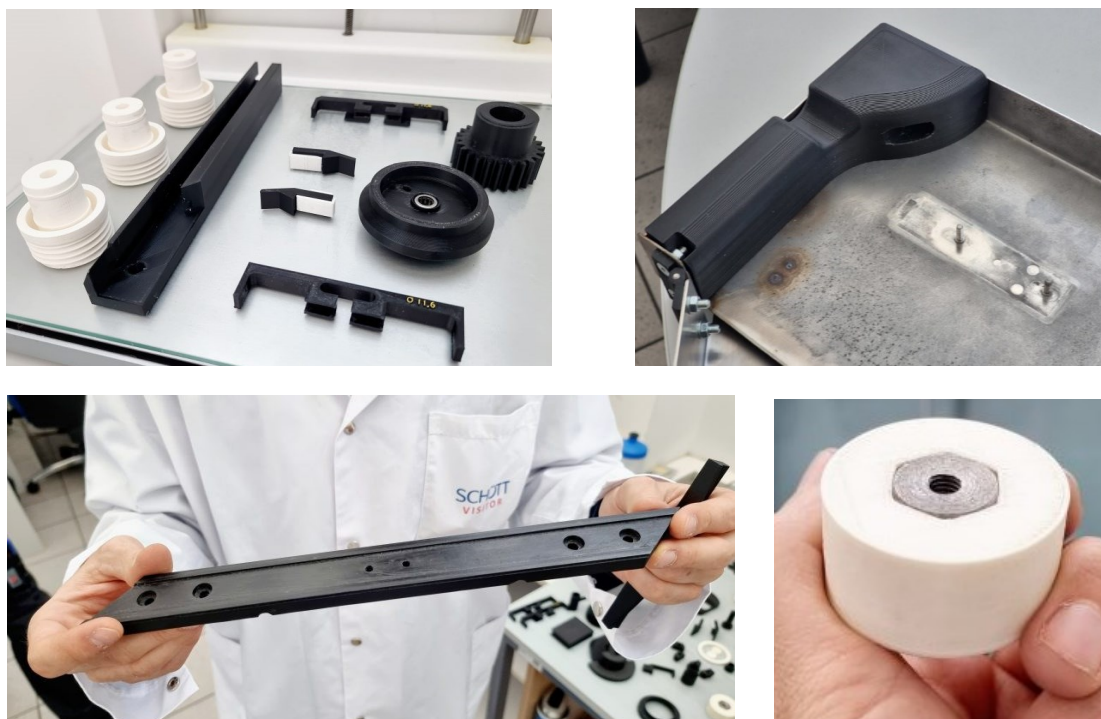
További értékes 3D nyomtatások

A SCHOTT Hungary Kft. példája jól mutatja, hogy a vállalati kultúra feltűnően nagymértékben tudja befolyásolni az additív gyártástechnológia bevezetésének sikerét. Talán azért, mert ha van egy eszközünk, amivel szinte bármit legyárthatunk, akkor van igazán szükség nyitottságra, kreativitásra, de kritikus fókuszra is, hogy végül igazi értéket teremtsünk.

A SCHOTT gyárban számos olyan 3D nyomtatással készült eszközt, alkatrészt, szerszámot láthatunk, amely dolgozói ötletek alapján készült. A mérnökség ajtaja mindig nyitva áll a társosztályok beérkező igényei előtt, a problémamegoldó

beállítottságú csapat lelkesen segít a megvalósításban. Ennek köszönhetően a gyártóberendezések és folyamatok fejlesztéséhez szükséges prototípusok gyorsan elkészülnek. A 3D nyomtatás a SCHOTT házon belüli, fejlesztési ötletek inspirálását és tesztelését célzó workshopjainak is szerves részévé vált, amely segítségével egy hét leforgása alatt egy ötlet számos verzióját tudják tesztelni a lehető leghatékonyabb megoldásig.

A 3D nyomtató (Ultimaker 3D) a karbantartás területén is jelentős értéket termelt a vállalat számára. Első lépésként átvizsgálták a raktárkészletet, hogy a nyomtatható alkatrészek digitális raktározásával csökkentsék azt. Emellett több esetben alkalmaztak nyomtatott modelleket meghibásodott alkatrészek pótlására áthidaló megoldásként is, ezáltal elkerülve a gyártósor teljes leállítását (3. ábra).



6.Melléklet-3. ábra. A csomagológép 3D nyomtatott segédalkatrészei [110]

A házon belüli 3D nyomtató segítségével egyik napról a másikra tesztelhető ötlet azonnali sikereket hozott. Ez a vevői igény ráadásul egyre több ügyfelüknél felmerült azóta, amire a SCHOTT így már felkészülten, kész megoldással tudott szolgálni.

