



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Gépjárműtechnológia Tanszék



TDK

Paraméterválasztás hatása additív gyártással készített Ti-6Al-4V próbatestek gyártási idejének csökkenésére és legfontosabb mechanikai tulajdonságaira

Készítette:

Péri Bence Péter

Konzulens:

Dr. Bán Krisztián

Budapest, 2023

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék

Budapest, XI. Stoczek utca 6. J. épület, Levélcím: Budapest, Postafiók 1521, tel. 06-1-463-1615, fax: 06-1-463-3978

e-posta: titkarsag@gjt.bme.hu, web: www.gjt.bme.hu

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
1. Irodalmi áttekintés	5
1.1. Additív technológiák történeti áttekintése	5
1.1.1. Szelektív lézeres szinterezés (Selective Laser Sintering, SLS).....	6
1.1.2. Elektronsugaras olvasztás (Electron beam melting, EBM).....	6
1.1.3. Szelektív lézeres olvasztás (Selective Laser Melting, SLM)	7
1.2. SLM technológiával készült Ti-6Al-4V mechanikai tulajdonságairól.....	8
1.3. A szinterezés lézerenergia-sűrűsége	12
1.4. Maradó feszültség.....	14
2. Mérés bemutatása	16
2.1. Alkalmazott gyártó berendezés ismertetése	16
2.1.1. Történelmi áttekintés	17
2.1.2. Előnyök hátrányok	17
2.1.3. Alkalmazása	18
2.2. Alkalmazott mérő berendezés ismertetése	19
2.3. Kutatás jelentősége és célja	20
2.4. A maradó feszültség mérése	20
2.5. Maradó feszültség mérése konzolos megközelítéssel	21
2.6. Szakítóvizsgálat	24
2.7. A módosított paraméterek bemutatása	25
2.8. Eredmények bemutatása	26
2.8.1. Réteghagyás (skip layer) hatása	27
2.8.2. A pásztázási távolság (distance) hatása.....	29
2.8.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség (power és speed) hatása	31
2.8.4. Gyártási irányok változtatása	33
2.9. Gyártási idők változása a paraméterbeállításokkal.....	35
3. Mérés kiértékelése	37
3.1. Eredmények validálása maradó feszültség méréssel	40
4. Összefoglalás.....	42
5. Köszönetnyilvánítás	43
Irodalomjegyzék.....	44
Ábrajegyzék	46

Táblázat	48
Mellékletek.....	49

ÖSSZEFOGLALÓ

Az additív gyártás napjainkban egy igen meghatározó gyártási eljárás, rengeteg lehetőséggel és kiaknázatlan területtel. Ezen belül is az SLM (Selective Laser Melting) technológia, amivel a dolgozat keretein belül bővebben foglalkozom, kiválóan alkalmazható orvosi implantátumok gyártására Ti-6Al-4V felhasználásával, valamint a repüléstechnika potenciális alapanyaga kis sűrűsége miatt.

A dolgozatomban ilyen, Ti-6Al-4V porból SLM technológiával készített próbatestek vizsgálatával foglalkozom, melyek különböző gyártási paraméterekkel készültek a gyártási idő csökkentése érdekében, majd szakítóvizsgálatot végeztem rajtuk egy tanszéki kutatási projekt keretében. A mérések eredményei alapján megvizsgáltam, hogy a változtatások mennyiben befolyásolták a próbatestek mechanikai jellemzőit, ill. értelmezem az eredményeket az anyagszerkezeti jellemzők és a gyártáskori termikus előélet függvényében. Az így kapott legjobb beállításnál a maradó feszültségeket és a gyártási idő változását is megvizsgálom, hogy így tudjam bizonyítani, hogy a változtatások megfelelnek-e az elvárásoknak, és kisebb mechanikai tulajdonságváltozások mellett valóban csökkenthető a gyártáshoz szükséges idő.

1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1. Additív technológiák történeti áttekintése

Az additív gyártás 1967-ben jelent meg a szterolitográfiával. Ez forradalmasította a gyártást, mivel ennek segítségével képesek voltak háromdimenziós testeket gyártani anyag-hozzáadással az eddig megszokott anyagleválasztással szemben. Az eljárás lényege, hogy vékony rétegeket visznek fel egymásra, amik UV fény hatására megszilárdulnak. Ez az eljárás rendkívül jól alkalmazható prototípusok vagy kis darabszámú alkatrészek gyártásánál, mivel nem igényel speciális szerszámokat.

A kilencvenes éve közepétől egyre több területen kezdték alkalmazni, többek között az orvoslásban, az autó- és légi iparban. Később egyre többféle eljárás jelent meg, mint például az FDM (Fused Deposition Modeling), amikor a testeket műanyag huzalból állítják elő, ezt megolvasszák, és ebből hozzák létre a rétegeket. Ezek napjainkban már egyes háztartásokban is fellelhetők, ami jól mutatja, hogy mennyire elterjedt a technológia, és mennyire lecsökkent a költsége.

Azonban számunkra sokkal fontosabb additív gyártási technológia az SLS (Selective Laser Sintering), és az SLM (Selective Laser Melting) eljárás. Ezeknél az eljárásoknál nagy energiasűrűségű lézer segítségével olvasszák össze a vékony rétegben (~20-50 μm) felvitt port ami lehet polimer, polimer keveréke fémmel, kerámia vagy tisztán fém. Ennek segítségével képesek vagyunk rozsdamentes acél és titán ötvözeiből készült testek létrehozására.

Ezek nagyon jó korrózióállóképességük mellett kedvező mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, miközben kis fajlagos tömegük van. Ennek köszönhetően orvosi felhasználásra alkalmasak. Sok esetben személyre szabott implantátumok készítésére, amik jobb illeszkedésünknek köszönhetően akár felére csökkenthetik a műtétek idejét, és utána sokkal könnyebben regenerálódik a szervezet. Ilyen fajta személyre szabást a régi technológiák nem tettek lehetővé, a műtetet végző orvos csak bizonyos előre legyártott méretű implantátumok közül választhatott, ami jóval nagyobb beavatkozást igényelt. A személyre szabott implantátumok készítése egy CT (Computed [Axial] Tomography) felvétellel kezdődik, ami egy pontfelhőt eredményez. Ebből lehet egy test modellt készíteni egy CAD (Computer Aided

Design) szoftver segítségével, ezután még lehet pontosítani a test geometriáját a programon belül.

Az additív gyártási folyamat a CAD modell elkészítése után, azzal folytatódik, hogy 2D-s szeletekre osztják egy úgynevezett „slicer” programmal. A szeletekre vonatkozó információkat az additív gyártóegység használja fel, és létrehozza az alkatrész 3D-s geometriáját rétegenként. Ez a módszer lehetőséget ad az alkatrész ellenőrzésére, és ha kell módosítására, valamint az egyedi tervezésű, bonyolult geometriájú alkatrészek gyártására akár generatív tervezéssel. [1]

1.1.1.Szelektív lézeres szinterezés (Selective Laser Sintering, SLS)

Az SLS azaz szelektív lézeres szinterezési eljárást a Texasi egyetemen fejlesztették ki és Carl Deckard szabadalmaztatta 1989-ben. A folyamat során egy vékony rétegben szemcsés (~50 µm) port szórnak le a mozgó asztalra, elsimítják, majd tömörítik. Ezután egy kellően nagy energiasűrűségű lézerrel (például: CO₂, fiber-, tárcsalézer) a legyártandó test 3D modelljéből generált két dimenziós szelet kontúrját, majd a belső területet végigpásztázzák, a lézerrel. A por ennek hatására felhevül, ezáltal az egyes szemcsék között atomi diffúzió jön létre, ezt nevezik lézeres szinterezésnek. A réteg elkészülte után a munkaasztal lesüllyed, pontosan egy rétegnyi távolságot, majd a gép újra egy réteg port terít rá, megint letömöríti, és újból végigpásztázza. Ezt egészen addig ismételi, amíg elkészül a munkadarab. A munkatérben fennmaradó, meg nem olvasztott port pedig elszívják, és ezt később, bizonyos mértékig, újra lehet hasznosítani. Ha olyan réteg következik, ami jelentősen túllóg az előző rétegen, előfordul, hogy alkalmazni kell átmeneti támasztó szerkezetet, ezzel megakadályozva a rétegek „felhajlását”. [1]

1.1.2. Elektronsugaras olvasztás (Electron beam melting, EBM)

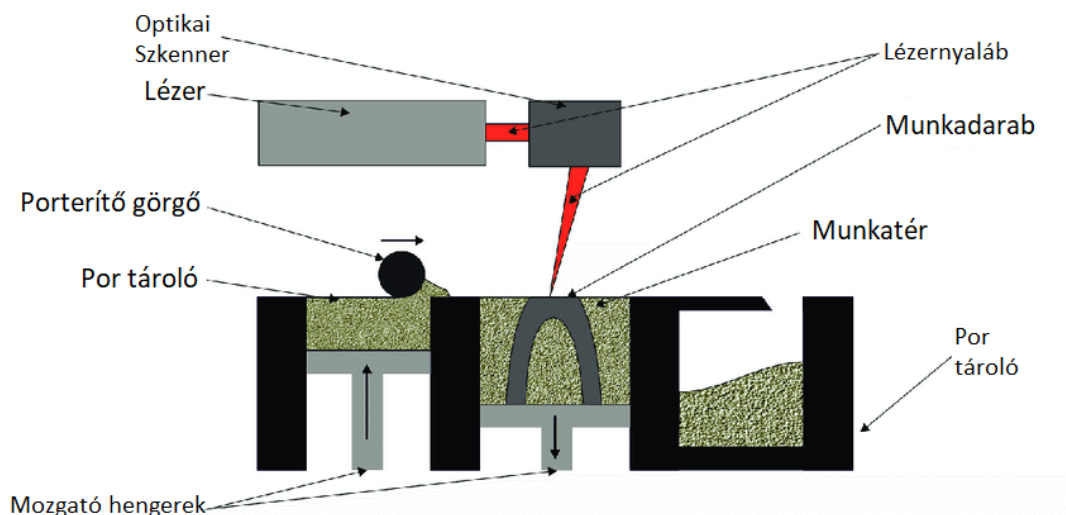
Az EBM, azaz elektronsugaras olvasztás egy viszonylag új, gyorsan fejlődő technológia. A folyamat hasonlít az SLS eljáráshoz azzal a különbséggel, hogy itt nagyfeszültségű elektronsugarat használnak (~30-60 KV) a por olvasztásához, ami egy vákuumkamrában történik az oxidáció elkerülése érdekében. EBM eljárás egyik legfőbb jövőbeli alkalmazási területe lehet az űrben való alkatrészgyártás, amit a vákuumkamra tesz lehetővé. Ezzel a

technológiával akár egy űrközpontban fellépő alkatrészhiányt is tudnak orvosolni, csupán egy CAD modellre van szükségük, és helyben el tudják készíteni a hiányzó alkatrészt. [2]

1.1.3. Szelektív lézeres olvasztás (Selective Laser Melting, SLM)

Az SLM, azaz szelektív lézeres olvasztás, ami a dolgozat szempontjából a legfontosabb additív gyártási módszer, az 1980-as évek végén fejlesztették ki. Az SLM folyamat során csak úgy, mint az SLS és az EBM eljárásoknál, a terméket egymásra helyezett por rétegekből (a mi esetünkben Ti-6Al-4V) formázzák egy lézersugár segítségével. A gép elteríti egy porréteget, amit lesimít, majd a lézersugár végigpásztázza, megmelegíti, és ha az alkalmazott sugár teljesítménye megfelelően nagy, a por megolvad, és olvadátkócsát képez. Ezután az olvadék lehűl, majd gyorsan megszilárdul, és kialakítja az alapját a termék formájának. A geometriai forma úgy alakul ki, hogy a gép végigpásztázza a réteg megfelelő keresztmetszetét, és a munkasztalt lejjebb viszi az adott réteg vastagságával megegyezően. Következő lépésben a gép leszór egy újabb porréteget és azt is végigpásztázza. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg a termék el nem készül. Azoknak az anyagrészeknek, amiket nem ért a lézersugár, a következő réteg por alátámasztása lesz a feleadatuk. A folyamat során a gép alátámasztásokat is készít, mivel anélkül meghajlana a munkadarab a hőhatások miatt. A művelet végeztével pedig a gép felszívja a fel nem használt port és bizonyos mértékig ezt később újra lehet hasznosítani. Fontos tudni az eljárásról, hogy a titán ötvözeteknek nagy reakcióképessége miatt ezt védőgázban kell elvégezni.

