

37. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2025. április 22–24.
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

**ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK ALKALMAZÁSÁNAK
VIZSGÁLATA GÉPJÁRMŰTECHNIKAI ALKATRÉSZEK
GYÁRTÁSÁHOZ**

Jelige: *Tengerszem*

Pályamunka lezárásának időpontja: 2024. 05. 21.

2025.

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS	4
2.	ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK.....	6
2.1	MŰANYAG ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK	6
2.1.1	Sztereolitográfia (SLA)	6
2.1.2	Digitális fényfeldolgozás (DLP)	7
2.1.3	Olvasztott lerakásos modellezés (FDM)	8
2.1.4	Szelektív lézeres szinterezés (SLS).....	9
2.1.5	Poly-Jet.....	11
2.1.6	Többsugaras fúzió (MJF)	11
2.2	FÉM ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK	13
2.2.1	Kötőanyag kibocsátás.....	13
2.2.2	Közvetlen fém lézerszinterezés (DMLS) / szelektív lézerolvasztás (SLM).....	14
2.2.3	Elektronnyalábos olvasztás (EBM).....	15
2.2.4	Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM).....	16
2.2.5	Írányított energia lerakás (DED)	17
3.	ADDITÍV GYÁRTÁS ALAPANYAGAI	20
3.1	MŰANYAGOK	20
3.1.1	Általános műanyagok.....	21
3.1.1.1	Politejsav (PLA).....	22
3.1.1.2	Akrilnitril-butadién-sztírol (ABS).....	22
3.1.2	Műszaki műanyagok	23
3.1.2.1	Polikarbonát (PC).....	23
3.1.2.2	Polietilén-tereftalát (PET)	23
3.1.2.3	Nylon (PA)	24
3.1.2.4	Polipropilén (PP)	24
3.1.3	Nagy teljesítményű műszaki műanyagok.....	24
3.1.3.1	Poliéter-éter-keton (PEEK)	25
3.1.3.2	Poliéterketoneketon (PEKK).....	26
3.1.3.3	Poliéterimid (PEI)	26
3.2	KOMPOZITOK	27
3.2.1	Aprított szálerősítésű kompozitok	28
3.2.2	Folyamatos szálerősítésű kompozitok.....	29
3.3	FÉMEK.....	29
3.3.1	Titán	30
3.3.2	Alumínium	30
3.3.3	Acél	31
3.3.4	Nikkel-króm ötvözet (Inconel).....	32
4.	ADDITÍV GYÁRTÁS KRITIKUS ASPEKTUSAI	33
4.1	TECHNOLÓGIA ÉRTÉKELÉSE	35

4.2	TERVEZÉS.....	36
4.3	NYOMTATÁSI FOLYAMAT	36
4.4	UTÓKEZELÉS	39
4.5	ELLENŐRZÉS ÉS TESZTELÉS	40
5.	ADDITÍV GYÁRTÁSI PÉLDÁK AZ AUTÓIPARBAN	43
5.1	BMW	43
5.2	PORSCHE	46
5.3	BUGATTI	49
5.4	RENAULT TRUCKS.....	51
6.	AZ ADDITÍV GYÁRTÁSI FOLYAMAT LEVEZETÉSE EGY OKTATÁSI BOLYGÓMŰVÖN KERESZTÜL	53
6.1	BOLYGÓMŰ MECHANIZMUS MEGHATÁROZÁSA	54
6.1.1	A bolygómű mechanizmus.....	54
6.1.2	Az elemi fogazat tervezése.....	59
6.2	3D TERVEZÉS	62
6.2.1	3D Tervezési szempontok	63
6.2.1.1	Hídépítés problémája.....	64
6.2.1.2	Függőleges tengelyű furatok	64
6.2.1.3	Horizontális furatok.....	65
6.2.1.4	Túlnyúlások.....	65
6.2.1.5	Sarkok.....	66
6.2.1.6	Függőleges csapok	66
6.2.2	Szeletelés	66
6.3	NYOMTATÁS	69
6.3.1	Nyomtatók és a felhasznált alapanyagok	69
6.4	ELTÁVOLÍTÁS A NYOMTATÓ TÉRBŐL, UTÓKEZELÉS ÉS ÖSSZESZERELÉS	71
6.4.1	Eltávolítás a nyomtató térből.....	71
6.4.2	Alátámasztások eltávolítása	71
6.4.3	Furatok javítása és rétegvonalak eltüntetése	71
6.4.4	Összeszerelés.....	72
7.	ÖSSZEGZÉS.....	75

1. BEVEZETÉS

Az alkatrészek gyártása és a gépjárműipar az utóbbi évtizedek során olyan mértékben megerősödött, hogy ma már elképzelhetetlen volna a gépjárművek modernizációját és fejlesztését megemlíteni az alkatrészeket biztosító modern gyártástechnológiák felhasználása nélkül. A gépjárműtechnikai alkatrészek körülöttünk vannak, és minden gépjármű működése és teljesítménye alapvetően az alkotóelemek minőségétől és megbízhatóságától függ. Az autóipar világszerte folyamatosan fejlődik, és az egyre növekvő környezeti és fogyasztói elvárásokkal szembesülve kénytelen reagálni a fenntarthatóság és hatékonyság kihívásaira. Az alkatrészgyártás területén felmerülő új technológiai megközelítések és eljárások, különösen az additív gyártástechnológiák, egyre inkább előtérbe kerülnek, és új perspektívákat nyitnak az alkatrészek tervezésében és előállításában. Az alkatrészek gyártásának és alkalmazásának megújítása alapvetően meghatározza a gépjárműipar jövőjét.

Additív gyártástechnológiának nevezzük az olyan gyártási technológiát, mely során anyag hozzáadással rétegről rétegre felépítve hozunk létre egy 3 dimenziós tárgyat, másnéven 3D nyomtatásként is ismert. Az additív gyártástechnológiák kibővítik az alkatrészgyártás lehetőségeit a gépjárműiparban. Ezek a technológiák a gyártási folyamatok forradalmi átalakítására képesek, lehetővé téve az alkatrészek gyors és pontos elkészítését, minimalizálva az anyagvesztést és csökkentve a hagyományos gyártási módszerekkel járó terhelést a környezetre. Az additív gyártás rendkívül testre szabható és flexibilis, ez lehetővé teszi az alkatrészek komplex geometriájú és könnyen testre szabható kialakítását. Ami különösen fontos lehet a gépjárműgyártásban, ahol az alkatrészeknek gyakran egyedülállóan kialakítottak kell lenniük az optimális teljesítmény és hatékonyság érdekében. Az autóipar a fenntarthatóság irányába mozdul el, az additív gyártásnak köszönhetően a gyártási folyamatok zöldebbé és kevésbé energiavesztéssé válhatnak. Ebben az esettanulmányban részletes bemutatom az additív gyártástechnológiák alapelveit és működését. Ezzel szembevetődik, hogy miként különböznek a hagyományos gyártási módszerektől. Ezek a különbségek jelenthetnek előnyt és kihívásokat is a gépjárműalkatrészek gyártása szempontjából, különös tekintettel a minőségre, anyaghasználatra és fenntarthatóságra tekintve. A tanulmányban egy gyakorlati példán keresztül is megvizsgálom az additív gyártás lehetőségeit. Erre a célra megterveztem egy oktatási bolygómű modellt, amely kinyomtatásra is került. A bolygómű mint a hajtások egyik lehetséges kialakítása egy gyakran használt mechanizmus a gépjárműiparban, ezért esett erre a választás. Például nehéz munkagépek és terepjárók kerekeinél alkalmazzák, mint úgynevezett véglehajtás, amely lehetővé teszi, hogy az erőátviteli rendszer teljes láncát alacsonyabb

nyomatékkal terhelje meg. Ezt a megoldást gyakran használják indítómotoroknál is, mint egy olyan eszközt, amely növeli a rendelkezésre álló nyomatékot. A bolygóművek geometria formája kellő képen bonyolult és komplex ahhoz, hogy nehéz feladatot adjon a 3D nyomtatónak. Így lehetőség van vizsgálni mire képes az additív gyártástechnológia.

2. ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK

Az alkatrészek rétegenként történő felépítéséhez használható technológiák igen változatosak, melyek a fejlesztés különböző szakaszaiban vannak. Számos technológia jelent meg annak érdekében, hogy a legkülönbözőbb anyagokat legyünk képesek felhasználni, valamint, hogy csökkentsük az építési időt és javítsuk az alkatrészek szilárdságát. Egyes technológiák a prototípusok gyártásának kereskedelmi forgalomban kapható eszközei, míg mások gyorsan a sorozatgyártás életképes formáivá válnak, és közben egyre újabb technológiák jelennek meg. Ezek a különböző additív gyártás módszerek különböző alkalmazott anyagtipusok szerint osztályozhatók, így itt válik ketté a műanyag és a fém 3D nyomtatás. Eddig lényegében megegyeztek a gyártási lánc egyes elemei, viszont a használni kívánt anyag egyértelműen meghatározza az alkalmazható additív gyártástechnológiákat. Az additív gyártástechnológiákat három csoportba tudjuk kategorizálni, ezek a következők: folyadék alapú, por alapú és szilárd alapú. A folyadék alapú technológiák azt jelentik, hogy az alapanyag, amiből az alkatrész elkészül az folyadék, tehát a gyártás során a folyadékot a nyomtató berendezés megszilárdítja és így készül el az alkatrész. Por alapú technológiák esetében por alapanyagot használunk fel a nyomtatáshoz, míg szilárd alapú 3D nyomtatási technológiáknál egy úgynevezett filamentet használunk, ami nem más, mint az alapanyag huzal formában feltekercselve. Ez az alapanyag lehet műanyag és fém is. A huzal átmérője általában 1,75mm és 2,85mm de lehetnek kivételek.

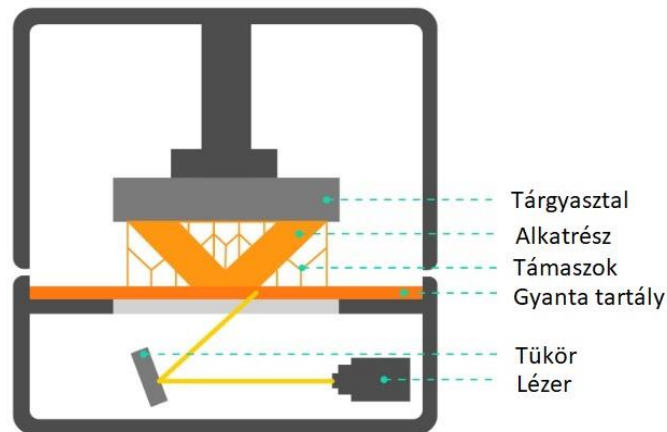
2.1 Műanyag additív gyártástechnológiák

2.1.1 Sztereolitográfia (SLA)

A sztereolitográfia¹ volt a világ első 3D nyomtatási technológiája, amelyet az 1980-as években találtak fel, és még mindig az egyik legnépszerűbb technológia a szakemberek körében. A fotopolimerizációnak nevezett folyamat során, az SLA gyantát 3D nyomtatók lézerrel keményítik (lásd 1. ábra). A fotopolimer gyantát egy tartályban tárolja a nyomtató és a lézernyalábot felülről a folyadék felületére irányozva történik meg a fotopolimerizáció, ezt hívjuk top-down nyomtatásnak. A rétegek fotopolimerizációja után a tárgyasztal folyamatosan mozogva emeli ki a folyadékból a már megkeményített gyanta rétegeket. Ez a működés a legelterjedtebb az SLA nyomtatók körében, de létezik olyan konstrukció is, ahol a gyanta egy

¹ Forrás: Subham Banerjee (2023): Additive Manufacturing in Pharmaceuticals. Szingapúr, Springer Nature

átlátszó tartályban található és a lézernyaláb alulról keményíti meg a gyantát az átlátszó tartály alján keresztül. Itt a tárgyasztalra fejjel lefelé építi fel a munkadarabot, ezt másnéven bottom-up nyomtatásnak nevezik.



1. ábra: Bottom-up SLA 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

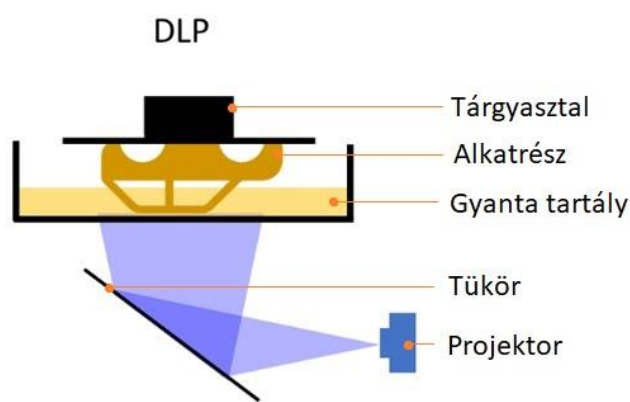
Az SLA alkatrészek rendelkeznek a legnagyobb felbontással és pontossággal, a legtisztább részletekkel és a legsimább felületkezeléssel az összes műanyag 3D nyomtatási technológia közül, de az SLA fő előnye a sokoldalúságában rejlik. Az anyaggyártók olyan innovatív SLA fotopolimer gyantaformulákat hoztak létre, amelyek optikai, mechanikai és termikus tulajdonságainak széles skálájával rendelkeznek, amelyek megfelelnek a szabványos, műszaki és ipari hőre lágyuló műanyagokéinak. Az SLA alkatrészek éles élekkel, sima felülettel és minimálisan látható rétegvonalakkal rendelkeznek. Az SLA kiváló lehetőség a szűk tűréseket és sima felületet igénylő, rendkívül részletes prototípusok, például öntőformák, mintázatok és funkcionális alkatrészek készítéséhez. Az SLA-t széles körben használják a mérnöki és terméktervezéstől kezdve a gyártáson át a fogászatig, ékszerészetig, modellkészítésig és az oktatásig számos iparágban.

2.1.2 Digitális fényfeldolgozás (DLP)

A DLP technológia² szintén folyékony hőre keményedő gyantákat alkalmaz az alkatrészek létrehozásához. A DLP eljárás során a folyékony gyantával töltött tartályt egy projektor nagy intenzitású fényének teszik ki, amely szelektíven, rétegről-rétegre haladva keményíti ki a gyantát a tárgyasztalon, így jön létre az alkatrész egy szilárd szelete (lásd 2.

² Forrás: Chander, P., Rupinder S., Sunpreet S., (2020, szerk.): 3D Printing in Biomedical Engineering. Németország, Springer Nature Singapore

ábra). A DLP eljárás egyszerre vetíti ki a 3D modell egy teljes rétegét, és minden egyes pontot egyszerre keményít ki. A DLP technológia is képes az alkatrészeket bottom-up nyomtatással vagy top-down nyomtatással nyomtatni. Az alulról felfelé irányuló DLP-konstrukciókat jellemzően asztali nyomtatókban használják, mivel maximalizálják az építési térfogatot, míg a felülről lefelé irányuló modelleket nagyobb ipari alkalmazásoknak tartják fenn. Sokan összekeverik az SLA-t és a DLP-t, mivel formájuk és működésük nagyon hasonló. A DLP-nyomtatók abban különböznek, hogy nem irányított lézerrel, hanem egy teljes réteg egyszerre történő kivetítésével keményítik a gyantát. A digitális vetítés csökkenti az alkatrész felbontását, de végső soron csökkenti az építési időt.



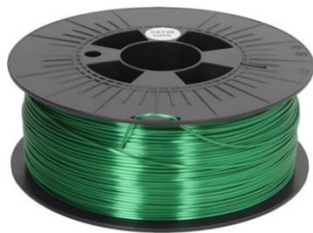
2. ábra: DLP 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

2.1.3 Olvasztott lerakásos modellezés (FDM)

Az 3D nyomtatási technológiák legelterjedtebb és legmegfizethetőbb fajtája az FDM nyomtatás³. Az eljárás egyszerűsége és a megfizethető alapanyagoknak köszönhetően. Általában úgy működnek, hogy egy tekercs filamentet betöltenek a 3D nyomtatóba, és azt, az extrudáló fejben lévő nyomtatófűvókához vezetik. A nyomtató fűvókáját a kívánt hőmérsékletre melegítik, hogy a filament szál (lásd 3. ábra) ott megolvadjon, ezután egy motor átnyomja a szálakat a fűtött fűvókán. A nyomtató ezután a megadott koordináták mentén mozgatja az extrudáló fejet, és az olvadt anyagot az építőplatformra helyezi le, ahol az lehül és megszilárdul (lásd 4. ábra). Amint egy réteg elkészült, a nyomtató egy újabb réteggel folytatja

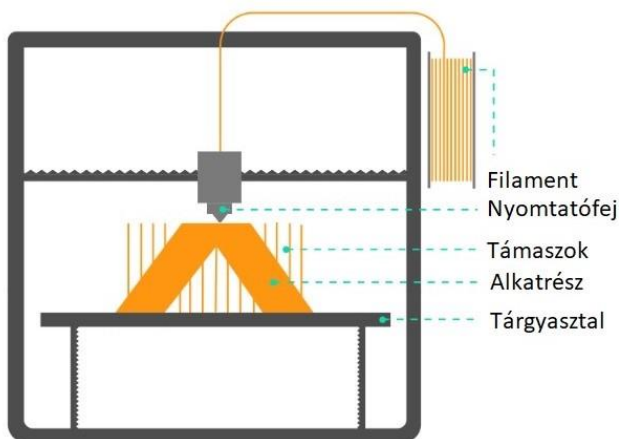
³ Forrás: Harshit K. D., J. Paulo D., (2021, szerk.): Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Németország, Springer International Publishing

a tárgy felépítését. A nyomtatásának ez a folyamata ismétlődik, rétegről rétegre haladva, amíg a tárgy teljesen fel nem épül.



3. ábra: 3DJAKE 1.75 mm átmérőjű PLA filament
(<https://www.3djake.hu/3djake/ecopla-ultra-satin-zoeld> letöltve: 2023.03.31.)

A tárgy geometriájától függően néha szükség van alátámasztó tartószerkezetek hozzáadására, például, ha a modellnek meredeken túlnyúló részei vannak. Ezeket a nyomtatás befejezésével szükséges eltávolítani. Az elkészült modell az eljárás egyszerűsége miatt nem a legesztétikusabb hiszen látszani fognak a rétegek vonalai. Ezt lehet javítani, ha professzionális FDM nyomtatóba fektetünk, ami részletesebb felbontással dolgozik ennek köszönhetően sokkal esztétikusabb felületet kaphatunk, valamint kis méretű geometriákat is képes nagy részletességgel megvalósítani.



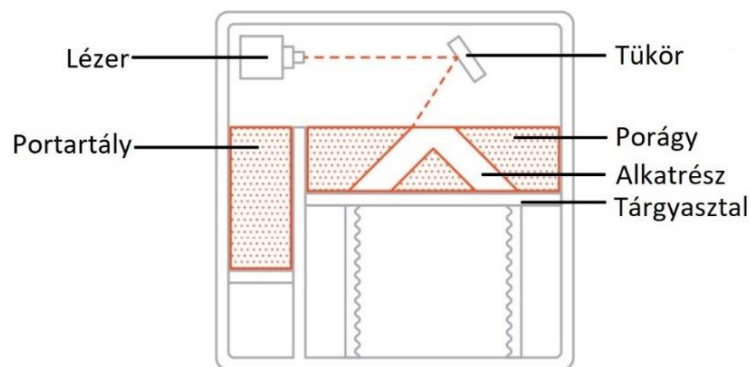
4. ábra: FDM 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

2.1.4 Szelektív lézeres szinterezés (SLS)

A szelektív lézeres szinterezés⁴ viszonylag egy új technológia, amelyet eddig főként gyors prototípusgyártásra és alkatrészek kisszériás gyártására alkalmaznak. Ez az additív

⁴ Forrás: Emerald Group Publishing Limited (2015): A Focus on SLM and SLS Methods in 3D Printing. Egyesült Királyság, Emerald Group Publishing

gyártástechnológia egy nagy teljesítményű lézer használatával olvasztja össze a műanyagpor részecskéit, így kapjuk meg a kívánt háromdimenziós alakú terméket. A lézer szelektíven olvasztja a porított anyagot azáltal, hogy az alkatrész háromdimenziós digitális leképezéséből a CAD-fájlból (számítógép által támogatott tervezés) vagy szkennelési adatokból generált keresztmetszeteket pásztázza a porágy felületén (lásd 5. ábra). Minden egyes keresztmetszet beolvasása után a porágyat egy rétegvastagsággal lejjebb engedik, új anyagréteget visznek fel a tetejére, és a folyamatot addig ismétlik, amíg az alkatrész el nem készül.

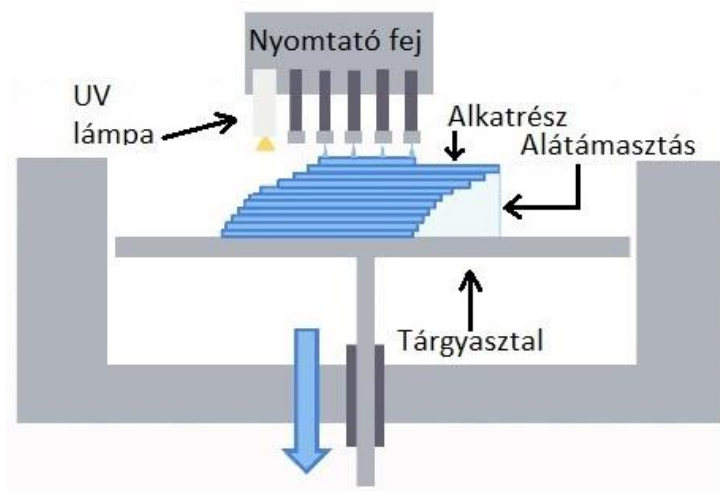


5. ábra: SLS 3D nyomtatási technológia
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Mivel a kész alkatrész sűrűsége a lézer csúcsteljesítményétől, nem pedig a lézer időtartamától függ, az SLS gép általában impulzuslézert használ. Az SLS 3D nyomtató a porágyban lévő ömlesztett poranyagot valamivel az olvadáspontja alá melegíti elő, hogy a lézer könnyebben tudja a kiválasztott régiók hőmérsékletét a maradék úton az olvadáspontig emelni. Az SLA és az FDM gépekkel ellentétben, amelyek a legtöbbször speciális alátámasztásokat igényelnek a túlnyúló minták gyártásához, az SLS-nek nincs szüksége külön adagolóra a tartóanyaghoz, mivel a készülő alkatrészt mindig szinterezetlen por veszi körül. Ez lehetővé teszi korábban lehetetlen geometriák megépítését. Továbbá, mivel a nyomtató kamrája mindig tele van poranyaggal, a több alkatrész gyártása sokkal kisebb hatással van a tervezés általános nehézségére és árára, mivel a fészekrakás néven ismert technika révén több alkatrész is elhelyezhető a gép határain belül. Egy tervezési szempontot azonban figyelembe kell venni az SLS-el lehetetlen üreges, de teljesen zárt elemet gyártani. Ennek oka, hogy az elembe lévő szinterezetlen por nem tudna kijutni az alkatrészből.

2.1.5 Poly-Jet

A PolyJet az anyagsugaras additív gyártási eljárások családjába tartozik⁵. A technológiát az Objet fejlesztette ki, amelyet később a Stratasys felvásárolt. Vannak más anyagsugaras nyomtatók is a piacon, de PolyJet márkanév alatt csak a Stratasys forgalmazza őket. A PolyJet 3D nyomtatók a hagyományos tintasugaras nyomtatókhoz hasonlóan működnek, de a tintacseppek kisugárzása helyett fotopolimer műanyag cseppeket keményítenek (lásd 6. ábra). A nyomtatás során a nyomtatófej az X- és Y-tengely mentén mozog a tárgyasztalon, és gyantacseppeket szór ki a platformra. Ugyanezen mozgás során a nyomtatófej ultraibolya fényt sugároz, ami kikeményíti a tárgyasztalra jutott cseppeket. A réteg elkészülte után a felépített platform lefelé mozog, hogy a nyomtatófej egy második réteget is elkészítsen. A nyomtatott tárgy ezután tovább növekszik, amíg a folyamat be nem fejeződik. Bonyolultabb geometriák, például túlnyúlások esetén a 3D nyomtató egy eltávolítható gélszerű tartóanyagot fúj ki. A nyomtatófejek több anyagot is össze tudnak keverni, hogy egyedi anyagtulajdonságokat és színeket érjenek el.



6. ábra: Polyjet 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

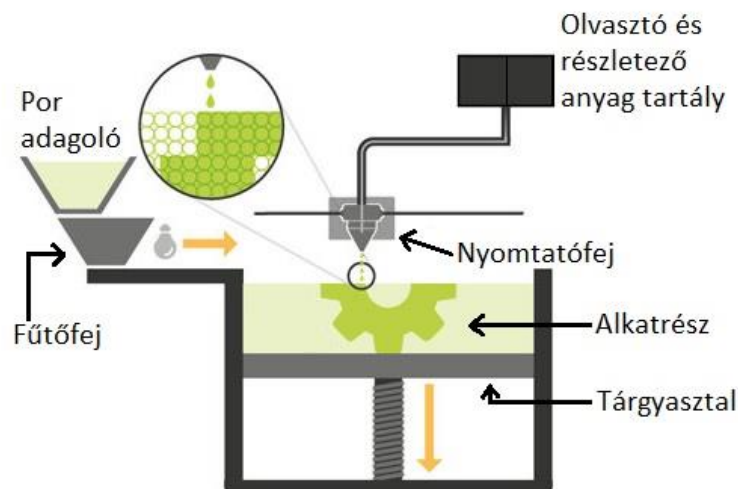
2.1.6 Többsugaras fúzió (MJF)

A többsugaras fúzió⁶ technikailag egy porágyfúziós 3D nyomtatási technológia. Az MJF-et a HP 2016-ban mutatta be, ez a technológia több évtizedes beruházásaira épül. A

⁵ Forrás: Lipson, H., és Kurman, M. (2013): The New World of 3D Printing. Németország, Wiley.

⁶ Forrás: Zapka, Werner. (2022): Inkjet Printing in Industry: Materials, Technologies, Systems, and Applications. Németország, Wiley.

technológia a nevét a több tintasugaras fejről kapta, amelyek elvégzik a nyomtatási folyamatot. Az anyag újbóli felhordását és a szerek elosztásával kapcsolatos folyamatokat különálló fejcsoportok végzik, amik mozognak a nyomtató ág fölött, így a felhasználó mindkét folyamatot egymástól függetlenül optimalizálhatja (lásd 7. ábra). A többsugaras fúzió nyomtatási folyamat során a nyomtató egy porréteget helyez el a nyomtatóágyra. Ezt követően egy tintasugaras fej fut végig a poron, ami egy olvasztó és egy részletező anyagot is felvisz rá. Ezután egy infravörös fűtőegység halad át a réteg fölött ezáltal az olvasztóanyag az alatta lévő réteggel összeolvad, míg a részletező anyaggal ellátott területek por formájában maradnak.



