DIPLOMADOLGOZAT

Mika Máté

2023

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Műszaki Intézet

mesterképzési szak

Kerékpár hajtókar generatív tervezése és 3D fémnyomtatásának megtervezése

Belső konzulens: Dr. Szakál Zoltán

egyetemi docens

Belső konzulens intézete/tanszéke: Műszaki Intézet/ Gépszerkezettani Tanszék

Készítette: **Mika Máté**

Gödöllő

2023

MŰSZAKI INTÉZET
MESTERSZAK
Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT

feladatlap

Mika Máté *(L8WSEC)*

részére

A diplomadolgozat címe:

Kerékpár hajtókar generatív tervezése és 3D fémnyomtatásának megtervezése

Feladatkiírás:
Bevezetés, szakirodalom feldolgozás, problémafelvetés, kerékpár hajtókar generatív tervezése a tömegcsökkentés érdekében, szilárdsági ellenőrzés, korrekciók, a hajtókar 3D fémnyomtatásának megtervezése, összefoglalás.

Közreműködő tanszék: Gépszerkezettani Tanszék, Gödöllő

Belső konzulens: *Dr. Szakál Zoltán, egyetemi docens,* MATE, Műszaki Intézet

A dolgozat beadási határideje: 2023. november 6.

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap

Jóváhagyom		**Átvettem**
(tanszékvezető)	(szakfelelős)	(hallgató)

A dolgozat készítőjének belső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap

(belső konzulens)

Tartalom

1. Bevezetés ... 3

2. Szakirodalom feldolgozás ... 4

2.1. Fémnyomtatási technológiák ... 4

2.1.1. Poralapú lézersugaras olvasztás ... 5

2.1.2. Huzal alapú lézersugaras olvasztás ... 7

2.1.3. Porágyalapú lézersugaras olvasztás és lézeres felrakó hegesztés összehasonlítása ... 8

2.2. Fémnyomtatott alkatrészek tulajdonságai ... 8

2.2.1. Belső kitöltés hatása a szilárdsági jellemzőkre ... 8

2.2.2. Felületi minőség, felületi minőség javítása ... 10

2.2.3. Nyomtatott alkatrészek porozitása ... 10

2.3. Fémnyomtatás tervezési kritériumai ... 13

2.4. Fémnyomtatási technológiával kapcsolatos problémák ... 14

2.5. Fémnyomtatás alkalmazási területei, alkalmazási példák ... 15

2.5.1. Ipari alkalmazás ... 15

2.5.2. Orvosi alkalmazás ... 16

2.6. Generatív tervezés ... 17

2.6.1. Generatív tervezés keretrendszere ... 17

2.6.2. Generatív tervezésre alkalmas programok. ... 19

2.7. Kerékpár hajtásrendszer ... 20

2.7.1. Kerékpár hajtómű ... 20

2.7.2. Hajtókar csatlakozás (középcsapágy) ... 20

2.7.3. Pedál ... 21

3. Hajtókar generatív tervezése ... 22

3.1. Méretfelvétel ... 22

3.2. Csatlakozó részek megtervezése ... 24

3.3. Generatív tervezés paramétereinek beállítása ... 25

3.3.1. Tervezési felbontás beállítása ... 25

3.3.2. Tervezési területek kijelölése ... 25

3.3.3. Terhelési esetek meghatározása ... 26

3.3.4. Gyártási beállítások megadása ... 29

3.3.5. Alapanyag beállítása ... 31

3.4. A generatív tervezés eredménye ... 32
3.5. A végeselem szimuláció eredményei ... 35
3.5.1. Hálózás beállítása ... 35
3.5.2. Első terhelési eset szimulációs eredményei ... 37
3.5.3. Második, harmadik és negyedik terhelési eset ... 37
3.6. A hajtókar módosítása ... 40
4. Hajtókar 3D fémnyomtatásának megtervezése ... 43
4.1. A kiválasztott fémnyomtató paraméterei ... 43
4.2. Nyomtatási beállítások ... 44
4.2.1. Nyomtató és alapértelmezett beállítások kiválasztása ... 44
4.2.2. Az alkatrész tájolása ... 45
4.2.3. Támaszok elhelyezése ... 47
4.3. Folyamat szimuláció ... 48
4.3.1. Elmozdulások a nyomtatás során (35 °C) ... 49
4.3.2. Hőmérsékleti viszonyok a nyomtatás során (35 °C) ... 50
4.3.3. Elmozdulások a nyomtatás során (80 °C) ... 51
4.3.4. Hőmérsékleti viszonyok a nyomtatás során (80 °C) ... 52
4.4. Szerszámpálya generálása ... 53
4.5. 3D nyomtatott műanyag prototípus elkészítése ... 54
5. Készülék tervezése ... 55
6. Folyamatösszefoglalás ... 57
7. Összefoglalás ... 59
8. Summary ... 60
9. Irodalomjegyzék ... 61
10. Árbák és táblázatok jegyzéke ... 65
10.1. Ábrajegyzék ... 65
10.2. Táblázatjegyzék ... 67

1. Bevezetés

Diplomadolgozatom témájaként egy szabványos méretű kerékpár hajtókar generatív tervezését választottam. A generatív tervezés célja egy olyan könnyített kerékpár hajtókar tervezése, amely az alapul választott öntött alumínium hajtókarnál számottevően könnyebb, de ugyanazt a terhelést képes elviselni.

Jelenleg a tömegcsökkentést főképp anyagválasztással érik el a konstruktőrök. Jellemzően acél, alumínium és titán alapanyagot használnak, illetve karbonból is készülnek hajtókarok, azonban ezek sérülékenyebbek, illetve áruk is jóval magasabb a fém hajtókarokéhoz képest. A generatív tervezés és a 3D fémnyomtatás azonban lehetővé teszi, hogy magával az alkatrész kialakításával, optimális geometriával érjük el a lehető legnagyobb szilárdságot a lehető legkisebb anyagfelhasználással, illetve a lehető legkisebb tömeggel. Ez mind konstrukciós, mind anyagi előnyt jelenthet.

Diplomadolgozatom készítése során a szakirodalom feldolgozása után a hajtókar generatív tervezését végeztem el, majd 3D fémnyomtatását terveztem meg, végül pedig az utólagos megmunkálásohoz terveztem egy befogó készüléket. Dolgozatom fő célja azt kideríteni, hogy lehet-e a generatív tervezés és a 3D nyomtatás által kínált tervezői szabadsággal olyan tömegcsökkentett hajtókart létrehozni, amely tömegében jelentősen könnyebb az alapul választott alumínium hatjókar tömegénél, de mindenemellet megfelelő szilárdsági és funkcióbeli jellemzőkkel bír, ezért alternatívát mutathat a karbonszál kompozitokból készült hajtókarok mellett.

2. Szakirodalom feldolgozás

A 3D nyomtatás olyan additív gyártási technológia, melynek során kétdimenziós rétegekből készül el a háromdimenziós alkatrész. Ez a fajta gyártástechnológia új szinteket nyitott meg a mérnöki alkotásban, korábban egyáltalán nem, vagy csak nagyon körülményesen gyártható, sokszor a hagyományos gyártástechnológiákkal gyártott alkatrészeknél kedvezőbb mechanikai, funkcionális jellemzőkkel bíró alkatrészek váltak gyárthatóvá. Az olyan 3D nyomtatási technológiáknak köszönhetően, mint a fémnyomtatási technológiák, már ipari alkalmazású, megfelelő szilárdsági jellemzőkkel bíró fém alkatrészek is gyárthatóvá váltak.

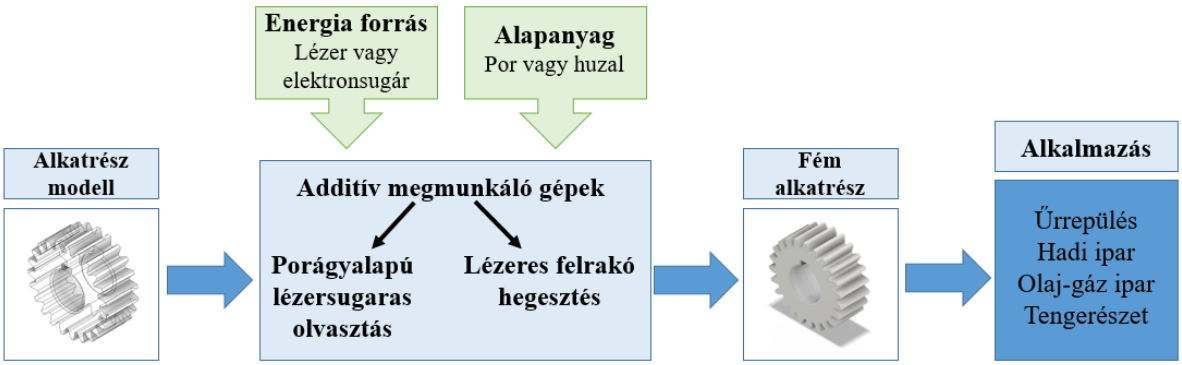
Szakdolgozatom irodalomfeldolgozásában a 3D fémnyomtatás technológiáját, a nyomtatott alkatrész tulajdonságait befolyásoló tényezőket, és a generatív tervezés folyamatát szeretném ismertetni.

2.1. Fémnyomtatási technológiák

A fémnyomtatásnak - a műanyag nyomtatáshoz hasonlóan – szintén több több típusa alakult ki. Mivel a fém összeolvasztásához szükséges energiát lézersugárral vagy elektronsugárral biztosítjuk, különbség főképpen az alapanyag formájában rejtőzik (Duda – Raghavan, 2016). Ez alapján megkülönböztetünk:

- por alapanyagot felhasználó nyomtatókat
- huzal alapanyagot felhasználó nyomtatókat.

A nyomtatás során a lézer rétegről rétegre építi fel az alkatrészt. A 3D fémnyomtatás általános folyamatábráját az **1. ábra** szemlélteti.

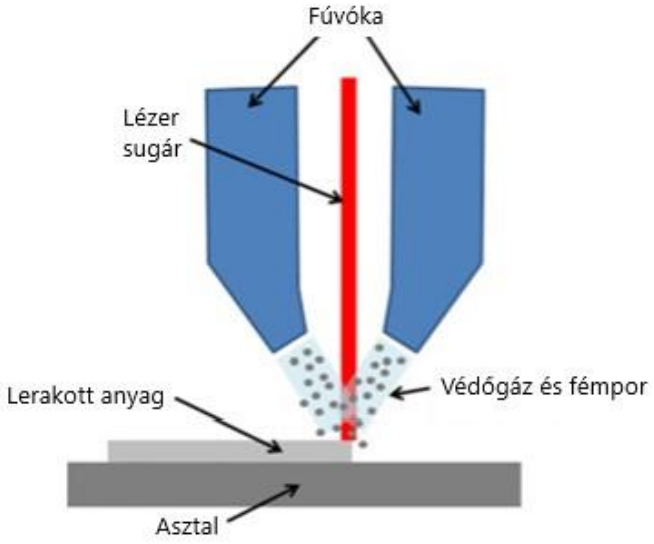


1. ábra: Fémnyomtatás folyamata
(Forrás: Saját szerkesztés. Duda – Raghavan (2016) alapján)

2.1.1. Poralapú lézersugaras olvasztás

A fémporral dolgozó technológiák két főbb kategórába csoportosíthatóak (Zsidai , 2023):

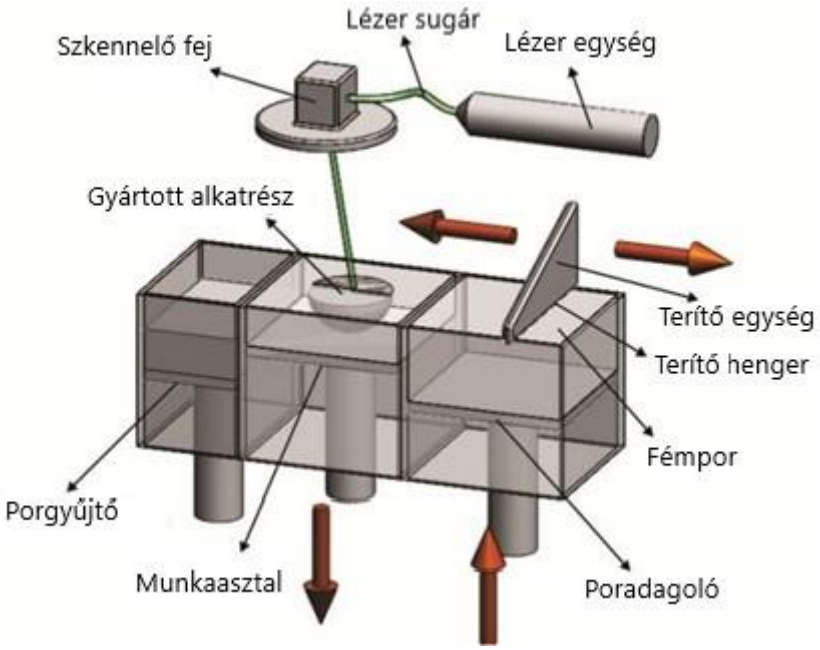
- **Fémporos DED (Direct Energy Deposition – lézeres felrakó hegesztés)**: ez a technológia a fémporszóráshoz hasonló elven alapszik. A kiáramló fémpor a fúvókában találkozik a lézersugárral, így a fúvókából már megolvadt alapanyagot viszi rá az építendő felületre. A hegesztéshez hasonlóan itt is szükség van védőgázra. A technológia nagy előnye, hogy 5-tengelyű megmunkáló központban, vagy robotkar segítségével is alkalmazható, így hibrid gyártó rendszer létesítésére alkalmas (Zsidai , 2023). A **2. ábra** a DED működési elvét ábrázolja.



2. ábra: Fémporos DED működési elve
(Forrás: Bineli-Peres-Jardini-Filho (2011) (szerkesztve))

- **DMLS (Direct Metal Laser Sintering – közvetlen lézer fém szinterezés):** nagy teljesítményű CO2 lézerrel a fémek közvetlen szinterezése. A folyamat hasonlít a SLS (Selective Laser Sintering) műanyag 3D nyomtatási technológiához. A poradagoló tartály és a terítő henger egy rétegvastagságnyi port terít el a munkaasztalon, amely rétegvastagságot a munkaasztal süllyesztésének mértéke határoz meg. A felesleges por a porgyűjtő tartályban gyűlik össze. A lézersugár a CAD modellből létrehozott 2D-s metszetek alapján besugározza a port, amely hatására a fémpor összeolvad (szinterezés). Ezután az asztal egy rétegvastagságnyit leereszkedik, majd a terítő penge ismét beteríti porral a munkaasztalt, és a lézer a következő 2D-s metszet alapján újra besugározza a területet. A folyamat addig ismétlődik, ameddig az alkatrész el nem készül. A nyomtatással az alkatrészek többé kevésbé elnyerik végső tulajdonságaikat, általában azonban szükséges utókezelni őket (hőkezelés, felületkezelés) (Bineli-Peres-Jardini-Filho, 2011).

A DMLS működési elvét a **3. ábra** ábrázolja.

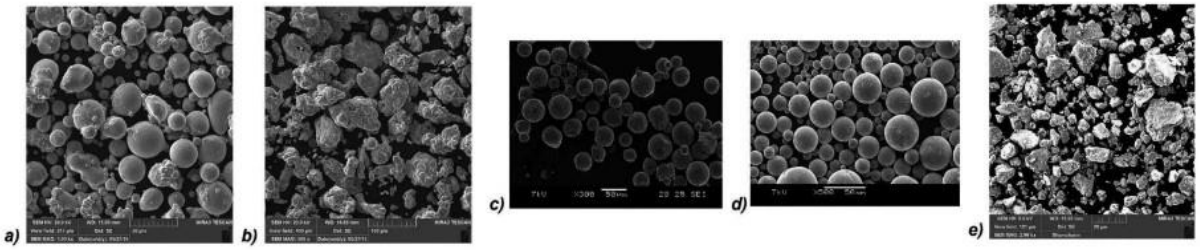


3. ábra: DMLS működési elve
(Forrás: Bineli-Peres-Jardini-Filho (2011) (szerkesztve))

A felsorolt technológiák nagyon finom szemcseméretű fémpor anyagot követelnek meg. A szemcse formája, nagysága az előállítás módjától függ:

- Mechanikus aprítás: forgácsolás, őrlőmalomban történő aprítás
- Gázporlasztás: olvasztás, sűrített levegővel forgó tárcsára porlasztás
- Fémoxid redukálás
- Elektrolízis: általába rézpor előállítására használják.

A **4. ábra** a külöböző technológiával előállított fémporok mikroszkópikus képét mutatja.



4. ábra: Különböző technológiákkal előállított fémporok mikroszkópikus képe
(Forrás: Popovich – Sufiiarov (2016))

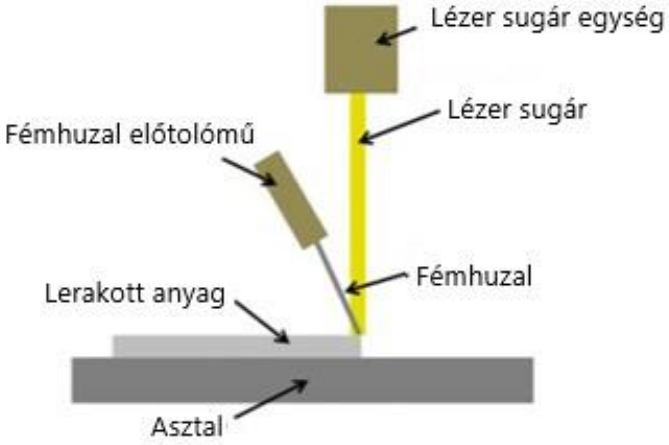
A „a” és „c” ábrán gázporlasztásos elven előállított por, a „b” ábrán fémoxid redukció elvén előállított por, az „e” ábrán mechanikus aprítás után előállított por, a „d” ábrán pedig gázatomizációs eljárással előállított por látható (Popovich – Sufiiarov, 2016).

A fémpor minősége alapjaiban határozza meg a 3D-nyomtatott alkatrész fizikai tulajdonságait, mikrostruktúráját, ezért a megfelelő tárolás és kezelés elengedhetetlen. A fémporokat a külső környezettől elzártan kell tárolni, mivel a levegő páratartalma öregíti a port, csökkenti a folyékonyságát, és növeli az oxigén mennyiségét nyomtatás során (a nyomtatásnak intertizált környezetben kell végbemennie a porrobbanás veszélyének és az oxidáció elkérülésének érdekében). Ezért a fémporokat mindig a lehető legközelebb tárolják nyomtatóhoz és csak a kivételezéskor nyitják meg a tárolóedényt, hiszen minden egyes megnyitás újabb szennyeződések bejutásának, illetve a nedvesség megváltozásának veszélyét hordozza, amely az alapanyag roncsolódását eredményezhetik (Trapp, 2011).

2.1.2. Huzal alapú lézersugaras olvasztás

A por alapanyagot felhasználó nyomtatókhoz képest kevésbé elterjedt technológia. Ennek magyarázata az, hogy jóval pontatlanabb alkatrészek előállítására képes. Tulajdonképpen a felrakó hegesztés elvén alapuló technológia. Az FDM technológiához is hasonlítható, csak nagyobb energia szükséges az olvadékképzéshez, amit lézer vagy elektronsugár biztosít.

Inkább javítási technológiákban, mintsem kész alkatrészek gyártására alkalmazza az ipar. Akár 5 tengelyű megmunkáló központban, vagy robotkar segítségével is alkalmazható a nyomtató fej megfogásával, ennek köszönhetően ezzel a technológiával könnyen megvalósulhat az egy megmunkáló központon belüli hibrid gyártás. A nyomtató felépíti az alkatrészt, a nyomtatási pontatlanságok, illetve a nyomtatási minőség alapján figyelmbe vett ráhagyásokkal, majd a forgácsoló szerszámok minimális anyagleválasztással elkészítik a kész geometriát (Zsidai, 2023). A huzal alapú DED működési elvét a **5. ábra** mutatja.



5. ábra: Huzal alapú DED működési elve
(Forrás: Bineli-Peres-Jardini-Filho (2011) (szerkesztve)

2.1.3. Porágyalapú lézersugaras olvasztás és lézeres felrakó hegesztés összehasonlítása

A bemutatott technológiák alapján látható, hogy a két fő technológiai irányultság a porágyalapú lézersugaras olvasztás, illetve a lézeres felrakó hegesztés, melynek alapanyaga fémhuzal, vagy fémpor is lehet. A két technológia összehasonlítását a **1. táblázat** mutatja

1. táblázat: Porágyalapú lézersugaras olvasztás és lézeres felrakó hegesztés összehasonlítása
(Forrás: Duda – Raghavan (2016) nyomán)

Paraméter	Porágyalapú lézersugaras olvasztás	Lézeres felrakó hegesztés
Építési sebesség	5-20 cm^3/h (40-160 g/h)	0,5 kg/h-ig (70 cm^3/h)
Pontosság	+/- 0.02-0.05 mm / 25 mm	+/- 0.125-0.25 mm / 25 mm
Rétegvastagás	0.04-0.2 mm	0.5-1.0 mm
Felületi minőség	Ra 4-10 µm	Ra 7-20 µm
Rendszer beruházási ár	EUR 450,000 – 600,000	EUR 500,000 – 800,000
Alkalmazás	➢ gyors prototípus gyártás ➢ „direct manufacturing”	➢ hengeres alkatrészek javítása ➢ felrakó hegesztések

2.2. Fémnyomtatott alkatrészek tulajdonságai

A következőkben a fémnyomtatott alkatrészek tulajdonságait és az azokat befolyásoló tényezőket fogom bemutatni.

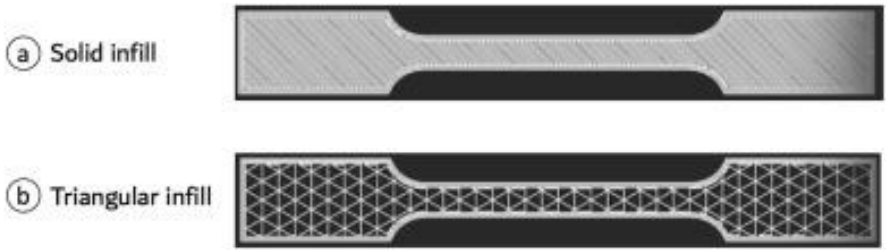
2.2.1. Belső kitöltés hatása a szilárdsági jellemzőkre

A belső kitöltési strukúra a nyomtatott alkatrészek egyik legnagyobb előnyét jelenti. Ez mind anyagtakarékosságot, mind kedvezőbb tulajdonságokat is kölcsönözhet az alkatrészeknek. A következő tanulmány fémpor töltésű filamentet alapú, FDM nyomtatóval készített, majd szinterezett próbatestek mechanikai jellemzőit mutatja be (Atatreh – Alyammahi – Vasilyan – Alkindi – Susantyoko, 2013). A **2. táblázat** a kísérleti próbatestek tulajdonságait mutatja.

