

**NYÍREGYHÁZI EGYETEM
MŰSZAKI ÉS AGRÁRTUDOMÁNYI INTÉZET**

Műszaki alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológiai Tanszék

Gépészmérnöki alapképzési szak,

NYÍREGYHÁZA

Additív gyártási technológia vizsgálata: a lézer-szinterezéses 3D nyomtatásról

Készítette: László Méri Anna

Konzulensek: Százvai Attila, műszaki oktató

Dr. Dezső Gergely, főiskolai tanár

2024

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
1. DUÁLIS KÉPZŐHELYEM	2
2. 3D NYOMTATÁS	4
2.1. Szakirodalmi feldolgozás	4
2.2. Az additív gyártásról.....	4
3. PROBLÉMAFELVETÉS	7
3.1. Ferdepályás kilökő szerkezet gyártástechnológiájának megváltoztatása	7
3.2. Alkalmazott fémnyomtató: a Lumex Avance 25 bemutatása	7
4. FERDEPÁLYÁS KILÖKŐ BEMUTATÁSA	9
4.1. Megmunkálási eljárások összehasonlítása	10
5. ANYAGFELHASZNÁLÁS ÉS ADATOK	13
6. ADDITÍV GYÁRTÁSRÓL SZERZETT GYAKORLATI TAPASZTALATOK.....	17
7.ANYAGVIZSGÁLAT.....	26
7.1. Szakítóvizsgálat	27
7.2. Ütőpróba	31
7.3. Keménységmérés	33
7.4. Törésfelület vizsgálata.....	36
7.5. Következtetés a vizsgálatokból.....	39
ÖSSZEFOGLALÁS	42
IRODALOMJEGYZÉK	43

BEVEZETÉS

Az additív gyártás napjainkban az ipar egyik legdinamikusabban fejlődő területe, amely jelentős változásokat hozott a gyártástechnológiákban. Ez az innovatív technológia új lehetőségeket teremt a bonyolult geometriájú alkatrészek előállításában, az egyedi gyártásban és a prototípus-készítésben, de persze hozzájárul a gyártási költségek csökkentéséhez és az anyagfelhasználás optimalizálásához is. Az additív gyártás fejlődése lehetővé teszi, hogy olyan megoldásokat valósítsunk meg, amelyek korábban a hagyományos gyártási technológiák keretein belül elképzelhetetlenek voltak. Az ipar ezen ágazatának kutatása és alkalmazása nemcsak a technológiai innovációk előmozdítása miatt kiemelkedő, hanem azért is, mert fenntarthatósági szempontból is jelentős előnyöket kínál.

Dolgozatom megírásában a duális képzőhelyemen szerzett gyakorlati tapasztalatok nagy értéket jelentettek. Az elmúlt évek során, a Jász-Plasztik Kft.-nél töltött idő alatt olyan elméleti és gyakorlati tudást sajátítottam el, amelyet a szakdolgozatom elkészítésekor hasznosítani tudtam. A vállalatnál végzett munka során mélyebb betekintést nyerhettem az additív gyártás alkalmazási lehetőségeibe, a szerszámgyártás folyamataiba és a gyártási technológiák optimalizálásába. A cég felszereltsége hozzájárult ahhoz, hogy a dolgozatomban nemcsak az elméleti ismeretekre, hanem a gyakorlati tapasztalatokra alapozva tárgyalhassam a választott témát.

Mind emellett az egyetemem anyagvizsgálathoz szükséges eszközkészlete is nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a kutatásaimat elvégezzem, alátámasszam, vizsgálhassam.

Dolgozatom célja, hogy bemutassa az additív gyártásban rejlő lehetőségeket és kihívásokat egy konkrét gyakorlati példa, a ferdepályás kilövő szerkezet elemzésén keresztül. A dolgozatban részletesen fogom ismertetni az additív gyártás technológiáját, különös figyelmet fordítva a lézerszinterezéses 3D fémnyomtatásra, valamint az ezen technológiával készült alkatrészek anyagvizsgálatát. A vizsgálatok során anyagszerkezeti vizsgálatokkal végzem el a 3D nyomtatott alkatrészek tulajdonságainak vizsgálatát. A dolgozat végén következtetéseket vonok le az additív gyártás alkalmazási lehetőségeiről, előnyeiről és korlátairól.

Az additív gyártás területén végzett kutatás és elemzés nemcsak az ipar számára jelentős, hanem személyes szempontból is különleges értékkel bír, hiszen lehetőséget adott arra, hogy a tanulmányaim során megszerzett ismereteket és a gyakorlati tapasztalatokat egy egységes, átfogó munkában ötvözzem. A dolgozatommal szeretném megmutatni, hogyan szolgálhatja ez a technológia a jövő iparágainak fejlődését.

1. Duális képzőhelyem

A Jász-Plasztik Kft. egy magyar tulajdonú vállalkozás, amely 1990-ben alakult meg Jászberényben. Az alapítók célja egy olyan cég létrehozása volt, amely képes a műanyagipar területén magas színvonalú termékeket gyártani és fejleszteni. Az évek során a vállalat folyamatosan bővült és fejlődött, köszönhetően a modern technológiák bevezetésének és a stratégiai beruházásoknak. A Jász-Plasztik mára a magyar ipar egyik meghatározó szereplőjévé vált, és jelentős exporttevékenységet is folytat. [3]

A vállalat nyíregyházi telephelye az egyik legfontosabb és legnagyobb gyártóegysége. Ez a telephely kulcsszerepet játszik a cég termelési kapacitásában és technológiai fejlődésében. A Nyíregyházán található üzem modern infrastruktúrával és fejlett gyártóberendezésekkel van felszerelve, amelyek lehetővé teszik a nagy volumenű, kiváló minőségű termékek előállítását. A telephelyen számos műanyagipari terméket gyártanak, többek között autóipari alkatrészeket, háztartási eszközöket és elektronikai komponenseket. [3]

A Jász-Plasztik Kft. tevékenységi köre rendkívül széles, amely a következő fő területeket öleli fel:

- **Műanyagipari Termékek Gyártása:** A cég számos különböző műanyag terméket gyárt, amelyek közé tartoznak az autóipari alkatrészek, háztartási eszközök, valamint az elektronikai ipar számára készült komponensek. A termelési folyamatok során a legmodernebb technológiákat és anyagokat alkalmazzák, hogy biztosítsák a termékek magas minőségét és tartósságát.
- **Fémfeldolgozás:** A Jász-Plasztik nemcsak a műanyag-, hanem a fémiparban is jelentős szereplő. A cég különböző fém alkatrészeket és szerkezeteket gyárt, amelyek szintén főként az autóiparban kerülnek felhasználásra.
- **Szerszámgyártás:** A vállalat saját szerszámgyártó részleggel rendelkezik, amely képes a legbonyolultabb szerszámok és formák előállítására is. Ez lehetővé teszi számukra, hogy rugalmasan és gyorsan reagáljanak a piaci igényekre és megrendelőik speciális kéréseire.
- **Újrahasznosítás:** Az egyik fontos tevékenységi terület a környezetvédelem és fenntarthatóság jegyében az újrahasznosítás. A Jász-Plasztik különböző műanyag hulladékokat dolgoz fel és hasznosít újra, ezzel is hozzájárulva a környezetvédelemhez és a fenntartható gazdasági működéshez. [3]

A Jász-Plasztik Kft. nagy hangsúlyt fektet az innovációra és a folyamatos fejlődésre. A vállalat rendszeresen investál kutatás-fejlesztési projektekbe, új technológiák és gyártási módszerek bevezetésébe. Céljuk, hogy mindig az iparág élvonalában maradjanak, és a legmodernebb, legkörnyezetbarátabb megoldásokat kínálják partnereik számára. [1]

A Jász-Plasztik Kft. mára nemzetközi szinten is elismert vállalattá vált, amely számos külföldi piacra is exportálja termékeit. A cég folyamatosan keresi az új lehetőségeket a bővülésre és az új piacok meghódítására. A jövőben is céljuk a magas színvonalú termékek gyártása és a fenntartható működés biztosítása, valamint a folyamatos technológiai és termékfejlesztés. [3]

2. 3D nyomtatás

2.1. Szakirodalmi feldolgozás

A 3D nyomtatás, más néven additív gyártás, a 20. század végén alakult ki. Az első ismert 3D nyomtatási technológia a sztereolitográfia (SLA) volt, amelyet Chuck Hull fejlesztett ki 1984-ben. Az elmúlt évtizedekben gyorsan fejlődött és elterjedt. Az additív gyártási technológiák költségei csökkentek, és a technológia egyre hozzáférhetőbbé vált a kisvállalkozások és az egyéni felhasználók számára is. Az ipari felhasználás mellett, ahol prototípusok és szerszámok készítésére használják, a 3D nyomtatás ma már számos más területen is megjelent, beleértve az egészségügyet, az építőipart, az ékszerkészítést és a divatipart. A 3D nyomtatási technológiák számos különböző típusát fejlesztették ki, amelyek közül a leggyakoribbak: az FDM amelynél műanyag szál (filament) olvasztanak meg és extrudálnak rétegről rétegre; az SLA amely UV-lézer segítségével folyadékot szilárdít; az SLS egy lézer segítségével porított anyagot (műanyagot, fémeket vagy kerámiát) olvaszt össze; a DLP egy digitális fényforrás segítségével szilárdítja meg a fotopolimert; valamint a PolyJet/MultiJet technológia folyékony fotopolimereket permetez a nyomtatófejből, majd ezt UV-fénnyel megszilárdítja. A technológia főbb alkalmazási területei a prototípus készítés, az egészségügy, az autóipar, az építőipar és a divat valamint ékszerkészítés. [4]; [5]; [6]

2.2. Az additív gyártásról

Az additív gyártás ipari elterjedése napjainkban is egyre gyorsabb ütemet mutat. Az additív gyártási technológiák egyik közös vonása, hogy lehetővé teszik a munkadarab közvetlen gyártását a 3D CAD tervezési modell alapján, ami szinte bármilyen formájú alkatrészek előállítását engedi meg szerszámcsere és gépátállítások nélkül. Ezen felül a költségek a termelési mennyiséggel szinte lineárisan változnak, így az egyedi gyártás gazdaságosan megvalósítható.

Az additív gyártáshoz elérhető anyagok skálája folyamatosan bővül, és jelen vannak közöttük műanyagok, fémek, kerámiák, kompozit anyagok, orvosi és biológiai anyagok, építőanyagok, és számos egyéb különleges anyag is. Általában egy adott berendezéssel csak egyféle anyag használható, vagy anyagok egy szűk csoportja dolgozható fel. Jelenleg nem létezik olyan univerzális additív gyártó berendezés, amely minden anyagot kezelni tudna. [7]

Az ISO/ASTM 52900:2015(en) szabvány szerint az additív gyártás olyan eljárás, amely az elektronikus testmodellt közvetlenül felhasználva, anyaghozzáadást megvalósító eljárással hozza létre a munkadarabot. Ez általában rétegről rétegre történik (ISO/ASTM 52900:2015(En), Additive Manufacturing — General Principles — Terminology, 2015). [7]

Az additív gyártás számos előnnyel rendelkezik a hagyományos gyártási eljárásokkal szemben. Kiemelkedő tulajdonsága hogy biztosítja a bonyolult és összetett geometriájú alkatrészek gazdaságos

gyártását. A hagyományos módszerek gyakran korlátozottak a geometriai komplexitás terén, míg az additív gyártmány gazdaságos megoldást kínál kis sorozatok és egyedi alkatrészek gyártására, elkerülve a hagyományos eljárások magas szerszám- és felszerelési költségeit. A gyors és hatékony prototípuskészítés szintén jelentős előny, lerövidítve a fejlesztési ciklusokat. Az additív gyártás anyagtakarékos, mivel csak a szükséges anyagmennyiséget használja fel, minimalizálva a hulladék keletkezését, valamint a generatív tervezéssel kombinálva lehetséges olyan könnyű, de mégis erős szerkezetek létrehozása, amelyek biztosítják a készített eszköz maximális kihasználhatóságát és egyben csökkentik annak súlyát. Ugyanakkor fontos megjegyezni a technológiai korlátait is. A gyártási pontosság és a felületminőség gyakran nem megfelelő, nem úgy mint a hagyományos eljárásoknál, ezért utólagos megmunkálásra lehet szükség. A gyártási idő, valamint az alkalmazható anyagok köre szűkebb lehet, mint más gyártási módszerek esetében, valamint a technológiai költségek jelentősek lehetnek. [7]

Az additív gyártás technológiák rendkívül változatosak, a különböző technológiák megkülönböztetése több szempontból is lehetséges, de főként hét fő kategóriát különböztet meg: [7]

Binder Jetting eljárás esetében por alapú alapanyagot (pl. fém-, kerámia- vagy műanyagpor) használ, amelyre egy folyékony kötőanyagot rétegről rétegre felvisz, mely kötőanyag összekapcsolja a porszemcséket, létrehozva a kívánt háromdimenziós szerkezetet. [7]

Directed Energy Deposition (rövidítve: DED) eljárásoknál egy energiasugár (lézer, elektronnyaláb vagy plazmaív) olvasztja meg és rakja le rétegről rétegre a hozzáadott anyagot (általában huzal vagy por formájában). Ez az eljárás lehetővé teszi a nagy méretű és komplex alkatrészek gyártását is. [7]

Material Extrusion esetében egy speciális fúvóka segítségével olvadt vagy lágy állapotú anyagot (pl. műanyag, fém, kompozit) extrudálnak rétegekből, melyek felépítik a kívánt tárgyat. [7]

Powder Bed Fusion nevű eljárásoknál egy vékony porrétegre fókuszált energiasugár (lézer, elektronnyaláb) hat, szelektíven megolvasztva a port a kívánt alakzatban. A megolvasztott por megszilárdul, és a következő réteg hozzáadásával épül fel a tárgy. A szelektív lézer szinterezés (SLS) és a szelektív lézer olvasztás (SLM) az ebbe a csoportba tartozó legismertebb eljárások. [7] [2]

Sheet Lamination esetében a vékony anyaglapokat (pl. papír, fémlemez) ragasztással vagy egyéb más módszerrel kapcsolnak össze rétegeket, kialakítva a kívánt alakzatot. [7]

A Vat Photopolymerization fényérzékeny folyékony gyantát használ. Egy ultraibolya fényforrás szelektíven polimerizálja (szilárdítja) a gyantát, rétegről rétegre létrehozva a kívánt alakzatot. Az SLA (Stereolithography) technológia ebbe a csoportba tartozik. [7]

Material Jetting elnevezésű technika folyékony fotopolimert, viaszt vagy más anyagot juttat rétegről rétegre a kívánt alakzatban, majd megszilárdítja azokat. [7]

A felsorolt technológiák mindegyike különböző alapanyagokat és gyártási folyamatokat használ, és a választás mindig függ az adott alkalmazás specifikus követelményeitől, például az anyagtulajdonságoktól, a kívánt pontosságtól, a geometriai komplexitástól, és a gyártási költségektől.