7. ábra: MJF 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

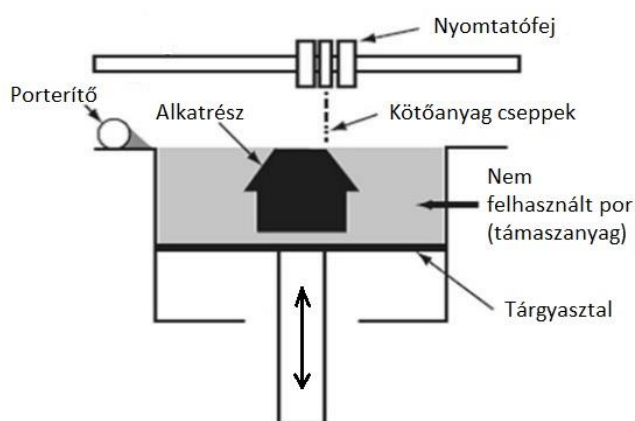
Ezek a por rétegek a nyomtatás befejezését követően egyszerűen leperegnek az alkatrész mellől, ami felszínre hozza a kívánt geometriát. Ezáltal a modell alátámasztására sincs szükség, mivel az alsóbb rétegek alátámasztják a föléjük nyomtatottakat. A MJF nyomtató abban különbözik a legtöbb más 3D nyomtatási technológiáktól, hogy minden egyes új anyag- és olvasztóréteg elhelyezése közben az előző rétegek még olvadtak. Ez lehetővé teszi, hogy mindkét réteg teljesen összeolvadjon, ami jobb nyomtatást biztosít, homogénebb lesz a végeredmény és finomabb részleteket eredményez. A nyomtatási folyamat befejezéseként a teljes porágy és a benne lévő nyomtatott alkatrész egy különálló feldolgozóállomásra kerül. Itt a laza, nem olvadt porrétegek nagy részét eltávolítják és elszívják, így a felesleges hulladék keletkezése helyett újra felhasználható. Bár az MJF-nyomtatók ára általában magasabb, mint az SLS-é, más szempontból költséghatékonyabbak lehetnek. Egyrészt az infravörös fény hatékonyabb energiaforrás, mint a lézer. Egy másik előnye, hogy valamivel jobb az újrahasznosítási aránya a fel nem használt pornak. Az MJF-nyomtatásokban keletkező

felesleges por körülbelül 80%-ban újrahasznosítható a következő nyomtatásokban. Az SLS esetében jellemzően csak az anyag 50-70%-át lehet újra felhasználni.

2.2 Fém additív gyártástechnológiák

2.2.1 Kötőanyag kibocsájtás

A kötőanyag kibocsájtás (binder jetting)⁷ technológiája fémalkatrészek és műanyagalkatrészek gyártására is használható. A technológia lényegében egyszerű műveleten alapszik, ez egy olyan 3D nyomtatási eljárás, ahol egy folyékony kötőanyag szelektíven megkötí a porágy egyes régióit. Az SLS-hez hasonló módon első lépésben egy kezdeti por réteget hord fel az építőplatformra, az SLS-től eltérően azonban, amely lézert vagy energiát használ a por szinterezéséhez, itt a kötőanyag megszilárdításához nem használ hőt. A kötőanyagot egy nyomtatófej juttatja a por felületre (lásd 8. ábra).



8. ábra: 3D nyomtatás kötőanyag kibocsájtással
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

A nyomtatófej a porfelület fölött mozog X- és Y-tengely mentén, miközben kötőanyagcseppeket helyez el, amelyek jellemzően 80 mikron átmérőjűek. Ezek a cseppek kötik össze a porszemcséket. Miután egy réteget kinyomtattak, a porágyat leeresztik, és egy új porréteg kerül a legutóbb nyomtatott rétegre. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg a teljes modellt felépíti a nyomtató. Ezután a tárgyat a porban hagyják, hogy ott megszilárduljon majd azt eltávolítják a porágyból, és a meg nem kötött port eltávolítják sűrített levegővel. A technológiát, mint említettem használhatjuk fém- és műanyagalkatrészek nyomtatására is,

⁷ Forrás: Blokdyk, Gerardus (2018): Binder Jetting The Ultimate Step-By-Step Guide. Emereo Pty Limited, 2018.

viszont itt meg kell említeni, hogy nem vagyunk képesek egy nyomtatóval kinyomtatni mindkét anyagot. Fém alkatrész esetében a fémpor polimer kötőanyaggal kötik meg. Fémtárgyak előállítása kötőanyag kibocsájtással lehetővé teszi olyan összetett geometriák előállítását, amelyek messze meghaladják a hagyományos gyártási technológiák képességeit. Ha fémtárgyakat készítünk kötőanyag kibocsájtással akkor azt csak másodlagos eljárással kombinálva lehet előállítani, mint például az infiltrálás vagy szinterezés. Az eredmény költsége és minősége általában meghatározza, hogy melyik másodlagos eljárás a legmegfelelőbb az adott igényünkhöz. E kiegészítő lépések nélkül az elkészült alkatrész mechanikai tulajdonságai gyengék lesznek. Az egyik másodlagos eljárás az infiltráció, ami következőképpen működik, kezdetben a fémpor részecskéket kötőanyaggal kötik össze, hogy egy úgynevezett „zöld” alkatrészt hozzanak létre. Miután ez teljesen kikeményedett eltávolítják a laza porból, és egy kemencébe helyezik, ahol a kötőanyagot kiégetik. A tárgy így körülbelül 60%-os sűrűségű marad, ahol a maradék 40% az üregek lesznek. Ezután bronzot használnak, hogy az üregekbe kapilláris hatás révén beszivároгjon a bronz, így a tárgyat körülbelül 90%-os sűrűségű lesz, ami nagyobb szilárdságú tárgyat eredményez. A fémből készült tárgyak azonban kötőanyag kibocsájtással készülve általában alacsonyabb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek a porágyfúzióval készült alkatrészekhez képest. A következő másodlagos eljárás a szinterezés, ez ott alkalmazható, ahol a fém alkatrészeket anélkül készítik, hogy bronzot szivároгtatnának bele. A nyomtatás befejezése után a zöld állapotban lévő alkatrészt egy kemencében kikeményítik nagy, 97% körüli sűrűségűre. Azonban így az nem egyenletesen fog zsugorodni, ami problémát jelenthet, és ezt a szinterezésnél figyelembe kell venni még tervezési szakaszban.

2.2.2 Közvetlen fém lézerszinterezés (DMLS) / szelektív lézerolvasztás (SLM)

A közvetlen fém lézer szinterezés és a szelektív lézerolvasztás is az SLS-hez hasonló módon állít elő tárgyakat. A jelentős különbség az, hogy a 3D nyomtatási technológia ezen típusait fém alkatrészek gyártására alkalmazzák és a fém 3D nyomtatási technológiák közül jelenleg ezek a legelterjedtebbek. A DMLS és az SLM is a porágyfúziós⁸ technológiák közé tartozik, ahol a nyomtatáshoz használt alapanyag por formájában van. Ezt egy por tartályban tárolja, amit porágnak is nevezünk, ebben a porágyban fog elkészülni az alkatrészünk (lásd 9. ábra). A DMLS nem olvasztja meg a port, hanem felmelegíti egy pontig, hogy az molekuláris szinten összeolvadjon. Az SLM a lézert használja a fémpor teljes megolvasztásához, homogén alkatrészt alkotva. Ez olyan alkatrészt eredményez, amelynek egyetlen olvadási hőmérséklete

⁸ Forrás: Manoj Gupta (2017): 3D Printing of Metals. Svájc, MDPI AG.

van, amit hagyományosan ötvözzel nem lehet előállítani, így módon viszont ez lehetséges. Ez a fő különbség a DMLS és az SLM között, az előbbi alkalmas arra, hogy fémötvözetekből készítsen alkatrészeket, míg az utóbbi egyetlen elemet tartalmazó anyagokat használ, például titániumot formál. Az SLS-től eltérően a DMLS és SLM eljárásoknál szerkezeti alátámasztásra van szükség, hogy korlátozzák a magas hőmérséklet által esetlegesen fellépő torzulások lehetőségét, annak ellenére, hogy a nyomtatás során a környező por fizikai alátámasztást biztosít. Az alkatrészeknél fennáll a magas hőmérséklet miatt a nyomtatás során keletkező maradó feszültségek veszélye, ami okozhat vetemedést a kész darabon. Ez SLM technológiánál jellemzőbb, azonban mivel a DMLS nem olvasztja meg a port, az alkatrészeknél kisebb feszültségek keletkezhetnek. A nyomtatás után az alkatrészeket jellemzően hőkezelik is, hogy az alkatrészekben lévő feszültségeket enyhítsék, ezzel csökkentve a vetemedés esélyét, és hogy mechanikai tulajdonságaikat javítsák.



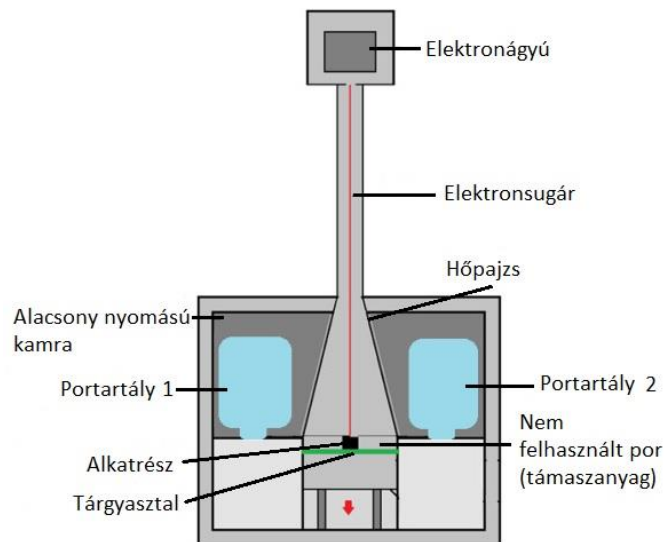
9. ábra: DMLS 3D nyomtatott alkatrész

(<https://amfg.ai/2019/06/26/metal-3d-printing-a-definitive-guide/> letöltve: 2023.03.29.)

2.2.3 Elektronnyalábos olvasztás (EBM)

Az elektronnyalábos olvasztás⁹ során a fémport egy építőlemezre van felhordva. Ezeket a fémrészecskéket egy elektronsugárral olvasztja össze, és rétegről rétegre hozza létre a kívánt alkatrészt. Ez az eljárás 2002-ben jelent meg a piacon a svéd Arcam által, majd 2016-ban a GE Additive felvásárolta a céget. Ez az egyetlen olyan cég, amely ezen a technológián alapuló gépeket forgalmaz. A fő különbség az előző technológiához képest az alkalmazott hőforrás. Itt az EBM technológia egy elektronágyú által előállított elektronsugarat használ (lásd 10. ábra).

⁹ Forrás: Awari, G. K., Thorat C. S., Ambade V. és Kothari D. P. (2021): Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications. Egyesült Királyság, CRC Press.



10. ábra: EBM 3D nyomtatási technológia
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

Ez utóbbi vákuum alatt kivonja az elektronokat egy volfrámszálból, és azokat gyorsított módon vetíti rá a fémorrétegre. Ezek az elektronok ezután képesek lesznek szelektíven összeolvasztani a port, és így előállítani az alkatrészt. A fémport a gépen belüli tartályba tölthető. Ez a fémport vékony rétegekben kerül lerakásra, amelyeket előmelegítenek, mielőtt az elektronsugárral összeolvasztják. Ez a lépés különösen a 3D nyomtatás alatt álló alkatrész túlnyúló területeinek nyújt nagyobb alátámasztást. A gép ezután annyiszor ismétli meg ezeket a lépéseket, ahányszor szükséges a teljes alkatrész elkészítéséhez. Miután a gyártási folyamat befejeződött, a kezelő kiveszi az alkatrészt a gépből, és a meg nem olvadt port egy fúvóka vagy ecset segítségével eltávolítja. Ezt követően lehetőség van a nyomtatási támaszok eltávolítására, ha használtak ilyeneket és az alkatrész leválasztására az építőlemezről. Figyelembe kell venni, hogy az elektronsugár megfelelő működéséhez minden gyártásnak vákuumban kell történnie. Ez megakadályozza azt is, hogy a por oxidálódjon a melegítés során. A gyártási folyamat végén az olvadásmentes por nagy része szinte közvetlenül újra felhasználható.

2.2.4 Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Az atomdiffúziós additív gyártástechnológia (ADAM)¹⁰ a Markforged által kifejlesztett és szabadalmaztatott 3D nyomtatási eljárás, amely a fém fröccsöntés alapjaira épül, egy olyan fémmegmunkálási eljárás, amely egy formát, fémport és kötőanyagokat használ háromdimenziós modellek létrehozásához. Az ADAM esetében azonban nincs szükség

¹⁰ Forrás: Galati, M. és Minetola, P. (2019): Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Materials, 12(24), 4122.

öntőformára, ehelyett egy 3D nyomtató hozza létre a teljes 3D modellt FFF/FDM technológiához hasonlóan, rétegek felépítésével. A fém, mint alapanyag itt egy különleges filament, amely fémporból és két kötőanyagból áll. A fémpor műanyag kötőanyaggal keverve találjuk egy vékonyfalú műanyag csőben ez alkotja a filamentet, és ebből a több alkotós alapanyagból készíti ez a nyomtató a 3D-s modellt. A leggyakrabban használt FDM eljárásához hasonló módon egy nyomtatófej végzi a nyomtatást, ami X, Y tengelyen mozogva a tárgyasztal Z irányú süllyesztésével építi a modellt. Az elkészült testet oldószeres folyadékban átmossák, ahol a fémpor tapaszthatóhoz szükséges gyanta kerül eltávolításra. Az alkatrészt ezután kemencébe helyezik, hogy a fémpor szilárd fémmé olvadjon össze, ezt a lépést nevezik szinterezési folyamatnak (lásd 11. ábra). Az alkatrész a végső méretét a szinterezést követően éri el. Az ADAM technológia olyan alkatrészeket állít elő, amelyek 96-98%-os kitöltésűek. Ezek tiszta szilárd fémek, kötőanyagtartalom nélkül, miután átestek a szinterezési folyamaton. Az alkatrészek olyan erősek, mint az öntött és kovácsolt alkatrészek. Közelről nézve az ADAM eljárás minden tengelyen kristálynövekedést eredményez, így az alkatrészek minden irányban a szilárd fém szilárdságát és mechanikai tulajdonságait kapják. Ez azt jelenti, hogy az ADAM technológiával nyomtatott alkatrészek helyettesíthetik az öntött alkatrészeket.



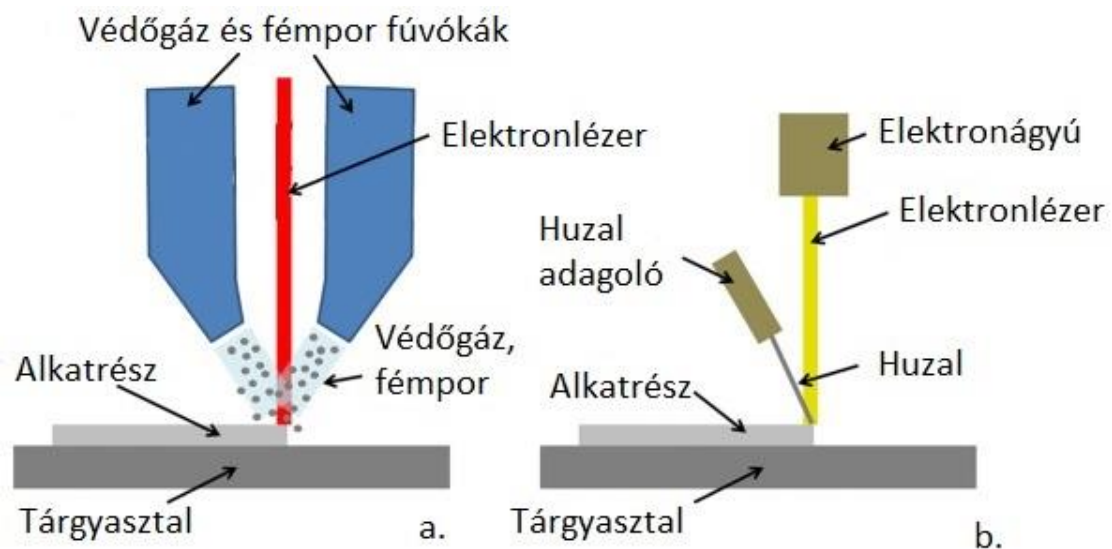
11. ábra: ADAM additív gyártás fázisai
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

2.2.5 Irányított energia lerakás (DED)

Az irányított energia lerakás¹¹ (DED) során a hőforrás megolvasztja az alapanyagot, amely általában valamilyen fémhuzal vagy fémpor (lásd 12. ábra). A por nagyobb pontosságot biztosít a lerakódás során viszont a huzal hatékonyabb az anyagfelhasználás szempontjából. Ezt az olvadt anyagot helyezi le a tárgyasztal felületére a nyomtatófej, ahol megszilárdul, majd a

¹¹ Forrás: J. R. Lawrence (2017): Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications. Egyesült Királyság, Elsevier Science.

már lerakott rétegre ráépít egy másikat, hogy azok egybe olvadjanak. Ezt addig ismétli amíg a kívánt formát el nem éri. A DED-gépek általában egy többtengelyes karra szerelt fúvókát használnak, amely több irányban is mozoghat, lehetővé téve a változó lerakódást. A folyamatot általában ellenőrzött kamrában, csökkentett oxigénellátottságú körülmények között végzik. Az elektronsugár-alapú rendszerek vákuumban végzik a folyamatot, míg a lézer-alapú rendszerek teljesen inert kamrát használnak, amikor reaktív fémekkel dolgoznak. A szennyeződések elkerülése miatt lehetőség van zárt kamrában védőgáz használatára is a 3D nyomtatás során. A rétegek vastagsága 0,25mm-0,5mm között van viszont a felületi minőség nem lesz jó. A lerakott rétegek hűtési ideje nagyon gyors, másodpercenként körülbelül 1000-5000 °C. Ez a hűtési idő fogja befolyásolni a belső szemcseszerkezetet, bár az anyagrétegek közötti átfedések újraolvadást okozhatnak, ami egységes, de váltakozó kristályszerkezetet hoz létre.



12. ábra: Fémporos DED (a.) és fémhuzalos DED 3D nyomtatás (b.)
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

A 3D nyomtatott tárgy legtöbb esetben rögzített helyzetben marad, míg a nyomtatófej mozog a térben az anyagrétegek lerakása érdekében. De ez megfordítható egy olyan tárgyasztallal, amely mozog, miközben a nyomtató fej rögzített helyzetben van. Ezt az eljárást leggyakrabban fém alkatrészekhez használják, de műanyagok esetében is használható. Ezzel a technológiával szinte bármilyen hegeszthető fém gyártható, beleértve az alumíniumot, az inconelt, a rozsdamentes acélt, a tantált, a titánt és titánötvözeteket, valamint a volfrámot. A DED technológia előnyei közé tartozik, hogy a létrejött szemcseszerkezet szabályos, ez lehetővé teszi, hogy ezzel az eljárással kiváló minőségű funkcionális alkatrészeket gyárthatunk és javíthatunk. Viszont egyensúlyt kell találni a sebesség és a pontosság között, mivel a nagyobb

sebesség a pontosság rovására megy és kevésbé egységes szemcseszerkezettel jár. Ezzel együtt a DED lehetővé teszi a nagyméretű alkatrészek gyártását.

3. ADDITÍV GYÁRTÁS ALAPANYAGAI

3.1 Műanyagok

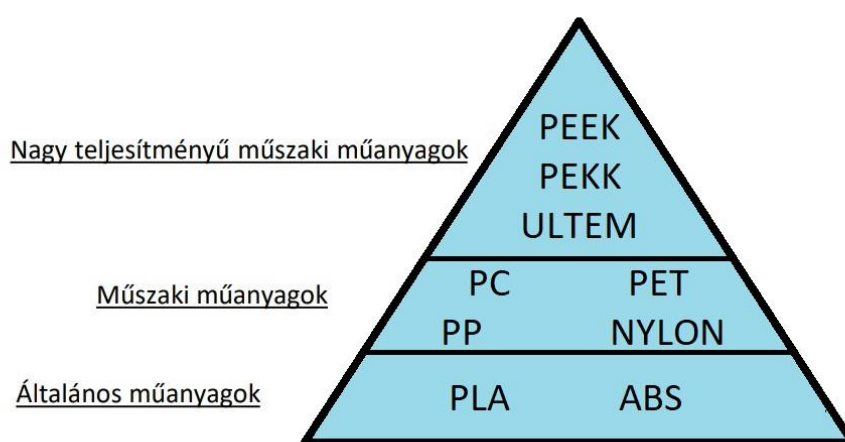
A 3D nyomtatás leggyakoribb és legelérhetőbb alapanyagai a termoplasztikus műanyagok¹². Ezek a termoplasztikus műanyagok melegítéskor lágyulnak, illetve olvadáspontjuk fölé melegítve folyékonnyá válnak, lehűléskor pedig megkeményednek. Ez a melegítési és hűtési folyamat többször is elvégezhető anélkül, hogy az anyag kémiai vagy mechanikai tulajdonságai jelentősen megváltoznának. A műanyagokat két csoportra oszthatjuk a molekula szerkezetük rendezettsége szerint. Az amorf műanyagok csoportjára jellemző, hogy molekulaszervezetük rendezetlen míg a kristályos műanyagok csoportjára, hogy molekulaszervezetük teljes mértékben rendezett. Viszont ez nagyon ritkán fordul elő, jellemzőbben az az eset áll fent, hogy az anyag inkább úgynevezett félkristályos, tehát rendelkezik az amorf műanyagok rendezetlenségével, de csak részben és nagyobb részben rendezett a molekula szerkezet.

Az amorf műanyagok véletlenszerű molekulaszervezete azt eredményezi, hogy az olvadásuk hőmérséklettartománya különböző. Ez viszonylag könnyen hőformázhatóvá is teszi őket, mivel a molekulák hő hatására mozgóvá válnak. Minél több hőt alkalmazunk, annál mozgékonyabbá válnak a molekulák. Ezek a hőre lágyuló műanyagok a véletlenszerű molekuláris elrendeződésük miatt áramlásukban izotrópok. Ennek köszönhetően jobb mérettartással rendelkeznek, és kevésbé hajlamosak a vetemedésre. Jellemzően kiváló ütésállósággal is rendelkeznek. Az amorf műanyagokat azonban szerkezeti alkalmazásokhoz ajánlatos használni, mivel csapágyként vagy kopó alkatrészként nem teljesítenek jól. Hajlamosabbak a feszültség okozta repedésre, mint a félkristályos műanyagok, és nagyon gyenge a fáradási ellenállásuk. Emellett általában alacsonyabb a kémiai ellenállásuk és nagyobb a sűrűlódásuk, mint a félkristályos társaiknak. Léteznek viszont nagy teljesítményű amorf hőre lágyuló műanyagok, amik kiválóan ellenállnak a forró víznek és a gőznek, jó kémiai ellenállást, valamint jó merevséget és szilárdságot biztosítanak. Az ebbe a kategóriába tartozó anyagok közé tartozik a poliéterimid (PEI), gyakoribb nevén ULTEM.

A félkristályos hőre lágyuló műanyagok közé tartozik a PEEK, PEKK és a nylon. Ezek a műanyagok általában nem átlátszóak, ellentétben az amorf hőre lágyuló műanyagokkal. Az amorf műanyagokkal ellentétben a félkristályos műanyagok nagyon rendezett

¹² Forrás: Joanna I. P., (2022): Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics. Egyesült Királyság, Elsevier Science.

molekulaszerkezettel rendelkeznek, ami pontosan meghatározott olvadáspontot eredményez. Ez az pontosan meghatározott olvadáspont nagyon megnehezíti a hőformázást, mivel a molekulák csak az anyag olvadáspontja felett válnak mozgékonyá. Az amorf műanyagokkal ellentétben nagyon jól teljesítenek a kopással, csapágyazással és szerkezeti terhelésekkel kapcsolatos alkalmazásokban. Alacsonyabb a súrlódási együtthatójuk, jobb a kémiai ellenállásuk és jobb a fáradási teljesítmény. Ütésállóságuk azonban nem olyan jó, mint az amorf műanyagoké. A 3D nyomtatásban alkalmazott műanyagokat felhasználási területük szerint 3 csoportra oszthatjuk: általános műanyagok, műszaki műanyagok és nagy teljesítményű műszaki műanyagok (lásd 13. Ábra).



13. ábra: Termoplasztikus műanyagok osztályozása
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

3.1.1 Általános műanyagok

Az általános műanyagok használata olyan esetekben ajánlott amikor az elkészített tárgyra nem fog hatni jelentős mechanikai terhelés, mert ezek a műanyagok alacsony szakítószilárdsággal rendelkeznek. Leggyakoribban csak dísz tárgyakra használják, valamint ezek a prototípus gyártás legjobb alapanyagai, köszönhetően a kedvező árúknak és könnyű nyomtathatóságuknak. Az otthonra megvásárolható alsó kategóriás nyomtatók is ezeket a műanyagokat használják hiszen olcsón ezek érhetőek el.

3.1.1.1 Politejsav (PLA)

A politejsav (PLA)¹³ a 3D nyomtatás, különösen az FDM egyik legnépszerűbb anyaga. Könnyű felhasználhatósága és minimális vetemedési problémái miatt a PLA filament tökéletes kiindulópontot jelent a 3D nyomtatáshoz. A PLA emellett az egyik legkörnyezetbarátabb 3D nyomtatási anyag, és az ABS-el ellentétben biológiailag lebomló. A PLA további előnyei közé tartozik még az alacsony ára és a színek és keverékek széles választéka. Az anyag törekenysége miatt azonban a PLA inkább nem funkcionális prototípusok készítésére, dekoratív és alacsony igénybevételű alkalmazásokhoz alkalmas. A PLA természetes forrásokból, például kukoricakeményítóből vagy cukornádból származik, ellentétben sok más hőre lágyuló műanyaggal, amelyeket nem megújuló forrásokból, például kőolajból állítanak elő. Az autóiipartól az élelmiszer-csomagolásig számos iparág használja a PLA-t 3D nyomtatott termékek előállítására. A PLA nyomtatási hőmérséklete viszonylag alacsony más hőre lágyuló műanyagokkal összehasonlítva. Ez azt jelenti, hogy a PLA kevésbé valószínű, hogy a nyomtatási folyamat során elvetemedik és eltömíti a fűvókát. Emellett az ABS-hez és más, magasabb olvadási hőmérsékletű hőre lágyuló műanyagokhoz képest a PLA jellemzően jobb felületi részleteket és élesebb vonásokat eredményez. A PLA hőállósága alacsony, ezért nem használható magas hőmérsékletű alkalmazásokhoz. Magas hőmérsékleten a PLA gyorsan deformálódhat, különösen, ha feszültségnek van kitéve. A PLA jellemzően gyengébb és alacsonyabb szakítószilárdsággal rendelkezik, mint társai, az ABS és a PET. Mivel a PLA alkatrészek 3D nyomtatáskor meglehetősen törekenyek, az anyag inkább esztétikai, mint mechanikai célokra alkalmas.