2. táblázat: A kísérleti próbatestek tulajdonságai
(Forrás: Atatreh – Alyammahi – Vasilyan – Alkindi – Susantyoko (2013) nyomán)

Anyag	Kitöltés típusa	Héj vastagság (réteg db)	Talp vastagság (réteg db)	Rétegvastagság
Rozsdamentes acél	Tömör	4	-	0,125
	Háromszög	4	4	0,125

A próbatesteket a **6. ábra** szemlélteti.



6. ábra: A kísérlethez gyártott próbatestek
(Forrás: Atatreh – Alyammahi – Vasilyan – Alkindi – Susantyoko (2013))

A szakítóvizsgálathoz 3-3 próbatest lett legyártva, és a vizsgálatok során a kapott eredményeket átlagolták. A **3. táblázat** és a **4. táblázat** a rozsdamentes acél próbatestek szakítóvizsgálat eredményeit mutatja.

3. táblázat: Tömör kitöltésű rozsdamentes acél próbatest szakítóvizsgálati eredményei
(Forrás: Atatreh – Alyammahi – Vasilyan – Alkindi – Susantyoko (2013) nyomán)

Tömör próbatest	Egyezményes folyáshatár (N/mm^2)	Szakítószilárdság (N/mm^2)	Fajlagos nyúlás (%)
Átlag	781	1018	3,33
Szórás	38,7	18,1	0,42

4. táblázat: Háromszög kitöltésű rozsdamentes acél próbatest szakítóvizsgálati eredményei
(Forrás: Atatreh – Alyammahi – Vasilyan – Alkindi – Susantyoko (2013) nyomán)

Háromszög kitöltésű próbatest	Egyezményes folyáshatár (N/mm^2)	Szakítószilárdság (N/mm^2)	Fajlagos nyúlás (%)
Átlag	517	586	1,34
Szórás	17,6	12,8	0,03

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a háromszög kitöltéssel rendelkező próbatest folyáshatára 34%-kal, szakítószilárdsága 57 %-kal romlott. Másik szempontból azonban tömege 34 %-kal csökkent (tömör: 26,4 g, kitöltött: 17,4g).

Kitöltés alkalmazásával a nyomtatási idő, az alapanyag felhasználás, az energiafelhasználás is csökkenthető, amelyek bár a szilárdság rovására mehet, azonban érdemes mérlegelni az előnyöket, hátrányokat. Egy adott alkatrésznél érdemes több kitöltlés megvizsgálásával megállíptani az ideális struktúrát, illetve a kitöltési sűrűséget.

2.2.2. Felületi minőség, felületi minőség javítása

Függetlenül a felhasznált anyagtól, a 3D fémnyomtatott alkatrészek általában durva, szemcsés felülettel rendelkeznek, köszönhetően a rétegről rétegre építésnek, illetve a porszemcsék méretéből adódó egyeletlenségnek. A felületi minőség javítására alkalmazznak kézi polírozást, homokfúvást, ultrahangos polírozást, elektrokémiai polírozást illetve lézer polírozást (S. M. Basha – Bhuyan - M.M. Basha – Venkaiah – Sankar, 2020).

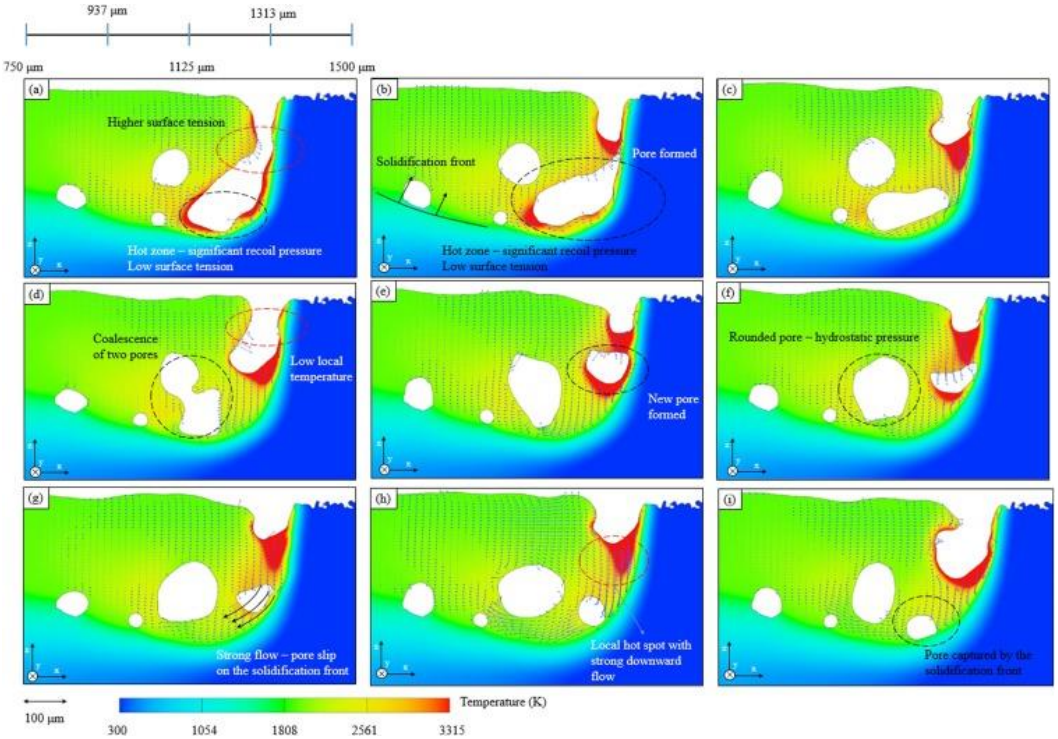
A 3D fémnyomtatott alkatrész nem megfelelő felületi minősége statikus és dinamikus terhelés hatására repedésképződést kiindulási pontjává is válhat. Rozsdamentes acél munkadarab esetén kimutatták, hogy kémiai polírozással az alkatrész átlagos felületi minősége R_a 15 µm – ről 0,4 µm – re csökkenthető (Tyagi – Goulet – Riso – Garcia-Moreno, 2019).

2.2.3. Nyomtatott alkatrészek porozitása

A porozitás a 3D fémnyomtatott alkatrészek egyik legnagyobb hátránya. A nyomtatási technológia illetve az alapanyag miatt az elkészült alkatrészek nem 100%-os tömörségűek, benne belső pórusok vannak. A porozitás rontja az alkatrész mechanikai tulajdonságait, illetve kifáradási jellemzőit. A porozitás többféle képpen is létrejöhet, ez lehet a nyomtatás során az rétegek összeolvadásának hiánya, illetve gáz pórusok képződése. (Wang – Ning – Zhu – Yang – Yan – Dun – Xue – Xu – Bose – Bandyopadhyay, 2022):

A

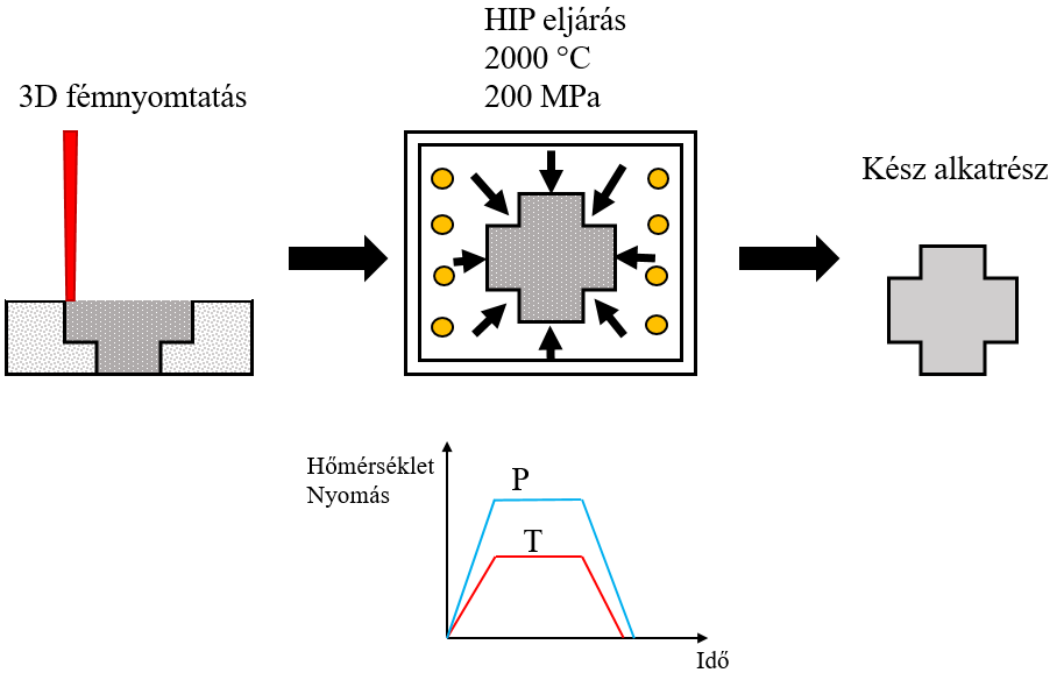
7. ábra szemlélteti, hogy hogyan jönnek létre a nyomtatás folyamán a belső gázpórusok.



7. ábra: Lunker kézpődés
(Forrás: Bayat – Thanki – Mohanty – Witvrouw – Yang – Thorborg – Tiedje – Hattel (2019))

A belső gázüreg, pórus képződése bonyolult folyamat. A lézersugár támadási pontján létrejön az úgynevezett kulcslyuk (keyhole), amelynek alján a hőmérséklet az alapanyag párolgási pontja fölé melegszik. Itt a nyomás viszonyok és megolvadt anyag felületi feszültsége olyan állapotot hozz létre, hogy a kulcslyuk nyitvamarad. Azonban a lézer elhaladtával a felső hideg zónák elkezdenek bezárulni, és így létrejönnek a belső pórusok. Ahogy a lézer halad, és olvasztja meg az anyagot, úgy az ömledékben ezek a pórusok képesek vándorolni. (Forrás: Bayat – Thanki – Mohanty – Witvrouw – Yang – Thorborg – Tiedje – Hattel, 2019)

Belátható, hogy a belső porozitások megszüntetése (sűrűség növelése) illetve a feszültségcsökkentés miatt hőkezelést igényelnek az alkatrészek. A HIP technológia (Hot isostatic pressing – Forró izosztatikus nyomás) során nagy nyomáson (max 200 MPa) és nagy hőmérsékleten (max 2000 °C) inertizált környezetben hőkezelik az alkatrészeket, így az anyag sűrűsödik, a belső porozítások eltünnek. Az anyagszerkezet sűrűsödésének köszönhetően az alkatrész kedvezőbb mechanikai tulajdonságokra tesz szert, mint pl. szívósság, kifáradási élettartam növekedése. Ezen kívül több azonos alkatrész mechanikai tulajdonságainak a szórása is kisebb lesz, így megbízhatóbb alkatrészeket kapunk (Hiperbaric). A HIP technológia egyszerűsített folyamatát a **8. ábra** mutatja.

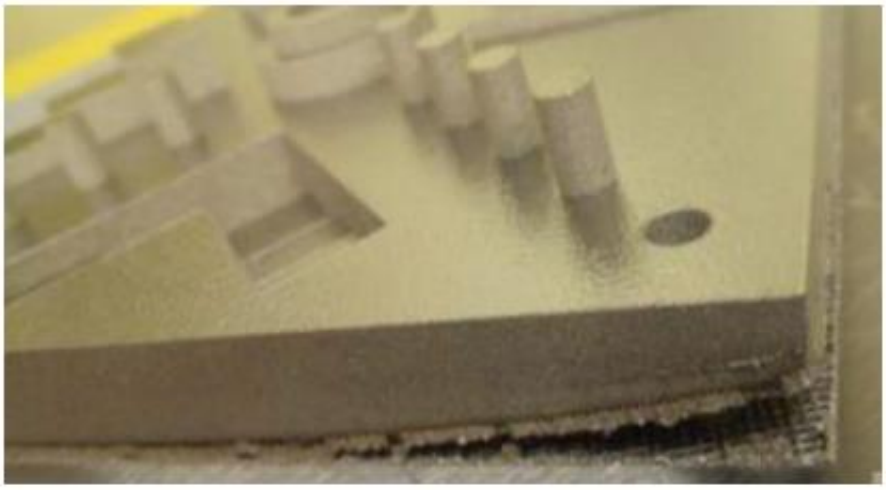


8. ábra: A HIP technológia egyszerűsített folyamata
(Forrás: saját szerkesztés)

2.3. Fémnyomtatás tervezési kritériumai

Additív technológiával gyártott alkatrészek tervezésekor számos olyan tulajdonság van, ami eltér a hagyományos megmunkálási technológiáktól, ezért a tervezés folyamán figyelembe kell venni ezeket (Duda – Raghavan, 2016).

- A felületi minőség nagyban függ a nyomtatáskor beállított rétegvastagságtól. Jobb felületi minőséget kisebb rétegvastagsággal érhetünk el, ami a gyártási idő megnövekedését eredményezi.
- Támasztások alkalmazása szükséges. Még a fémporos nyomtatáskor is kell támaszokat alkalmazni. Ennek oka nem (vagy nem csak) az anyag alátámasztása, hiszen azt a por elvégzi, hanem a hőfeszültségek miatt keletkező deformáció elhúzó hatásának elkerülése.
- Huzal szikraforgácsolás szükséges az alkatrész asztalról való leválasztásához.
- A finom felületi érdesség a belső felületeken nehezen állítható elő (pl. áramlási csatornák)
- Az alkatrészek anyagszerkezete közvetlenül gyártás után nem elég sűrű, így nagy nyomású alkalmazásokhoz még nem alkalmazhatóak (HIP technológia szükséges)
- Az anyagszerkezet eltér az öntés, kovácsolás során kialakult szerkezettől
- Az anyagnak irányultsága van az építési technológiának köszönhetően
- Tervezéskor figyelembe kell venni a nagy hőfeszültséget. Nagy hőfeszültég hatására az alkatrész képes elválni az építőlaptól is, képesek a nyomtatási rétegek elszakadni. Az 9. ábra ezt az effektust mutatja.

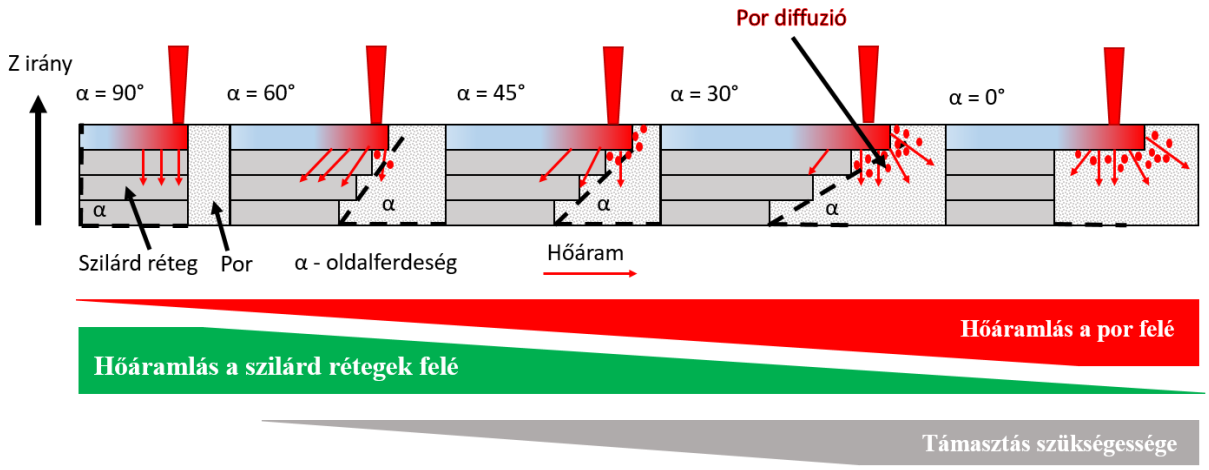


9. ábra: Hőfeszültség hatására felszakadó alkatrész
(Forrás: Duda – Raghavan (2016))

2.4. Fémnyomtatási technológiával kapcsolatos problémák

Az additív fémnyomtatás még viszonylag fiatal technológiának számít, ezért számos olyan problémával rendelkezik, amit figyelembe kell venni a technológia alkalmazása során. (Duda – Raghavan, 2016).

- A nyomtatás során különböző termikus hatások lépnek fel, melegedési és hűlési szakaszok váltják egymást, amelyek belső hőfeszültségekhez, deformációkhoz vezethetnek.
- A technológia átvitele különböző rendszerek között (szoftveres úton) nem lehetséges, vagy nagyon korlátozott.
- A terítőhenger megfelelő működtetése nehézkes
- Lézer útvonalának számítása bonyolult
- Por kezelés és betöltés a rendszerbe
- A por tisztasága
- A por újrahasználása (szitálázs, szelektálás)
- Alkatrész tisztítás (belső üregekből a por eltávolítása)
- Támasztékok eltávolítása körülményes
- A kinyúló felületek, a falak ferdeségnek, a támasztásoknak a hatása. A hőhatás közvetetten a port is éri, ezért az képes diffunálni, mely rossz felületi minőséget, és méretpontatlanságot eredményez. A por diffuziót a **10. ábra** szemlélteti.



10. ábra: Por diffuzió a 3D fémnyomtatás során
(Forrás: Saját szerkesztés Duda – Raghavan (2016) alapján)

2.5. Fémnyomtatás alkalmazási területei, alkalmazási példák

A 3D nyomtatás terjedése új utakat nyitott meg a tervezőmérnökök számára, korábban egyáltalán nem legyártható, vagy csak nagyon körülményesen legyártható alkatrészek váltak elkészíthetővé. Mivel a technológia még rendkívül költséges, ezért a következő főbb területekre korlátozódik az alkalmazás:

- Prototípus gyártás
- Organikus (akár generatív tervezetett) alakzatok gyártása
- Bonyolult, összetett alkatrészek kis sorozatú gyártása

2.5.1. Ipari alkalmazás

A fém 3D nyomtatás nagymértékű szabadsága jelentősen csökkentette a tervezési korlátokat. A tervezőmérnökök számára korábban alapvetés volt, hogy csak olyan alkatrészeket tervezzenek, amely a rendelkezésre álló szerszámparkkal le is gyárthatóak. A 3D fémnyomtatás egyik nagy előnye, hogy tulajdonképpen nincs szükség szerszámra. Ez bonyolult, de kisszériás gyártáskor gazdaságilag is megtérülő lehet, illetve az átfutási időt is csökkenti (FREEDEE). Másik nagy előny, hogy anyagfelhasználás szempontjából nagyon gazdaságos technológiának tekinthető, ha a forgácsoláshoz viszonyítjuk. A 3D fémnyomtatás ki tudja elégíteni az egyre növekvő, egyedi igények mentén történő alkatrész előállítást, azaz a rugalmas gyártást.

A repüléstechnikában különösen nagy szereppel bír a 3D fémnyomtatás, hiszen így a korábbival azonosan jó, de könnyebb alkatrészek gyárthatóak, ami alapvető feltétel ebben az iparágban. Az Airbus már alkalmazza a 3D fémnyomtatás technológiáját, amely segítségével akár 70%-kal könnyebb alkatrészeket is tudnak gyártani. Általánosságban elmondható, hogy az általuk újratervezett, 3D fémnyomtatással legyártható alkatrészek 55%-kal könnyebbek az eredeti alkatrésznél, és 90%-kal kevesebb anyagfelhasználással készülnek el (az additív gyártás nagyon kevés hulladékot eredményez) (AdditiveX). Egy airbus által gyártott 3D nyomtatott konzolt mutat a **11. ábra**.

11. ábra: 3D nyomtatott konzol
(Forrás: https://www.aircraftinteriorsinternational.com/)

2.5.2. Orvosi alkalmazás

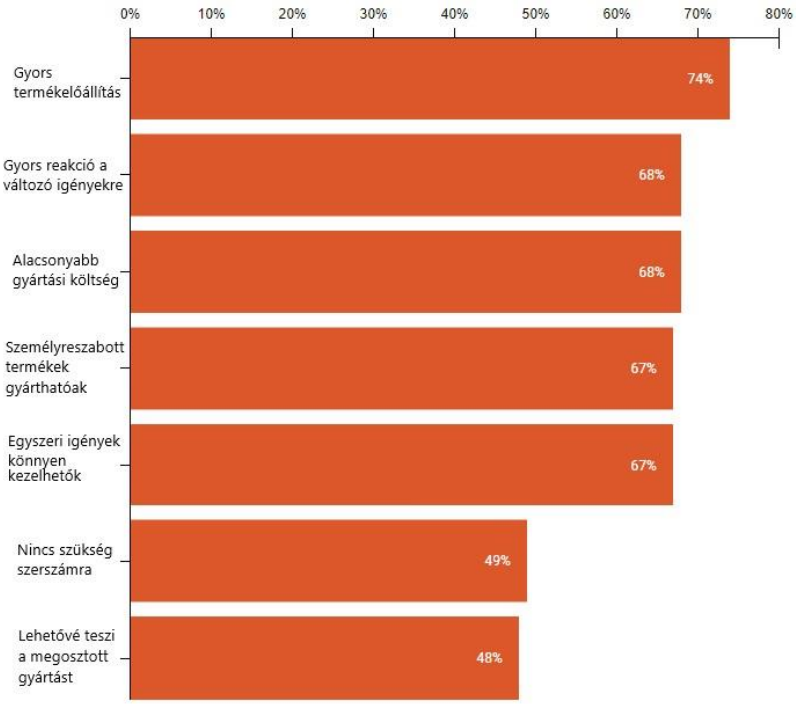
Orvosi alkalmazásban a 3D fémnyomtatásnak elsősorban az ortopédiai szektorban van nagy jelentőssége. Segítségével olyan bonyolult geometriák (pl. protézis) válnak gyárthatóvá kiváló minőségű alapanyagokból (pl. titán), amelyek lassan, nehézkesen, vagy egyáltalán nem gyárthatóak le (FREEDEE).

A 3D fémnyomtatás lehetővé teszi a személyre szabott protézisek legyártását, olyan méretben és alakban, amely megfelel a páciens anatomiájának. A hagyományos gyártási költségeknél alacsonyabb költséggel valósíthatóak meg az összetett és bonyolult termékek. A **12. ábra** egy titániumból készült csipőprotézis (protézis szár, protézis gömbfej és vápa) mutat (Jabil).

12. ábra: 3D nyomtatott titán csípőprotézis
(Forrás: Jabil)

A *Jabil 3D nyomtatási technológiák az egészségügyben* témájú kérdőívében a válaszadók a következőkben adták meg a 3D nyomtatási technológia előnyeit (

13. ábra).