[7]

3. Problémafelvetés

3.1. Ferdepályás kilőkő szerkezet gyártástechnológiájának megváltoztatása

Munkám során gyakran feladatom egy-egy alkatrész vagy szerszám gyártástechnológiai tervének elkészítése, amelyeket kézi megmunkálással kell előállítani. Munkaadóm jászberényi üzeme rendelkezik egy modern 3D nyomtató berendezéssel, ami felkeltette érdeklődésemet az ilyen irányú fejlesztések iránt. Felmerült bennem a kérdés, hogy vajon egy 3D nyomtató használatával nem lenne-e lehetséges csökkenteni a speciális alkatrészek gyártási idejét és költségeit, figyelembe véve a fontos szempontokat, mint az alapanyag költsége, a felhasznált gépek és eszközök ára, valamint az alkalmazottak bérköltsége. Érdekes megvizsgálni, hogy a 3D nyomtatás mennyire lehet hatékonyabb és gazdaságosabb megoldás a hagyományos kézi megmunkáláshoz képest.

Éppen ezen okokból mikor arról értesültem, hogy egy szerszámalkatrész nem megfelelően működik, sérült, és pótolni kell, szívesen jelentkeztem a részvételre, hogy a megoldást találjunk a problémára. Az eszköz utánrendelése nem volt megoldás, hiszen a fröccsöntőszerszámokat egyedileg tervezik és készítik el, és általában csak az adott mennyiséget tervezi és gyártja le a beszállító partnercéggel. Általában szerszámalkatrész meghibásodásakor elsősorban javítómunkákat végzünk, majd, ha azzal sem orvosolható a helyzet, cserealkatrészt rendelünk, vagy készítünk. Az adott alkatrész, amely egy ferdepályás kilőkő szerszám volt, ugyan megmunkálható hagyományos eljárással is, de véleményem szerint a nyersanyag megmunkálása és az erre fordított idő jelentősen megdrágította volna a munkaköltségeket. Ez a gondolatmenet vezetett a szakdolgozatom témájának kiválasztásához, amely során a 3D nyomtatást kívántam megfigyelni és vizsgálni, hogy a korszerű és innovatív megoldások milyen mértékben nyújtanak hatékony és költséghatékony megoldást a gyártóiparban. Továbbá arra is választ kerestem, hogy egyes esetekben jobb döntés lehet-e a hagyományos megmunkálási módszerek követése.

A dolgozatom célja tehát, hogy alaposan megvizsgáljam a technológia előnyeit és hátrányait, gyakorlati példákkal alátámasztva, és megállapítsam, hogy mikor és milyen körülmények között érdemes ezt választani. Ezzel a kutatással szeretném hozzájárulni a gyártási folyamatok optimalizálásához és a költségek csökkentéséhez a gyártóiparban.

3.2. Alkalmazott fémnyomtató: a Lumex Avance 25 bemutatása

A LUMEX sorozatú gépeket a Matsuura Machinery Corporation fejlesztette ki. Ezek olyan úttörő megközelítést képviselnek a fém 3D-nyomtatás területén, amely a hibrid gyártási technológiát alkalmazzák. A lézerszinterezéses eljárást egy CNC marással kombinálja egyetlen gépen belül, mely megmunkálás nagy pontossággal rendelkezik, ezen módszerrel egyedülálló módon ötvözi a réteges felépítés előnyeit a hagyományos megmunkálás pontosságával. Ennek köszönhetően a LUMEX

összes rendszere komplex fém alkatrészek gyártását teszi lehetővé, beleértve a bonyolult belső struktúrákat, a finom részletek kialakítását, esetleg a bonyolult hűtőcsatornák integrálását is. Ezeket más gyártási technológiák nehezen vagy egyáltalán nem tudják megvalósítani.[8]; [9]; [10]

A LUMEX Avance 25 először LMF (Laser Metal Fusion) technológiával rétegesen felépíti az alkatrészt a finom fém porból. Minden réteget lézer használatával szilárdul meg, a gép precízen követi a digitális modellt. Ezt követően, ugyanazon a gépen, a beépített nagy sebességű CNC maróegység precíziós utómegmunkálást végez. Ez a belső marás eltávolítja a felesleges anyagot, javítja a felületminőséget, és lehetővé teszi a bonyolult belső struktúrák kialakítását. A teljes folyamat egyetlen gépen zajlik, minimalizálva a kezelési időt és a hibalehetőségeket. Mind emellett a réteges felépítés minimalizálja a szükséges anyagmennyiséget, ezzel csökkentve a hulladék mennyiségét és a gyártási költségeket. [8]; [9]; [10]

A LUMEX Avance 25 az előző gépekhez képest lényegesen megnövelt gyártási sebességgel rendelkezik, ezzel azt eredményezve, hogy fokozottan nő a termelékenység. A pontos sebessége azonban függ az anyagtól, a modell geometriától, és a betáplált paraméterektől. Érdekes azt is kiemelni, hogy ez a modell automatikus porvisszanyerő rendszerrel (APR - Automatic Powder Recovery System) rendelkezik, amely egy jelentős előrelépés a fenntarthatóság és a gazdaságosság terén. Ez egy olyan automatizált rendszer, amely lehetővé teszi a lézeres fém szinterezés során azon pormennyiség visszanyerését, amely nem került felhasználásra, majd ennek újrahasznosítását biztosítja. A rendszer automatikusan összegyűjti a felesleges port, megtisztítja, és újra felhasználhatóvá teszi. [8]; [9]; [10]

4. Ferdepályás kilőkő bemutatása

A szerszám átvételekor átfogó állapotfelmérést végeztünk a Jász-Plasztik üzemében, hogy pontos képet kapjunk annak állapotáról és esetleges hibáiról. Az állapotfelmérés során észleltük, hogy a ferdepályás kilőkőkön jelentős sérülések találhatók, amelyek befolyásolhatják a gyártási folyamat minőségét. A kilőkő vízhűtéses rendszerrel van ellátva, amelynek részeként furatokat alakítottak ki. Ezek a furatok a használat során korróziónak voltak kitéve, ami az anyag felületén sérülési nyomokat hagyott. Ennek következtében a fröccsöntött termékek felületén is észrevehetővé váltak ezek a sérülések, amelyek rontották a végtermék minőségét. A hibás felületek javítását elsősorban lézeres hegesztéssel próbáltuk megoldani. Ez a technológia lehetővé tette, hogy pontosan és hatékonyan orvosoljuk a problémát anélkül, hogy jelentős mértékben beavatkoznánk a komponens szerkezetébe. Az elsődleges felületjavítás átmenetileg megfelelő megoldásnak tűnt, és úgy gondoltuk, hogy sikeresen helyreállítottuk a szerszám működőképességét. Azonban a valóságban az ilyen jellegű javítások esetében többszörös próbák és alapos vizsgálatok szükségesek ahhoz, hogy biztosak lehessünk a javítás tartósságában és pontosságában. A fröccsöntési folyamatot követően derül fény a pontatlanságokra, ezért a fröccsöntött műanyag termékek részletes vizsgálata elengedhetetlen. Ezen vizsgálatok során gyakran szükségessé válik az alkatrész újrahegesztése, hogy biztosítani tudjuk a végtermék minőségét. Így a felületjavítási eljárást többször is meg kell ismételni a megfelelő eredmény elérése érdekében.

Összefoglalva, a munkadarab állapotának felmérése és javítása egy komplex és többlépcsős folyamat, amely alapos szakértelmet és folyamatos ellenőrzést igényel. A kilőkők sérüléseinek kezelése során szerzett tapasztalataink rávilágítottak arra, hogy a lézeres hegesztés hatékony, ám nem végleges megoldás, és a fröccsöntési folyamat során felmerülő pontatlanságokat csak a késztermékek alapos vizsgálatával lehet teljes mértékben kiküszöbölni.

Az alternatív rövid távú megoldások kipróbálása után arra a következtetésre jutottunk, hogy a legésszerűbb döntés a kilőkők újragyártása lenne. E feladathoz a 3D fémnyomtatás technológiáját választottuk. A kilőkők esetében a vízhűtés miatt fennáll annak a valószínűsége, hogy a cseretartozék idővel ismét elkorrodál. Emiatt a 3D fémnyomtatás gyorsabb és pontosabb megoldásnak bizonyult, hiszen a 3D modellek segítségével könnyebben elkészíthető a gyártási program, majd elindítható a gyártási folyamat.

A 3D nyomtatás előnyei közé tartozik, hogy a digitális modellek alapján rendkívül precíz alkatrészek készíthetők. A 3D nyomtatási technológia lehetővé teszi a bonyolult geometriai formák pontos reprodukálását, amit hagyományos gyártási módszerekkel nehéz lenne megvalósítani.

Továbbá, a 3D nyomtatás gyorsabb átfutási időt biztosít, ami különösen fontos, ha sürgős cseretartozékokra van szükség.

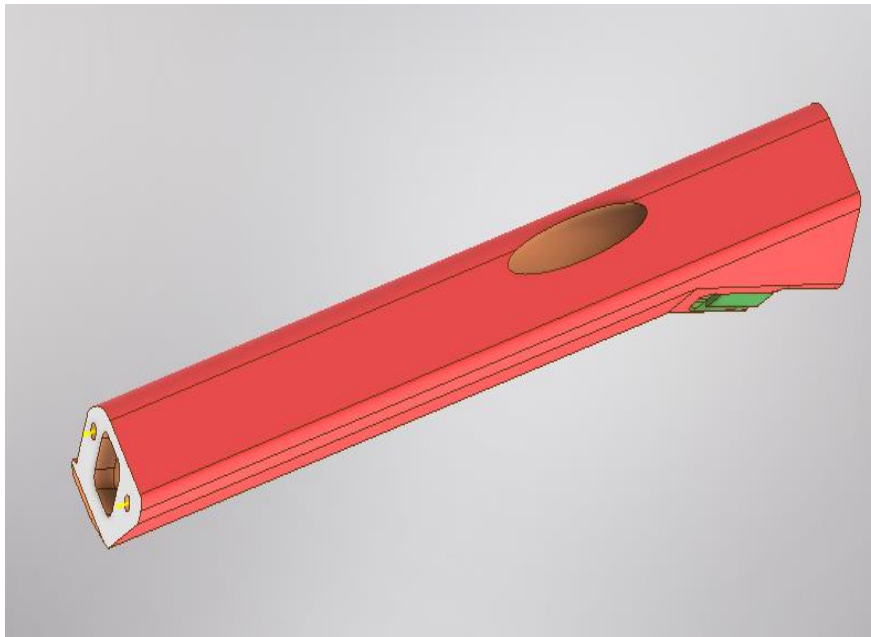
A hagyományos gyártási módszerek, amelyek gyakran igénylik tapasztalt szakemberek közreműködését, hosszadalmasak és költségesek lehetnek. Ezzel szemben a 3D nyomtatás automatizált folyamatként működik, amely kevesebb emberi beavatkozást igényel, és jelentősen csökkenti a gyártási időt és költségeket. A digitális 3D modellek elkészítése és a gyártási program beállítása után a nyomtatási folyamat egyszerűen elindítható és felügyelhető.

A döntésünk tehát a 3D fémnyomtatás alkalmazására alapult, mivel ez a technológia nemcsak a gyártási idő és költségek csökkentését teszi lehetővé, hanem a pontos és megbízható alkatrészek előállítását is garantálja. A vízhűtéses kilökök újragyártásával kapcsolatos tapasztalataink alapján megerősödött az a meggyőződésünk, hogy a 3D fémnyomtatás hosszú távon is fenntartható és hatékony megoldást nyújt a gyártóipar számára. Ezzel a technológiával nemcsak a jelenlegi problémáinkat tudjuk orvosolni, hanem jövőbeli fejlesztési és optimalizálási lehetőségeket is feltárhatunk, amelyek hozzájárulnak a gyártási folyamatok további innovációjához.