- [1] L. Borbás, Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben,, MMK-Kiadványsorozata 4., Gépészeti Tagozat FAP-15/2017-GT, 2017.
- [2] „www.hubs.com/get/am-technologies/,” [Online]. Available: www.hubs.com/get/am-technologies/. [Hozzáférés dátuma: 28 03 2023].
- [3] www.freedee.hu, „www.freedee.hu/a-3d-femnyomtatas-modszerei/,” [Online]. Available: www.freedee.hu/a-3d-femnyomtatas-modszerei/. [Hozzáférés dátuma: 26 03 2023].
- [4] „www.rolandberger.com,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 30 03 2023].
- [5] A. D. Mazurchevici, Dumitru Nedelcu és Ramona Popa, „Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review,” *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 27, pp. 179-192, április 2020.
- [6] [Online]. Available: <https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [7] A. Paesano, „Handbook of Sustainable Polymers for Additive Manufacturing (1st ed.),” CRC Press, 2022.
- [8] [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [9] [Online]. Available: <https://3dnyomtato.shoppe.hu/pages/3d-nyomtato-alapanyagok-osszehasonlitas>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [10] [Online]. Available: <https://3dprinting.com/reviews/pla-filament-review/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [11] S. Rodríguez-Reyna, Cristian Mata, J. H. Díaz-Aguilera, H. R. Acevedo-Parra és Fidencio Tapia, „Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF,” *Materials Today Communications*, %1. kötet33, 2022.
- [12] [Online]. Available: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [13] [Online]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [14] [Online]. Available: <https://juggerbot3d.com/petg-filament-review/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [15] L. Musa, N. K. Kumar, S. Z. A. Rahim, M. S. M. Rasidi, A. E. W. Rennie, R. Rahman, A. Y. Kanani és A. A. Azmi, „A review on the potential of polylactic acid based thermoplastic

elastomer as filament material for fused deposition modelling,” *Journal of Materials Research and Technology*, %1. kötet20, 2022.

- [16] [Online]. Available: <https://tractus3d.com/materials/tpe/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [17] [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/tpe-vs-tpu-flexible-filament-the-differences/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [18] [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/polycarbonate-pc-for-3d-printing-110220204/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [19] [Online]. Available: <https://filament2print.com/gb/advanced/1754-3diakon-pmma.html>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [20] M. Dimitrova, M. Corsalini, R. Kazakova, A. Vlahova, B. Chuchulska, G. Barile, S. Capodiferro és S. Kazakov, „Comparison between Conventional PMMA and 3D Printed Resins for Denture Bases: A Narrative Review,” *Journal of Composites Science* 6, 2022.
- [21] E. R. Pablo, J. Arribas-Barrios, O. Rodriguez-Alabanda, R. González-Merino és G. Guerrero-Vaca, „Manufacture of polyurethane foam parts for automotive industry using FDM 3D printed molds,” in *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, %1. kötet32, 2021, pp. 396-404.
- [22] [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/pom-acetal-delrin-3d-printing/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [23] [Online]. Available: https://filament2print.com/gb/blog/48_3D-printing-trends-2019.html. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [24] M. Schmid, A. Amado és K. Wegener, „Polymer powders for selective laser sintering (SLS),” *AIP Conference Proceedings*, 2015.
- [25] [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/it/guida-pva-stampa-3d-1300320239/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [26] C. Duran, V. Subbian, M. T. Giovanetti, J. R. Simkins és F. R. Beyette Jr, „Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol,” *Rapid Prototyping Journal*, %1. kötet21, %1. szám5, pp. 528-534, 2015.
- [27] [Online]. Available: <https://shop3d.ca/collections/ultimaker/products/ultimaker-3-cleaning-filament>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [28] P. Marek, J. Hajnys, Q. Ma, L. Jancar, J. Jansa, P. Stefek és J. Mesicek, „A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing,” *Polymers*, %1. kötet13, %1. szám4, 2021.
- [29] [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/best-resin-for-3d-printer/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [30] [Online]. Available: <https://www.kings3dprinter.com/material/uv-resin-ks158T.html>. [Hozzáférés dátuma: 2023].

- [31] [Online]. Available: <https://www.fastradius.com/resources/know-your-materials-sla-tough-resin/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [32] [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/different-types-of-resins-3d-printing-281220225/#!>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [33] [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/resins-dental-3d-printing-dangerous-reproductive-health080220214/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [34] [Online]. Available: <https://www.cnet.com/tech/computing/best-3d-printer-resin/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [35] [Online]. Available: <https://www.weerg.com/3d-printing-materials/nylon/pa-11>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [36] W. S. Tey, C. Cai és K. Zhou, „A Comprehensive Investigation on 3D Printing of Polyamide 11 and Thermoplastic Polyurethane via Multi Jet Fusion,” *Polymers*, %1. kötet13, 2021.
- [37] [Online]. Available: <https://www.jellypipe.com/en/blog-news/3d-print-material-test-pa11-pa12/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [38] [Online]. Available: <https://www.liqcreate.com/supportarticles/properties-fdm-sls-resin/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [39] [Online]. Available: <https://www.aniwaa.com/insight/am-materials/metal-3d-printing-materials/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [40] [Online]. Available: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/understanding-3d-printing-metal-material-nuances/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [41] [Online]. Available: <https://markforged.com/resources/blog/metal-3d-printing-materials>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [42] [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-aluminum/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [43] [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-titanium-methods-printers-applications/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [44] [Online]. Available: <https://www.eos.info/en/3d-printing-materials/metals/nickel-alloys>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [45] [Online]. Available: <https://markforged.com/resources/blog/introducing-3d-printed-inconel>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [46] [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/copper-3d-printing-the-ultimate-guide/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [47] [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].