3.1.1.2 Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS)

Az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS)¹⁴ egy másik népszerű 3D nyomtatásban használt hőre lágyuló műanyag. Szilárdsága, magas hő- és kopásállósága, valamint viszonylag alacsony ára miatt az ABS-t gyakran használják számos fogyasztói és ipari alkalmazásban. Az ABS-ről az is ismert, hogy erősebb és tartósabb, mint a PLA. Az ABS-ből jobb tulajdonságokkal rendelkező alkatrészek készíthetők. ABS-ből részletes alkatrészeket és méretpontosabb darabokat készíthetünk, mint PLA-ból. Viszont figyelembe kell venni, hogy a 3D nyomtató beállítása és az alkatrész összetettsége határozza meg elsősorban a pontosság szintjét. Az ABS

¹³ Forrás: Sin L. T. (2012, szerk.) *Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications*. Hollandia, Elsevier Science.

¹⁴ Forrás: Chander P., Kamalpreet S., Karupppasamy S., Seeram R. és Sunpreet S. (2021, szerk.): *Sustainability for 3D Printing*. Svájc, Springer International Publishing.

más anyagokkal is keverhető a jobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében, például PC-ABS (polikarbonát- ABS), amely kiváló szilárdsággal és hőállósággal rendelkezik. Az ABS higroszkópos, ami azt jelenti, hogy nedvességet szív fel a levegőből. Nem megfelelő tárolás esetén a nedves ABS-szálak rossz nyomtatási minőséget vagy a fűvóka eltömődése miatt megghiúsult nyomtatási folyamatot eredményezhetnek. Az ABS anyagokat károsíthatja a napfénynek való tartós kitettség, ami negatívan befolyásolja a nyomtatás minőségét. Ezért olyan alkalmazásokhoz, amelyek közvetlen UV-fénynek lesznek nem ajánlott.

3.1.2 Műszaki műanyagok

3.1.2.1 Polikarbonát (PC)

A polikarbonát¹⁵ a műanyagok a szilárdságukról, szívósságukról és hőállóságukról ismertek. A PC-t számos alkalmazási területen használják, többek között műszaki alkatrészek, DVD-k és golyóálló üveg formájában. Előnyös jellemzője, hogy átlátszó. A polikarbonát 3D nyomtatási filament egy erős, méretstabil, hőálló, jó ütésállóságú műanyag. Merevsége és stabilitása miatt a kinyomtatott alkatrészek megtartják alakjukat és méretpontosságukat. A nagy ütésállóság miatt ez egy szívós anyag, amely alkalmas nagy tartósságú alkalmazásokhoz, például funkcionális prototípusok készítéséhez akár végleges beépítésekhez is használható

3.1.2.2 Polietilén-tereftalát (PET)

A polietilén-tereftalát (PET)¹⁶ egy poliészter alapú anyag, amely kiváló mechanikai, elektromos és termikus tulajdonságokat egyesít nagyon jó kémiai ellenállással és méretstabilitással. A PET emellett alacsony nedvességfelvételi tulajdonságokkal és jó folyási tulajdonságokkal rendelkezik, így kiválóan alkalmas a vízálló tartályok készítéséhez. A PET előnyei közé tartozik, hogy az anyag nyomtatáskor nem bocsát ki gázokat, és 100%-ban újrahasznosítható, viszont az újrahasznosított anyag felülete puhább lehet, ami hajlamossá teheti a kopásra. A PET-nek van egy másik népszerű változata a PETG, ez a PET glikollal dúsított változata, ez egy többfajta monomerből álló polimerlánc vagyis egy copolymer ami egyesíti a PET és a glicol tulajdonságait. A PETG ellenállóbb a sima PET-nél ezért gyakrabban alkalmazzák ezt, mint a sima PET-et.

¹⁵ Forrás: Yang, W. és Jian, R. (2023, szerk.): Polymer 3D Printing and 3D Copying Technology. Németország, Springer Nature Singapore.

¹⁶ Forrás: Daniel J. T. és Deepti S. (2020, szerk.): 3D Printing in Medicine and Surgery: Applications in Healthcare. Egyesült Királyság, Elsevier Science.

3.1.2.3 Nylon (PA)

A nylon a poliamidok (PA)¹⁷ néven ismert műanyagok csoportjára utal. Ezek többnyire félkristályos és általában nagyon szívós anyagok. Számos változatban megtalálható, de a legelterjedtebbek a Nylon 6, Nylon 6-6 és Nylon 12. A nyilont széles körben alkalmazzák az autóiparban mivel sokoldalú anyag, és szinte mindenféle gyártási művelethez, például fröccsöntéshez, extrudáláshoz és additív gyártáshoz (FDM, SLS és MJF esetén) alkalmas. A nylon rugalmassága és tartóssága segít a vékony falú alkatrészek 3D nyomtatásában. Alacsony sűrűlódási együtthatója magas olvadáspontjával különösen ellenállóvá teszi a kopással szemben, és lehetővé teszi, hogy olyan alkatrészek nyomtatásához használják, mint például a funkcionális, egymásba illeszkedő fogaskerekek. Az előnyök mellett a nylonnak van egy jelentős hátránya, amely gyakran hátráltatja a nyomtatási teljesítményt, ez a nedvességfelvevő tulajdonsága. Ez a tulajdonság hátrányosan befolyásolja a kiszámítható teljesítményt. Ezért kell ügyelni nylonnal való nyomtatás során, hogy az alapanyagot zárt és pára mentes módon tároljuk.

3.1.2.4 Polipropilén (PP)

A polipropilént¹⁸ ritkábban használják 3D nyomtatószálként, de egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek. A polipropilén az egyik leggyakoribb polimer, amelyet a háztartásunk körül találhatunk. Nagyszerű az áttetszősége, valamint a vegyi anyagokkal és a fáradtsággal szembeni ellenállása. Mivel élelmiszer- és mikrohullámú sütőben is használható, gyakran használják a háztartási műanyag edényekben. A 3D nyomtatáshoz a PP kiválóan alkalmas bármire, aminek könnyűnek, vízzárónak vagy tartósnak kell lennie. A táskák zsanérjai például nagyon népszerű felhasználási területet képviselnek, mivel a PP többször is meghajlik anélkül, hogy eltörne. Viszont kihívást jelent, hogy a polipropilén félkristályos szerkezetű. A nyomtatásnál ez azt jelenti, hogy nagy torzító feszültségek keletkeznek.

3.1.3 Nagy teljesítményű műszaki műanyagok

A nagyteljesítményű műanyagok elsősorban hőmérséklet-stabilitásukban, de vegyi ellenállásukban és mechanikai tulajdonságaikban és árakban is különböznek az általános műanyagoktól és a műszaki műanyagoktól. Ezek a műanyagok közé tartoznak a poliéter-éter-

¹⁷ Forrás: Page, I. B. (2000): Polyamides as Engineering Thermoplastic Materials. Egyesült Királyság, Rapra Technology Limited.

¹⁸ Forrás: Tripathi, D. (2002): Practical guide to polypropylene. Egyesült Királyság, Rapra Technology.

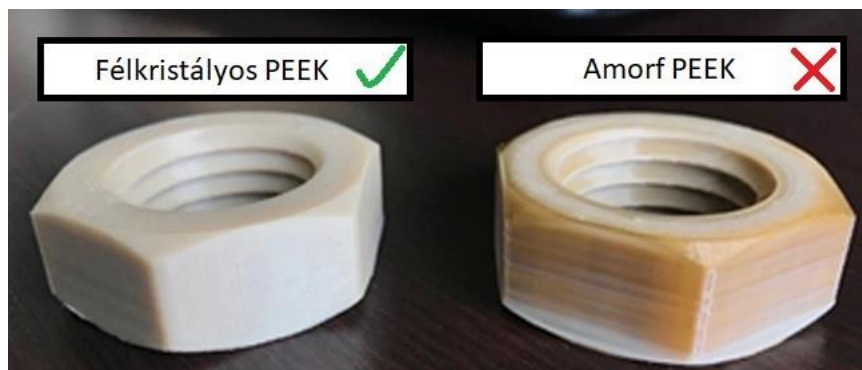
keton (PEEK), Poliéterketoneketon (PEKK) és Poliéterimid (PEI). Ezek az anyagok nagyobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint az eddigiek. Néhány ilyen anyagot még szénszállal vagy üveggel is meg lehet erősíteni, ami érdekes tulajdonságokkal ruházza fel őket. Bár ezeknek az anyagoknak számos előnye van, meg kell jegyezni, hogy ezekkel az anyagokkal nehezebb nyomtatni, mivel igényes kritériumoknak kell megfelelniük. A PEEK, PEKK és a PEI számos előnnyel rendelkezik, amelyeket három kategóriába lehet csoportosítani, jó termikus tulajdonságok, magas mechanikai jellemzők és végül egy sor különböző ellenállás, mint például oldószerekkel és savakkal szembeni ellenállóság. A nagy teljesítményű műszaki műanyagok jó mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek, mint például a nagy merevség. Ami lehetővé teszi, hogy a hagyományos megmunkált alkatrészekhez képest könnyű alkatrészeket kapjunk. Ez közvetlen hatással lesz a költségekre az olyan ágazatokban, mint az autonóm járművek vagy repülés, például egy elektromos járműnél az önsúly csökkentésével növelhető a megtehető kilométerek száma.

3.1.3.1 Poliéter-éter-keton (PEEK)

A poliéter-éter-keton¹⁹ a világ egyik legnagyobb teljesítményű műszaki hőre lágyuló műanyagának számít, amely kivételes kémiai ellenállást és kiváló mechanikai tulajdonságokat kínál magas hőmérsékleten. A PEEK additív gyártásban történő fő alkalmazásai közé tartozik a fémhelyettesítés, a funkcionális prototípusgyártás és a végfelhasználásra szánt alkatrészek olyan iparágakban, mint a repülőgépipar, az autóipar, az olaj- és gázipar, az orvostudomány és a fogászat. A PEEK anyag számos előnyt kínál az autóipar számára, főként prototípusok készítésére és a vezetékek védelmére használják, valamint könnyebb alternatívát kínál a vezetékek más típusú védelméhez képest. Könnyű tulajdonságai segítenek abban, hogy a járművek könnyebbek és üzemanyag-hatékonyabbak legyenek. Sőt, az elektronikus járművek új generációjának piacra kerülésével a PEEK anyag segíthet a járművön belüli elektronika teljesítményének javításában is. A PEEK egy félkristályos anyag, ami jelentős javulást mutat a szilárdság és a merevség terén, jobb magas hőmérsékleti teljesítményekkel és kiváló vegyi ellenállással bír. Túl gyors lehűlés vagy alacsony hőmérsékleten való nyomtatás esetén a PEEK amorf, áttetsző-barna területet mutató anyaggá válhat (lásd 14. Ábra), aminek gyengébbek a mechanikai, termikus és kémiai tulajdonságai. Ha az alkalmazások során jelentősen nagy terhelést kell elbírní, a tiszta PEEK még mindig nem biztos, hogy eléggé ellenálló.

¹⁹ Forrás: Steven M. K. (2011, szerk.): PEEK Biomaterials Handbook. Hollandia, Elsevier Science.

Tulajdonságainak javítása érdekében a PEEK különböző arányban erősíthető különböző szálerősítésekkel, például szénszállal és üvegszállal.



14. ábra: Félkristályos és amorf PEEK
(Szerkesztette: Tenczel Martin Bence)

3.1.3.2 Poliéterketoneketon (PEKK)

Poliéterketoneketon²⁰, ismertebb rövidítéssel PEKK. A PEKK rendkívül sokoldalú hőre lágyuló műanyag, egyesíti magában a kémiai ellenállást, a tűzzel való ellenállást és a kiváló mechanikai tulajdonságokat, amelyek az összes ismert hőre lágyuló műanyag közül a legmagasabbak. A kristályosodási sebessége valamivel lassabb, mint a PEEK-é, ami sokkal könnyebben szabályozhatóvá teszi, és jobb rétegtapadást eredményez. A jobb rétegtapadásnak köszönhetően a PEKK a PEEK-hez képest még nagyobb szakítószilárdságot érhet el minden tengelyen. Ez az anyag a nagy teljesítményű polimerek egyik legjobb példája. A PEKK nagyon jól ellenáll a kopásnak és a kémiai agresszióknak. Valójában képes ellenállni számos folyadéknak, például a benzolnak, az autóiparban használt hűtőközegnek, vagy akár számos alkoholnak. Az anyag nagyon jó dielektromos stabilitással és szigetelő tulajdonságokkal is rendelkezik, ami kulcsfontosságú előny az elektronika területén. Végül a PEKK nem gyúlékony és nem bocsát ki mérgező füstöt, ellenáll a nyomásnak és a magas hőmérsékletnek. Ezenkívül szénszál-erősítésű PEKK is kapható, ami növeli a merevséget és a könnyűségét.

3.1.3.3 Poliéterimid (PEI)

A poliéterimid²¹ egy sokkal olcsóbb alternatíva, a PEEK és a PEKK-hez képest, 150 euróba kerül kilónként, amíg az azonos mennyiségű PEEK vagy PEKK legalább 300 euróba. A poliéterimid egy amorf anyag, és jobban ismert az ULTEM kereskedelmi név alatt. FDM 3D

²⁰ Forrás: Béland, S. (1990): High Performance Thermoplastic Resins and Their Composites. Egyesült Államok, Elsevier Science.

²¹ Forrás: Mittal, K. L. (2005): Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications. Hollandia, Taylor & Francis.

nyomtatókhöz való filamentként kapható főbb jellemzője, hogy nagyon jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, például nagyon jó a méretstabilitása. Tömeggyártásra csak a nagy teljesítményű FDM nyomtatók kifejlesztésével vált alkalmassá mivel a gép extruderét 350°C-ra kell melegíteni a hőre lágyuló műanyag megolvasztásához. A SABIC jelenleg két különböző gyantát kínál, az ULTEM 9085-öt és az ULTEM 1010-et. Ami az előbbit illeti, ez az anyag önmagában is égésgátló, és nagyon jó eredményeket ért el a láng, füst és mérgező anyag kibocsátás teszteken. Magas lángállósággal, alacsony füstkibocsátással és alacsony toxicitással rendelkezik. Az anyag emellett nagy szilárdság/tömeg aránnyal rendelkezik, és mechanikai tulajdonságainak köszönhetően akár bizonyos fémeket is helyettesíthet. Végül pedig jól ellenáll az autóiipari folyadékoknak, szénhidrogéneknek, alkoholoknak és vizes oldatoknak. Az ULTEM 1010 nagy szakítószilárdsággal rendelkezik, nagy szilárdságot és tartósságot mutat. Biokompatibilis és NSF 51 tanúsítvánnyal rendelkezik az élelmiszerekkel való érintkezéshez. A PEI-t széles körben használják a repülőgépiparban, különösen az ULTEM 9085-öt a fent említett tulajdonságai miatt. Emellett az autóiiparban, az orvostechikában és az élelmiszeriparban is kedvelt anyag, különösen a konyhai eszközök tervezésénél. Ezt a hőre lágyuló műanyagot a szerszámgyártásban is széles körben használják, akár szerszámok, szerszámvázak vagy különböző kötőelemek tervezéséhez. A Bombardier például ezt az anyagot használja egyedi szerszámainak gyártásához, a gyártósorain lévő alkatrészek testre szabásához, valamint a vonatai kész alkatrészeinek előállításához.

3.2 Kompozitok

A kompozitok két anyagból tevődnek össze, egy mátrix anyagból, ami általában valamilyen polimer és egy erősítőanyagból. Az erősítőanyag állhat folytonos szálakból vagy aprított szálakból²². Ezzel az erősítéssel a kompozit anyag nagyobb merevséget és szilárdságot mutat a szálerősítés nélküli polimerekhez képest. Ezzel egyes kompozitok helyettesíthetik a fémeket, mint például az alumíniumot. Az aprított szálerősítés esetében a polimer anyagba apró, milliméternél kisebb szálak kerülnek beépítésre. A felhasznált szálak százalékos aránya és a mátrix polimer határozza meg, hogy a végső alkatrész milyen erős lesz. A folyamatos szálak²³ esetében a hosszú szálakat a nyomtatási folyamat során összekeverik a műanyaggal. A szálerősítésként felhasznált szálak típusait tekintve a szénszál és az üvegszál a legnépszerűbbek,

²² (2020.02.25.): Composite 3D Printing: An Emerging Technology with a Bright Future. AMFG, <https://amfg.ai/2020/02/25/composite-3d-printing-an-emerging-technology-with-a-bright-future/> (megtekintve: 2023.03.30.)

²³ Forrás: Doddamani, M. (2023, szerk.): 3D Printing of Composites. Németország, Springer Nature Singapore, 2023.

de használnak kevlárt is. A kiváló anyagtulajdonságok mint a merevsége és a kedvező szilárdság/tömeg aránya teszik a kompozitokat keresett anyagokká. Számos iparágban használják a kompozitokat mint például a repülőgépiparban, az autópiparban, az iparcikkek gyártásában, valamint az olajiparban és gáziparban. Kiváló megoldást nyújtanak olyan helyeken, ahol fontos, hogy az alkatrészek könnyűek legyenek és emellett magas szilárdsággal rendelkezzenek.

3.2.1 Aprított szálerősítésű kompozitok

Az aprított szálakkal erősített műanyagok a 3D nyomtatott kompozitok gyakoribb típusa. A legelterjedtebb aprított szálerősítés a szénszál, ahol az aprított szénszálakat klasszikus 3D nyomtatási műanyagokkal, például PLA-val, ABS-el vagy nylonnal keverik.²⁴ Kivételes esetekben alkalmaznak szálerősített nagy teljesítményű műszaki műanyagokat is mint a PEEK. A hozzáadott erősítő szálak átveszik az alkatrészre ható feszültségek nagy részét ezzel, fokozva a gyengébb minőségű anyagok tulajdonságát. A szénszálak hozzáadása javítja a mechanikai tulajdonságok hőstabilitását is, ami kiszélesíti az üzemi hőmérsékleti tartományt, és javítja az anyag viselkedésének kiszámíthatóságát magas és alacsony hőmérsékleten egyaránt. Ezeket a szálakat finom darabokra aprítják és a polimerbe keverik, mielőtt azt egy filament szállá extrudálják, hogy az FDM-en alapuló 3D nyomtatók ki tudják nyomtatni. A 3D nyomtatási folyamat ugyanaz marad, mivel a szénszálak a hőre lágyuló műanyagban vannak, így azt ugyanúgy felmelegítik, extrudálják majd lehűtik az alkatrészben, mint minden FDM 3D nyomtatásnál. Az aprított szálak kompozit 3D nyomtatás alapanyagént vesz egy hőre lágyuló műanyagot, amely bizonyos tulajdonságokban hiányos lehet és felerősíti azt²⁵. A szénszálak esetében a szálak növelik az alkatrész szilárdságát, merevségét és méretstabilitását, így az nagyobb teljesítményűvé válik, mint az alap műanyag. Az aprított szálak 3D nyomtatási anyagok ugyanúgy használhatók, mint a normál FDM 3D nyomtatási műanyagok, egyes anyagtulajdonságokat fokozva. A szálak mennyisége és az aprított szegmensek hossza befolyásolja az alkatrész szilárdságát és minőségét. A különböző gyártók különböző mennyiségű és hosszúságú szálakat kevernek a műanyagukba, így különböző szilárdságú anyagokat kapunk. Egy bizonyos küszöbérték alatt, a szálak fokozzák az alkatrész felületi minőségét. A küszöbérték felett, ha nagy mennyiségű hosszabb szálakat keverünk bele a

²⁴ Carolta, V. (2023.07.28.): The Complete Guide to 3D Printing Composites. 3Dnatives, <https://www.3dnatives.com/en/complete-guide-3d-printing-composites-280120204/> (megtekintve: 2023.08.15.)

²⁵ Forrás: Sanders, B. A. (1982, szerk.): Short Fiber Reinforced Composite Materials. Egyesült Államok, American Society for Testing & Materials.

műanyagba, erősebb anyagot kapunk, de a felületi minőség és az alkatrész méretpontossága csökken, mivel az anyagban összességében kisebb százalékban van műanyag. A hőre lágyuló műanyag elengedhetetlen a 3D nyomtatott kompozitokhoz, mert ez teszi a nyomtatási folyamatot működőképpé.

3.2.2 Folyamatos szálerősítésű kompozitok

Azt a 3D nyomtatási eljárást, ahol folytonos erősítő szálakat adunk az alkatrészhez nyomtatás közben folyamatos szálgyártásnak másnéven CFF-nek nevezzük. Folyamatos erősítő szálakat adunk az alkatrészhez gyártás közben, hogy a fémszilárdsági tulajdonságokat a súly töredéke mellett érje el²⁶. A nyomtató két nyomtatófej segítségével építi fel az alkatrészt, az első nyomtatófej hőre lágyuló műanyagból felépíti a mátrixanyagot ezután a második nyomtatófej folyamatos erősítőszálakat vasal az alkatrészbe. A CFF eljárással erősebb alkatrészeket kapunk, ereje a szálak folytonosságából ered. Az aprított szálakkal ellentétben a folytonos szálak képesek a terhelést teljes hosszukban elnyelni és elosztani. A polimer mátrixba ágyazott folytonos szálakkal az alkatrész nagyobb terhelést képes elviselni és nagyobb ütések elnyelni. Ez lehetővé teszi, hogy ezek az alkatrészek elérjék a fém szilárdságát a súly töredéke mellett. A CFF 3D nyomtatási eljárás rétegenként két lépésből áll, először egy hőre lágyuló műanyagot extrudálnak ez szolgál a kompozit "mátrix" anyagaként. Ezután a folytonos szálakat ebbe a mátrixba vasalják, és kompatibilis gyantabevonat segítségével összeolvadnak a hőre lágyuló műanyaggal. Ez a folyamat rétegről rétegre ismétlődik, így az erősítő szálak a 3D nyomtatott alkatrész gerincét adják. Ez az eljárás hasonló ahhoz, ahogyan a beton belsejébe betonacélokat lehet helyezni, hogy megerősítsék azt. A szálakat meghatározott területekre helyezhetjük el annak alapján, hogy az alkatrész milyen terhelést fog kapni, így pontosan oda helyezve a szilárdságot, ahol szükség van rá. Különböző szálerősítési opciókat lehet használni különböző terhelési feltételekhez.

3.3 Fémek

A legtöbb 3D nyomtató az előzőekben tárgyalt hőre lágyuló polimereket nyomtat, olyanokat, mint például a PLA, ABS és a PET. Meg lehet tervezni, hogy ezek jó mechanikai tulajdonságokat mutassanak, de attól ezek még mindig műanyagok, és a műanyagok nem cserélhetik le a fémet minden területen, különösen az iparban. A fém alkatrészek helyettesítő anyagai inkább a szálerősítésű kompozitok. Ezek a fémhez hasonlóan erős kompozitok képesek

²⁶ Forrás: Kenneth, R. (2020, szerk.): Durability of Composite Systems. Egyesült Királyság, Elsevier Science.

igazán a fém alkatrészek helyettesítésére. A fém alkatrészek iránti kereslet azonban megmarad, és az idők végezetéig fenn is fog maradni. Hiszen a fém könnyen megmunkálható, olcsó és tartós. Bevált és pótolhatatlan. És ha meghibásodik vagy a használat során elveszíti az alakját, beolvasztható és újra formálható, vagy újrahasznosítható, átalakítható és újrahasznosítható valami újjá.

3.3.1 Titán

A titán a legfontosabb anyagok közé tartozik a repülésben, űrhajózásban és az orvostudomány területén is, köszönhetően kiváló szilárdsági mutatóinak és könnyű tömegének, valamint a korrózióval szembeni nagyfokú ellenállóképességének és biokompatibilitásának. A titán rendkívüli korrózióállóságot és hegeszthetőséget mutat²⁷. A 3D nyomtatás megkönnyíti a titán alkatrészek gyártását, és elkerüli a hagyományos technikáknál a hegesztési fázisban keletkező szennyeződéseket. Ennek az anyagnak azonban nagy hátránya a magas költsége, mivel körülbelül 50-szerese az acélénak. A titánötvözetek jobb mechanikai tulajdonságokkal és kémiai jellemzőkkel rendelkeznek. Az additív gyártás során ipari alkatrészek széles skálájának előállítására használják őket, beleértve a lapátokat, kötőelemeket, gyűrűket, tárcsákat és edényeket. A titánötvözeteket nagy teljesítményű versenymotor-alkatrészek, például sebességváltók és összekötőrudak gyártására is használják. Titán vagy ötvözeiteinek nyomtatása során gondoskodni kell, hogy a nyomtató tér légmentesen zárt legyen és védőgázt alkalmazzanak amíg tart a nyomtatás, mert a titán könnyen reakcióba léphet. Erre még nagyobb hangsúlyt kell fektetni olyan additív technológiák esetében, ahol az alapanyag valamilyen titán por, ilyenek a DMLS/SLM és a EBM.

3.3.2 Alumínium

Ez az anyag kiváló kompromisszumot jelent a könnyűség és a szilárdság között, továbbá ellenáll a korróziónak és hegeszthető is. Tiszta formában az acélokhöz képest kevésbé ellenálló a környezettel szemben és érzékenyebb a magas hőmérsékletre. Ezek a jellemzők viszont ötvözéssel javíthatók. Elsősorban olyan területeken használják, ahol a súly alapvető fontosságú, mint például a versenyautók mechanikus alkatrészeinél, a repüléstechnikában, az űrhajózásban és a kerékpárokbán. Tiszta állapotban ritkán fordul elő, gyakrabban fizikai és mechanikai tulajdonságait javító fémekkel, például szilíciummal és magnéziummal ötvözve található meg.

²⁷ Forrás: Dutta, B. és Froes, F. (2016, szerk.): Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities. Hollandia, Elsevier Science.

Jelenleg az AlSi10Mg alumínium, ami 10 % szilíciumot és valamennyi magnéziumot is tartalmaz a leggyakrabban használt alumínium ötvözet a repülőgép- és a járműiparban egyaránt. Ezt a német EOS gyártó kínálja, por formában 3D nyomtatáshoz, ez lehetővé teszi akár olyan szilárd és összetett alkatrészek gyártását is, amik vékony fallal rendelkeznek. Az alumínium ötvözetek nagy szilárdság/tömeg aránnyal rendelkeznek, és jó ellenállást mutatnak a fémek fáradásával és a korrózióval szemben is.