Az SLM technológia csakúgy, mint a többi additív gyártási technológia, rengeteg előnnyel rendelkezik, ideértve a gyors elkészülési időt, ahhoz képest mintha külön szerszámot kéne legyártani hozzá. Továbbá lehetőséget ad speciális alakú munkadarabok, elkészítésére drága öntőformák nélkül. Az SLM technológia csakúgy, mint az SLS, nagy szabadságot enged meg azzal, hogy az alkatrészeket CAD modellek által állítjuk elő, és különböző alakú alkatrészek akár ugyanazon a munkasztalon elkészíthetők. A technológia megengedi olyan, komplex geometriák létrehozását, amik hagyományos technológiákkal elképzelhetetlenek lennének.



Ábra 1-1: SLM technológia elvi vázlata és részei [1]

A rengeteg előnye mellett ennek a technikának is megvannak a hátulütői. Például az SLM technológiánál az anyagot nagy hőhatások érik az olvadátkócsa környezetében, illetve mivel nagy az olvadékfelület és kicsi a hozzá tartozó olvadéktömeg, ezért gyorsan megszilárdul, és ez kedvezőtlen lehet számunkra a benne maradó feszültségek szempontjából. Továbbá még hátrány, hogy limitált a felhasználható anyagok száma, néhány anyag felhasználását a por formátum, másokat a mögötte lévő kutatás hiánya korlátozza. Ahhoz, hogy ezt a problémát kezelni tudjuk, jobban meg kell értenünk az eljárást. Azonban az SLM nem egyszerű folyamat, a paraméterek széles skálája áll, a rendelkezésünkre, nem csak a lézer paraméterei, hanem például a pásztázási sebesség, vagy a pásztázási távolság, valamint a nyomtatási paraméterek, például a nyomtatás struktúrája, illetve még a nyomtatandó anyag tulajdonságai is befolyásolják a késztermék tulajdonságait. Tehát a téma még tele van kiaknázatlan területekkel. [3]

1.2. SLM technológiával készült Ti-6Al-4V mechanikai tulajdonságairól

Az SLM technológia paramétereinek változtatásáról és ennek hatásáról sok tanulmány készült, mivel rengeteg beállítás van, amiket kombinálhatunk. Alábbiakban összefoglalom párat, melyek az általam elvégzett kísérlethez hasonló témát dolgoztak fel, és megnézem, hogy milyen következtetéseket vontak le a kísérleteik végén.

Több cikket is találtam, amiben ugyanúgy a folyamatparaméterek változtatásának hatásait vizsgálták. Ezek a paraméterek a lézerteljesítmény, pásztázási sebesség, pásztázási távolság (ami azt határozza meg, hogy az egymással párhuzamos pásztázásoknál a lézerfolt középpontja mekkora távolságra van egymástól), lézer pásztázási szöge (ami a különböző rétegek egymással bezárt szögét jelenti), illetve az egyik vizsgálat során még hőkezelést is alkalmaztak. Az első cikkben AmirMahyar Khorasani és társai a mérésük során 25 mintát vizsgáltak, melyek 5 csoportra oszthatók a beállítások szerint. Több mechanikai tesztet elvégeztek rajtuk, mint a szakítóvizsgálat, sűrűség- és keménységvizsgálat, és ezek alapján összehasonlították őket.

A vizsgálat során kiderült, hogy a nagyobb lézerteljesítmény és kisebb pásztázási sebesség keménység növekedést eredményezett, ami a nagyobb egységnyi felületre jutó energiának volt köszönhető, mivel ezáltal nagyobb olvadátkócsa jött létre. Azonban az optimálisnál kisebb pásztázási távolság, azaz a túl nagy átfedés miatt a termék keménysége csökkent. Az optimálisnál nagyobb pásztázási távolság is csökkentette a keménységet, mivel ebben az esetben kisebb volt az egy egységnyi felületre jutó energia. A kicsi pásztázási szög nagyobb keménységet eredményez, mivel a lézer ebben az esetben újraolvasztja az előző réteget az átfedésekben. Végül pedig még arra jutottak, hogy a hőkezelésnél a hőmérséklet emelése megnöveli a szemcseméretet ezáltal csökkenti a keménységet. [4]

A másik kutatásnál, ami szintén ezzel a témával foglalkozik, szintén Amir Mahyar Khorasni és társai azt vizsgálták, hogy a paramétereket miként tudnák megváltoztatni anélkül, hogy az ne okozzon különböző problémákat, mint a csomósodás („balling” azaz olyan porrészek, amik nem olvadtak meg), porozitás vagy a vetemedés (distortion). A kísérletük során a paraméterek megváltoztatása által okozott hatásokat próbálták kideríteni. Az általuk vizsgált paraméterek pedig a lézerteljesítmény, pásztázási sebesség, pásztázási távolság, lézer pásztázási szöge volt. A paramétereket itt is szakítóvizsgálat segítségével hasonlították össze.

A csapat eredményeiből látjuk, hogy a lézerteljesítmény a legmeghatározóbb paraméter a szakítóvizsgálat alapján. Továbbá a pásztázási sebesség, majd a hőkezelés, a pásztázási távolság és a lézer pásztázási szöge voltak a legnagyobb hatással ilyen sorrendben. A feszültség- megnyúlás diagramok megmutatták, ha a lézerteljesítmény és a pásztázási távolság egy optimális érték közöt van, az okozza a legnagyobb szakítószilárdságot (756-1537 MPa). Ez az érték elég tág kereteken belül van ugyan, azonban a tanulmány ezt határozta meg céltartománynak. Az is kiderült, ha nagyobb a pásztázási sebesség, kisebb a szakítószilárdság.

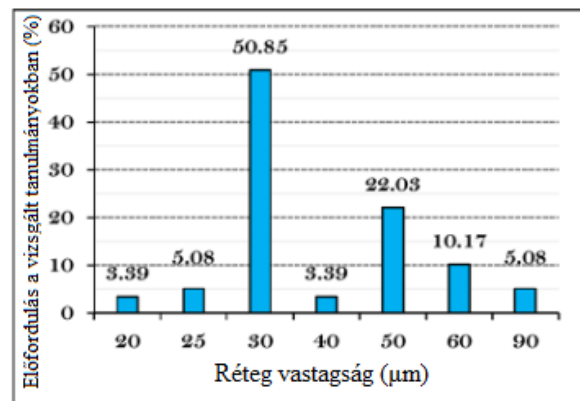
Továbbá azt is megállapították, hogy a hőkezeléseknek is vannak pozitív hatásai a szakítószilárdságra nézve, azonban egy bizonyos hőmérsékletnél magasabb érték esetén már csökkenti az anyag szilárdságát.

Tehát a kísérlet megmutatta, hogy mely paraméterek megváltoztatása esetén kapják a legnagyobb szakítószilárdságot, ha kombinálják hőkezeléssel, és mindezt úgy, hogy még a költséget is csökkentsék. [5]

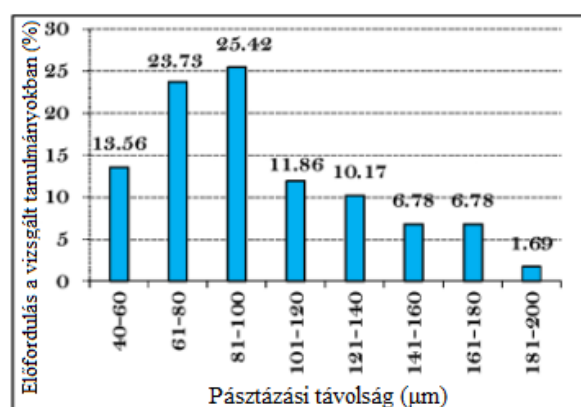
Egy másik, ugyanezen témakörhöz tartozó cikkben Anil Kumar Singla és csapata azt vizsgálták [6], hogy különböző kutatások mire jutottak az SLM folyamat beállításai, hibái és az utókezelések vizsgálata során, és ezeket hasonlították össze. [7], [8], [9], [10], [3] Továbbá megnézték, hogy az általuk választott beállítások megszakítják az összehasonlításban felfedezett hibaképződés tendenciáját, valamint, az utómunkálatok tudják javítani a mechanikai tulajdonságokat. Ezen felül szerették volna megtudni, hogy milyen hatással vannak az SLM paraméterei, vagyis a pásztázási sebesség, a lézerteljesítmény, a pásztázási távolság és a rétegvastagság a nagyobb anyaghibákra. Céljuk volt, hogy jobban megértsék az SLM technológiával készült Ti-6AL-4V ötvözetek tulajdonságait.

Az összehasonlítások eredményeként az alábbi megállapításokra jutottak a paraméter beállításokkal kapcsolatban.

A rétegvastagságra a 30 μm tűnt az optimálisnak SLM technológiával készült Ti-6AL-4V ötvözet esetén, ahogy az a csatolt ábrán (Ábra 1-2) is látszik, mivel a témában folytatott kutatások 50,85% erre a megállapításra jutott. [7] Ezzel szemben a pásztázási távolságra nem találtak ennyire egyértelmű eredményt, de megállapították, hogy nagyjából 61-100 μm között a legjobb. Az ábra (Ábra 1-3) is mutatja, hogy azért nem tudtak teljesen biztos következtetést levonni, mivel



Ábra 1-2: Az optimálisnak megállapított rétegvastagság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]



Ábra 1-3: Az optimálisnak megállapított pásztázási távolság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]

a témával foglalkozó kutatások 25,42%-a 81-100 μm közötti értéket talált optimálisnak, a 23,73%-nak a 61-80 μm közti érték jött ki a legjobbnak. [8]

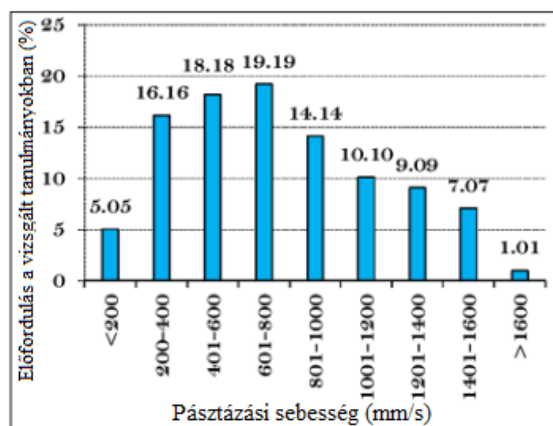
A legtöbb kutatás azt mutatta, hogy az ideális pásztázási sebesség 601-800 mm/s között van TI-6AL-4V ötvözeteknél, azonban sok kutatás pedig arra jutott, hogy az optimum 200-600 mm/s között van, mivel, ahogy az a (Ábra 1-4) ábrán is látszik a 200-400; 401-600 és 601-800 mm/s közötti pásztázási sebességet találták optimálisnak a kutatások több mint 50%-ban és nagyjából egységes eloszlásban.

Viszont a legjobb pásztázási sebesség értékének meghatározásával nem csak az a probléma, hogy nagy eltérések születtek, hanem a paraméterek egymástól való függése is nehezíti ennek értelmezését, ezért nem mindegy, hogy a vizsgált kísérleteknél, milyen különböző beállítások (például lézerteljesítmény) mellett érték el az optimumot (például pásztázási sebesség esetében) így, hogy melyik az optimális érték ezen információk hiánya nélkül nem lehet egyértelműen kijelenteni.