13. ábra: Kérdőív a 3D nyomtatás előnyeiről az egészségügyi szektorban
(Forrás: Jabil (szerkesztve))

2.6. Generatív tervezés

A generatív tervezés egy újszerű tervezési metódus. Generatív tervezés során az iterációs tervezési folyamatot számítógép végzi a mérnök által bevitt paraméterek alapján, így a gyártási költségek, az alkatrész teherbírása, a forma, már a tervezés legelső szakaszában ugyanakkora figyelmet kap, mint a funkció.

A tervezési folyamat során a program a tervezendő alkatrész szabadon változtatható paramétereit (pl. tervezési geometria) véletlenszerűn változtatja előre meghatározott határokon belül (pl. határoló geometria), így rengeteg tervvariánst létrehozva. Ezután a terveket különböző peremfeltételek mentén (szilárdság, gyárthatóság, ergonómia, biztonsági tényező) szűri a program, így csak az életképes tervek maradnak meg (Krish, 2010).

A tervező feladata a tervezési peremfeltételek helyes megválasztása, majd a kapott tervvariánsok közül mérnöki megfontolások alapján az optimális konstrukciót kiválasztása.

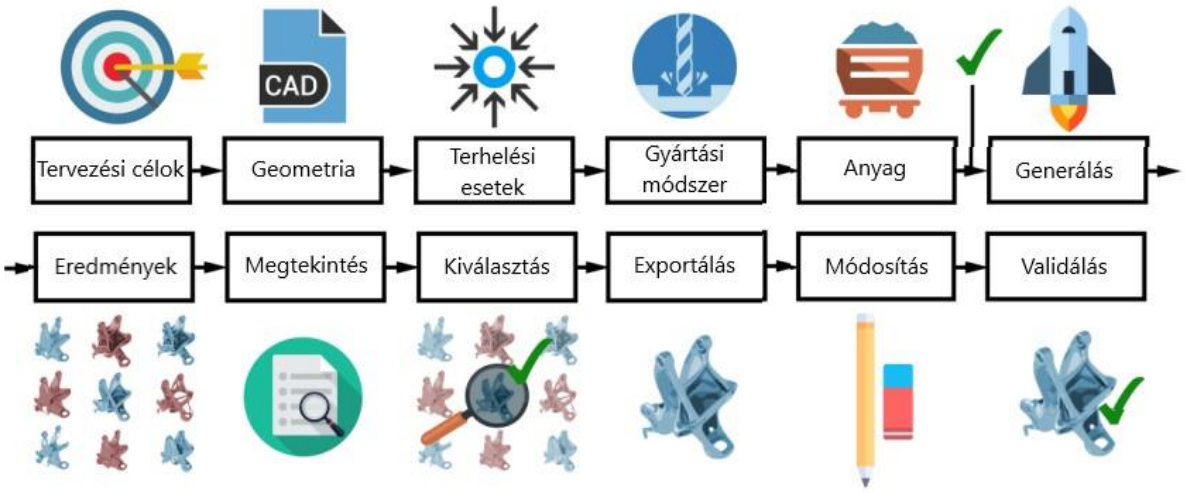
2.6.1. Generatív tervezés keretrendszere

A generatív tervezés főbb momentumai általánosságban a következőképpen vázolhatóak fel (Autodesk Fusion 360 alapján):

- Tervezési célok - a két fő tervezési cél a tömeg minimalizálása, és a maximális merevség. A második tervezési cél választásánál a tervezőnek meg kell adnia azt a céltömeget, amely mellett a lehető legnagyobb merevséget szeretné kapni.
- Geometira – a tervező több fajta területet határozz meg tervezés során: azokat a területek amelyeket érintetlenül kell hagyni (Preserve regions – régiók megőrzése), azokat a területek, amelyeket üresen kell hagyni (Obstacle regions – akadály régiók), illetve opcionálisan megadható az a határoló terület is, amelyen belül kell a tervezésnek végbemennie (Starting region – kiinduló régió)
- Terhelési esetek – a tervező itt definiálja a terheléseket (erő, nyomás, nyomaték, csapágyterhelés), illetve a kényszereket (fix kényszer, súrlódásmentes kényszerek)
- Gyártási korlátok – a tervező itt tudja kiválasztani a kívánt gyártási módot (forgácsolás, öntés, 3D nyomtatás), illetve az adott gyártási módon belül annak speciális jellemzőit.
- Anyag kiválasztás – itt lehet a kívánt anyagot beállítani. Még csak lineárisan rugalmas anyagmodellekkel képesek dolgozni a generatív tervező szoftverek.

- Ellenőrzés és számítás – a program ellenőrzi minden szükséges bemeneti feltétel meglétét, majd ha megvannak, elkezdi a tervezést. A felhő alapú számítástechnika kreditekbe kerül, amely krediteket a felhasználónak kell megvásárolnia.
- Eredmények – a felhő alapú számítás után az eredmény a számítógépre letöltésre kerülnek (beállítástól függő mennyiségben)
- Eredmények megtekintése – a legjobb kiválasztás érdekében az eredmények mechanikai és fizikai tulajdonságaik megtekinhetőek.
- Kiválasztás, exportálás – a tervező a legjobbnak ítélt tervet kiválasztja, és exportálja CAD fájlba.
- Módosítás – exportálás után lehetőség van az esetleges hibák kijavítására, illetve módosítások végrehajtására pl. a gyárthatóság érdekében.
- Validáció – annak az érdekében, hogy a modell valóban megfelel a kívánalmaknak, végeselem szimálciót kell végrehajtani, amely által megkapjuk az alkatrész végső mechanikai tulajdonságait (Buonamici – Carfagni – Furferi – Volpe – Governi, 2021).

A **14. ábra** az Autodesk generatív tervezésének keretrendszerét mutatja.



14. ábra: Autodesk generatív tervezésének keretrendszere
(Forrás: Buonamici – Carfagni – Furferi – Volpe – Governi (2021) (szerkesztve))

2.6.2. Generatív tervezésre alkalmas programok.

A kereskedelmi forgalmoban elérhető generatív tervezési csomagok közé tartozik a Fusion 360, a Solid Edge, a CogniCAD, a Creo 7.0, az MSC Apex, a CATIA V6 és az NX. Azonban egyik program sem alkalmas anizotróp anyagok kezelésérére (Junk – Burkart, 2021). Az **5. táblázat** a különböző, generatív tervezésre alkalmas szoftverek tulajdonságait mutatja.

5. táblázat: Generatív tervezésre alkalmas szoftverek tulajdonságai
(Forrás: Junk – Burkart, 2021 nyomán)

Szoftver	Fejlesztő	Származás	Kapcsolhatóság	Adattárolás
Fusion 360	Autodesk	USA	Integrált	Felhő alapú
CogniCAD	ParaMatters	USA	Egyedülálló	Lokális
Solid Edge	Siemens	Németország	Integrált	Lokális
Creo 7.0	PTC	USA	Integrált	Lokális
MSC Apex	MSC Software	USA	Egyedülálló	Lokális
CATIA V6	Dassault Systèmes	Franciaország	Integrált	Lokális
NX	Siemens	Németország	Integrált	Lokális

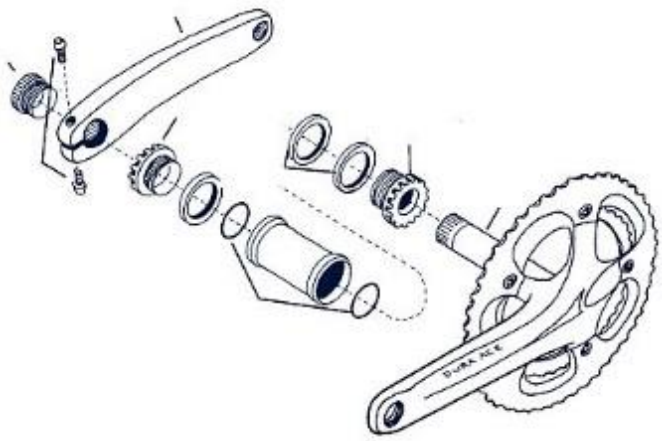
Ezek a szoftverek azonban még csak korlátozottan elérhetőek, köszönhetően a magas vétel és használati árnak. Például a Fusion 360 évi licensz díja 1200 $, emelett 33 $ a futtatások díja (Goudswaard – Nassehi – Hicks, 2023).

2.7. Kerékpár hajtásrendszer

A következőkben a diplomamunkámban tervezett kerékpár hajtókarral kapcsolatos általános információkat mutatok be.

2.7.1. Kerékpár hajtómű

A kerékpár hajtómű a két hajtókart, és a rászerelt lánckerekeket (lánctányérokat) tartalmazza. A lánckerekek száma típustól függően lehet 1,2 vagy 3. A hajtómű kapcsolódik kerékpárvázba szerelt középcsapágyhoz és a hajtóműhöz (pontosabban a hajtókarokhoz) csatlakozik a pedál. A hajtómű feladata, hogy a kerékpáros lábai által leadott teljesítményt a kerékre közvetítse. A lánckerek illetve a hajtókarok lehetnek integráltak vagy cserélhetőek is (Bikepro). A **15. ábra** egy modern, integrált tengelyes kerékpár hajtómű robbantott ábráját mutatja.



15. ábra: Integrált tengelyes kerékpár hajtómű
(Forrás: https://bikemag.hu/tech/hajtomuvek-szerelese-karbantartasa/)

2.7.2. Hajtókar csatlakozás (középcsapágy)

Régebben a legtöbb kerékpár négyszögletes középcsapágy-szisztémát alkalmaztott. A középcsapágy tengelye rendszerint 17 mm átmérű, kúpos, négyszögesített végű, 102-127 mm hosszal rendelkező tengely. Ezt négyszögletes hajtómű rendszernek nevezzük. (Németh –Ardó, 2022). A **16. ábra** egy négyszögletes hatjóműrendszer mutat.

16. ábra: Négyszögletes hajtómű rendszer
(Forrás: Németh – Ardó (2022))

2.7.3. Pedál

A pedál szerepe, hogy forgáspontként működve képesek legyünk a hajtómű forgatsására, illetve, mint testünkkel folyamatosan érintkező pont, a kényelemérzetet is nagymértékben meghatározza. A pedálok alapvetően két fő típusra oszthatóak: taposópedálokra, illetve patentpedálokra (Németh 2009).

A taposópedál a legelterjedtebb pedálfajta. Felső részüket általában csúszásgátló réteg borítja, vagy a pedál kialakítása olyan, hogy nem engedi a láb lecsúszását (Vital Club).

17. ábra: Taposó pedál
(Forrás: Vital Club)

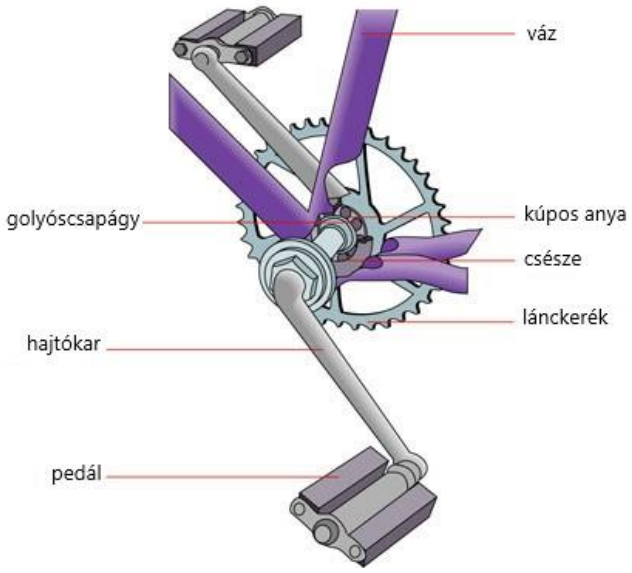
A patent pedál a klipszes pedál továbbfejlesztett változata (hatékonyságban jobb, mint a taposópedál). A klipszes pedál esetében a lábfej szíjakkal van átvetve, amely segít a kifejthető hajtóerő növelésében, azonban veszélyhelyzet esetén nem tudunk megszabadulni a pedáltól. A patent pedál ezt a problémát kívánja orvosolni. Tekerés közben nem csak lefelé nyomással vagyunk képesek erő kifejteni, de a másik lábunk felfelé húzásával is, így növelve a hatékonyságot (Vital Club).

18. ábra: Patent pedál
(Forrás: Vital Club)

3. Hajtókar generatív tervezése

Szakdolgozatomban egy kerékpár hajtókar generatív tervezését végeztem el, egy meglévő hajtókar alapján. Munkám célja megvizsgálni, hogy generatív tervezés alkalmazásával és 3D fémpornyomtatással lehet-e olyan hajtókart készíteni, ami már releváns tömegkülönbséggel rendelkezik a hagyomás hajtókarhoz képest, így akár a kerékpáros versenysportnak is alternatívát mutat.

Áttekintésként a **19. ábra** mutatja be a hajtókar szerepét a hajtóműben. A lánckerék közvetlenül kapcsolódik a tengelyhez, a jobb oldali hajtókar kapcsolódhat a lánckerékhez, illetve a tengelyhez is, bal oldali hajtókar pedig a tengelyhez kapcsolódik. Munkám során olyan hajtókart terveztem, ami mindkét oldalra csatlakoztatható.



19. ábra: Hajtómű egyszerű vázlata
(Forrás: bdumas)

3.1. Méretfelvétel

A kerékpár hajtókarokat szabványos méretekkel gyárták. A **hajtókarok hosszát** a középcsapágytól a pedálytengelyig mért (közép-közép) távolsággal jellemezzik, amely felnőtt szabványos méret esetén **165-180 mm** között változik. Esetemben a **választott hosszméret 175 mm**. A kiindulási és viszonyítási alapként választott hajtókart a **20. ábra** mutatja.

20. ábra: Kiindulási alkatrész
(Forrás: saját)

Az általam választott hajtókar tengelycsatlakozása a hagyományos, négyszögletes hajtómű rendszernek felel meg, tehát a hajtókar egy kúpos, négyszögletes lapolással csatlakozik a tengelyhez, az axiális rögzítés csavarral van megoldva. A kiválasztott hajtókar alapanyaga alumínium, így én is alumínium alapanyagot választottam. A hajtókar és a pedál csatlakozása is szabványosított, 9/16”-os pedálmenet. A pedált **21. ábra** mutatja.

21. ábra: Pedál
(Forrás: saját)

A tervezéshez szükséges befoglaló méreteket a hajtókar lemérésvel határoztam meg. A befoglaló téglatest mérete 205x45x36 mm. A fontosabb kiindulási paramétereket a **6. táblázat** mutatja.

6. táblázat: Kiindulási paraméterek
(Forrás: saját)

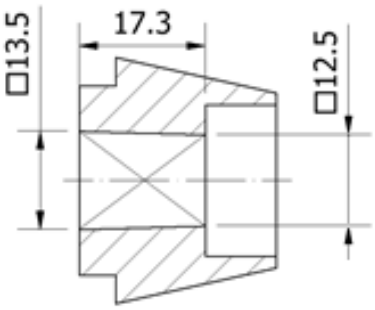
Megnevezés	**Érték**
Közép-közép távolság	175 mm
Pedálmenet mérete	9/16”
Befoglaló méretek	205x45x36 mm
Alapanyag	Alumínium

3.2. Csatlakozó részek megtervezése

A csatlakozó részeket, azaz az általam definiált részeit a leendő alkatrésznek Autodesk Inventor programban terveztem, a meglévő hajtókar méretei alapján (befoglaló, csatlakozó méretek). A hajtókar két csatlakozó résszel rendelkezik: a tengelyhez való csatlakozás (négyszögletes hajtómű rendszer), illetve a pedálhoz való csatlakozás (9/16”-os pedálmenet). A tervezés jobb átláthatósága érdekében a pedálmenet csatlakozását nem ábrázoltam, hanem a magfurat méreteivel, sima hengeres felülettel helyettesítettem. A csatlakozó részeket a **22. ábra** mutatja.

22. ábra: Csatlakozó részek
(Forrás: saját)

A lapolás méreteit külön metszetben is ábrázoltam a jobb átláthatóság érdekében. A metszetet a **23. ábra** mutatja.

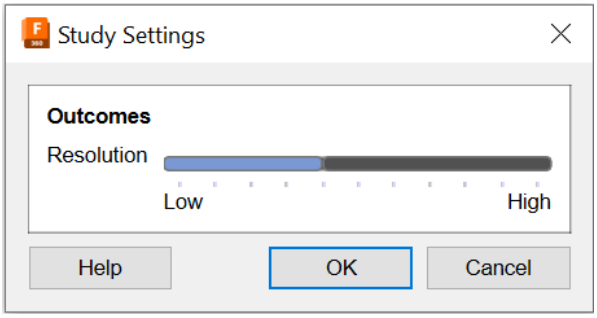


23. ábra: Lapolás ábrázolása metszetben
(Forrás: saját)

3.3. Generatív tervezés paramétereinek beállítása

3.3.1. Tervezési felbontás beállítása

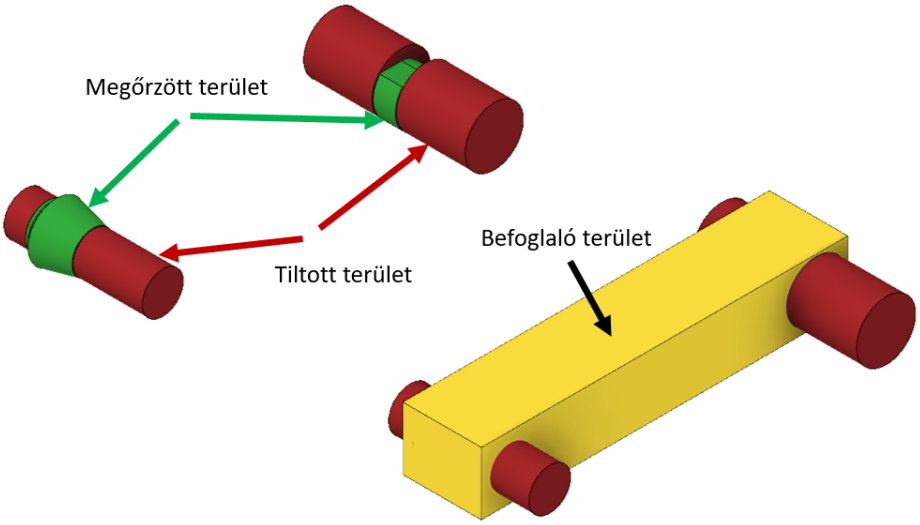
Elsőként lépésként a generatív tervezés „felbontását” állítottam be, melynek munkaablakát a **24. ábra** mutatja.



24. ábra: Tervezési „felbontás” beállítása
(Forrás: saját)

3.3.2. Tervezési területek kijelölése

A következő lépés a tervezés számára szükséges területek (megőrzött, tiltott, kiindulási/befoglaló) megjelölése. A zölddel jelölt terület a megőrzött terület, amely a csatlakozó felületeket jelöli ki, ezeken tehát a program nem fog módosítani. A piros terület a tiltott terület, ahová a programnak nem szabad terveznie, mert ott más alkatrész fog elhelyezkedni, vagy szereléshez szükséges utat kell biztosítani. A sárga terület pedig a kiindulási vagy befoglaló terület, ezen belül szabadon tervezhet a program (az előzőekben említett kikötések figyelembevételével). A területek kijelölését a **25. ábra** mutatja.



25. ábra: Tervezési területek kijelölése
(Forrás: saját)

3.3.3. Terhelési esetek meghatározása

A kerékpár hajtókar terhelése több terhelési esetre bontható fel, attól függően, hogy a hajtókar körülfordulása során éppen melyik helyzetében van, így **90°-os osztással 4 terhelési esetet** kapok. A terhelések meghatározásakor feltételezem, hogy a pedálon szíj is van, így a kerékpáros húzni is tudja a pedált. A terhelés periódikussága a sebességtől és az áttételtől függően változó, illetve a terhelés nagysága a gyorsítás mértékétől (nyeregből kiállás, hirtelen gyorsítás) is függ. A generatív tervezés során dinamikus tényezővel növelt statikus terheléseket fogok megadni, a **dinamikus tényező értékét 1,5**-nek veszem fel.

Megjegyzendő, hogy mivel a terhelő erő nem a pedál és hajtókar csatlakozásánál hat, hanem a pedálon, ezért a hajtókart nyomaték is fogja terhelni, amit figyelembe veszek a terhelések megadásakor. Ennek a nyomatéknak az erőkarját **65 mm-re** veszem (pedálközép és hajtókar közép távolsága). A terhelő erőt elsősorban a kerékpáros tömegéből származtatom, amit **120 kg**-nak feltételekzek. A terhelő erőt, illetve a terhelő nyomatékot a következő összfüggésekkel számítottam:

$$Terhelő\ erő = Tömegből\ származtatott\ erő * dinamikus\ tényező\ (1{,}5)[N]$$

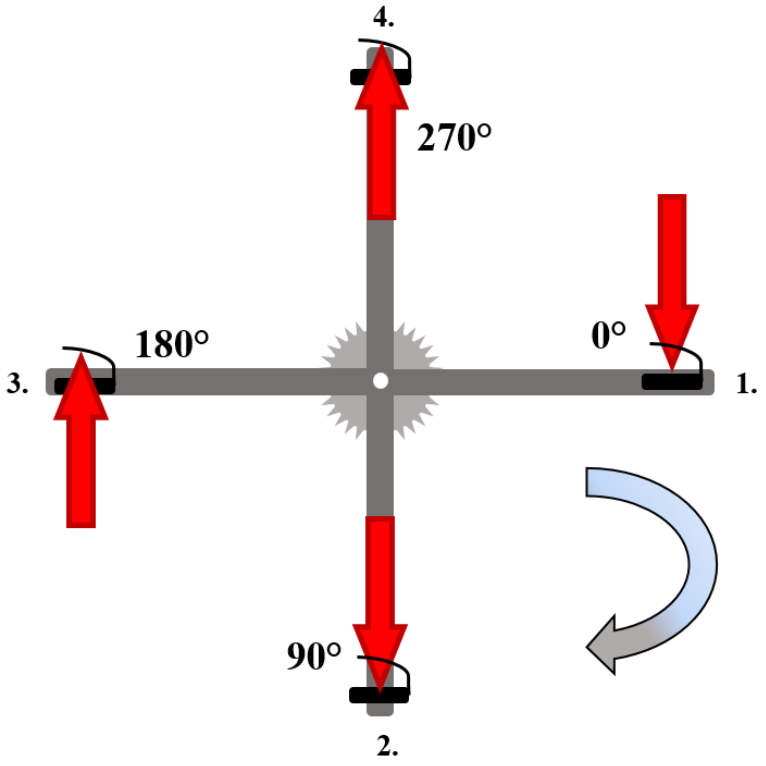
$$Terhelő\ nyomaték = Terhelő\ erő * erőkar\ (0{,}065)[Nm]$$

A **7. táblázat** a terhelési esetekben fellépő terhelő erő és terhelő nyomaték értékeit mutatja.