3.3.3 Acél

Ez a leggyakrabban használt fém a világon és a 3D nyomtatásban. Az acél nyomtatása volt az egyik legjelentősebb lépcső a 3D nyomtatás fejlődésben, ezzel jelentős új felhasználási lehetőségek nyíltak meg a repülőgépiparban, az orvosi eszközökben, az autóiparban, a szerszámgyártásban, a nehéziparban, és még sok más területen. A 3D nyomtatott acél alkatrészek²⁸ ugyanolyan erősek vagy erősebbek lehetnek, mint a hagyományos gyártással készült acél alkatrészek. Ez számos változótól függ, beleértve a végfelhasználást, az acél típusát, a 3D nyomtatási technológia kiválasztását, az utófeldolgozást és az alkatrész alakját. Hagyományos technológiával gyártott acél alkatrészekkel való összehasonlítás nem egyszerű, figyelembe kell venni, hogy a szilárdság melyik aspektusára összpontosítunk, szakítószilárdság, szilárdság statikus terhelésnél, nagy ciklusú fáradásnál stb. A 3D nyomtatott acélt használják már repülőgép alkatrészekhez és védelmi iparban is kezdenek megjelenni. A nyomtatott acél legnagyobb előnye nem csak a szilárdsága, hanem az egyedül álló képesség arra, hogy olyan belső csatornákat és rácsos kitöltéseket tudunk létrehozni az alkatrészekből, amelyek hagyományos gyártástechnológiákkal lehetetlenek. A hagyományos gyártáshoz több ezer acélötvözet létezik, amik mind más-más mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek, a 3D nyomtatásban azonban csak néhány tucat van. Ezek között vannak olyan acélötvözetek, amik csak az utóbbi pár évben jelentek meg és a 3D nyomtatáshoz lettek külön kifejlesztve, amelyek célja a hagyományosan gyártott acél alkatrészekkel kapcsolatos problémák megoldása. 3D nyomtatásban alkalmazott acélokat négy csoportra oszthatjuk. Leggyakrabban használatosak a rozsdamentes acélok ilyen például a 316L, 304L és a 420 jelzésű acélok. Ezután következnek a szerszámacélok, mint a D2, M2, H13, H11 és az MS1. Acél 3D nyomtatáshoz elérhetővé váltak még az alacsonyán ötvözött acélok, mint a 4140 és a betétben edzhető acélok is mint a 20MnCr5.

²⁸ Forrás: Toyserkani, E. (2021): Metal Additive Manufacturing. Egyesült Királyság, Wiley.

3.3.4 Nikkel-króm ötvözet (Inconel)

Az Inconel²⁹ egy szuperötvözet, ami nikkel-króm alapú. Hagyományos technológiák esetében az összetett alakzatok legyártását megnehezítik az inconel fokozott mechanikai tulajdonságai. Ezért az inconel 3D nyomtatása egyszerre idő- és költségmegtakarítást jelent az ilyen alkatrészek gyártásában. Ez a szuperötvözet az oxidációval és a korrózióval szembeni kiváló ellenállása révén emelkedik ki más fémek közül. Emiatt az inconelt széles körben használják szélsőséges környezetben, mint a nukleáris és a repülőgépipar. Az Inconel korrózióállósági tulajdonságai a vastag passzíváló rétegnek tulajdoníthatók, amely oxidáció révén magas hőmérsékleten képződik a felületén. Ez teszi ezt az anyagot egy osztálynyira különállóvá alumínium és acél társaitól. Oxidáció akkor következik be, amikor az oxigén kölcsönhatásba lép egy anyaggal, például egy fémmel. Másrészt a korrózió egy anyag romlását jelenti. Az oxidáció rozsda kialakulásához vezethet a fém felületén. A korróziót savas környezet vagy más vegyi anyagok is okozhatják. Az Inconel magas hőmérsékleten mutatott nagyszerű mechanikai tulajdonságai a két vagy több fémes elemből képződő kristályos vegyületeken alapulnak. Ezek a vegyületek az anyagban lévő apró kockakristályok, amelyek gátolják a csúszást és a kúszást. A két legnépszerűbb ötvözet, amellyel ma a piacon találkozhatunk, az Inconel 718 és 625. Az Inconel 718 kémiai összetétele molibdént, nióbiumot és tantált, alumíniumot és titániumot tartalmaz. A 625 ötvözet kémiaiailag nikkelből, krómból és molibdénből áll. A kémiai összetételbeli különbség a két ötvözet tulajdonságaiban eltérést okoz, nevezetesen az oxidációs és korrózióállóságban. Ez azt jelenti, hogy mindkét ötvözetet különböző célokra használják. A 625-ös ötvözet tökéletesen alkalmas többek között sugárhajtóművek, hőcserélők, turbinagyűrűk és nyomásszelepek alkalmazásához. Az Inconel ezen fajtája arról is ismert, hogy ellenáll a tengervíznek és a durva vegyi anyagokkal szemben. Míg a 718-as megfelelője az előbb említetteken felül magas korrózióállósággal rendelkezik.

²⁹ Forrás: Deng, D. (2018): Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties. Svédország, Linkopings Universitet.

4. ADDITÍV GYÁRTÁS KRITIKUS ASPEKTUSAI

3D nyomtatott alkatrészek minőségének ellenőrzése rendkívül fontos a gyártási folyamat során, mivel kisebb hibák a végső termék minőségére is hatással vannak, ezért az állandó minőség megtartása végett elengedhetetlen a legyártott darabok ellenőrzése. A 3D nyomtatás során számos módszer és technika használható a minőségellenőrzéshez. Viszont fontos megjegyezni, hogy a minőségellenőrzési eljárásokat és technikákat a konkrét alkalmazás, a nyomtatott alkatrész funkciója, valamint a nyomtatási technológia is meghatározza³⁰. A gyártási folyamat során rendszeres minőségellenőrzésekkel és tesztekkel biztosítani lehet az alkatrészek megbízhatóságát és teljesítményét. A megfelelő minőség biztosítása kulcsfontosságú, ha sorozatgyártásról van szó. Ezért az autóipar megköveteli az alkatrészek magasszintű minőségét és szabványoknak való szigorú megfelelést.

A QMS (Quality Management System)³¹ tanúsítvány igazolja, hogy egy vállalat vagy szervezet minőségirányítási rendszere megfelel bizonyos nemzetközi vagy iparági minőségi szabványoknak. A QMS tanúsítvány azt mutatja, hogy a vállalat követi a meghatározott minőségi irányelveket és folyamatokat a termékek gyártásában. Az egyik legismertebb és legelterjedtebb minőségirányítási rendszer a világon az ISO 9001³². Ez a nemzetközi szabvány részletesen meghatározza a minőségirányítás alapelveit és követelményeit, amelyeknek egy vállalatnak meg kell felelnie a tanúsítvány megszerzéséhez. Az ISO 9001 tanúsítvány azt jelzi, hogy a vállalat rendelkezik egy hatékony minőségirányítási rendszerrel, amely segíti a minőség javítását és a folyamatos teljesítést. A QMS tanúsítványok nemcsak az ISO 9001-hez köthetnek, hanem más szakmai és iparági szabványokhoz is, például az ISO 14001³³ (környezeti irányítási rendszer), IATF 16949³⁴ (autóipari minőségi irányítási rendszer) és a ISO/TC 261³⁵ (additív gyártás minőségi irányítási rendszer). Az adott iparágra és az ügyfélkövetelményekre épülően választják ki a megfelelő tanúsítványt. A tanúsítvány általában

³⁰ Forrás: Sheng, B., Kanfoud, J. és Gan, T.H. (2022): Quality Control of Metal Additive Manufacturing. IntechOpen.

³¹ Forrás: Chen, Z. (2021): A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping 17.

³² Forrás: ISO 9001 (2015): Minőségirányítási rendszerek - követelmények, International Organization for Standardization, Genf, Svájc. <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>

³³ Forrás: ISO 14001 (2015): Környezetvédelmi irányítási rendszerek, International Organization for Standardization, Genf, Svájc. <https://www.iso.org/standard/60857.html>

³⁴ Forrás: IATF 16949 (2016): Autóipari Minőségirányítási Rendszer, ÉMI-TÜV SUD. <https://www.tuvsud.com/hu-hu/szolgalatasok/audit-es-rendszertanustas/iatf-16949>

³⁵ Forrás: ISO/TC 261 (2011): Additív gyártás, International Organization for Standardization, Technical Committees. <https://www.iso.org/committee/629086.html>

külső auditorok által végzett ellenőrzés során szerzett, és rendszeresen megújítandó a fenntartásához.

	Szabványok és előírások	
Technológia értékelése	Az adatokra vonatkozó szabvány	ISO/ASTM 52915
	Ajánlott gyakorlat a technológiákra vonatkozó értékeléshez és minősítéshez	DNVGL-RPA203
Tervezés	Általános tervezési elvek	ISO/ASTM52910, ISO/ASTM52911
Nyomtatási folyamat	QMS-szabványok	ISO 9001, AS9100, ISO 13485
	Létesítmény biztonsági irányítás	UL3400
	Gyártásellenőrzés	ISO/ASTM 52904
Utókezelés	Specifikáció, végfelhasználói műszaki követelmények.	AMS 7000
Ellenőrzés és tesztelés	A vizsgálati módszerekre vonatkozó szabványok	ASTM F2971, F3122, ISO/ASTM 52902

15. ábra: Additív gyártás folyamat kritikus aspektusai és azok szabványai
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Hagyományos gyártástechnológiák esetében a minőségellenőrzési terület már kiforrottnak számít. Például műanyag alkatrészek fröccsöntésénél a gyártók úgy biztosítják az állandó minőséget, hogy a fröccsöntő szerszám formája mindig ugyan az és ellenőrizve van, hogy nincs-e elkopva vagy megsérülve. Ez biztosítja, hogy az alkatrészek minden alkalommal ugyanúgy készüljenek. A 3D nyomtatásban viszont nem tudják közvetlen a gyártás után teljesen garantálni az alkatrészek minőségét³⁶. Az alkatrészek nyomtatása hosszú folyamat, amelyet sok kölcsönhatásban álló nyomtatási paraméter befolyásol. Ilyen például a kitöltési mintázat, az alátámasztás, a rétegvastagság, a lerakott anyag mennyisége és fémek esetében lehet még a szinterkezési idő. Ezeken a nyomtatási paramétereken kívül számos külső tényező is befolyásolja a nyomtatás minőségét. Ilyen például a 3D nyomtató karbantartottsága, a tárgyasztal felülete, a 3D nyomtató kalibrálása, valamint ide tartozik még a nyomtatási környezet hőmérséklete és páratartalma is. Ezek mind befolyásolják a 3D nyomtatott alkatrészek minőségét. A megbízható gyártáshoz a minőségnek állandónak, bizonyítottnak és megismételhetőnek kell lennie. Ezt úgy lehet elérni, ha azonos paraméterek és körülmények vannak biztosítva a nyomtatás során. Nyomtatási körülmények közé tartozik a nyomtatott alapanyag is, mivel nyomtatáshoz kapható alapanyagokat sok különböző gyártó is értékesíthet ezért előfordulhat, hogy az alapanyag megnevezése megegyező, de összetétele eltérő, ami más minőségű végterméket

³⁶ Forrás: Végvári Zs. (2023): A 3d nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. Katonai Logisztika 2023. évi 1-2. szám pp. 177-198 http://real-j.mtak.hu/25795/1/KatLog_2023_1-2.pdf (Megtekintve: 2023.11.11)

eredményezhet. Ajánlott mindig ugyan azon gyártó által gyártott alapanyagot használni. Tehát látható ahhoz, hogy a nyomtatott termék minősége állandóan biztosított legyen a nyomtatást minden aspektusból ellenőrizni és biztosítani kell (lásd 15. ábra). A következőkben kifejttem az additív gyártás kritikus aspektusait.

4.1 Technológia értékelése

Az additív gyártás forradalmi technológiaként jelent meg, amely széleskörű alkalmazásokkal rendelkezik a különböző iparágakban. Az 3D nyomtatott termékek minőségének és megbízhatóságának biztosításában kiemelkedően fontos, és a technológiák értékelése és minősítése. Mivel az additív gyártás többféle additív eljárással is történhet azokat vizsgálni kell és értékelni, hogy az adott termék esetében a legmegfelelőbb eljárást alkalmazzuk. Figyelembe véve a gazdasági szempontokat és a termék minőségi követelményeit. Költségoptimalizálásban is jelentős szerepe van az előzetes technológiai értékelésnek, ami lehetővé teszi a hatékony additív gyártást, csökkentve a gyártási hulladékot és a hibákat. Az eljárások alapanyagai legtöbb esetben nem felcserélhetőek, például egy SLM fém 3D nyomtató melynek alapanyaga valamilyen fémpor, nem képes DED 3D nyomtatáshoz gyártott fém huzallal nyomtatni. De ezeknél a költséges nyomtatási eljárásoknál a nyomtató gép gyártója amúgy is felsorolja a felhasználható alapanyagok listáját. A technológiaértékelés lehetővé teszi az additív gyártásban használt különböző anyagok értékelését, biztosítva, hogy azok megfeleljenek a minőségi szabványoknak és megfelelőek legyenek a tervezett alkalmazáshoz. A nyersanyagok kiválasztása az additív gyártás folyamatának első és legfontosabb lépése, mivel közvetlen hatással van a végtermék minőségére. A nyersanyagok számos tulajdonsággal rendelkeznek, mint például mechanikai, hőmérsékleti és kémiai paraméterek, amelyek meghatározzák az anyag alkalmasságát egy adott alkalmazáshoz. A minőségi alapanyagok használata elengedhetetlen annak érdekében, hogy a végtermék megfeleljen a kívánt specifikációknak, és az anyagtulajdonságok konzisztenciája elengedhetetlen az ismételhetőséghez. Az anyagköltségek befolyásolják az gyártási folyamat gazdaságosságát, ezért fontos a minőségi előírásoknak megfelelő, gazdaságos anyagok kiválasztása. Szigorú szabályozási előírásokkal rendelkező iparágakban, mint például az autóipar elengedhetetlen a bevizsgált nyersanyagok használata a termék minőség érdekében. A nyersanyagok nyomon követhetősége elengedhetetlen a minőségellenőrzéshez, különösen olyan alkalmazásokban, ahol a termékfelelősség kérdéses.

4.2 Tervezés

A 3D nyomtatás minőségbiztosítása kulcsfontosságú a megbízható és biztonságos termékek előállításához. A konkrét termék előállítása pedig a tervezéssel kezdődik, ami történhet többféle módon is, de lényegében additív gyártáshoz minden esetben egy 3D-s modell a végeredmény. A tervezési szakaszban figyelembe kell venni az állami és szabályozási követelményeket, valamint a funkcionális, műszaki és minőségi követelmények fontosságát. Az állami és szabályozási előírásoknak való megfelelés elengedhetetlen annak biztosításához, hogy a 3D nyomtatott termékek megfeleljenek a jogi és biztonsági kötelezettségeknek, védve mind a gyártókat, mind a fogyasztókat. A meghatározott műszaki és funkcionális követelményeknek való megfeleléssel történt tervezés biztosítja, hogy a 3D nyomtatott alkatrész hatékonyan és megbízhatóan teljesítse a tervezett funkcióit. Ilyen meghatározott követelmény lehet például, hogy az alkatrész ne deformálódjon egy adott erő hatására. Minden egyes alkatrész egyedi tervezési követelményeit, például a teherbíró képességet vagy a vegyi ellenállást alaposan figyelembe kell venni és szimulációval és teszteléssel validálni kell.

A geometria és a számítások az additív gyártás folyamatának tervezési fázisában összefüggnek a tervezési validálással, ami az előzőekben került említésre. A tervezési validálás során a geometria kulcsfontosságú szempont. Ennek oka, hogy az additív gyártási folyamatok lehetővé teszik komplex geometriák létrehozását, amelyek hagyományos gyártási módszerekkel nehezen vagy egyáltalán nem valósíthatók meg. A geometria optimalizálása során a tervezők kihasználhatják az additív eljárások előnyeit, például a könnyű súlycsökkentést, belső szerkezetek kialakítását és más speciális geometriai tulajdonságokat. A topológiai optimalizálás (véges elem analízis) és a fáradási ellenállás számításai is összefüggnek a tervezési validálással és a geometriával. Ezek a számítások lehetővé teszik a tervezők számára, hogy feszültségelemzést végezzenek az alkatrész tervezése során. A számítások révén meghatározható, hogy az adott geometria és anyag milyen terheléseket képes elviselni anélkül, hogy meghibásodna. Ez lehetővé teszi a túlterhelés elkerülését és megmutatja, hogy az alkatrész melyik részeire esik a terhelés, ezzel lehetséges a súlycsökkentés. Fáradási ellenállás szimulációjával vizsgálható és biztosítható, hogy hogyan viselkednek az anyagok hosszabb ideig tartó terhelés esetén.

4.3 Nyomtatási folyamat

Az additív gyártás, nyomtatási folyamata során számos fontos szempontot kell figyelembe venni, hogy a kinyomtatott termékek minősége állandó legyen. Az egyik ilyen

fontos szempont a nyomtatási paraméterek fontossága. A nyomtatási paraméterek olyan beállításokat tartalmaznak, mint a réteg- és falvastagság, a nyomtatási sebesség és a nyomtatófej hőmérséklete. Ezek a beállítások befolyásolják a nyomtatott termék minőségét és tulajdonságait.

Például egy vékonyabb rétegvastagság lehetővé teszi részletesebb megjelenést, de hosszabb nyomtatási időt eredményez. A hőmérséklet fontos az anyag fúziójához és a megfelelő tapadáshoz. A nyomtatási sebesség szintén kritikus, mivel túl gyors nyomtatás esetén a rétegek nem fednek megfelelően egymásra, míg túl lassú nyomtatás esetén az anyag túl sok hőt kap, ami torzulást vagy egyenetlenségeket okozhat. Ezeket a nyomtatási paramétereket külön-külön minden alkatrészre be kell állítani abban az esetben, ha a nyomtatási ciklusok között más-más alkatrészt nyomtatunk. A nyomtatási paramétereket tartalmazó fájl maga az STL-fájl, ami tartalmazza az alkatrész geometriáját és a nyomtatónak fontos szerszámpálya koordinátáit is.

Viszont a nyomtató beállításai is fontosak, amik biztosítják nyomtatás folyamán a megfelelő és hiba mentes üzemelést. A nyomtató beállításainak megfelelő konfigurálása magában foglalja a lézer vagy a nyomtatási fej pozíciójának és mozgásának beállítását. A nyomtatónak pontosan kell követnie a tervezett szerszámpályát és megfelelően kell vezérelnie a nyomtató fejet. Ha a nyomtató nem megfelelően van beállítva, az vezethet a termék torzulásához vagy egyenetlenségekhez. A nyomtatók idővel kisebb változásokat mutathatnak a pontos nyomtatás terén. Ennek megakadályozása érdekében rendszeres kalibráció szükséges. A kalibráció során a nyomtató pontosan beállítja a lézer vagy a nyomtatási fej pozícióját és mozgását, valamint a hőmérsékletet, hogy biztosítsa a minőség és a pontosság fenntartását. A kalibráció részeként történik még a tárgyasztal szintezése is. Kalibráció során történhet kalibrációs nyomtatás is, amikor egy minősítő mintát nyomtatnak ki, ezt a modellt mérőműszerekkel megméri és ezáltal vizsgálják, hogy megfelelőek-e nyomtató beállításai. Minősítő mintákat és alkatrészeket kell használni a minőségellenőrzés során is. Ezek az összetevők a termékek minőségének referenciái lehetnek. Sorozat gyártás során periodikusan szükséges újbóli minősítést elvégezni annak érdekében, hogy a berendezések és rendszerek folyamatosan megfeleljenek a minőségi követelményeknek.

Bonyolult vagy levegőben lebegő részek nyomtatásakor alátámasztási struktúrákat használnak, hogy azok a levegőben ne süllyedjenek meg vagy ne torzuljanak el. Ezeket a struktúrákat később eltávolítják, de fontos, hogy megfelelően legyenek tervezve és elhelyezve, hogy a támogatott részek ne sérüljenek, és a felületük sima legyen.

A nyomtatás során a melegedő nyomtatott részek hűtésére és szellőztetésére is figyelni kell. A hő túlzott felhalmozódása torzuláshoz és egyenetlenségekhez vezethet. A megfelelő szellőzés és hűtés segít elkerülni ezeket a problémákat. A nyomtató gépek általában elvannak látva valamilyen hűtési szerkezettel. A környezeti körülmények, például a páratartalom és a pormentesség, hatással vannak a nyomtatott termékek minőségére. A páratartalom kontrollálása segíthet elkerülni a nyomtatott részek deformációját, míg a pormentesség megakadályozza a szennyeződések, amelyek a nyomtatás során problémákat okozhatnak. A nyomtatási területnek tiszta és ellenőrzött környezetet kell biztosítania a legjobb eredmények eléréséhez.

A gyártás során folyamatosan ellenőrizni kell a nyomtatott termékek minőségét és megfelelőségét az előírt méretekhez, felületi minőséghez, szabványokhoz és specifikációkhoz képest. Ennek egyik módszere a vizuális ellenőrzés, ami a nyomtatás során lehetővé teszi a folyamat valós idejű ellenőrzését és a hibák azonnali felismerését. Gyakorlatban ez többféle képen is történhet, néhány 3D nyomtató be van szerelve beépített kamerákkal vagy szenzorokkal, amelyek folyamatosan figyelik a nyomtatás folyamatát. Ezek a kamerák rögzítik a nyomtatott alkatrész különböző részeit, amint azok épülnek. A szenzorok az anyagok hőmérsékletét és egyéb fontos paramétereket figyelik. Egy másik megközelítés lehet egy külső kamera használata, amely képeket vagy videófelvevételeket készít a nyomtatási folyamatról. A kamera képeket készít az alkatrészről, és ezt a képet a felhasználó vagy az operátor később megvizsgálhatja. Egy egyszerűbb megoldás, ha a felhasználó vagy az operátor rendszeresen készíthet fényképeket a nyomtatás során. A fényképek segítségével ellenőrizhetik a nyomtatott alkatrész külsejét és az esetleges hibákat, például repedéseket vagy deformációkat.

A nyomtatási folyamat alatti ellenőrzések másik típusa a hőmérsékletek ellenőrzése. A nyomtatás során a hőmérséklet ellenőrzése fontos a nyomtatott alkatrészek minőségének és a megfelelő anyagfúzió biztosításához. Gyakorlatban történhet a nyomtatón belül és a nyomtatott területek közelében elhelyezett hőmérőkkel, amik monitorozzák a hőmérsékletet. Ezek a hőmérők folyamatosan figyelik a környezeti hőmérsékletet és az anyagok hőmérsékletét. Emellett vannak nyomtatók melyek szabályozzák a hőmérsékletet, hogy az a megfelelő szinten maradjon. Például a fűtőpad hőmérsékletét és a nyomtató fejének hőmérsékletét beállíthatják a megfelelő értékekre az optimális nyomtatási minőség eléréséhez. De a legegyszerűbb A nyomtatón vagy a számítógépen megjelenő hőmérőadatok lehetővé teszik a felhasználók vagy operátorok számára, hogy figyeljék a hőmérsékletet a nyomtatás során. Ha a hőmérséklet elvételét észlelik, azonnal beavatkozhatnak a probléma megoldása érdekében. A hőmérsékleti ellenőrzés alapvető fontosságú a nyomtatás minőségének és a megfelelő anyagfúzió biztosításához. A hőmérsékleti változások torzulást vagy más problémákat okozhatnak a

nyomtatott alkatrészekben, ezért a nyomtatási folyamat során rendszeres hőmérséklet-ellenőrzést kell végezni.

A gyártási eljárás során minden lépésnek továbbá értéknek szigorúan ellenőrzöttnek és dokumentálnak kell lennie, hogy a folyamatok ismételhetőek legyenek. Az additív gyártás minőségének biztosításához egy szigorú minőségellenőrzési rendszert kell kialakítani és fenntartani. Ez segít megelőzni a minőségi hibákat, növeli a termékek megbízhatóságát és csökkenti a selejtezést, ami hozzájárul a vállalat hosszú távú sikeréhez.

4.4 Utókezelés

Az additív gyártás utókezelési fázisában a minőségbiztosítás szempontjából számos tevékenységet szükséges szigorúan felügyelni. Az egyik ilyen a nyomtatott termékek eltávolítása az nyomtatási térből. Az gyártás során keletkező felesleges anyagok továbbá a kész termék biztonságos eltávolítása fontos a minőségének biztosítása érdekében. Az eltávolítási folyamatnak precíznek és megbízhatónak kell lennie. Az eltávolítás során a megfelelő eszközök és technikák alkalmazása kiemelten fontos. A választott eszköz és technika az anyagtól és a nyomtatási beállításoktól is függ. Fontos, hogy óvatosan és körültekintően kell dolgozni, hogy ne roncsoljuk meg a nyomtatott terméket vagy a nyomtatási tárgyasztalt. Az additív gyártás során gyakran a nyomtatott alkatrészeket egy építési platformon nyomtatják melyek össze vannak kapcsolódva a nyomtatott termékkel. Ez leginkább fém additív technológiáknál megfigyelhető, de például az SLA 3D nyomtatásnál is előfordul. A minőségbiztosítás részeként fontos a platformról való pontos és biztonságos eltávolítás, hogy a termék ne sérüljön.

Fémek esetében az építési platformról való eltávolítás kézi erővel nem megvalósítható, vagy csak nagyon nehezen és nem konzisztensen. Viszont gépi rendszerek használata segíthet a konzisztens minőség elérésében. Az automatizált berendezések pontosan és ismételhetően végezhetik el az eltávolítási műveleteket. A huzalszikra vágás más néven Wire EDM (Wire Electrical Discharge Machining) eljárást alkalmazzák az additív gyártásban nyomtatott fémalkatrészek minőségi eltávolítására az építési platformról. A Wire EDM egy precíziós vágási eljárás, amely elektromos kisüléseket használ vezető huzallal a munkadarab megmunkálásához. Ezt a módszert azért alkalmazzák, mert kiváló pontossággal és kiváló minőségű felületek létrehozására képes, és lehetővé teszi az összetett vagy finom részletekkel rendelkező fémalkatrészek szétválasztását.

Additívan gyártott fém termékek esetében szinte minden esetben az utókezelés része a hőkezelés, szinterezés is. A hőkezelés olyan fontos folyamat, amelynek során a nyomtatott alkatrészek megfelelő időtartamig megfelelő hőmérsékletnek vannak kitéve. Ez szükséges a

szilárdság, keménység vagy egyéb tulajdonságok eléréséhez, ami kulcsfontosságú az elérendő minőség szempontjából. A hőkezelés során a megfelelő hőmérséklet és időzítés szigorú szabályozásával biztosítható az állandó minőség. Az alkatrészek hőkezeléséhez megfelelő berendezéseket és technológiát kell használni. A hőkezelő kemencék és hőmérséklet-szabályozó rendszerek rendszeres karbantartása és kalibrálása szükséges. A hőkezelés során a munkadarabok tulajdonságainak ellenőrzése és dokumentálása alapvető fontosságú a minőségellenőrzés szempontjából. Például végrehajthatóak anyagvizsgálatok, keménységmérés vagy mikroszkópos vizsgálatok az elvárt tulajdonságok bizonyítására.

Hőkezelés során a folyamat szigorú szabályozása kulcsfontosságú. A hőmérséklet ingadozásainak minimalizálása és a folyamat szabályozása automatizált rendszerek segítségével is elérhető. Legtöbb esetben az additív gyártás során keletkező alkatrészeknek további mechanikai feldolgozásra lehet szükségük, például marás, esztergálás, menetvágás vagy furatok kialakítása. Ezeken a műveleteken is szigorú minőségbiztosítási eljárásoknak kell megfelelni. Minden lépés során részletes nyilvántartásokat kell vezetni az anyagokról, paramétereikről, és az ellenőrzési eredményekről. Ezek a nyilvántartások kulcsfontosságúak a minőség nyomon követése és az esetleges problémák azonosítása szempontjából. Ezen tevékenységek összessége biztosítja, hogy az additív gyártás utókezelési folyamatai megfelelően működjenek, és a végtermék a megfelelő minőségi sztenderdeknek megfeleljen.