4.1. Megmunkálási eljárások összehasonlítása

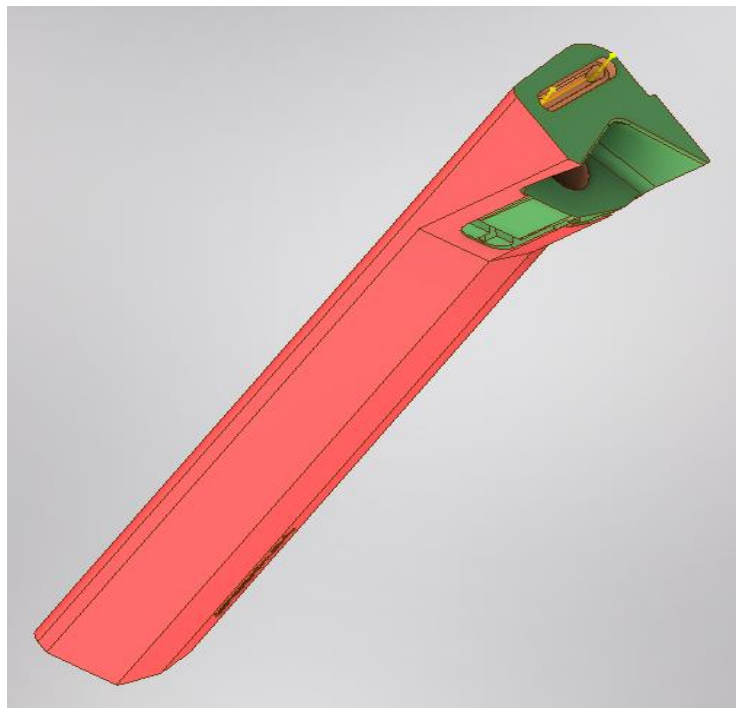
A képeken (1. és 2. sz. ábra) is jól látható, hogy az alkatrész első ránézésre rendkívül egyszerűnek tűnik. Azonban alaposabb vizsgálat, például a modellen történő nagyítás vagy az alkatrész kézzel forgatása során felfedezhetjük, hogy az alkatrész felületei aprólékosan kidolgozott részletekből állnak. Ezeknek a finom részleteknek a megmunkálása hagyományos eljárásokkal rendkívül nehézkes. A munkadarab befogása és pontos méretre marása, köszörülése, a precíz szögben való megtámasztás, valamint a ferde furatok elkészítése mind komoly kihívást jelenthetnek. Ezek a feladatok gyakran időigényesek, mivel a pontos beállításokhoz sokszor több próbálkozásra és finomhangolásra van szükség.

Ezzel szemben a 3D nyomtatás jelentősen leegyszerűsítheti a folyamatot. A 3D nyomtatóhoz szükséges program elkészítése és a nyomtatási folyamat elindítása sokkal gyorsabb és egyszerűbb megoldást kínál. Azonban fontos megjegyezni, hogy a 3D nyomtatók beszerzése és karbantartása jelentős költségekkel járhat. Az ilyen eszközök megvásárlása csak akkor éri meg, ha a kihasználtságuk megfelelően magas. Ritka használat esetén a befektetés nem térül meg, hiszen a magas kezdeti költségek és a rendszeres karbantartási igények hosszú távon sem hoznak gazdasági hasznot.



1. sz. ábra. Ferdepályás kilőkő 3D modell

Forrás: AutoDesk Inventor, saját kép

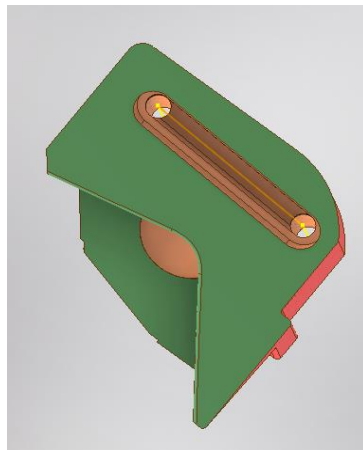


2. sz. ábra. Ferdepályás kilőkő 3D modell

Forrás: AutoDesk Inventor, saját kép

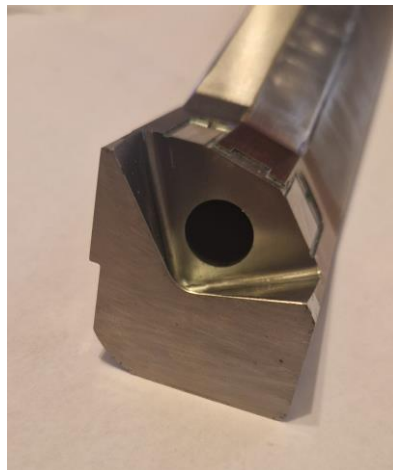
Az additív gyártást támogatja még azt is, hogy olyan komplex geometriák kialakítására is alkalmas, amelyek más gyártási módszerekkel nem hozhatók létre. A modellen megfigyelhető mélyedés (3. sz. ábra) megteremtésére például azért volt szükség, mert az U alakú hűtőcsatornát más eljárásokkal nem lehetett megvalósítani a test belső struktúrájában. Viszont, amikor a szerszám

megrongálódott, az újranyomtatás lehetősége lehetővé tette, hogy a felületet másképpen alakítsuk ki. A nyomtatási folyamat során a réteges fémpor kialakításának és a beépített marónak köszönhetően a furat alakja tökéletesen megvalósítható úgy, hogy az egység zárt maradjon, tehát a folyamat során a rétegeken a hézagok kihagyása teszi lehetővé a teljesen zárt furat létrehozását (4. sz. ábra), amely fontos a megfelelő működés biztosítása érdekében. Ez a technológia nemcsak az alkatrészek pontos helyreállítását teszi lehetővé, hanem a design rugalmasságát is növeli, lehetőséget adva a mérnököknek arra, hogy kreatívan, innovatívan közelítsenek a problémákhoz.



3. sz. ábra. Ferdepályás kilökö hűtőcsatorna kialakítás

Forrás: AutoDesk Inventor, saját kép



4. sz. ábra. Additív gyártással kialakított zárt hűtőcsatorna

Forrás: saját kép

5. Anyagfelhasználás és adatok

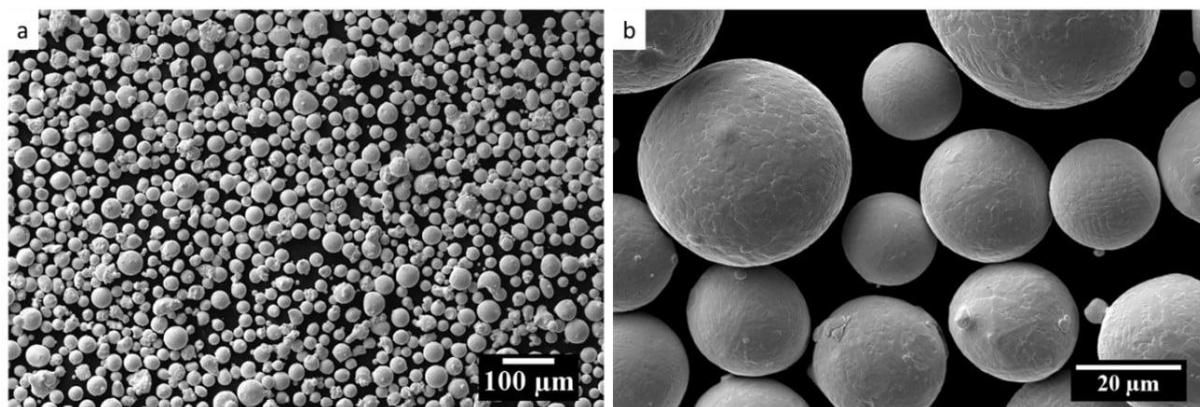
A Jász-Plasztik Kft. esetében nem ritka, hogy teljesen új egységeket nyomtassanak, vagy csak részegységeket, amelyeket később az eltört, megmunkált felületre hegesztenek, vagy teljesen új alap tömböt állítanak elő hagyományos eljárással.

A 18Ni300 egy nagy keménységű martenzites acél, amely kobalt, nikkel és molibdén ötvözet. Ezt az anyagot jellemzően konform hűtésű formaszerszámokhoz és gumiabroncs-formázókhoz használható. [11]

Az alkatrészek gyártási folyamata során a különböző hőkezelési eljárások, a közvetlen öregítés, az oldatban való lágyítás (homogenizálás) lehetővé teszi, hogy az alkatrészek megfelelően megmunkálhatóak legyenek. Ezen alkatrészek szikra-erodálásra, bevonási eljárásra, mikrosúrolásra, hegesztésre, polírozásra is alkalmasak. Ez a sokoldalúság lehetővé teszi, hogy a gyártási folyamat során a tervezési és funkcionális követelményeknek megfelelően alakítsuk az alkatrészek jellemzőit. Ezt a fémport vagy indukciós olvasztással állítják elő, amely vákuumos inertgáz-porlasztással (VIGA) történik, vagy argon alatt végzett olvasztást követően, amely az inertgáz-porlasztás (IGA) folyamatát megelőzi. Ezen eljárások célja gömb alakú morfológiájú por előállítása. Ez szignifikánsan kedvező folyási jellemzőket és magas tömörítési sűrűséget biztosít. A gömb alakú por formája hozzájárul ahhoz, hogy a por jó folyási jellemzőkkel és nagy tömörítési sűrűséggel rendelkezzen. Továbbá, a por alacsony oxigéntartalma és szennyeződés-szintje elősegíti a kohászatilag tiszta anyagok létrejöttét, amelyek fokozott mechanikai teljesítménnyel rendelkeznek. [11]

A martenzites acélok az ultra-nagy szilárdságú, nagy keménységű és nagy szívósságú acélok osztályába tartozik, amelyek előmelegítés nélkül hegeszthetők, lágyított (könnyen megmunkálható) vagy hőkezelt állapotban. Ezek a tulajdonságok ideális jelöltekké teszik őket a lézerporágy-fúziós (L-PBF) eljáráshoz, összetett geometriájú alkatrészek gyártásához olyan igényes alkalmazásokhoz, amelyek a szilárdság, a szívósság és a hőstabilitás kiváló kombinációját igénylik. Az ilyen típusú acélok erősítő mechanizmusai eltérnek a klasszikus szénacélokétól, ahol a hűtés során martenzites, bainites vagy perlit fázisok képződnek, és temperálást alkalmaznak a keménység csapadék szabályozására. Az 18Ni300-AM maraging acélt nagy keménység és szívósság jellemzi, és könnyen hőkezelhető egyszerű termikus öregedési eljárással, hogy kiváló keménységet és szilárdságot érjen el. Az alkatrészek megmunkálhatóak, szikra-erodálhatóak, hegeszthetők, polírozhatók és bevonhatók, ha szükséges. [11]

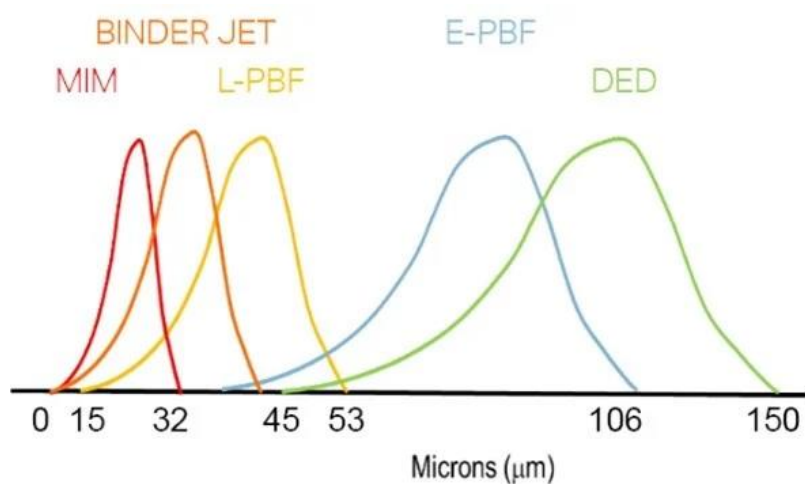
Additív gyártáshoz a por gömb alakú morfológiával és nagy tömörítési sűrűséggel jellemezhető (5. sz. ábra), ami jó folyási tulajdonságokat biztosít. A porágyas eljárásoknál ezek elengedhetetlenek, amikor friss porréteget viszünk fel az ágyra, hogy biztosítsuk az egyenletes alkatrészpépítést. [11]



5. sz. ábra. 18Ni300 fémpor morfológia

Forrás: [11]

A részecskeméret-eloszlás szerint széles skálában kapható (6. sz. ábra), amely az egyes adalékgyártási rendszerekhez igazodik. A végső alkalmazás speciális követelményeihez is szabható, mind a mechanikai teljesítmény, mind a felületi minőség tekintetében. [9]



6. sz. ábra. 18Ni300 fémpor részecskeméret-eloszlás

Forrás: [11]

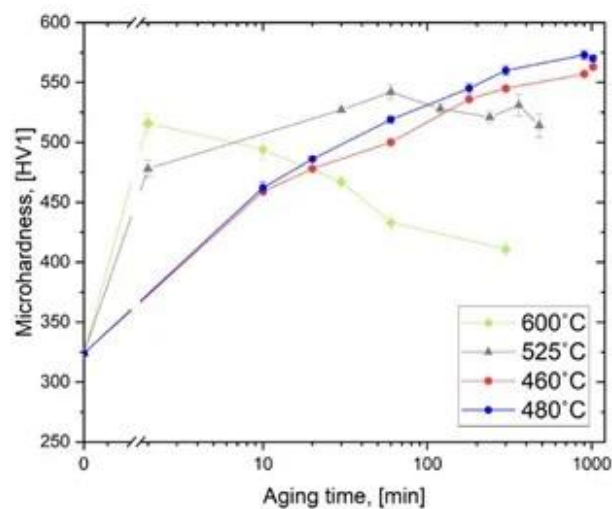
1. sz. táblázat: Alkalmazott eljáráshoz kialakított szemcseméret-eloszlás

Technológia elnevezés	Szemcseméret-eloszlás (μm)
Binder Jetting eljárás	$\leq 16, \leq 22, \leq 32, \leq 38, \leq 45$
Lézer porágyas fúzió (L-PBF)	15-től 53-ig és 10-től 45-ig
Elektronnyaláb porágyas fúzió (E-PBF)	45-től 106-ig
Direct Energy Deposition eljárás (DED)	53-től 150-ig

Forrás: [11]

A maximális keménységet körülbelül 550 HV-t (53 HRC) általában 480°C-on 6-10 órás hőkezelés után érik el, az alkatrész méretétől függően (7. sz. ábra). Alacsonyabb keménység érhető el magasabb hőmérsékleten történő öregítéssel.

Kerülni kell a magasabb hőmérsékletet és a hosszabb tartási időt, mivel a túlzott öregbítés és az ausztenit visszafejlődése miatt lágyulás következik be. [9]



7. sz. ábra. Hőkezelési diagram

Forrás: [11]

A mechanikai adatokat L-PBF eljárás esetében a következő táblázat mutatja be.

