

ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

NYOMTATÁSI PARAMÉTEREK HATÁSA 17-4PH
ROZSDAMENTES ACÉLBÓL SZÁLHÚZÁSOS
TECHNOLÓGIÁVAL ELŐÁLLÍTOTT PRÓBATESTEK
MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA ÉS
SZÖVETSZERKEZETÉRE

Szerző: **Csibor Balázs**
gépészmérnöki BSc,
Anyagtechnológiai és
minőségügyi specializáció

Konzulensek: **Bognár Adrián**
tanársegéd
Ledniczky György Vilmos
tanársegéd

Kecskemét
2023

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS	5
1. SZAKIRODALMI FELDOLGOZÁS A FÉM ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁKRÓL, A TERMÉKET BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐKRŐL ÉS UTÓKEZELÉSÜKRŐL	6
1.1. FÉM ADDITÍV GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁK	7
1.1.1. Irányított energiaközlés alapú eljárások.....	8
1.1.2. Porágyfúziós eljárások.....	9
1.1.3. Anyag extrúziós, filament alapú eljárások.....	10
1.2. ADDITÍV GYÁRTÁSRA HASZNÁLT ANYAGOK	13
1.2.1. Nem fémes anyagok additív gyártása	13
1.2.2. Fémes anyagok additív gyártása	15
1.3. UTÓKEZELÉSI ELJÁRÁSOK	22
2. A PRÓBATESTEK GYÁRTÁSA KÍSÉRLETTERV ALAPJÁN	23
2.1. A NYOMTATÁSHOZ FELHASZNÁLT ALAPANYAG BEMUTATÁSA	24
2.2. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET FELÉPÍTÉSE	24
2.3. GYÁRTÁSI PARAMÉTEREK KIVÁLASZTÁSA	25
2.4. ZÖLD DARABOK TÖMEGELOSZLÁSA	26
2.5. ZSUGORODÁS/TÖMÖRÍTÉS MÉRTÉKÉNEK MEGHATÁROZÁSA	26
2.6. A LEGYÁRTOTT PRÓBATESTEK	27
3. A KÖTŐANYAGELTÁVOLÍTÁSI ÉS A SZINTERELÉSI FOLYAMAT BEMUTATÁSA	29
3.1. A KÖTŐANYAGELTÁVOLÍTÁS FOLYAMATA	29
3.2. A SZINTERELÉS FOLYAMATA	30
4. A MECHANIKAI ANYAGVIZSGÁLATOK MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK KIÉRTÉKELÉSE.....	34
4.1. MÉRÉSI ELJÁRÁS LEÍRÁSA.....	34
4.2. MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	35
4.3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	36
4.3.1. A szakítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése.....	36
5. A GYÁRTÁSTECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK BEFOLYÁSÁNAK ELEMZÉSE ELEKTRONMIKROSKÓPI FELVÉTELEK SEGÍTÉSÉVEL	40
5.1. ELŐZETES FELVÉTELEK KÉSZÍTÉSE	40
5.2. ELEKTRONMIKROSKÓPI FELVÉTELEK KÉSZÍTÉSE	40
5.2.1. Vizsgálati eredmények.....	42
ÖSSZEFOGLALÁS	43
IRODALOMJEGYZÉK	44

Jelölés- és rövidítésjegyzék

D&S	Debinding and Sintering	Kötőanyag eltávolítás és szinterelés
DED	Direct Energy Deposition	Irányított energiaközlés
SLS	Selective Laser Sintering	Szelektív lézer szinterelés
SLM	Selective Laser Melting	Szelektív lézer olvasztás
LMD	Laser Metal Deposition	Lézeres fémlerakás
LENS	Laser Engineering Net-Shaping	Lézeres mérnöki hálózás
WAAM	Wire-Arc Additive Manufacturing	Huzalíves additív gyártás
EBF	Electro-Beam freeform fabrication	Elektronsugaras szabadformájú gyártás
PBF	Powder Bed Fusion	Porágyfúzió
BMD	Bound Metal Deposition	Kötött fémlerakás
BPE	Bound Powder Extrusion	Kötött por extrúzió
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing	Atom diffúziós additív gyártás
FDM	Fused Deposition Modeling	
FFF	Fused Filament Fabrication	
MSD	Mean Squared Deviation	Átlagos négyzetes eltérés
MEAM	Material Extrusion Additive Manufacturing	Anyag extrúziós additív gyártás
MIM	Metal Injection Molding	Fémfröccsöntés
STL	Stereolithography	Sztereolitográfia
CRP	Cu-rich precipitates	Rézben gazdag kiválások

Jelölés- és rövidítésjegyzék

CAD	Computer Aided Design	Számítógéppel támogatott tervezés
SEM	Scanning Electron Microscope	Pásztázó elektronmikroszkóp
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	Energia-diszperzív röntgensugaras spektroszkópia
SiO ₂	Szilícium-dioxid	SiO ₂
Cr ₂ O ₃	Króm-oxid	Cr ₂ O ₃
NbC	Nióbium-karbid	NbC
THF	Tetrahidrofurán	THF

Bevezetés

A tervezés és gyártás folyamatai a mai napig rendkívüli lehetőségekkel bővülnek az additív technológiák térnyerése és fejlődése által. Az additív eljárások radikálisan eltérnek a hagyományos gyártási módszerektől és egy teljesen új mérnöki megközelítést igényelnek. Ennek eredményeként új lehetőségek nyílnak meg és olyan geometriák hozhatók létre, amelyeket korábban más technológiákkal nehezen vagy egyáltalán nem lehetett előállítani. Az orvostudomány és az ipar területén kiemelkedő alkalmazási lehetőségek rejlenek ebben a fejlődésben. [1]

Az additív gyártáshoz felhasznált anyagok palettája folyamatosan bővül [2], ezért a jelen kutatás a fém próbatestek előállítására és vizsgálatára koncentrál. Fontos megemlíteni, hogy a fém alkatrészek előállításához érdemes figyelembe venni az SLS/SLM technológiák mellett az FDM/FFF eljárást is. Ennek oka az alacsonyabb költségek, a nagyobb méretű alkatrészek gyártásának lehetősége, valamint az egészségügyi előnyök, amelyeket ezek a módszerek kínálnak. [3]

A próbatestek nyomtatásához magas fémpor tartalmú 17-4PH filamentet és egy Craftbot Flow IDEX XL nyomtatót alkalmaztunk. A fémporral dúsított filamentben alkalmazott acél ötvözet már régóta ismert az ipar számára és az 1950-es években repülőgép futómű alkatrészek gyártására használták. [4] Ennek oka a magas szilárdság és a korrózióállóság kombinációja volt. Az 1980-as években az autó- és elektronikai iparban már ipari szinten alkalmazták. [5]

A fémpor és műanyag homogén összekeverésével létrejött az ún. "feedstock¹," amely a fémförccsöntés (Metal Injection Molding MIM) alapanyaga lett. A filament hasonló összetételű, de granulálás helyett extrúziós eljárással készítik. Mind a fémförccsöntés, mind pedig a 3D nyomtatás esetében szükség van további lépésekre a kész alkatrészek előállításához, beleértve a kötőanyag eltávolítását (debinding) és a szinterelést.

A kutatás célja, hogy megvizsgáljuk egyes nyomtatási paraméterek hatását a kész munkadarabok mechanikai tulajdonságaira és szövetszerkezetére, jelen esetben anélkül, hogy további hőkezelésnek vetnénk alá a próbatesteket szinterelés után.

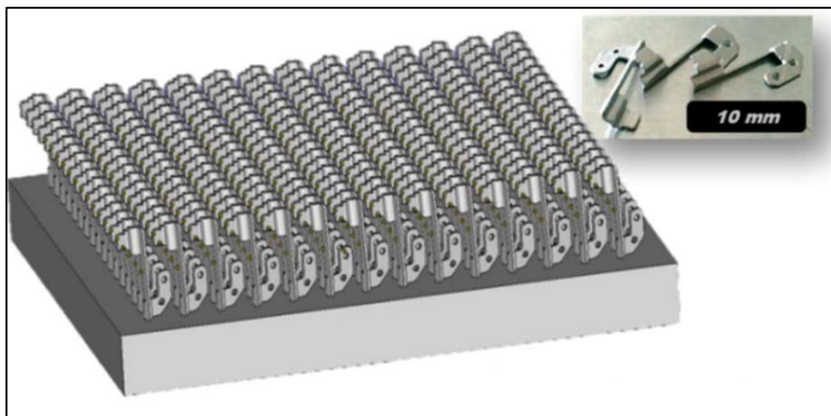
¹ Feedstock: Többnyire fémförccsöntés területén használt fogalom a bekevert granulátum alapanyagra, valamint más additív technológiák alapanyagaira is használt fogalom.

1. Szakirodalmi feldolgozás a fém additív gyártástechnológiákról, a terméket befolyásoló tényezőkről és utókezelésükről

Napjainkra, 2023-ra az additív gyártóberendezések, anyagok és tervezési módszerek nagyjából három évtized alatt jelentős fejlődésen, változáson mentek keresztül. A 90'-es években az eredeti megnevezés gyorsprototípus fejlesztés volt, mert az additív technológiákat főleg termékfejlesztésre és prototípusgyártásra használták. Az elmúlt 30 év alatt fém alkatrészek előállítására új módszerek jelentek meg a hagyományos forgácsoló, öntő, alakító technológiák mellett és fokozatosan adoptálták az iparba alternatív termelési technikaként. Ugyanakkor eddig csak néhány fenntartható értékláncot szemléltettek speciális területeken. [6] Additív gyártásra példákat mutat az 1. 2. és 3. ábra.



1. ábra. 30 darab korrózióálló extruder henger egyidejű gyártása [6]



2. ábra. 238 darab fogsabályzó gyártása egy platformon [6]



3. ábra. GE LEAP jet motorhoz üzemanyag befecskendező [6][11]

Additív gyártásnak nevezzük az ISO/ASTM 52900:2015/2021? szabvány szerint azt a folyamatot, amikor 3D modell adat alapján anyagot kapcsolunk össze, általában rétegről rétegre haladva, szemben az anyageltávolító vagy alakadó gyártási módszerekkel. [7]

A fém additív gyártási technológiákat tájékozódás céljából feloszthatjuk por alapú és anyag extrúziós eljárásokra. Fémes anyagú testeket lézeres módszerekkel általában egylépéssel hozhatunk létre. Anyag extrúziós technológiákkal először ún. zöld darabokat nyomtatunk szintén CAD modell alapján, szeletelő szoftver segítségével. A zöld darab elnevezés a darabok jellegzetes színéből ered, mert ebben az állapotban még tartalmazzák az extrudáláshoz és alakadáshoz szükséges kötőanyag rendszert. Ahhoz, hogy a zöld darabokból kész, teljesen fémtesteket állítsunk elő, szükség van további lépésekre. Először kötőanyag eltávolításra, amely lehet oldószeres, termikus vagy katalitikus. Ezután barna darabnak nevezzük a testeket. Végül a kötőanyag szinte teljes mértékben való eltávolítása után magas hőmérsékleten szintereljük/tömörítjük a darabokat.[8][20] A kész darabok adott esetben igényelhetnek további, másodlagos forgácsoló megmunkálásokat.

1.1. Fém additív gyártási technológiák

Fémes anyagú testek előállítására használt additív technológiák több szempont alapján is csoportosíthatók, úgymint a felhasznált alapanyag formája, -a teljesség igénye nélkül- a rétegek létrehozása alapján feloszthatjuk irányított energiaközlés alapú, porágyfúziós és extrúziós eljárásokra. Következő szakaszokban ezeket a technológiákat írom le röviden.

1.1.1. Irányított energiaközlés alapú eljárások

A DED, vagyis az Irányított Energiaközlés alapú technológiák azon az alapon működnek, hogy az építeni kívánt helyre juttatják egy fókuszpontba a megolvasztandó anyagot. Mindez általában inert atmoszférában történik. A DED eljárásokat tovább osztályozhatjuk az alapanyag (feedstock) és energiaforrás fajtája alapján. Alapanyag lehet por vagy huzal, míg az energiaforrás lehet lézersugár, elektronsugár, ív vagy kinetikus energia. [2]

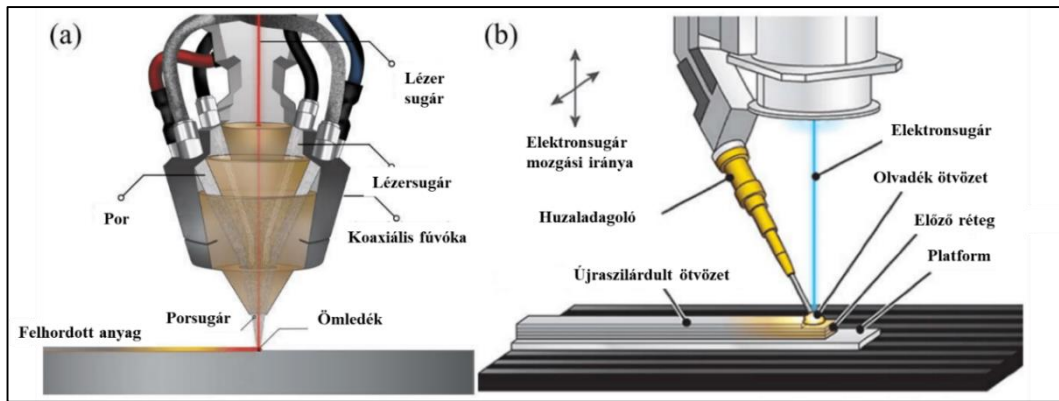
Lézeres fémlerakás, vagyis LMD eljárás során lézersugár segítségével fémporból olvadék zónát hozunk létre fémes hordozóra, ahol a port betápláljuk. A megolvadt fémpor réteget képez, amit fúzió köt a fémes hordozóhoz. Az LMD széles körben elterjedt új alkatrészek előállítására, valamint létező alkatrészek javítására.[2]

A lézeres mérnöki hálózás, LENS hasonló az LMD-hez. Az eljárás segítségével közvetlen CAD modell alapján lehetséges fém alkatrészeket gyártani. Az LMD technológia során lézersugár által olvadt medencét formálnak, mellyel a fémport összegyűjtjük a poráramból. A LENS egy sokoldalú és iparhoz igazodó folyamat, köszönhetően olyan egyedülálló tulajdonságainak, mint a különböző anyagok használhatósága és a funkcionálisan osztályozott darabok létrehozása. Más, por ágyat használó technológiákhoz képest nagyobb méretű alkatrészek előállítására alkalmas. Sing és társai, Balla és társai TiO₂ alapú funkcionálisan osztályozott struktúrát hoztak létre, melyek változó TiO₂ kerámia összetétellel biokompatibilis, nem mérgező tulajdonsággal bírnak és javult a keménység, illetve a felületi nedvesítőképesség.[2]