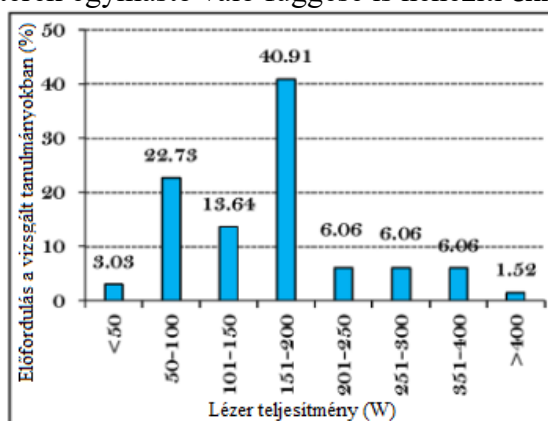
Az optimális lézerteljesítményre sem mutattak a tanulmányok egyöntetű eredményt,

sokakban 151-200 W közötti érték volt az optimum, azonban 51-100 W közötti érték is kiugró eredményt adott. Amint az ábrán (Ábra 1-5) is látható, a mérések 40,91%-a 151-200 W között találta optimálisnak a lézer teljesítményét, azonban 22,73% 50-100 W közöttre tette azt, ami szintén egy jelentős hányad. Továbbá az sem egyszerűsíti a helyzetet, hogy az alkalmazandó lézerteljesítmény mértékét a használt gép is nagyban befolyásolja. [11] Tehát ez is további kutatásokat igényel.

Az SLM folyamatoknál a nyomtatási sebesség és a lézer energia befolyásolta a legjobban az anyaghibák keletkezését, ezért ezekre kell a legjobban figyelni, ha minimalizálni akarják a hibákat.



Ábra 1-4: Az optimálisnak megállapított pásztázási sebesség értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]



Ábra 1-5: Az optimálisnak megállapított lézerteljesítmény értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]

A tanulmány során több utókezelési hőmérsékletet is össze hasonlítottak, azonban ezekből sem tudtak egyértelmű következtetéseket levonni.

Számos tanulmány kiemelte, hogy jó alternatíva a porózusság csökkentésére a HIP (hot isostatic pressing), azaz az állandó, izosztatikus nyomáson történő hőkezelés, azonban arra nem voltak összefüggő eredmények, hogy milyen nyomáson és milyen hőmérsékleten lenne ez ideális.

Arra az eredményre jutottak, hogy többfajta utómunkálat együttes alkalmazása is csökkentheti, az anyaghibák kialakulását, valamint javítja az anyag tulajdonságait. Illetve még a hidegkamrás utókezelést (cryogenic treatment) találták befolyásoló tényezőnek a mechanikai tulajdonságokra.

A kutatók végül arra jutottak, hogy az SLM technológia egy nagyon ígéretes terület azonban még rengeteg kísérletre van szükség, hogy megértsék az anyag és a beállítások viselkedését.

1.3. A szinterezés lézereenergia-sűrűsége

Az SLM eljárás célja megfelelően sűrű és anyag hibáktól mentes termék előállítása. Ennek elérése nem egyszerű feladat, mivel az SLM eljárás során mechanikai nyomás nem lép fel, csak a gravitációs és a kapilláris erők vannak jelen a hőhatással együtt.

SLM technológiával történő gyártás során több paraméter játszik szerepet az anyag minőségének kialakulásában. Vannak paraméterek, amiket a gép tulajdonságai szabnak meg (mint a használt hullámhossz) és vannak olyanok, amiket a nyomtatandó por (például az olvadék viszkozitása és a hővezető képesség). Ezek együtt határozzák meg a folyamat határfeltételeit. Ezekkel szemben vannak azok az úgynevezett gyártási paraméterek, amiket tudunk állítani, ezek optimalizálásával próbálunk jobb tulajdonságokkal bíró anyagokat előállítani.

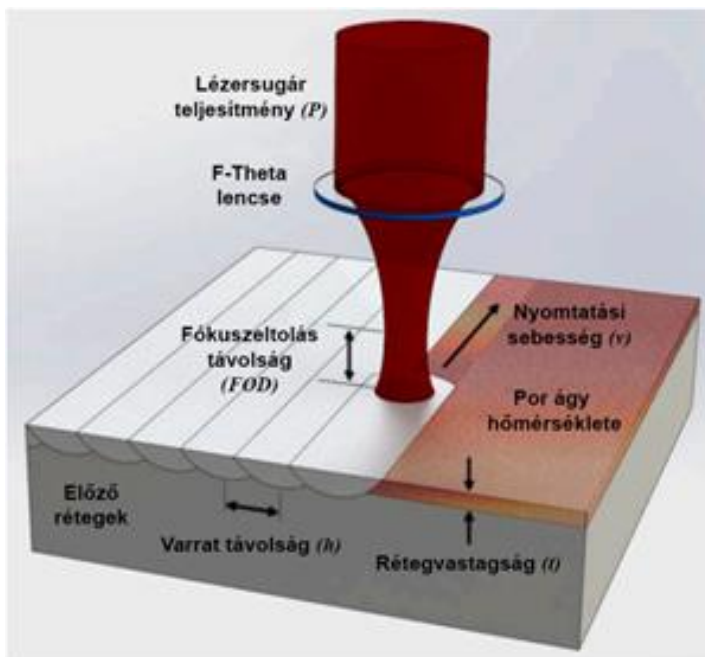
Egy adott anyag esetében az E lézereenergia-sűrűség, az SLM folyamat során egy egységnyi térfogatú porra vonatkozik és a következő képlet alapján számítható.

$$E = \frac{P}{v * t * s}$$

1. egyenlet: Szinterezés lézereenergia-sűrűsége [J/mm³] [1]

Ahol P a lézer teljesítményt [W], v a pásztázási sebességet [mm/s], t a megolvasztandó rétegvastagságot [mm] és s a pásztázási távolságot [mm] jelöli (ami azt határozza meg, hogy az egymással párhuzamos pásztázásoknál a lézerfolt középpontja mekkora távolságra van egymástól).

A lézer energiasűrűsége ezen tényezőktől függ, ami meghatározza a végleges termék sűrűségét és minőségét. Mint a fenti egyenletből is látszik, ha megnöveljük a lézerteljesítményt vagy a pásztázási sebességet, megolvasztott rétegvastagságot, pásztázási



Ábra 1-6: Sematikus ábra az SLM technológia paramétereiről [1]

távolságot csökkentjük, a lézer energiasűrűsége nő, ebből kifolyólag a por hőmérséklete is. Mivel a magasabb energiasűrűség nagyobb mértékű olvadást tesz lehetővé, azaz nagyobb térfogat átolvasztását, ebből kifolyólag magasabb sűrűséget kapunk a folyamat végeztével. Az SLM eljárásnál a por teljes megolvadása szükséges, ezért a teljesen sűrű anyag kialakulásához, átkell lépni a por minimális kritikus lézerenergia-sűrűségét. Például a

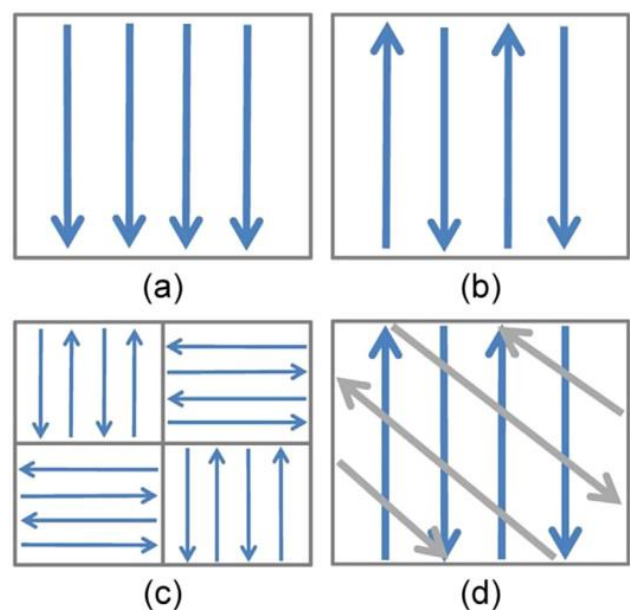
kereskedelemben kapható tiszta titán (CP-Ti), a Ti-6Al-4V és a Ti-24Nb-4Zr-8Sn SLM kritikus lézerenergia-sűrűsége kb. 120, 120 és 40 J/mm³.

Az SLM folyamat során a lézersugár a porágyon állandó sebességgel halad át, amit pásztázási sebességnek hívunk [v]. Ez nagyban befolyásolja az alkatrész gyártási idejét. Vagyis a pásztázási idő növelésével tudjuk csökkenteni a termék gyártási idejét. Azonban figyelembe kell venni az eszköz lézerteljesítményét is, mivel ha csak simán, növeljük a sebességet, az a minőség romlását eredményezheti. A rétegvastagság [t] befolyásolja a porréteg megolvasztásához szükséges lézerenergia-sűrűséget, illetve később a megszilárduláshoz szükséges időt. A rétegvastagság fontos jellemzője az anyagnak, mivel akkor kapunk jó minőségű anyagot, ha az alsóbb rétegek újraolvadnak. Viszont nagyobb rétegvastagság vagy több rétegenként történő olvasztás esetén (amikor bizonyos számú rétegenként kimarad a

pásztázás, ezért egy pásztázáskor egyszerre több réteget kell megolvasztani) a gyártás időt tudjuk redukálni. Azonban ennek is vannak hátulütői, mégpedig a vastagabb rétegek olvasztásához szükséges nagyobb energiabefektetés növelheti a felületi érdességet, illetve csökkentheti a méretpontosságot. A pásztázási távolság (azaz angol nyelven hatch space), ami azt határozza meg, hogy az egymással párhuzamos pásztázásoknál a lézerfókusz középpontja mekkora távolságra van egymástól. Ez azért fontos, mert a lézer által bejárt sávok átfedése nagyban befolyásolja a porozitást, felületi érdességet és a gyártási időt.

Az SLM technológia további fontos paraméterei a pásztázási vektorok hossza és mintája. A pásztázási vektorok hosszát a bejárasi

geometria határozza meg. Ezt, az úgynevezett gyártási mintát különböző módon lehet megválasztani, de általában párhuzamos vonalakkból áll, azonban előfordulhatnak kör vagy spirál lefedettségek is. A pásztázási minta megváltoztatható egy rétegen belül vagy különböző rétegekben is. Amint az ábrán (Ábra 1-7) is látszik, az a. és b. ábrák egy illetve két irányú (cikcakkos) pásztázási mintának felelnek meg. A c. ábrarészleten is látszik, hogy egy rétegen belül különböző



Ábra 1-7: Különböző pásztázási minták összehasonlítása [1]

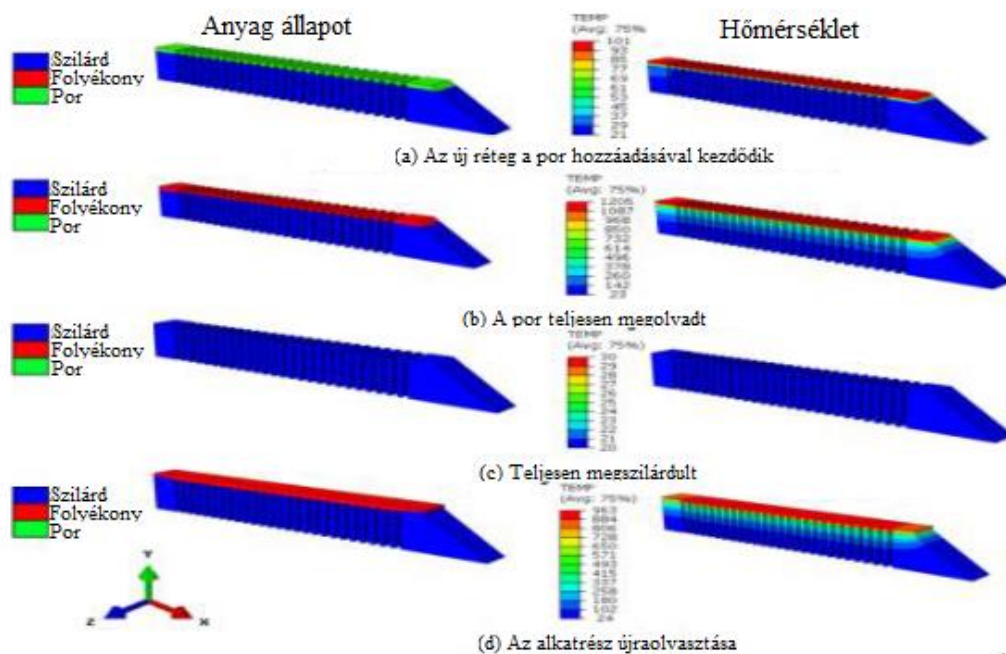
nyomtatási irányok is megvalósíthatók. Végül pedig a d. ábra, arról mutat példát, amikor az egymást követő rétegek egy adott szöget zárnak be egymással. A gyártási minták is nagy hatással vannak a késztermék minőségére és mechanikai tulajdonságaira. [1]