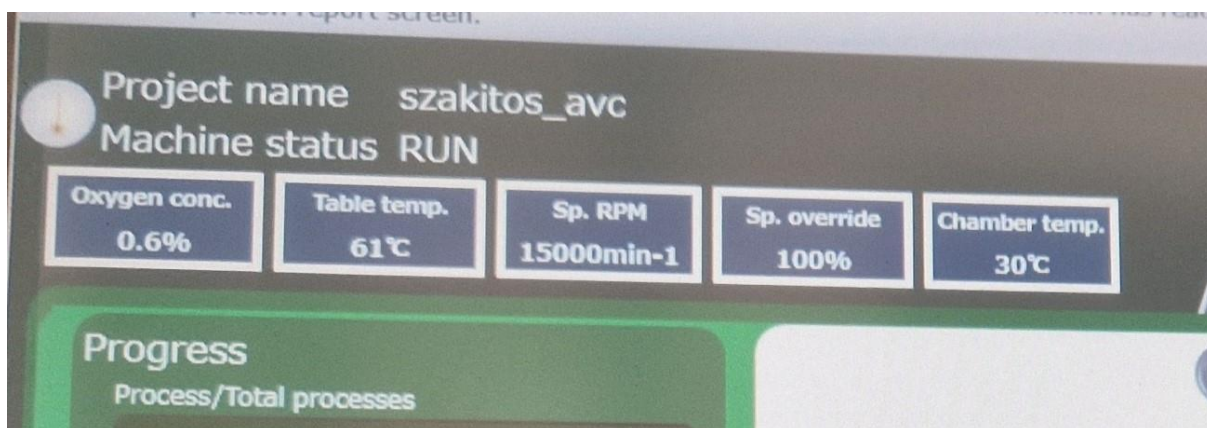
2. sz. táblázat: Mechanikai tulajdonságok 50 µm-es rétegvastagság esetén

Állapot			Nyersen nyomtatott		Hőkezelt	
Irány			Vízszintes	Függőleges	Vízszintes	Függőleges
0,2%-os biztosított szakítószilárdság	R _{p0,2}	[MPa]	960±45	785±54	2013±16	1961±21
Szakító-szilárdság	R _m	[MPa]	1176±9	1036±7	2094±7	2052±10
Nyúlás	A _{lo15}	[%]	17,6±0,8	16,6±1,7	5,2±0,8	6,2±1,0
Young-modulus		[GPa]	171±7	162±6	185±7	179±8
Ütési szívósság	J		56,0±10,0	46,0±3,0	9,9±0,5	9,1±0,8
Keménység	HRC		31	31	53	53

Forrás: [11]

6. Additív gyártásról szerzett gyakorlati tapasztalatokat

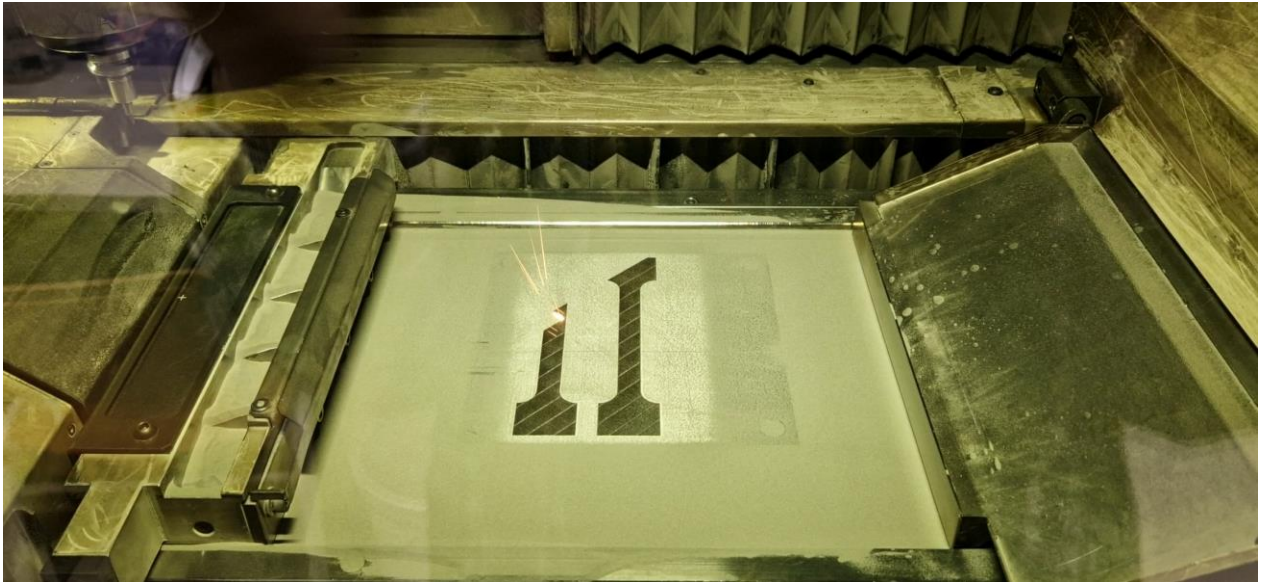
A tényleges gyártás megkezdésekor érdemes ellenőrizni a fémnyomtató aljában található porgyűjtőt. Ezt követően a kívánt fémporral feltöltjük a gépet. A modell betöltésekor a gép programsorában megtalálhatjuk, hogy hány réteget fog nyomtatni, és mennyi porra van szüksége. A modellek kialakítása általában úgy történik, hogy a széleken 3 mm vastagságú, tömör anyagot nyomtatunk, míg a belső területeket, amelyek nem tartalmaznak furatokat vagy más kritikus elemeket, porózusan lesznek kinyomtatva. Ezt követően a gép eltávolítja az oxigént a nyomtatási területről. A nyomtatási folyamat akkor indítható el, ha a belső oxigén koncentrációja 0,8%-ra vagy annál alacsonyabb szintre csökken (8. sz. ábra). A nyomtatási adatok általában általánosak. A vállalat bizonyos alapbeállításokat rendelt egyes fémporokhoz, ezzel könnyítve meg az általános felhasználást. Természetesen további beállításokat is lehet alkalmazni, az ehhez szükséges tudást a vállalat oktatási képzésén lehet elsajátítani.



8. sz. ábra. Nyomtatási terület adatai

Forrás: saját kép

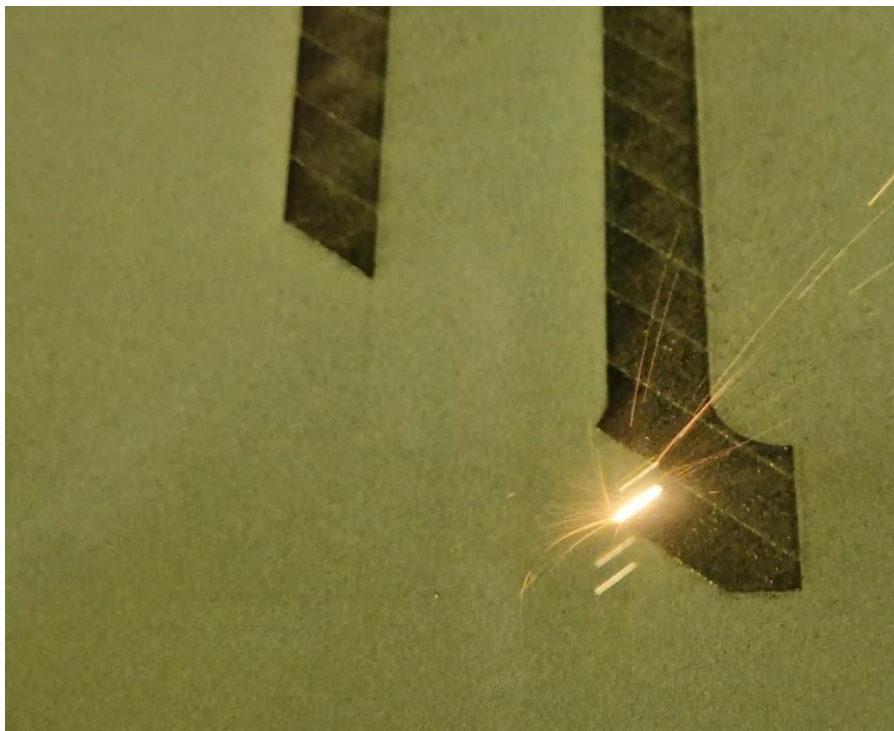
A nyomtatás menete úgy zajlik, hogy a porhúzó egység a nyomtatási területre fémport simít. A réteg vastagságát is ellenőrzi ekkor. A fémpor elterítését követően a lézernyaláb ferde pályán párhuzamos, egyenlő vastagságú részeket éget ki (9. sz. ábra), majd a kontúrvonalat is kiégeti.



9. sz. ábra. Lézer keresztirányú mozgása

Forrás: saját kép

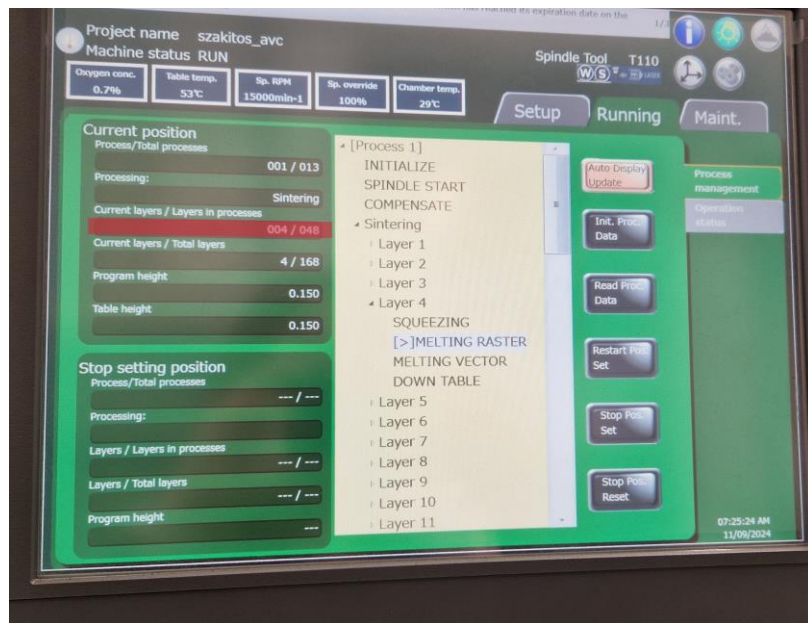
Ezt követően a porhúzó egység visszafelé is húz egy réteg port, a lézer pedig az előző iránnyal tükörirányú részeket érint (10. sz. ábra).



10. sz. ábra. Lézer keresztirányú mozgása

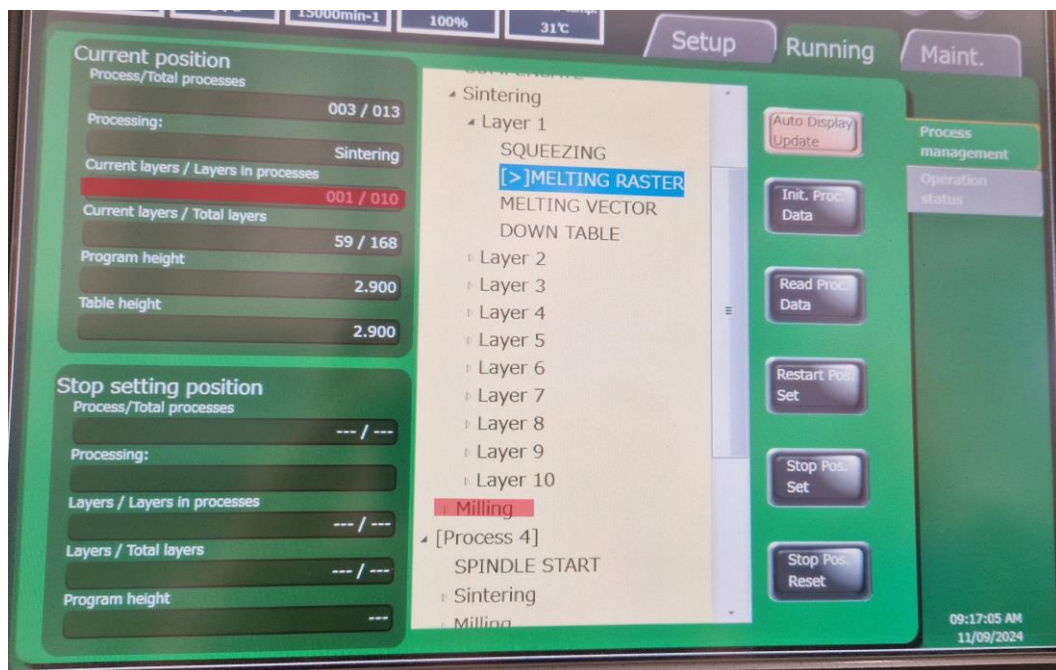
Forrás: saját kép

A folyamat vagy a 3 mm vastagság eléréséig, vagy 10 réteg eléréséig ismétlődik (11. és 12. sz. ábra).