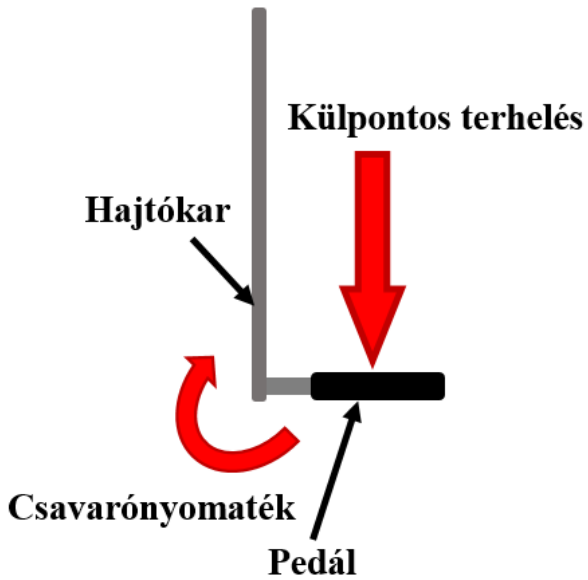
7. táblázat: A terhelési esetekben fellépő terhelő erő és nyomaték értékek
(Forrás: saját)

Terhelési eset	Terhelő erő [N]	Terhelő nyomaték [Nm]	Hajtókar állás [°]
1.	1800	117	0°
2.	1800	117	90°
3.	740	48	180°
4.	740	48	270°

A **26. ábra** és a **27. ábra** szemlélteti a különböző terhelési esetekben a terhelések irányát.

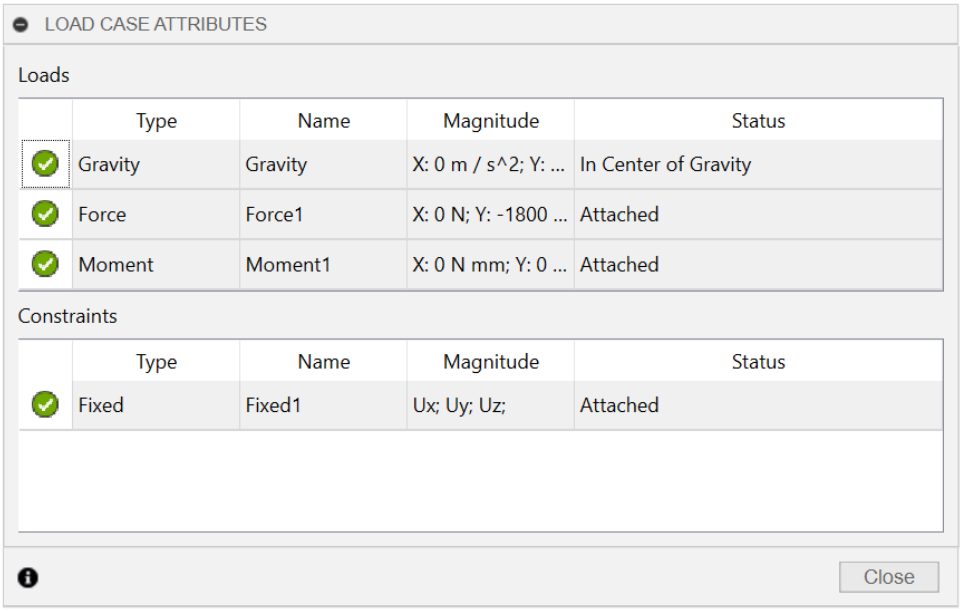


26. ábra: Terhelési esetek
(Forrás: saját)



27. ábra: Külpontos terhelés és csavarónyomaték értelmezése
(Forrás: saját)

A **28. ábra** a programban beállított terhelési értékeket mutatja, az első terhelési esetre vonatkozóan. A többi terhelési esetet a korábban bemutatott értékek alapján, hasonló módon állítottam be.



28. ábra: Terhelések beállításának munkaablaka
(Forrás: saját)

Bár az öntömeg, így a gravitációs terhelés ennél az alkatrész méretnél (kb. 100-200 g) nem mérvadó, mégis megadtam, hiszen a kar körülfordulásából 4 terhelési eset adódik, és a gravitációs terhelés vektora segítséget nyújt a későbbiekben, hogy éppen melyik helyzetében van a hajtókar. A terhelések vizuális ábrázolását a **29. ábra** mutatja.

29. ábra: Felvett terhelések és kényszerek
(Forrás: saját)

A **29. ábrán** a lakat jelzi a fix kényszerek helyét, amelyet a kúpos lapolás mind a 4 oldalára felvettem. A sárga nyíl jelöli a gravitációs terhelés, a sötétkék nyíl a terhelő erőt, a világoskék pedig a külpontos terhelésből (terhelés a pedálon ébred) származó csavarónyomatékot jelöli.

3.3.4. Gyártási beállítások megadása

A generatív tervezés beállításai során szükséges megadni a biztonsági tényező értékét. Mivel a hajtókar fárasztó igénybevételt szenved így a biztonsági tényező értékét a következő táblázat segítségével harátozom meg (**30. ábra**).

Biztonsági tényező (mivel függ össze)	**Felosztás**	**A rongálódás mértéke**		
		kicsi	**közepes**	**nagy**
x_1 jelentősége)	A rész törésének nincs következménye	1,20	1,30	
	A rész törése a gép leállását okozza	1,30	1,40	
	A rész törése gépcsoportok tönkremenését okozza vagy embereket veszélyeztethet	1,70		
x_2	Kovácsolt, hengerelt acél	1,10		
	Acélöntvény (egyszerű alakú)	1,25		
	Acélöntvény, bonyolult alakú, többnyire öntéstechnikai szempontból sem kivitelezhető kifogástalanul	1,30	1,40	
x_3 vizsgálata)	Minden rész üzemszerű vizsgálata esetén	1,05	1,10	1,15
	Üzemszerű vizsgálat választás szerint, minden rész szakító és fajlagos ütőmunka vizsgálatával	1,10	1,15	1,20
	Minden rész vizsgálata szakításra és fajlagos ütőmunkára	1,10	1,20	1,25
	Szakító és fajl. ütőmunkavizsgálat választás szerint, minden rész keménységvizsgálatának alávetve	1,15	1,25	1,30
	Minden rész keménységvizsgálata esetén	1,15	1,35	1,45
	Keménységvizsgálat választás szerint	1,15	-	-
	Vizsgálat nélkül	1,20	-	-
x_4 eljárás pontatlanságai)	A számítás pontos	1,10		
	A számítás feltevés szerinti	1,30		
x_5 minősége)	Kifogástalan kivitel esetén	1,10		
	Másodrendű kivitel (szerelési feszültségek)	1,20	1,30	

30. ábra: Biztonsági tényezőt befolyásoló résztényezők
(Forrás: Czupy – Horváth – Major 2011)

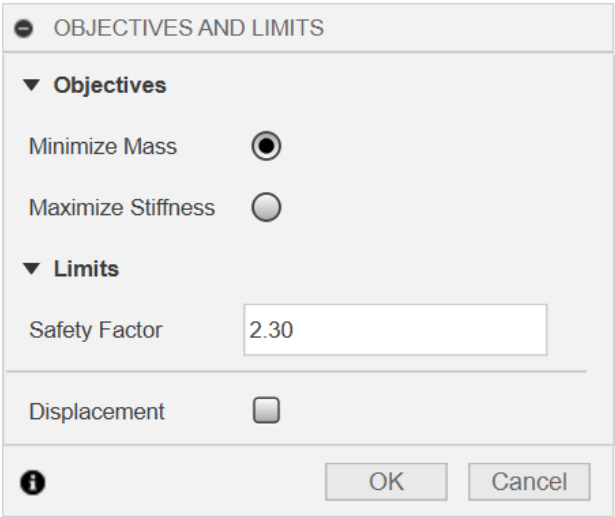
Az általam meghatározott biztonsági tényezők értékei:

$$x_1 = 1{,}2 \quad x_2 = 1{,}3 \quad x_3 = 1{,}2 \quad x_4 = 1{,}1 \quad x_5 = 1{,}1$$

Az összevont biztonsági tényező értékét a következő összefüggés adja:

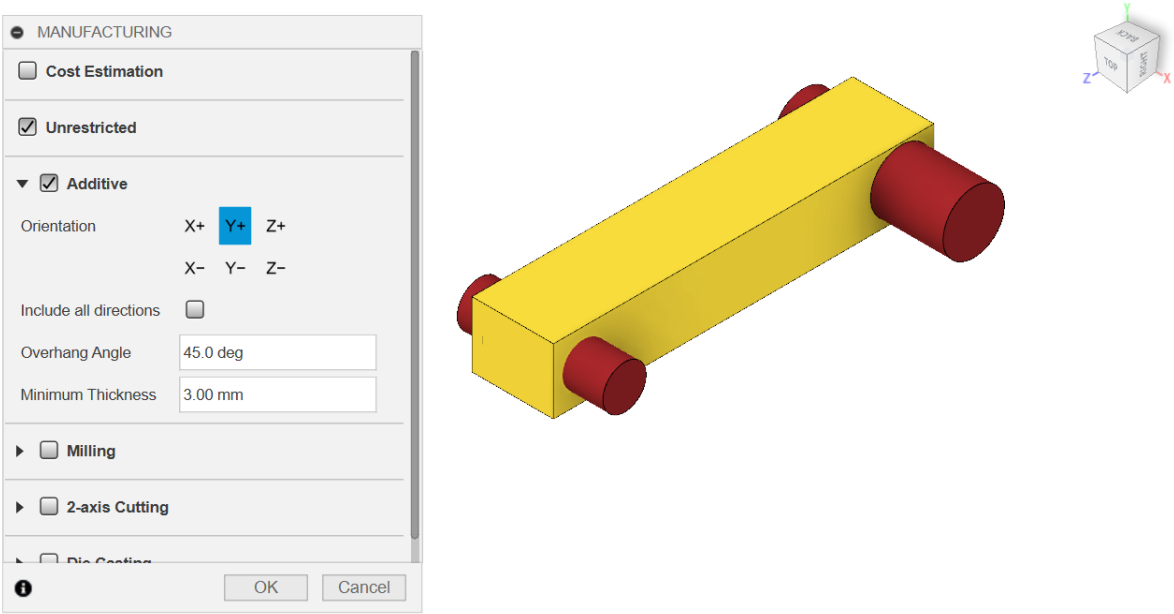
$$x = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 = 1{,}2 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}1 \approx 2{,}3$$

A **31. ábra** a tervezési cél, és a biztonsági tényező beállításának munkaablakát mutatja. Tervezési célként a tömeg minimalizálását adtam meg, biztonsági tényezőként pedig a fentiekben meghatározott értéket.



31. ábra: Tervezési cél és biztonsági tényező munkaablaka
(Forrás: saját)

A gyártási típus beállításánál az additív gyártási módot választottam. Az „unrestricted” opció kiválasztásával a program számol a gyártási módszer megkötéseivel, így végeredményben jobb minőségű modellt szolgáltat nekünk a program, azonban számba kell venni, hogy ezek a modellek feltehetően nehezebben gyártható alternatívák. Esetemben, mivel 3D fémpornyomtatásssal lesz az alkatrész elkészítve, így nem okoz gondot a nehezebben gyártható geometria, viszont cél a minnél jobb minőségű alkatrész. Az additív gyártási mód beállítását a **32. ábra** mutatja.



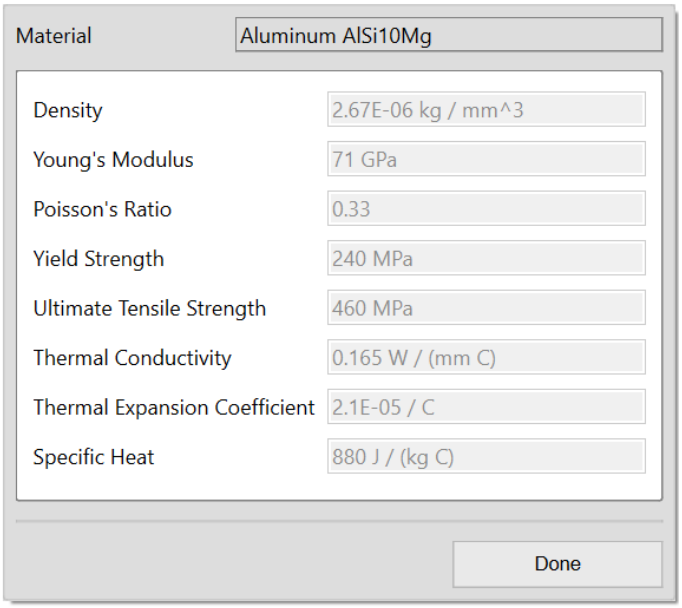
32. ábra: Additív gyártási mód beállítása
(Forrás: saját)

3.3.5. Alapanyag beállítása

A beállított anyag **ALSI10Mg**, mely fontosabb mechanikai jellemzői a következők:

- Folyáshatár: 240 MPa
- Szakítószilárdság: 460 MPa
- Young modulusz: 71 Gpa

A részletes anyagtulajdonságokat, az alapanyagbeállítás munkaablakát a **33. ábra** mutatja.



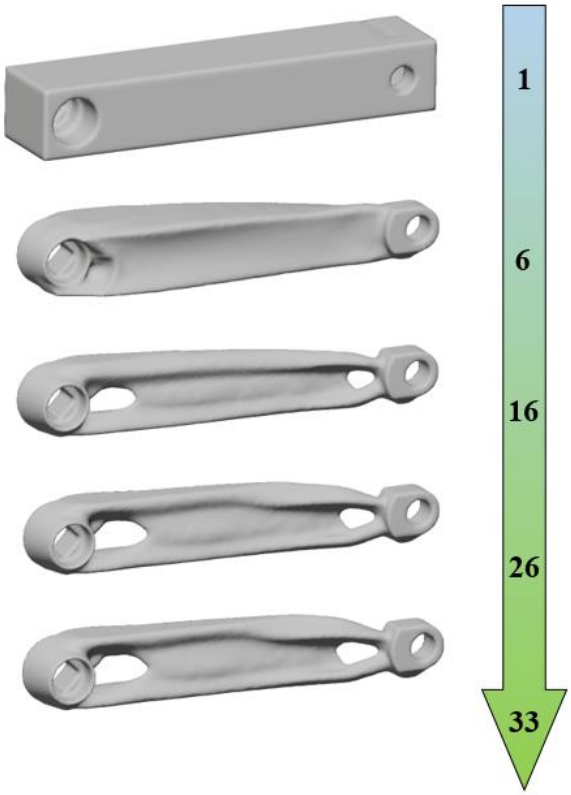
33. ábra: Anyagtulajdonságok munkaablaka
(Forrás: saját)

3.4. A generatív tervezés eredménye

A generatív tervezés több tervvariánst is elkészített, amelyek közül kiválasztottam az optimálisat. Az első és második tervvariánst a 34. ábra mutatja.

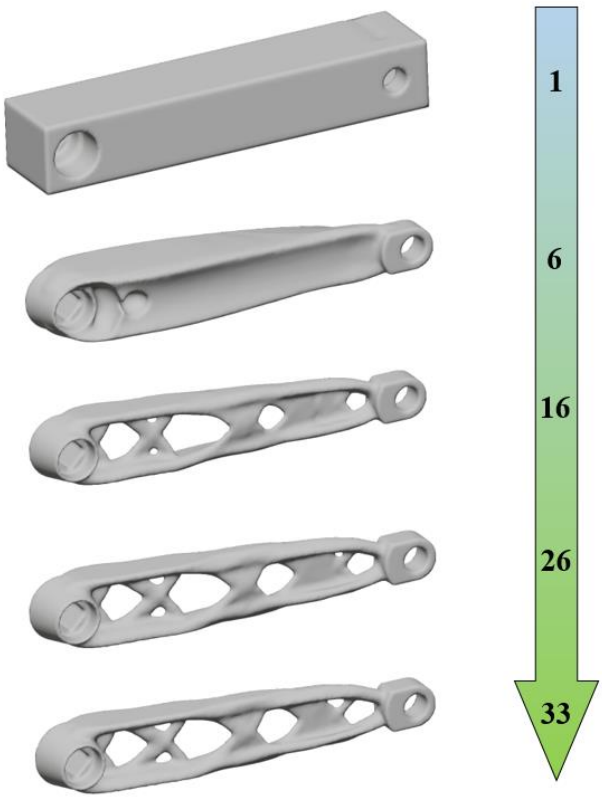
34. ábra: Tervvariánsok
(Forrás: saját)

Az első tervariáns esetében a tervezett hajtókar tömege - tömör kialakítást feltételezve - **149 g, ami 51 g-al könnyebb** a hagyományos technológiával készül hajtókarénál. A tervvariáns 33 iterációs lépéssel készült el. Az iteráció lépéseit a 35. ábra mutatja:



35. ábra: 1. tervvariáns iterációs lépései
(Forrás: saját)

A második tervvariáns esetében a tervezett hajtókar tömege - tömör kialakítást feltételezve - **130 g, ami 70 g-al könnyebb** a hagyományos technológiával készül hajtókarénál. A tervvariáns 33 iterációs lépéssel készült el. Az iteráció lépéseit a 36. ábra mutatja:



36. ábra: 2. tervvariáns iterációs lépései
(Forrás: saját)

A kiválasztáshoz az alábbi táblázatban (**8. táblázat**) foglaltam össze a tervezett hajtókarok jellemzőit.

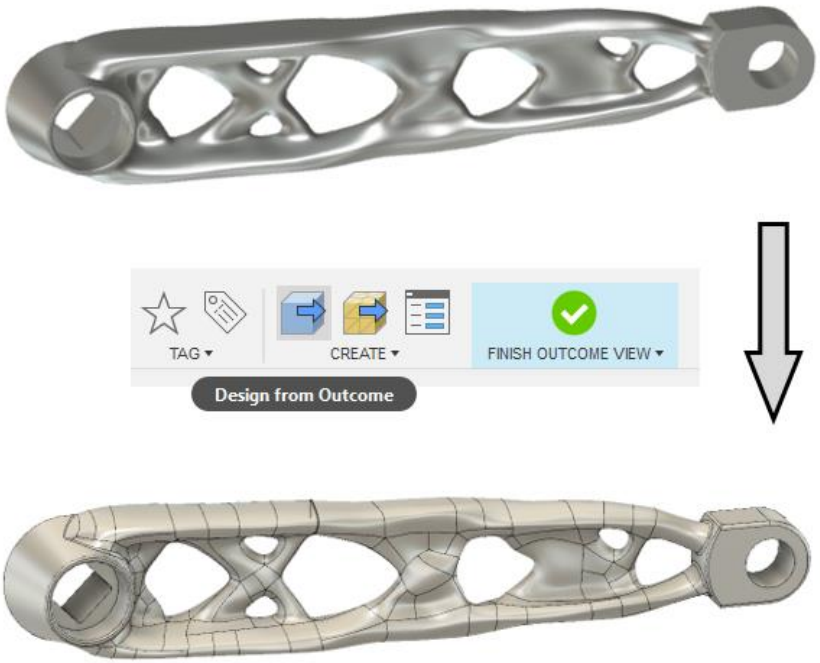
8. táblázat: tervvariánsok tulajdonságai
(Forrás: saját)

	1. **Tervvariáns**	2. **Tervvariáns**
Tömeg (g)	149	130
Legnagyobb red. feszültség (MPa)	104,348	104,348
Legkisebb biztonsági tényező (-)	2,3	2,3
Legnagyobb globális elmozdulás (mm)	2,213	2,404

Az második tervvariáns tömege 19 g-al könnyebb, mint az elsőé, azonos maximális feszültség, és biztonsági tényező értékek mellett. A legnagyobb globális elmozdulás a második tervvariáns esetében 0,191 mm-el nagyobb. Mivel elsődleges cél a tömegcsökkentés, és a többi tulajdonságban számottevő különbség nem mutatkozik, ezért a választás a második tervvariánsra esik (**37. ábra**).

37. ábra: Választott tervvariáns
(Forrás: saját)

Ahhoz, hogy a generatív tervezett alkatrészen változtatásokat tudjak eszközölni, illetve pontosabb feszültséganalízist kapjak, 3D modellt kell készíteni az iteráció kimeneteléből (exportálás). Ekkor a program egy parametrikus modellt fog létrehozni. A folyamat menetét a **38. ábra** mutatja.



38. ábra: Parametrikus modell létrehozása
(Forrás: saját)

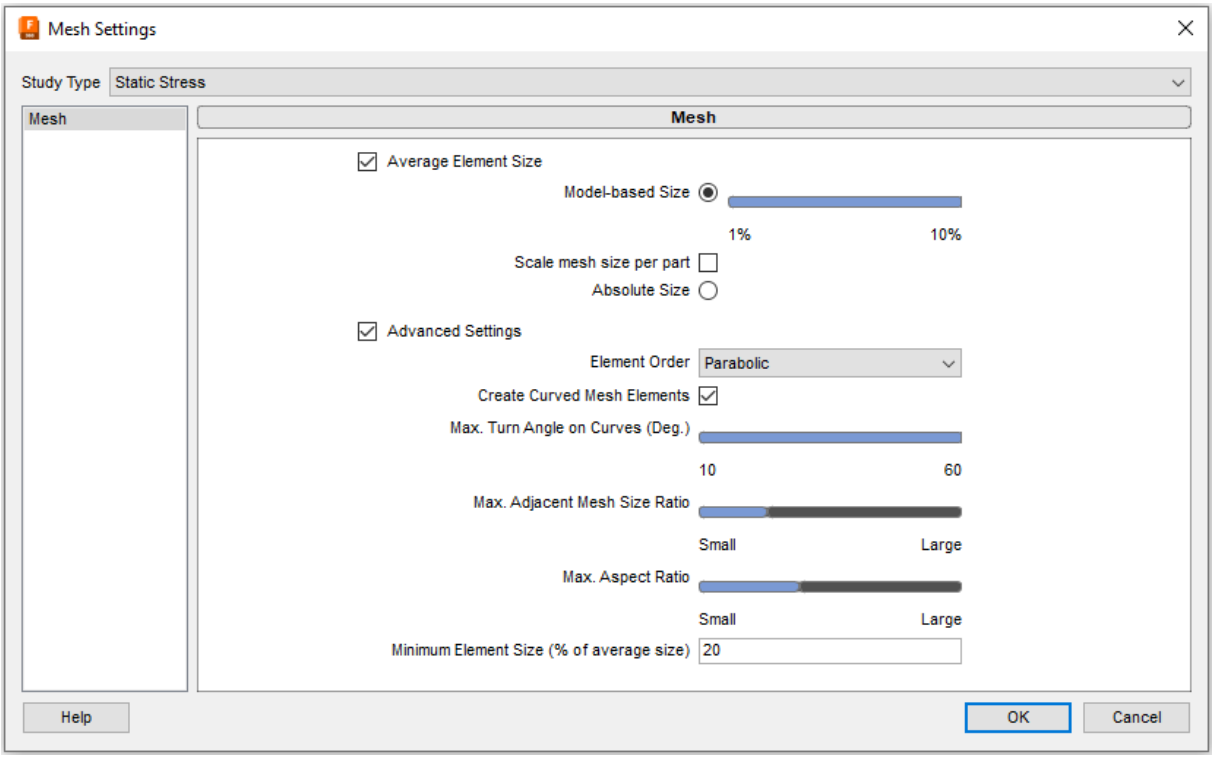
3.5. A végeselem szimuláció eredményei

A generatív terv exportálása után pontosabb szimulációs eredményeket kaptam az ébredő feszültségekről, illetve a biztonsági tényezők értékéről. Ez utóbbi azért fontos, mert az alkatrész azon része, ahol a biztonsági tényező értéke a korábbiakban meghatározott érték alatt van, ott valószínűleg idővel kifáradási meghibásodások fognak fellépni..