4.5 Ellenőrzés és tesztelés

A 3D nyomtatott gépjárműtechnikai alkatrészek minőségének ellenőrzésére és tesztelésére számos különböző eljárás és módszer alkalmazható. A választott tesztek és vizsgálatok a konkrét alkatrész típusától és funkciójától függenek, de általánosságban elmondható, hogy a legalapvetőbb módszer az alkatrészek vizuális ellenőrzése és a méreteinek vizsgálata. A 3D nyomtatás során előfordulhatnak felületi hibák, például repedések, horpadások, megfolyások, karcok vagy más sérülések az alkatrészek felületén. Az emberi szem segítségével vizuális ellenőrzés során ezeket az apró hibákat könnyen észlelhetik. A rétegfelépítés során is léphetnek fel hibák, például rétegek közötti rés, túlzott rétegtávolság vagy egyenetlen rétegfelépítés. Ezek a hibák a vizuális ellenőrzés során világosan láthatók lehetnek. Viszont fontos az alkatrész pontos méreteinek biztosítása, valamint az illeszkedő felületeinek minősége is.

Az 3D nyomtatás után alkalmazott műszaki mérések és ellenőrzések kiemelkedő fontosságúak az alkatrészek méretpontosságának ellenőrzése és a minőség biztosítása szempontjából. Az alábbiakban ismertetett módszerek és eljárások segítenek az alkatrészek

tervezési toleranciáknak való megfelelésének megerősítésében, és hozzájárulnak az optimális minőségű nyomtatott alkatrészek létrehozásához. A mérőeszközök, például tolómérők és mikrométerek használata lehetővé teszi az alkatrészek hosszúságának, szélességének és magasságának pontos mérését. A koordináta mérőgépek és lézer szkennerek további lehetőségeket kínálnak a 3D-s alkatrészek dimenzióinak és geometriájának alapos elemzésére. Az ellenőrzések során különös figyelmet fordítanak a tervezési toleranciák és az előírt szabványok betartására. A koordináta mérőgépek rendkívül pontosak és ismételhető méréseket végeznek, ami lehetővé teszi a szűkebb toleranciájú méréseket is. Hasznosak az összetett és precíziós alkatrészek méretpontosságának és minőségének ellenőrzésében. A méréseket gyakran CAD modellekkel összevetik, hogy meghatározzák az esetleges eltéréseket. A lézer szkennerek viszont olyan eszközök, amelyek lézeres sugárzásokat használnak a tárgyak felületi pontjainak gyors és pontos felméréséhez. A lézer szkennerek 3D pontfelhőket hoznak létre a munkadarabról vagy alkatrészről, és ezen pontfelhők alapján lehetőség nyílik a méretek és a geometria teljes elemzésére.

A felületi finomságmérések és a mikroszkópiás vizsgálatok segítenek a felületi hibák, az egyenletesség és a domborúság ellenőrzésében. Az eltérések az előírt méretekhez képest meghatározásra kerülnek, és a számítógépes szoftverek segítségével az adatok könnyen összevetésre kerülnek a tervezett értékekkel. Emellett fontos megemlíteni a fémtani vizsgálatokat, amelyek segítenek az anyagminőség és szilárdság ellenőrzésében. Ezek az eljárások feltárják az anyag belső szerkezetét, és hozzájárulnak az alkatrész megbízható teljesítményéhez. A fémtani vizsgálat az anyagok mikrostruktúrájának és összetételének elemzését foglalja magában. Ennek során a minta anyagát mikroszkóp alatt megvizsgálják, és különböző anyagi tulajdonságokat értékelnek ki. A vizsgálat segítségével meghatározhatók az anyag mechanikai tulajdonságai, például a rugalmasság és a keménység. A mikroszkópos vizsgálaton kívül gyakran alkalmaznak mechanikai keménység vizsgálatot is. A keménység vizsgálat egy fontos vizsgálati eljárás az anyagok és alkatrészek minőségellenőrzésében. A keménység mérése az anyag mechanikai tulajdonságait, különösen a kopásállóságot és a mechanikai szilárdságot értékeli. Különböző módszereket alkalmaznak a keménység vizsgálatára, a legelterjedtebbek közülük a Brinell, Vickers és Rockwell keménységpróbák.

Ezek a vizsgálatok roncsolják az alkatrészeket hiszen apró nyomot hagynak maguk után viszont léteznek úgynevezett roncsolásmentes vizsgálatok is, amik olyan technikákat jelentenek, amelyek az alkatrészek vagy anyagok állapotának ellenőrzését végzik anélkül, hogy azokat károsítanák. Ezek az eljárások kiemelkedő fontosságúak a minőségellenőrzésben és a hibák azonosításában, különösen olyan alkalmazásokban, ahol a kritikus terhelések és a

megbízhatóság elengedhetetlenek. A rombolásmentes vizsgálatok lehetővé teszik a rejtett hibák, repedések és anyaghibák feltárását, ami kritikus fontosságú az alkatrészek és anyagok biztonságos alkalmazásához. Ilyen vizsgálat például az ultrahangvizsgálat melynek során magas frekvenciájú hanghullámokat alkalmaznak a vizsgált alkatrészekeken keresztül. Az ultrahang hullámok terjedési sebessége és visszaverődése alapján lehetőség van a rejtett hibák, például repedések vagy zárványok azonosítására. Az ultrahangvizsgálat széles körben alkalmazott a repülési, kohászati, és energetikai iparágakban. Másik hasonló vizsgálati módszer a röntgenvizsgálat amikor röntgensugarakat alkalmaznak a vizsgált anyagokon vagy alkatrészekeken keresztül, és a visszavert vagy áthatolt sugárzást érzékelik. Ez lehetővé teszi a belső hibák felderítését anélkül, hogy az anyagot károsítanák. Ezeknél egyszerűbb módszer a penetráns vizsgálat. A módszer során penetráns festékanyagot alkalmaznak az alkatrész felületén, ami bejut a repedésekbe vagy hibákba. A felesleges penetráns eltávolításra kerül, majd egy előhívó anyaggal azonosítják a hibákat.

Minőség biztosítás érdekében megtörténhet még az alkatrészek tesztelése valóságos használati körülményeket szimuláló próbakörnyezetekben is. Ezek a tesztek lehetővé teszik az alkatrészek tartósságának, teljesítményének és megbízhatóságának értékelését olyan környezetben, amelyben a tényleges használat során is működniük kell. Az alkatrészek terheléses vagy hőmérsékleti tesztelése hozzájárul a tartósság és megbízhatóság biztosításához. Az alkatrészeket terheléses teszteknek vetik alá, amelyek magukban foglalhatják a mechanikai terhelést, vibrációt vagy ismétlődő stresszt. Ez lehetővé teszi az alkatrészek hosszú távú tartósságának és megbízhatóságának értékelését a valós használat során felmerülő terhelésekkel szemben. A hőmérsékleti tesztek során az alkatrészeket különféle hőmérsékleti körülményeknek teszik ki, amelyek megfelelnek a környezeti változásoknak vagy a működési körülményeknek. Ez lehetővé teszi az alkatrészek hőállóságának és teljesítményének értékelését. Például autóalkatrészek hőmérsékleti tesztekkel ellenőrizhetők a motorháztető alatt fellépő hőingadozásokhoz. A tesztek során a gyenge pontok vagy anyaghibák azonosításra kerülnek, és lehetőség nyílik a tervezési és gyártási folyamatok javítására. Az ilyen hibák korai észlelése csökkenti a későbbi termelési problémákat és javítja az alkatrészek minőségét. Ezek a tesztek lehetővé teszik a fejlesztők és gyártók számára, hogy bizonyosságot szerezzenek az alkatrészek teljesítményéről és megbízhatóságáról, és hogy azok megfeleljenek a tervezési specifikációknak és a minőségi szabványoknak.

5. ADDITÍV GYÁRTÁSI PÉLDÁK AZ AUTÓIPARBAN

Az elmúlt években az autóipar figyelemre méltó átalakuláson ment keresztül, amely az új technológiai fejlesztéseknek és innovatív gyártási technológiáknak köszönhető. Az autógyártás területén az additív technológiák, különösen a 3D nyomtatás, ami kezd teret nyerni járműalkatrészek gyártásában. Az autóipar hosszú múltra tekint vissza a hagyományos gyártás terén, amely nagymértékben támaszkodik az olyan szubtraktív eljárásokra, mint marás, esztergálás és öntés az összetett alkatrészek gyártása során. Viszont az átalakulás egyik szembevető aspektusa az, hogy a 3D nyomtatás már most részét képezi sok autóipari gyártónak. Az a korszak, amikor a 3D nyomtatásról jövő időben beszéltünk, elmúlt, hiszen már kézzelfogható valósággá vált, és számos autógyártó aktívan alkalmazza az additív gyártási technológiákat kisebb-nagyobb mértékben a gyártási folyamataiban. Az átfogó áttekintés érdekében ez a fejezet valós példákat mutat be a 3D nyomtatási alkalmazásokról az autóiparban, a hajtáslánc és karosszéria alkatrészeitől kezdve a bonyolult motoralkatrészekig. Ezek az alkalmazási példák rávilágítanak arra a gyakorlatiasságra, hatékonyságra és innovatív megoldásokra, amelyet az additív gyártás az autóipari gyártás szegmensének nyújtani tud. Számos nagy autógyártó cég már felismerte az additív gyártásban rejlő lehetőségeket, mint például a BMW csoport, Porsche, Bugatti és a Renault is elkezdte a fejlesztéseket ebbe az irányba.

5.1 BMW

A BMW csoport a (Bayerische Motoren Werke) nevű német autógyártó vállalatcsoport világszerte ismert autógyártó cég, amelynek székhelye Münchenben, Németországban található. A BMW csoport^{37,38} magába foglalja BMW járműveket a Minit, mint a BMW csoport tulajdonában lévő brit autómárka és a Rolls-Royce luxusautó gyártó céget.

A BMW csoport 1991 óta alkalmazza az additív gyártási eljárásokat a koncepció prototípusok készítése során, azóta viszont jelentősen továbbfejlesztette az eljárások alkalmazását. 2020 június óta a BMW csoport a München mellett található additív gyártó létesítményben egyesíti teljes technológiai szakértelmét. Az additív gyártó központ már 50 fém-

³⁷ Forrás: (2020.12.10.): Industrial-scale 3D printing continues to advance at BMW Group. BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0322259EN/industrial-scale-3d-printing-continues-to-advance-at-bmw-group?language=en> (Megtekintve: 2023.11.04.)

³⁸ Forrás: (2018.08.23.): BMW Impresses with 3D Printed Roof Bracket for BMW i8 Roadster. 3DPrint, <https://3dprint.com/222268/bmw-3d-printed-roof-bracket/> (Megtekintve: 2023.11.04.)

és polimerfeldolgozó rendszert üzemeltet, valamint további több mint 50 rendszer működik a világ más termelési helyszínein. Az additív gyártó létesítményben évente közel 25 000 prototípus kérést dolgoznak fel, és évente közel 100 000 alkatrészt gyártanak le saját részre.



16. ábra: BMW Z4 GT3 versenyautó 3D nyomtatott vízpumpa kereke

(<https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0215062EN/racing-technology-right-from-the-3d-printer:-bmw-makes-water-pump-wheel-for-dtm-racecars-using-additive-production-method?language=en>)

Letöltve: 2023.11.04)

A BMW csoport³⁹ 2010-ben kezdett el kísérletezni additív technológiákkal, amikor a DTM-es (Német Túraautó Bajnokság) versenyautóiknak könnyű vízszivattyúkra volt szükségük (lásd 16. ábra). 2015-ben a, 3D nyomtatóval készült vízpumpa kerékekkel szerelték fel a BMW Z4 GT3 DTM versenyautókat. Egy versenyen a nagyteljesítményű hajtásláncok az idő akár 70 százalékában teljes terhelés alatt futnak, ráadásul különösen a mozgó alkatrészeknek kell megbirkózniuk a szélsőséges körülményekkel. A nagy pontosságú, nagy igénybevételnek kitett alkatrész alumíniumötvözetből készült, és már korábban is bizonyított a motorsportok világában. A beszerelt szivattyúkerek hibátlanul működtek, megerősítve a BMW csoport vezető szerepét az additív gyártási módszerek terén.

Két évvel később már additív gyártási eljárásokkal készült alkatrészek kerültek a sorozatgyártott Rolls-Royce-ok egyes típusaiba. Ma már összesen tíz 3D-nyomtatott alkatrészt is használ a Rolls-Royce modellpalettája. Például csak a Phantom modellekhez már több mint 10 000 alkatrészt gyártott additív eljárással a BMW. Ilyen alkatrészek voltak például a karosszériához hegesztett tartó konzolok, amelyek többféle kialakításban lettek legyártva (lásd 17. ábra).

³⁹ Forrás: Petrány M. (2018.11.23.): BMW Built One Million 3D-Printed Parts Since 2010. Roadtrack, <https://www.roadandtrack.com/new-cars/car-technology/a25291381/bmw-built-one-million-3d-printed-parts-since-2010/> (Megtekintve: 2023.11.06.)



17. ábra: Additívan gyártott hegesztett tartó konzolok

(<https://www.voxelmatters.com/rolls-royce-shows-off-heaps-of-serially-3d-printed-automotive-metal-parts/>
Letöltve: 2023.11.05)

Mi sem bizonyítja jobban, hogy a BMW csoport élen jár a 3D nyomtatás tömeggyártásban történő felhasználásában, hogy létrehozta az első olyan 3D nyomtatott fém alkatrészt, amelyet sikeresen gyártottak sorozatgyártott közúti autóhoz. Az alkatrész a 2018-as BMW i8 Roadster tetőmerevítő konzolja (lásd 18. ábra), már sok éve dolgoztak rajta, amíg a 3D nyomtatás el nem jutott arra a szintre, hogy az alkatrész tömeges, bár viszonylag kis mennyiségben történő gyártását megkezdhessék. A konzol segítségével az autó lágytetője gyorsan fel- és leemelhető, illetve cikcakkos elrendezésben össze- és széthajtható. A tetőmerevítő konzol feladata, hogy emelni, tolni és húzni tudja a tető súlyát és kellőképpen könnyű legyen. A kialakítása szükségszerűen összetett volt, ami lehetetlenné tette az öntést.



18. ábra: BMW i8 Roadster tetőmerevítő konzolja

(<https://www.autoevolution.com/news/bmw-to-set-up-new-3d-printing-center-125006.html> Letöltve: 2023.11.03)

5.2 Porsche

A Német Porsche szintén egy nemzetközileg elismert autógyártó cég, amely leginkább sportautók gyártására specializálódott. A Porsche Classic⁴⁰, a német gyártó egyik részlege, amely a régi és már nem gyártott modellekhez szállít alkatrészeket, már 2018-ban alkalmazott additív technológiákat fém és polimer alkatrészek pótlására. Bár a részleg mintegy 52 000 alkatrészt tárolt, az alkatrészek egy részének gyártásához szükséges szerszámok elhasználódtak vagy már nem léteztek. Ez különösen a limitált szériás modellek esetében jelentet hatalmas problémát. A részleg kilenc alkatrészt gyártott sikeresen a technológia segítségével, köztük a 959-es kuplungkioldó kart (lásd 19. ábra), a 356-osok hőcserélőjének tartóját és a 1991-es Speedster tükör konzolját. A kuplungkioldó kar gyártásához SLM 3D nyomtatási technológiát alkalmaztak és a gyártást követően szigorú ellenőrzési eljárásokon esett át. A nyomtatott kioldókar mind a közel három tonnás terhelésű nyomáspróbán, mind az azt követő, belső hibák kimutatására irányuló CT (komputertomográfia) vizsgálaton kiválóan megfelelt. A tesztjárműbe szerelt karral végzett gyakorlati tesztek és a kiterjedt vezetési tesztek megerősítették az alkatrész kifogástalan minőségét és működését.



19. ábra: SLM technológiával gyártott Porsche 959-es kuplungkioldó kar

(<https://content3.eu.porsche.com/prod/pag/classic/ClassicExplorer.nsf/ClassicPartsExplorerProductDetail?ReadForm&country=usa&se=959&mo=&my=&ca=&sw=&pr=2EC8F373EFFBE27BC125826C003CC0B8> Letöltve: 2023.11.06)

⁴⁰ Forrás: (2012.02.12.): Porsche Classic supplies classic parts from a 3D printer. Porsche AG, <https://newsroom.porsche.com/en/company/porsche-classic-3d-printer-spare-parts-sls-printer-production-cars-innovative-14816.html> (Megtekintve: 2023.11.04)

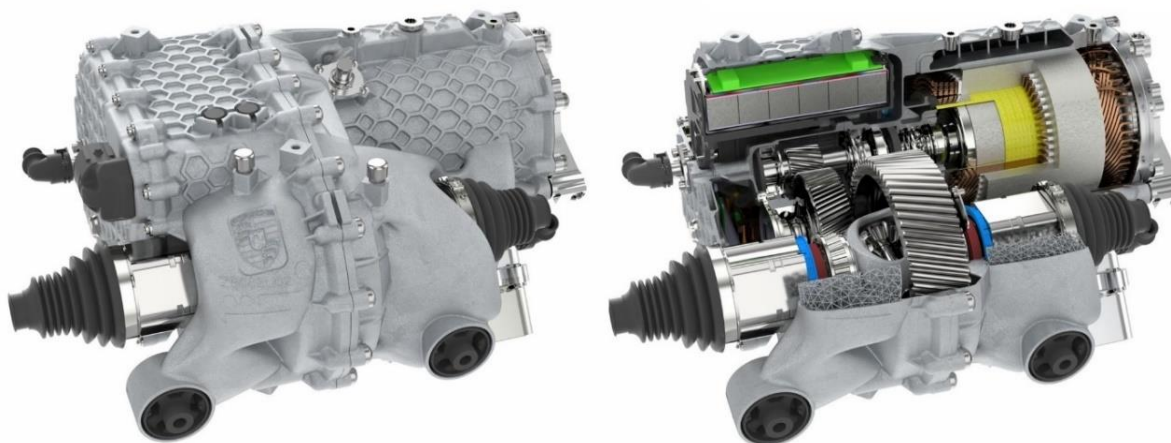
Miután a Porsche⁴¹ már korábban használta az additív technológiát utángyártott alkatrészekhez, a következő lépés az volt, hogy sorozatgyártott járműveknél is alkalmazza. Ezt tette meg a Porsche 911 GT2 RS sportautó esetében, ahol a nagy igénybevételeknek kitett dugattyúíhoz alkalmazza (lásd 20. ábra). A dugattyúk nyomtatásához a Trumpf által gyártott TruPrint 3000 sorozatú 3D nyomtatókat használta, amik DMLS technológián alapulnak. Nyomtatás és a megvelelő ellenőrző vizsgálatok után a dugattyúkat beépítették egy motorba a gyakorlati teszteléshez. A motort 200 órás tartóssági tesztnek vetették alá egy próbapadon, a legszigorúbb körülmények között. A tesztprogram során 24 órát szimuláltak egy nagysebességű pályán, ami közel 6000 kilométert jelentett, átlagosan 250 km/h sebességgel, beleértve a szükséges tankolási megállásokat is. Emellett további 135 órát teljes terheléssel és körülbelül 25 órát húzóterheléssel terheltek meg, minden esetben különböző motorfordulatszámmal. A végeredmény az lett, hogy minden dugattyú megfelelt a teszten. Az additív technológiának köszönhetően a dugattyú tömegét sikerült csökkenteni, amivel a lengő tömegek csökkenése miatt növelhető lett a motor fordulatszáma. A hagyományos kovácsolt dugattyúk teljesítmény határa 515kW (700 LE) volt, a 3D nyomtatott dugattyúké 537kW (730 LE), ezzel 22 kW-al növelték a motor teljesítményét.



20. ábra: A Porsche GT2 RS 3D nyomtatott dugattyúinak gyártási fázisai
<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovation/en/porsche-innovation/3d-printed-pistons>
(Letöltve: 2023.11.04)

⁴¹ Forrás: 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS. Porsche AG,
<https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovation/en/porsche-innovation/3d-printed-pistons>
(Megtekintve: 2023.11.02.)

A nyomtatott dugattyúk sikeresen bizonyították a 911 GT2 RS motorjában, ezért ezután a cég további alkalmazásokra szeretne volna használni az additív technológiát⁴². A következő alkatrész az elektromos autókban használt villanymotor háza volt, amit nagy tisztaságú fémporból gyártottak le, DMLS-en alapuló eljárással (lásd 21. ábra). A kifejlesztett teljes elektromos meghajtású ház magas minőségi követelményeknek felel meg, ezt biztosították a szigorú ellenőrzésekkel. A villanymotorral azonos házba építették be az utána következő kétfokozatú sebességváltót. Amire az additív technológia által biztosított topológia optimalizáció révén érték el. A funkciók integrálásával egyetlen házba és a topológia optimalizálásának köszönhetően a házrészek súlya körülbelül 40 százalékkal csökkent és kompaktabbá vált. Ez a könnyített szerkezetű építésnek köszönhetően a teljes meghajtó esetében mintegy tíz százalékos súlymegtakarítást jelent. A 1,5 milliméteres összefüggő falvastagság ellenére a rácsszerkezeteknek köszönhetően a villanymotor és a sebességváltó közötti merevség 100 százalékkal nőtt. A méhsejtes szerkezet csökkenti a vékony házfalak rezgéseit, és így jelentősen javítja a hajtómű egészének akusztikáját. Ezzel egyidejűleg a merevséget is jelentősen megnövelték.



21. ábra: Fém 3D nyomtatott villanymotor ház

<https://www.topgear.com/car-news/electric/porsche-using-3d-printing-make-ev-parts> (Letöltve: 2023.11.06)

⁴² Forrás: Greg P. (2021.01.08): Porsche is using 3D printing to make EV parts. TopGear, <https://www.topgear.com/car-news/electric/porsche-using-3d-printing-make-ev-parts> (Megtekintve: 2023.11.11.)

5.3 Bugatti

A Bugatti⁴³ egy francia sportautógyártó vállalat, amely nagy teljesítményű gépkocsik gyártására szakosodott, és jelenleg a Volkswagen csoport egyik leányvállalata. 2017-ben sikeresen tesztelte a Bugatti Chiron titánium féknyergét (lásd 22. ábra), amit a Fraunhofer IAPT-vel és a Bionic Production AG-val együttműködve terveztek és gyártottak le. Ehhez SLM technológián alapuló SLM Solutions SLM 500 3D nyomtató gépét használták, ami Ti6Al4V-ből nyomtatta ki a féknyerget. A nyomtatási folyamat teljesen automatizált volt, de így is 45 órát vett igénybe egyetlen féknyereg elkészítése. A nyomtatásokat követő ellenőrzések és vizsgálatok során megállapították, hogy 1250 N/mm² szakítószilárdságot és 99,7% feletti anyagsűrűséget értek el.



22. ábra: 3D nyomtatott Bugatti Chiron titánium féknyereg

<https://newsroom.bugatti.com/press-releases/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer> (Letöltve: 2023.11.06.)

A közelmúltban a technológiát egy aktív spoilerkonzol létrehozásánál alkalmazták, amelyet szintén az SLM 500 3D nyomtató gépen, titánból készítettek. Optimalizálták az alkatrészt, hogy csökkentsék a súlyát, miközben megtartották a szilárdságát, és figyelemre méltó, 53%-os súlycsökkenést értek el, miközben növelték a merevséget (lásd 23. ábra). Ez az innovatív spoilerkonzol lehetővé teszi, hogy a Bugatti Chiron mindössze 32,6 másodperc alatt gyorsuljon fel 400 km/h sebességre, és mindössze 9 másodperc alatt teljesen megálljon.

⁴³ Forrás: (2018.01.22.): World premiere: brake caliper from 3-d printer. Bugatti Automobiles, <https://newsroom.bugatti.com/press-releases/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer> (Megtekintve: 2023.11.05.)



23. ábra: Fém 3D nyomtatott aktív spoilerkonzol

<https://3dprintingindustry.com/news/slm-solutions-and-bugatti-driving-automotive-sector-with-metal-3d-printed-parts-150907/> (Letöltve: 2023.11.06.)

A Bugatti Chiron-ba⁴⁴ kifejlesztettek még egy motorkonzolt, integrált vízhűtéssel, amit az összes szériagyártású modellbe beépítenek (lásd 24. ábra). A Chiron két különálló vízhűtési körrel rendelkezik, hogy az alkatrészek és a rendszer hőmérsékletét még a legszélsőségesebb környezeti és üzemi körülmények között is elfogadható szinten tartsa. A magas hőmérsékletű kör az autó motorjának hűtésére szolgál, míg az alacsony hőmérsékletű kör gondoskodik arról, hogy a szívtöltet hűtési hőmérséklete megfelelően alacsony maradjon. A beépített motorkonzol aktív hőpajzsként működik, ami az átadott hő csökkentését eredményezi. Elsődleges feladata a sebességváltók bekapcsolása a hétfokozatú duplakuplungos sebességváltó két tengelykapcsolójának nyitása és zárása során, miközben a vezérlőegységet is magában foglalja. A konzolt alumínium ötvözetből gyártották az SLM Solutions SLM 280 Twin 3D nyomtató gépén.