11. sz. ábra. 3 mm tömör fal lézerezése marás előtt

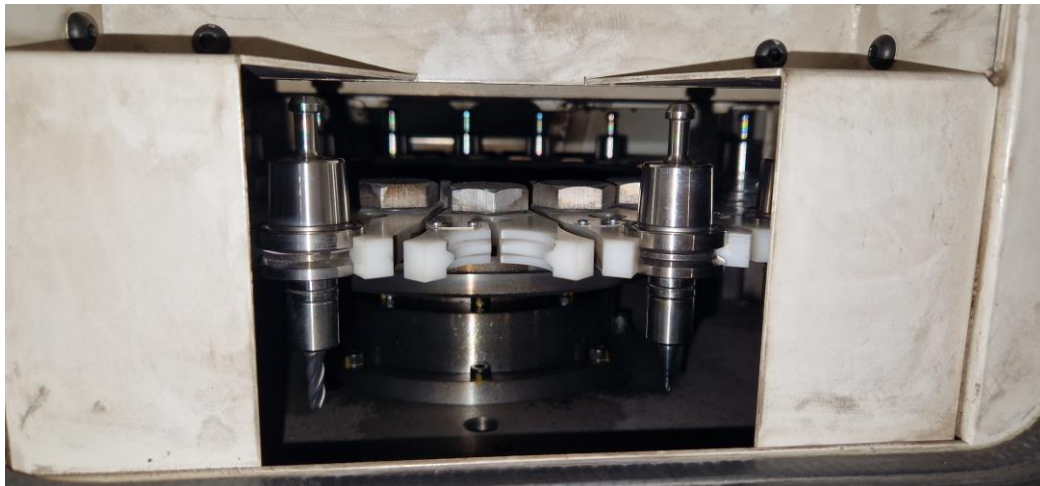
Forrás: saját kép



12. sz. ábra. Porózus terület nyomtatása

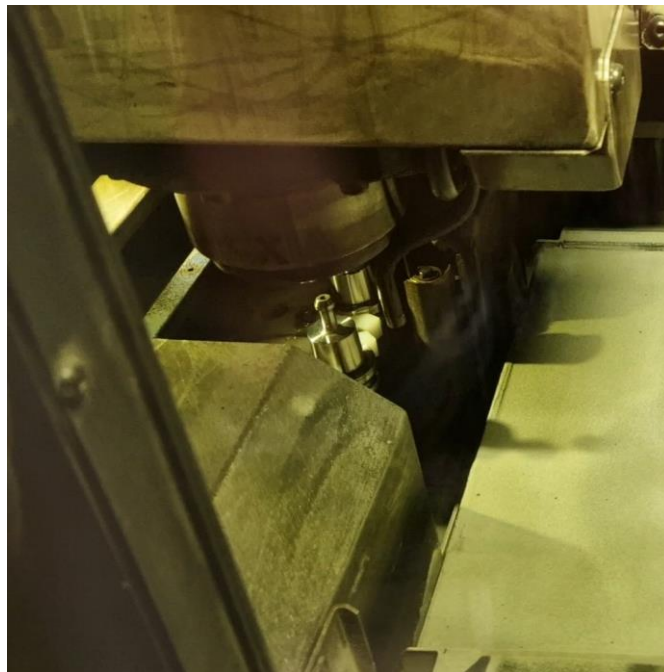
Forrás: saját kép

Mikor ezek teljesülnek, a rendszer a kiválasztott marót előhívja a szerszámtárból (13. és 14. sz. ábra).



13. sz. ábra. Szerszámtár

Forrás: saját kép



14. sz. ábra. Szerszámelőhívás

Forrás: saját kép

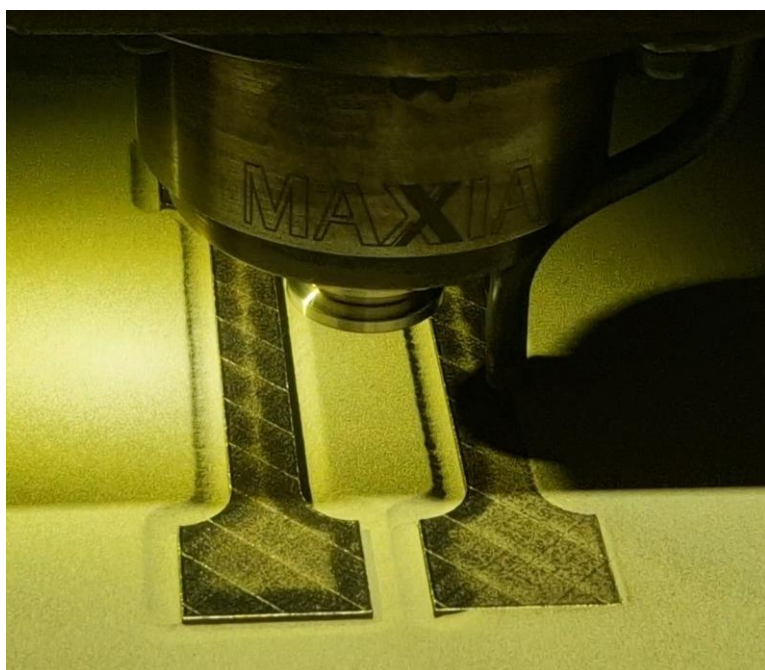
Minden maró kivételkor az eszközt egy érintőfelülethez irányítja, amely lehetővé teszi a maró adatainak és a megállapított kopási határok nyomon követését (15. sz. ábra). Minden marónak létezik egy testvérszerszáma, amely az ellenőrzési folyamat során hívnak elő, ha a kiválasztott maró nem felel meg az elvárt paramétereknek. Ez a mechanizmus támogatja a folyamatos minőségellenőrzést és a gyártási folyamat zökkenőmentes működését, garantálva ezzel a szükséges precízitást a gyártott alkatrészek esetében.



15. sz. ábra. Szerszámkopás vizsgálata

Forrás: saját kép

A marást megelőzően egy elszívócső a nyomtatott alkatrész körvonalán végigfut, hogy a maróban és a nyomtatott felületben se lehessen kárt tenni a marás folyamán (16. sz. ábra).



16. sz. ábra. Porelszívó útvonala a marást megelőzően

Forrás: saját kép

A nyomtatás befejeztével, amikor az utolsó réteg is elkészült, az asztal fűtése azonnal leáll, 50 °C-ról 32 °C-ra csökkenti a hőmérsékletet. Ezt követően elindul a porelszívó programja. A fel nem használt port ekkor üríti ki teljesen a nyomtatási területről. A program leállása után az elkészült darabokhoz hozzáférni. Egyéb hőkezelés a munkadarab lehuzalozása után történik.

A nagyobb egységek 3D fémnyomtatása során időigényes folyamatokra kell számítani. Például egy teljes ferdepályás kilökő nyomtatása akár több napot is igénybe vehet, ami jelentős hatással van a gyártási hatékonyságra. Bár ebben az esetben a nyomtató gép nem igényel folyamatos felügyeletet, a hosszú nyomtatási idő miatt a berendezés üzemeltetése költséges lehet. Annak érdekében, hogy optimalizáljuk a gyártási folyamatokat és csökkentsük a nyomtatással töltött időt, egyes esetekben lehetőség van arra, hogy ne a teljes egységet készítsük el a 3D fémnyomtatóval. Helyette a bonyolult geometriai felületek esetén a fémnyomtató használata ajánlott, míg a tömbszerű, egyszerűbb területek hagyományos gyártási eljárással készülhetnek el (17. sz. ábra). Ez a megközelítés nemcsak a gyártási időt csökkenti, hanem a költségeket is optimalizálja. Bár ez a megoldás nem minden munkadarab esetében jelent megoldást, azért nem árthat egy ilyen szituációban ezzel a lehetőséggel is számolni. A két egység összekapcsolása, például hegesztési eljárás alkalmazásával, lehetővé teszi a megfelelő összhang megteremtését a különböző gyártási technológiák között. Ez a kombinált módszer hatékonyan ötvözi a 3D fémnyomtatás előnyeit a hagyományos gyártási megoldásokkal, lehetővé téve bonyolult geometriai struktúrák előállítását anélkül, hogy felesleges időt és anyagot pazarolnánk el. Ezen technológiák együttes alkalmazása hozzájárul a termelési folyamatok rugalmasságának és hatékonyságának növeléséhez a modern ipari környezetben.



17. sz. ábra. A hagyományos és az additív eljárás ötvözése

Forrás: saját kép

Egy alternatív, innovatív gyártási eljárás keretében lehetséges a lézeres nyomtatás alkalmazása egy már előzőleg elkészített felületre. Ennek a megközelítésnek az egyik fontos lépése, hogy a kész

felületet a gyártási területen pontosan pozicionáljuk, majd a lézeres nyomtató a rétegek ráolvasztásával folytatja a munkálatokat. Ez az eljárás lehetőséget nyújt arra, hogy bonyolult vagy speciális geometriai jellemzőkkel rendelkező struktúrákat készítsünk, amelyek integrálhatók a meglévő felületekhez. Sajnos, a lézeres eljárás alkalmazásával szerzett tapasztalataim nem voltak kedvezőek. Tudomásom szerint a legtöbb esetben az ezzel a technológiával készült darabok élettartama korlátozott volt. Előfordult, hogy a nyomtatott rétegek nem tapadtak megfelelően egymáshoz, ami végül törésekhez vezetett (18. sz. ábra). Ez a problémakör arra utal, hogy bár a lézeres nyomtatás az innováció lehetőségeit kínálja, a folyamat során felmerülő adhéziós kihívások jelentős hatással vannak a végtermék megbízhatóságára és tartósságára.

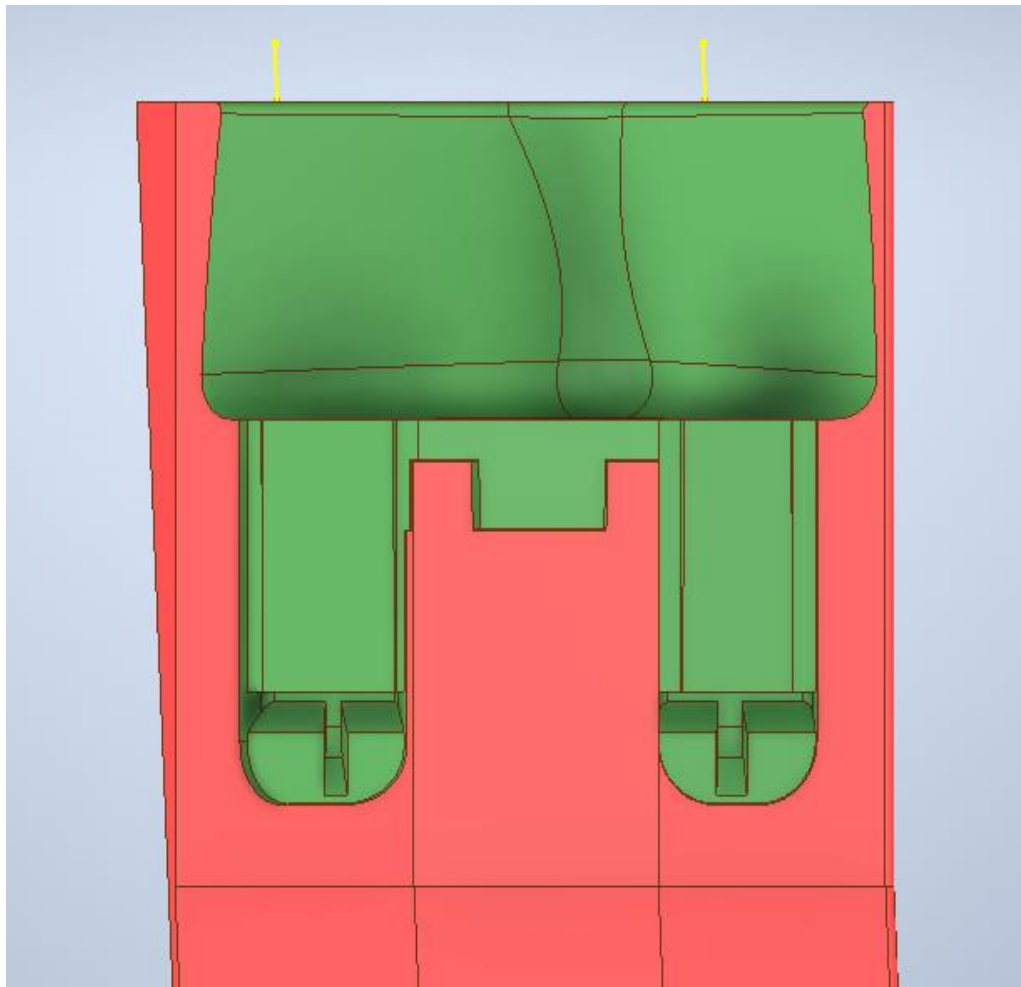


18. sz. ábra. Rétegtapadási problémából adódó törés

Forrás: saját kép

Bár a 3D fémnyomtatás számos geometriai megoldásra kínálja a lehetőséget, léteznek olyan felületek, amelyek megmunkálása nem végezhető el utómunkálatok nélkül. Az én esetemben például egy apró részletgazdagsággal rendelkező terület nyomtatása során a 3D fémnyomtató csak felületesen alakította ki a kívánt formát (19. és 20. sz. ábra). A végleges kialakításhoz elengedhetetlen volt az utómunkálat, amely során a szikraforgács-technológiát alkalmazása a kis méretű mélyedések precíz kialakítását eredményezte. Ez a folyamat rávilágít arra, hogy bár a nyomtatási technológia nagymértékben elősegíti a bonyolult formák elkészítését, nem minden esetben képes a kívánt részletességet és precizitást önállóan megvalósítani, ezzel is alátámasztva, hogy az additív gyártás csupán a hagyományos megmunkálásokkal együtt eredményez kiváló munkát. Az utómunkálatok, mint például a szikraforgácsolás, elengedhetetlenek lehetnek a nyomtatott alkatrészek

tökéletesítéséhez, biztosítva, hogy azok megfeleljenek a tervezési előírásoknak és a műszaki követelményeknek.