- [48] [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/#section-exotic-and-funky-types-of-3d-printer-filament>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [49] [Online]. Available: <https://www.3erp.com/blog/3d-printing-composite-materials-an-introductory-guide/>. [Hozzáférés dátuma: 2023].
- [50] B. R. Redwood, F. Schöffner és B. Garret, The 3D Printing Handbook, Technologies, design and applications, 3D Hubs B.V. , 2017.
- [51] „www.hydraresearch3d.com/design-rules,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 25 05 2023].
- [52] „www.protolabs.com/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/design-guidelines/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 02 09 2023].
- [53] „www.3dprint.com/237866/design-guidelines-for-direct-metal-laser-sintering-selective-laser-melting-laser-powder-bed-fusion,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 16 09 2023].
- [54] „www.billieruben.info/post/my-3d-printing-posters-1,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 16 09 2023].
- [55] „www.xometry.eu/en/infographic-design-rules-for-3d-printing/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 16 09 2023].
- [56] „www.ms-kb.msd.unimelb.edu.au/next-lab/3d-printing/design-guidelines,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 16 09 2023].
- [57] C. T. SMYTH, „FUNCTIONAL DESIGN FOR 3D PRINTING, DESIGNING PRINTED PRINTED THINGS FOR EVERYDAY USE, 3. kiadás, ISBN: 9780692934418,” 2013-17.
- [58] „www.eplus3d.com/accuracy-of-3d-printed-parts.html,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 07 2023].
- [59] H. István, „Additív szerszámgyártás technológiájának fejlesztése járműipari alkatrészek gyártásához, doktori értekezés,” Széchenyi István Egyetem, Győr, 2020.
- [60] L. Zsidai és R. Z. Keresztes, „CNC technológiák szubtraktív és additív gyártás-gyakorlati oktatási tananyag a műszaki szakképzésben résztvevőknek, egyetemi hallgatók számára készített gyakorlati oktatási tananyag, (EFOP 3.4.3-16-2016-00012),” MATE-MI-SZIC, Gödöllő, 2018.
- [61] „www.pollen.am/design_for_3d_printing_wall_thickness/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 15 06 2023].
- [62] „www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/ibox-revealed-as-the-worlds-smallest-resin-3d-printer/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2023].
- [63] „all3dp.com/1/large-format-3d-printer-large-scale,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 06 2023].

- [64] „www.arup.com/projects/additive-manufacturing,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 01 08 2023].
- [65] „<https://all3dp.com/1/the-best-generative-design-software/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 08 01 2023].
- [66] „www.3dnatives.com/en/the-top-design-softwares-for-1505236/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 08 2023].
- [67] „www.plm.automation.siemens.com/media/global/en/Siemens-PLM-Generative-Design-ebook-mi-63757_tcm27-31974.pdf,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 08 2023].
- [68] „<https://altairuniversity.com/49668-optimized-skate-truck-design-for-additive-manufacturing-with-altair-inspire/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 08 2023].
- [69] „<https://3dprintingindustry.com/news/ntopology-commercializes-generative-design-software-with-the-ntop-platform-157530/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 08 2023].
- [70] „<https://www.neofab.fr/nouveaute-markforged-simulation/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 08 2023].
- [71] „www.netfabb-basic.software.informer.com,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 15 08 2023].
- [72] „<https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/>, AMFG/3D Printing Support Structures: A Complete Guide, 17 October 2018,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 19 08 2023].
- [73] H. Amir, S. A. Babak, A. G. Odesi és . M. Mohsen, „Dynamic loading of direct metal laser sintered AlSi10Mg alloy: Strengthening behavior in different building directions,” *Materials & Design*, %1. kötet Volume 159, pp. 201-211, 5 December 2018.
- [74] „www.help.autodesk.com/view/MSHMXR/2019/ENU,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 25 08 2023].
- [75] „Form Cure time and temperature settings,” Formlabs, [Online]. Available: https://support.formlabs.com/s/article/Form-Cure-Time-and-Temperature-Settings?language=en_US.
- [76] „www.zaccord.com/blog?id=10, Mi is az SLA 3D nyomtatás?,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 05 09 2023].
- [77] L. Zsidai, Integrált gyártórendszerek FMS/CIM/LEAN, Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó, ISBN: 9789631254037, 2016.
- [78] „insta3dp.com,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 29 08 2023].
- [79] „www.plasticstoday.com/3d-printing/additive-manufacturing-sector-soars-almost-20-2021-says-wohlers-report,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 09 08 2023].
- [80] „<https://amfg.ai/2020/04/01/3-ways-connectivity-will-enhance-your-additive-manufacturing-operations/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 09 08 2023].