A huzalíves additív gyártás, vagyis a WAAM során elektromos ívet használunk energiaforrásként, hogy rétegről-rétegre helyezzünk el anyagot. Lézer alapú technológiákhoz képest magasabb lerakódási sebesség érhető el, továbbá alacsonyabb eszközököltség, jobb anyagfelhasználási arány jellemzi és környezetbarátabb folyamat. [2]

Az elektronsugaras szabadformájú gyártás (4. ábra), EBF eljárás lehetővé teszi az ún. near-net-shape² testek gyártását. Lézer alapú technológiákhoz hasonlóan vákuumban történik az eljárás. Más gyártási folyamatokhoz képest kevesebb nyersanyagot igényel az EBF. [2]

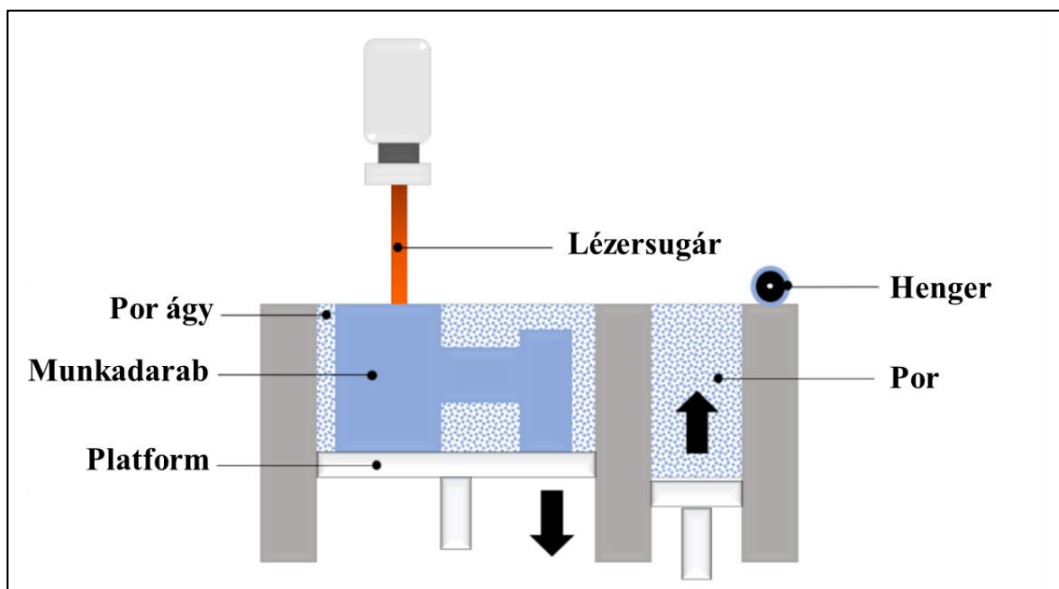
² Near-net-shape: névleges mérethez és alakhoz közeli gyártási technika



4. ábra. (a) Lézersugaras DED; (b) Elektron sugaras DED [17]

1.1.2. Porágyfúziós eljárások

A porágyfúzió azon az elven működik, hogy lokálisan megolvasztjuk a fémport egy hordozón/platformon, majd rétegenként haladunk így tovább. Miután kialakult egy réteg, egy henger segítségével újabb réteg port terít el a gép. Az el nem használt port használhatjuk támaszként az egymást követő rétegekhez, kizárva ezzel a külön támaszték (support) használatát. Porágyas technológiák nagyrésze inert gázt vagy vákuumot használ a zárt munkatérben, hogy elkerüljék a por oxidációját. A DED technológiákhoz képest nagyobb alakhűségeket biztosítanak a PBF alapú technológiák. [2]

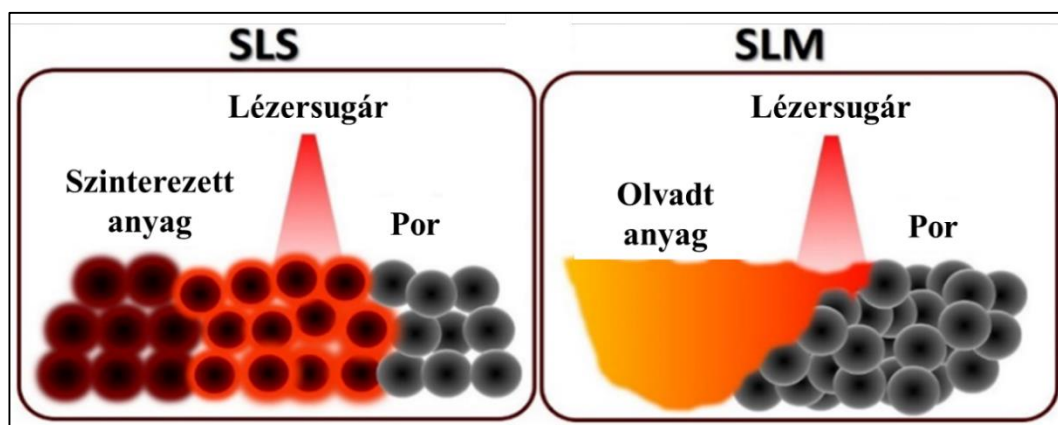


5. ábra. Porágyfúzió sematikus ábrázolása [18]

Szelektív lézerolvasztás, vagyis SLM lézer használatával teljesen megolvasztja a fémport, így közel végleges méretű darabokat érhetünk el, 99.9% relatív sűrűséggel. SLM folyamattal gyártott darabok komplex struktúrával, geometriával, hosszú élettartammal és nagy szilárdsággal rendelkeznek. [2]

A szelektív lézer szinterelés, vagyis SLS nagyon hasonló az SLM-hez. A különbséget az adja, hogy SLS folyamatban a port nagy energiasűrűségű lézer köti össze a por olvadáspontja alatt, míg SLM-nél előbb megolvad a por, majd kialakul a részecskék közti kötés (6. ábra) [2].

A fém direkt lézer szinterelés, vagyis DMLS hasonló a szelektív lézer szintereléshez, mivel nagy energiasűrűségű lézert használ a fémpor szintereléséhez. Komplex geometriák létrehozására alkalmas, melyeket más fémfeldolgozási módszerekkel nem lehetséges előállítani.



6. ábra. SLS és SLM eljárás különbsége [19]

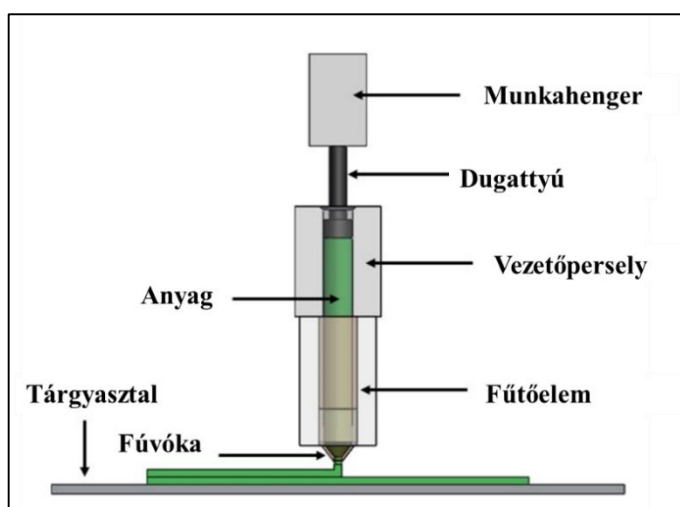
Az elektronsugaras olvasztás, vagyis EBM megegyezik a lézer alapú módszerekkel, azzal a különbséggel, hogy elektronsugarat használ a betáplált fémpor megolvasztására. Ezt a technológiát csak fémekhez és ötvözetekhez használják. Az eljárás szigorúan vákuumban történik, hogy elkerüljük az oxidációt.

1.1.3. Anyag extrúziós, filament alapú eljárások

Anyag extrúziós eljárásokkal -szemben a por alapú technológiákhoz képest- szükség van további folyamatokra. Ahogy fentebb említettem, kötőanyag eltávolításra és szinterelésre, hogy kész termékeket kapjunk. Ezekhez a technológiákhoz használt alapanyag lehet filament vagy granulátum. Filamentekre jellemző néhány főbb tulajdonság:

- Anyaga
- Átmérője: 1.75mm vagy 2.85mm, tűrése: $\pm 0.05\text{mm}$
- Nyomtatási hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- Asztal hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- Nyomtatási sebesség: [mm/s] [10]

A kötött fémlerakás, vagyis BMD a Desktop Metal Inc. által szabadalmaztatott extrúzió alapú indirekt fémnyomtatás. Nyomtató rendszereik mellett alapanyagokat is fejlesztettek. Fémekből többek közt 17-4PH és 316L tartalmú rúdanyagokat is kínálnak, melyek jól meghatározott és szabályozott átmérővel rendelkeznek. A rudakat egy speciálisan tervezett és párnázott kazettákban tárolják. Nyomtatás közben dugattyú nyomja a rudat egy vezetőpersely segítségével fűtőelemen, majd fúvókán keresztül. Ez az extrúziós rendszer 50 μ m legkisebb rétegvastagságot tesz lehetővé. Az általuk kínált rendszerek felhasználó barát módon kezelhetők, azonban a szoftver automatikusan szeleteli az STL kiterjesztésű modelleket, így a beállítások nem módosíthatók és hozzáférhetők. A technológia működését a 7. ábra mutatja [8, 9, 11].

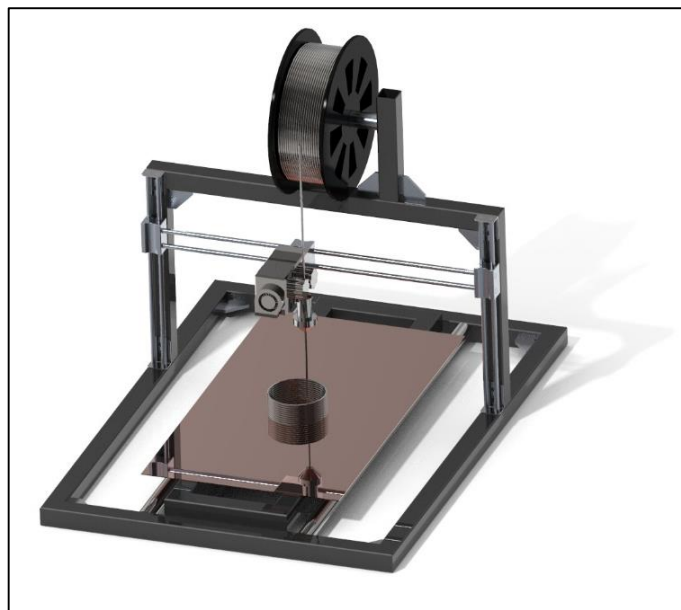


7. ábra. BMD technológia sematikus ábrázolása [14]

A kötött por extrúzió (BPE), más néven atom diffúziós additív gyártás (ADAM) a Markforged Inc. által szabadalmaztatott indirekt additív gyártási folyamata. A Markforged által forgalmazott Metal X rendszer a nyomtató mellett tartalmazza a kötőanyag eltávolító és szinterelő berendezéseket is. A nyomtató rendszerhez saját felhő alapú szeletelő szoftver is tartozik, az Eiger. Azonban a felhasználó számára a rétegvastagság és kitöltési orientáció módosítható és hozzáférhető, ezért több cikkben ezeket a paramétereket nem tudták közölni [3].

A BPE és ADAM lényegében szálhúzásos 3D nyomtatási technológiák, ismertebb rövidítéssel FDM/FFF. Az egyik legismertebb, széles körben használt, más additív technológiákhoz képest költséghatékony, kevesebb energiát igénylő és felhasználóbarát eljárás. Alapanyagot tekintve főként műanyag filamenttel találkozhatunk, azonban vannak még kompozit, fa és fémpor tartalmúak. Utóbbit kevesebb cég gyártja, például a BASF és Markforged. Fémpor tartalmú filamentek készítéséhez egyrészt szükség van a fémporra,

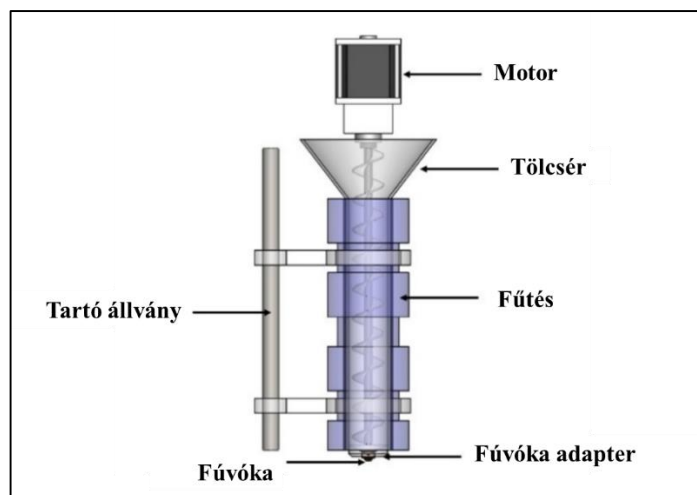
másrészt egy polimer alapú kötőanyag rendszerre, hasonlóan a fémfröccsöntéshez. A filamentben lévő fémpor magas térfogatszázaléka (50-65vol%) miatt műanyagokhoz képest nagyobb súrlódással kell számolni a fúvókában. Emiatt fémpor tartalmú filamentekhez speciális rubint vagy edzett acél fúvókát is javasolnak. FDM alapú fémnyomtatással készített próbatesteket vizsgáló cikkek száma az elmúlt évtizedben kezdett növekedni exponenciálisan. Ez feltételezhetően annak köszönhető, hogy viszonylag kevésbé kutatott eljárás, és a DED vagy PBF alapú technológiákhoz képest olcsó, egyszerű, nem igényel biztonsági óvintézkedéseket és általában nagyobb munkatér áll rendelkezésre. [2, 3, 10, 15, 16]



8. ábra. Filament alapú 3D nyomtató sematikus ábrázolása [Szerző]

Extrúziós technológiákhoz tartozik még a csavaralapú, Screw based³ 3D nyomtatás. Ennek alapanyaga granulátum/pellet, melyet gyakorlatilag a fémfröccsöntéshez is használnak. Fontos, hogy a granulátum mérete szabályozott legyen, <5mm alatti, hogy elkerüljék az esetleges nyomtatási hibákat légbuborékok miatt. A filament vagy rúd alapú technológiákhoz képest előnye a nagyobb termelékenység, mert egyenletesen biztosított az anyag ellátása és áramlása. Továbbá a fémfröccsöntéssel egyenértékű szilárd töltés érhető el. Hibásnak tűnő zöld darabok zúzás és szitálás után visszahelyezhetők a tölcserbe, ezáltal közvetlen újra használható az anyag, úgymint a fémfröccsöntésnél is. Pellet alapanyagot használó nyomtatókat szabadalmaztatott az AIM3D GmbH és a Pollen AM cég. [3, 16]

³ Screw based: Extruder csigát használó 3D nyomtatás.