19. sz. ábra. Részletgazdag terület a modell szerint

Forrás: saját kép



20. sz. ábra. Szikraforgácsolás előtti nyomtatott egység

Forrás: saját kép

7. Anyagvizsgálat

Az anyagvizsgálat célja az anyagok fizikai, kémiai és mechanikai tulajdonságainak, mikroszerkezetének meghatározása, valamint a szerkezeti hibák feltárása. Ez az információ alapvető fontosságú a tervezés, a gyártás, a minőségellenőrzés és a baleseti vizsgálatok során. Az alkalmazott anyagvizsgálati módszerek két nagy csoportba sorolhatók: roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokra. [2]

A roncsolásos anyagvizsgálat olyan módszereket foglal magában, amelyek a vizsgált anyagminta megsemmisülésével járnak. Ez a megközelítés pontos és megbízható adatokat szolgáltat a vizsgált anyag mechanikai tulajdonságairól, beleértve a szilárdsági jellemzőket (szakítószilárdság, folyáshatár, keménység, ütési szívósság), a képlékenységi jellemzőket (nyúlás, keresztmetszet-csökkenés), valamint az anyag viselkedését különböző terhelési feltételek mellett (pl. fáradás, kúszás, ütés). [2]

A roncsolásos vizsgálatok előnye a pontos és megbízható eredmények nyújtása. Hátrányuk viszont, hogy a vizsgált minták megsemmisülnek a vizsgálat során, ami korlátozhatja a felhasználhatóságukat, és növelheti a vizsgálat költségeit. [2]

Dolgozatom megírása alatt a cégem támogatásával lehetőségem nyílt roncsolásos anyagvizsgálatot végezni, méghozzá szakító és ütésvizsgálatokat. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a Jász-Plasztik Kft. vállalta, és a fröccsöntő szerszámok alkatrészeihez használt porból készültek el. A gyártási költségek miatt viszont csökkentett mennyiségben sikerült ezeknek a daraboknak az előállítását. Két darab szakítópróbatestet (21. sz. ábra) és három darab ütépróbatestet (22. sz. ábra) készítettünk el additív gyártással.



21. sz. ábra. 3D fémnyomtatott szakítópróbatestek

Forrás: saját kép



22. sz. ábra. 3D fémnyomtatott ütőpróbatestek

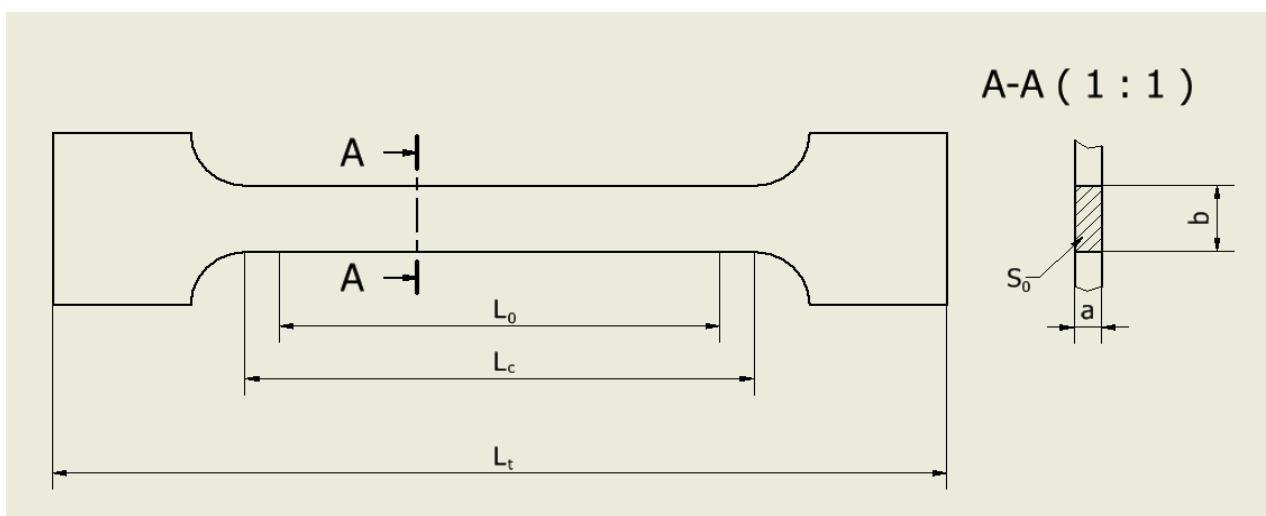
Forrás: saját kép

Bár a teljes értékű vizsgálathoz több próbatest alkalmazása lett volna szükséges, ettől függetlenül a vizsgálatokat elvégeztem és dokumentáltam is azokat.

7.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat célja a szerkezeti anyagok húzó igénybevételre adott válaszreakciójának kísérleti vizsgálata, amelynek során meghatározhatók a szilárdsági és képlékenységi jellemzők. A vizsgálat során szabványos geometriájú és méretű próbatest húzóerő hatására bekövetkező alakváltozását és a terhelés nagyságát mérik állandó húzási sebességgel egészen a próbatest töréséig. A kapott adatokból a szakítószilárdság, folyáshatár, nyúlás és keresztmetszet-csökkenés számítható ki, melyek az anyag mechanikai tulajdonságait jellemzik. [2]

A felhasználni kívánt próbatestet szabványosan lemodelleztem az Autodesk Inventor segítségével, hogy elküldhessem legyártásra (23. sz. ábra).



23. ábra. Szakítópróbatest műszaki rajz

Forrás: saját munka

L_t - a teljes hossz (a próbatest hossza a fejrésszel együtt) [mm];

L_c - a vizsgálati hossz (a próbatest hengeres vagy hasáb alakú részének hossza a fejrész és az átmeneti részek nélkül) [mm];

L_o - az eredeti jeltávolság (a próbatest vizsgálati hosszán kijelölt szakasz, amelyen a nyúlást mérjük) [mm];

a - a hasáb alakú próbatest vastagsága [mm];

b - a hasáb alakú próbatest vizsgálati szélessége [mm];

S_o - a vizsgálati szakasz eredeti keresztmetszete [mm²]. [2]

Esetemben a méretek a következők:

$$L_t = 162,5 \text{ [mm]}$$

$$L_c = 92,5 \text{ [mm]}$$

$$L_o = 80 \text{ [mm]}$$

$$a = 5 \text{ [mm]}$$

$$b = 12,5 \text{ [mm]}$$

A méréseket megelőzően a próbatesteken bejelöltük a tíz darab egységet az eredeti jeltávolságon, mindet arányosan 0,8 mm-enként (24. sz. ábra).

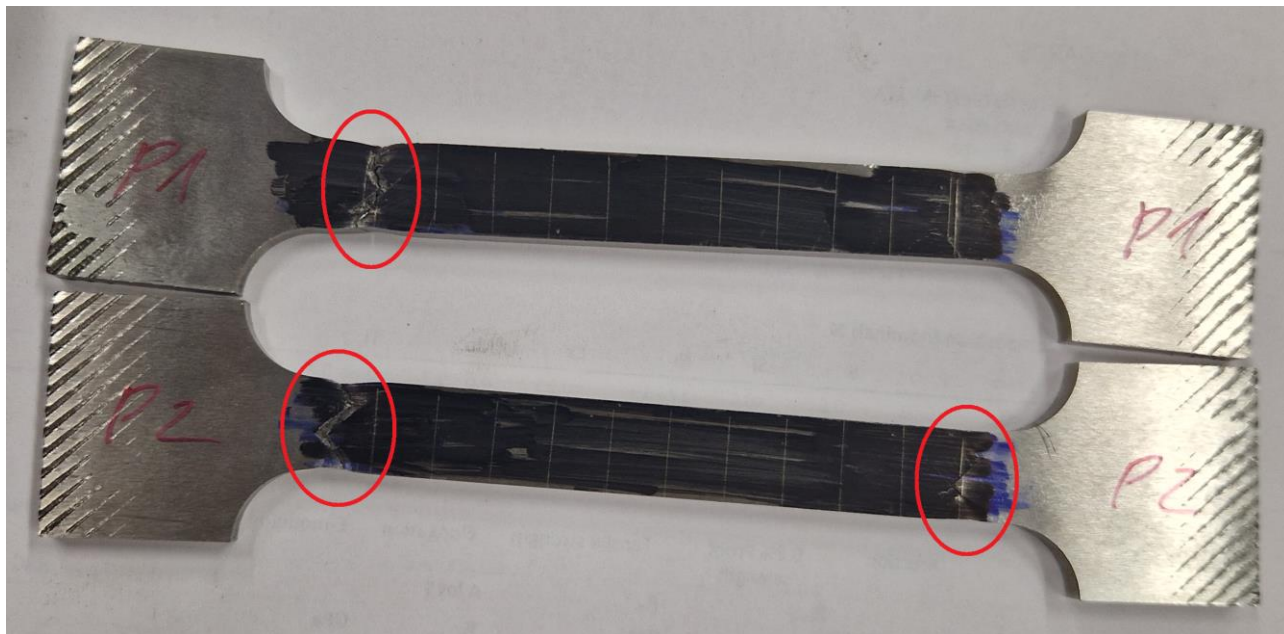


24. sz. ábra. Szakítópróbatest jeltávolság

Forrás: saját munka

Mivel további próbatestek előállítása nem állt rendelkezésemre, így számottevő következtetést nem tehettem az anyaggal kapcsolatban. Minden esetre a próbatestek szakadása a P1 esetében a jeltávolság szélén, a P2 esetében a jeltávolságon kívüli területen történt. A P2 próbatest esetében az

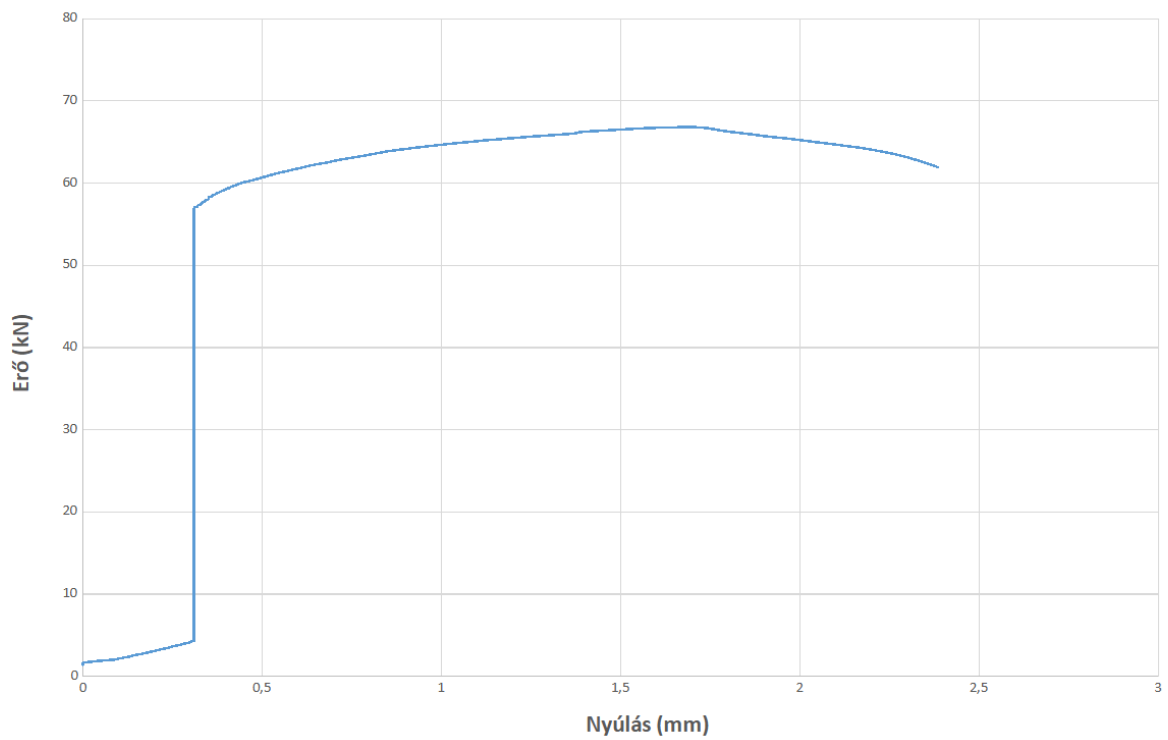
anyag a jeltávolság mind a két végén megrepedt (25. sz. ábra). A szakítóvizsgálat azonban a két próbatest esetében teljesen más adatokat mutatott (26. sz. ábra).



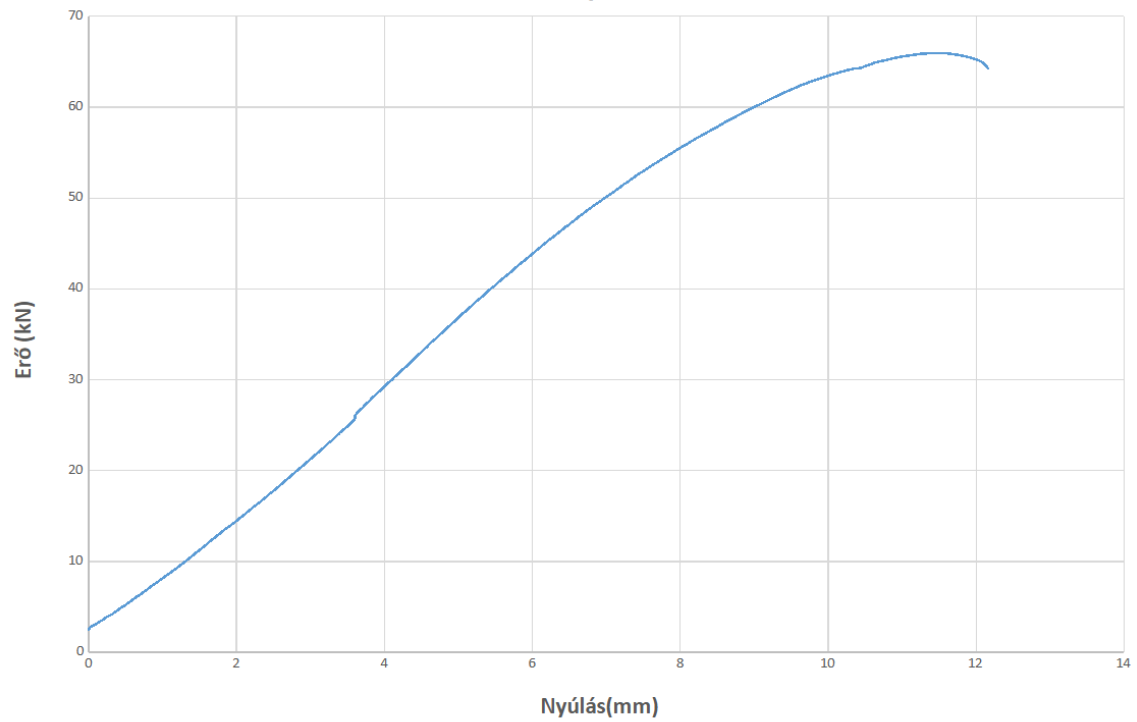
25. sz. ábra. Szakítópróbatest roncsolásos vizsgálat után

Forrás: saját munka

1. számú próbatest



2. számú próbatest



26. sz. ábra. Szakítóvizsgálat diagram

Forrás: Microsoft Excel, saját munka

A diagramon is jól látható, hogy a nyúlási érték a második próbatest esetében nem valóságos, hiszen a fentebb látható ábrán a két próbatest egymás mellé téve nem különbözik számottevően méretben. A mérés előtti és utáni értékeket az alábbi táblázatban foglaltam össze.