- [81] „www.additive.sandvik/en/products-services-am/metal-powder/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2023].
- [82] „www.semanticscholar.org/paper/IN-SITU-MELT-POOL-MONITORING-AND-THE-CORRELATION-TO-Alberts-Schwarze/5afc5dec3d3abf54149f28bad711570341ee7133/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2023].
- [83] „www.digitalengineering247.com/article/real-time-process-monitoring-for-metal-additive-manufacturing/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2023].
- [84] „<https://precise.zeiss.com/en/2022/from-powder-to-performance/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2023].
- [85] „<https://precise.zeiss.com/en/2022/from-powder-to-performance/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 11 08 2023].
- [86] „<https://minifactory.fi/industrial-3d-printer/quality-assurance/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 13 08 2023].
- [87] „<https://ai-build.com/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 13 08 2023].
- [88] „<https://blog.siemens.com/2023/05/the-factory-of-the-future-for-3d-printing/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [89] „www.automationalley.com/articles/factory-of-the-future-6-main-principles/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [90] „www.sheffield.ac.uk/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [91] „www-objects.markforged.com/craft/materials/A2-and-D2.pdf,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [92] „[26 www.metal-am.com/articles/process-and-quality-control-for-3d-printing-sigma-labs-printrite3d/](http://26www.metal-am.com/articles/process-and-quality-control-for-3d-printing-sigma-labs-printrite3d/),” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [93] „<https://all3dp.com/2/best-3d-printer-test-print-3d-models/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [94] „www.nist.gov/topics/additive-manufacturing/resources/additive-manufacturing-test-artifact/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [95] „www.metal-am.com/articles/standards-for-metal-3d-printing-a-global-perspective/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 08 2023].
- [96] „www.metal-am.com/articles/safety-management-in-metal-3d-printing/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [97] „<https://all3dp.com/researchers-sutd-develop-recycling-process-sustainable-3d-printing/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].

- [98] „<https://revelationmachinery.com/product/markforged-gen-1-metal-x-3d-printer-2017-with-washer-and-sintering-oven/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [99] „<https://all3dp.com/1/3d-printing-for-mass-production/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [100] „<https://formlabs.com/eu/3d-printers/form-auto/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [101] „<https://www.carbon3d.com/resources/case-study/adidas/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [102] „<https://n-e-r-v-o-u-s.com/kinematics/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].
- [103] „<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/new-balance-midsoles/content/new-balance-shoes-with-3d-printed-midsoles/>,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 20 08 2023].

Mellékletekhez

- [104] G. Kalácska , R. Z. Keresztes és M. Kozma, Kalácska G Keresztes R Kozma M ; Zsidai L Szerkesztő: Kalácska Gábor Műszaki polimerekről gépészmérnököknek: alapismeret, technológia, tudomány ISBN 9789631276923, Gödöllő: Quattroplast Kft., 2017.
- [105] „www.freedee.hu/tizezres-darabszamok-fuse-1-sls-nyomtatoval-az-agc-glass-hungary-nel/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 17 07 2023].
- [106] „www.freedee.hu/egy-kompozit-3d-nyomtato-valodi-erteke/markforged-x7-kompozit-nyomtato/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 27 08 2023].
- [107] „formlabs.com/eu/blog/wohler-rapid-prototyping/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 10 07 2023].
- [108] „www.freedee.hu/funkcionalis-prototipusok-asztali-sla-3d-nyomtatassal-tobbfele-alapanyagbol/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 10 07 2023].
- [109] „www.freedee.hu/mestermintak-kis-es-kozepes-szeriagyartas-formlabs-3d-nyomtatokkal/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 27 07 2023].
- [110] „www.freedee.hu/schott-hatekonyabb-gyartas-es-elegedettebb-vevok-3d-nyomtatassal/,” [Online]. [Hozzáférés dátuma: 07 08 2023].

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

1.	NÉMETH András, MILÁVECZ Richárd	Iparban használatos vízminőségek
2.	SZILÁGYI Zsombor Dr., SZUNYOG István Dr.	Mérések a gáziparban
3.	BARNA Lajos Dr., EÖRDÖGHNÉ MIKLÓS Mária Dr., SZÁNTHÓ Zoltán, BALLA József Dr.	A biztonságos ivóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei
4.	BORBÁS Lajos Dr.	Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben
5.	BERENCSI Miklós, BERECHKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFFY Krisztina	Kerékpárosbarát közlekedéstervezés
6.	TÜDŐS Tibor, VARJÚ György Dr., PETRI Kornél Dr., GÁBOR András	A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet)
7.	GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., VÁRADI András	Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal
8.	KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó	A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv

2018.