9. ábra. Csavar alapú extrúziós nyomtatófej [14]

1.2. Additív gyártásra használt anyagok

Különböző additív gyártási technológiákhoz ma már számos anyagfeleség áll rendelkezésre. Ebben a szakaszban két fő csoportra osztottam fel az anyagokat, nem fémes és fémes anyagokra.

1.2.1. Nem fémes anyagok additív gyártása

FDM nyomtatás terén legelterjedtebbek a termoplasztikus, azaz hőre lágyuló műanyagok, de használhatók SLS technológiához is. Széles körben és választékban elérhetők a piacon, gyakorlatilag a legolcsóbb alapanyagok additív gyártásra. Eleinte a műanyagokat prototípus gyártásra használták, majd később funkcionális alkatrészeket is elkezdtek készíteni belőlük. A polimerek sokoldalúságuknak köszönhetően több iparágban is elterjedtek, mint az elektronikai ipar, egészségügy, autóipar és repülőgépipar. Figyelemre méltó tulajdonságuk, hogy különböző szinten képesek teljesíteni a szakítószilárdság, merevség, és sűrűség követelményeit, ezáltal egyedi igényekhez jól kapcsolhatók. Sokoldalú tulajdonságaik mellett széles színválasztékban is elérhetők. A nyomtatás azonban nem mindegyik polimerrel egyszerű, bizonyos fajták hajlamosak például felgömbülni az asztalról és saját rétegéről. Ennek kiküszöbölése miatt fontos a hőmérsékletek beállítása. Léteznek biológiailag lebomló polimerek is. [2]

Az egyik leggyakrabban használt polimer, az ABS a nevét adó három monomer egységből áll. A három különböző monomer egység miatt terpolimernek számít. Az ABS amorf szilárd anyag valódi olvadáspont nélkül, de üvegesedési átmenetet mutat 105°C-on. Gyártási folyamat egyszerű és költséghatékony, mely magában foglalja az akrilnitril és sztirol polimerizációját polibutadién jelenlétében.

A monomerek arányai jellemzően 15-35% akrilnitril, 40-60% sztírol és 5-30% butadién. A nitril csoportnak köszönhetően magasabb szilárdsággal bír a nyers polisztirolhoz képest. A sztírol csoport fényes felületet ad. A polibutadién szívósságot kölcsönöz alacsony hőmérsékleten is. Az ABS-t jellemzően -20 és 80°C között használják, mert a mechanikai tulajdonságai hőmérséklettől függenek.[2]

Másik közkezdvelt termoplasztikus polimer a PLA, egy biológiailag lebomló és biológiailag aktív alifás anyag. Természetes forrásból előállítható, mint a cukornád, tápióka gyökér, burgonya és kukoricakeményítő. Kémiaiilag két monomerből áll, ciklikus diészter-laktidból/dilaktid és laktid savból/tejsavól. Amorf anyag, 55°C-os üvegesedési és 180°C-os olvadási hőmérséklettel. A PLA-t megfelelő fémes katalizátorokkal a dilaktid polimerizációjával állítják elő, mely megnyitja a gyűrűs szerkezetét.[2]

Másik csoportja az additív gyártásra használt nem fémes anyagoknak a kerámiák. A kerámiák olyan szervesetlen anyagok - például agyag, cement, üveg-, melyek közt találhatunk kristályos és amorf szerkezetűeket egyaránt. A hagyományos kerámiák általában természetes forrásból származnak, míg a modern kerámiák szintetikus anyagokból és sokszor igényre szabott tulajdonságokkal rendelkeznek. Ilyen lehet a szemcseméret, részecske eloszlás és tisztaság. Egyik fő előnyük a kiváló hőállóság és az elektromos szigetelőképeség is. Továbbá jellemző a kerámiákra a keménység, kopásállóság, azonban a ridegség is. A modern kerámiák mikrostruktúrájában jelen lévő kovalens és ionos kötésnek köszönhető kiváló mechanikai, kémiai és fizikai tulajdonságuk. Ilyen tulajdonságok a kémiai inertitás (környezeti stabilitás), magas hőállóság, merevség és alacsony súrlódási tényező [2].

Additív gyártásra használt kerámiák háromféle feedstock formában vannak jelen:

- Iszap-alapú
- Por alapú
- Ömlesztett szilárd anyag [2]

Iszap-alapúnál folyadékban vagy fél-folyadékban oszlatnak el kerámia részecskéket. Két ismertebb kerámia, az alumínium-oxidot (Al_2O_3) és cirkónium-oxidot (ZrO_2) additív technológiákhoz is használják. Az Al_2O_3 sokoldalúbb, a ZrO_2 keményebb, de mindkettő szinterelési hőmérséklete alacsony. A szilícium-dioxid (SiO_2) költséghatékony helyettesítő anyag, és szintén használják additív gyártásra. Nem oxid alapú kerámiák általában jobb hőállósággal rendelkeznek, és kevésbé hajlamosan magas hőmérsékleten bomlásra. Oxid-kerámiák mellett vannak karbid alapú kerámiák, mint a volfrám-karbid, bór-karbid és szilícium-karbid, illetve nitrid alapúak, mint a szilícium-nitrid és alumínium-nitrid [2].

1.2.2. Fémek anyagok additív gyártása

Az additív gyártás növekvő fontossággal bír, mert ma már nem csak a prototípusgyártást szolgálja ki, hanem a funkcionális darabok követelményeinek is megfelel. Fém additív gyártás széleskörűen elfogadott a repülőgépipar, orvosi protézisek és autóalkatrészek esetén. Fém alkatrészek additív gyártására már számos technológia és anyag áll rendelkezésre. Azonban ezek a technikák magas befektetési költséget igényelnek és bonyolult felszerelést, hogy biztonságosan kezeljék a fémport. [3, 20]

SLS vagy DMLS technológiához használt porok mérete 15-50 μm , amely hasonló egészségügyi kockázatot jelent egy operátor számára, mint hegesztés esetén. Egészségügyi aggodalmak, magas költségek és a lézerrel kapcsolatos biztonsági kérdések vezettek kutatásokat oda, hogy más módszereket vizsgáljanak fém additív gyártásra. Egy, a lézer használatát kizáró/kiváltó eljárás az FDM. Az FDM eljárással nyomtatott zöld darabok dimenzionális tűrésének minősége jó, azonban felületi érdessége és sűrűsége nem olyan jól szabályozott, mint lézeres eljárásoknál [21].

Az FDM technológia egyszerű és biztonsági óvintézkedések nélkül végezhető folyamat. Továbbá az FDM eljárás alacsony befektetést igényel más additív technológiákhoz képest. Az FFF technológia egyik előnye, hogy bonyolult darabok gyártása esetén nem szükséges csatornákat kialakítani, hogy a fel nem használt port kiengedjük. Természetesen vannak korlátai is, mert a barna darabok szilárdsága miatt a belső struktúrának van egy minimális kitöltési igénye. [22, 23]

Szállhúzásos technológián alapuló fém alkatrészek előállításának folyamatát mutatja a 10. ábra.



10. ábra. FFF alapú fémnyomtatás folyamata

Sadaf és társai egyszerű, egykomponensű kötőanyagból, alacsony sűrűségű polietilénből (LDPE) és 316L porból készítettek filamentet, majd ezzel nyomtattak különböző alakú testeket. Kötőanyag eltávolítás során 5°C/perc hevítési sebesség tette lehetővé a lebomlott polimerek elpárolgását és a formák megőrzését felületi hibák nélkül. Kész darabokat 1380°C-on 180 perces szinterelési ciklussal készítettek, ezáltal 93% sűrűséget értek el a darabokban. Fáziselemzés kimutatta az ausztenit jelenlétét, ami megerősíti, hogy a kezelések során alkalmazott hidrogén megvédte a mintákat az oxidációtól és más szennyeződésektől. Mikroszerkezeti elemzésen megfigyelték a $45\pm 5\mu\text{m}$ szemcseméretű ausztenites szerkezetet, valamint az elemi összetétel az egész termikus kezelés során megmaradt. A mechanikai tesztek bizonyítékul szolgáltak arra, hogy az FDM módon nyomtatott és szinterelt darabok az eljárásból fakadó porozitás jelenléte ellenére is összehasonlíthatók fémfröccsöntött darabokkal. [27]

Kedziora és társai FFF technológiával nyomtattak BASF Ultrafuse 316L és Markforged 17-4PH anyagú szakító-, kifáradási és ütőpróbatesteket, valamint két SLM nyomtatóval (EOS M 290 és Renishaw AM 400) 316L anyagból. Az AnyShape-nél -standard eljárásuknak megfelelően- EOS M 290 nyomtatóval készült darabok 700°C-on 2órás feszültségcsökkentést kaptak. Minden darabot ZX irányban nyomtattak (mely FFF esetén a legkedvezőtlenebb). Minden teszthez és anyaghoz 10-10 próbatest készült. Mindkét anyag esetén a legalacsonyabb szilárdsági értékeket minimális szakadási nyúlásnál magas porozitású mintákon tapasztalták. Hozzá kell tenni, hogy a ZX irányban nyomtatott tárgyak kiterjedt porozitással rendelkeznek az XY irányúakhoz képest. A különböző technológiákkal nyomtatott darabok mechanikai tulajdonságaikban tapasztalható szórás az eltérő folyamatok során létrejött mikrostruktúrákkal magyarázható. A mikrostruktúra összetett jellemző, több tulajdonság van rá hatással. Ilyenek a porozitás, pórusok formája, diszlokáció sűrűség, szemcseméret és a repedések sűrűsége. Az egyes mechanikai vizsgálatok után arra a következtetésre jutottak, hogy -hipotézisüket alátámasztva- nem ajánlják strukturális darabok gyártását FFF technológiával, mert az SLM technológiával készült darabokhoz képest az FFF próbatestek alacsonyabb mechanikai tulajdonságokkal bírnak. Továbbá az eredmények azt mutatják, hogy az FFF eljárás fejlesztésére van szükség azért, hogy javítsák a rétegek közti kapcsolatot. Az extrudált rétegek közti kapcsolat a nyomtatás során kialakuló légbuborékok elkerülésével és a szinterelés optimalizálásával javítható. A légbuborékok gyengébb mechanikai tulajdonságokhoz vezetnek, kifejezetten XZ irányban nyomtatásnál. Spiller és társai 316L szálhúzásos 3D nyomtatással (MEAM) készítettek szakító próbatesteket.

Fémpor tartalmú filamentekhez a megfelelő nyomtatási paraméterek megválasztása nehezebb, mint műanyagok esetén, mert viszkózusabbak és más hőátadási képességeik vannak [23, 35].

A másik gyakori, fém additív gyártásra használt anyag a 17-4PH (1.4542), amely egy martenzites, kiválóan keményedő korrózióálló acél.

Sing és társai 17-4PH MIM alapanyagot használtak additív gyártásra. A nyomtatás, kötőanyag eltávolítás és szinterelés lépéseit alaposan kiértékelték, hogy a legnagyobb sűrűséget ériék el. Alacsony költségvetésű 3D extrúziós nyomtatást és szinterelési eredményeket hasonlítottak össze más lézer alapú additív gyártási technológiákkal. TGA tesztet végeztek a MIM alapanyagon, hogy meghatározzák az alapanyagban lévő kötőanyag súlyát. Ehhez a szinterelési kinetika paramétereit, 1°C/perc hevítés 500°C-ig, majd 1 óra hűtést használtak. A teljes tömegvesztés $6.5 \pm 0.2\%$ volt. AIM3D ExAM 255 típusú nyomtatót használtak [34].

Az elért optimális nyomtatási paraméterek:

- 0.05mm rétegvastagság,
- 20mm/s fúvóka sebesség,
- 120% extrúzió,
- 196°C extrúziós hőmérséklet,
- 60°C asztal hőmérséklet
- 100% kitöltési sűrűség [34].

A kötőanyag eltávolítást két lépésben, oldószerezrel és termikus úton érték el. PEG eltávolításához oldószert használtak. A darabokat vízbe mártották és mágneses úton keverték 12 órán át szobahőmérsékleten 60°C-on. A mintákat 2 óráig 100°C-on hőkezelő kemencében szárították. Megmérték szárítás előtt és után is a darabokat. A vízbe merítés után 4, 6, 8, 10 és 12 óra elteltével mérték a darabok súlyát. Termikus szinterelést csőkemencében végezték. 1°C/perc hevítési sebességgel 500°C-ig, majd 1 óra hűtést, ezután 4°C/perc hevítés különböző magasabb hőmérsékletekre (1100°C, 1200°C, 1300°C, 1360°C), ahol 5 óra hűtést, majd 4°C/perc hűtést [34].

Zhang és Roch házon belül készített filamentből nyomtattak. Az alapanyag és a kísérleti környezet az alábbi adatokkal jellemezhető:

- Filament elasztomer kötőanyagú tartalmú,
- 64 tömegszázalék 17-4PH alapanyagból származott
- 200-220°C-on extrudálták. 2.85 ± 0.01 mm pontossággal

- Renkforce 2000 típusú nyomtató
- 210°C fúvóka hőmérséklet,
- 50mm/s nyomtatási sebesség, 90°C tárgyasztal,
- 0.2mm rétegvastagság,
- 0.4mm fúvóka,
- külső héj 15% átfedés,
- 105% kitöltés,
- kitöltés párhuzamos vonallal [22].

Acetonban 50°C 5 órán keresztül, 3,5-4 tömegszázalék veszteség a kívánt. A termikus kötőanyag eltávolítás diagramja a TGA alapján lett megállapítva. A por homogenitása és a kötőanyag lehetőleg teljes eltávolítása fontos a szinterelés utáni repedések és deformációk elkerülése érdekében. Hidrogén atmoszféra segített a szerves kötőanyag eltávolításában. 1040 és 550°C-on történt megeresztés. Hőkezelési eljárásaik:

- SS1 hőkezelés: 1360°C-on 1óra, megeresztés N2 befúvás mellett szobahőmérsékletig (30l/perc)
- SS2: SS1+ 550°C-on megeresztés 4 órán át
- SS3: SS1+ 1040°C-on 1óra + 550°C-on 4 óra megeresztés [22].