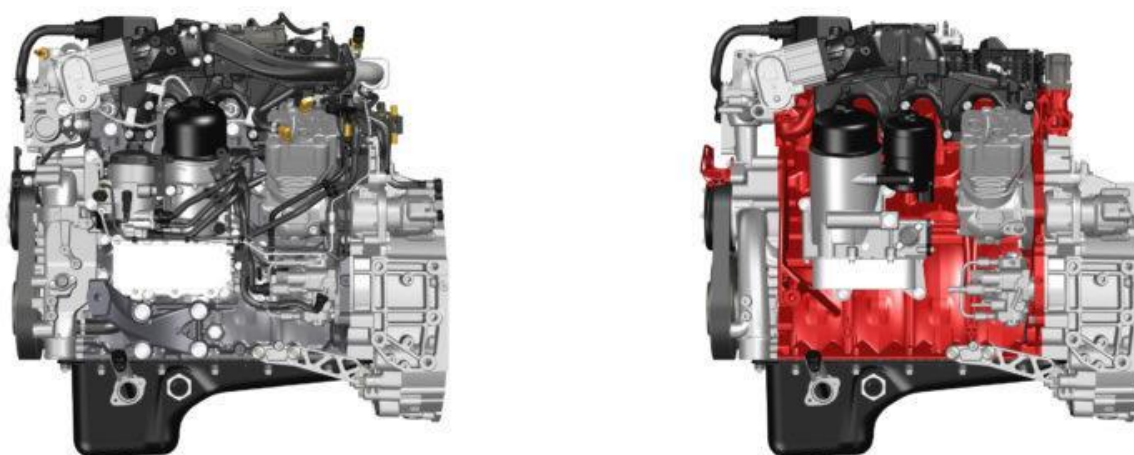
24. ábra: Bugatti Chiron 3D nyomtatott motorkonzol, integrált vízhűtéssel

<https://3dprintingindustry.com/news/slm-solutions-and-bugatti-driving-automotive-sector-with-metal-3d-printed-parts-150907/> (Letöltve: 2023.11.06)

⁴⁴ Forrás: Csere Cs (2018.05.14.): How Automakers Are 3D-Printing Parts for Production Cars (and Classics). Hearts Autos, <https://www.caranddriver.com/features/columns/a20684648/how-automakers-are-3d-printing-parts-for-production-cars-and-classics/> (Megtekintve: 2023.11.05)

5.4 Renault Trucks

A Renault Trucks egy francia nehézgépjármű gyártó vállalat, amely a Volvo csoport tagja, azon belül a második legnagyobb leányvállalata a Volvo csoportnak. 2017-ben elkezdte az additív gyártási lehetőségeknek a fejlesztését, amivel motoralkatrészeket képes fejleszteni, amely lehetővé teszi könnyebb és hatékonyabb motorok gyártását. Renault Trucks felismerte, hogy a szállítmányozási vállalatoknak számos előnye származik a fém 3D nyomtatás alkalmazásából. A járműflotta⁴⁵ teljes üzemeltetési költségei csökkenthetők, mivel a motor térfogatának csökkentése nagyobb hasznos terhelhetőséget és alacsonyabb üzemanyag-fogyasztást eredményezhet. Ehhez projekthez a DTI 5 4 hengeres, Euro 6-os Euro C⁴⁶ fokozatú motort választották. A projekt célja, hogy bemutassa a fém additív gyártás pozitív hatását a motor méretére és súlyára. Ez az eljárás lehetővé tette nekik, hogy egy 4 hengeres motor súlyát 120 kg-mal, azaz 25%-kal csökkentsék (lásd 25. ábra).



25. ábra: Balra a DTI5 Euro 6 motor, jobbra ugyanaz a motor, additív gyártásra tervezve
<https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Letöltve: 2023.11.05)

A Renault Trucks Lyon Powertrain Engineering részlege által kifejlesztett alkatrészeket már sikeresen tesztelték egy Euro-6-os motor belsejében. A teljes motort tervezése már virtuálisan megvan, az additív gyártásra tervezett alkatrészek közül már kettő be is építettek egy motorba és tesztelték azokat. A szelephimbákat és a vezérműtengely csapágyfedeleit fém 3D nyomtatással készítették el, és 600 órán keresztül sikeresen tesztelték (lásd 26. Ábra). A

⁴⁵ Forrás: Saunders S. (2017.01.11.): Metal Additive Manufacturing Helps Renault Trucks Reduce Weight of 4-Cylinder Engine by 25% Using 3D Printed Components. 3DPrint, <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Megtekintve: 2023.11.06)

⁴⁶ Forrás: Ficsor B. és Hegedős E.: A 3d fémnyomtatás alkalmazhatóságának vizsgálata MALE-kategóriájú UAV-dízelmotor fejlesztésre. Katonai Logisztika 31. évf. 2023. évi 1-2. szám pp. 38.-72., http://real-j.mtak.hu/25795/1/KatLog_2023_1-2.pdf (Megtekintve: 2023.11.06)

Renault DTI 5 Euro 6-os motor eredeti alkatrészeinek száma közel 850 volt. Ezt a számot 25%-kal, 200 alkatrésszel kevesebbel csökkentették a fémadalékos gyártás segítségével.

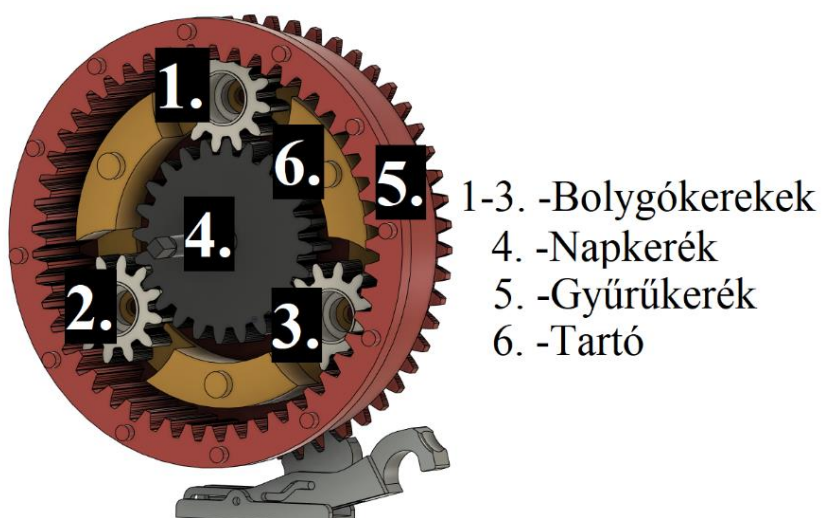


26. ábra: Felül hagyományos szelephiba, alul fém 3D nyomtatott szelephiba
<https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Letöltve: 2023.11.07)

6. AZ ADDITÍV GYÁRTÁSI FOLYAMAT LEVEZETÉSE EGY OKTATÁSI BOLYGÓMŰVÖN KERESZTÜL

Az additív gyártás vizsgálatához a gyártási folyamat minden lépését figyelembe kell venni és vizsgálni azokat. Ezért a tervezés, nyomtatás, utókezelés és ellenőrzés fázisait mind levezetem. Mindegyik gyártási fázisnak megvannak a különbségei a hagyományos gyártástechnológiákhoz képest. Gyártási példaként egy bolygóművet választottam, amit egy oktatási bolygóműként terveztem meg annak érdekében, hogy a jövőben megfelelő példaként szolgáljon az bolygóművek működésének megértéséhez. Mint additív gyártástechnológia FDM 3D nyomtatást használtam, mivel ez állt rendelkezésre számomra a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző kar Haditechnikai tanszékén. Két féle FDM nyomtatási technológiát is használtam, műanyag és kompozit szálerősítésű műanyag alapanyagút is.

A bolygóművek bonyolult fogaskerekes mechanizmusok, amelyek három fő komponensből állnak, napkerék, bolygókerekek és a gyűrűkerék (lásd 27. ábra). A nap kerék a központi fogaskerék, amely általában a mechanizmus közepén található. Ez az a fogaskerék, amely általában a bemeneti teljesítményt vagy nyomatékot kapja. A bolygó fogaskerekek kisebb fogaskerekek, amelyek a napkerék körül forognak. Általában egy közös hordozóra vannak szerelve, amely lehetővé teszi számukra, hogy kötött körpályán mozogjanak a napkerék körül. A gyűrűkerék a legkülső fogaskerék, és körül veszi a bolygóműveket. Ez a bolygó fogaskerekekbe illeszkedik, és általában a kimenetet biztosítja, vagy a rendszer egy másik alkatrészét hajtja meg.



27. ábra: Oktatási bolygómű fő elemei
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Tehát a bolygóművek a napkerék, a bolygókerekek és a gyűrűkerék kombinációjának felhasználásával működnek a különböző sebességi viszonyok és nyomatékkibocsátások elérése érdekében. A fogaskerekek elrendezésétől és összekapcsolásától függően különböző áttételeket és forgásirányokat lehet elérni. Ez teszi a bolygóműves fogaskerékrendszereket sokoldalúvá és különböző alkalmazásokban hasznossá. Ezért a bolygóműves mechanizmusokat sok helyen alkalmazzák, ilyenek például a terepjárók, teherképkocsik vagy nehéz munkagépek kerekeinél alkalmazott véghajtás. Ezáltal az egész erőátviteli rendszert, a nagyobb fordulatszám miatt, alacsonyabb nyomaték terheli meg. Az indítómotorok esetében is széles körben elterjedt a nyomatéknövelő megoldásként. A képesség, hogy egy adott bolygómű rendszer attól függően, hogy melyik elemét rögzítik, különböző áttételeket nyújt, jelentős lehetőséget biztosít az automata (hidromechanikus) sebességváltóművek tervezésében. Ezért előnyben részesítik ezekben az autóiipari alkalmazásokban a kompakt kialakításuk, a különböző áttételi arányok biztosításának képessége és az erőátvitel hatékonysága miatt. Lehetővé teszik a fogaskerekek automatikus és sima váltását általában lamellás tengelykapcsolók felhasználásával, ami növeli a vezetési kényelmet és teljesítményt. A bolygóműves fogaskerekek emellett nagy nyomatékterhelést is képesek kezelni, ami alapvető fontosságú a gépjárművek és a harcjárművek hajtásrendszereiben is. A harcjárművek közül is a harckocsikban van a legnagyobb szerepe a bolygóművekből álló automata sebességváltóműveknek. Mert ezek a rendszerek hatékonyan képesek átvinni és irányítani a hatalmas nyomatékokat, amelyeket a harckocsik generálnak. Az esetükben különösen fontos az erős és megbízható hajtómű, mivel nagy tömegűek és gyakran nehéz terepen és különböző mostoha körülmények között is képesnek kell lennie megfelelő nyomaték leadására. A bolygóművek robosztus kialakítása és hatékony erő átvitelük miatt hozzájárulnak a harckocsik megbízhatóságához és teljesítményéhez. Ezért alkalmazza ezt a mechanizmus szinte minden modern harckocsi, mint például a Krauss-Maffei Wegmann (KMW) által gyártott Leopard 2 harckocsicsalád, amelyből a Leopard 2A4 megtalálható a Magyar Honvédség állománytáblájában is. A Leopard 2 harckocsik hajtóművében a sebességek váltásáról és a láncalpak kormányzásáról is bolygóművek gondoskodnak.

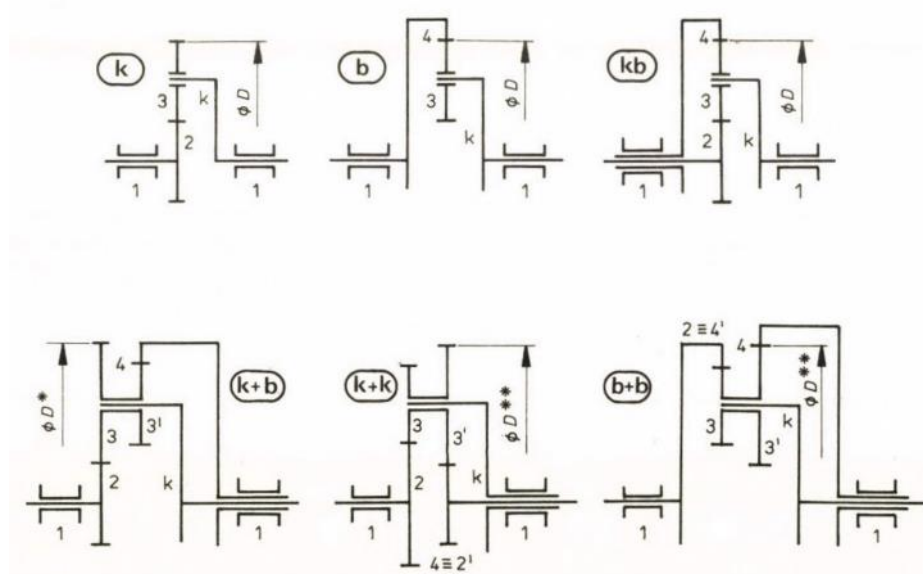
6.1 Bolygómű mechanizmus meghatározása

6.1.1 A bolygómű mechanizmus

A tervezési cél az volt, hogy egy olyan bolygóművet hozzak létre, amely jól láthatóan bemutatja egy bolygómű mozgási viszonyait. Erre azért van szükség mert a bolygómű

mechanizmust nagyon gyakran alkalmazzák a gépjárműiparban, mint az automata sebességváltók egyik jelentős eleme.

A bolygóművek⁴⁷ három fő elemének (napkerék, bolygókerek és gyűrűkerék) van egy-egy tengelye, ami konstrukciótól függően lehet ki- és behajtó tengely is. A bolygókerek esetében ez úgy van kialakítva, hogy össze vannak kötve egy összekötő elemmel, amit bolygókerék tartónak nevezünk (lásd 27. ábra). Adott tengelyek fékezésével és rögzítésével érhető el a sebességi fokozatok kapcsolása, ezzel fordulatszám és nyomaték módosítása a kihajtó tengelyen. Az automata⁴⁸ sebességváltókban többféle bolygómű kialakítást is megtalálhatunk, de mindegyiket vissza lehet vezetni a hat alaptípusra (lásd 28. ábra).



28. ábra: A bolygóművek hat alaptípusának kinematikai vázlata

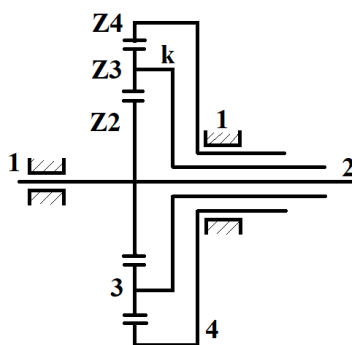
(**k** a külső-külső, **b** a belső-külső fogazatkapcsolásra utal; **1** a hajtóműház, **2** a napkerék, **3** a bolygókerék, **4** a gyűrűkerék, * az első, ** a második bolygókerékre utal kettős bolygókerék esetén) http://real-eod.mtak.hu/3449/1/MTA_ErtekezésekEmlekezések_098_000811221.pdf (Letöltve: 2023.11.08.)

A **k** betű jelenti a külső-külső fogazat kapcsolatot, a **b** betű pedig a belső-külső fogazatkapcsolatot. A **k,b** jelenti az elemi alaptípusokat. Ezen kívül megkülönböztetünk még **kb** egyszerű bolygóművet és a kettős bolygókerékes alaptípusokat, **k + b**, **k + k** és **b + b**.

A nyomtatáshoz a **kb** egyszerű bolygómű alaptípust választottam mert ez fordul elő leggyakrabban a gépjárműiparban. Az általam tervezett bolygómű kinematikai rajza eltér az előbb bemutatott egyszerű bolygóműétől viszont arra vezethető vissza (lásd 29. ábra).

⁴⁷ Forrás: Gyarmati J., Hegedűs E. és Gávy Gy. (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó. Műszaki Katonai Közlöny 32. évf 3.szám pp. 113-126. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/6291/5187> (Megtekintve: 2023.11.05)

⁴⁸ Forrás: Apró F. (1967): Egyszerű bolygóművek fogszámválasztása három bolygókerék esetén. Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc, https://matarka.hu/koz/ISSN_0540-3413/13k_1967/ISSN_0540-3413_13k_1967_003-020.pdf (Megtekintve: 2023.11.08)



29. ábra: Az oktatási bolygómű kinematikai vázlata
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Az oktatási bolygómű tervezésénél a legfőbb meghatározó tényező a külső befoglaló méret volt és a bolygó kerekének száma. A bolygókerék száma, $N=3$ mivel gépjárműtechnikában ez a leghasználatosabb. A maximális befoglaló méretnek 180 mm átmérőt határoztam meg. A befoglaló méretet leginkább a fog nagysága és a gyűrűkerék osztókörének átmérője adja. Ezeket a fogazat tervezése fejezetben kiszámoltam (lásd 33. ábra)

Bolygóművek esetében nem lehet akármilyen fogszámot választani a fogaskereknek, mivel ahhoz, hogy mechanizmus megfelelően működjön, három feltételnek is meg kell felelni. Ezek az egytengelyűségi feltétel, szerelhetőségi feltétel és a szomszédossági feltétel.

a) Egytengelyűségi feltétel:

Az egytengelyűségi feltétel lényege, hogy a bolygóműben elhelyezett fogaskerékpár kapcsolódásoknak azonos tengelytávolságot kell biztosítaniuk. Ami azt jelenti, hogy a **2** és **3** jelű fogaskerék tengelytávolságának meg kell egyeznie a **3** és **4** jelű fogaskerék tengelytávolságával (lásd 29. ábra). Az egytengelyűségi feltétel **kb** bolygómű és általános fogazat esetén:

$$Z_4 - Z_2 = 2Z_3 \quad (1)$$

Ahol Z_2 : Napkerék fogszáma

Z_3 : Bolygókerék fogszáma

Z_4 : Gyűrűkerék fogszáma

b) Szerelhetőségi feltétel:

A bolygómű hatékony működése, különösen a terhelés kiegyenlítés és terheléseloszlás szempontjából előnyös, ha a bolygókerek egyenletesen elosztva vannak elhelyezve a napkerék és gyűrűkerék forgástengelye körül. N számú bolygókerék esetén fontos, hogy ezek egymástól azonos szögosztásra legyenek elhelyezve. A szerelhetőségi feltétel azt jelenti, hogy N számú bolygókerék behelyezése csak úgy valósulhat meg, ha a bolygókerek minden pillanatban azonos kapcsolási helyzetben van. A szerelhetőségi feltétel **kb** típusú bolygómű esetén:

$$Z_4 + Z_2 = EN \quad (2)$$

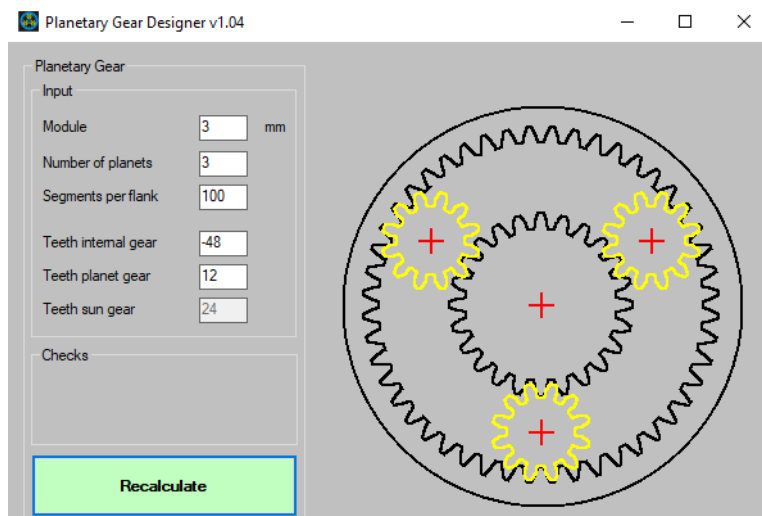
Ahol E : Tetszőleges egész szám

N : Bolygókerek száma

Z_4 : Gyűrűkerék fogszáma

Z_2 : Napkerék fogszáma

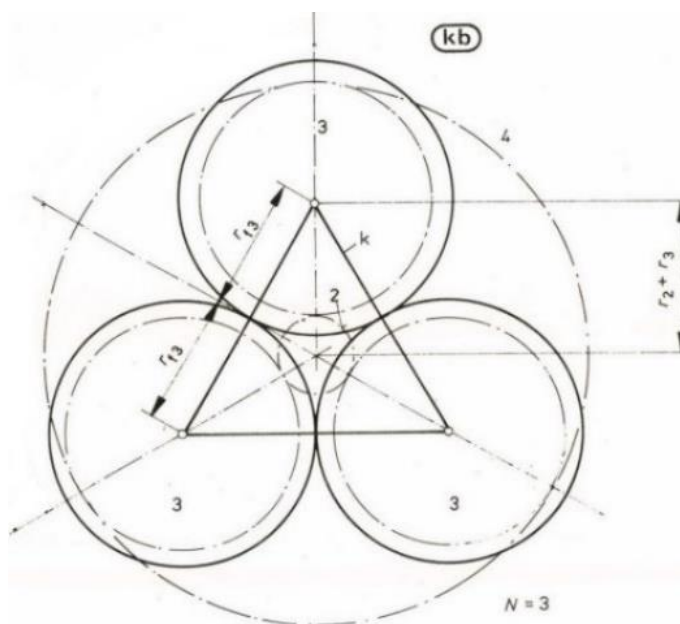
Az előző két feltételnek megfelelően választottam a $Z_2=24$, $Z_3=12$ és a $Z_4=48$ fogsámokat. A fogsám hármasok melyek $N=3$ esetén teljesítik az egytengelyűségi és a szerelhetőségi feltételt, megtalálhatóak kézi könyvekben. Viszont bolygókerék tervező szoftver segítségével is meghatározhatóak úgy a fogsámok, hogy azok teljesítsék a feltételeket. Én ehhez a Planetary Gear Designer nevű szoftvert használtam, ami a mueller.ch oldalon elérhető (lásd 30. ábra). A szoftver a választott szabványos modul és bolygókerek számából kiszámolja a fogsámokat, amik teljesíteni fogják a feltételeket.



30. ábra: Planetary Gear Designer v1.04 szoftver az oktatási bolygómű adataival
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

c) Szomszédossági feltétel:

A szomszédossági feltétel azt határozza meg, hogy az egymás mellett elhelyezkedő bolygókerek fejkörei nem érintkezhetnek egymással. Mivel, ha érintkezés áll fent a bolygókerek között akkor a bolygómű nem összeszerelhető, mert a bolygókerek fogai egymásba ütköznek összeszerelés során. Jelen esetben $N=3$, melynek határhelyzetét az ábra mutatja (lásd 31. ábra).

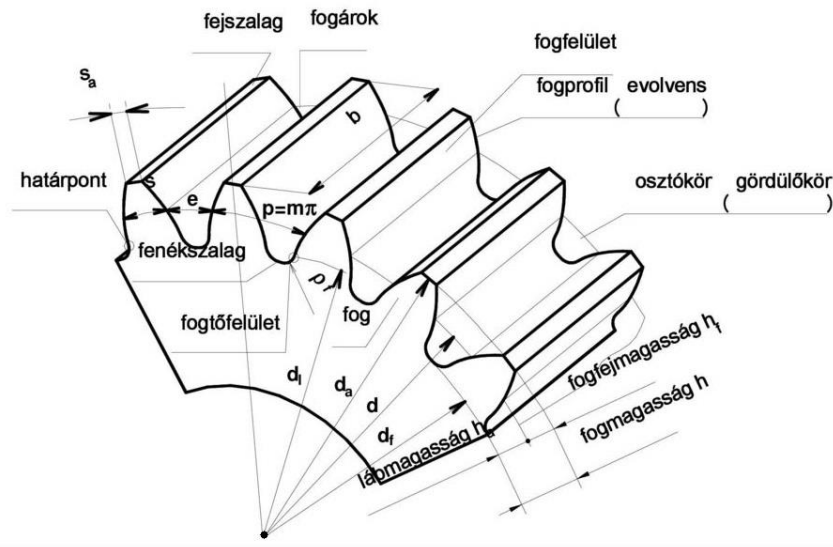


31. ábra: A kb típusú bolygómű szomszédossági határhelyzete $N=3$ esetén

(r a gördülő kör-, r_f a fejkör sugarának jele) http://real-eod.mtak.hu/3449/1/MTA_ErtekezésekEmlekezések_098_000811221.pdf (Letöltve: 2023.11.11.)

Tehát a bolygómű helyes működéséhez elengedhetetlen volt a tervezés során figyelembe venni a három kritérium feltételt, az egytengelyűségi feltételt, a szerelhetőségi feltételt és a szomszédossági feltételt. A választott fogszámoknak ezeknek a feltételeknek kellett megfelelni.

6.1.2 Az elemi fogazat tervezése



32. ábra: Az elemi fogazású fogaskerék jellemzői

<https://docplayer.hu/229424-Fogaskerekhajtasrol-roviden.html> (Letöltve:2023.11.08.)

A bolygóművet elemi egyenes fogazatú fogaskerekkel terveztem, amely biztosítja majd a bolygómű számára az erők megfelelő átadását. Az elemi fogazás evolvens profillal rendelkezik (lásd 32. ábra). A fogaskerek 3D-s tervezéséhez szükséges volt meghatározni az elemi fogazatra jellemző geometriai jellemzőket, amiket egy táblázatba foglaltam össze (lásd 30. ábra). Az m , mint modul, mértékegysége mm, a fogaskerék számításoknál alapadat és a DIN 780⁴⁹ nemzetközi szabvány tartalmazza. A modul képlete a következő:

$$m = \frac{d}{z} \quad (3)$$

Ahol m : Szabványos modul

d : Osztókör átmérő

z : Fogszám

Tehát a modul meghatározásához ismerni kell a d osztókörátmérőt és a Z fogszámot. Jelen esetben az osztókör nem ismert hiszen azt szerettem volna megtudni, ezért a modult szabványtáblázatból választottam. Így 3 mm-es modul-al számoltam minden fogaskerék esetében.

⁴⁹ DIN 780 (1977): Modulok a fogaskerekhez. Deutsches Institut für Normung (DIN)

Megnevezés	Egyenlet	Z ₂	Z ₃	Z ₄
Fogmagasság	$h=2,25 \cdot m$	6,75 mm	6,75 mm	6,75 mm
Lábhézag	$c=0,25 \cdot m$	0,75 mm	0,75 mm	0,75 mm
Lábmagasság	$h_f=1,25 \cdot m$	3,75 mm	3,75 mm	3,75 mm
Fejmagasság	$h_a=m$	3 mm	3 mm	3 mm
Osztókörátmérő	$d=m \cdot z$	72 mm	36 mm	144 mm
Fejkörátmérő	$d_a=d+2 \cdot m$	78 mm	42 mm	150 mm
Lábkörátmérő	$d_f=d-2,5 \cdot m$	64,8 mm	28,8 mm	136,8 mm

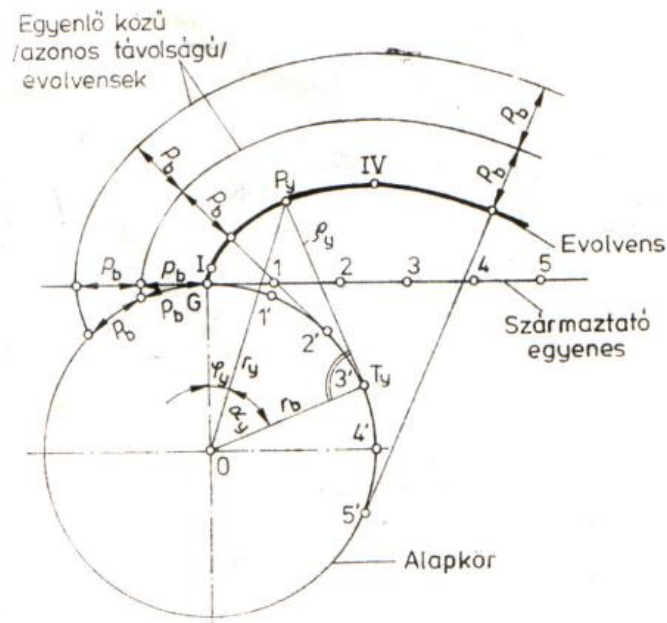
33. ábra: Az oktatási bolygómű elemi fogazatának sugár irányú paraméterei
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Az egyenletekkel kapott információk birtokában már megtudtam kezdeni a fogaskerek rajzolását a CAD szoftverben. Amire még különös figyelmet kellett fordítani az az evolvens profil szerkesztésének menete. Hiszen a fogak profilja nem egyszerű ívekből vagy körprofilokból áll. Az evolvens profilt származtatása (lásd 34. ábra) a következőképpen történik, egy egyenest csúszásmentesen legördítve egy d_b átmérőjű körön, az egyenes minden pontja egy evolvenst ír le. Az d_b kört nevezzük alapkörnek melynek képlete:

$$d_b = mz \cos \alpha \quad (4)$$

Ahol d_b : Szabványos modul
 m : Szabványos modul
 z : Fogsám
 α : Fogak kapcsolási szöge

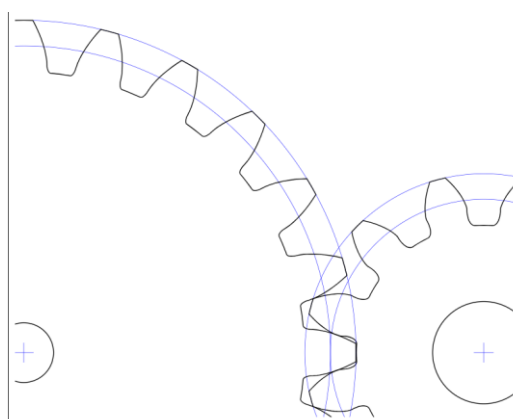
α jelenti a fogaskerek kapcsolószöget, ami szabványokban meghatározott és Európában leggyakrabban 20 fok, ezért én is ezt használtam.