9.	BLAZSOVSZKY László	A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai
10.	CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDVARDY Péter	Orvostechnológiai továbbképzés ismeretanyaga
11.	NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza	A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és útügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer
12.	SZILÁGYI Zsombor Dr., HORÁNSZKY Beáta	Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet)
13.	SZILÁGYI Zsombor Dr.	Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók
14.	S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté	Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével
15.	BALIKÓ Sándor Dr., CSŰRÖK Tibor Dr., NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, ZSEBIK Albin Dr.	Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
16.	DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor	Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet
17.	TÜDŐS Tibor, KRUPPA Attila	Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató
18.	FENYVESI Zsolt	Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása

- | | | |
|-----|--|---|
| 19. | GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás | Nagyméretű informatikai beruházásoknál (fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I. – II. kötet) |
| 20. | DIVÓS Ferenc Dr. | Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés – Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek |
| 21. | KARÁCSONYI Zsolt Dr. | Faanyagok tartós szilárdsága |
| 22. | BARNA Lajos Dr., ERDEI István, JASPER Andor Dr., TAKÁCS Gyula | Segédlet épületek csatorna-berendezéseinek tervezéséhez |
| 23. | ANTÓK Péter István, FÜZÉR Ferenc, SÁRKÖZI András | Fényvezető kábelszakaszok műszaki-minőségi ajánlás gyűjteménye |
| 24. | JANCSÓ Béla, KULCSÁR Alexandra Dr., NÉMETH Gábor, VÍMI Zoltán Dr., DÉRI Lajos, SZIMANDEL Dezső | Vízjogi engedélyezési eljárással kapcsolatos dokumentációk és engedélyeztetéssel kapcsolatos követelmények a 2018.01.01-én hatályba lépett 41/2017. (XII.29.) BM rendelet alapján |
| 25. | TAKÁCS Bence Dr., SIKI Zoltán Dr., ÉGETŐ Csaba Dr., BÉNYI László | Mérnökgeodéziában alkalmazott alapponthálózatok – A jó gyakorlat bemutatása mintapéldákkal |
| 26. | MÓCZÁR Balázs Dr., LAUFER Imre, TÓTH Gergő, WOLF Ákos | Korszerű támszerkezetek tervezése |
| 27. | HALÁSZ Györgyné Dr., CSERVENYÁK Gábor, TUCZAI Attila, VIRÁG Zoltán | Különböző funkciójú épületek klímatechnikája II. |
| 28. | KÁDI Ottó, JÓZSA Bálint | Kerékpáros balesetek létesítmények szerinti vizsgálata |
| 29. | GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., PELLER József Bendegúz | Hőteljesítménymérési tényező alkalmazása távhőrendszerek optimális szabályozásának modelljében |
| 30. | GARBAI László Dr., SÁNTA Róbert Dr., JASPER Andor Dr. | A kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása – Tervezés és üzemeltetés |
| 31. | LADÁNYI Gábor Dr. | Diagnosztika a karbantartásban |
| 32. | MÉSZÁROS János, MOLNÁR Tibor, RITZL András | KIÜRÍTÉSI ÉS MENEKÜLÉSI ÚTVONALBA ÉPÍTETT AJTÓK tervezési segédlet (2018) |

2019.

- | | | |
|-----|---|---|
| 33. | BLAZSOVSZKY László | Földgáz elosztóvezetékek üzemeltetése |
| 34. | DR. SZILÁGYI Zsombor | A megújuló energiahordozók jövője Magyarországon |
| 35. | FORGÁCS Lajos Dr., HAIDEGGER Tamás Dr., PÓLYA Endre ifj. | Új fejlesztések, innovatív megoldások az orvostechnológia terén |
| 36. | VARRÓ Beáta, KIS András Dr. | Magyarországon előforduló, épületekbe beépített faanyagokat károsító gombák vizsgálata és azonosítása DNS diagnosztikával |
| 37. | MANNINGER Marcell, SZEPESHÁZI Attila, SCHEURING Ferenc, MOLNÁR György | Munkatér határoló szerkezetek |
| 38. | KORSÓS András, RÁDULY Zsolt | A közterületi és belterületi térfigyelő kamerarendszerek tervezési irányelvei |
| 39. | GERGELY Edit, BEZEGH András Dr. | Módszertani útmutató az üvegházhatású gázok közvetlen és közvetett kibocsátásának számítására |