3.5.1. Hálózás beállítása

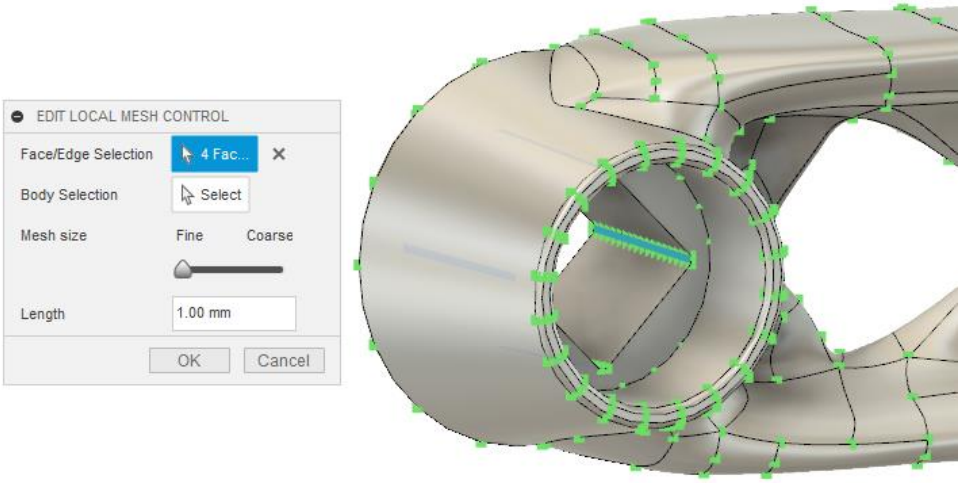
A hálózás beállításait a következőkben foglalom össze:

- Az átlagos elemméret (average element size) a modell méretei alapján került meghatározásra (model-based size). A százalék beállítása itt a háló finomságát jelzi. Mivel előreláthalólag megmondható, hogy hol várhatóak feszültség csúcsok, így a számítási kapacitás érdekében ezt 10%-ra állítottam, és csak a szükséges helyeken finomítottam a hálót.
- A hálózás módját (element order) parabolikusra állítottam, mivel az alkatrész nem egyenesek, hanem görbék által határolt, ezért így pontosabb eredményt kaptam. Hálózás alapbeállításait a **39. ábra** mutatja.



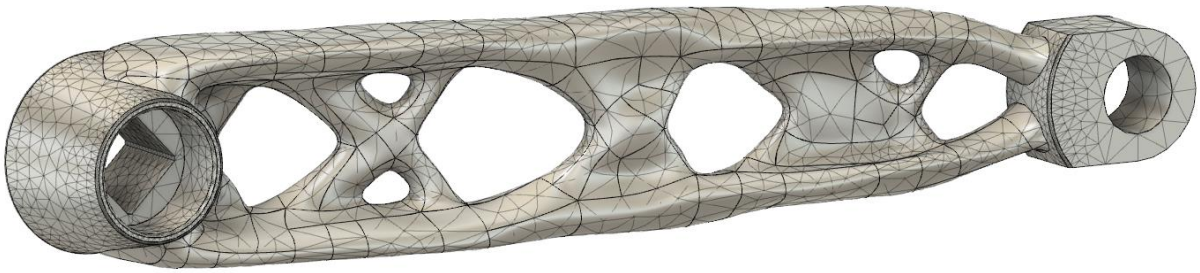
39. ábra: Hálózás alapbeállításai
(Forrás: saját)

- A hálóméretet a kritikus helyeken a local mesh control paranccsal állítottam be. Mivel a lapolásnál ébred a legnagyobb nyomaték, illetve a sarkok feszültséggyűjtő helyek, ezért itt biztosan szükség volt a hálóméret finomítására. Itt 1 mm-es eleméretet állítottam be. A beállítást a **40. ábra** mutatja.



40. ábra: Hálóméret finomítása
(Forrás: saját)

A **41. ábra** behálózott modellt a mutataja. Látható hogy az adott terület bonyolultságától függően a program változó elemméretet állított be a jobb feszültség analízis eredmények érdekében.

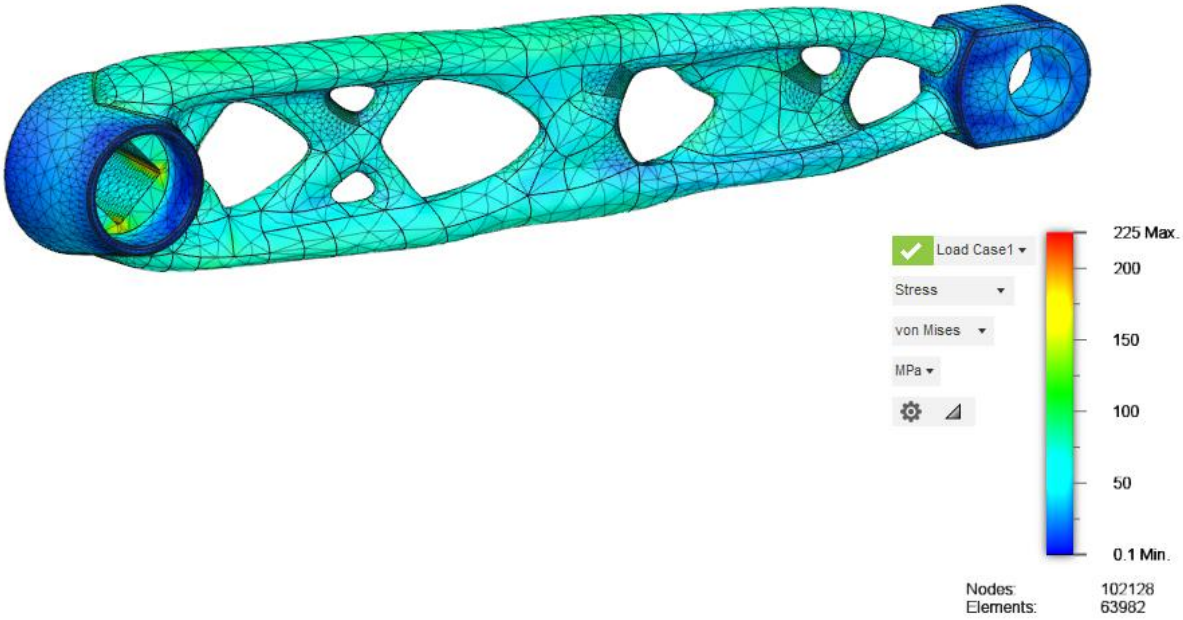


41. ábra: Behálózott modell
(Forrás: saját)

3.5.2. Első terhelési eset szimulációs eredményei

A végeselem szimulációban a hálóméret beállításán kívül nem volt szükséges mást megadnom, hiszen a terheléseket, kényszereket, anyagjellemzőket a program áthozta a generatív tervezési modulból.

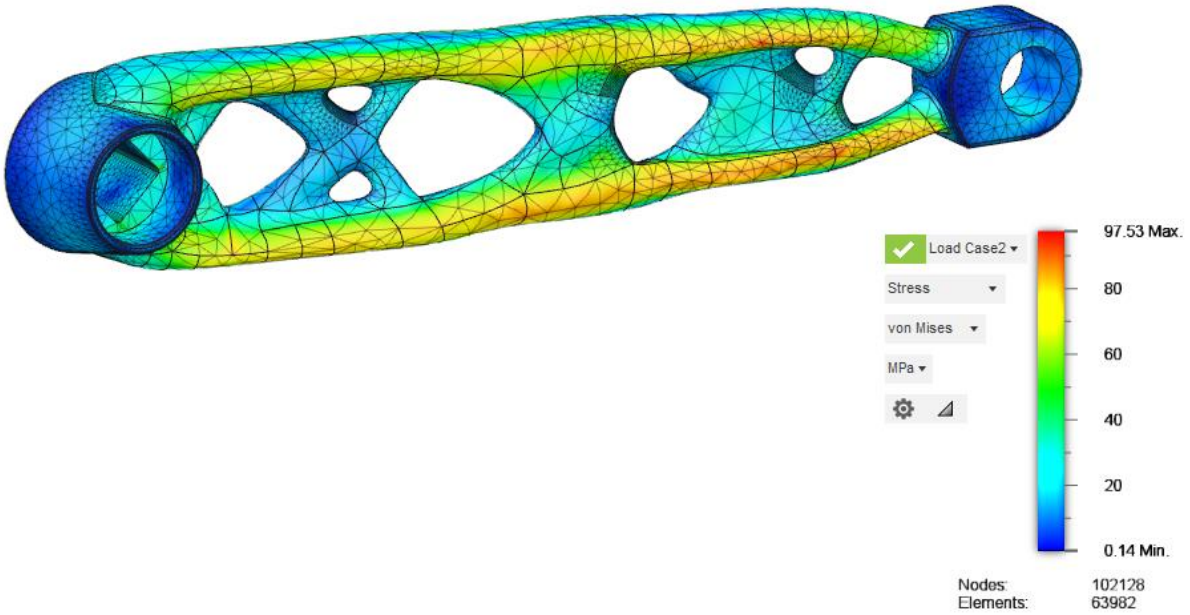
A hajtókart az első terhelési esetben éri a legnagyobb terhelés. Ezesetben fellépnek a folyáshatárhoz közeli (225 MPa) nagyságú feszültségek is. Látható, hogy ez a nagy feszülségérték a négyszögletes lapolás sarkainál ébred, amely a sarkok feszültséggyűjtő hatásával magyarázható. A hajtókar használata során ezeken a részeken kismértékű, lokális folyások következhetnek be, így a deformációnak köszönhetően a nagy feszültségértékek oldódnak, és végeredményben a szerkezet mechanikai tulajodonságait befolyásoló változás nem fog bekövetkezni. Az első terhelési esetet a **42. ábra** mutatja



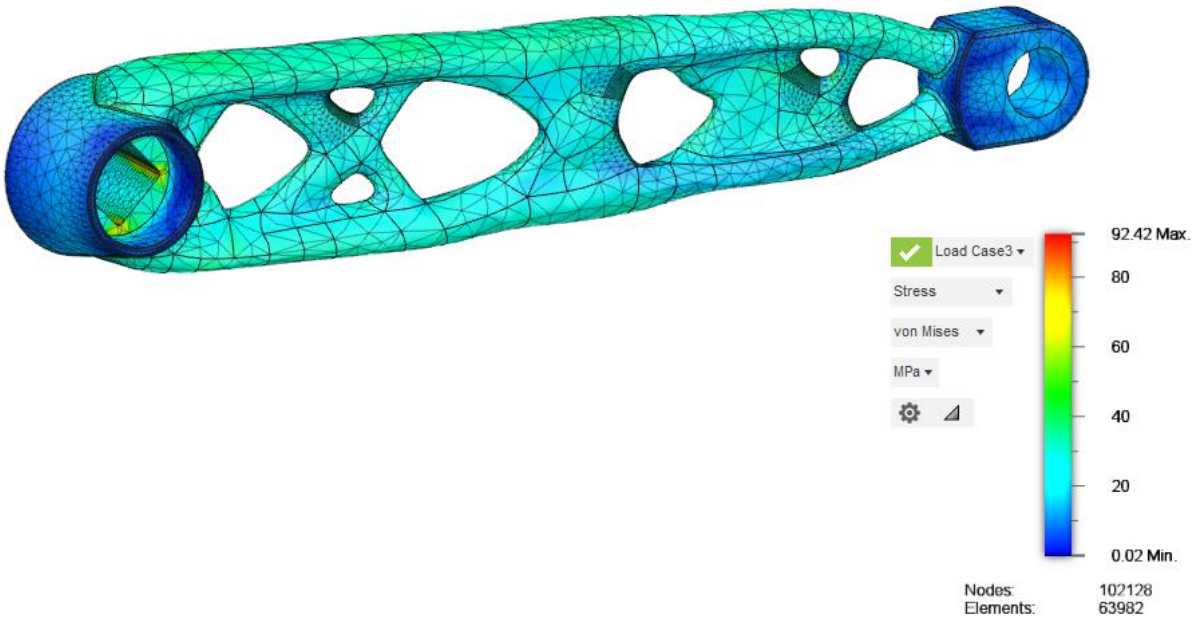
42. ábra: Első terhelési eset
(Forrás: saját)

3.5.3. Második, harmadik és negyedik terhelési eset

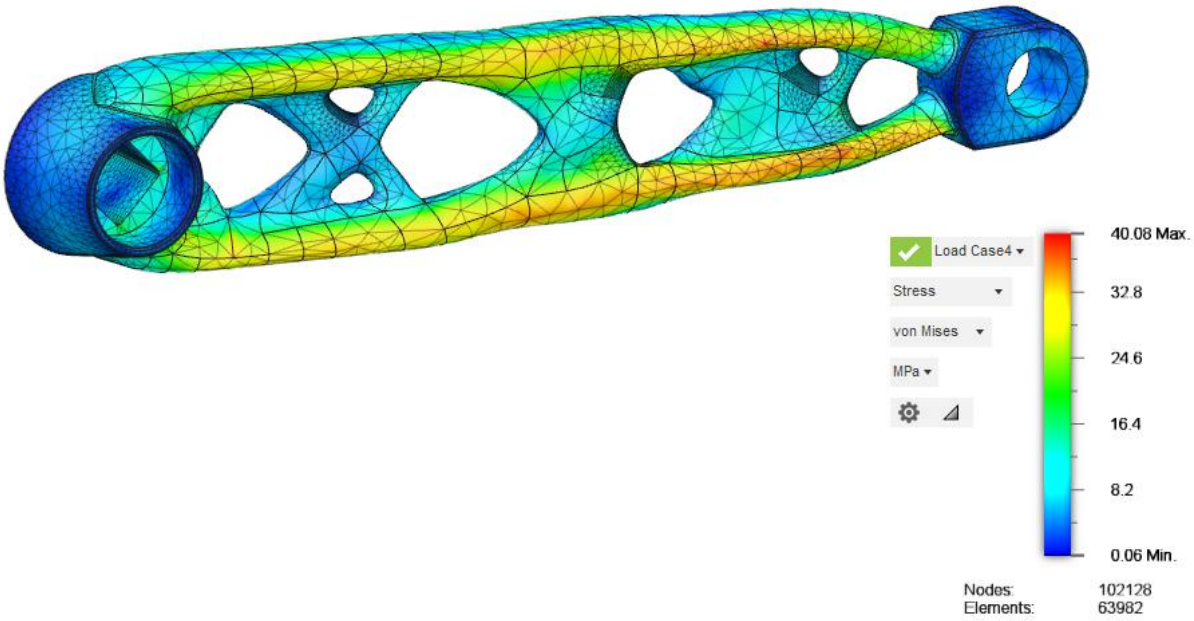
A többi terhelési esetben szimulciós eredményeit sorban a **43. ábra, 44. ábra és 45. ábra** mutatja.



43. ábra: Második terhelési eset
(Forrás: saját)



44. ábra: Harmadik terhelési eset
(Forrás: saját)



45. ábra: Negyedik terhelési eset
(Forrás: saját)

Az egyes terhelési esetekben (**26. ábra**) fellépő feszültségek minimum és maximum értékeit összefoglalva a **9. táblázat** tartalmazza. Látható, hogy a folyáshatárt (240 MPa) átlépő feszültség egyik terhelési esetben sem ébred.

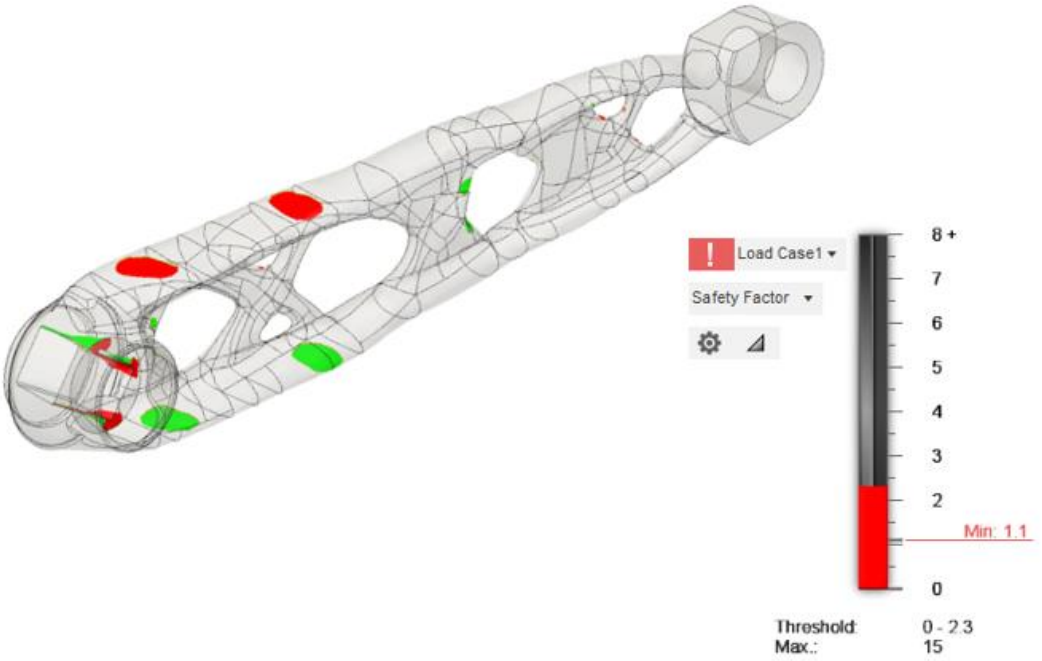
9. táblázat: Ébredő feszültségek min. és max. értékei
(Forrás: saját)

Terhelési eset	Max. ébredő feszültség (MPa)	Min. ébredő feszültség (MPa)
1.	225	0,1
2.	97,53	0,14
3.	92,42	0,02
4.	40,08	0,06

3.6. A hajtókar módosítása

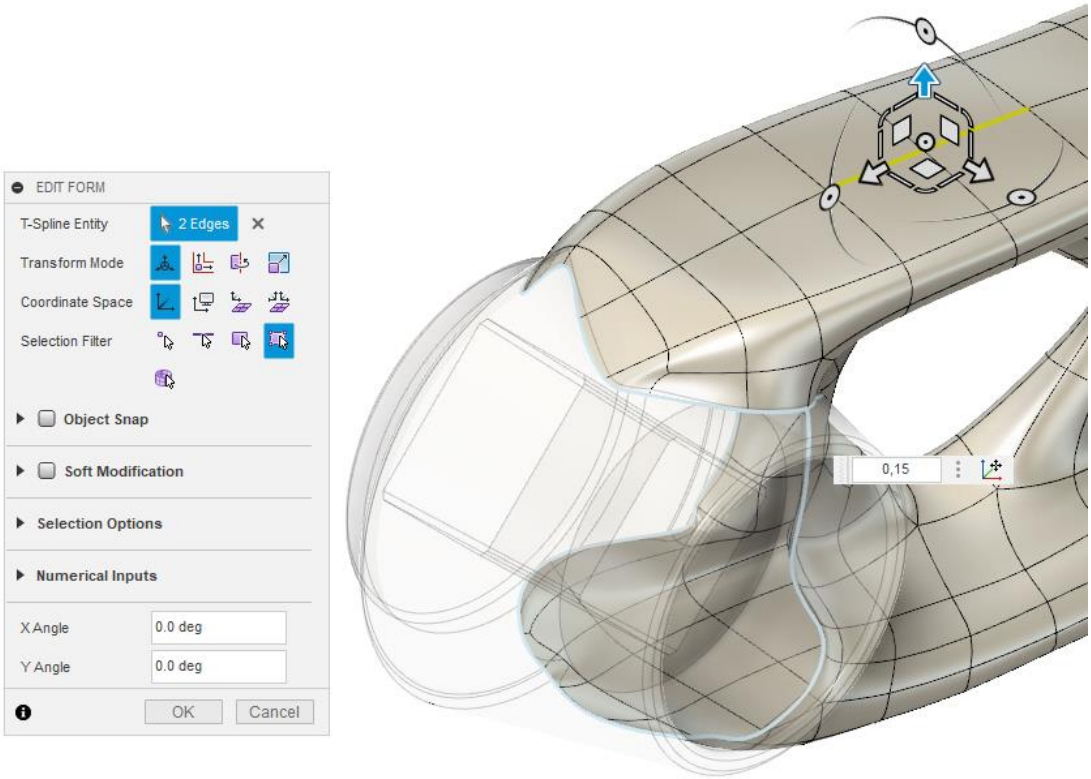
Ahhoz, hogy a hajtókar megfelelően elviselje a dinamikusan változó nagyságú, illetve irányú terhelésekből származó fárasztó igénybevételt, a korábban meghatározott biztonsági tényezőnek (2,3) érvényesnek kell lennie a hajtókar valamennyi pontjára (kivétel ezalól a négyszögletes lapolás sarkainál ébredő feszültség, amely a feszültséggyűjtő hatásnak köszönhetően a lokális megfolyás következtében oldódni fog, illetve a kis kiterjedésű feszültségcsúcsok, amelyek szintén lokális folyásnak köszönhetően oldódni fognak).

A korábban mutatott szimuláció eredményekből látható, hogy ilyen eset az **első terhelési esetben** fordul elő. A 46. ábra a hajtókar azon pontjait mutatja, ahol a biztonsági tényező értéke 2,3 alatti.