A megeresztésnek úgy tűnik, hogy nincs hatása a sűrűsége, viszont van a kialakuló fázisokra és a mechanikai tulajdonságokra. Legnagyobb rugalmasság SS3-nál, legnagyobb szakítószilárdság SS1-nél. A MIM és FFF által készített darabok tulajdonságai hasonlóak. A zsugorodás és a végső darab méretei 0.1mm pontossággal meghatározhatók. Fő előnyei az FFF folyamatnak gazdasági jellegűek, mint az egyszerű technológia és a minimális biztonsági normák [22].

Cho és társai MEAM-mal 17-4PH-t gyártottak és hőkezeléssel szabályozták a mikrostruktúrát és mechanikai tulajdonságokat. Ennek a kutatásnak többek közt a célja, hogy a folyamatszabályozás mellett csökkentsék a hibákat, mint a rétegek közti repedéseket. Továbbá vizsgálták a mikrostruktúrát és a szakítószilárdságot a gyártási, hőkezelési körülmények függvényében, és ezek szilárdsági, deformációs viselkedését. A tesztdarabok izotróp mikrostruktúrával rendelkeztek és a mátrix főként martenzitből állt. H900⁴ hőkezelés után nem történ fázisátalakulás, diszlokáció sűrűség enyhén nőtt.

⁴ H900: tipikus hőkezelési jelölés kiválóan keményedő korrózióálló acélokra. 900°C-on 1 órán keresztül.

A kísérlethez használt optimális beállítások:

- fúvóka 0.6mm,
- 140°C fúvóka hőmérséklet,
- 65°C asztal,
- 40mm/s nyomtatási sebesség,
- 60mm/s mozgási sebesség,
- 0.3mm rétegvastagság,
- 3 külső réteg,
- 100%-os rácsos kitöltés [33].

A kötőanyag eltávolítás oldószeres és termikus úton történt. Oldószeres: 48óráig, 30°C-on THF (tetrahidrofurán)-ban. Termikus: 1óra hőntartás 20, 300, 500 és 700 és 880°C-on hidrogén közegben, ez eltávolítja a maradék kötőanyagot és előkészíti a port szintereléshez. Fűtési sebesség 3.33°C/perc csak az 500 és 700°C-nál, a többinél 1°C/perc. Ezt követően a mintákat vákuumban 4°C/perc sebességgel hevítés, hőntartás 20°C hőmérsékleten 30 percig és 1150°C hőmérsékleten 3 órán át, végül szinterelve 1350°C 3 órán keresztül, majd lehűtve a kemencében. A szabványos utóhőkezelést (H900) 7°C/perc sebességgel végezték Argon védőgázban az oxidáció elkerüléséért. A hőkezeléssel szabályozni kívánták a mikrostruktúrát és mechanikai tulajdonságokat. Hőkezelés lépései:

- Szilárd oldatos keményítés: 1050°C/1óra+víztemperálás.
- Kiválósosan keményítés: 480°C/1óra+levegőn hűtés.

A 17-4PH fázisdiagramja szerint az NbC 473°C körül kezd kialakulni és teljesen elbomlik 1283°C-on. Más szóval, amíg a szinterelés során az NbC lebomlik, addig a H900 hőkezelésnél és a szilárd fázisban újabb NbC válik ki.

Általában a delta-vas fázis csökkenti a szilárdsági tulajdonságokat, viszont 10% alatt nem jelentősen. H900 hőkezelés után ~10HRC-vel nőtt a keménység (377-> 437HV). A H900 tesztadarab feszültségi-alakváltozási aránya magasabb volt a szinterelt darabnál. Továbbá a szakítószilárdsága 1.35GPa volt, ami a 17-4PH porkohászati darabok közt a legjobb. A nyírószilárdság teljesítette az ASTM A693 szabvány szerinti érték 95%-át, tehát elvárható, hogy a MEAM-mel helyettesíthető a hagyományos folyamatokkal gyártott ötvözetek. A H900 valós szakítódiagramon az áramlási feszültség gyorsan nőtt a kontraháló keresztmetszetben, és egy bizonyos keményedési szintet értek el a plasztikus alakváltozás maximális pontján. A szinterelt darab alacsonyabb nyírási szilárdságú volt, és a nyaknál gyorsan megjelent lágyulás.

A töretfelületen deformálódott mikrostruktúrát figyeltek meg. A rétegek közti repedések nem jelentek meg a makroszkópi képeken, ahogy tipikusan szokott a MEAM-nél. Ez köszönhető annak, hogy a hibákat megfelelően szabályozták. Mind a szinterelt, mind a H900 darab képlékeny, gödrös töretfelületet mutatott, és gömbös oxidokat észleltek rajtuk, amik SiO_2 és Cr_2O_3 oxidok voltak, ahogy megfigyelték a kiindulási mikrostruktúrában is. Ezek az oxidok csökkentik az acél mechanikai tulajdonságait köszönhetően a gyenge kötési erőnek a mátrix és a részecskék közt. A nano méretű karbidok nem csak a diszlokációk mozgását akadályozza, hanem a másodlagos ultrafinom gömbfázisok kialakulásának oka is, ezáltal hozzájárul a szilárdság és nyúlás növeléséhez. A keresztmetszeti töretképek martenzit transzgranuláris töretét mutatták mindkét esetben.

A 17-4PH-ban a fő szilárdságnövelő fázis a CRP, köszönhetően a kristályrácsának, és nem a fázis méretének vagy térfogatának. A CRP a hőkezeléstől függően finomabban és sűrűbben oszlik el. Az NbC tovább tudja növelni a szilárdságot a krómban gazdag karbidok létrejöttének gátlásával, ami rontja a korrózióállóságot. Tehát 97% feletti kitöltésű szinterezett darabokat tudtak előállítani, nagyrészt martenzitet és gömb alakú oxidokat tartalmazva, δ -vasból anizotróp tulajdonságok nélkül. Hőkezelést követően szubmikrométer méretű NbC és CRP fázisok. Szinterezett darab szakítószilárdsága 1261Mpa és 6.4% nyúlás. H900 darab nyírószilárdsága 1.11GPa, szakítószilárdság 1.31GPa, 7.8% nyúlás. A H900 darab szilárdsága nőtt a kivált fázisok (NbC és CRP) miatt, és változott a CRP kristályrácsa.

Tosto és társai [3] FFF technológiával BASF Ultrafuse 316L és Markforged 17-4PH filamentből készítettek darabokat. SEM és EDS felvételeken elemezték a nem teljes raszterkötéseket és a hagyományos polimer FFF-nél tapasztalható hibákat. Nyomtatási beállítások Ultrafuse 316L esetén:

- 0.4mm fúvóka,
- visszahúzás 2mm,
- visszahúzás sebessége 40mm/s,
- rétegvastagság 0.14mm,
- 100% kitöltés,
- 240°C fúvóka,
- 90°C tárgyasztal,
- Skálázás: XY 19.98%, Z 16.03%

Zortrax M200 nyomtatót használtak 316L-hez. A minták kötőanyag eltávolítását és szinterelést kiszervezték egy szolgáltatónak, amely megfelel a BASF ajánlásának. 17-4PH-ból készült minták nyomtatását is kiszervezték, Markforged Metal X gépeken nyomtatták a saját szoftvere (Eiger) által javasolt beállításokkal. A zöld daraboknál a 100%-os kitöltés ellenére megfigyeltek részleges összeolvadás miatti hibákat. A nyers filamentben tisztán látható polimer láncokat nem tudták megfigyelni a zöld darabokban a mátrix diffúziója és olvadása miatt. 17-4PH zöld daraboknál a raszterek tömörebbek, és jobb a rétegek közti diffúzió. Ugyanakkor a rétegek szárazabbnak tűntek és nem volt egyértelmű bizonyíték a szemcsék közti polimer mátrixra.

Az alapanyagok polimer részét képező polimer összetevőket nevezik összefoglalóan kötőanyag rendszernek. A kötőanyagok nagymértékben befolyásolják a gyártási folyamatot és a kész darabok minőségét, még akkor is, ha teljesen eltávolították előtte. A kötőanyag rendszerek általában különböző típusú polimerekből, waxokból és adalékokból áll. Egy kötőanyag rendszeren belül általában 3 fő csoportra oszthatjuk ezeket az anyagokat:[14]

- Fő komponens: A legnagyobb mértékben van jelen és először távolítják el a kötőanyag mentesítés során. A teljes kötőanyag rendszer 50-90vol% tömegszázalékát képezi.
- Gerinc (Backbone): A munkadarabot hivatott összetartani a kötőanyag eltávolítás első lépése után, majd a szintereléskor termikus módon bontják le. A kötőanyag rendszer 0-50 térfogatszázalékát adja.
- Adalékanyagok: Ezek általában diszpergáló-, komptabilizáló- és stabilizálószerke, melyek segítenek eloszlatni a –jelen esetben- fémpor részecskéket, megakadályozni az agglomerációt és fázis szétválást. [14]

Van lehetőség egy típusú polimert használni kötőanyagként, azonban ebben az esetben csak termikus lebontásra van lehetőségünk, ami általában hosszabb időt vesz igénybe oldószeres vagy katalitikus kötőanyaeltávolításhoz képest. Emiatt a legtöbb kötőanyag legalább két komponensből áll. Filamentek készítéséhez használt kötőanyagrendszerek olyan anyagokat is tartalmaznak, melyek rugalmasságuknak köszönhetően lehetővé teszik a huzal feltekerését. Ilyen anyagok például az amorf poliolefinok és elasztomerek [14].

1.3. Utókezelési eljárások

A különböző technológiákkal előállított zöld darabok további kezeléseket igényelnek, hogy kész darabokat, tisztán fémes testeket kapjunk. A kezelések során először a kötőanyag rendszert távolítjuk el, mely szükséges volt az fémpor megkötésével az extrudáláshoz és alakadáshoz. Végül az így létrejött barna darabokat magas hőmérsékleten szintereljük. Amennyiben indokolt a mechanikai tulajdonságok növelése, végezhetünk további eljárásokat, például hőkezelést vagy meleg izosztatikus préselést [28, 36].

A kötőanyag eltávolítási eljárások közt megkülönböztethetünk:

- Oldószeres: általában triklóretánt vagy heptánt használnak,
- Termikus: hőmérséklettartomány 60-600°C lehet
- Katalitikus: salétromsav vagy oxálsavat használnak 110-150°C között [28].

A kötőanyag mentesítés után létrejött barna darabok magas hőmérsékletű szinterelés után eléri a kész állapotot, és közben a zöld darabhoz képest 12-20% zsugorodáson mennek keresztül [14].

Szinterelés során megkülönböztetünk 6 anyagtranszport mechanizmust:

- Felületi diffúzió
- Rácsdiffúzió
- Szemcsehatár diffúzió
- Párolgás és kondenzáció
- Viskózus áramlás
- Plasztikus áramlás [14].

A szinterelési folyamat után a munkadarabok porozitása 12-20% között várható az alkalmazott hőmérséklettől függően. Szinterelés során különböző gázokat is használnak, például nitrogént, argont és hidrogént. A szinterelés több tényező befolyásolja:

- Fűtési sebesség
- Szinterelési hőmérséklet
- Szinterelési folyamat ideje
- Kemence atmoszférája [14]

2. A próbatestek gyártása kísérletterv alapján

A kísérlet felépítéséhez előzetes tervezés nélkül szükség lett volna számos beállítási kombináció gyártására, ha vizsgálni kívánjuk több változó, faktor együttes hatását. Azonban költség és időcsökkentés miatt sem javasolt minden beállítás elkészítése, hiszen vannak folyamatok vizsgálatára irányuló rendszerezett módszerek. Vannak folyamatok –például gépipari berendezések-, melyek beállításai viszonylag gyorsan megváltoztathatók ahhoz képest, hogy egy kísérlet több év is lehet a mezőgazdaságban. Az elterjedt módszerek három csoportba sorolhatók: [31]

- Faktoriális tervek: több faktor egyidejű vizsgálata.
- Válaszfelület tervek: összefüggések részletekbe menő vizsgálata és jelleggörbe mezők modellezése
- Négyzetes tervek: kettőnél több beállítási lehetőséggel bíró faktor egyidejű vizsgálata [31]

Faktoriális tervek közé tartozik az egyik legismertebb olyan kísérletmódszertan, mely lehetővé teszi a kísérletek számának jelentős csökkentését, Genichi Taguchi nevéhez fűződik. Taguchi felfogásának két alapeleme a veszteségfüggvény és a robosztus folyamatok modellje. A veszteségfüggvénnyel lehetséges a célértéktől való eltérések leírása pénzügyi egységekben. A robosztus folyamatok modellje azt jelenti, hogy a folyamatokat érzéketlenné kell tenni a zavaró hatásokkal és befolyásoló tényezőkkel szemben. A kézben tartható tényezők hatását Taguchi jelnek tekinti, míg zajnak az ún. zajfaktorok hatását. A jel/zaj viszonyon alapuló elemzéssel az ismétlések átlagát és az átlag körüli szórást vesszük figyelembe. Az átlagos négyzetes eltérés (MSD) értéke a minőségi jellemző típusának függvénye: [31]

- A célérték a jobb (Nominal is best)
- A kisebb a jobb (Smaller is better)
- A nagyobb a jobb (Larger is better) [30][31]

A kísérlet felépítését tehát Taguchi-féle kísérlettervezéssel végeztük.

2.1. A nyomtatáshoz felhasznált alapanyag bemutatása

A nyomtatáshoz a BASF Ultrafuse 17-4PH jelölésű filamentet használtuk, mert a fémnyomtatással foglalkozó irodalmakban az egyik leggyakoribb anyag, és a 17-4PH fémport tartalmazó filamentek gyártóinak száma meglehetősen kevés. Az alapanyag néhány jellemzőit tartalmazza az 1. táblázat.