- | | | |
|-----|---|---|
| 40. | BEZEGH András Dr., BITE Pálné Dr.,
GERGELY Edit | Városi környezetvédelem (Fenntartható és okos városok) |
| 41. | GÓDOR Balázs, KÁSA László Dr.,
SZÉKELY Bence | Híddaruk méretezési segédlete (2019.) |
| 42. | FÜRJES Andor Tamás, KOTSCHY
András, NAGY Attila Balázs, CSOTT
Róbert | Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló
szituációkban |
| 43. | KARÁCSONYI Zsolt Dr. | Faanyagok tartós szilárdsága
Faanyagok szilárdságának változása az idő függvényében |
| 44. | BALIKÓ Sándor Dr., ORBÁN Tibor,
VARGA Péter, ZSEBIK Albin Dr. | Ötletlapok II. – Energiahatékonyság növelő ötletek
egyszerű energetikai és gazdasági számításai |
| 45. | PRIMUSZ Péter, PhD. | Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése
talajstabilizációk figyelembevételével |
| 46. | NÉMETH Balázs, HÁMORI Sándor,
KOSTYÁK Attila, VÍGH Gellért | Különböző funkciójú épületek klimatechnikája III.
Segédlet ipari épületek lég- és klimatechnikai
rendszereinek tervezése |
| 47. | JANCSÓ Béla, KAVECZKI Gergely,
KÓCZÁN Gábor, LABORCZI Tamás,
KNOLMÁR Marcell, RAUM László | Csapadékvízgazdálkodás tervezési követelményei
Hogyan tervezzünk városi csapadékelvezető rendszereket |
| 48. | DOHÁNY Máté, SCHVANNER
Norbert | Kerékpárosok sebességének felülvizsgálata jelzőlámpás
csomópontokban |
| 49. | JÓZSA Bálint, S. VÍGH Judit | Sebességcsökkentés hatásainak vizsgálata gyorsforgalmi
utakon |
| 50. | ZSEBIK Albin Dr., NOVÁK Dániel | Projektlapok I. – Energiahatékonyság növelő javaslatok
projektlapjai |
| 51. | MÓGA István Dr. | Beruházási projektek szabályozási és szabvány
környezete, Tervezési követelmények meghatározása |
| 52. | GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH
József Dr., NÓGRÁDI Gábor,
RÁTKAY Tamás | Informatikai Tervező szakmai minősítő rendszere
(Informatikai szakmai terület illesztése a Mérnök Kamarai
működési rendbe és rendszerekbe)

I. kötet: Konceptió és modell
II. kötet: Modell illesztése
III. kötet: Tudástár |
| 53. | VIRÁG Zoltán, GYURKOVICS Zoltán,
SZAKÁL Szilárd, VIRÁG Zsolt,
ORCSI Attila | Országos Tűzvédelmi Szabályzat épületgépész
értelmezése a szakmai gyakorlatban
Segédlet a gyakorló épületgépész mérnökök számára I. |

2020.

- | | | |
|-----|-------------------------------|--|
| 54. | KISS Jenő Dr., CSERMELY Gábor | JAVASLAT az egyszerű bejelentésű lakóépület
megvalósításának – tervezés építés – módszerére |
|-----|-------------------------------|--|

55.	SZILÁGYI Zsombor Dr.	A hidrogén a környezetbarát energiahordozó, Hidrogén az energetikában
56.	VARGA Tamás, SZEDENIK Norbert Dr., KOVÁCS Károly Dr., KRUPPA Attila, KULCSÁR Lajos, KAPITOR György, TURI Ádám	A nem norma szerinti villámvédelem egységes műszaki követelményrendszerének kialakítása és javaslat a teljes villámvédelmi szabályrendszer jövőbeli egységesítésére
57.	KÁDI Ottó	A gyalogsközlekedés közúti keresztezései
58.	MOLNÁR Szabolcs	„Hulladékból konnektorba” A települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának lehetőségei
59.	VÁRDAI Attila	Segédlet szabadidős létesítmények tartószerkezeti tervezéséhez
60.	BEJÓ László Dr.	Szénlábnyom-elemzés készítése a faiparban
61.	JANCSÓ Béla, NÉMETH Gábor, SZIMANDEL Dezső	Szakmai útmutató vízellátási-művelési tervezők számára a 2020 január 1-én hatályba lépett „VIZEK keretrendszer” használatához
62.	FELLEGI Zsóka, KARAFI Balázs, KOCH Edina, KOVÁCS Gábor, MURINKÓ Gergő, TÓTH Gergely József	Munkagödrök és földművek víztelenítése
63.	HOLÉCZY Ernő, OLÁH Róbert, SIKI Zoltán Dr., TAKÁCS Bence Dr., TÓTH Zoltán Dr., VARGA Tibor	Módszertani útmutató az elavult ingatlan-nyilvántartási térképek korszerű technológiákkal végzett felújításához
64.	GÁBORI László Dr., MOLNÁR Bálint Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás	Az Informatikai Tervező tervezési segédlete
65.	NÁDASDY Tamás, TOMASCHEK Tamás, PALÁSTY István, SZECSŐ Dániel Géza	Dinamikus forgalomirányítás tervezői segédlete gyorsforgalmi úthálózat esetén
66.	LENGYEL István	Szakmai útmutató szolgalmi jogok alapításához (mérnöki segédlet)
67.	NÉMETH Balázs, SZLOVÁK Krisztián, VÍGH Gellért	Épületgépészeti tervezéshez praktikus, gyakorlati adatbázis
68.	FÜRJES Andor Tamás, BORSINÉ Arató Éva, NAGY Attila Balázs, ILLYÉS László, BORSI Gergely	Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban (példatár)
69.	BORBÁS Lajos Dr., GONDA Zoltán	Optikai feszültségvizsgálat – Kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére, szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének optimalizálására

2021.