1.4. Maradó feszültség

A külső terhelésektől függetlenül a szerkezetekben és anyagokban jelen vannak belső feszültségek. Ezeket a feszültségeket maradó feszültségeknek nevezzük. A maradó feszültségek úgy definiálhatók, mint azok a feszültségek, melyek a gyártás és megmunkálás után az anyagban vagy testben maradnak külső erők vagy termikus gradiensek hatása nélkül. Tehát a maradó feszültség kialakulásának fő okai a hőmérsékletváltozás okozta zsugorodás,

illetve elsősorban, szilárd fázisú fázisátalakulások okozta fajterfogatváltozás. Ezek alapján nem meglepő, hogy additív gyártás során a gyors fűtési és hűtési ciklus miatt a hegesztéshez hasonlóan maradó feszültségek ébrednek a gyártott alkatrészben. Ezt jól szemlélteti a leni ábra (Ábra 1-8) is, ami az anyagállapotot és hőmérséklet változást mutatja be a test egyrétegének gyártása közben. A maradó feszültség az egyik legkritikusabb probléma az additív gyártásban mivel hatással van az alkatrész mechanikai viselkedésére és az élettartamra. Ezért fontos megérteni és mérni, mivel ennek segítségével akár azonosíthatók esetleges gyártási hibák. [12]

A dolgozatomban azért fontos a maradó feszültség mérése, mivel a gyártási paraméterek változtatása a maradó feszültség mértékére is hatással van attól függően, hogy mekkora a gyártási energiasűrűsége. A maradó feszültség mérésétől azt várom, hogy ennek segítségével a paraméterváltoztatások káros hatásai kimutathatóak lesznek.



Ábra 1-8: Anyagállapotot és hőmérséklet változást mutatja be a test egyrétegének gyártása közben

2. MÉRÉS BEMUTATÁSA

2.1. Alkalmazott gyártó berendezés ismertetése



Ábra 2-1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS

A dolgozatban vizsgált próbatestek legyártása során az EOS M 100 DMLS additív gyártó berendezést használtuk, amiben a DMLS mozaikszó a Direct Metal Laser Sintering kifejezést jelenti, amit a már korábban említett SLSként is hívnak. Ez nagyon hasonlít az SLM technológiához. A kettő közti különbség csupán az, hogy SLS-nél csak felmelegíti (szinterezi) a gép az anyagot, a kötés sok esetben diffúzió okozta adhéziós kötés, míg az SLM-nél teljesen megolvasztja, tehát mindkettőt lehet gyártani ugyanazzal a géppel, csak az SLM-hez nagyobb teljesítmény szükséges. Ebből következik, hogy az SLS kevesebb energiát igényel. [13]

Munkaterület	Ø 100 x 95 mm (magasság az alaplappal együtt)
Lézer típus	Yb-fiber lézer; 200 W
Precíziós optika	F-theta-lencse; nagy sebességű szkennel
Szkennelési sebesség	max. 7.0 m/s
Lézer átmérő	40 µm

Ábra 2-2: Berendezés fontos tulajdonságai a dolgozat szempontjából [16]

2.1.1. Történelmi áttekintés

A DMLS története a 90-es években kezdődött, ahogy már fentebb említettem, abban az időben Carl Deckard az USA-ban kitalálta a SLS technológiát. Azonban ezzel párhuzamosan az EOS cég Németországban fejlesztett additív gyártási technológiákat, köztük a lézerszinterezést is műanyagokhoz és fémekhez. Ebből az következett, hogy a technológia birtoklásáért egy kisebb jogi vita keletkezett, amit végül az EOS nyert, így világszerte megszerezte a jogokat is az SLS technológia fölött. A cég továbbfejlesztette az eljárást, és végül 1995-ben kereskedelmi forgalomba hozták az első DMLS nyomtatót. Az EOS a mai napig az SLS technológia vezető cége.

Az SLM technológiát is abban az időben fejlesztették, ki mint az SLS-t Aachenben, Németországban. Ennek a technológiának a fejlesztése során is volt számos jogi vita, de nem magával a technológiával, itt is inkább az eljárás jogaival és annak megszegésével kapcsolatban. Annak ellenére, hogy az SLS technológiát tulajdonképpen birtokolta, az EOS az SLM iránt is nagy érdeklődést mutatott, és végül sikerült is megállapodniuk a Trumpf GmbH-val ezzel kapcsolatban. [13]

2.1.2. Előnyök hátrányok

A SLS és a SLM technológiák nagyjából azonosak a tulajdonságaik tekintetében néhány kivétellel. Természetesen mindkettő magában foglalja az additív gyártás előnyös tulajdonságait, mint ahogy a réteg a rétegre technológia megenged olyan komplex geometriákat, amiket anyagelvonásos és formázó technológiákkal lehetetlen lenne. Az SLS lehetővé teszi különböző tiszta vagy ötvöztött fémek nyomtatását anélkül, hogy az anyag tulajdonságait befolyásolná, továbbá az anyagok keverékét is megengedi, mint például az alumínium és a nylon együttes nyomtatását. Az SLS és az SLM technológia is lehetővé teszi fém és ötvöztött fémporok felhasználását, ideértve az acélokat, rozsdamentes acélokat, alumíniumot, titánt, nikkelötvöztetteket és kobalt-krómot. Mind két eljárás típus jó anyag tulajdonságokat eredményezhet. Valamint, ahogy már említettem, a fémpor bizonyos szinten újrahasznosítható.

A technológiák hátrányai közé tartozik, az SLS és SLM technológiák magas költsége, mivel a felhasznált anyag, védőgáz, hulladékkezelés és maga a gép is drága és egy munkadarab

elkészítése sok időt vesz igénybe, ezért nagy darabszám esetén nem gazdaságos. Továbbá a hátrányok közé tartozik, hogy az előállítható termék méretét a munkatér térfogata lekorlátozza. [13]

2.1.3. Alkalmazása

Az additív gyártási technológiát az teszi vonzóvá az ipar számára, hogy ez által a vállalatok képesek magas minőségű egyedi fémeket és fémötvözeteket gyártani viszonylag egyszerűen.

Az SLS és SLM technológiák a legjobban felhasználhatók a fogászati, orvosi és repülőgépiparban, mivel ezeken a területeken előszeretettel alkalmaznak magas minőségű vagy különleges fémeket.

Az additív gyártási technológiát az orvostudományban általában implantátumok gyártására használják titán ötvözetekből, hogy helyettesítsék bizonyos csontok részeit, amik hiányoznak baleset vagy betegség miatt. Ilyen esetekben fontos az anyagok nagy szilárdsága, illetve, a mechanikai karakterisztikájuk és a sűrűségük is közeli legyen az élő csontszövetéhez, hogy megfelelően tudja helyettesíteni a csontot és a porózus tulajdonságnak köszönhetően a csontszövet belenő az implantátumba. A technológia nagy előnye, hogy személyre szabott implantátumok készíthetők vele.

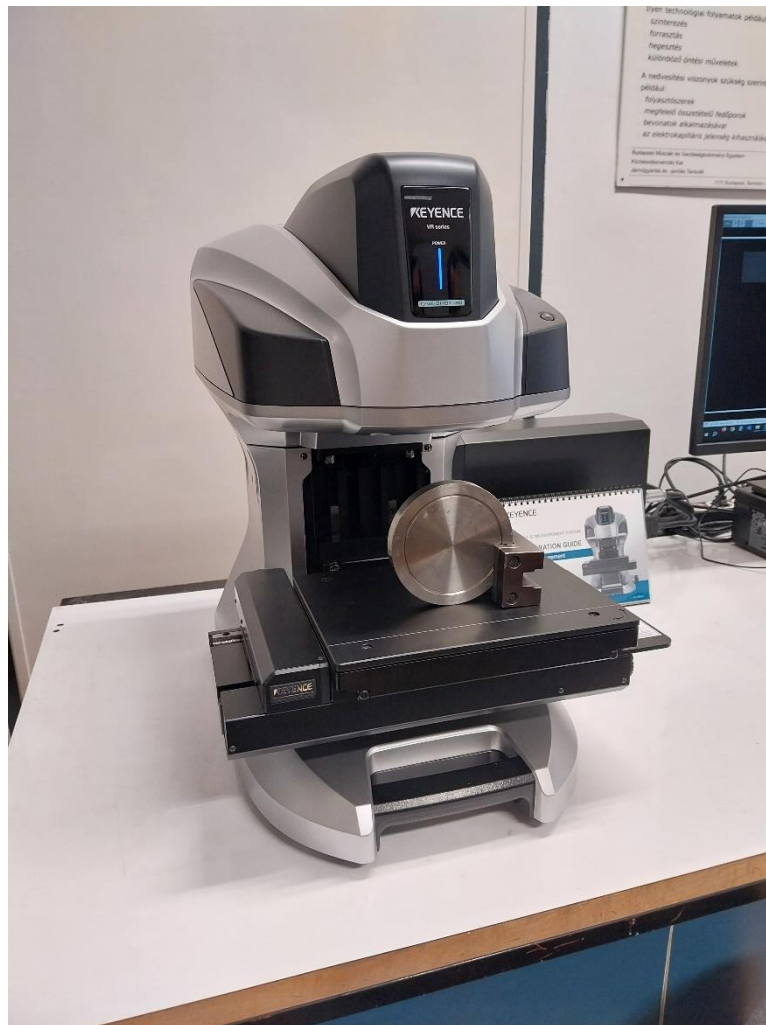
A fogászati eszközök készítésére is kiválóan alkalmazható, ez már egy ma is működő iparág, például implantátumok, hidak, koronák személyre szabott legyártásához nagyszilárdságú anyagokból, mint a kobalt-króm. Ezek a termékek tökéletesen illeszkednek a problémás területre, jó szilárdsági tulajdonsággal bírnak, időtállóak, és gyorsan elérhetőek az additív technológiáknak köszönhetően.

A repüléstechnikában is remekül helytállnak ezek az anyagok, mivel ott nagyon fontos a súlycsökkentés, mindezt úgy, hogy a szilárdság ne romoljon vagy akár még nagyobb is legyen. Ezek azonban nem lehetetlenek a generatív tervezéssel, amikor a méretek, terhelések, az anyag és a szilárdság megadása után egy mesterséges intelligenciára épülő software optimalizálja az alkatrész alakját, ezáltal jelentős súlyt megtakarítva viszont ezt csak additív gyártással lehet elkészíteni gazdaságosan. A technológiát alkalmazzák a hétköznapi repülőktől a rakétákig, amiken a szimpla konzoltól a hajtóműelemig bármit le lehet gyártani. Még egy egész rakétafűvóka is készíthető vele.

Tehát a technológia és az additív gyártó berendezések számos területen használhatóak és nagy jövő áll előttük. [13]

2.2. Alkalmazott mérő berendezés ismertetése

A maradó feszültség mérését konzolos módszer segítségével végeztem, amire a későbbiekben bővebben is kitérek. A legyártott konzolos mintát pedig egy Keyence VR 5200 típusú mérőberendezés segítségével mértem. Ahol először beszkeneltem a mintát majd a hozzá tartozó software segítségével kitudtam nyerni a számomra szükséges magassági adatokat.