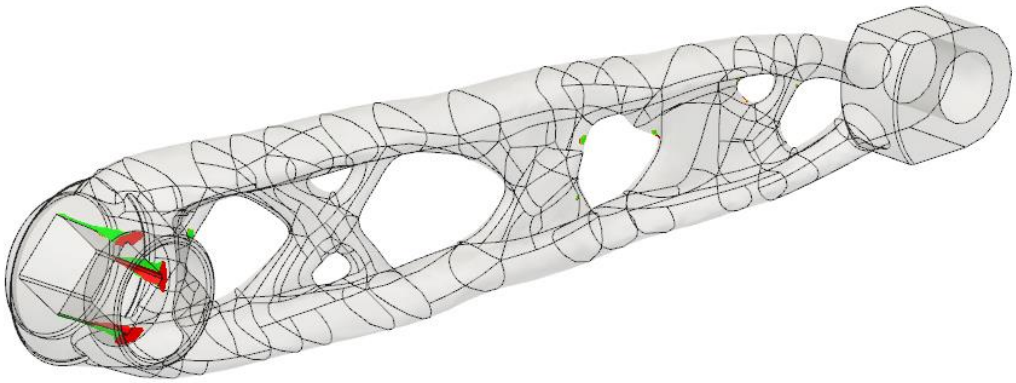
46. ábra: Biztonsági tényező értékek
(Forrás: saját)

A lapolás sarkaiban ébredő feszültséget leszámítva a többi pontban a biztonsági tényező értéke **2,1 azaz csak 0,2-del** van a kritikus érték alatt. Megoldásként a kritikus helyeken a keresztmetszet növelését választottam. Az alábbi ábrán látható, hogy a kijelölt él mentén 1,5 mm-el vastagítottam az anyagot. Azért változtattam ebben az irányban a geometriát, mert így nem csak keresztmetszet növekedést értem el, hanem a hajtókar éltartása is nagyobb lett. A munkafolyamatot a **47. ábra** mutaja



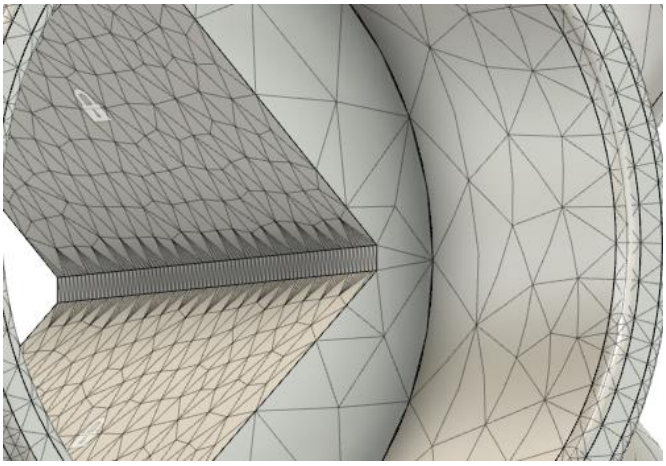
47. ábra: Keresztmetszet növelés folyamata
(Forrás: saját)

A többi kritikus helyen is hasonlóan igyekeztem orvosolni a problémát. Így a kritikikus helyek száma, illetve kiterjedésük csökkent. A változtatások utáni eredményt a **48. ábra** szemlélteti. Látható, hogy számottevő feszültségcsúcsok már csak a lapolás sarkaiban ébrednek.



48. ábra: Biztonsági tényező értékek a módosított hajtókaron
(Forrás: saját)

Hogy a maximálisan ébredő feszültségekre pontosabb eredményt kapjak, úgy a kritikus helyeken a sűrítettem a hálóméretet. Ha az eredmény változik az azt jelenti, hogy a hálóméret függvényében a feszültség egy adott értékhez konvergál. Ez jelentheti, hogy az adott helyen nem kaptam meg a valós, pontos eredményt, és a hálóméret sűrítésével változni fog a feszültségérték, azonban felléphet szingularitási probléma is. A **49. ábra** a lapolás sarkainál finomított hálóméretet mutatja.



49. ábra: Sűrített hálóméret
(Forrás: saját)

A konvergencia vizsgálat eredményeit a **10. táblázat** mutatja.

10. táblázat: Konvergencia vizsgálat eredményei
(Forrás: saját)

Eleméret (mm)	Maximális feszültség (MPa)
1	255,9
0,5	225
0,25	225

Látható, hogy az elemméret csökkentésével először a 225 MPa-hoz képest kiugró eredményt kaptam, azonban további csökkentéssel megállapítható, hogy az ébredő maximális feszültség **225 MPa** így nem lép fel szingularitás.

4. Hajtókar 3D fémnyomtatásának megtervezése

A hajtókar fémnyomtatását az Autodesk Fusion 360 szoftverében terveztem meg. Következőkben a tervezés illetve a beállítások lépései láthatóak.

4.1. A kiválasztott fémnyomtató paraméterei

A válaszott szerszámgép a Fusion 360 adatbázisában is megtalálható **EOS M 290** típusú 3D fémnyomtató. A technikai paramétereket a **11. táblázat** mutatja. A nyomtatót a **50. ábra** mutaja.

11. táblázat: EOS M 290 3D fémnyomtató tulajdonságai
(Forrás: EOS nyomán)

Tulajdonság	Jellemző
Munkaterület	250 x 250 x 325 mm (magasság az alaplappal együtt)
Lézer típus	Yb fiber lézer, 400 W
Precíziós optika	F-theta lencse, nagy sebességű szkenner
Szkennelési sebesség	max 7,0 m/s
Lézer átmérő	100 µm
Energiaellátás	32A / 400 V
Energiafogyasztás	max. 8,5 kW / átl. 2,4 kW / fűtött asztallal 3,2 kW
Sűrített levegő igény	7000 hPa, 20 m^3/h

50. ábra: EOS M 290 3D fémnyomtató
(Forrás: EOS)

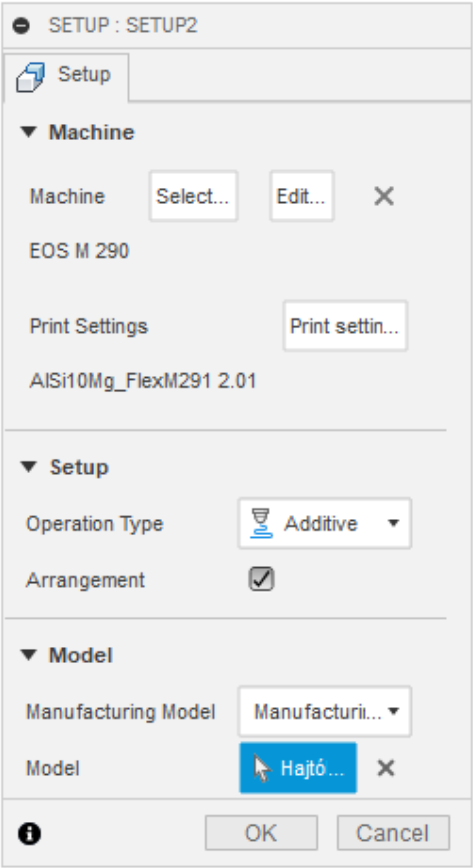
A nyomtató munkaterülete alkalmas az általam tervezett alkatrész kinyomtatására. Az alkalmazható anyagok között szerepel az általam definiált anyag (**ALSI10Mg**) amelyet 30 µm illetve 60 µm rétegvastagsággal képes nyomtatni, így a nyomtató a feladatra megfelel.

4.2. Nyomtatási beállítások

A nyomtatási beállításokat a következőkben foglalom össze.

4.2.1. Nyomtató és alapértelmezett beállítások kiválasztása

A nyomtatási paraméterek beállításakor a Fusion 360-ba be kell importálni a szerszámgépet, illetve alapértelmezett beállításokat is be lehet importálni, a felhasznált anyag és a nyomtatási rétegvastagság függvényében. Esetemben az alapanyag **ALSI10Mg** a nyomtatási rétegvastagság pedig **30 µm**. A nyomtató, és az alapértelmezett beállítások kiválasztását a mutatja.



51. ábra: Nyomtató és alapértelmezett beállítások kiválasztása
(Forrás: saját)

Az általam felhasznált nyomtatási beállítás a *AlSi10Mg_FlexM291 2.01*. A nyomtatási beállítás tulajdonságait, valamint egyéb fontos információkat a gyártói specifikáció közöl. A **12. táblázat** a kiválasztott nyomtatási beállítás tulajdonságait mutatja.

12. táblázat: Nyomtatási tulajdonságok
(Forrás: EOS nyomán)

Rendszer	EOS M 290
EOS nyomtatási beállítás	AlSi10Mg_FlexM291 2.01
Szükséges szoftver	EOSPRINT 1.6 vagy újabb EOSYSTEM 2.4 vagy újabb
Por cikkszáma	9011 – 0024
Terítő penge	EOS HSS penge
Munkaasztal hőmérséklet	35 °C
Fúvóka	EOS szabványos fúvóka
Inert gáz	Argon
Szitaméret	90 µm

A munkaasztal hőmérsékletének növelése jobb építhetőséget biztosít, azonban 100 °C felett már számolni kell az alkatrész mechanikai tulajdonságainak romlásával.

A kinyomtatott alkatrészre, hőkezelés nélkül, mintavételezés alapján a következő tulajdonságok érvényesek. Látható, hogy mindenképpen érdemes a HIP hőkezelés alkalmazása.

13. táblázat: Nyomtatott alkatrész mechanikai jellemzői
(Forrás: EOS nyomán)

Irány	Egyezményes mérnöki folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [MPa]	Szakadási nyúlás [%]	Mintavétel száma
Függőleges	230	460	6,3	261
Vízszintes	270	450	10,2	108

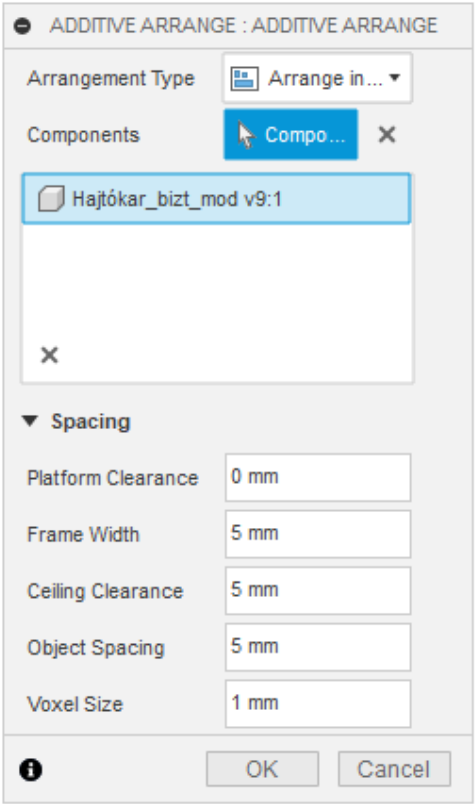
4.2.2. Az alkatrész tájolása

Az alkatrész tájolásakor a következőket szükséges beállítani:

- **Platform clearance (alkatrész és asztal távolsága)**: mivel 3D fémnyomtatás esetében az alkatrész eltávolítása nehezebb, mint a műanyag 3D nyomtatás esetében, így opcióként meg lehet adni, hogy ne közvetlenül az asztalra építsen, hanem a porban kezdje el az építési folyamatot. Ilyenkor is ajánlott azonban alkatrész fixen tartása, illetve a hőhatásból származó deformáció elkerülése végett az alkatrész hozzákapcsolni az asztalhoz támaszok segítségével. Esetemben mivel csak kis felületen érintkezik az alkatrész az asztallal, így ezt a távolságot 0 mm-nek vettem.

- **Frame width (keret szélesség)**: Azt határozza meg tulajdonképpen, hogy az alkatrész mekkora területet foglalhaz el maximum az asztalon, másképp fogalmazva az asztal szélétől mért minimális távolságot jelenti. Esetemben ezt alapbeállításon hagytam.
- **Ceiling clearance (munkatér teteje és az alkatrész távolsága)**: Mivel az alkatrészt az asztalhoz már rögzítettem, így ezt alapbeállításon hagytam.
- **Object spacing (alkatrészek elhelyezése)**: több alkatrész esetében lenne mérvadó, én egy alkatrész 3D nyomtatását vizsgáltam.
- **Voxel size (voxel méret)**: a voxel a térfogati pixelt jelenti, ezek szolgálnak a 3D nyomtatás számítsainak alapjául. Esetemben ezt 0,5 mm-nek vettem.

A tájolási beállításokat az **52. ábra** mutatja.



52. ábra: Tájolási beállítások
(Forrás: saját)

Az **53. ábra** mutatja a hajtókar helyzetét a munkatérben. Az oldalnézetből látható, hogy nem letalpalva került a hajtókar elhelyezésre, hanem az úgynevezett „Minimize Build Height" azaz építés magasság minimalizálása parancsot kiadva kissé ferdén lett beállítva. Ez azért előnyös, mert így az alkatrész olyan pozícióba kerül, hogy a nyomtatási rétegek nem szakadnak meg az alkatrész hossza mentén.

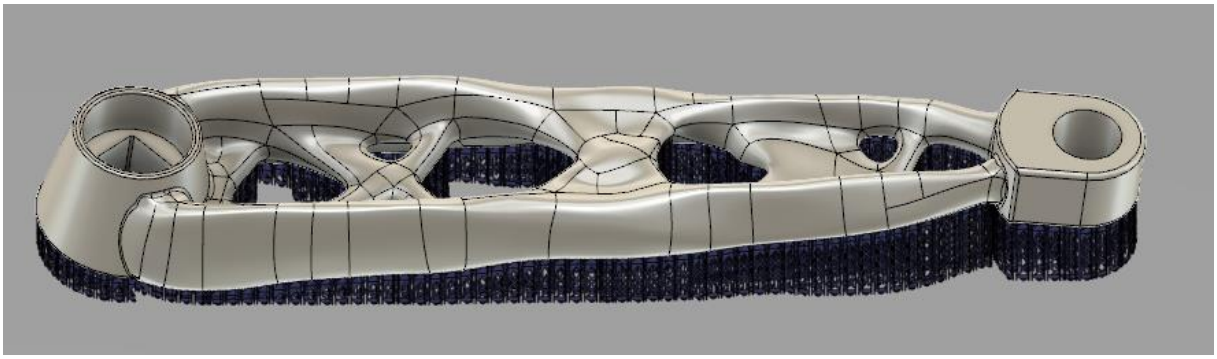
53. ábra: Hajtókar helyzete a nyomtatási térben
(Forrás: saját)

Ennek a tájolásnak még az is előnye, hogy kisebb alkatrész felület illeszkedik a munkaasztalhoz, ami az alkatrész eltávolításánál előnyt jelent, hátrányként azonban ezen a felületen is szükséges támaszokat tenni, amiknek eltávolítása alapvetően körülményes folyamat.

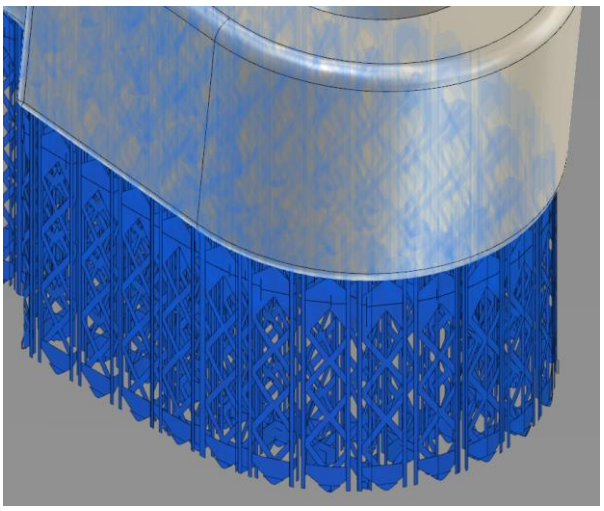
4.2.3. Támaszok elhelyezése

Ahhoz, hogy a hajtókar rétegei a nyomtatás során az esetleges külső behatások (terítőhenger), illetve hődeformáció hatására ne mozudljanak el, támasztás alkalmazása szükséges. Az alátámasztás elkészítéséhez a térfogati alátámasztást választottam. A támasztást az **54. ábra** és **55. ábra** mutatja. A támasztás beállításainál a következő szempontokat vettem figyelembe:

- A támasztás típusa: térfogati támasztás (volumetric support)
- A kritikus oldalferdeség 45°
- A támasztás mind a munkaasztalhoz, mind az alkatrészhez hozzá ér
- A támasztás gyémánt strukúrájú, és a legritkább sűrűségre van állítva
- Az asztalhoz és az alkatrészhez is kikönnyített törési pontokon keresztül csatlakozik



54. ábra: Támasztással ellátott alkatrész
(Forrás: saját)



55. ábra: A támasztás felépítése (gyémánt srtuktúra)
(Forrás: saját)

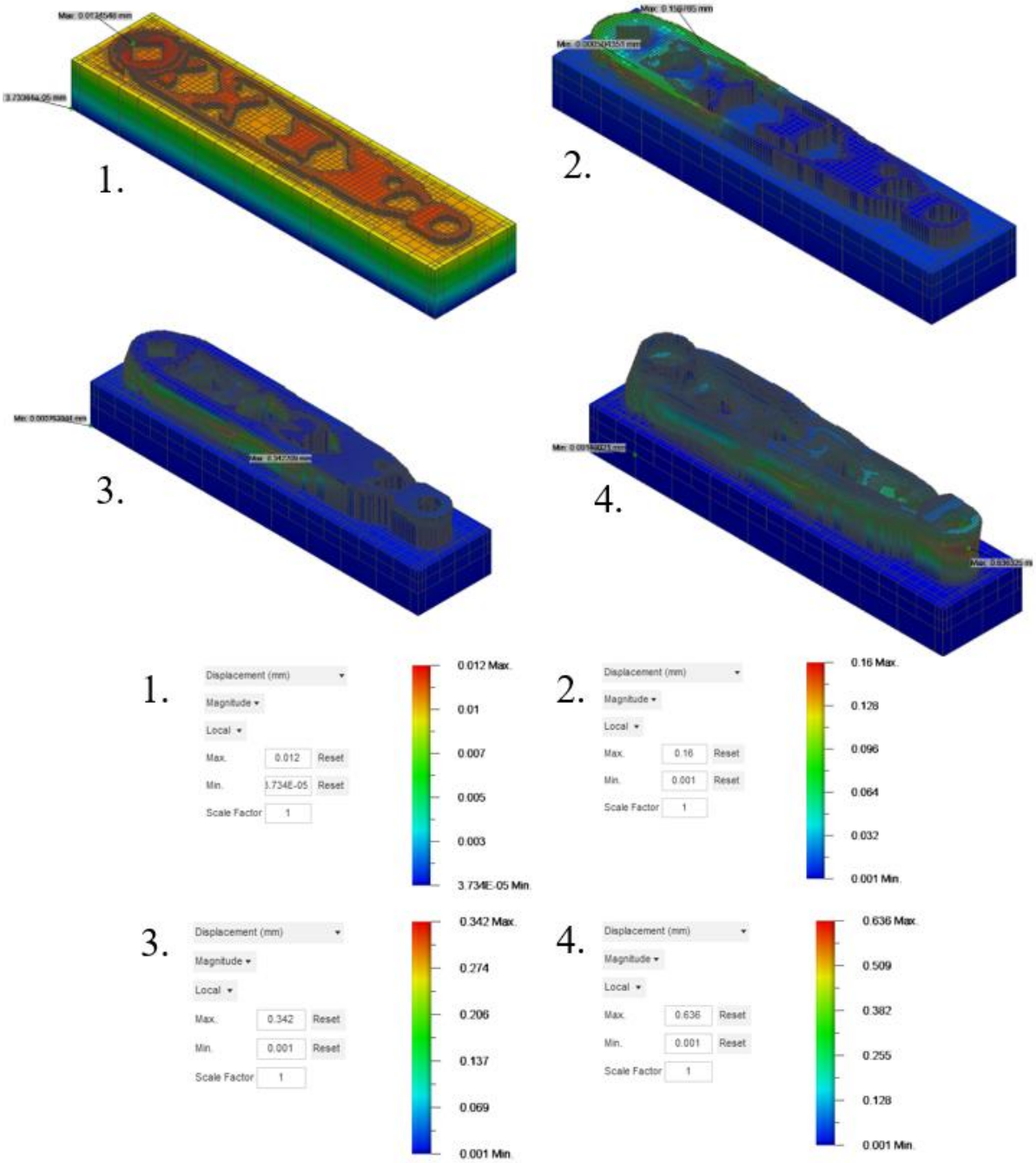
4.3. Folyamat szimuláció

A Fusion 360-ban lehetőség van az úgynevezett process simulation, azaz folyamat szimuláció lefuttatására. Ez a szimuláció beállított paraméterek alapján megmutatja, hogy a nyomtatási folyamat során, a hőhatásnak köszönhetően hol mekkora elmozdulásokkal kell számítani, vagy hogy a nyomtatás során milyen hőmérsékleti viszonyok alakulnak ki. Ez különösképpen hasznos, hiszen így képet kaphatunk arról, hogy a megválasztott támasztásunk mennyire megfelelő. A beállítások következőek:

- A felbontást a legnagyobbra állítottam, a számítógépes kapacitás korlátai miatt. Ez a felbontás lényegében a végeselem szimulációnál használt hálózással hasonlatos.
- Az asztal vastagsága az alapértelmezett 25 mm
- Az asztalat kontrolált fűtésű. Először az ajánlott 35 °C-on, majd összevetésképpen 80 °C-on végzem el a szimulációt.

4.3.1. Elmozdulások a nyomtatás során (35 °C)

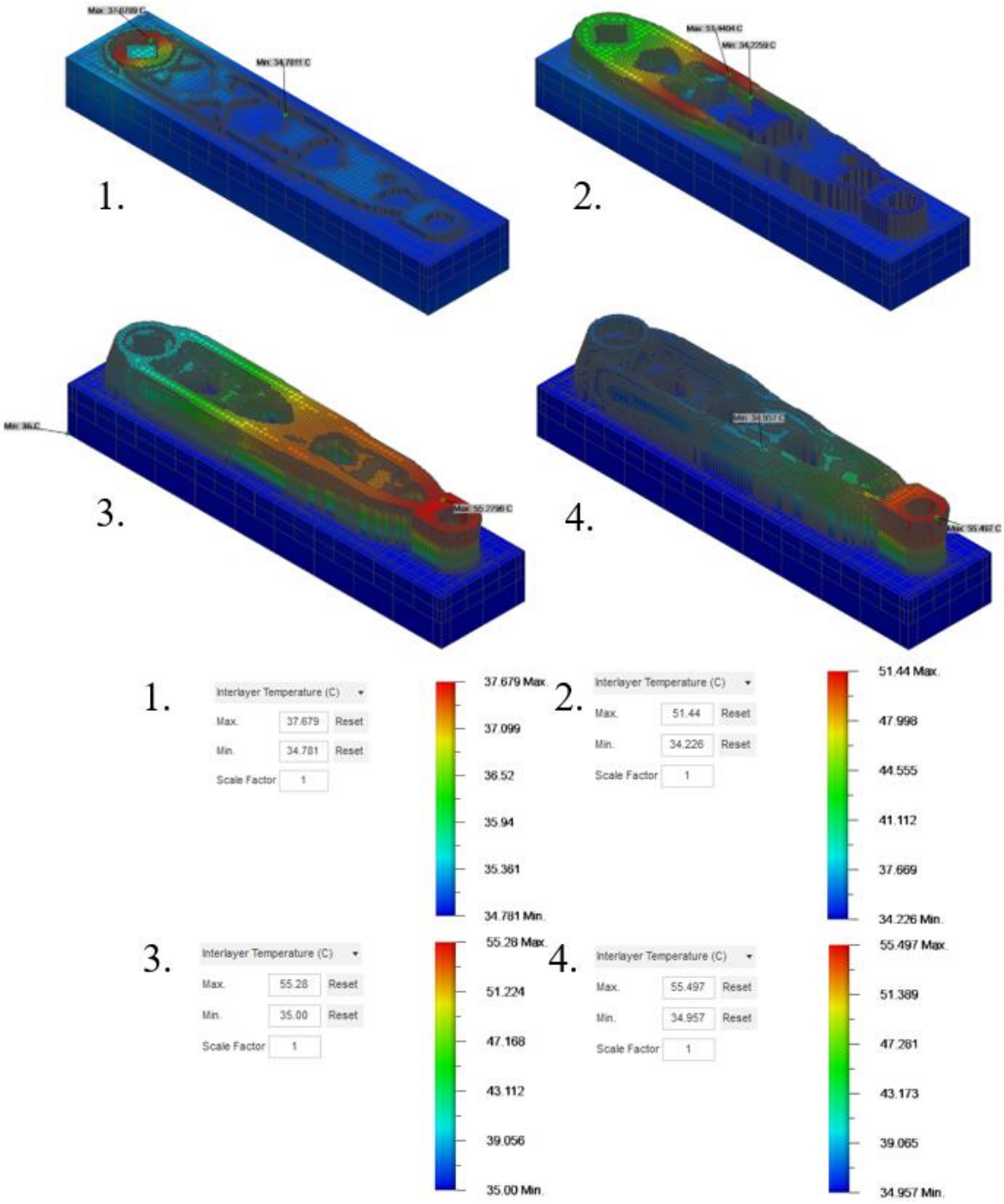
A szimulációs eredményeket az **56. ábra** mutatja.