70.	BLAZSOVSZKY László	A gázipar és a kéményseprő-ipar határterületeinek szabályozási anomáliái a szakmagyakorlók és a felhasználók szemszögéből
71.	FORGÁCS Lajos Dr., NAGY Gábor, RÉV Zoltán	Kórháztervezés új szempontjai a 21. században - Korszerű kórházak infrastrukturális egységei
72.	HOLÉCZY Ernő, KISS Albert Miklós, KOVÁCS István, TAKÁCS Bence Géza Dr., TÓTH Zoltán Dr.	M.2.-2021. Mérnökgeodéziai tervezési segédlet
73.	BEJÓ László Dr.	Az Ipar 4.0 alkalmazási lehetőségei a faipar területén

- | | | |
|-----|---|---|
| 74. | BORBÉLY Dániel, HUDACSEK Péter, KARNER Balázs, KOVÁCS László, SÁNDOR Csaba | Monitoring, a geotechnikai kockázatkezelés eszköze |
| 75. | FELFÖLDI Krisztina, JÁMBOR András, TÓTH Sándor, BÜKI Gábor, GÓDOR Balázs | Emelőgépek időszakos vizsgálatának eljárásrendje |
| 76. | GYURKOVICS Zoltán, RÉBAY Lajos, NAGY Bernát | Szakmai útmutató az épületgépész felelős műszaki vezetők és műszaki ellenőrök számára |
| 77. | ZSEBIK Albin Dr., NOVÁK Dániel, PAPP Ábrahám | Hulladék hő hasznosítás - hűtés és fűtés összekapcsolása
Segédlet az elemzéshez és gyakorlati példák bemutatása |
| 78. | CZINE Ferenc, HIRKÓ György | Elektromos meghajtású mikromobilitási eszközök -
Jellemző paraméterek |
| 79. | KALMÁR Tamás, LÁNYI Péter Dr., HÓZ Erzsébet | Kerékpárút hálózatok vizsgálata a fejlesztések és
úthasználók tapasztalatai alapján |
| 80. | VARGA Tamás, FARKAS Péter János, TOKODY Dániel Dr., ZSARNOVSZKI Attila, MÉSZÁROS Tamás, VERESS Árpád | Építmény villamossági tervezés robbanásveszélyes
környezetben |
| 81. | VONA Márton Dr., BALATONYI László Dr., TÉCSŐY István | Dombvidéki víz visszatartás, kisvízfolyások szabályozása
természet közeli megoldásokkal
Kisléptékű víz visszatartás, kistelepülés-léptékű
vízmegtartó megoldások |
| 82. | ZANATHY Valéria, BUZÁS Györgyi, TÓTH László | Acélszerkezetek korrózió elleni védelme – Acélszerkezetek
korrózió elleni védelmére vonatkozó szabványok,
előírások, szakmai tapasztalatok összefoglalása |
| 83. | JÓZSA Bálint, DOHÁNY Máté | DDI, avagy a fordított gyémánt csomópontok vizsgálata és
magyarországi alkalmazhatósága |
| 84. | SZÉPSZÓ Gabriella, ALLAGA-ZSEBEHÁZI Gabriella, LAKATOS Mónika, SZENTES Olivér, TAKSZ Lilla, SELMECZI János Pál, CZIRA Tamás Dr., CSÓKA Gergely, BAKA György | Éghajlatvédelmi vizsgálatok módszertana és az azt
megalapozó adatbázisok alkalmazása |
| 85. | ZSIGMONDI András, MARIÁN Gábor, WÉBER László | A műszaki egyenértékűség és helyettesítő termék
egyenértékűségének megállapítási módjai |
| 86. | NAGY János, HORVÁTH Rita, KAPITOR György, MERTLI Ferenc, PAPP Ábrahám, SITKU György, ZSEBIK Albin Dr. | Világítástechnika - segédlet az EKR dokumentáció
készítéséhez – Alapismeretek és mintapéldák |
| 87. | CSENDES János, VELLER Tamás | Épületautomatika – Összefüggésben az
Energiahatékonysági Kötelezettségi Rendszerrel |

2022.

- | | | |
|-----|--|---|
| 88. | FÖLDI László József Dr., BERENCSI Bence | Ipari gépek CE jelölése és biztonsága az EU-s és hazai
szabályozás tükrében |
| 89. | SZILÁGYI Zsombor Dr., VADÁSZI Marianna Dr. | Irányelv új földgáz- és villamos energia szerződéskötéshez |
| 90. | MÓCZÁR Balázs Dr., CSORBA Gábor, GRITSCH Ákos, KRISTON Gábor, MIHUCZ Tibor, SZENDEFY János Dr., SZILÁGYI Katalin | Segédlet ipari padlók geotechnikai és statikai tervezéséhez,
kivitelezéséhez |