Ábra 2-3 Keyence VR 5200 Mikroszkóp a BME laboratóriumában. (Saját kép)

Keyence VR 5200 mikroszkóp teherbírása 4.5 kg, munkatávolsága 7,5 mm-es és 4 megapixeles felbontással és 2x-es dupla telecentrikus lencsével rendelkezik. A mérési fény forrása fehér LED, a zoom 1x-től 4x-ig állítható, a kijelző felbontása pedig 0,1 μm . A

tápellátáshoz 100 és 240 V közötti, 50/60 Hz-es tápfeszültség szükséges. A berendezés működési tartománya +15 és 30 °C közötti hőmérsékleten és 20 és 80 % közötti relatív páratartalomnál van. [14]

2.3. Kutatás jelentősége és célja

Az additív technológiák témakörében azért szükséges kutatni, mert annak ellenére, hogy a folyamat nem annyira új, még rengeteg dolog van, amit nem tudunk róluk. Ebben az sem segít, hogy körülbelül tíz paraméter van, amit egy test legyártásakor állítani tudunk, ami az anyag végleges minőségét jelentősen befolyásolja és ezek kombinációja százas nagyságrendű. Továbbá a különböző berendezések is nagyban eltérnek egymástól, ezért nem mindegy, milyen gépet használunk. Ez is okozhatta, hogy a fentebb említett dolgozatok során, sok esetben, nem tudtak egyértelmű következtetéseket levonni több mérés össze hasonlításánál. Tehát ezért volt szükség a mérés elvégzésére, mivel jobban megszerettem volna érteni a saját gépünket (ami egy EOS M 100 DMLS). Valamint a paraméterek kiválasztásánál az volt a legfőbb szempont, hogy minél jobban le tudjam csökkenteni a gyártási időt anélkül, hogy ez az anyag minőségének rovására menne, mivel a folyamat jelenleg igen időigényes, azonban van benne potenciál. Ezért fontos lenne, a gyártás idő csökkentése, mert ezáltal tudnám növelni a termelékenységet és azzal a technológiára költségei redukálnának.

Végül pedig kiválasztom a legjobb paraméter beállítást és egy maradó feszültség vizsgálatot végzek rajta konzolos megközelítési módszer segítségével, így össze tudom hasonlítani a gyári beállítás és a paraméter változtatás utáni maradó feszültséget, amely egy következő szempontot ad a paraméterváltoztatás hatásának minősítésére.

2.4. A maradó feszültség mérése

A maradó feszültség mérése elengedhetetlen, annak meghatározásához, hogy az alkatrész ellenáll-e az élettartama során fellépő igénybevételeknek.

Ha a maradó feszültség a paraméterváltoztatások után nem változik jelentősen, az azt bizonyítja, hogy a változtatások várhatóan nem befolyásolták rossz irányba az anyag mechanikai tulajdonságait.

A maradó feszültség mérési technikáit két főcsoportba oszthatók: roncsolásos és roncsolás mentes vizsgálatokra. A roncsolásos módszerek során az alkatrész károsodik, vagy megváltozik, a feszültség feloldása érdekében. Ezzel szemben a roncsolás mentes vizsgálatoknál a feszültség mérése az alkatrész megváltoztatása nélkül történik meg.

Technikák	Előnyök	Hátrányok
Lyukfúrás	Gyors, egyszerű Széles körben elérhető Hordozható Sokféle anyagnál alkalmazható Mély lyuk fúrható így vastag alkatrészeknél is használható	Adatok értelmezése Roncsolásos Korlátozott feszültség érzékenység és felbontás
Röntgendiffrakció	Sokoldalú, széles körben elérhető Sokféle anyagnál alkalmazható Hordozható berendezés Macro és micro RS	Alapvető mérés Laboratoriumi berendezések, kis alkatrészek
Szinkrotron	Röntgensugarak jobb penetrációja és felbontása Mélységi profilozás Gyors, egyszerű Macro és micro RS	Speciális képzettség Laboratoriumi berendezés
Neutron diffrakció	Kiváló penetrációja és felbontása 3D térképek Macro és micro RS	Speciális képzettség Laboratoriumi berendezés
Görbület és réteg eltávolítás	Viszonylag egyszerű Sokféle anyagnál alkalmazható Más technikákkal is kombinálható a feszültség profil kialakításához	Egyszerű formákra korlátozódik Roncsolásos Laboratoriumi berendezés
Mágneses	Nagyon gyors Mágneses technikák széles választéka Hordozható	Csak ferromágneses anyagoknál alkalmazható
Ultraszónus	Általánosan elérhető Nagyon gyors Alacsony költségek Hordozható	Korlátozott felbontás

Ábra 2-4 Maradó feszültség mérési technikák [14]

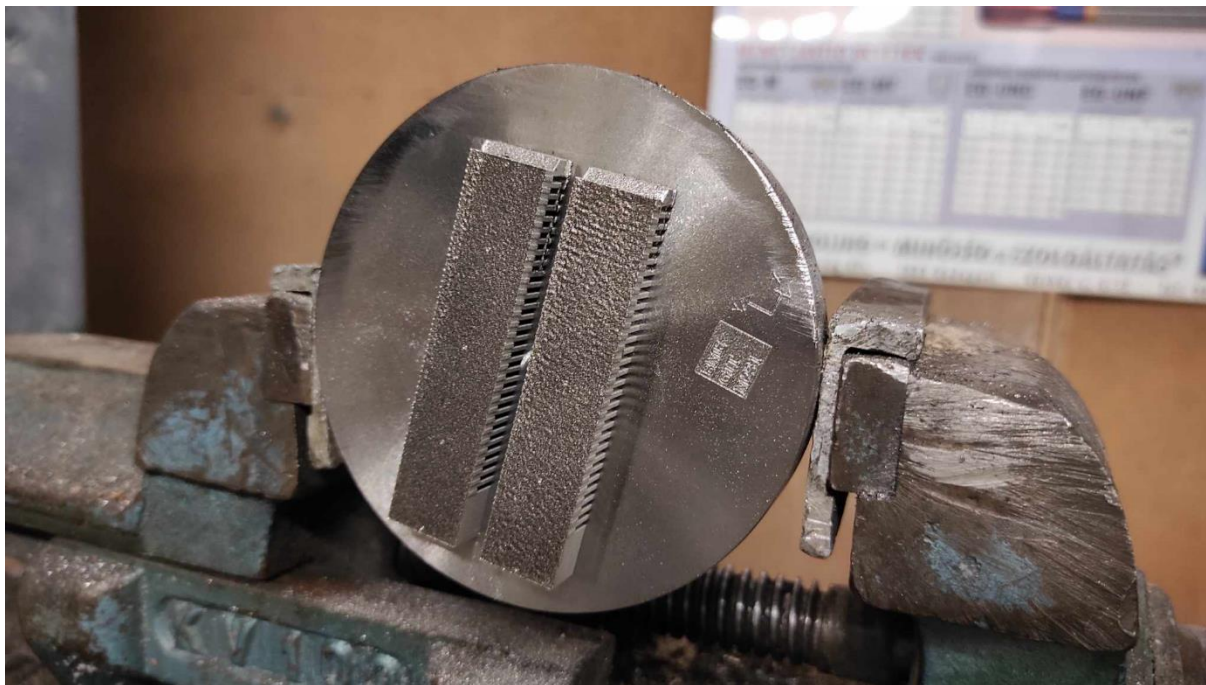
Néhány jellemzőbb maradófeszültség vizsgálati módszer a röntgendiffrakció, görbület- és réteg eltávolítás, lyukfúrásos módszer, és a konzolos megközelítés, ami egy félig roncsolásos módszer. A dolgozatomban ezt a módszert használtam a maradó feszültség megállapításához. [14]

2.5. Maradó feszültség mérése konzolos megközelítéssel

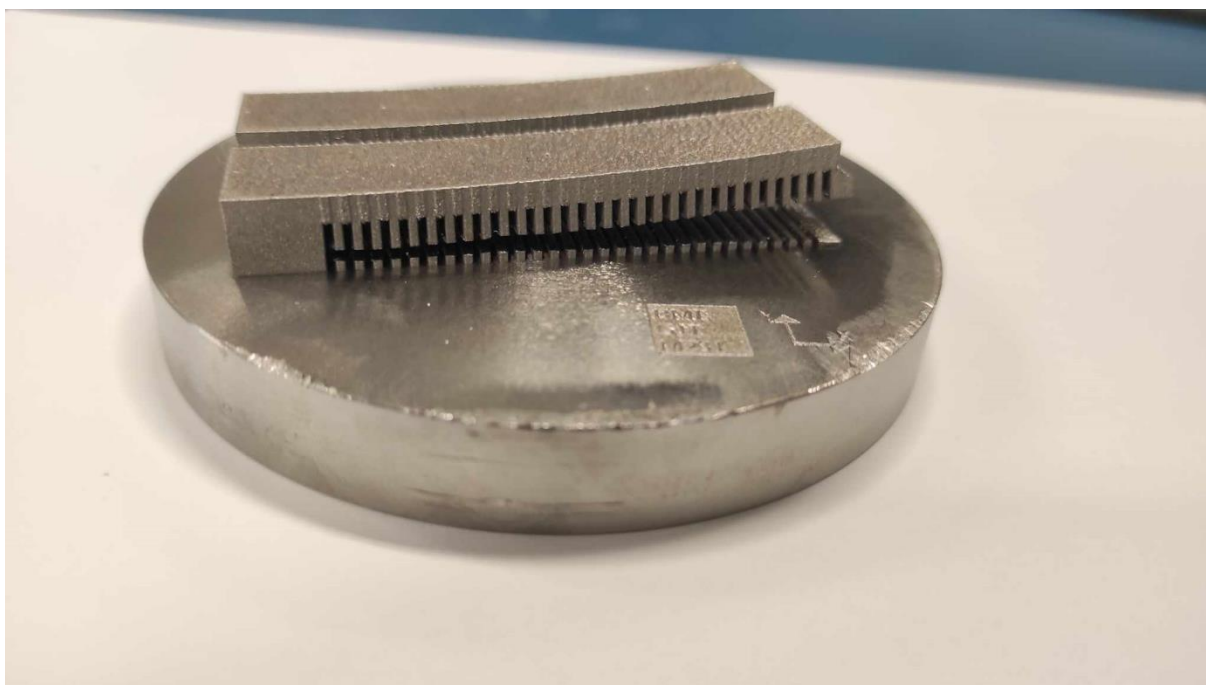
Az alkatrész megbízhatóságának biztosítása érdekében a maradó feszültségek szintjét pontosan meg kell mérni és elemezni. Az additív gyártással készített Ti6Al4V ötvözetekben a maradó feszültség kimutatására több módszert is kidolgoztak, ilyenek a röntgensugár diffrakció, neutron diffrakció és lyukfúrásos technikák. Azonban ezek a módszerek megkövetelik drága eszközök beszerzését vagy bonyolult mintaelőkészítési eljárásokat.

Ezért fejlesztették ki a konzolos megközelítést. Aminek lényege, hogy téglalap alakú konzolos testet készítettünk Ti6Al4V-ből. A konzolt tartó lábak támasztják meg a gyártás során, majd ezeket a gyártás végétével elvágjuk, és a maradó feszültség hatására a levágott

konzol felhajlik. A konzolt a vágás előtt és után megmérjük és ez alapján a megfelelő képlet segítségével kiszámítható a gyártás során keletkezett maradó feszültség.