3. sz. táblázat: Szakítópróbatetek mért adatai

Próbatest elnevezése	Szakítás előtti keresztmetszet		Szakítás utáni keresztmetszet		Szakítás után mért hosszúság	Szakítás folyamán mért maximális erő (F _m)
	a [mm]	b [mm]	a [mm]	b [mm]	[mm]	kN
P1	4,94	12,41	4,88	11,62	165,5	66,8
P2	4,93	12,42	4,84	11,74	165,2	65,96

Forrás: saját munka

Mivel a szakítóvizsgálaton mért maximális erő közel azonos, így mind a kettőből szakítószilárdságot számítottam, hogy a 3.2. fejezet 2. számú táblázat értékével összehasonlíthassam.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

R_m: szakítószilárdságot [N/mm²];

F_m: a szakítás folyamán mért legmagasabb erő [N],

S₀: a próbatest eredeti keresztmetszete [mm²].

$$S_0 = a * b = 12,5mm * 5mm = 62,5mm^2 \quad (2)$$

$$R_{m1} = \frac{66800N}{62,5mm^2} = 1068,8 \frac{N}{mm^2} \quad (3)$$

$$R_{m2} = \frac{65960N}{62,5mm^2} = 1055,36 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

$$R_{m\text{átlag}} = \frac{1068,8 \frac{N}{mm^2} + 1055,36 \frac{N}{mm^2}}{2} = 1062,08 \frac{N}{mm^2} \quad (5)$$

Bár a pontos eredményhez több mérési adat szükséges, az eddigi eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy az átlagolt szakítószilárdság nem éri el a táblázatban található 1176 N/mm²-es értéket, de ahhoz közelít. Ennek lehetséges oka a nem megfelelő összeolvadás, amely miatt a próbatest nem érte el a kívánt minőséget.

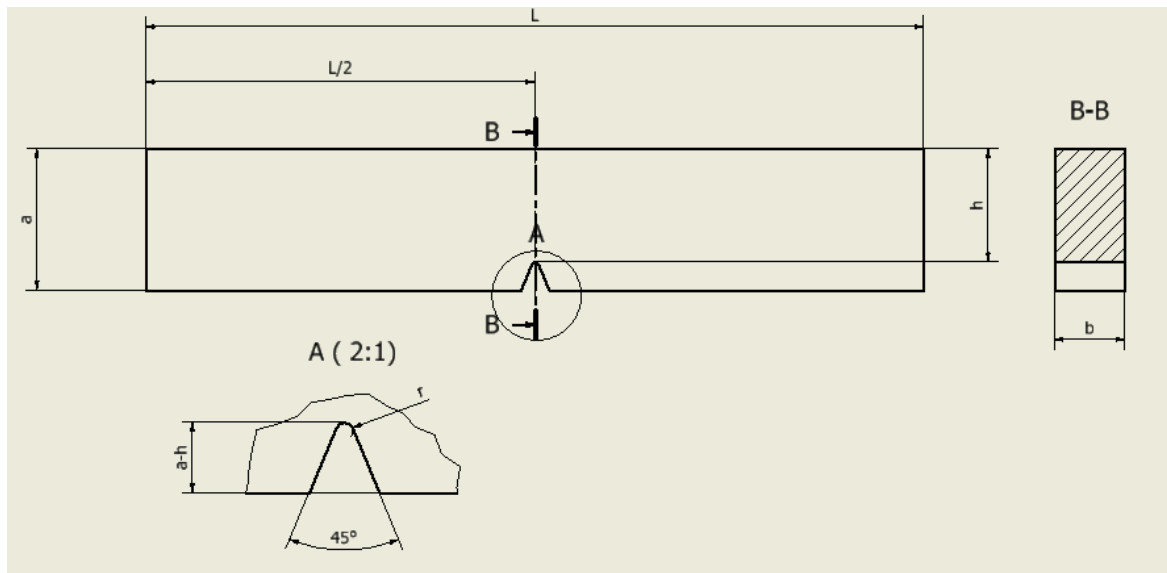
7.2. Ütőpróba

Az ütőpróba célja az anyag ütészilárdságának mérése, vagyis annak vizsgálata, hogy az anyag mennyire képes ellenállni az ütészzerű igénybevételnek. A vizsgálat során egy bemetszéssel ellátott szabványos próbatestet (pl. V- vagy U-bemetszésű) helyeznek az ütőgépbe, amely egy lendítő

kalapács segítségével eltöri azt. A töréshez szükséges energia, az ún. ütőmunka, az anyag szívósságát jellemzi, és Joule-ban fejezik ki. [2]

Az ütőpróbával meghatározható az ütőmunka, a ridegtörési viselkedés és a ridegtörési tartomány, a hőkezelés eredményessége, valamint az öregedési hajlam. [2]

A próbatesteket szabványosan modelleztem le a legyártáshoz (27. sz. ábra)



27. sz. ábra. Ütőpróbatest műszaki rajza

Forrás: Autodesk Inventor, saját munka

a - a próbatest vastagsága, amely mindig 10 mm;

b - a próbatest szélessége: 5 mm (10 mm normál méretű próbatestnél);

h - a próbatest vastagsága a bemetszés helyén: V-alakú bemetszés esetén 8 mm;

(a-h) - a próbatest bemetszésének mélysége [mm]: V-alakú bemetszés 2 mm;

r - a bemetszés lekerekítésének sugara; V-alakú bemetszésnél 0,25;

L - a próbatest hossza, 55 mm. [2]

A kapott eredményeket korrigáltuk, mivel a próbatestek szélessége feleakkora volt a szabványos mérethez képest, ezért az értékeket duplázni kellett az összehasonlíthatóság érdekében.

A mért adatokat a következő táblázatban tüntettem fel.

4. sz. táblázat: Ütőpróba mért adatai

	Mért érték [J]	Méret miatti kétszerezett érték [J]
1. számú próbatest	32	64
2. számú próbatest	34	68
3. számú próbatest	38	76
Átlag	34,67	69,3

Forrás: saját munka

A 3.2. fejezet 2. sz. táblázatában szereplő adatok figyelembevételével megállapítható, hogy az általam végzett ütőpróba során mért értékek meghaladják a táblázatban található várt értékeket. Ugyanakkor a kapott eredmények alapján pontos és megalapozott következtetések levonása érdekében további ütőpróbák elvégzése lenne szükséges. Ezeknek a végrehajtása azonban a dolgozatom készítésének időkeretében nem volt lehetséges.

7.3. Keménységmérés

A roncsolt ütőpróbatestek felületén Vickers- és Rockwell -féle keménységvizsgálatot is végeztem (5. és 6. sz. táblázat). A pontos eredményekért a próbatestek három oldalán végeztem el a keménységméréseket: öt darabot a nyomtatási kezdő oldalon, öt mérést a nyomtatási befejező oldalon, és öt mérést az egyik oldalon.

A Vickers-féle keménységmérést keményebb anyagok vizsgálatára fejlesztették ki. Az eljárás során egy négyzet alapú gyémántgúlát nyomnak a vizsgálandó anyagba meghatározott terheléssel, és meghatározott ideig. A gyémántgúla csúcsszöge 136° . A keménység a terhelőerő és benyomódási felület hányadosaként határozható meg. [2]

A benyomat felülete négyzet alakú, ennek átlóját mérik, és ebből számítják ki a benyomat felszínét. Az MSZ 105/12 szabvány tartalmazza a méréssel kapcsolatos előírásokat. [2]

5. sz. táblázat: Vickers-féle keménységmérés adatai

	Nyomtatási kezdő felület [HV30]	Nyomtatási befejező felület [HV30]	Oldalsó felület [HV30]
1. számú próbatest	365,7	345,9	363,8
	344,2	360,1	377,2
	187,9	371,4	367,6
	286	377,2	363,8
	185,2	373,3	362
2. számú próbatest	351,1	371,4	373,3
	252,9	373,3	385,2
	322,9	367,6	365,7
	229,8	375,2	375,2
	443,8	369,5	377,2
3. számú próbatest	218,1	363,8	369,5
	239,4	369,5	373,3
	307,9	354,7	381,2
	228,8	371,4	385,2
	234,5	365,7	363,8

Forrás: saját munka

A Rockwell-féle keménységmérés gyors és egyszerű módszer, amely során a vizsgálati felületbe kúpos gyémánt vagy acélgolyó alakú behatolótestet nyomnak két lépésben: előterheléssel és

főterheléssel. A keménység értékét a maradó benyomódás mélységének mérésével határozzák meg, amely arányos a keménységi számmal. Az előterhelés a felületi érdességből származó hibák kiküszöbölésére szolgál, míg a főterhelés mértéke és a behatolótest típusa alapján különböző keménységi skálák alkalmasak. [2]

A módszer előnye, hogy a keménységi értékek közvetlenül leolvashatók a mérőóráról, és nincs szükség optikai mérőeszközre. Ezáltal gyorsabb, mint a Vickers-eljárás, és különösen alkalmas gyártás közbeni tömeges mérésekre. [2]

6. sz. táblázat: Rockwell-féle keménységmérés adatai

	Nyomtatási kezdő felület [HRC]	Nyomtatási befejező felület [HRC]	Oldalsó felület [HRC]	Átlag [HRC]
1. számú próbatest	18	37	34	29
	11	37	37	
	11	37	37	
	12	37	37	
	16	37	37	
2. számú próbatest	25	37	37	31,53
	19	36	37	
	21	33	37	
	23	39	37	
	19	36	37	
3. számú próbatest	25	37	37	29,87
	11	34	37	
	13	35	37	
	17	35	37	
	17	39	37	
Átlag	17,2	36,4	36,8	30,13
Szórás	4,75	1,58	0,75	

Forrás: saját munka

A keménységmérések átlaga megközelítette a 2. számú táblázatban megadott referenciaértéket, az additív gyártással készült próbatestek oldalai azonban jelentős eltéréseket mutattak. Annak ellenére,

hogy a három próbatest nyomtatása egyazon időben történt, a mért keménységi értékek változékonyságot mutattak. Különösen a nyomtatási kezdő felület esetében jelentkezett nagy szórás, ahol a mért értékek néhány esetben a várt keménység felét sem érték el.

Az eltérések egyik lehetséges oka, hogy a nyomtatási folyamat kezdeti szakaszában a fémpor szemcséi nem olvadtak össze megfelelően. Feltételezhető, hogy a nyomtatási terület asztalának hőmérséklete és a lézerezési paraméterek nem voltak optimálisak, ezért a kezdeti rétegek inhomogének maradtak. A folyamat előrehaladásával azonban az anyag egyre homogénebbé vált, és a fémpor megfelelő összeolvadása lehetővé tette a jobb mechanikai tulajdonságok kialakulása

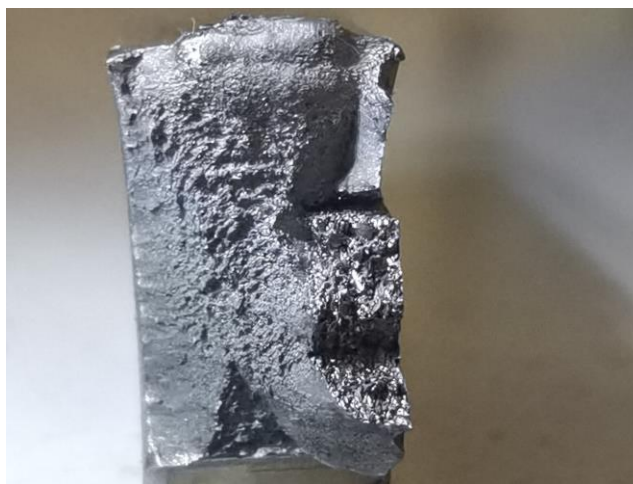
Az oldalfalak keménysége megfelelő volt, ami feltételezhetően a rétegek elkészítése után alkalmazott lézeres kontúrkezelés eredménye. Ez a technológiai lépés megerősítette a határoló éleket és javította a rétegek közötti kötést, így biztosítva a kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat az oldalfelületeken. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a nyomtatási paraméterek pontos beállítása kulcsfontosságú a próbatestek egyenletes minőségének biztosítása érdekében.

7.4. Törésfelület vizsgálata

A törésfelület vizsgálata számos fontos következtetést levonását teszi lehetővé. Bár a dolgozat készítése során nem állt módomban mikroszkópos elemzést végezni, a szabad szemmel történő szemrevételezés is értékes információt nyújthat.

A szemrevételezéshez ütőpróbatesszt és szakítópróbatesszt felületét is vizsgáltam. Az alábbi képek bemutatják a törés felületét különböző próbatesteken és különböző nézetekből is.

A törés felületén (28.sz.ábra) megfigyelhető a változó anyagszerkezet. Megfigyelhetők a durva, szemcsés, valamint a simább részek is. A különböző felületek arra utalhatnak, hogy a törés során különböző mechanikai hatások érvényesülnek.