1. táblázat BASF Ultrafuse 17-4PH filament műszaki adatai [10]

Tulajdonságok	
<i>Filament átmérője</i>	1,75 mm
<i>Átmérőjének tűrése</i>	$\pm 0,05$ mm
<i>Körkörüsség tűrése</i>	$\pm 0,05$ mm
<i>Nyomtató</i>	Szálhúzásos (FFF)
<i>Fúvóka hőmérséklet</i>	230-250°C
<i>Nyomtató tálca hőmérséklet</i>	90-100°C
<i>Fúvóka átmérője</i>	$\geq 0,4$ mm
<i>Nyomtatási sebesség</i>	15-50 mm/s

2.2. Kísérleti környezet felépítése

A zöld darabok előállításához Craftbot Flow IDEX XL típusú szálhúzásostechnológiával működő nyomtatót használtunk. A nyomtató néhány főbb jellemzőit az 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat Craftbot Flow IDEX XL nyomtató jellemzői

Nyomtatási tulajdonságok	Craftbot Flow IDEX XL
<i>Nyomtatási technológia</i>	FFF
<i>Nyomtatási méret</i>	X: 425 mm x Y: 250 mm x Z: 500 mm
<i>Utazási sebesség</i>	160 mm/s-ig
<i>Nyomtatási sebesség</i>	160 mm/s-ig
<i>Nyomtató tálca</i>	Fűthető, eltávolítható, rugóacél mágneses nyomtatótálca
<i>Nyomtatótálca hőmérséklet</i>	40-110°C
<i>Támogatott filament átmérő</i>	1,75mm
<i>Fúvóka átmérő</i>	Alap: 0,4 mm, tartozék: 0,25 mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm
<i>Fej hőmérséklete</i>	40-300°C

2.3. Gyártási paraméterek kiválasztása

Ugyanolyan formájú, fröccsöntéshez szabványos próbatesteket, de eltérő beállítással nyomtattunk próbatesteket. Minden darab 100% kitöltéssel, XY irányban készült. Változóként három paramétert választottunk ki a CraftWare szoftverben megtalálható számos közül, amelyek egyrészt hatással lehetnek a mechanikai tulajdonságokra, másrészt a nyomtatási időre:

- Nyomtatási sebesség [mm/s]
- Rétegvastagság [mm]
- Kitöltési orientáció [°]

A nyomtatási sebesség alapvetően a nyomtató fej mozgási sebességére, ezáltal a nyomtatás idejére van hatással. Lehetséges azonban, hogy a rétegek közti adhézió mértékét is befolyásolja, így akár a szakítószilárdság is változhat. Nyomtatási sebességre ugyan a gyártói ajánlás magasabb értékeket is megenged, nálunk abban az esetben filament elakadást észlelt a nyomtató. A nyomtatási sebesség értékeit ezért alacsonyabb tartományból választottuk meg. A rétegvastagság megadja, hogy a szoftver a CAD modellt milyen vastagságú rétegekre szeletelje fel. Minél kisebb a rétegvastagság, annál esztétikusabb, pontosabb darabot kapunk, viszont ezzel a nyomtatási idő növekszik. A kitöltési orientáció minden esetben párhuzamos vonalak voltak, és ezek szögét változtattuk az XY síkhoz képest.

A változó paraméterek egyenként 3-3 értéket vehettek fel. Taguchi-féle kísérlettervezés alapján állítottunk fel 9 beállítási sorozatot. Ezeket mutatja a 3. táblázat.

3. táblázat. Próbatestekhez használt különböző nyomtatási paraméterek

Kísérlet száma	Rétegvastagság [mm]	Nyomtatási sebesség [mm/s]	Kitöltési szög [°]
#1	0,2	15	0
#2	0,2	25	45
#3	0,2	35	90
#4	0,3	15	45
#5	0,3	25	90
#6	0,3	35	0
#7	0,4	15	90
#8	0,4	25	0
#9	0,4	35	45

A rétegvastagság csökkenésével és a 90°-os kitöltési orientációval lesz feltételezhetően a legmagasabb a szakítószilárdság. A leghosszabb nyomtatás az #1-es kísérlet esetén 6 óra 56 perc volt, míg a legrövidebb a #9 kísérletnél 1 óra 55 perc.

2.4. Zöld darabok tömegeloszlása

Kötőanyag eltávolítás és szinterelés után is csökken a munkadarabok tömege. A kezelések hatásossága megadható a zöld darabok tömegének barna darabok vagy szinterelt állapot tömegéhez való viszonyítással. A zöld darabok sűrűségét a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat. Zöld darabok sűrűsége

Kísérlet száma	1db zöld termék tömege átlagolva [g]	Zöld termék sűrűsége [g/cm ³]
#1	29,2	4,44
#2	29,33	4,46
#3	27,52	4,18
#4	27,76	4,22
#5	27,23	4,14
#6	27,51	4,18
#7	28,62	4,35
#8	29,24	4,44
#9	28,88	4,39

Mivel a CAD modellből kinyerhető egy darab térfogata (6.58 cm³), illetve ismerjük az egyes kísérletek tömegeit, ebből az adatból számolható a sűrűség.

2.5. Zsugorodás/tömörítés mértékének meghatározása

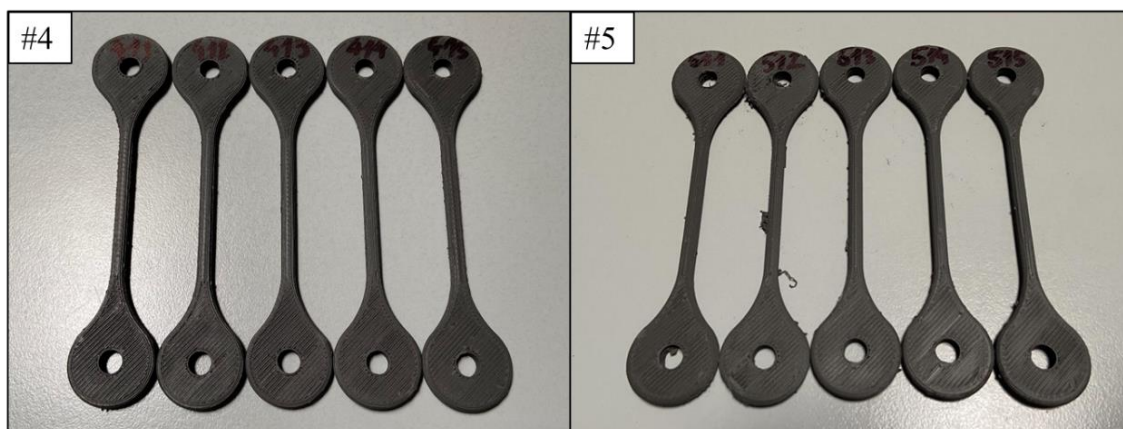
A zsugor mértékének számításához először a zöld darabok furattávolságát Mitutoyo PJ-A3000 típusú profil projektorral határoztuk meg. A zöld állapotban mért értékeket az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat. Zöld darabok furattávolsága

Kísérlet száma	Zöld darabok furattávolsága átlagolva [mm]
#1	101,841
#2	101,876
#3	101,814
#4	101,896
#5	101,742
#6	101,851
#7	101,770
#8	101,799
#9	101,792

2.6. A legyártott próbatestek

A zöld darabokat a 11. ábra mutatja.



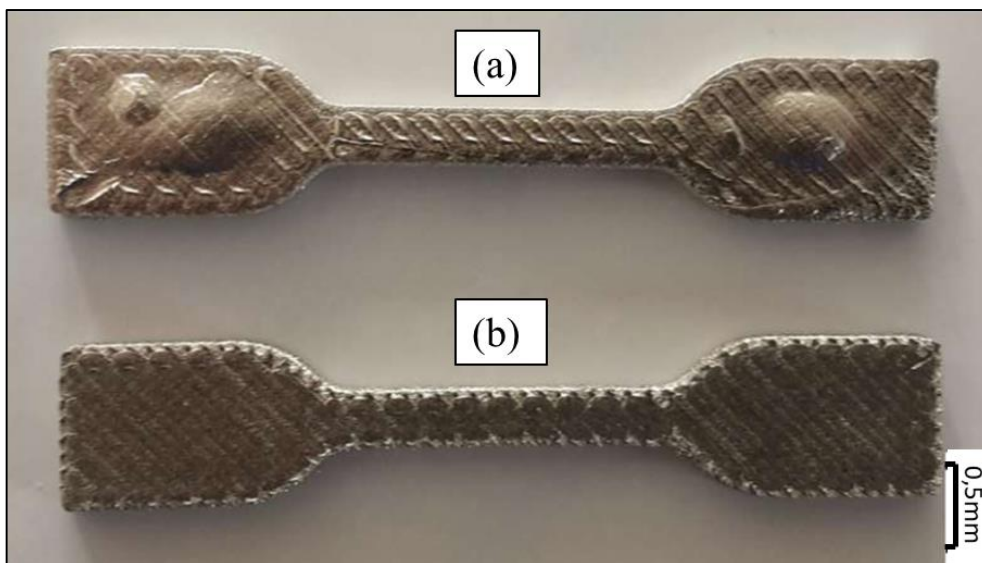
11. ábra. 4. és 5. kísérlet zöld darabjai

Kísérleti megfontolásból átadtunk két zöld darabot az AFT Hungary Kft. részére, ahol fémfröccsöntéssel foglalkoznak, és ehhez rendelkezésükre áll a kötőanyag eltávolító és szinterelő folyamat is. A BASF filamenthez tartozó ajánlásától ugyan eltérő kezeléssel ment át a két darab, de érdekesnek tartottuk, hogy valóban sikertelen lesz-e a folyamat. A 12. ábra mutatja a kapott eredményt.



12. ábra Szinterelés utáni eredmény BASF filamentból az AFT Hungary Kft.-nél

Oldószeres kötőanyag eltávolításnál fontos, hogy megfelelő mértékben vonjuk ki a kötőanyagot a darabból. Ellenkező esetben a 13. ábrán is látható hólyagosodás fog történni. Az (a) jelű darab oldható kötőanyag komponenseinek nagyjából 94%-át vonták ki, míg a (b) jelűnél nagyjából 99%-át. A (b) jelűnél hólyagok jelentek meg a polimerek degradációja során keletkező gőz miatt.



13. ábra. 17-4PH anyagú szinterelt darabok 94% (a) és 99% (b) kötőanyag eltávolítással

[14]

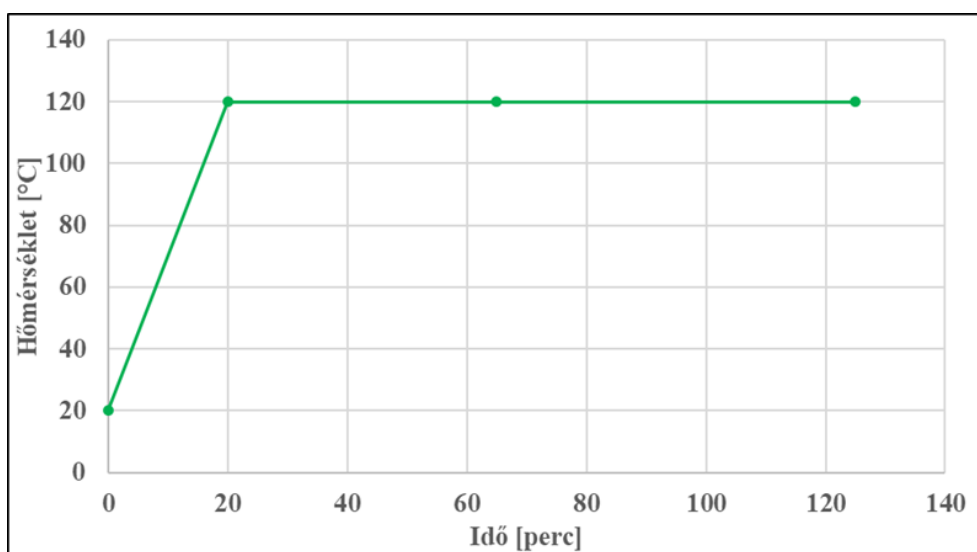
3. A kötőanyageltávolítási és a szinterelési folyamat bemutatása

Különböző fémporból és kötőanyag rendszerből felépülő anyagok eltérő kötőanyag eltávolítási és szinterelési technológiákat, atmoszférát igényelnek. Az egyetemen ilyen speciális berendezések nem állnak rendelkezésre, ezért a BASF hivatalos ajánlásának megfelelő és akkreditált tevékenységet folytató szervezet, az Elnik System GmbH szolgáltatását vettük igénybe. Kötőanyag eltávolítási és szinterelési folyamatot (D&S) 316L és 17-4PH anyagokra 2 hetente indítanak. A zöld darabok kiérkezése után egy hétre várható a kész darabok visszaérkezése.

A zöld darabokat tartalmazó csomagunk kiérkezése után az Elnik System felvette velünk a kapcsolatot elektronikus úton. A késztermékek tulajdonságait a kötőanyag eltávolítás és szinterelés folyamatának paraméterei jelentősen befolyásolják, ezért nem akartuk adatok nélkül hagyni ezt a fejezetet. Kérésünkre, röviden összefoglalva rendelkezésünkre bocsátották a két eljárás lényegesebb adatait, melyeket a következő szakaszokban fejtek ki.

3.1. A kötőanyageltávolítás folyamata

A kötőanyag eltávolítás ciklusában először előfűtenek 120°C-ra alacsony hevítési sebességgel. Kezdetben 5, majd 1 és 0.5°C/perc sebességgel. Amint elérték a 120°C-ot, 45percig tartják a hőmérsékleten. Ezután kezdődik a saváramlás, melyet 1mm falvastagságonként 1 óráig végeznek. A sav áramlása 3.4 ml/perc. Amikor a sav áramlása befejeződik, 120°C-on 90 percig tartanak hőn, hogy megtisztítsák a kemencét és előkészítsék a nyitásra. A kötőanyag eltávolítást a 14.ábra mutatja.