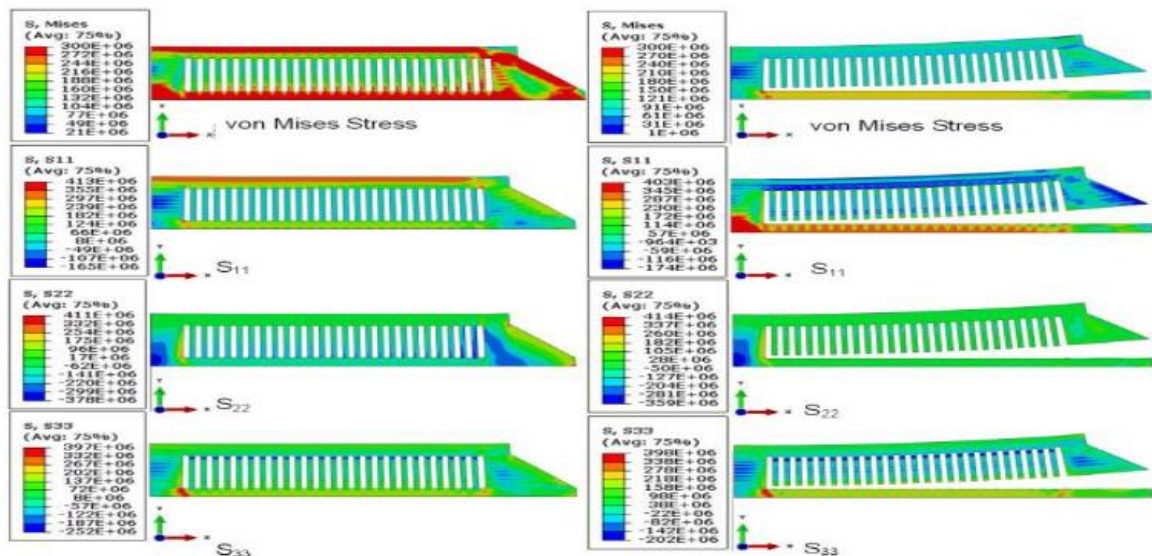


Ábra 2-5 A vizsgált konzolos tartólevágás előtt (saját kép)



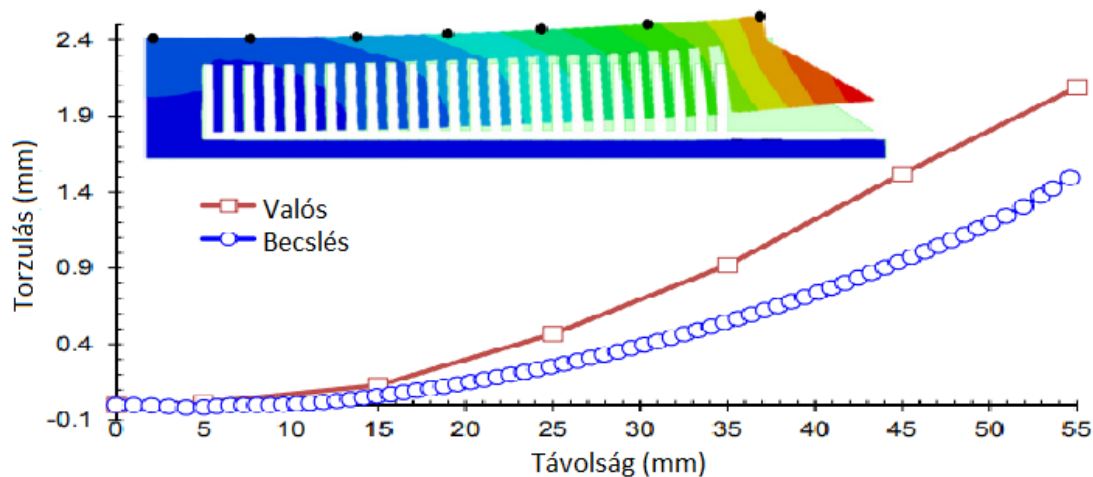
Ábra 2-6 A vizsgált konzolos tartó levágás után (saját kép)

A lenti ábra megmutatja (Ábra 2-7) von Mises feszültséget négy jellemző esetben az építési platformról való levágás előtt és után a levágás után bemért konzolok esetében.



Ábra 2-8 von Mises feszültséget három jellemző esetben az építési platformról való levágás előtt és után. [12]

Az alkatrész várható torzulásának megbecsülését szimulációval is el szokták végezni, amint az az alábbi ábrán is látható (Ábra 2-10), a torzulás a kísérletben a konzol felső részén hosszirányba ment végbe. A változás vizualizálásának érdekében, a szimulációban, a felső él feketepontokkal van ellátva és ezeknek a pontoknak az elmozdulása mérhető a szimuláció során és a valós próbatesten.



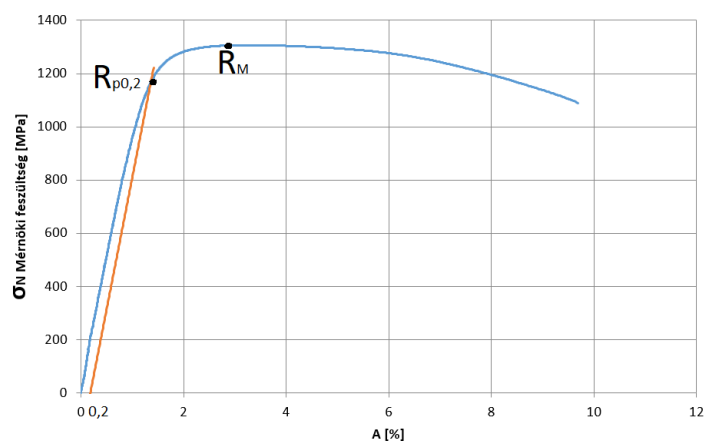
Ábra 2-9: Szimulációs előre jelzés [12]

A támaszt eltávolítása egy homorú, felfelé irányuló görbületet eredményez. A torzulás mértéke megegyezik az előre jelzett eredményekkel. A termikus előélet felelős ennek a görbületnek a kialakulásáért. Az alapanyagpor a lézerpásztázás hatására megolvad, és megnő a térfogata, viszont az anyag lehűlésével csökken a térfogat, ami jelentős húzó maradó

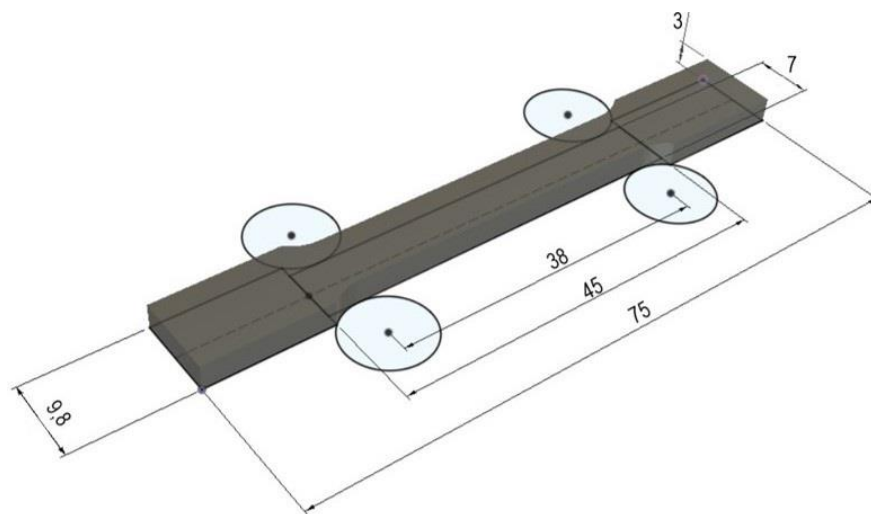
feszültséget okoz. A húzó feszültség nagy része felszabadul, miután levágjuk a konzolt az építési platformról, és stabil állapotba kerül. Az irodalmak szerint a konzolos-módszer megbízható és hatékony módszernek bizonyul a maradó feszültségek kimutatására az additívan gyártott Ti6Al4V ötvözetekben. Egyes források szerint a legtöbb additív gyártási technológia jelentős hőgradienseket termel az építés során, amelyek nagymértékű maradó feszültséget idéznek elő, ez pedig deformációt vagy repedéseket okozhat az építési folyamat során, és akár még utána is. Ez különösen hangsúlyos lehet a Ti6Al4V esetében, az alacsony hővezetőképessége miatt. A konzolos-módszernek köszönhetően azonban fontos betekintést nyerhetünk az anyagok viselkedésébe és lehetséges alkalmazhatóságára. [12]

2.6. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat során a mérnöki feszültséget határoztam meg a százalékos megnyúlás függvényében. Ez abban különbözik a hagyományos szakítódiagramtól, hogy a függőleges tengelyen a mérnöki feszültség van, ami a próbatestre ható erő elosztva a kezdeti kereszt



Ábra 2-12: Ti-6Al-4V szakítódiagram



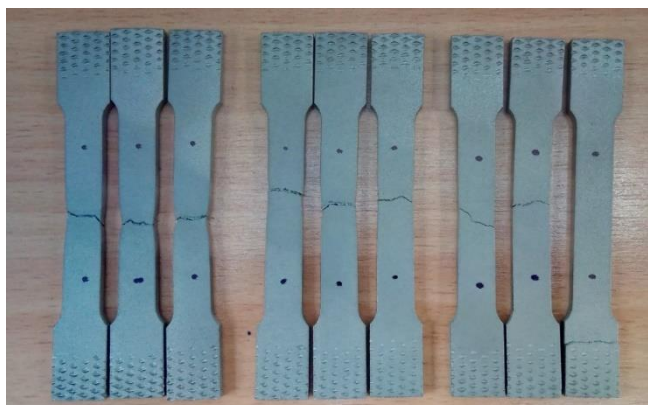
Ábra 2-11: A szakító próbatestek geometriai mérete [15]

metszetével, és a vízszintes tengelyen a milliméterben megadott megnyúlás helyett százalékos megnyúlás található. Ez alapján az anyag jellemző mechanikai tulajdonságait szerettem volna meghatározni, amik pedig a Young-modulus vagy rugalmassági modulus (ami a rugalmas szakaszra illesztett egyenes meredeksége alapján határozható meg). A szakítószilárdságot az ábra (Ábra 2-12) R_m -el és az egyezményes folyáshatárt $R_{p0,2}$ -vel jelöli (ezt úgy határoztam meg, hogy 0,2% maradó nyúláshoz tartozó pontból egy, a rugalmas szakasszal párhuzamos egyenest húztam, ahol ez az egyenes metszi a szakítódigrammot, ott található az $R_{p0,2}$ érték). A százalékos, fajlagos szakadási nyúlás, ami a próbatest szakadás után mérhető megnyúlása az eredeti jeltávolság százalékában.

A szakítóvizsgálat során a szakítódigrammon kívül jelentős szerepe van magának a szakító pálcának, melyet a következő jelölésekkel szoktak ellátni. A próbapálcánál fontos információk az eredeti jeltávolság L_0 , amihez tudjuk viszonyítani a megnyúlást, nálam ez 26 mm volt, valamint a keresztmetszet a jeltávolságon belül, ami az S_0 , ennek segítségével tudjuk kiszámítani az egységnyi felületre eső erőt.

A vizsgálatokat a Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékének Anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem el.

A szakítást végző gép egy Zwick Z250-es, melynek a szakítási sebességét 2mm/sec értékre és a befogási távot 47 milliméterre állítottuk. Az optikai nyúlásmérő egy Mercury Monet DIC, ennek a mérés során figyelembe vet eredeti jeltávolsága 26 mm volt.



Ábra 2-13: Mérés során elszakított próbatestek

2.7. A módosított paraméterek bemutatása

A mérés során felhasznált próbatestek a (Táblázat 2-1) táblázatban is látható paraméterbeállításokkal készültek el. Ezek közül az első a DP, ami a gyári, javasolt alapbeállítást jelenti. A változtatásokat tartalmazó darabokat pedig TP-vel jelöltem. A mérés során csináltam még további két másik jelölést a TPX és TPXY-t, ami csak a nyomtatás

irányában tér el a DP beállítástól. A TPX és TPXY kivételével a Táblázat 2-1 tartalmazza a különböző beállításokat.