56. ábra: Elmozdulások a nyomtatás során (35 °C)
(Forrás: saját)

4.3.2. Hőmérsékleti viszonyok a nyomtatás során (35 °C)

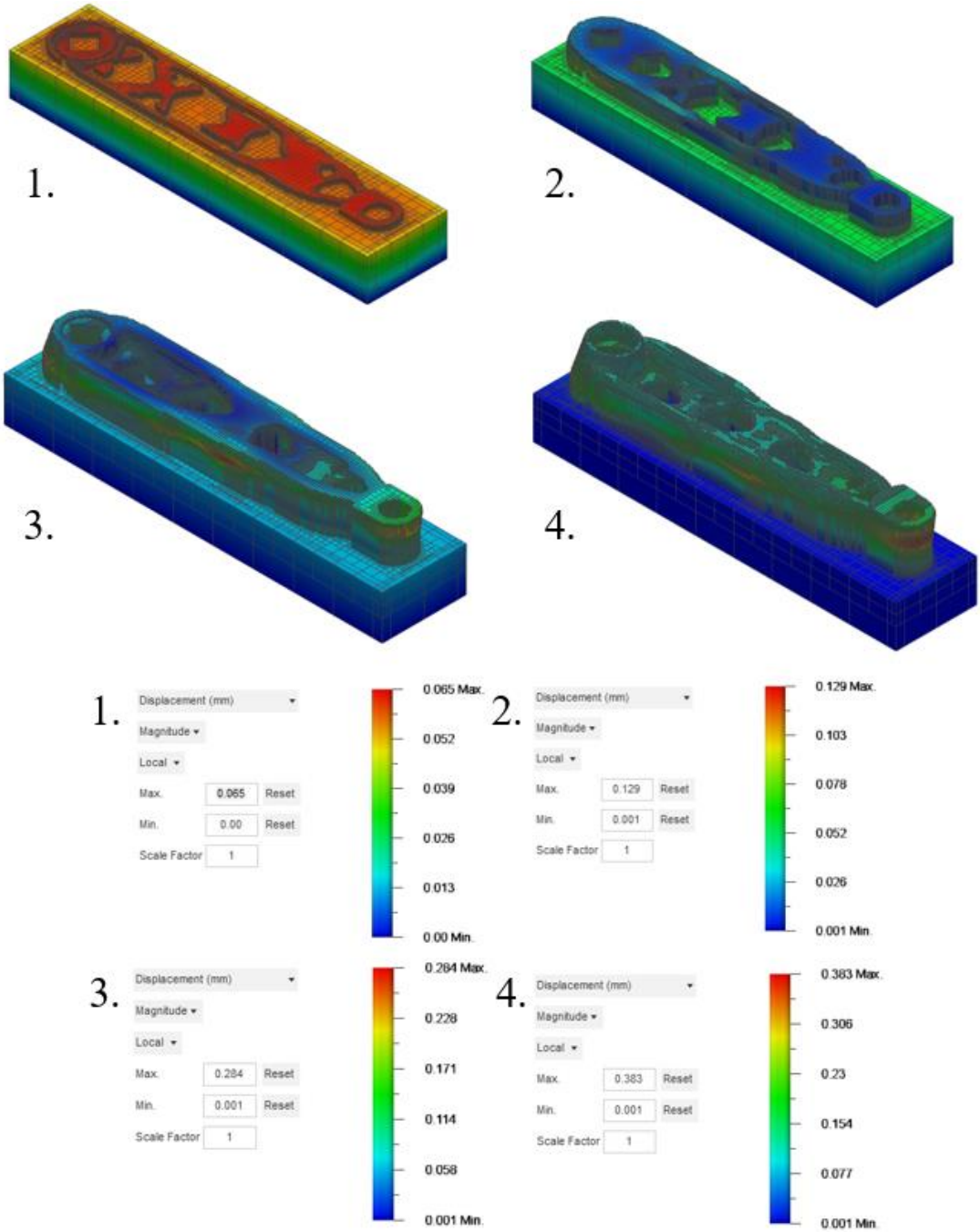
A szimulációs eredményeket az **57. ábra** mutatja



57. ábra: Rétegközi hőmérsékletek a nyomtatás során (35 °C)
(Forrás: saját)

4.3.3. Elmozdulások a nyomtatás során (80 °C)

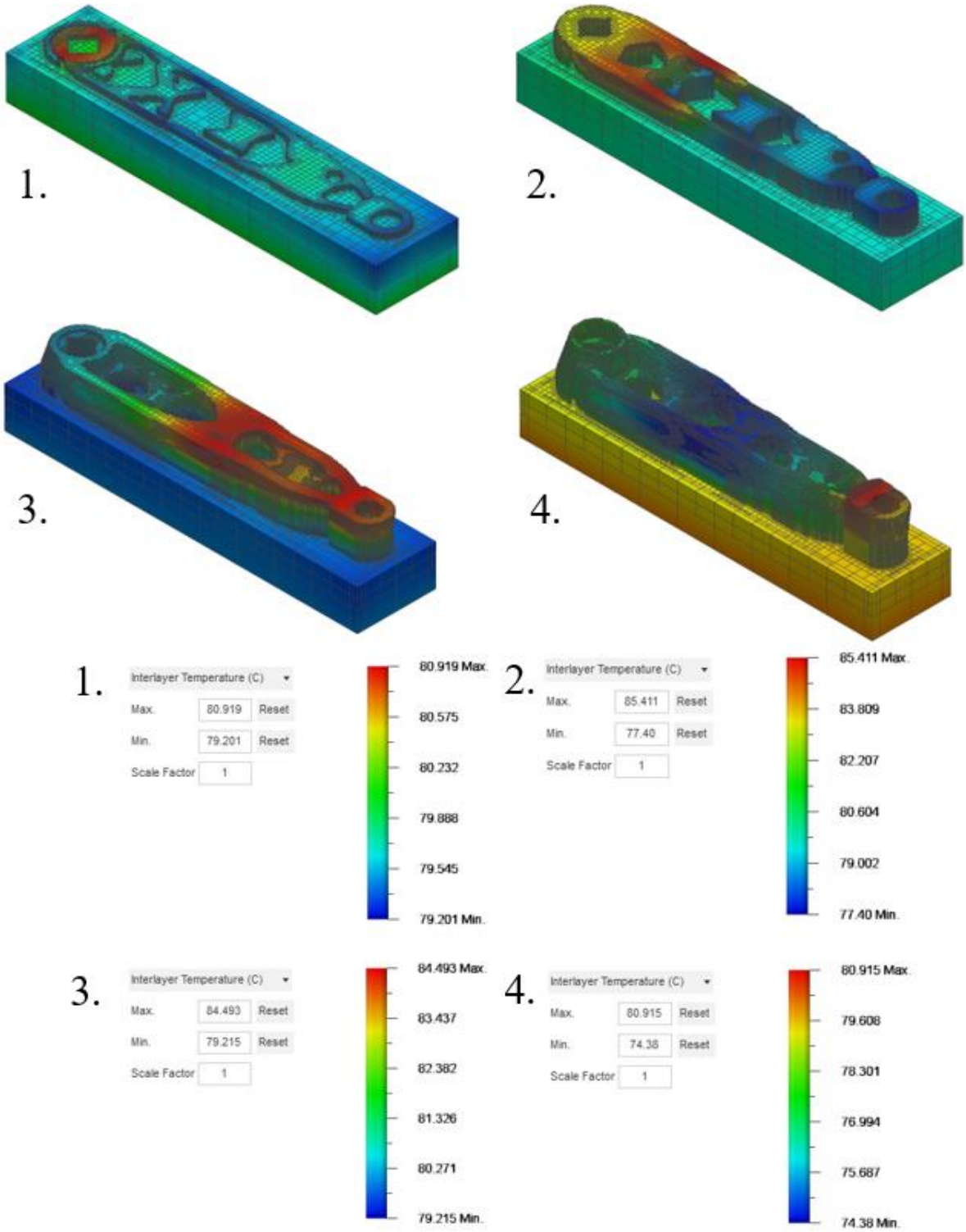
A szimuláció során láthatóvá vált, hogy a nyomtatás folyamán a hőhatásból eredendően elmozdulás kisebb mértékű, mint a 35 °C asztalhőmérséklet esetén. Ebből megállapítható, hogy a nagyobb nyomtatási hőmérséklet kisebb deformációt eredményez. A szimulációs eredményeket az **58. ábra** mutatja.



58. ábra: Elmozdulások a nyomtatás során (80 °C)
(Forrás: saját)

4.3.4. Hőmérsékleti viszonyok a nyomtatás során (80 °C)

A rétegközi hőmérsékleteket az alábbi ábra mutatja. Látható, hogy a nyomtatás folyamán nem lép fel kritikusan nagy hőmérséklet, az alkatrészben a lézer hőhatásából eredő hőmérsékletek ébrednek. A szimulációs eredményeket az **59. ábra** mutatja.



59. ábra: Rétegközi hőmérsékletek a nyomtatás során (80 °C)
(Forrás: saját)

Folyamat szimuláció eredmények, kiértékelés

A folyamat szimuláció alapján a nyomtatás viszonyait 4 esetben vázoltam fel, melynek eredményeit összefoglalva a **14. táblázat** mutatja.

14. táblázat: Folyamat szimuláció eredményei
(Forrás: saját)

Eset	35 °C asztalhőmérséklet		80 °C asztalhőmérséklet	
	Max. elmozdulás [mm]	Max rétegközi hőmérséklet [°C]	Max. elmozdulás [mm]	Max rétegközi hőmérséklet [°C]
1.	0,012	37,679	0,065	80,919
2.	0,16	51,44	0,129	85,411
3.	0,342	55,28	0,284	84,493
4.	0,636	55,497	0,383	80,915

A szimuláció eredményeiből megállapítható, hogy 80 °C asztalhőmérséklet beállítása mellett az alkatrész pontosabban legyártható, hiszen a hőhatásokból adódó deformáció kisebb mértékű lesz. Mivel 100 °C felett veszélyezteti az asztalhőmérséklet az alkatrész minőségét, ezért az az asztalhőmérsékletet 80°C-nak választom.

4.4. Szerszámpálya generálása

A 3D nyomtatásra való előkészítés utolsó lépése a szerszámpálya generálása. A program az előre beállított rétegvastagság alapján végzi el a pályagenerálást. Az alkatrészt tömör kivitelben készül, így tömege hozzávetőlegesen 130 g lesz. A szerszámpálya generálás által a következő információk adódtak:

- 979 rétegből fog felépülni az alkatrész
- A beállított tájolással 29,37 mm-t foglal el magasságban
- A támasztás anyagszükséglete 3,067 cm^3

4.5. 3D nyomtatott műanyag prototípus elkészítése

Az alkatrészből készítettem egy 3D nyomtatott műanyag prototípust méretellenőrzés céljából. Bár a nyomtatás tűrése miatt pontos értékösszevetésre nem alkalmas a prototípus, de egy nagyságrendi megfelelőséget meg lehet állapítani, így az egyértelmű hibák már kiküszöbölhetőek. A **60. ábra** az eredeti hajtókar és a nyomtatott hajtókart szemlélteti.

60. ábra: Eredeti hajtókar és a 3D nyomtatott prototípus
(Forrás: saját)

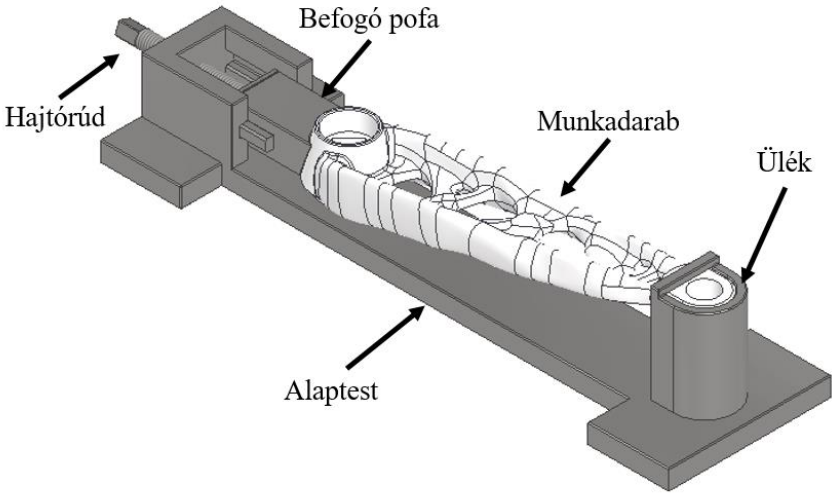
A **61. ábra** a kerékpárra felszerelt prototípust mutatja.

61. ábra: Kerékpárra felszerelt prototípus
(Forrás: saját)

Megállapítottam, hogy a hajtókar méretei helytállóak, megfelelő a négyszögletes csatlakozás, a hajtókar hossza, illetve a hajtókar a kívánt befoglaló méreteken belül van, így a 3D fémnyomtatásra való előkészítést készznek nyilvánítom.

5. Készülék tervezése

A hajtókar 3D fémnyomtatásta, illetve hőkezelése után szükséges még a pedálmenet, illetve a lehúzó menet elkészítése. Ezek a munkafolyamatok marógépen elvégezhetők azonban munkadarab megmunkálás közbeni megfogásárára szükséges egyedi befogó készüléket tervezni. Az általam tervezett befogó készüléket a **62. ábra** mutatja. A munkadarab behelyezésekor a befogó pofát teljesen hátra kell hajtani, hogy a munkadarab pedálmenet felőli végét be tudjuk helyezni az ülékbe. Ezután a befogó pofával rögzítjük a munkadarabot.

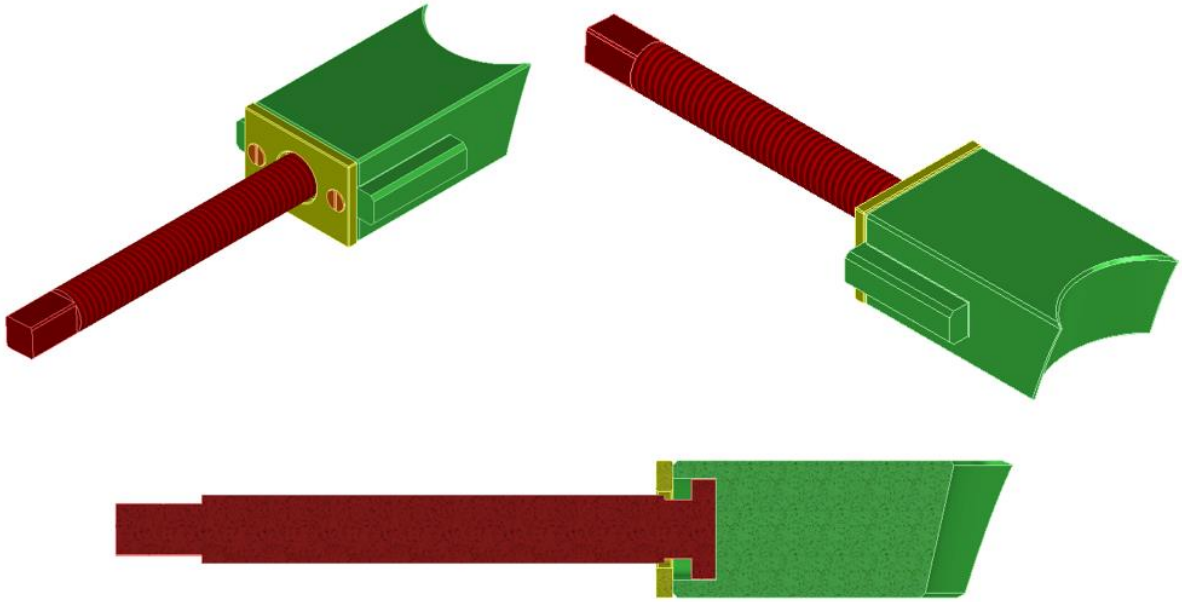


62. ábra: Befogó készülék
(Forrás: saját)

Megmunkálás közben főképp függőleges irányú erők érik a munkadarabot. A pedálmenet felőli részen az ülék felett elhelyezkedő híd akadályozza meg a függőleges irányú elmozdulást, a lehúzó menet felőli végén pedig a befogó pofa. A befogó pofa és a munkadarab kúpos kialakításának köszönhetően (**63. ábra**) nem tud az alkatrész függőleges irányban elmozdulni.

63. ábra: Befogó pofa
(Forrás: saját)

A befogó pofa kialakítását a **64. ábra** mutatja. A pofa érintkező részét úgy terveztem meg, hogy az az alkatrész kúpos felületéhez illeszkedjen. A hajtórúd kézzel mozgatható, 6-os villáskulccsal meghúzható.

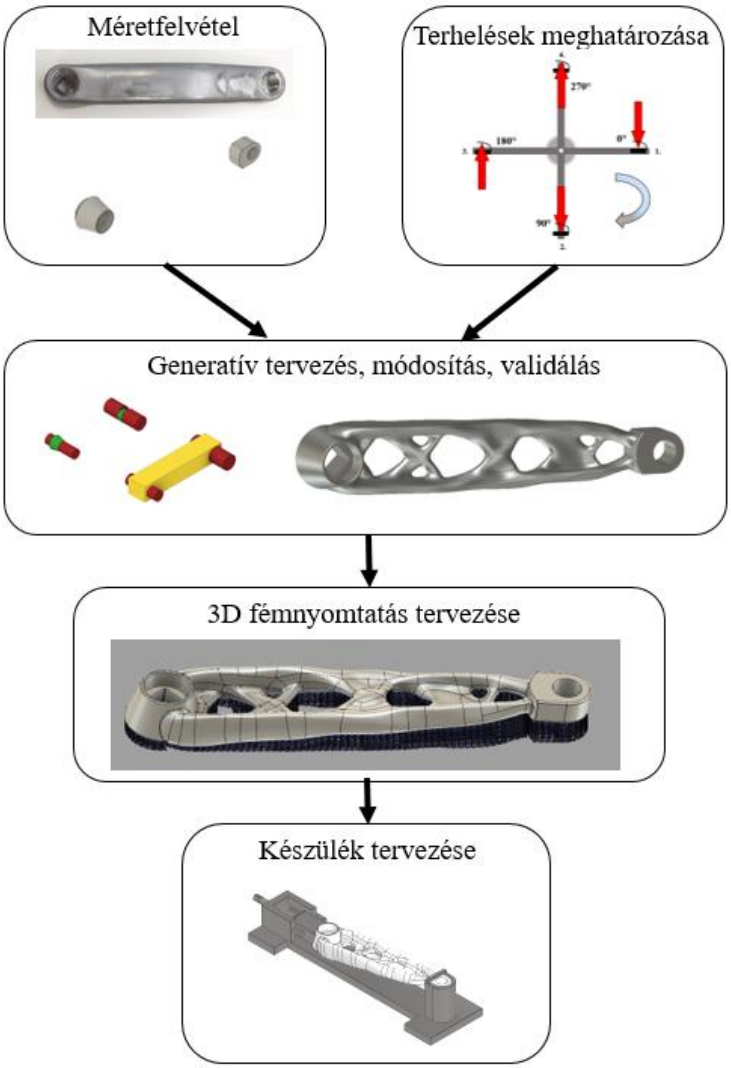


64. ábra: Befogó pofa kialakítása
(Forrás: saját)

A készülék alaplapján található fülek arra szolgálnak, hogy a készüléket a szerszámgép munkaasztalához tudjuk rögzíteni. A készülék anyaga S235 szerkezeti acél. Az **1. számú melléklet** tartalmazza a készülék összeállítási rajzát.

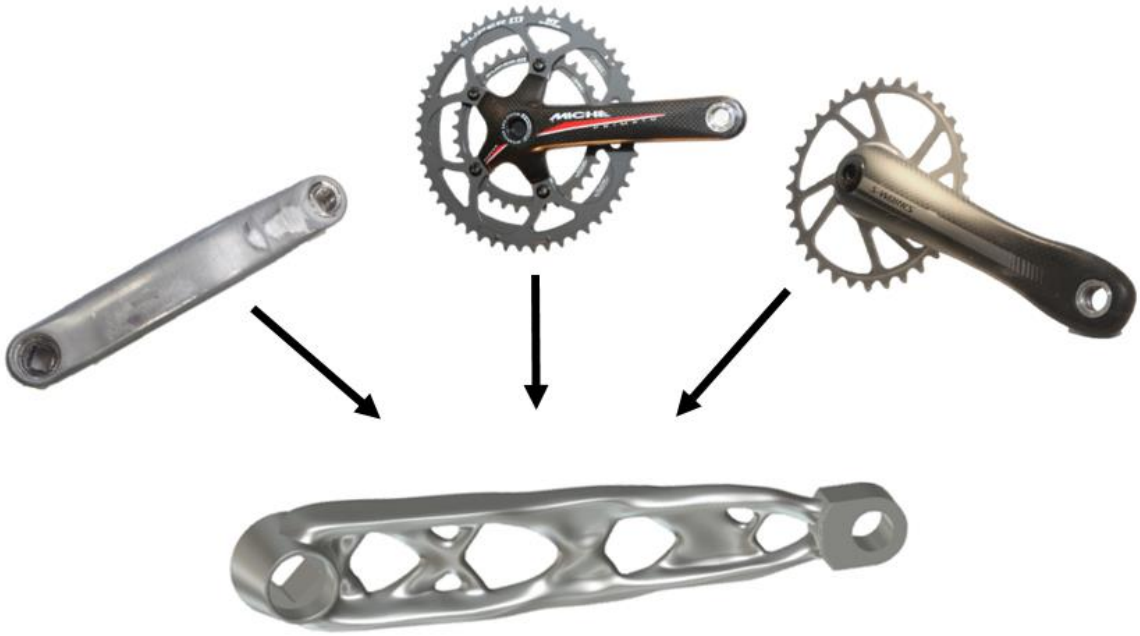
6. Folyamatösszefoglalás

Diplomamunkám zárásaként a tervezési folyamat főbb momentumait mutatom be. A kiindulási alapként választott hajtókar alapján felvettem a tervezéshez szükséges méreteket, illetve meghatároztam, hogy a hajtókart milyen és mekkora terhelések fogják érni. Ezután generatív tervezés segítségével elkészítettem a modellt, amin apróbb változtatásokat eszközöltem. Mivel a hajtókar geometriájából adódóan 3D fémnyomtatással készíthető el, ezért megterveztem a 3D fémnyomtatás technológiáját is. Zárásképpen egy készüléket terveztem, ami a utólagos megmunkáláshoz biztosítja a munkadarab megfogását. A folyamatot a **65. ábra** szemlélteti.