91.	FELFÖLDI Krisztina, GÓDOR Balázs, NAGY Pál, RADVÁNYI G. Levente	G-D-36 Tanúsítvány kiadásához kompetencia-követelmények kidolgozása
92.	BUZÁS Zoltán, KÁLMÁN Miklós, BÖLSEI Tamás, LUKÁCS Tamás	A tervdokumentációk tartalmi és formai követelményeinek átdolgozása, különös tekintettel a Hír-Közmű bevezetésére. A Tervezés, Engedélyezés, Kivitelezés segédlet módosítása (92./1-2-3.)
93.	SIKI Zoltán Dr., CSEMNICZKY László, HOLÉCZYNÉ KAJTÁR Dóra, LEHOCZKY Máté, RÉPÁS Zoltán, TÓTH István	Szakmai útmutató digitális tervezési alaptérképek készítéséhez. A minőségi mérnöki munka segítése, a jó gyakorlat bemutatása, javaslat a térképek rétegszerkezetére és az alkalmazandó jelkulcsokra
94.	CSERMELY Gábor, TÓTH Péter	Szakmai útmutató a magasépítési kivitelezési munkák minőségellenőrzésére
95.	MARIÁN Gábor, ZSIGMONDI András	Az építési beruházások műszaki átadás-átvételi eljárása – Szakmai ajánlás az építési beruházások műszaki átadás-átvételi eljárására
96.	BARNA Sándor, MOLNÁR Tibor Dr.	Segédlet az AERMOD view szoftver használatához a légszennyező anyagok terjedési modellezéséhez
97.	BAKA György	A talajnak, mint természeti erőforrásnak a védelme a beruházások megvalósítása során
98.	BLAZSOVSZKY László	A gázipari szakmagyakorlók megváltozott felelőssége, hatásköre és a mindennapok gyakorlatának anomáliái a megváltozott jogszabályi környezetben
99.	FÜRJES Andor Tamás	Elektroakusztika elméleti és gyakorlati áttekintés
100.	RÁCZ Tibor, KUN Csaba, BALATONYI László Dr.	ITVT Integrált Települési Vízgazdálkodási Terv tervezési segédlet

2023.

101.	SZILÁGYI Zsombor Dr., BLAZSOVSZKY László	Az energiahordozók jövője
102.	BLAZSOVSZKY László	Szakmai útmutató felhasználási helyek gázellátását biztosító elosztóvezeték leágazásának létesítéséhez
103.	ÁKOSHEGYI György Dr., BORBÉLY Tibor, DIÓS András, EÖRDÖGH Zsolt	Medencés fürdők vízgépészeti tereinek tervezési szempontjai
104.	KISS Jenő dr., METZING Ferenc dr., CSERMELY Gábor, dr. HEGYI Dezső, KÖNCZÖL Gyula, DEZSŐ Zsigmond	Szakmai Útmutató az épületek, épületszerkezetek bontásához
105.	MÓGA István Dr.	Atomerőművi alapok
106.	BAK Edina, FEJES Gábor, HONTI Imre, HUDACSEK Péter, SCHELL Péter	Talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatok, azok megtervezése és eredményeinek felhasználása a geotechnikai tervezői gyakorlatban
107.	EGRI Sándor, BUZÁS Zoltán	AutoCAD alapon készített tervdokumentációkból EHO szerinti XML fájl készítése (objektumsablon készítése)
108.	BONDOR Gabriella, CSORDÁS Szilveszter, KANOSIK Ilona, PÓLYA Endre, VARJÚ József	Szakmai ismeretek a jogosultsági vizsgára
109.	KAKUK Ilona	Az Informatikai Tervező Szakmai Útmutatója (109./1-2-3.)

- | | | |
|------|---|---|
| 110. | GIORIS Nikolaos, MENYHÁRT István Zsolt, OLÁH Róbert, TAKÁCS Bence dr., VASS Imre | Digitális mellékletek készítése az M.2 (2021.) mérnökgeodéziai tervezési segédlethez |
| 111. | ZSIDAI László Dr., SARANKÓ Ádám Dr., SZABÓ Péter | Az additív technológiák terméktervezési és technológiai sajátosságai |
| 112. | REINIGER Róbert, BARNA Sándor, BITE PÁLNÉ DR. PÁLFFY Mária, MIHICS Dalma, PINTÉR István | A Li-ion alapú akkumulátor, illetve akkumulátor részegység gyártás környezetvédelmi hatásági engedélyezésének környezetvédelmi alapkövetelményei - Szakmai segédlet környezetvédelmi szakértők, illetve hatásági eljárási szereplők részére |
| 113. | TOKODY Dániel Dr., SCHOTTNER Károly, HADDAD Richárd, ADY László, ÁGOSTON Gergő, DRABIK Gergő, HAN Xiaoping, CSAPÓ Dániel, SZŰCS Marcell, FELHŐS Dávid Dr. | Napelemes rendszerekkel együttműködő energiatárolók létesítése |
| 114. | GYIMESI András Dr., BOHÁCS Gábor Dr., SÜLLE Miklós, GÓDOR Balázs | Építőgépezés mesteriskola tantárgyi felépítés és a hozzá kapcsolódó tematika kidolgozása |
| 115. | BOROS János | Az atomerőművi rendszerek és rendszerelemek tervezésénél figyelembe vett elvek összefoglalása |
| 116. | PRIMUSZ Péter Dr. | Hajlékony útpályaszerkezetek szükséges erősítőrétegének meghatározása roncsolásmentes teherbírásmérés alapján |