Skip layer [-]		1	2				0
Distance [mm]	0,12			0,18	0,24		0,06
Speed [mm/s]						2100	1400
Power [W]						150	100
	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	DP

Táblázat 2-1 Gyártási paraméterek

A táblázatban található változtatott paraméterek a következőket jelentik. A „Skip layer” vagy is a réteghiagyás annyit takar, hogy hány lefektetett porrétegenként pásztázzuk végig lézerrel a keresztmetszet, például az 1-es „skip layer”-nél minden második réteget pásztázunk, amíg 2-nél minden harmadikat. A „distance” azaz pásztázási távolság, azt határozza meg, hogy egymással párhuzamos pásztázásoknál a lézerfolt középpontjai mekkora távolságra vannak egymástól, ez a táblázatban milliméterben megadott érték. Ez azért lényeges, mert ettől függ, hogy mekkora két pásztázási sáv átfedése, ami a szemcsék újraolvadásának mértékét befolyásolja. „Speed” változtatásánál a pásztázási sebességet változtattam, ami mm/s-ban értendő. Végül pedig a „power” ami a lézer teljesítményét és ennek változtatását jelenti watt-ban megadva. A paraméterek kiválasztásánál az volt a legfőbb szempont, hogy minél jobban le tudjam csökkenteni a gyártási időt anélkül, hogy ez az anyag minőségének rovására menne. Ahogyan ez a táblázaton is látszik, ezt az alap paraméterbeállításhoz képest nagyobb értékek megadásával próbáltam elérni.

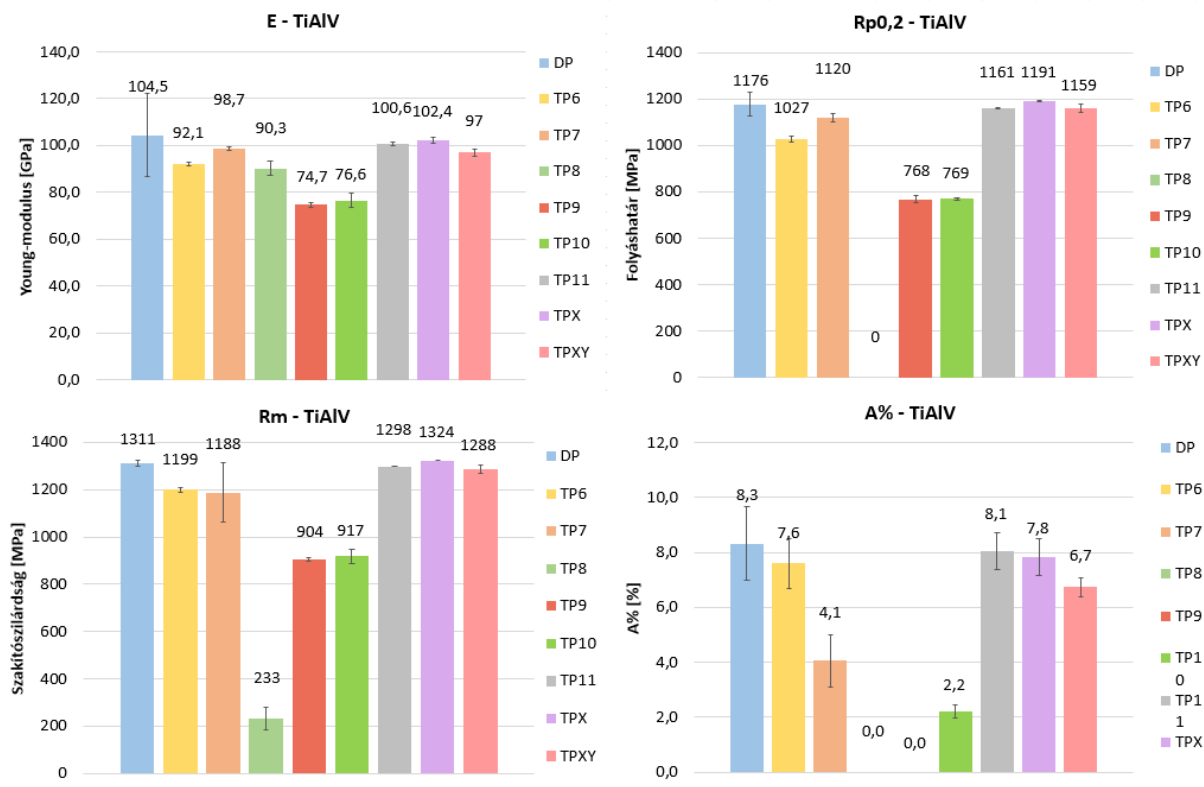


Ábra 2-14: Legyártott probatestek [15]

2.8. Eredmények bemutatása

A vizsgálat során először az alap paraméterbeállítással csináltam meg a szakítóvizsgálatot, majd a többi értéket ehhez tudtam hasonlítani. Az összehasonlítást a számomra legfontosabb

mechanikai jellemzők alapján végeztem, amik a Young-modulus vagy rugalmassági modulus (E), a szakítószilárdság (R_m), a terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár ($R_{p0,2}$) és a százalékos nyúlás (A).

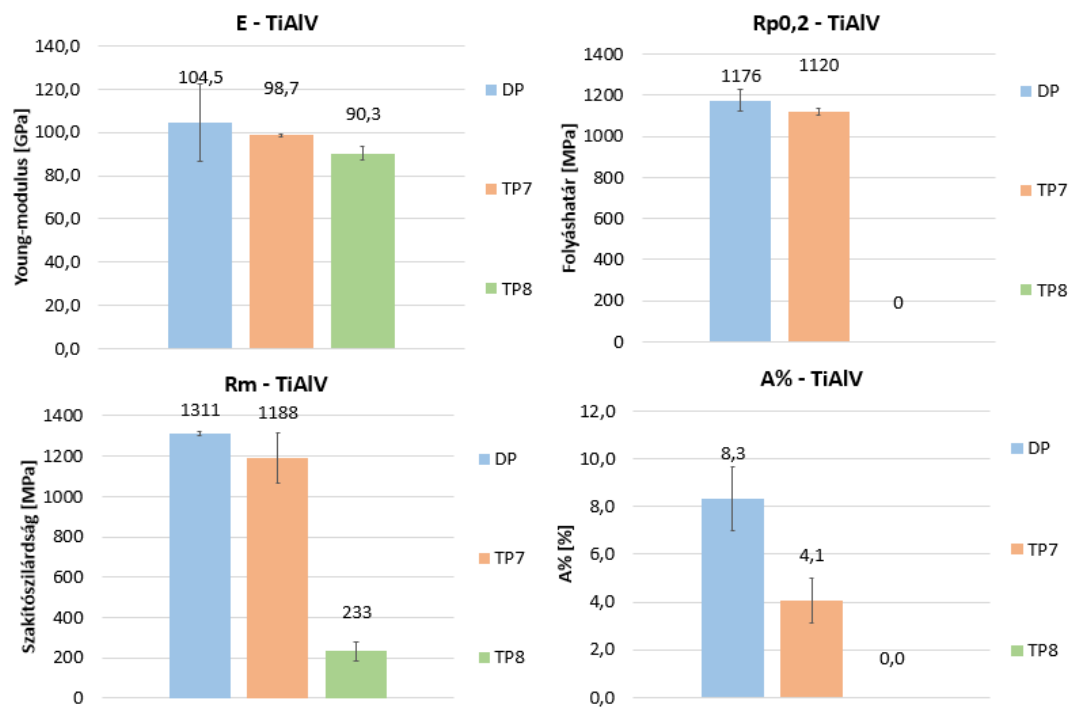


Ábra 2-15: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra

Az ábrán (Ábra 2-15) látható a fent említett mechanikai tulajdonságok oszlopdiagramjai azonos beállítás szerint csoportosítva, mivel mindegyik paraméterrel három mérést végeztem a megbízhatóbb eredmények érdekében. A kiértékelt adatok átlagát és szórását számítottam még ki, az egyszerűbb összehasonlítás és a mérési pontosság szemléltetésének érdekében. Az adatokat összefoglaló táblázat (Táblázat 0-1) és szakítódigramok összefoglaló ábrája (Ábra 0-2) a mellékletek közt találhatóak meg.

2.8.1. Réteghagyás (skip layer) hatása

Az alábbi diagram segítségével az alap paraméterbeállítással készített és a „skip layer” változtatott próbatestek jellemző mechanikai tulajdonságait lehet össze hasonlítani. A narancssárga oszlop az egy, amíg a zöld a két „skip layer”-el gyártott pálcák átlagát jelenti.

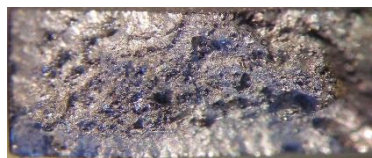


Ábra 2-16: Skip layer változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

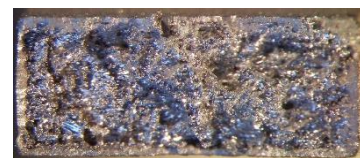
Az ábrán (Ábra 2-16) lévő diagramokból látszik, hogy a rétegek kihagyásának következtében az anyag egyre ridegebb lett. Egy kihagyott réteg nem befolyásolta jelentősen a folyáshatárt, azonban két kihagyott rétegnél, egyik próbatestnél sem sikerült kiértékelni sem az egyezményes folyáshatárt, sem a szakadási nyúlást, mivel a próbatestek nyakba szakadtak, illetve ridegtörés következett be. Egy kihagyásnál a szakítószilárdság sem csökkent jelentősen, azonban két kihagyásnál ugyanez nem mondható el, ebben az esetben az agyag ridegsége és a porozitása is közre játszhatott az alacsony eredményekben. Az anyag megnyúlását a változtatások jelentős mértékben befolyásolták, mint az az ábrán is látható, egy kihagyásnál felére csökkent, két kihagyásnál pedig, mindegyik próbatest nyakban szakadt, így nem tudtam kiértékelni ezt az adatot.



Ábra 2-19: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2

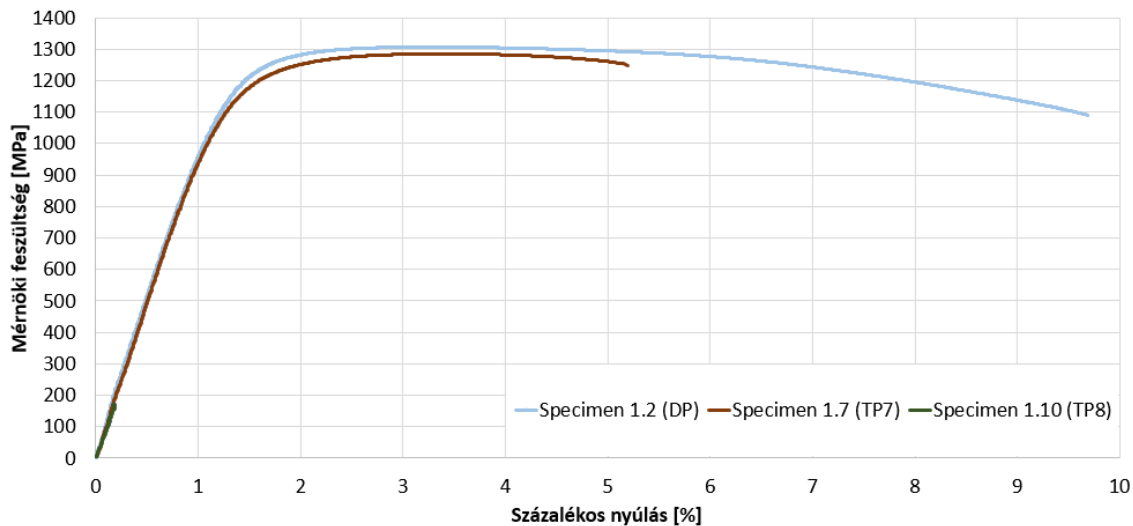


Ábra 2-18: TP7 minta szakadási felülete Specimen 1.7



Ábra 2-17: TP8 minta szakadási felülete Specimen 1.10

Mint a mellékelt ábrák is mutatják, a rétegkihagyások növekedésével az anyag porozitása is nőtt, két kihagyásnál már láthatóak az anyagban a szemcsék. Az anyag szélén egy vékony réteg is megfigyelhető, ami annak köszönhető, hogy a lézer a kontúrt minden esetben külön menetben körüljárja.