34. ábra: Evolvens profil származtatása

https://witch.mik.pte.hu/oktatas/Tanszeki_anyagok/Gepeszernok_Tanszek/Dr_Stampfer_Mihaly/Gepelemek_hajt%E1sok/eloadasvazlat/4_Fogaskerek_m_vet.pdf (Letöltve: 2023.11.08.)

Az oktatási bolygómű fogaskerekeinek 3D-s tervezéséhez szükséges volt az evolvens profilok szerkesztése, ami egy hosszú folyamat. A 3D tervezési folyamat felgyorsítása érdekében a fogaskerek evolvens fogprofilját egy Spur Gear Generator nevű online szoftver segítségével készítettem el, ami megtalálható evolventdesign.com-on. Ahol a lehetséges egyszerre két fogaskerék körvonalának leképezése, a fogszámok, modul és a kapcsolási szög ismeretében (lásd 35. ábra). A körvonalak generálása után azok elmenthetőek voltak olyan fájlformátumban, amit importálni tudtam a Fusion 360 CAD szoftverbe.

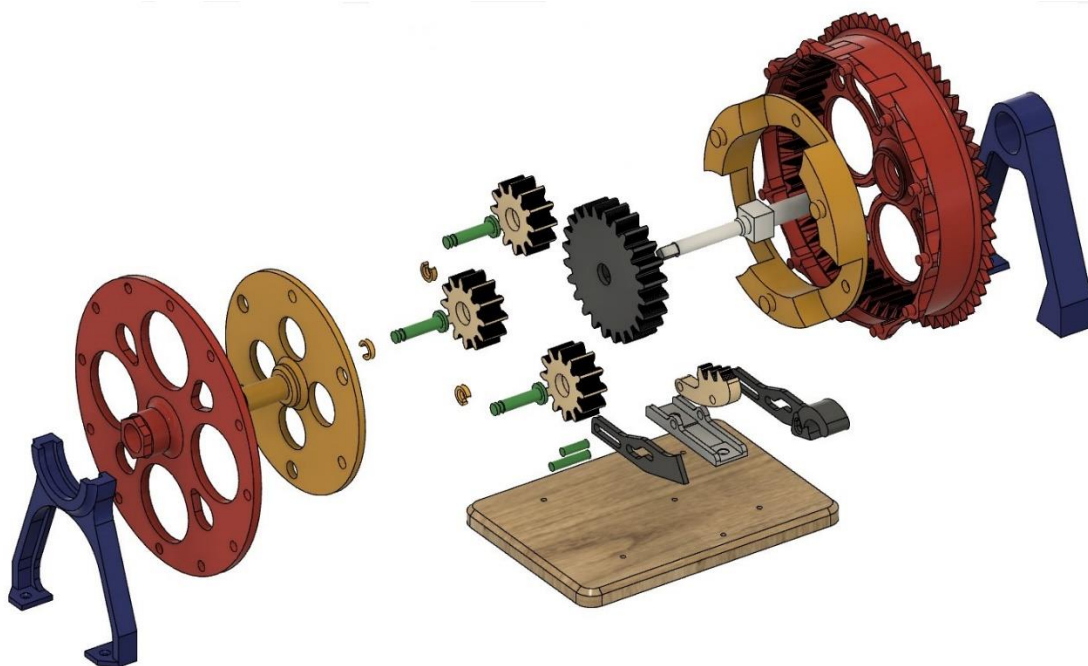


35. ábra: Generált evolvens fogprofilok
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

6.2 3D tervezés

Az oktatási bolygómű tervezésénél elsődleges szempont volt, hogy egy valóságos automata sebességváltóműben alkalmazott bolygókerék mechanizmushoz hasonló legyen, de mellette a funkcióját, hogy jól szemléltesse a mozgási viszonyokat és a kapcsolást, ne veszítse el (lásd 36. ábra). Ezért ez a mechanizmus ebben a formában nem lenne használható egy valós alkalmazási környezetben, mint például egy automata sebességváltóműben.

A tervezési módszereknek két különböző kategóriája különböztethető meg, a tervező mérnök által vezérelt és a folyamat vezérelt tervezés. A folyamat által vezérelt forma az emberi tervező manuális részvételének minimalizálását helyezi előtérbe a tervezési folyamat felgyorsítása és teljesítményének növelése érdekében. Ezzel szemben a tervező által készített forma olyan emberi tervező mérnököket foglal magában, akik aktívan alakítják a folyamatot, és a gyártással kapcsolatos szakértelmet nyújtanak a drága szériaalkatrészek gyártásának megelőzése érdekében. Mindkét megközelítésben alapvető fontosságú az additív gyártás gyárthatósági szempontjainak figyelembevétele, a teljesítmény javítása és az alkatrészenkénti költségek közötti kényes egyensúly fenntartása a nagyüzemi gyártás során.



36. ábra: Oktatási bolygómű robbantott ábrája
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Folyamat vezérelt forma topológia optimalizálás formájában egy olyan módszer, amely kihasználja az additív gyártás előnyeit, komplexitási képességét az alkatrész teljesítményének növelése érdekében. A topológiai optimalizálás elsősorban a tervezés megkönnyítésére és a modell tömegének csökkentésére használt technika. Ennek során a tervező meghatároz egy

tervezési teret, és a topológiai optimalizáló szoftver eltávolítja a tervezési tér minden olyan részét, amely nem járul hozzá a termék szerkezeti integritásához. A topológiai optimalizálás ezt úgy éri el, hogy a végelem-analízis segítségével a tervezetet diszkrét darabokra bontja, poligonokra, csúcsokra és szélekre, amik egy hálót alkotnak, majd elemzi a hálóra ható erőket. Ennek a folyamatnak köszönhetően a felesleges anyagok eltávolításával organikus, gyakran egészen meglepő formák alakulnak ki.

A tervező mérnök által tervezett forma olyan tervezési folyamatra utal, amelyet egy emberi tervező kézzel irányít. Az elsődleges cél gyakran az alkatrész költségének csökkentése a tervező választott gyártási módszerrel kapcsolatos szakértelmének kihasználásával. Ez magában foglalja a gyártási módszer képességeinek leírását, beleértve az anyagtulajdonságokat, a méretpontosságot és a költségtényezőket. A tervezés végterméke első sorban a 3D modell, ami egy digitális számítógépes fájl, amely egy tárgy háromdimenziós leírását tartalmazza. 3D nyomtatáshoz az ötleteket, vázlatokat vagy kétdimenziós rajzokat 3D modellel kell alakítani valamilyen 3D szoftver másnéven CAD szoftver segítségével. Amiben már választhatunk a kétféle tervezési stratégia közül. A piacon megtalálható 3D szoftverek között találhatunk ingyeneseket melyek általában felhasználóbarátok és gyorsan elsajátítható a kezelésük, valamint vannak még az előfizetési szoftverek, ezek sokkal részletesebbek és kevésbé felhasználóbarátok. Ha a célunk egy működő prototípus, aminek geometriai követelményei, hogy matematikailag pontosan definiált szögletes és ívelt felületei legyenek akkor mechanikus modellező szoftvert érdemes használni, mint az Autodesk Fusion 360, Autodesk Inventor, Solid Edge, Solidworks, ProE vagy a Catia. Az utóbbi négy szoftvert professzionális szinten is használják a gyártók, a 3D nyomtatásban és a CNC-vel (Számítógépes Numerikus Vezérlés) vezérelt szerszámgépekkel történő gyártásban is.

6.2.1 3D Tervezési szempontok

A tervezési folyamat Autodesk Fusion 360 CAD szoftverben történt tisztán a tervező által vezérelt tervezéssel, tehát nem vettem igénybe a szoftverben található topológia optimalizáció lehetőségét. Mivel a tervezés időszakában ez a lehetőség még nem volt elérhető a számomra használható Fusion 360 diák licensze által. A tervezés folyamán figyelembe kellett venni az FDM 3D nyomtatási technológia sajátosságait és korlátjait. Az FDM 3D nyomtatásra jellemző tervezési korlátok és problémák, amiket figyelembe kellett venni tervezés során.

6.2.1.1 Hidépítés problémája

Hídképzés akkor fordul elő, amikor a nyomtatónak két támasz vagy rögzítési pont között kell nyomtatnia. Mivel nincs mire építeni, a kezdeti nyomtatott réteg nem kap alátámasztást, és az anyag hajlamos megereszkedni. A hidak leggyakrabban a vízszintes tengelyű lyukakban fordulnak elő, amelyek a tárgyak falában vannak. Az egyik megoldás a híd távolságának csökkentése, de ennek hatása az alkatrész tervezési korlátaitól függ. Egy másik megoldás a megereszkedés elkerülésére az alátámasztás beépítése. Az alátámasztás ideiglenes platformot kínál a hídképző réteg számára, amelyre rá lehet építeni. A tartóanyag a nyomtatás befejezése után eltávolítható, bár nyomokat hagyhat vagy károsíthatja azt a felületet, ahol a tartó a végleges alkatrészhez csatlakozott.

Fő tervezési szempont: Az FDM természetéből adódóan a támasztóanyagból származó megereszkedés vagy nyomok bizonyos mértékig mindig jelen vannak. De mivel a kész mechanizmus bemutató modellként fog funkcionálni ezért a fő szempont az volt, hogy minimális legyen az alátámasztott felületek nagysága. Ezért tervezés során figyelembe vettem, hogy ne legyenek olyan pontok melyek között áthidalást kellene nyomtatni.

6.2.1.2 Függőleges tengelyű furatok

Az FDM technológia gyakran nyomtat alulméretezett függőleges tengelyű furatokat. Az ilyen furatok átmérő csökkenésének oka, hogy ahogy a fűvóka kinyomtatja a függőleges tengelyű furat kerületét, az újonnan nyomtatott réteget a meglévő építési rétegekre nyomja, hogy javítsa a tapadást. A fűvóka összenyomó ereje az extrudált kerek réteg alakját körből szélesebb, laposabb alakúra deformálja. Ez növeli a korábban nyomtatott réteggel érintkező területet, javítja a tapadást, de szélesíti az extrudált szegmenst. Ez a nyomtatott furat átmérőjének csökkenését okozza a tervezetthez képest. Ez a csökkenés különösen kis átmérőjű lyukak nyomtatásakor jelenthet problémát, amikor a lyukátmérő és a fűvóka átmérőjének aránya miatt a hatás nagyobb. Az alulméretezés mértéke a nyomtatótól, a szeletelőszoftvertől, a lyukmérettől és az anyagtól függ.

Fő tervezési szempont: Ha a függőleges tengely furatának átmérője kritikus, akkor annak tervezése során túlméretezve kellett tervezni, hogy a nyomtató által alulméretezettséget kiküszöböljük. Ilyen kritikus furatátmérők voltak például a gyűrűkerék fedelét pozícionáló csapoknak kialakított furatok és a csapágazási furatok. Mindkét esetben fontos volt a furatok pontos átmérője, a pozícionáló csapok esetében a 6 mm-es átmérő miatt 0.2 mm túlméretezésre volt szükség a pontos illeszkedéshez. Mivel a csapágak szabvány szerinti méretre vannak

gyártva és szoros illesztéssel vannak rögzítve a PLA műanyagba ezért kritikus volt a mérethelyesség. A számukra kialakított furatok átmérője nagyobb volt, mint a pozícionáló csapoké ezért ott kisebb túlméretezésre volt szükség, 0.15 mm-re.

6.2.1.3 Horizontális furatok

Az FDM esetében mindig lesz eltérés a szeletelőben megadott érték és a 3D nyomtatott furat tényleges átmérője között. A horizontális furatok például hírhedtek arról, hogy nem tökéletesen kerek, míg a vertikális furatok gyakran kisebbek a tervezettnél. A horizontális furat azzal a problémával szembesül, hogy a felülete több rétegből áll, amelyek különböző mértékű túlnyúlásokkal rendelkeznek. Így előfordulhat, hogy a görbe egyes szakaszai nem lesznek tökéletesen kerek. Minél kisebbre tervezük a furatokat, annál valószínűbb, hogy ezek a jelenségek problémát okoznak.

Fő tervezési szempont: A horizontális furatok legyen méretűek, ezért a horizontális furatok alakhelyességének megőrzéséhez vékony tartóhártyát terveztem be a furatba, ami 0.1mm vastagságú. Ez hártya megtartja a furat tetejét és görbe geometriáit, valamint utólag könnyen eltávolítható.

6.2.1.4 Túlnyúlások

A túlnyúlásokkal kapcsolatos problémák az egyik leggyakoribb FDM nyomtatási minőségi problémák közé tartoznak. A túlnyúlások akkor fordulnak elő, amikor a nyomtatott anyagréteget csak részben támasztja meg az alatta lévő réteg. Az áthidalásokhoz hasonlóan a nem megfelelő alátámasztás, amelyet az építőréteg alatti felület biztosít, rossz rétegtapadást, kidudorodást vagy torzulást eredményezhet. Az anyagtól függően a túlnyúlás általában 45°-ig nyomtatható a minőség romlása nélkül. A 45°-os túlnyúlásnál az újonnan nyomtatott réteget az előző réteg 50%-a támasztja alá. Ez elegendő alátámasztást és tapadást teremt az építkezéshez. A túlnyúlások nyomtatásakor felmerülő másik probléma a göndörödés. Az újonnan nyomtatott réteg egyre vékonyabbá válik a túlnyúlás szélén. Ez eltérő lehűlést eredményez, ami a réteg felfelé történő deformálódását okozza.

Fő tervezési szempont: A túlnyúlások korlátait a 45° feletti falszögek alátámasztásával kell áthidalni. Leginkább kerülni a túlnyúlások alkalmazást, és csak kritikus esetben tervezni túlnyúlásokat, hogy vizuálisan minél szebb felületeket kapjunk.

6.2.1.5 Sarkok

Mivel az FDM nyomtatási fűvóka kör alakú, a sarkok és élek sugara megegyezik a fűvóka méretével. Ez azt jelenti, hogy ezek a jellemzők soha nem lesznek tökéletesen szögletesek. Az éles élek és sarkok esetében a nyomtatás első rétegei különösen fontosak. Amint azt fentebb a vertikális furatoknál már említettem, a fűvóka minden egyes nyomtatási réteggel lefelé nyomja a nyomtatási anyagot, hogy javítsa a tapadást. A kezdeti nyomtatási rétegnél ez egy gyakran "elefántlábnak" nevezett peremet hoz létre. Ez a meghatározott méreteken kívülre nyúl, és befolyásolhatja az alkatrészek mérethelyességét és összeszerelhetőségét.

Fő tervezési szempont: Ahol az összeszerelés vagy az méretek kritikusak az alkatrész működése szempontjából, akkor a tárgyasztallal érintkező összes élen legyen 45°-os letörés vagy sugár.

6.2.1.6 Függőleges csapok

Függőleges csapokat gyakran alkalmaztam amikor az alkatrészek összeszerelésére vagy igazítására volt szükség. Általában nagyméretű (10 mm-nél nagyobb) csapokat fallal és kitöltéssel érdemes nyomtatni, ami erős kapcsolatot biztosít. A kisebb átmérőjű (10 mm-nél kisebb) csapokat érdemes viszont 100% kitöltéssel, azaz tömören kinyomtatni. A nyomtató helyes kalibrálása, beleértve az optimális rétegmagasságot, a nyomtatási sebességet és a fűvóka hőmérsékletét, gyakran csökkentheti a vékony csapok hibás nyomtatásának valószínűségét. A csap tövében lévő sugár hozzáadása kiküszöböli a gyenge szilárdságot, mint feszültségkoncentrációt, és növeli a szilárdságot.

Fő tervezési szempont: Az adott geometria által megengedhető a legnagyobb átmérőjű csapok alkalmazása. 10 mm átmérő alatti csapokat lehetőleg 100% kitöltéssel nyomtatni.

6.2.2 Szeletelés

Amikor a tervezési szempontokat figyelembe véve elkészült a 3D-s digitális modell azt egy másik szoftverbe küldtem át. Az Ultimaker Cura-ba ami jelen esetben az ULTIMAKER típusú nyomtatókhoz lett kifejlesztve, de kompatibilis sok más nyomtatóval is. A szoftver feladata az elkészült 3D-s modell úgynevezett szeletelése volt, ami azt jelenti, hogy a modellt virtuálisan szeletekre vágja. Ezek a szeletek igazából a Z irányba történő rétegek felépítésében vesznek részt, az úgynevezett szeletek tekinthetők a nyomtatott rétegeknek is. A szeletelőszoftver által elkészített információ egy nyomtatási utasításokból álló sor az adott 3D nyomtató számára. Ezen utasítások tartalmazzák a felhasználó által megadott 3D nyomtatási

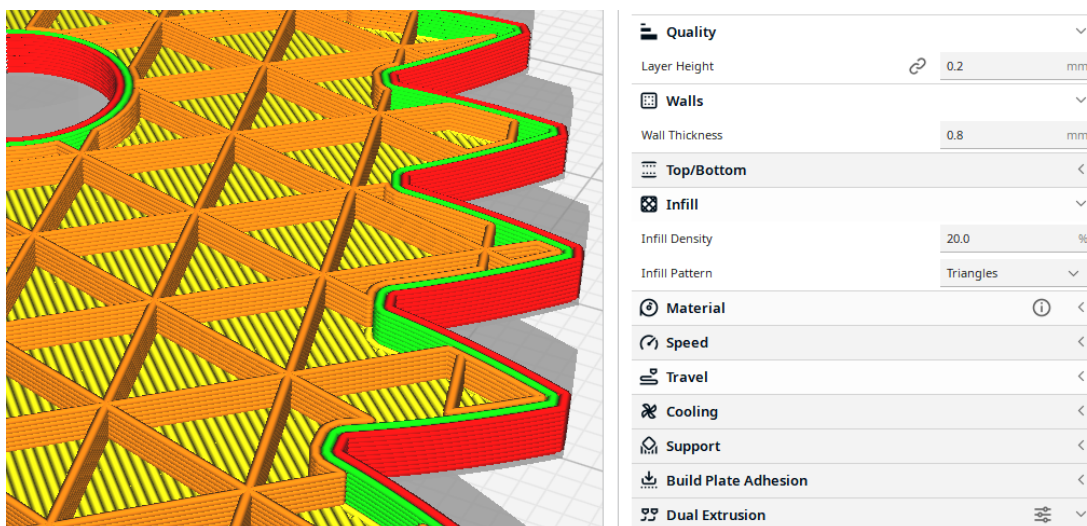
paramétereket, például a rétegmagasság, a nyomtatási sebesség, alátámasztások beállításait és a különböző kitöltési mintázattokat is.



37. ábra: A bolygómű tartószerkezet jobb oldalának alátámasztás stratégiája
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

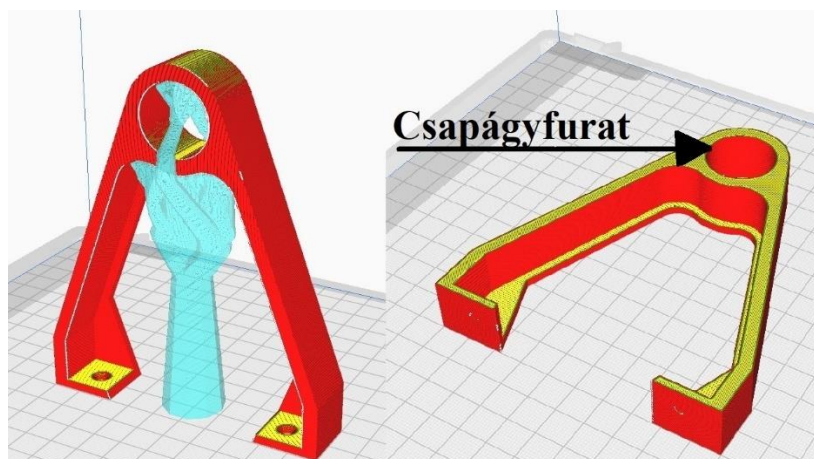
A legtöbb szeletelőszoftver rendelkezik azzal a képességgel, hogy automatikusan létrehozzon alátámasztásokat (lásd 37. ábra) a 45° -nál nagyobb szögekkel rendelkező felületek megtámasztására, mert ennél a kritikus szögnél nagyobb értékek esetén fennáll a veszélye, hogy az anyag a saját tehetetlensége miatt összeesik, vagy legalábbis torzul.

Bár a szeletelő szoftverekkel általában nem hozzák összefüggésbe, a számítógéppel támogatott gyártással (CAM) de ez segít abban, hogy érthető legyen, hogy mit csinál még egy szeletelő szoftver. A CAM a számítógépes szoftverek használatát jelenti a gyártási folyamatok segítésére, megkönnyítésére vagy automatizálására, ez már egy régen bevett módszer az iparban. A gyakorlatban hídként szolgál a digitális 3D modellek és a gyártórendszerek között azáltal, hogy a rajzokat és 3D-s modelleket lefordítja a gép által végrehajtandó szerszámpálya utasításokká. A közös nyelv a G-kód, amelyet számos különböző típusú gyártási rendszerrel használnak. Bár a 3D szeletelők nem tartoznak szigorúan a CAM-szoftverek kategóriájába, ugyanezt a funkciót látják el a 3D nyomtatási folyamatban, mivel olyan fájlokat állítanak elő, amelyek részletes utasításokat tartalmaznak a nyomtató számára (lásd 38. ábra).



38. ábra: Cura szoftverben beállítható nyomtatási paraméterek és egy háromszög kitöltési mintázat
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

A szeletelő szoftverben állítottam be még hogy milyen pozícióban történjen a nyomtatás, ami kritikus lehet gazdaságossági vagy nyomtatási idő szempontjából. Hiszen a megfelelő orientáció kiválasztásával csökkenteni tudtam a nyomtatási időket, mivel minden esetben arra törekedtem, hogy egyáltalán ne kelljen vagy ha kellett csak minimális alátámasztást alkalmazzak. Egyes alkatrészeknél fel kellett áldozni a felületek minőségét annak érdekében, hogy a kritikusan fontos geometriák a legpontosabb méretekkel rendelkezzenek. Az orientáció fontosságának bemutatására megfelelő példa a tartószerkezet bal oldali tartó konzolja, aminél az ábrán látható furatba dupla csapágyat helyeztem a napkerék tengelyének megvezetésére és támasztására (lásd 39. ábra). Jól látható, hogy a bal oldali képen kézzel látható színnel alátámasztást kellett volna alkalmazni a levegőbe nyúló részek megtámasztására, ami rossz felületi minőséget hagyott volna maga után. Szintén a bal oldali képen látható orientációban a furat méretepontossága sem lett volna megfelelő hiszen a horizontális furatok könnyebben torzulnak, mint a vertikális furatok. A jobb oldali orientáció minden szempontból előnyösebbnek bizonyult, első sorban a vertikális furatok kevésbé torzulnak és a torzulásuk is minimális túlméretezéssel kompenzálható volt, másod sorban az látható, hogy alátámasztásra sem volt szükség, amivel jelentősen csökkent a nyomtatási idő.



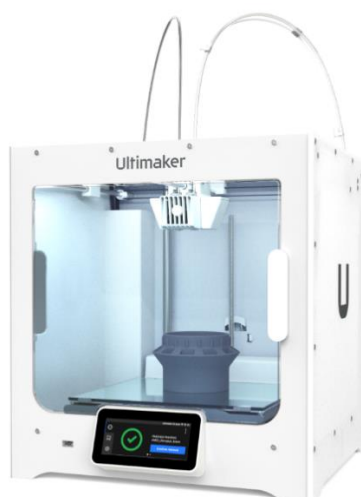
39. ábra: Balra a bal oldali tartókonzol hibás orientációja, jobbra a tartókonzol optimális orientációja

(Készítette: Tenczel Martin Bence)

6.3 Nyomtatás

A 3D nyomtatási folyamatok két különböző FDM technológián alapuló nyomtatóval valósultak meg. Az egyikük egy ULTIMAKER S3 (lásd 40. ábra) volt, míg a másik egy Markforged OnyxPro (lásd 41. ábra). Mindkét nyomtató professzionális kategóriába tartozik, és lehetővé teszi geometriailag magas pontosságú és szabályos testek nyomtatását. A nyomtatók a Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszékén voltak elérhetőek számomra.

6.3.1 Nyomtatók és a felhasznált alapanyagok



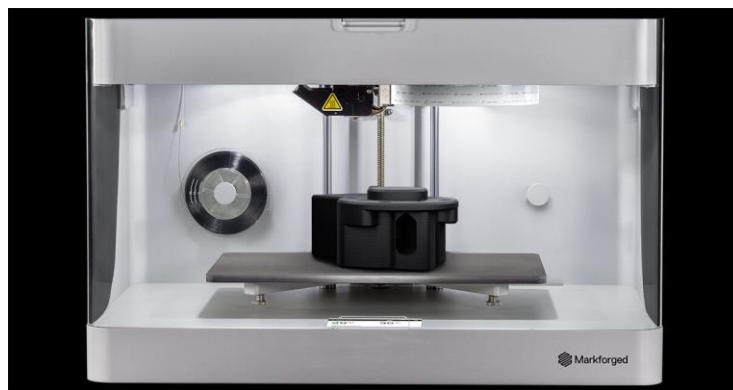
40. ábra: ULTIMAKER S3 3D nyomtató

<https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s3/> (Letöltve:2023.11.09.)

ULTIMAKER S3 fontosabb technikai adatai:

- Nyomtatási technológia: Olvasztott lerakásos modellezés (FDM)
- Maximális nyomtatási méret: 230 x 190 x 200 mm
- Nyomtatófej: Kettős extrúziós nyomtatófej
- Rétegmagasság: 20 - 600 mikron
- XYZ pozícionálási pontosság: 6,9; 6,9; 2,5 mikron
- Tárgasztal: 20 - 140 °C-ig fűtött üveg építőlemez
- Nyomtatható anyagok: PLA, PETG, ABS, PVA

Az ULTIMAKER S3-al nyomtatott alkatrészek mindegyike PLA alapanyagból lett kinyomtatva, mivel gazdaságos, könnyen nyomtatható és kiváló vizuális minőség érhető el vele. A nyomtatás előkészítésére szükség volt, hogy az első nyomtatott réteg megfelelően letapadjon a tárgasztalra. Ezért a megfelelő letapadás elérése érdekében minden nyomtatás előtt 3DLAC sprays ragasztóval lett lekezelve a tárgasztal. Ez a ragasztás megfelelő tapadást biztosított minden nyomtatási ciklusnál.