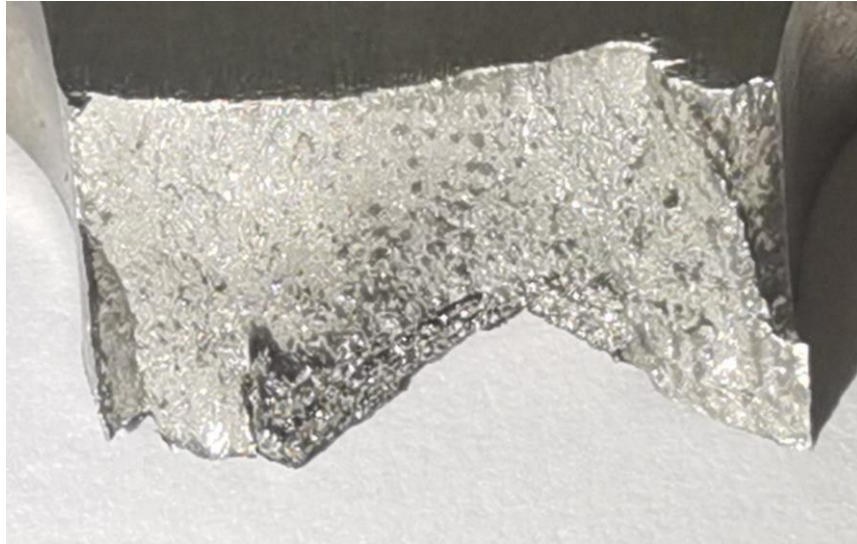


28. sz. ábra. Ütőpróbatesszt törési felülete

Forrás: saját munka

A durva, szemcsés törési struktúra rideg törésre utalhat, amely hirtelen, alakváltozás nélkül következett be. A ridegség oka lehet az anyagszerkezeti hiba, amely a nem megfelelő összeolvadásból fakadt. Ezt alátámasztja, hogy a szemcsés szerkezet a nyomtatási kezdő oldalnál található.

Az anyag homogenitása eltérő az egyes tartományokban, hiszen a felület különböző területein eltérő szerkezet figyelhető meg (29.sz. ábra). Ez arra utalhat, hogy az anyag teljes homogenitásának feltétele nem teljesült az additív gyártás nem megfelelő paraméterezése miatt.



29. sz. ábra. Törési felületen látható szemcsés szerkezet

Forrás: saját munka

A felület lyukacsos, ami zárványokra vagy pórusokra utalhat. Ez tipikus probléma lehet az additív gyártás folyamán, ha a por nem olvad jól vagy ha a gyártási körülmények (pl. lézerezés, rétegezés) nem voltak optimálisak.

A következő képen (30. sz. ábra) a P2-es próbatest látható, melyről korábban már bemutattam, hogy a testen egy szakadás, valamint egy repedés is fellelhető a vizsgálat után.



30. sz. ábra. Szakítópróbatest felületi repedése

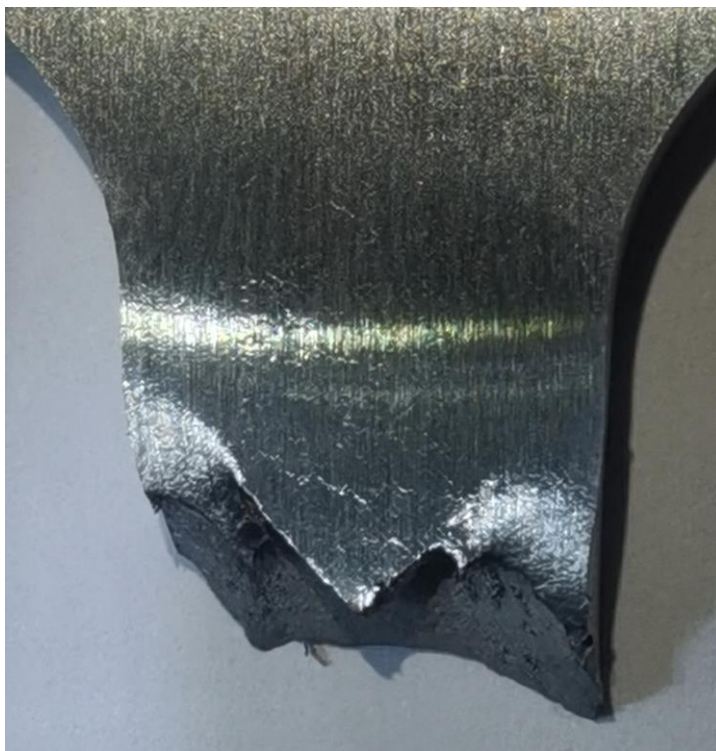
Forrás: saját munka

A részleges törés alakja ék alakú, amely arra utalhat, hogy milyen rideg törés kezdődött meg. Az éles törési vonalak és a szakadás körüli sima felület megerősítheti ezt a feltételezést.

A repedés a központi részről indult el, ahol a legmagasabb értékű koncentrált feszültség alakulhatott ki. Az is észrevehető, hogy a repedés alakja a rétegek fedését rajzolja ki. A törési felület ehhez hasonlóan a test gyártási kezdőoldalán élesen tört, majd a befejező oldal felé haladva a törés éle simább lesz (31.sz.ábra).

A kép alapján megfigyelhető, hogy a törés folyamata még nem fejeződött be, ami azt jelzi, hogy a próbatest nem érte el teljes szakítószilárdságát a második pontban. Viszont a második repedés elindulása rámutat arra, hogy a nyomtatás kezdő oldalán milyen gyenge, inhomogén terület alakult ki.

Az additív gyártás során a rétegek közötti kohézió gyengesége okozhatja a repedés elindulását



31. sz. ábra. Szakítópróbatest felületi repedése

Forrás: saját munka

Valószínűsíthető, hogy az additív gyártás során a lézerezési folyamat vagy a hőmérséklet paraméterei nem voltak optimálisak, így a rétegek közötti kapcsolat nem volt megfelelő.

A részleges törés irányából az is valószínű, hogy a próbatest belső mechanikai feszültségei szerepet játszottak a repedés kialakulása

A törési felületből következtethetünk a gyártási folyamat során felmerülő problémákra, amelyek a rétegek közötti megfelelő kohézió hiányát eredményezte. Ez az additív gyártás során előforduló nem megfelelő összeolvadás, az anyag lokális gyengesége vagy a gyártási paraméterek helytelen beállítását igazolhatja.

7.5. Következtetés a vizsgálatokból

A vizsgálatok során alkalmazott roncsolásos anyagvizsgálati módszerek révén alapos és részletes betekintést nyertem a 3D nyomtatással előállított szerszámok és alkatrészek lehetséges mechanikai és fizikai tulajdonságaiba. A szakító-, ütésvizsgálatok, valamint a keménységmérések lehetővé tették, hogy pontos képet kapjak az additív gyártással készült alkatrészek viselkedéséről különböző terhelési körülmények között. Az eredmények rámutattak arra, hogy az ilyen módon gyártott alkatrészek jellemzői számos esetben közelítenek a gyártói specifikációkban megadott értékekhez, ugyanakkor bizonyos területeken jelentős eltéréseket tapasztaltam, amelyek a technológiai folyamat beállításának további vizsgálatára ösztönöznek.

A szakítószilárdsági és nyúlási vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy az additív gyártással készült próbatestek szakítószilárdsága közel azonos a fémport forgalmazó által megadott értékekkel. Ez arra utal, hogy a technológia alapvetően képes olyan alkatrészek előállítására, amelyek mechanikai szilárdsága megfelelő az ipari követelmények teljesítéséhez. Ugyanakkor a nyúlási tulajdonságok esetében jelentős variabilitás volt megfigyelhető. Ez a változékonyság, valamint az egyes próbatestek törési helyeinek eltérései arra világítanak rá, hogy a nyomtatási folyamat paraméterezése nem teljesen optimális. A rétegek közötti tapadás minőségének javítása érdekében a duális képzőhelyem esetében további beállításokra és finomhangolásra van szükség, amelyek biztosítják a gyártott alkatrészek egyenletesebb minőségét.

Az ütésvizsgálatok során mért korrigált ütőmunka értékek egyes esetekben túlszárnyalták a referenciaadatokat, ami az anyag kiemelkedő szívóssági tulajdonságaira utal. Ez kedvező eredmény, hiszen az anyag ütési terhelésekkel szembeni ellenállóképessége a mechanikai alkalmazhatóság szempontjából kritikus jelentőségű. Mindazonáltal a kapott adatok megbízhatóságának növelése érdekében elengedhetetlen a vizsgálatok bővítése, további próbatestek bevonásával. Csak így biztosítható az eredmények pontosabb értékelése és a technológia stabilitásának alátámasztása.

A keménységmérések eredményei szintén értékes információkkal szolgáltak. Az oldalsó és a nyomtatási befejező felületeken mért értékek viszonylagos homogenitása biztató eredmény, hiszen ez a nyomtatási folyamat során alkalmazott technológiai megoldások hatékonyságát tükrözi. Ugyanakkor a nyomtatási kezdő felületeken tapasztalt nagyobb szórás a kezdeti rétegek inhomogenitására utal. Ez valószínűleg a gyártási környezet hőmérsékleti viszonyainak, a fémpor eloszlásának vagy a lézerparamétereknek a nem megfelelő beállításából ered. A problémák kiküszöbölése érdekében elengedhetetlen a gyártási paraméterek további finomhangolása, amely lehetővé teszi az alkatrészek minőségének és homogenitásának javítását.

A törésfelületek vizsgálata során számos érdekes jelenségre derült fény. A törésfelületeken megfigyelt változatos anyagszerkezet különböző mechanikai hatásokra utal, amelyek a gyártási folyamat során léphettek fel. A durva szemcsés és a simább felületek egyaránt jelen voltak, ami arra utal, hogy a technológiai beállítások és a gyártási környezet stabilitása jelentős hatással van a végeredményre. Ez kiemeli annak fontosságát, hogy a nyomtatási folyamat során biztosítsuk a gyártási környezet állandóságát, valamint a paraméterek ennél pontosabb beállítását.

Ezen megfigyelések alapján kijelenthető, hogy az additív gyártás, mint technológia, jelentős potenciállal rendelkezik a szerszámgyártásban és az alkatrészgyártásban. Ugyanakkor az is világossá vált, hogy a technológia teljes körű kiaknázásához további kutatások és fejlesztések szükségesek. A

gyártási folyamat optimalizálása és az anyagtulajdonságok következetes javítása érdekében a jövőben széleskörű vizsgálatok elvégzése elengedhetetlen.

Összefoglalás

A dolgozatom célja az additív gyártás vizsgálata volt, különös tekintettel a lézerszinterezéses 3D fémnyomtatás alkalmazási lehetőségeire. A kutatás középpontjában a ferdepályás kilökö szerszám állt, annak anyaga és a 3D nyomtatással lehetséges fejlesztése, amely lehetőséget adott a technológia előnyeinek és hátrányainak gyakorlati összehasonlítására.

A kutatás során bemutattam a 18Ni300 maraging acél alkalmazását a lézerszinterezésben, valamint az anyagvizsgálatok eredményeit. Az elvégzett roncsolásos anyagszerkezeti vizsgálatok részben rávilágítottak az anyag mechanikai tulajdonságaira és az additív gyártás képességeire. Kiemelném, hogy a költségek miatti kevés mennyiségben előállított próbatestek által mért eredmények további vizsgálatot igényelnének, de az eredmények alapján lekövetkeztethető, hogy a nyomtatás beállítása-inak finomhangolása mindenképpen szükséges az anyag inhomogenitása miatt. A dolgozatom során megállapítható, hogy az additív gyártás kiemelkedő előnyei közé tartozik a bonyolult geometriák pontos előállítása, az idő- és anyagtakarékosság, valamint a gyártási folyamat rugalmassága.

Ugyanakkor a kutatás feltárta az additív gyártás néhány korlátját is, például a hosszú gyártási időt, a berendezések magas költségeit, valamint az utólagos megmunkálások szükségességét. Ezek a tényezők bizonyos esetekben hátrányt jelenthetnek a hagyományos technológiákkal szemben, különösen nagy volumenű vagy egyszerűbb alkatrészek gyártásánál.

A dolgozat eredményei alapján egyértelmű, hogy az additív gyártás hosszú távon jelentős potenciállal rendelkezik a gyártóiparban, különösen az egyedi és kis szériás alkatrészek előállítása során. Az általam elvégzett kutatás hozzájárulhat a technológia ipari alkalmazásának további fejlesztéséhez és a gyártási folyamatok optimalizálásához a duális képzőhelyem esetében.

Zárásként megállapítható, hogy az additív gyártás nemcsak alternatívát, hanem kiegészítést is nyújthat a hagyományos megmunkálási eljárásokhoz, így a jövőben a két technológia kombinált alkalmazása még nagyobb rugalmasságot és hatékonyságot biztosíthat a gyártási folyamatokban.

Irodalomjegyzék

Felhasznált irodalom:

- [1]. DUDÁS I. (2002): Gépgyártástechnológia III., Miskolci Egyetemi Kiadó
- [2]. PÉK L. (2015): Anyagszerkezetten és anyagvizsgálat, Szombathely

Internetes forrás:

- [3]. <https://www.jp.hu> (2024.07.10.)
- [4]. <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=3864> c (2024.07.10.)
- [5]. <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/> (2024.07.10.)
- [6]. <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2018/01/23/the-future-of-3-d-printing/> (2024.07.10.)
- [7]. Dezső Gergely - Szigeti Ferenc (2022): A fém alkatrészek additív gyártásának technológiai lehetőségei: https://www.researchgate.net/publication/361482598_A_fem_alkatreszek_additiv_gyar_tasanak_tehnologiai_lehetosegei (2024.10.08.)
- [8]. <https://www.lumex-matsuura.com/english/> (2024.07.20.)
- [9]. <https://www.matsuurausa.com/matsuuras-lumex-hybrid-metal-3d-printer/> (2024.07.20.)
- [10]. <https://www.matsuura.co.uk/brands/lumex/> (2024.07.20.)
- [11]. <https://www.metalpowder.sandvik/en/products/metal-powder-alloys/maraging-steel/osprey-18ni300/#isb-osprey-18ni300> (2024.10.08.)