14. ábra. Kötőanyag eltávolítás diagramja

Az Elnik System-nél kötőanyag eltávolításhoz a CD 3045 típusú kemencéjüket használják, mely a BASF által szabadalmaztatott Catamold kötőanyagrendszer eltávolításához igazodik. Ennek néhány tulajdonságai az alábbiak:

- Belső kamrájának mérete 508×686×686 mm,
- Hőmérséklet tartomány: 20-1500°C-ig
- 44 polc helyezhető el benne
- 4,5kg polcanként és összesen 198kg termék helyezhető be. [29]

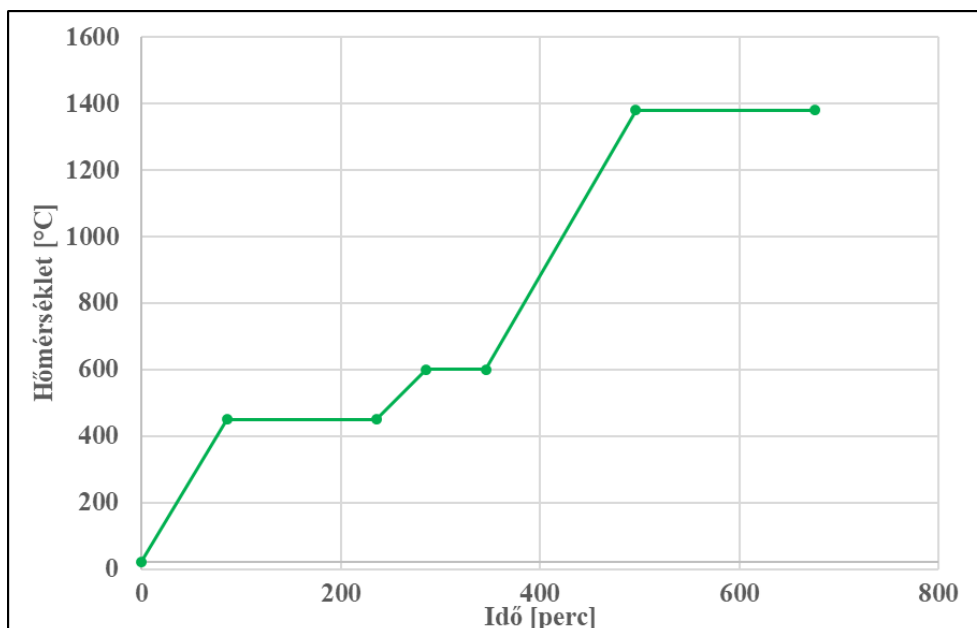
A 15. ábrán látható a CD 3045 típusú kemence. A kemencéhez PLC alapú számítógép vezérlés tartozik. Minden egyes folyamatot automatikusan Microsoft Excel-ben rögzítenek, hogy fejlesszék a kezelési profil programját. Számos előnye van a számítógéppel irányított kötőanyag eltávolításnak, különösen olyan területeken, mint a repülőgépipar, orvosi ipar és autóipar, ahol az átláthatóság és a nyilvántartások vezetése fontos. [29]



15. ábra. CD 3045 típusú kötőanyag eltávolító kemence [29]

3.2. A szinterelés folyamata

A szinterelés ciklus először egy kötőanyag eltávolítási résszel kezdődik. Először 450°C-ra 5°C/perc hevítéssel fűtenek, majd 150percig tartják a hőmérsékletet. A következő lépcső 600°C, amire 3°C/perc sebességgel hevítenek és 60percig tarták a hőmérsékletet. A szinterelési lépcső 1380°C-on történik, melyet 5°C/perc hevítési sebességgel érnek el, és 180 percig tartják a hőmérsékletet. Végül a kemencét szabadon hagyják hűlni szobahőmérsékletig.



16. ábra. Szinterelés diagramja

A szintereléshez MIM3045 típusú kemencét használnak. A szinterelő és a kötőanyag eltávolító kemence is saját fejlesztésű berendezésük. A MIM 3000 típusú kemencék szinterelés előtt bármilyen fém bármilyen kötőanyagának eltávolítására alkalmasak, anélkül, hogy a két folyamathoz külön berendezést kellene igénybe venni, ezáltal elkerülhető a darabok mozgatása. Ezt gázzáró tűzálló fémretorta és gázkezelő rendszer segítségével érik el. Lamináris gázáramlás garantálja minden ciklusnál az egységes tulajdonságú darabokat. A gázkezelő rendszer tömegáramlást szabályzó fémretortából, forró zónából, és vákuum szivattyúhoz speciálisan tervezett parciális nyomásszelepből áll. A forró zónába és a retortába jutó gázok különböző áramlása garantálja, hogy csak minimális mennyiségű kötőanyag tapadjon a kemence hideg falához. A retortának két gázgyűjtő kamrája van, amely furatokkal rendelkezik, hogy biztosítsa a polcokon keresztül a forró gáz egyenletes áramlását. A kemencében hitelesített hőelemek segítségével 6 zónában figyelik a hőmérsékleteket. A hőmérsékletek eltérését ún. ACCU-Temp linearizációs technikával korrigálják, amely lehetővé teszi, hogy minden zóna $\pm 1^\circ\text{C}$ -on belül legyen a retortában lévő aktuálshoz képest. Az ACCU-Temp technikával fémfröccsöntött anyagok magas sűrűségét tudják elérni a tényleges olvadásponthoz közel anélkül, hogy a túlfűtés miatt torzulás lépne fel a darabokban. [29]

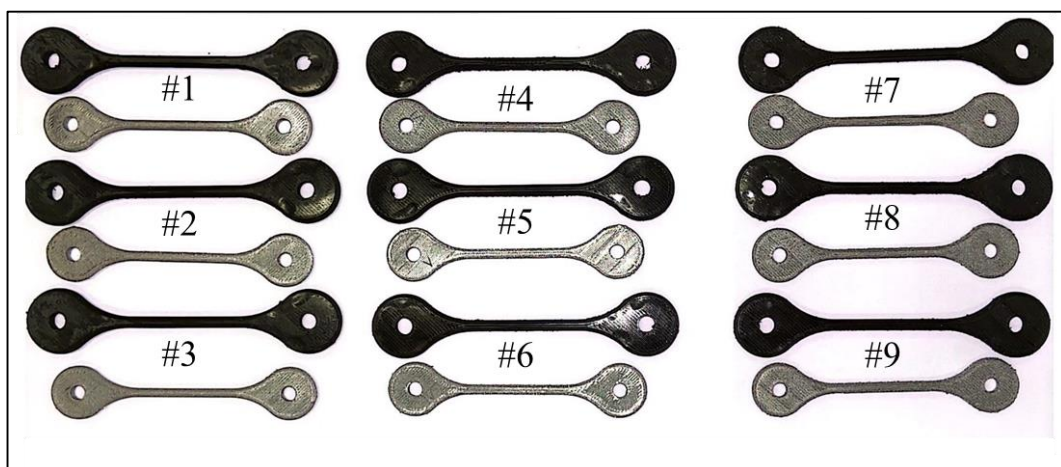
Néhány tulajdonsága a MIM 3045 típusú kemencének (17. ábra):

- Használható retorta méret: 420×460×610 mm
- Használható térfogat: 116 l
- Polcok száma: 44
- Szivattyú sebessége: 85m³/óra [29]



17. ábra. MIM 3045 típusú szinterelő kemence [29]

A kötőanyag mentesítés és szinterelés után visszaérkezett kész mintákat mutatja a 18. ábra.



18. ábra. Kész darabok

Az 5. táblázat folytatásaként a zsugor mértékének meghatározását a 6. táblázat rögzíti. A zsugor mértékét a zöld darabok és szinterelt darabok furattávolsága alapján határoztuk meg Mitutoyo PJ-A3000 típusú profil projektossal. A zsugor terjedelme azonban kicsi, közel 1%, tehát a zsugor mértéke kevésbé függ a zöld darabok gyártási paramétereitől.

6. táblázat. Zöld és szinterelt darabok furattávolsága alapján a zsugor mértéke

Kísérlet száma	Zöld darabok furattávolsága átlagolva [mm]	Szinterelt darabok furattávolsága átlagolva [mm]	Zsugor mértéke [%]
#1	101,841	86,502	15.061
#2	101,876	86,132	15.454
#3	101,814	85,824	15.705
#4	101,896	86,534	15.076
#5	101,742	86,335	15.143
#6	101,851	86,207	15.359
#7	101,770	87,217	14.300
#8	101,799	86,351	15.175
#9	101,792	86,503	15.020

A zöld és kész darabok összehasonlítása alapján a #3-as kísérletnél volt a legnagyobb, míg a #7-es kísérletnél volt legkisebb a zsugor mértéke. A 4. táblázat folytatásaként a kész darabok tömegét és tömegveszteségét a 7. táblázatban láthatjuk.

7. táblázat. Zöld és kész darabok tömege és tömegvesztesége

Kísérlet száma	1 db zöld termék tömege átlagolva [g]	1 db kész termék tömege átlagolva [g]	Tömegveszteség [%]
#1	29,20	25,35	13.19
#2	29,33	25,82	11.96
#3	27,52	24,23	11.95
#4	27,76	24,28	12.53
#5	27,23	24,07	11.60
#6	27,51	25,59	6.99
#7	28,62	24,71	13.65
#8	29,24	25,12	14.09
#9	28,88	25,26	12.52

4. A mechanikai anyagvizsgálatok mérési eredményeinek kiértékelése

A szakítóvizsgálat célja a szilárdsági és képlékenységi jellemzők, és ezek kapcsolatának meghatározása, melyeket tervezés, méretezés és ellenőrzés során használunk. A mérés elve, hogy a szakítógép befogó pofái közé helyezett próbatestet egytengelyű húzóigénybevétellel terheljük szakadásig. Mérés közben előre meghatározott időközönként méri a gép a terhelő erőt, megnyúlást és az időt.

4.1. Mérési eljárás leírása

A kész, szinterelt állapotú darabokon a fémes anyagok egyik alapvető mechanikai tulajdonságát, a szakítószilárdságot határoztuk meg. Ehhez az egyetemen megtalálható Instron 5900R 4482 típusú, univerzális szakítógépet használtuk. 100 kN erőmérő cellával felszerelt. A gép által rögzített adatokat több fájl is tartalmazza. Ezekből többet közt ábrázolhatók a szakítódiagramok is.

A 19. ábra mutatja a szakítógépbe behelyezett egyik darabot.



19. ábra. Próbatest a szakítógép befogó pofájában

4.2. Mérési eredmények

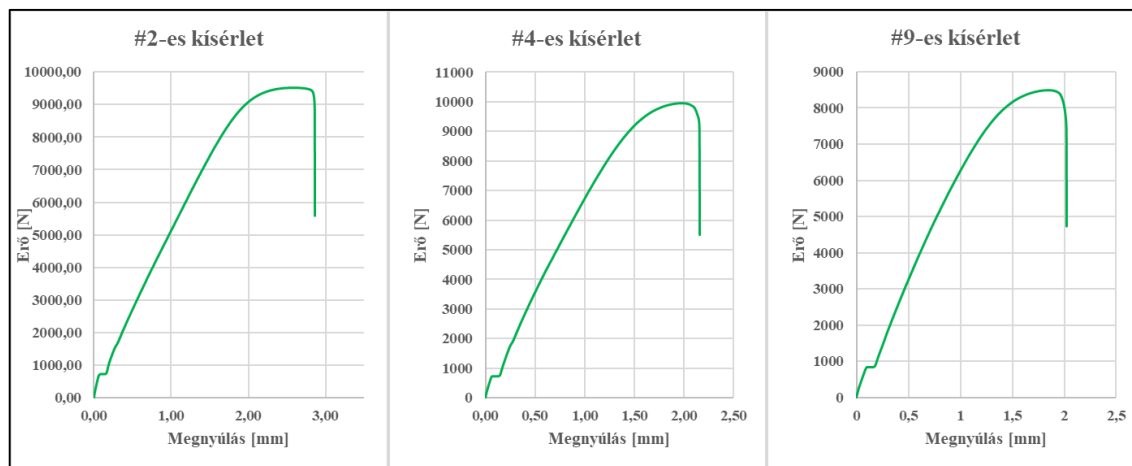
A szakítógépet által rögzített értékeket az 8. táblázat mutatja.

8. táblázat. Szakítógépet által mért értékek

Kísérlet száma	Próbatest 1 [MPa]	Próbatest 2 [MPa]	Próbatest 3 [MPa]	Szakítószilárdságok átlaga [MPa]
#1	749	758	755	754
#2	793	803	796	797
#3	690	679	677	682
#4	666	664	654	661
#5	433	648	650	577
#6	395	470	648	504
#7	601	594	632	609
#8	597	614	586	599
#9	650	668	648	655

Az eltérő rétegvastagságú kísérletek közül a legmagasabb értékeket a #2, #4 és #9-es beállítások eredményezték.

A #2, #4 és #9 kísérletek szakítódíagramjait a 20. ábra mutatja.



20. ábra. A #2, #4 és #9 beállítás legmagasabb értéket adó szakítódíagramjai

4.3. Eredmények kiértékelése

A mechanikai vizsgálatok alatt rögzített értékekből elkészítettem a Taguchi kísérletterv analízisét. A kísérletek kiértékeléséhez Taguchi kísérlettervet alkalmaztam, melynél az 1. táblázatban lévő faktorok hatását vizsgáltam. Minden faktornál 3-3 változó módosítása történt. A kiértékeléseket a Minitab szoftver segítségével végeztem.

4.3.1. A szakítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése

Mivel jelen esetben szakítóvizsgálatra fogom származtatni az eredményeket és a minél nagyobb húzófeszültség elérése a cél, így a Nagyobb a jobb típussal dolgoztam, mely az alábbi összefüggéssel számítható (1):

$$\bar{A}NE_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2}}{n} \quad (1)$$

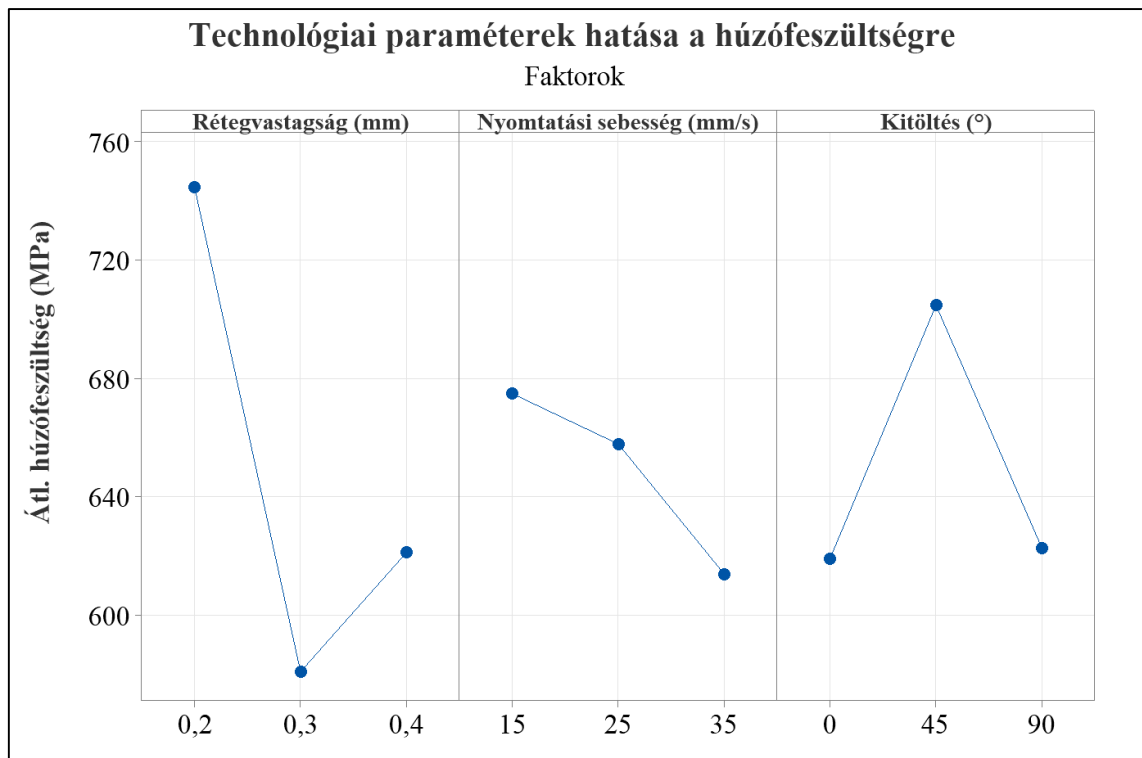
Ahol:

- $\bar{A}NE_i$ - az átlagos négyzetes eltérés (MSD: Mean Squared Deviation)
- i - a kísérleti beállítás száma
- y_{ij} – az i beállítás típus mellett mért j -ik érték
- n - ismétlések száma

Az (1) képlet alapján a kísérletben előforduló zajokat úgy szűrtük, hogy az elvárás szerint a nagyobb értékek a jobbak (nagyobb húzófeszültség). A kapott eredményeket a 9. táblázattól kezdődően láthatjuk.