65. ábra: Tervezési folyamat
(Forrás: saját)

Az eredeti hajtókar tömege 200 g, az általam tervezett hajtókar tömege pedig 130 g. Ez 35%-os tömegcsökkenést jelent, ami már releváns, így a generatív tervezés és a 3D fémnyomtatás alternatívát mutathat a kerékpáros versenysport tömegcsökkentési igényeinek (**66. ábra**).



66. ábra: Generatív tervezett hajtókar, mint alternatíva
(Forrás: saját és Bikepro)

7. Összefoglalás

Szakdolgozatom célja egy olyan kerékpár hajtókar tervezése volt, ami a hagyományos alumínium hajtókar tömegénél relevánsan kisebb, de ugyanúgy megfelelő mechanikai és funkcionális tulajdonságokkal rendelkezik. A tömegcsökkentést nem anyagváltoztatással, hanem a kialakítás változtatásával kívántam elérni.

Kiindulási alapként egy meglévő, hagyományosnak mondható alumínium hajtókart választottam, amelynek főbb méreteit vettem alapul. A tervezést az Autodesk Fusion 360 programban végeztem el. A generatív tervezést alkalmazva olyan tömegcsökkentet alkatrészt kaptam, ami megfelel a szilárdsági és funkcionális követelményeknek, viszont olyan bonyolult geometriával rendelkezik, amelyet hagyományos technológiákkal nem, vagy csak körülményesen lehet legyártani, azért az alkatrész legyártásához a 3D fémnyomtatást választottam. A generatív tervezés által kapott modell finomítása után elvégeztem a 3D fémnyomtatás megtervezését is, illetve méretellenőrzés képpen egy 3D nyomtatott műanyag prototípust is legyártottam. Utolsó lépésként a menetek elkészítéséhez szükséges befogó készüléket terveztem meg.

A tervezett hatjókar tömege 70 g-al könnyebb a kiindulási alapként választott hajtókar tömegénél, ami 35 %- os tömegcsökkenést eredményez, miközben a mechanikai és funkcionális tulajdonságok megfelelőek maradnak. Ez a tömegcsökkenés relevánsnak mondható, így alternatívát mutat a kerékpáros sportágnak a tömegcsökkentés egyik módjára a generatív tervezés és 3D nyomtatás által.

8. Summary

The purpose of my thesis was to design a bicycle crank arm, which is lighter than an aluminum crank arm made by traditional manufacturing method, but it has same mechanical and functional properties. I decided to vary the geometry instead of change material.

As a starting point I chose a normal crank arm, and it's main dimensions were used as a base for my design. I designed with Autodesk Fusion 360. Applying generative design I've got a part with lower mass than the basic part, but with same mechanical and functional properties, however it would be difficult or maybe impossible to manufacture by traditional methods, therefore I decided to use 3D metal printing. After refining the part I had the 3D metal printing planned and to compare dimensions I printed a plastic prototype as well and finally I designed a device for making threads.

My designed part is 70 g lighter, than the basic part, which means 35% reduction in mass, while the mechanical and funtional properties remain the same. This change in mass is relevant, so it could be a great alternative for the bicycle sport to mass recution using generative design and 3D printing.

9. Irodalomjegyzék

[1] T. Duda – L.V. Raghavan (2016) 3D Metal Printing Technology, [Digitális kiadás.] Amszterdam: Elsevier Ltd. In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496 (Letöltés időpontja: 2023.09.03.)

[2] A. R. R. Bineli – A. P. G. Peres – A. L. Jardini – R. M. Filho (2011) DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): TECHNOLOGY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF MICROREACTORS [Digitális kiadás.] [K. n.] In: alvarestech.com http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0502.pdf (Letöltés időpontja: 2023.09.04.)

[3] A. Popovich – V. Sufiiarov (2016) Metal Powder Manufacturing, [Digitális kiadás.] Horvátország: Intech In: books.google.hu https://books.google.hu/books?hl=hu&lr=&id=fm-QDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA215&dq=metal+powder+additive+manufacturing&ots=xyoOCpBo10&sig=07S7MqMPvTgx_GYgrxsrxpGke4k&redir_esc=y#v=onepage&q=metal%20powder%20additive%20manufacturing&f=false (Letöltés időpontja: 2023.09.04.)

[4] Trapp H. (2021) A 3D-fémnyomtatás láthatatlan szereplői, [Digitális kiadás.] In: gyartastrend.hu https://gyartastrend.hu/cikk/a-3d-femnyomtatas-lathatatlan-szereploi (Letöltés időpontja: 2023.09.05.)

[5] Zsidai L. (2023) 3D fémnyomtatási technológiák (Letöltés időpontja: 2023.10.01.)

[6] S. Atatreh – M. S. Alyammahi – H. Vasilyan – T. Alkindi – R. A. Susantyoko (2013) Evaluation of the infill design on the tensile properties of metal parts produced by fused filament fabrication, [Digitális kiadás.] [K. n.] In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023000816 (Letöltés időpontja: 2023.10.10.)

[7] S. M. Basha – M. Bhuyan - M. M. Basha – N. Venkaiah – M. R. Sankar (2020) Laser polishing of 3D printed metallic components: A review on surface integrity [Digitális kiadás.] [K. n.] In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320311986 (Letöltés időpontja: 2023.10.01.)

[8] P. Tyagi – T. Goulet – C. Riso – F. Garcia-Moreno (2019) Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components [Digitális kiadás.] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology In: springer.com https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2890-0 (Letöltés időpontja: 2023.09.21.)

[9] S. Wang – J. Ning – L. Zhu – Z. Yang – W. Yan – Y. Dun – P. Xue – P. Xu – S. Bose – A. Bandyopadhyay (2022) Role of porosity defects in metal 3D printing: Formation mechanisms, impacts on properties and mitigation strategies [Digitális kiadás.] [K. n.] In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369702122002231 (Letöltés időpontja: 2023.09.21.)

[10] M. Bayat – A. Thanki – S. Mohanty – A. Witvrouw – S. Yang – J. Thorborg – N. S. Tiedje – J. H. Hattel (2019) Keyhole-induced porosities in Laser-based Powder Bed Fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: High-fidelity modelling and experimental validation [Digitális kiadás.] [K. n.] In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419303914 (Letöltés időpontja: 2023.09.22.)

[11] Hiperbaric [N.a] What is HIP technology [Digitális kiadás.] [K. n.] In: hiperbaric.com https://www.hiperbaric.com/en/hip-technology/what-is-hip-technology/ (Letöltés időpontja: 2023.09.22.)

[12] FREEDEE [N.a] Komplex geometriával rendelkező alkatrészek 3D bérnyomtatása lézer szinterezéssel [Digitális kiadás.] [K. n.] In: www.freedee.hu https://www.freedee.hu/3d-szolgaltatasok/femalkatreszek-3d-nyomtatasa-lezeres-szinterezessel/ (Letöltés időpontja: 2023.09.22.)

[13] AdditiveX [N.a] How Airbus is Using 3D Printing to Reduce Aircraft Emissions [Digitális kiadás.] [K. n.] In: additive-x.com https://additive-x.com/blog/how-airbus-is-using-3d-printing-to-reduce-aircraft-emissions/ (Letöltés időpontja: 2023.10.16.)

[14] Jabil [N.a] 3D Printing in Healthcare Makes It Personal [Digitális kiadás.] [K. n.] In: jabil.com https://www.jabil.com/blog/3d-printing-in-healthcare.html (Letöltés időpontja: 2023.10.16.)

[15] S. Krish (2010) A practical generative design method [Digitális kiadás.] [K. n.] In: sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010448510001764 (Letöltés időpontja: 2023.09.19.)

[16] F. Buonamici – M. Carfagni – R. Furferi – Y. Volpe – L. Governi (2021) Generative Design: An Explorative Study [Digitális kiadás.] [K. n.] In: cad-journal.net https://cad-journal.net/files/vol_18/CAD_18(1)_2021_144-155.pdf (Letöltés időpontja: 2023.10.19.)

[17] Bikepro [N.a] KERÉKPÁR HAJTÓMŰ [K. n.] In: bikepro.hu https://bikepro.hu/alkatresz_001/hajtas_79/hajtomu_80 (Letöltés időpontja: 2023.10.19)

[18] Németh B. – Ardó T. (2022) HAJTÓKAROK ANATÓMIÁJA: MIÉRT KELL 8 KÜLÖNFÉLE PARAMÉTERT ELLENŐRIZNI VÁSÁRLÁSKOR? [Digitális kiadás.] [K. n.] In: bikepro.hu https://bikepro.hu/cikkek_2/hajtokarok_anatomiaja_miert_kell_8_kulonfele_parametert_ellenorizni_vasarlaskor (Letöltés időpontja: 2023.10.19.)

[19] Németh B. (2009) Pedálok szerelése, karbantartása [Digitális kiadás.] [K. n.] In: bikemag.hu https://bikemag.hu/tech/pedalok-szerelese-es-karbantartasa/ (Letöltés időpontja: 2023.10.07.)

[20] Vital Club [N.a] Mi a patent pedál? Kell ez nekem? Előnyök és hátrányok. [Digitális kiadás.] [K. n.] In: fehervarkerekpar.hu https://www.fehervarkerekpar.hu/patent-pedalok (Letöltés időpontja: 2023.10.07.)

[21] S. Junk – L. Burkart (2021) Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing [Digitális kiadás.] [K. n.] In: www.sciencedirect.com https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121006004 (Letöltés időpontja: 2023.10.07.)

[22] M. Goudswaard – A. Nassehi – B. Hicks (2023) A generative-based design methodology to enable the democratisation of 3D printing [Digitális kiadás.] Cambridge University Press In: cambridge.org https://www.cambridge.org/core/journals/design-science/article/generativebased-design-methodology-to-enable-the-democratisation-of-3d-printing/01A9F894643A09FC401C565AEADE1E65 (Letöltés időpontja: 2023.10.07.)

[23] [N.m] [N.a] Crank Gear [Digitális kiadás.] [K. n.] In: bdumas.fr https://bdumas.fr/AIDES/THEME-TRANSPORTS/INFO_VISUELLE_TRANSPORT-Format%20HTML/www.infovisual.info/05/034_en.html (Letöltés időpontja: 2023.09.29.)

[24] Czupy I. – Horváth B. – Major T. (2011) Általános géptan gyakorlatok [Digitális kiadás.] [K. n.] In: oszkdk.oszk.hu https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/01/43/08/dd/1/altalanos_geptan_gyakorlatok.pdf (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)

[25] EOS [N.a] EOS M 290 Series In: eos.info https://www.eos.info/en/industrial-3d-printer/metal/eos-m-290 (Letöltés időpontja: 2023.10.14.)

[26] EOS [N.a] EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet In: eos.info https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf (Letöltés időpontja: 2023.10.14.)

10. Árbák és táblázatok jegyzéke

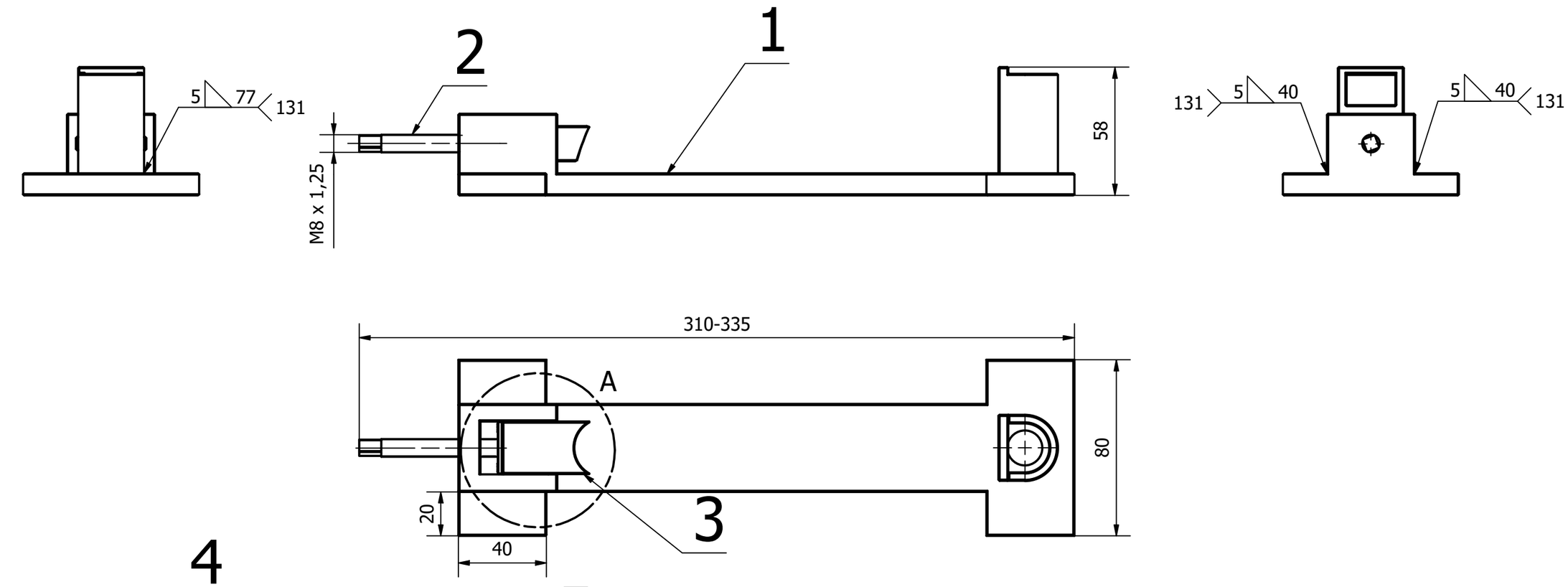
10.1. Ábrajegyzék

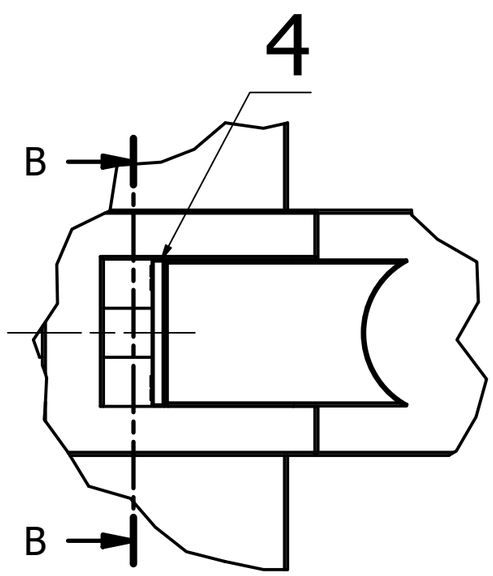
1. ábra: Fémnyomtatás folyamata ... 4
2. ábra: Fémporos DED működési elve ... 5
3. ábra: DMLS működési elve ... 6
4. ábra: Különböző technológiákkal előállított fémporok mikroszkópikus képe ... 6
5. ábra: Huzal alapú DED működési elve ... 7
6. ábra: A kísérlethez gyártott próbatestek ... 9
7. ábra: Lunker kézpődés ... 11
8. ábra: A HIP technológia egyszerűsített folyamata ... 12
9. ábra: Hőfeszültség hatására felszakadó alkatrész ... 13
10. ábra: Por diffuzió a 3D fémnyomtatás során ... 14
11. ábra: 3D nyomtatott konzol ... 15
12. ábra: 3D nyomtatott titán csípőprotézis ... 16
13. ábra: Kérdőív a 3D nyomtatás előnyeiről az egészségügyi szektorban ... 16
14. ábra: Autodesk generatív tervezésének keretrendszere ... 18
15. ábra: Integrált tengelyes kerékpár hajtómű ... 20
16. ábra: Négyszögletes hajtómű rendszer ... 20
17. ábra: Taposó pedál ... 21
18. ábra: Patent pedál ... 21
19. ábra: Hajtómű egyszerű vázlata ... 22
20. ábra: Kiindulási alkatrész ... 23
21. ábra: Pedál ... 23
22. ábra: Csatlakozó részek ... 24
23. ábra: Lapolás ábrázolása metszetben ... 24
24. ábra: Tervezési „felbontás” beállítása ... 25
25. ábra: Tervezési területek kijelölése ... 25
26. ábra: Terhelési esetek ... 27
27. ábra: Külpontos terhelés és csavarónyomaték értelmezése ... 27
28. ábra: Terhelések beállításának munkaablaka ... 28
29. ábra: Felvett terhelések és kényszerek ... 28
30. ábra: Biztonsági tényezőt befolyásoló részténye zők ... 29
31. ábra: Tervezési cél és biztonsági tényező munkaablaka ... 30
32. ábra: Additív gyártási mód beállítása ... 31

33. ábra: Anyagtulajdonságok munkaablaka 31
34. ábra: Tervvariánsok 32
35. ábra: 1. tervvariáns iterációs lépései 32
36. ábra: 2. tervvariáns iterációs lépései 33
37. ábra: Választott tervvariáns 34
38. ábra: Parametrikus modell létrehozása 34
39. ábra: Hálózás alapbeállításai 35
40. ábra: Hálóméret finomítása 36
41. ábra: Behálózott modell 36
42. ábra: Első terhelési eset 37
43. ábra: Második terhelési eset 38
44. ábra: Harmadik terhelési eset 38
45. ábra: Negyedik terhelési eset 39
46. ábra: Biztonsági tényező értékek 40
47. ábra: Keresztmetszet növelés folyamata 41
48. ábra: Biztonsági tényező értékek a módosított hajtókaron 41
49. ábra: Sűrített hálóméret 42
50. ábra: EOS M 290 3D fémnyomtató 43
51. ábra: Nyomtató és alapértelmezett beállítások kiválasztása 44
52. ábra: Tájolási beállítások 46
53. ábra: Hajtókar helyzete a nyomtatási térben 47
54. ábra: Támasztással ellátott alkatrész 48
55. ábra: A támasztás felépítése (gyémánt srtuktúra) 48
56. ábra: Elmozdulások a nyomtatás során (35 °C) 49
57. ábra: Rétegközi hőmérsékletek a nyomtatás során (35 °C) 50
58. ábra: Elmozdulások a nyomtatás során (80 °C) 51
59. ábra: Rétegközi hőmérsékletek a nyomtatás során (80 °C) 52
60. ábra: Eredeti hajtókar és a 3D nyomtatott prototípus 54
61. ábra: Kerékpárra felszerelt prototípus 54
62. ábra: Befogó készülék 55
63. ábra: Befogó pofa 55
64. ábra: Befogó pofa kialakítása 56
65. ábra: Tervezési folyamat 57
66. ábra: Összehasonlítás 58

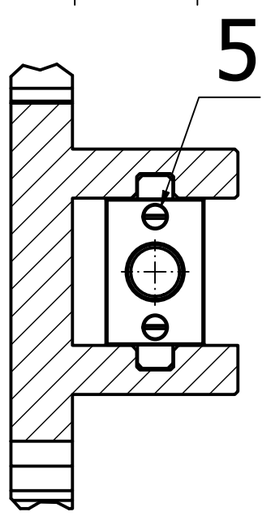
10.2. Táblázatjegyzék

1. táblázat: Porágyalapú lézersugaras olvasztás és lézeres felrakó hegesztés összehasonlítása8
2. táblázat: A kísérleti próbatestek tulajdonságai 8
3. táblázat: Tömör kitöltésű rozsdamentes acél próbatest szakítóvizsgálati eredményei 9
4. táblázat: Háromszög kitöltésű rozsdamentes acél próbatest szakítóvizsgálati eredményei . 9
5. táblázat: Generatív tervezésre alkalmas szoftverek tulajdonságai 19
6. táblázat: Kiindulási paraméterek 23
7. táblázat: A terhelési esetekben fellépő terhelő erő és nyomaték értékek 26
8. táblázat: tervvariánsok tulajdonságai 33
9. táblázat: Ébredő feszültségek min. és max. értékei 39
10. táblázat: Konvergencia vizsgálat eredményei 42
11. táblázat: EOS M 290 3D fémnyomtató tulajdonságai 43
12. táblázat: Nyomtatási tulajdonságok 45
13. táblázat: Nyomtatott alkatrész mechanikai jellemzői 45
14. táblázat: Folyamat szimuláció eredményei 53





A
1:1



B-B
1 : 1

Tsz	Db	Megnevezés	Méret	Anyag	Szabv.	Megjegyzés
5	2	Süllyesztett fejű csavar	M3x8		DIN 963	
4	1	Rögzítő lemez	23,8x16x2	S235		
3	1	Befogó pofa	31,4x40x16	S235		
2.	1	Hajtórúd	∅11,8x70	S235		
1.	1	Készülék alaptest	280x80x58,2	S235		

Ellenőrizte:

Dátum: 2023.10.31.

Tárgy: Befogó készülék Összeállítási rajz

M 1:2

Tömeg: 1,6 kg

Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem

Téma: Befogó készülék tervezés

Mellékletszám: 1. sz. melléklet

Név: Mika Máté

Anyag:

Lapok száma: 1 | 1.sz.lap

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve:	Mika Máté
A Hallgató Neptun kódja:	L8WSEC
A dolgozat címe:	Kerékpár hajtókar generatív tervezése és 3D fémnyomtatásának megtervezése
A megjelenés éve:	2023
A konzulens intézetének neve:	Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve:	Gépszerkezettani Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlant állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023. év 10. hó 26. nap

Mika Máté

Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Mika Máté (L8WSEC) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védésre **javaslom / nem javaslom**[1].

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*[2]

Kelt: Gödöllő, 2023. év 10. hó 25. nap

belső konzulens

[1] A megfelelő aláhúzandó.
[2] A megfelelő aláhúzandó.