41. ábra: Markforged OnyxPro folyamatos szálerősítéses FDM 3D nyomtató
<https://markforged.com/3d-printers/onyx-pro> (Letöltve: 2023.11.09.)

Markforged OnyxPro fontosabb technikai adatai:

- Nyomtatási folyamat: Olvasztott lerakásos modellezés (FDM) folyamatos szálerősítéssel (CFR)
- Maximális nyomtatási méret: 320 x 132 x 154 mm
- Z irányú rétegfelbontás: 100 - 200 mikron
- Nyomtatható anyagok: Onyx, PLA, TPU
- Szálerősítés: Üvegszál

A Markforged OnyxPro-val nyomtatott alkatrészek Onyx műanyagból lettek kinyomtatva. Az Onyx a markforged saját fejlesztésű alapanyaga, amely, amely nylon és mikroszénérősítés keveréke. Ami azt jelenti, hogy a nylon anyagába porított szénérősítés van belekeverve.

6.4 Eltávolítás a nyomtató térből, utókezelés és összeszerelés

6.4.1 Eltávolítás a nyomtató térből

Az FDM 3D nyomtatás során a tárgyasztalra felépített alkatrész hozzá ragad tárgyasztalhoz ezzel biztosítva, hogy a nyomtatási folyamat során az nem mozog el semmilyen irányba sem. Viszont ez a jelenség nehézséget okozhat az alkatrészek eltávolításakor. A gyártásnak ennek a fázisában megtörtént az alkatrészek eltávolítása a nyomtatási térből, gyakorlatban a tárgyasztal eltávolítható a nyomtató térből így könnyebben hozzáférhetőek voltak a tárgyasztalhoz ragadott alkatrészek. Mivel a nyomtatás előtt az tárgyasztal felülete 3DLAC ragasztóval lett lekezelve így az alkatrészek eltávolítása relatív egyszerű volt. Az alkatrészek bázis felületénél alkalmazott megfelelő kézi erővel könnyen eltávolíthatóak voltak.

Miután az alkatrészeket eltávolítottam a tárgyasztalról, következett az alkatrészek utókezelése. Nem minden esetben kellett utólag dolgozni az alkatrészekkel, voltak esetek amikor a nyomtatás befejeztével már egy kész alkatrészt kaptam. Viszont pár esetben szükséges volt utólagos munkálatokra és tevékenységekre.

6.4.2 Alátámasztások eltávolítása

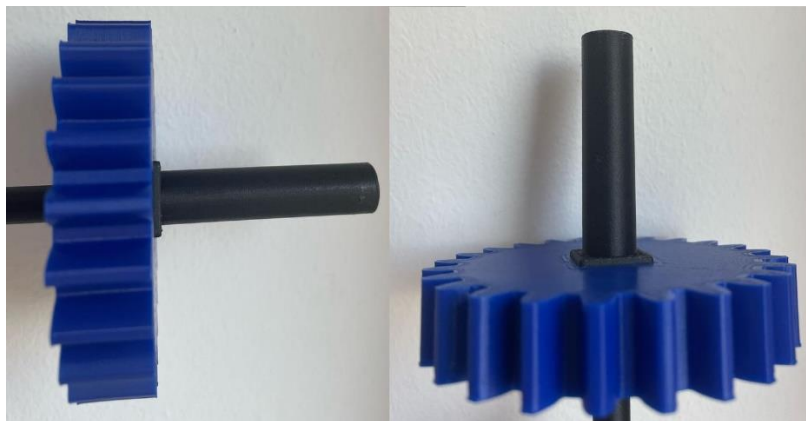
Az gyártás során az alkatrészeket némelyik esetben alátámasztásokkal nyomtattam, hogy alátámasztást biztosítson a túlnyúló részek számára. Az első lépés az volt, hogy ezeket az alátámasztásokat eltávolítottam. Ügyelni kellett arra, hogy megfelelő eszközöket használjak a könnyű eltávolítás érdekében, valamint, hogy ne sérüljön az alkatrész. Az alátámasztások eltávolításhoz kombinált fogót és csípőfogót használtam.

6.4.3 Furatok javítása és rétegvonalak eltüntetése

Az nyomtatás során az alkatrész rétegekben épült fel, és ezek a rétegek vonalakat hagytak maguk után. Az utókezelés során kis méretű tű reszelőt használtam annak érdekében, hogy eltüntessem ezeket a vonalakat, és sima felületet hozzak létre, ahol szükséges volt. Furatok esetében erre mindenhol szükség volt hiszen azok vagy csapokra illeszkedtek vagy csapágyazást kaptak és a rétegvonalak az illesztett ellenalkatrész útjában álltak. A reszelővel megmunkált felületek vizuálisan nem lennének elfogadhatóak, viszont ezek furatokban jöttek létre, amik nem látszanak az alkatrészek összeszerelése után.

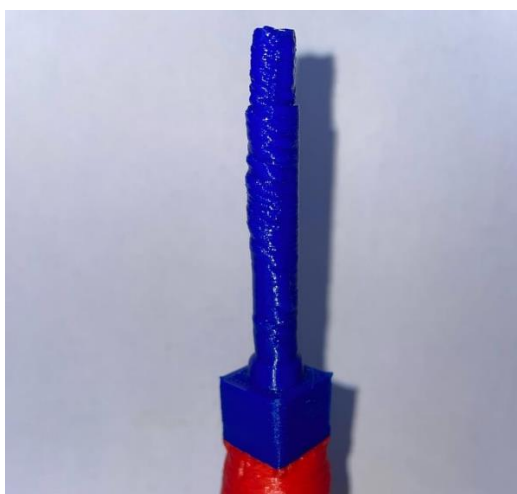
6.4.4 Összeszerelés

Az oktatási bolygómű összeszerelésére már a tervezési fázisban gondolni kellett, mivel a bolygómű, amit terveztem 31 darab alkatrészből áll, amiből 7 darab csapágó. Az alkatrészek jelentős része illesztett, vagy furatba, vagy felülethez ezért fontos azokat a tervezettnek megfelelően összeszerelni. Például, hogy a napkerék tengelyét ütközésig helyezzem el a napkerékben (lásd 42. ábra), hiszen így valósul meg a megfelelő váll távolság a fogaskerék lapjától.



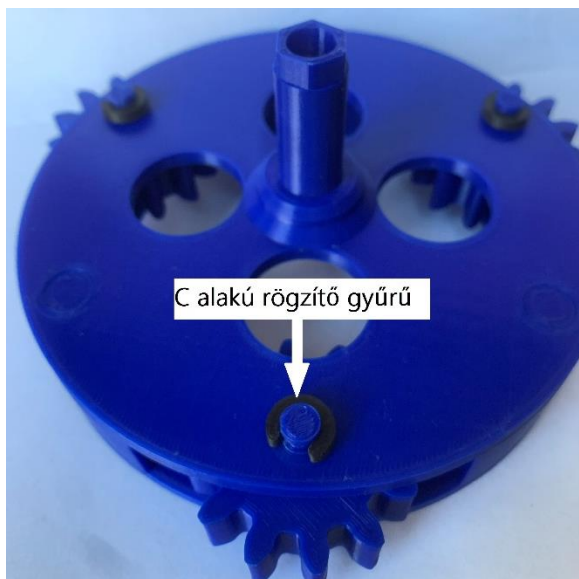
42. ábra: Napkerékbe szerelt központi tengely
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Maga a nyomtatási folyamat és a tárgyasztalról való eltávolítás után meg kellett vizsgálni a nyomtatott alkatrészeket, hogy azok nem szenvedtek-e valamilyen torzulást (lásd 43. ábra), majd ellenőrzési méréseket végeztem rajtuk, annak érdekében, hogy megbizonyosodjak az alkatrészek mérethelyességéről. Olyan esetekben amikor az alkatrészek mérethelyessége nem volt megfelelő, változtattam a nyomtatási paramétereken vagy magán a 3D-s modellen és utána az alkatrész újra nyomtatásra került.



43. ábra: Torzult központi tengely
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

Miután megbizonyosodtam róla, hogy az alkatrészek méretei helyesek, elkezdődhetett az egymásba illeszkedő darabok összeillesztése, ami nem minden esetben ment első próbálkozásra mivel voltak alkatrészek, amik szoros illesztésre lettek tervezve. Ezek esetében történt meg a rétegvonalak elsimítása. A rétegvonalak elsimítása és az illeszkedések próbája felváltva követte egymást amíg a tervezett szoros illesztés létre nem jött. Miután az egyes alkatrész csoportokat összeszereltem, ellenőriztem, hogy azok megfelelően illeszkednek-e és nem feszülnek túlságosan, valamint a tervezettnak megfelelően működnek-e.

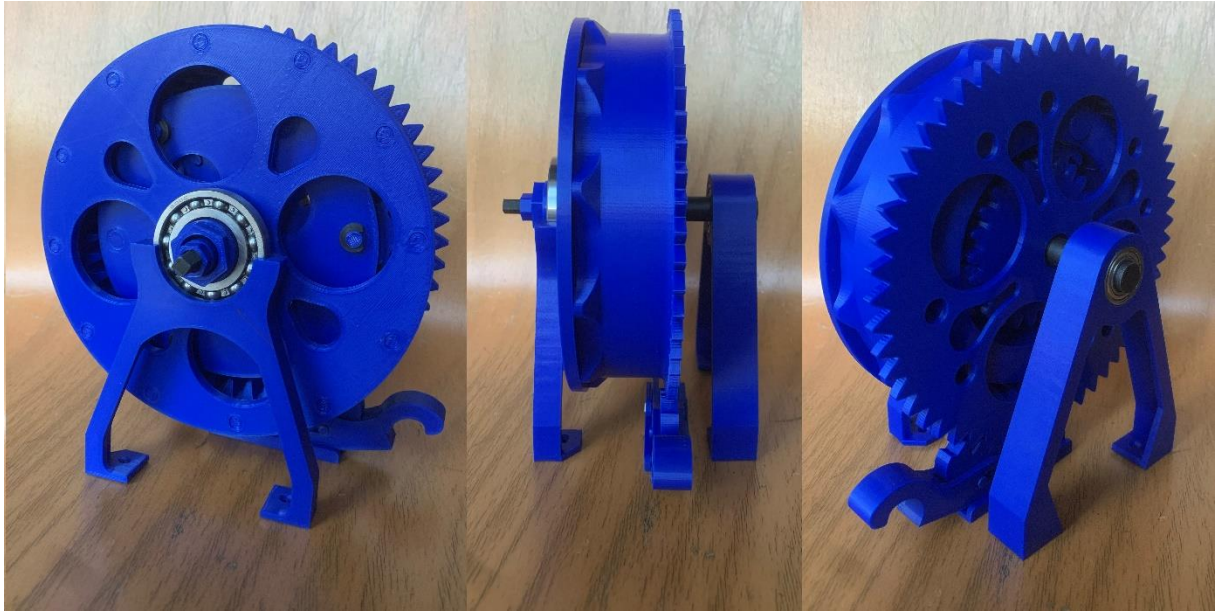


44. ábra: Összeszerelt bolygókerék tartó C alakú rögzítőgyűrűvel
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

A tervezés során minden esetben úgy terveztem az alkatrészeket, hogy azokat ragasztani ne keljen, ez legjobban például a bolygókerék tartó fedelénél megfigyelhető, ahol C alakú gyűrű rögzíti (lásd 44. ábra) a bolygókerék tartó fedelét a bolygókerék tartóhoz. Így a későbbiekben az roncsolás nélkül szétszerelhető, az esetleges javítások vagy átalakítások beépítése során.

Összességében az összeszerelési folyamat jelentősebb probléma nélkül zajlott. Levonható tapasztalat az összeszerelésből, hogy függőlegesen nyomtatott csapok esetében szükségessé válik valamilyen teszt nyomtatás, melynek során külön csak a csapok nyomtatását tesztelhetjük. Erre akkor lehet igazán szükség, ha az adott alkatrész csap geometriái az alkatrész tetején helyezkednek el, mivel, ha a nyomtató addig sok réteget nyomtatott, de a felső rétegeket, amik a csapokat alkotják nem tudja megfelelően felépíteni akkor az addig elhasznált alapanyag kárba vész. Ennek elkerülése véget ajánlatos lehet a csapok teszt nyomtatása.

Az oktatási bolygómű összeszerelt állapotban az ábrán látható (lásd 45. ábra).



45. ábra: Oktatási bolygómű modellje, gyűrűkerék fékező mechanizmussal
(Készítette: Tenczel Martin Bence)

7. ÖSSZEGZÉS

Napjainkban, ahol minden évben számos innováció és új gyártási eljárás jelenik meg a gépjárműipari vállalatok gyártási folyamataiban, nem lehet elmenni az additív gyártástechnológiák egyre inkább nagyobb jelenléte mellett sem a gyártási folyamatokban. Jelenleg 2023-ban már számos nagy és elismert autógyártó vállalat alkalmazza az additív gyártástechnológiákat.

Dolgozatomban bemutattam, hogy olyan nemzetközi gyártók, mint a BMW, a Porsche, a Bugatti és a Renault is mekkora mértékben használja ezt a gyártási eljárást. És nem csak prototípusok gyártására alkalmazzák, hanem sok esetben sorozatgyártott autókhoz. Ami azt bizonyítja, hogy az additív technológiák eljutottak egy olyan szintre, amivel biztonságosan beépíthetők 3D nyomtatott alkatrészek a személygépjárművekbe. Ehhez a gyártóknak a gyártási folyamat minden szakaszában biztosítani kell a folyamatos minőség garantálását. Csak úgy, mint az eddig megszokott hagyományos gyártástechnológiáknál. A gyártás folyamán fennálló kritikus aspektusokat összegyűjtöttem és bemutattam, hogy azok során hogyan biztosítható az állandó minőség.

Egy oktatási bolygómű tervezésével, legyártásával és összeállításával vizsgáltam, hogy FDM 3D nyomtatással történő gyártás során hogyan nyilvánulnak meg a gyakorlatban a kritikus aspektusok. A nyomtatási folyamatot levezettem a tervezéstől az alkatrészek összeszereléséig. Így lekövetkeztethető, hogy a teljes FDM 3D nyomtatási folyamat ugyan rövidebb, mint egy hagyományos gyártási folyamat, viszont mind a tervezés és a gyártás során is ugyan akkor felhasználói szakértelem szükséges a jó eredmények elérése érdekében. Minden egyes additív gyártástechnológiához úgy kell hozzá állnia a felhasználónak, mintha az egy teljesen elkülönülő technológia lenne a többi additív technológiához képest. Hiszen minden 3D nyomtatási technológia során más-más elgondolás alapján kell foglalkozni a tervezéssel, a gyártással és az utókezeléssel is. Az oktatási bolygómű nyomtatásával megvizsgáltam, hogy az FDM 3D nyomtatási technológia alkalmas-e egy ilyen összetett mechanizmus gyártására, illetve, hogy mennyire alkalmas a fogaskerek evolvens profiljának gyártására. A nyomtatások utáni kész bolygómű bizonyítja, hogy ez az eljárás alkalmas erre a feladatra, abban az esetben, ha az alkatrészek nem rendelkeznek 0.2 mm-nél kisebb illesztési tűrésekkel.

A jövőben tervben az oktatási bolygómű tovább tervezése és legyártása. A tovább tervezett bolygómű alkalmas lesz több kapcsolható fokozat létrehozására. Ezzel még jobban bemutatható lesz az automata sebességváltó működése.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Apró F. (1967): Egyszerű bolygóművek fogszámválasztása három bolygókerék esetén. Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc, https://matarka.hu/koz/ISSN_0540-3413/13k_1967/ISSN_0540-3413_13k_1967_003-020.pdf (Megtekintve: 2023.11.08.)
- [2] Awari G. K., Thorat C. S., Ambade V. és Kothari D. P. (2021): Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications. Egyesült Királyság, CRC Press.
- [3] Béland S. (1990): High Performance Thermoplastic Resins and Their Composites. Egyesült Államok, Elsevier Science.
- [4] Blokdijk, Gerardus (2018): Binder Jetting The Ultimate Step-By-Step Guide. Emereo Pty Limited.
- [5] Carolta V. (2023.07.28.): The Complete Guide to 3D Printing Composites. 3Dnatives, <https://www.3dnatives.com/en/complete-guide-3d-printing-composites-280120204/> (megtekintve: 2023.08.15.)
- [6] Chander P., Kamalpreet S., Karupppasamy S., Seeram R. és Sunpreet S. (2021, szerk.): Sustainability for 3D Printing. Svájc, Springer International Publishing.
- [7] Chander P., Rupinder S., Sunpreet S., (2020, szerk.): 3D Printing in Biomedical Engineering. Németország, Springer Nature Singapore.
- [8] Chen Z. (2021): A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping.
- [9] Csere Cs (2018.05.14.): How Automakers Are 3D-Printing Parts for Production Cars (and Classics). Hearts Autos, <https://www.caranddriver.com/features/columns/a20684648/how-automakers-are-3d-printing-parts-for-production-cars-and-classics/> (Megtekintve: 2023.11.05.)
- [10] Daniel J. T. és Deepti S. (2020, szerk.): 3D Printing in Medicine and Surgery: Applications in Healthcare. Egyesült Királyság, Elsevier Science.
- [11] Deng D. (2018): Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties. Svédország, Linköpings Universitet.
- [12] Doddamani M. (2023, szerk.): 3D Printing of Composites. Németország, Springer Nature Singapore.
- [13] Dutta B. és Froes F. (2016, szerk.): Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art, Challenges and Opportunities. Hollandia, Elsevier Science.

- [14] Emerald Group Publishing Limited (2015): A Focus on SLM and SLS Methods in 3D Printing. Egyesült Királyság, Emerald Group Publishing.
- [15] Ficsor B. és Hegedűs E.: A 3d fémnyomtatás alkalmazhatóságának vizsgálata MALE-kategóriájú UAV-dízelmotor fejlesztésre. Katonai Logisztika 31. évf. 2023. évi 1-2. szám pp. 38.-72., http://real-j.mtak.hu/25795/1/KatLog_2023_1-2.pdf (Megtekintve: 2023.11.06.)
- [16] Galati M. és Minetola P. (2019): Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Materials, 12(24), 4122.
- [17] Greg P. (2021.01.08): Porsche is using 3D printing to make EV parts. TopGear, <https://www.topgear.com/car-news/electric/porsche-using-3d-printing-make-ev-parts> (Megtekintve: 2023.11.11.)
- [18] Gyarmati J., Hegedűs E. és Gávay Gy. (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó. Műszaki Katonai Közlöny 32. évf 3. szám pp. 113-126., <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/6291/5187> (Megtekintve: 2023.11.05.)
- [19] Harshit K. D., J. Paulo D., (2021, szerk.): Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Németország, Springer International Publishing.
- [20] IATF 16949 (2016): Autóipari Minőségirányítási Rendszer, ÉMI-TÜV SUD. <https://www.tuvsud.com/hu-hu/szolgáltatások/audit-es-rendszertanúsítás/iatf-16949>
- [21] ISO 14001 (2015): Környezetvédelmi irányítási rendszerek, International Organization for Standardization, Genf, Svájc. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- [22] ISO 9001 (2015): Minőségirányítási rendszerek - követelmények, International Organization for Standardization, Genf, Svájc, <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>
- [23] ISO/TC 261 (2011): Additív gyártás, International Organization for Standardization, Technical Committee. Genf, Svájc, <https://www.iso.org/committee/629086.html>
- [24] J. R. Lawrence (2017): Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications. Egyesült Királyság, Elsevier Science.
- [25] Joanna I. P., (2022): Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics. Egyesült Királyság, Elsevier Science.
- [26] Kenneth R. (2020, szerk.): Durability of Composite Systems. Egyesült Királyság, Elsevier Science.
- [27] Lipson H., és Kurman, M. (2013): The New World of 3D Printing. Németország, Wiley.
- [28] Manoj Gupta (2017): 3D Printing of Metals. Svájc, MDPI AG.

- [29] Mittal K. L. (2005): Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications. Hollandia, Taylor & Francis.
- [30] Page I. B. (2000): Polyamides as Engineering Thermoplastic Materials. Egyesült Királyság, Rapra Technology Limited.
- [31] Petrány M. (2018.11.23.): BMW Built One Million 3D-Printed Parts Since 2010. Roadtrack, <https://www.roadandtrack.com/new-cars/car-technology/a25291381/bmw-built-one-million-3d-printed-parts-since-2010/> (Megtekintve: 2023.11.06.)
- [32] Sanders B. A. (1982, szerk.): Short Fiber Reinforced Composite Materials. Egyesült Államok, American Society for Testing & Materials.
- [33] Saunders S. (2017.01.11.): Metal Additive Manufacturing Helps Renault Trucks Reduce Weight of 4-Cylinder Engine by 25% Using 3D Printed Components. 3DPrint, <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/> (Megtekintve: 2023.11.06.)
- [34] Sheng B., Kanfoud J. és Gan T.H. (2022): Quality Control of Metal Additive Manufacturing. IntechOpen.
- [35] Sin L. T. (2012, szerk.) Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications. Hollandia, Elsevier Science.
- [36] Steven M. K. (2011, szerk.): PEEK Biomaterials Handbook. Hollandia, Elsevier Science.
- [37] Subham Banerjee (2023): Additive Manufacturing in Pharmaceuticals. Szingapúr, Springer Nature.
- [38] Toyserkani, E. (2021): Metal Additive Manufacturing. Egyesült Királyság, Wiley.
- [39] Tripathi D. (2002): Practical guide to polypropylene. Egyesült Királyság, Rapra Technology.
- [40] Végvári Zs. (2023): A 3d nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. Katonai Logisztika 2023. évi 1-2. szám pp. 177-198 http://real.j.mtak.hu/25795/1/KatLog_2023_1-2.pdf (Megtekintve: 2023.11.11)
- [41] Yang W. és Jian R. (2023, szerk.): Polymer 3D Printing and 3D Copying Technology. Németország, Springer Nature Singapore.
- [42] Zapka Werner. (2022): Inkjet Printing in Industry: Materials, Technologies, Systems, and Applications. Németország, Wiley.
- [43] (2012.02.12.): Porsche Classic supplies classic parts from a 3D printer. Porsche AG, <https://newsroom.porsche.com/en/company/porsche-classic-3d-printer-spare-parts-sls-printer-production-cars-innovative-14816.html> (Megtekintve: 2023.11.04)

- [44] (2018.01.22.): World premiere: brake caliper from 3-d printer. Bugatti Automobiles, <https://newsroom.bugatti.com/press-releases/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer> (Megtekintve: 2023.11.05.)
- [45] (2018.08.23.): BMW Impresses with 3D Printed Roof Bracket for BMW i8 Roadster. 3DPrint, <https://3dprint.com/222268/bmw-3d-printed-roof-bracket/> (Megtekintve: 2023.11.04.)
- [46] (2020.02.25.): Composite 3D Printing: An Emerging Technology with a Bright Future. AMFG, <https://amfg.ai/2020/02/25/composite-3d-printing-an-emerging-technology-with-a-bright-future/> (megtekintve: 2023.03.30.)
- [47] (2020.12.10.): Industrial-scale 3D printing continues to advance at BMW Group. BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0322259EN/industrial-scale-3d-printing-continues-to-advance-at-bmw-group?language=en> (Megtekintve: 2023.11.04.)

Ábrajegyzék

1. ábra: Bottom-up SLA 3D nyomtatási technológia	7
2. ábra: DLP 3D nyomtatási technológia	8
3. ábra: 3DJAKE 1.75 mm átmérőjű PLA filament	9
4. ábra: FDM 3D nyomtatási technológia	9
5. ábra: SLS 3D nyomtatási technológia	10
6. ábra: Polyjet 3D nyomtatási technológia	11
7. ábra: MJF 3D nyomtatási technológia	12
8. ábra: 3D nyomtatás kötőanyag kibocsátással.....	13
9. ábra: DMLS 3D nyomtatott alkatrész	15
10. ábra: EBM 3D nyomtatási technológia	16
11. ábra: ADAM additív gyártás fázisai.....	17
12. ábra: Fémporos DED (a.) és fémhuzalos DED 3D nyomtatás (b.)	18
13. ábra: Termoplasztikus műanyagok osztályozása	21
14. ábra: Félkristályos és amorf PEEK	26
15. ábra: Additív gyártás folyamat kritikus aspektusai és azok szabványai	34
16. ábra: BMW Z4 GT3 versenyautó 3D nyomtatott vízpumpa kereke	44
17. ábra: Additívan gyártott hegesztett tartó konzolok	45
18. ábra: BMW i8 Roadster tetőmerevítő konzolja.....	45
19. ábra: SLM technológiával gyártott Porsche 959-es kuplungkioldó kar	46
20. ábra: A Porsche GT2 RS 3D nyomtatott dugattyúinak gyártási fázisai	47
21. ábra: Fém 3D nyomtatott villanymotor ház	48
22. ábra: 3D nyomtatott Bugatti Chiron titánium féknyereg.....	49
23. ábra: Fém 3D nyomtatott aktív spoilerkonzol.....	50
24. ábra: Bugatti Chiron 3D nyomtatott motorkonzol, integrált vízűtéssel	50
25. ábra: Balra a DTI5 Euro 6 motor, jobbra ugyanaz a motor, additív gyártásra tervezve	51
26. ábra: Felül hagyományos szelephiba, alul fém 3D nyomtatott szelephiba	52
27. ábra: Oktatási bolygómű fő elemei	53
28. ábra: A bolygóművek hat alaptípusának kinematikai vázlata	55
29. ábra: Az oktatási bolygómű kinematikai vázlata	56
30. ábra: Planetary Gear Deesigner v1.04 szoftver az oktatási bolygómű adataival	57
31. ábra: A kb típusú bolygómű szomszédossági határhelyzete N=3 esetén	58
32. ábra: Az elemi fogazású fogaskerék jellemzői.....	59
33. ábra: Az oktatási bolygómű elemi fogazatának sugár irányú paraméterei.....	60
34. ábra: Evolvens profil származtatása	61
35. ábra: Generált evolvens fogprofilok.....	61
36. ábra: Oktatási bolygómű robbantott ábrája	62
37. ábra: A bolygómű tartószerkezet jobb oldalának alátámasztás stratégiája	67
38. ábra: Cura szoftverben beállítható nyomtatási paraméterek és egy háromszög kitöltési mintázat	68
39. ábra: Balra a bal oldali tartókonzol hibás orientációja, jobbra a tartókonzol optimális orientációja	69

40. ábra: ULTIMAKER S3 3D nyomtató	69
41. ábra: Markforged OnyxPro folyamatos szálerősítéses FDM 3D nyomtató	70
42. ábra: Napkerékbe szerelt központi tengely	72
43. ábra: Torzult központi tengely	72
44. ábra: Összeszerelt bolygókerék tartó C alakú rögzítőgyűrűvel.....	73
45. ábra: Oktatási bolygómű modellje, gyűrűkerék fékező mechanizmussal	74