9. táblázat. A számításokkal kapott átlagolt értékek

Szint	Rétegvastagság (mm)	Nyomtatási sebesség (mm/s)	Kitöltés (°)
1	744,4	674,8	619,1
2	580,9	657,8	704,7
3	621,1	613,9	622,7
Delta	163,6	60,9	85,6
Rangsor	1	3	2



20. ábra. A 9. táblázatból vett eredmények grafikonjai

A 9. táblázatban látható átlagolt értékekből számolható tovább az említett Jel-zaj viszony (Signal-to-noise). A Jel-zaj módszer alkalmazása során törekedni kell a lehető legoptimálisabb beállítások megválasztására, hogy minimalizálni lehessen a kitűzött célérték körüli szórást. Ennél az elemzési módszernél azon faktorok hatását értjük melyekre van ráhatásunk, zajnak pedig a zajfaktorok hatását. Ennek alapján az átlag körüli szórást is figyelembe veszi, nem csak az ismétlések átlagát. A Jel-zaj viszony a 9. táblázatban található átlagolt értékekből számolható tovább a következő képlet segítségével (2):

$$J / Z = -10 \log_{10}(\overline{ANE}) \quad (2)$$

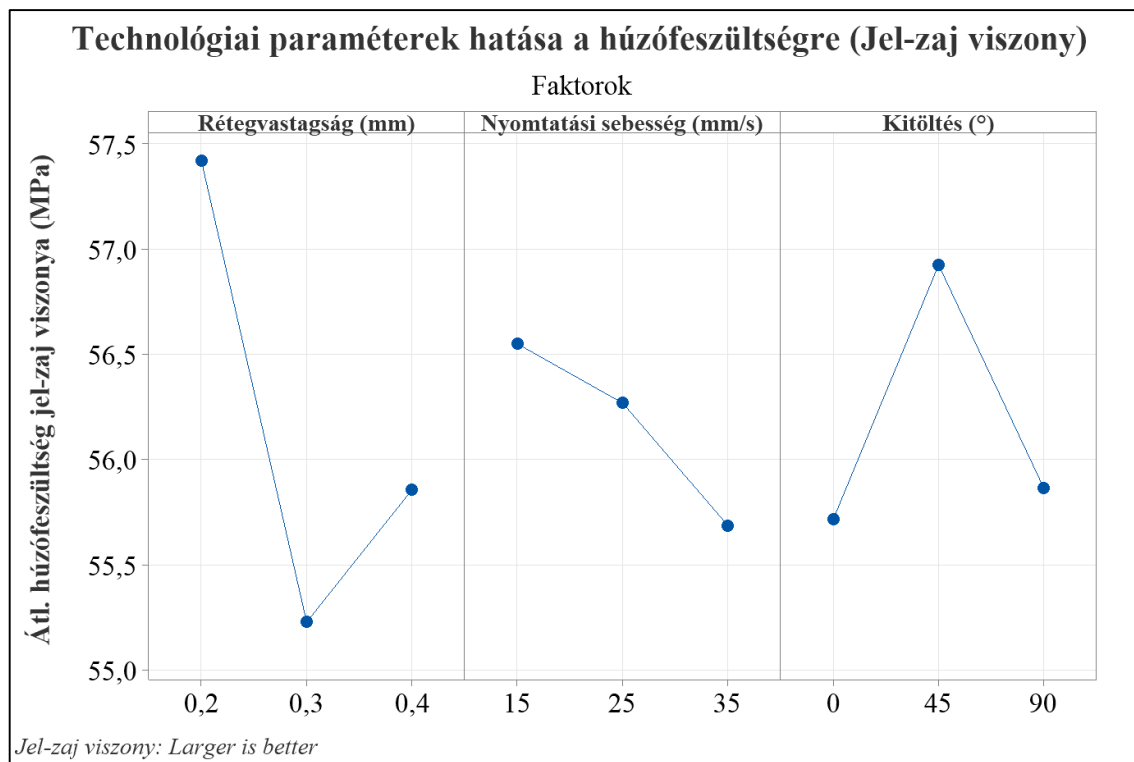
Ezzel az egyenlettel átszámolt értékeket a 10. táblázat rögzíti. Az egyes faktorok befolyásoló hatásának erősségét a táblázatok Delta sorában található értékek mutatják. Ezen értékek alapján alakul ki a rangsor a következő sorban. A faktorok hatását a Rank sorban találjuk, az 1-es jelölésű a legnagyobb hatású a kísérletben, míg a 3-nak van a legkisebb hatása. Megfigyelhető, hogy vannak bizonyos faktorok, melyek közel azonos hatással bírnak az adott kísérlet szempontjából, de a delta kisebb értéke miatt a rangsorban is lejjebb kerülnek.

Szint	Rétegvastagság (mm)	Nyomtatási sebesség (mm/s)	Kitöltés (°)
1	57,42	56,55	55,72
2	55,23	56,27	56,92
3	55,86	55,69	55,86
Delta	2,19	0,86	1,21
Rangsor	1	3	2

10. táblázat A Jel-zaj viszony szerint átlagolt értékek

A kapott értékek segítségével a Minitab szoftvere képes felvenni a Jel-zaj viszony diagramokat. Az SNR diagramok jól mutatják az egyes faktorok hatásait a kísérletben, hogy mely értéknél növelték, vagy épp csökkentették a szakítóvizsgálat eredményeit (21. ábra).

Ezt a módszert főhatás elemzésnek nevezzük



21. ábra. Jel-zaj viszony szerint átlagolt értékek grafikonjai

A főhatás-diagramokból jól látható, hogy a legnagyobb hatással bíró folyamatparaméterek a rétegvastagság (1) és a kitöltési orientáció (3).

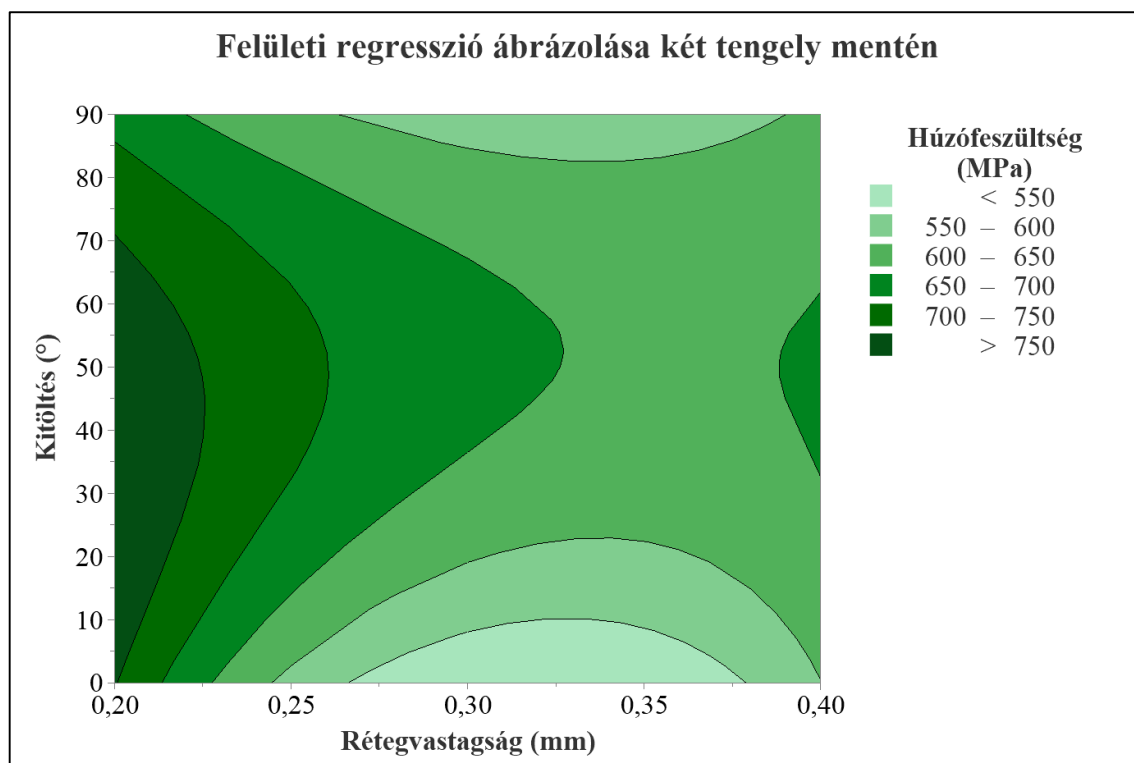
A két fő befolyásoló faktor kereszthatásainak szemléltetésére varianciaanalízist hoztam létre (ANOVA⁵), ahol a másodrendű regressziós egyenlet eredménye egy felület (22. ábra). A regressziós egyenletek megoldásához kódolt egységeket alkalmaztam annak érdekében, hogy az eltérő nagyságrendű technológiai paraméterek kölcsönhatását össze tudjuk hasonlítani. Egy analitikai módszerrel -1 és +1 közötti egységekre kódoltam őket a Minitab szoftver segítségével.

Ha a válaszfelület görbületet tartalmaz, akkor magasabb fokú polinom modellt használunk. A másodrendű regressziós egyenlet (1):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

- Y: a válaszváltozó,
- β_0 : a konstans érték, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ az együtthatók,
- $x_1, x_2, \dots, x_k$: a mért értékek,
- ε : a hiba kifejezés. [31]

A felületi regressziók ábrázolása látható a különböző faktorok alapján a 22. ábrán.



22. ábra. Felületi regresszió ábrázolása rétegvastagság és kitöltés szerint

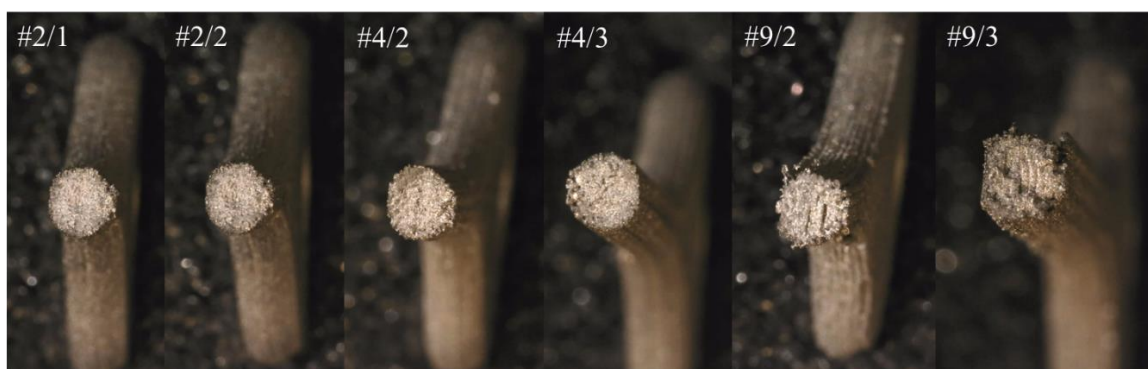
⁵ ANOVA: Analysis of Variance, varianciaelemzés

5. A gyártástechnológiai paraméterek befolyásának elemzése elektronmikroszkópi felvételek segítségével

A pásztázó elektronmikroszkóp roncsolásmentes vizsgálatot tesz lehetővé, nagy felbontású képalkotás és nagysebességű felvétel által. Olyan topográfiai képalkotás, mellyel 10-500.000x nagyítás is lehetséges. Különböző detektorok segítségével széleskörű információkhoz juthatunk a vizsgált mintákról. Bizonyos esetben az eljárás hátránya, hogy korlátozott a behelyezhető minta mérete, és a vizsgálni kívánt anyag vákuumkompatibilis kell legyen.

5.1. Előzetes felvételek készítése

A pásztázó elektronmikroszkópi felvételek előtt készítettünk néhány felvételt a különböző rétegvastagságú kísérletek legnagyobb szakítószilárdsági értékeit eredményező minták töretfelületéről. Az előzetes felvételek készítéséhez Dino-Lite típusú digitális mikroszkópot használtunk. A felvételeket mutatja a 23. ábra.



23. ábra. Digitális mikroszkópi felvételek

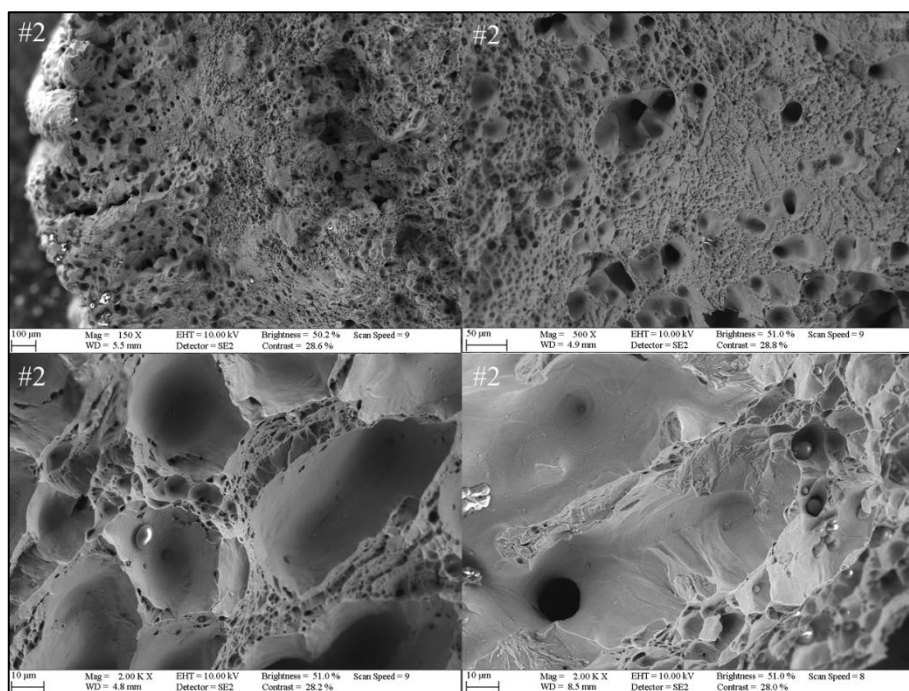
5.2. Elektronmikroszkópi felvételek készítése

A SEM felvételek készítéséhez az egyetemen megtalálható Zeiss Sigma 300 VP típusú berendezést használtuk. A berendezést a 24. ábrán láthatjuk.



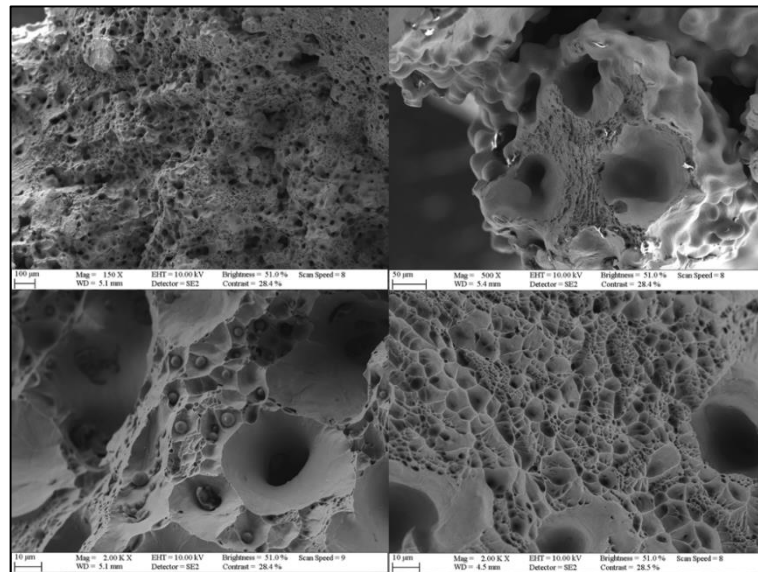
24. ábra. Zeiss Sigma 300 VP pásztázó elektronmikroszkóp

A felvételek készítéséhez egyrészt SE detektort használtuk, ami a széles eloszlású, de kis energiájú elektronokat képes észlelni és megállapítható vele a felület alakja, morfológiája. Továbbá a BSD detektort használtuk, ami képes a periódusos rendszer különböző elemeit azonosítani, úgymond rendszámérzékeny. A #2-es kísérlet felvételeit a 25. ábra mutatja.



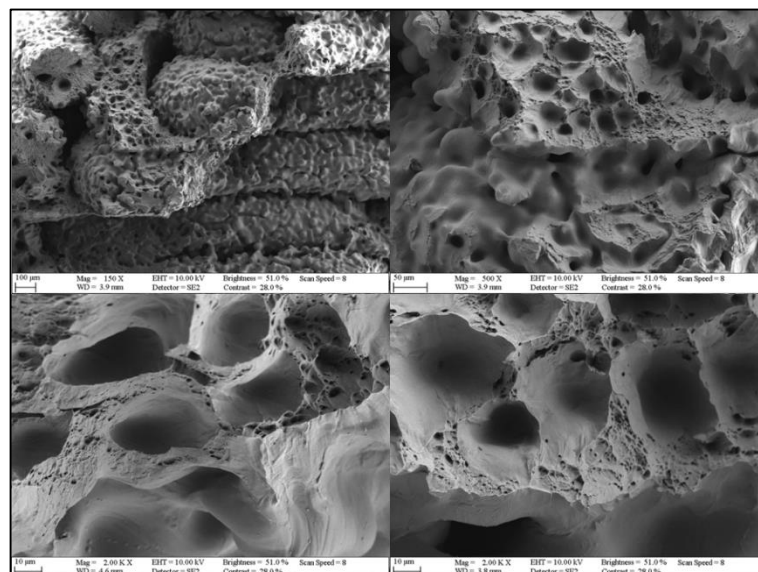
25. ábra. #2-es kísérlet SEM felvétele SE detektorral

A #4-es kísérlet felvételei a 26. ábrán láthatók.



26. ábra. #4-es kísérlet SEM felvételei SE detektorral

A #9-es kísérlet felvételei a 27. ábrán láthatók.



27. ábra. #9-es kísérlet SEM felvételei SE detektorral

5.2.1. Vizsgálati eredmények

Mindegyik vizsgált kísérleti minta esetén jelentős porozitás figyelhető meg a felületeken. A porozitás többek közt függ a szinterelés körülményeitől is. Érdekes jelenség, hogy a #8-as kísérlet mintáján kisebb nagyítás mellett a rétegek felülete erősen szemcsés, viszont 2000x nagyításnál kevésbé tűnik porózusnak, mint a másik két minta esetében. A rétegek összeolvadása úgy tűnik annál eredményesebb, minél kisebb a rétegvastagság.

Összefoglalás

A kutatásunk célja az volt, hogy meghatározzuk a nyomtatási beállítások hatásait a mechanikai tulajdonságokra és mikrostruktúrára. Ehhez FFF technológiával magas fémpor tartalmú BASF 17-4PH filamentből Craftbot Flow IDEX XL nyomtatóval állítottunk elő próbatesteket Taguchi-féle kísérlettervezés alapján. A zöld mintákat külső szolgáltató, az Elnik System GmbH kötőanyag eltávolította és szinterelte a BASF előírásának megfelelően.

Feltevéseink egy része beigazolódott, például a rétegvastagság jelentős hatással van a szakítószilárdságra, de nem minden esetben. A 0,3 mm rétegvastag a szakítószilárdságra nézve csökkentő hatással volt, erre nem találtunk még egyértelmű választ. Ugyanakkor a másik két paraméter hatása a Taguchi-elemzés alapján nem várt eredményt mutat. A kitöltési szög közül a 90° helyett a 45°-os bizonyult jobbnak a szakítószilárdságra nézve. A nyomtatási sebesség csökkentésével a szeleteléskor láttuk, hogy az időre természetesen befolyással van, azonban nem volt magától értetődő, hogy szilárdsági tulajdonságra is hatással lehet. Ez feltételezhetően annak köszönhető, hogy lassabb nyomtatási sebességgel a rétegek közti kapcsolat számára kedvezőbb viszonyok biztosítottak.

A jövőben több irányba is tovább léphetünk a téma kapcsán. Vizsgálhatjuk mélyebben a jelen kutatásban kiválasztott paramétereket más értékekkel, a Taguchi-elemzést alapul véve. Felállíthatunk új faktorok alapján kísérlettervet a jelen eredmények alapján, ezáltal további pontosabb hatásokat tudnánk rögzíteni. Elvégezhetjük más alapanyaggal a meglévő beállítási kombinációkat. Figyelhetjük a fúvóka kopását, hiszen a fémpor tartalmú filament abrazív hatással van rá. Kötőanyag eltávolításhoz és szintereléshez nem álltak rendelkezésünkre berendezések, de irodalmi információk alapján a kötőanyag eltávolítás és szinterelés körülményei is hatással vannak a késztermék szilárdsági tulajdonságaira és mikrostruktúrájára. Továbbá hőkezelésekkel is módosítható a 17-4PH jelű acél tulajdonságai.

Irodalomjegyzék

- [1] Szabó Dániel (2021): Csípőprotézisek berögzülésének és élettartamának optimalizálási lehetősége fémnyomtatás és mesterséges intelligencia segítségével. Mesterséges intelligencia –interdiszciplináris folyóirat, III. évf. 2021/1. szám. 73-85. doi: 10.35406/MI.2021.1.73
- [2] Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi, Adnan Alashkar, Shamma Alasad, Haya Aljaghoub, Hegazy Rezk, Mohammad Ali Abdelkareem, Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals, Ain Shams Engineering Journal, Volume 14, Issue 11, 2023, 102516, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057>)
- [3] Tosto, C.; Tirillò, J.; Sarasini, F.; Cicala, G. Hybrid Metal/Polymer Filaments for Fused Filament Fabrication (FFF) to Print Metal Parts. Appl. Sci. 11, 2021, 1444.
- [4] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 18.)
<https://www.xometry.com/resources/materials/precipitation-hardening-stainless-steel/>
- [5] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 15.)
<http://www.nsalloys.com/products/stainless-steel-bar/austenitic/grade-630.html>
- [6] Alain Bernard, Jean-Pierre Kruth, Jian Cao, Gisela Lanza, Stefania Bruschi, Marion Merklein, Tom Vaneker, Michael Schmidt, John W. Sutherland, Alkan Donmez, Eraldo J. da Silva, Vision on metal additive manufacturing: Developments, challenges and future trends, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 47, 2023, Pages 18-58, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.08.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581723001256>)
- [7] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 18.)
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5341680/mod_resource/content/1/ISOASTM52900.11961.pdf
- [8] Jones, J.; Vafadar, A.; Hashemi, R. A Review of the Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion. J. Manuf. Mater.Process. 2023, 7, 162. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050162>
- [9] Luigi Maria Galantucci, Alessandro Pellegrini, Maria Grazia Guerra, Fulvio Lavecchia 3D Printing of parts using metal extrusion: an overview of shaping debinding and sintering technology Advanced Technologies & Materials Volume 47 2022 ISSN: 2620-0325 (print), ISSN: 2620-147X (online)
- [10] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023.10.06.)
Technical Datasheet 17-4 PH
https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/02/Ultrafuse_17-4PH_TDS_EN_v1.1.pdf
- [11] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 12.)
<https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>
- [12] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 18.)
<https://www.desktopmetal.com/>
- [13] M. Chemkhi, J. Marae Djouda, M.A. Bouaziz, J. Kauffmann, F. Hild, D. Retraint, Effects of Mechanical Post-Treatments on Additive Manufactured 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion, Procedia CIRP, Volume 104,

- 2021, Pages 957-961, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.161>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121010593>)
- [14] Aghnia Ilmiah Nurhuda, Sugeng Supriadi, Yudan Whulanza, Agung Shamsuddin Saragih, Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 66, 2021, Pages 228-237, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.018>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521002553>)
- [15] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 18.)
<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>
- [16] Suwanpreecha, C.; Manonukul, A. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals* 2022, 12, 429. <https://doi.org/10.3390/met12030429>
- [17] Selema, A.; Ibrahim, M.N.; Sergeant, P. Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. *Energies* 2022, 15, 1076. <https://doi.org/10.3390/en15031076>
- [18] Laser PBF, Dejene ND, Lemu HG. Current Status and Challenges of Powder Bed Fusion-Based Metal Additive Manufacturing: Literature Review. *Metals*. 2023; 13(2):424. <https://doi.org/10.3390/met13020424>
- [19] Papazoglou, E.L., Karkalos, N.E., Karmiris-Obratański, P. et al. On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review. *Arch Computat Methods Eng* 29, 941–973 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s11831-021-09601-x>
- [20] Bin Liu, Yuxiang Wang, Ziwei Lin, Tao Zhang, Creating metal parts by Fused Deposition Modeling and Sintering, *Materials Letters*, Volume 263, 2020, 127252, ISSN 0167-577X, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X19318841>)
- [21] Henry, T.C., Morales, M.A., Cole, D.P. et al. Mechanical behavior of 17-4 PH stainless steel processed by atomic diffusion additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 2103–2114 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06785-1>
- [22] Yaozhong Zhang, Aljoscha Roch, Fused filament fabrication and sintering of 17-4PH stainless steel, *Manufacturing Letters*, Volume 33, 2022, Pages 29-32, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.06.004>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846322000281>)
- [23] Kedziora, S.; Decker, T.; Museyibov, E.; Morbach, J.; Hohmann, S.; Huwer, A.; Wahl, M. Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing. *Materials* 2022, 15, 6278.
<https://doi.org/10.3390/ma15186278>
- [24] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 20.)
<https://kor-fitting.hu/anyagminosegek/#>
- [25] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 20.)
<https://markforged.com/es/resources/blog/metal-3d-printing-materials-1>
- [26] M. Sadaf, M. Bragaglia, F. Nanni,

- [27] A simple route for additive manufacturing of 316L stainless steel via Fused Filament Fabrication, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 67, 2021, Pages 141-150, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.055>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521003029>)
- [28] Reza Molaei, Ali Fatemi, Nam Phan, Multiaxial fatigue of LB-PBF additive manufactured 17–4 PH stainless steel including the effects of surface roughness and HIP treatment and comparisons with the wrought alloy, *International Journal of Fatigue*, Volume 137, 2020, 105646, ISSN 0142-1123,
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105646>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112320301778>)
- [29] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 24.)
<https://elnik.com/products/>
- [30] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 24.)
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>
- [31] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 24.)
https://johanyak.hu/files/u1/segedlet/problemamegoldo_modszerek/kiserlet2002_2003_01.pdf
- [32] Elektronikus forrás (Utolsó megtekintés dátuma: 2023. 11. 24.)
https://help.craftbot.com/wp-content/uploads/zendesk-export/FlowIdex_FlowIdexXL_usermanual_2020_v01_HUN.pdf
- [33] Yong-Hoon Cho, So-Yeon Park, Ju-Yong Kim, Kee-Ahn Lee, 17-4PH stainless steel with excellent strength–elongation combination developed via material extrusion additive manufacturing, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 3284-3299, ISSN 2238-7854,
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.228>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423006919>)
- [34] Gurminder Singh, Jean-Michel Missiaen, Didier Bouvard, Jean-Marc Chaix, Additive manufacturing of 17–4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering, *Additive Manufacturing*, Volume 47, 2021, 102287, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102287>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421004474>)
- [35] Saveria Spiller, Sondre Olsøybakk Kolstad, Nima Razavi, Fabrication and characterization of 316L stainless steel components printed with material extrusion additive manufacturing, *Procedia Structural Integrity*, Volume 42, 2022, Pages 1239-1248, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.158>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622007156>)
- [36] Pellegrini, A., Lavecchia, F., Guerra, M.G. et al. Influence of aging treatments on 17–4 PH stainless steel parts realized using material extrusion additive manufacturing technologies. *Int J Adv Manuf Technol* 126, 163–178 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11136-3>