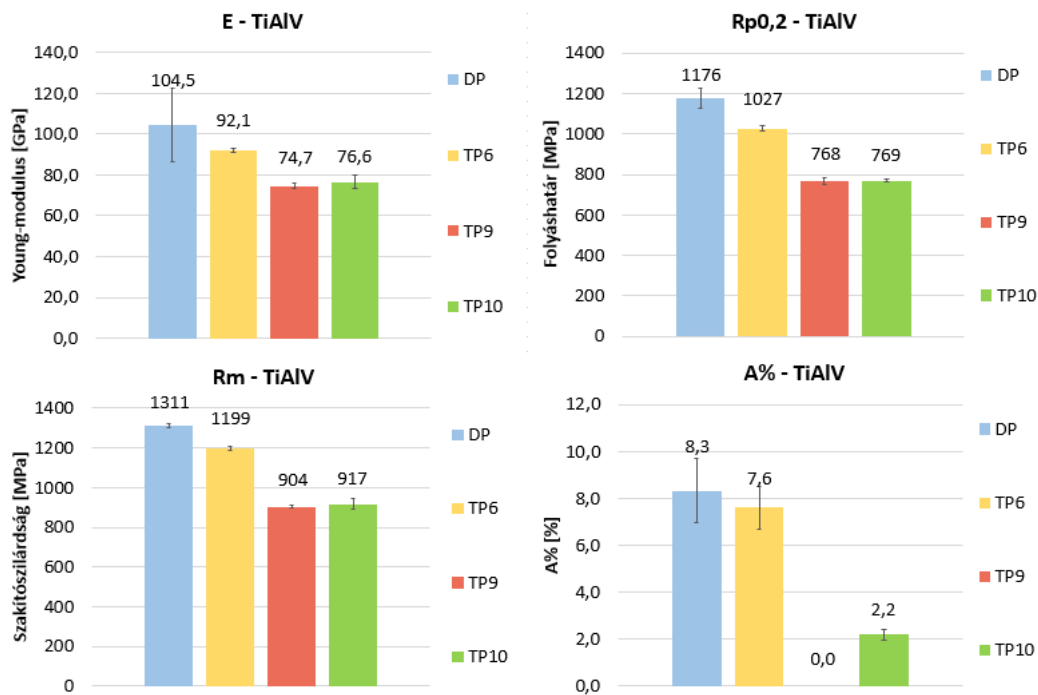


Ábra 2-20: Skip layer változtatások szakítódíagramjainak összehasonlítása

Az ábrán (Ábra 2-20) látható szakítódíagramokról is leolvasható, hogy a merekségben (ami a rugalmassági moduluszt adja) nincs sok különbség, viszont a TP7 (ami az egyes „skip layer” érték) folyáshatára és szakítószilárdsága kicsit, valamint a nyúlása jóval kisebb, mint a DP értéke. A TP8 (ami a kettes „skip layer”) a rugalmassági modulusz kivételével (rugalmas szakasz mereksége) mindenben elmarad a másik kettőhöz képest.

2.8.2. A pásztázási távolság (distance) hatása

Az (Ábra 2-21) ábrán is látható diagram segítségével a pásztázási távolság változtatásának hatását lehet megvizsgálni a tulajdonságokra nézve. A kék oszlop csak úgy, mint az előző diagramon, az alap paraméterbeállítást jelenti, ahol 0,06 mm a pásztázási távolság. A TP6, amit az ábra a sárga oszlopként jelöl, 0,12 mm-es, a TP9, ami a piros oszlop, 0,18 mm-es és a TP10, ami meg a zöld oszlopként van feltüntetve a diagramon, 0,24 mm-es távolsággal készült. A tulajdonságaikat tekintve jól látszik a TP6 esetében, hogy mind a négy tulajdonsága egységesen csökkent az alap paraméterbeállításhoz képest, azonban nem olyan nagymértékben.



Ábra 2-21: Distance változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

A TP9 hasonló arányban csökkent a TP6-hoz képest, mint az alap paraméterbeállításához viszonyítva, ami nem meglepő az arányos pásztázási távolságváltoztatás után. Ez jól látszik a rugalmassági modulusnál, a folyáshatárnál és a szakítószilárdságnál, azonban a megnyúlást nem tudtam kiértékelni, mivel a próbatestek mind három vizsgálat során nyakban szakadtak, és így ez nem mutatott valós eredményt. A TP10 nemhogy nem követte az eddig tapasztalt arányos csökkenést, hanem még magasabb értékeket is adott, mint a TP9 az első három értékelési szempont alapján. Ebben az esetben a megnyúlásra is értelmezhető eredmény született, azonban lényegesen alacsonyabb az eddig értékelt DP és TP6-hoz képest, ami jelentős ridegedésre utal.



Ábra 2-24: DP minta szakadási felülete
Specimen 1.2



Ábra 2-23: TP6 minta szakadási felülete
Specimen 1.5

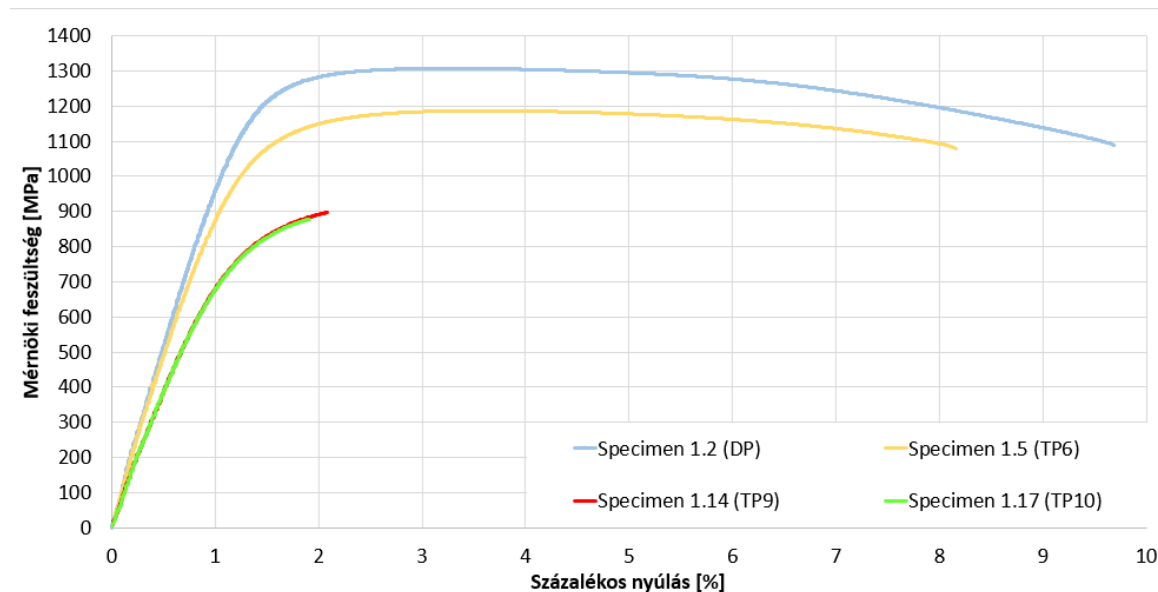


Ábra 2-25: TP9 minta szakadási felülete
Specimen 1.14



Ábra 2-22: TP10 minta szakadási felülete
Specimen 1.17

Ezeknél a szakadási felületeknél is felfedezhető a porózus felület, valamint az, hogy a TP9 és TP10-es minták felülete nagyon hasonló, magyarázatot adhat a megegyező viselkedésükre.



Ábra 2-26: Distance változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása

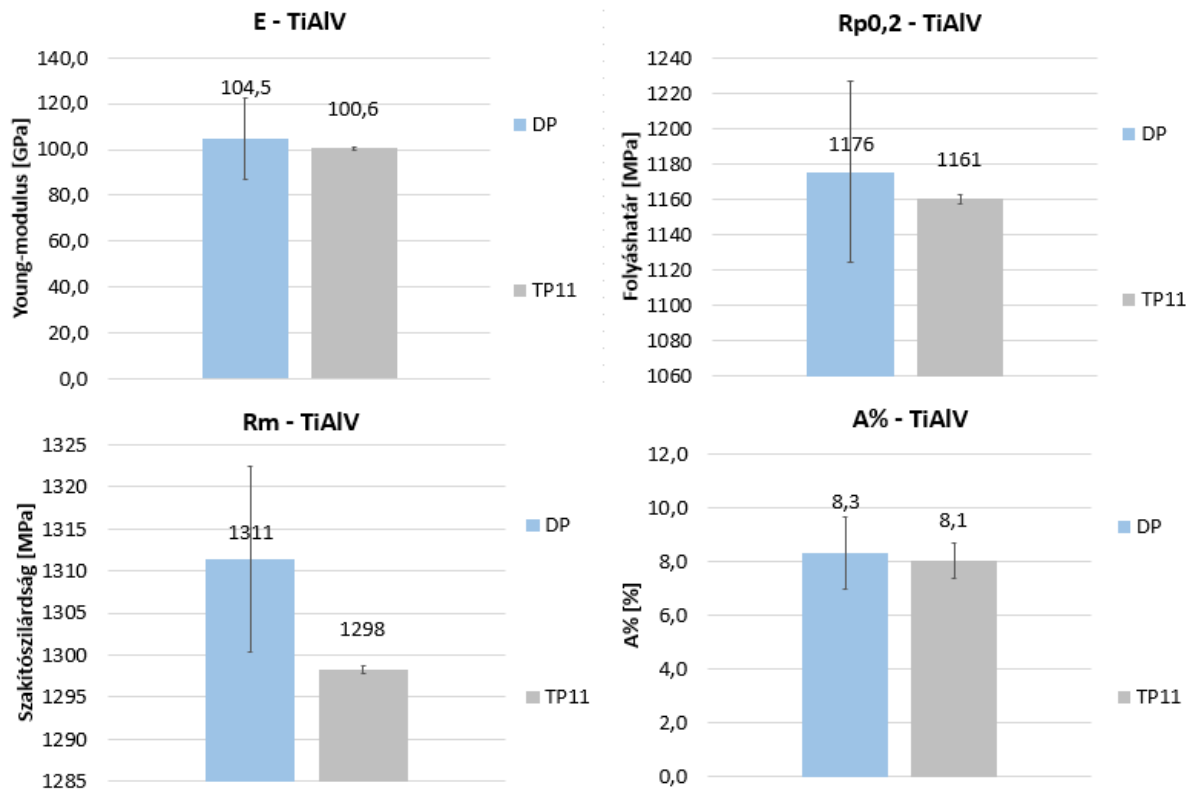
Az (Ábra 2-26) ábrán megfigyelhető szakítódigramok is alátámasztják, amit az oszlopdiagramból kiolvastam, vagy is a TP6 csökkenését a DP-hez képest, illetve a TP10 nem követi a csökkenési sémát, és szinte megegyezik a TP9-cel.

2.8.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség (power és speed) hatása

Az (Ábra 2-27) ábrán lévő diagramon a „power”, azaz lézerteljesítmény és a „speed”, a pásztázási sebesség változtatás hatása figyelhető meg. Az alap paraméterbeállítással rendelkező próbatestek 100 watt és 1400 mm/s értékekkel készültek. Ebben az esetben egy próbatestcsoport készült amit TP11-nek nevezünk el az ábrán pedig szürkével jelöltem. Mind két értéket egyszerre változtattuk a teljesítmény értékét 150 watt-ra és a sebességet pedig 2100 mm/s-ra emeltük meg.

Az (Ábra 2-27) ábrán megfigyelhető, hogy a TP11-nél a változtatások következtében kicsivel csökkentek a szilárdsági és alakváltozási értékek az alap paraméterbeállítással rendelkező próbatestekéhez képest, de hangsúlyozni kell, hogy ez a különbség rendkívül csekély 3-4%-os eltérést jelent csupán, ami egy ilyen mérés során nem számít jelentős eltérésnek. Ez a kis eltérés a változtatások ellenére annak köszönhető, hogy a lézerteljesítményt és a sebességet

párhuzamosan változtattuk meg úgy, hogy az alap paraméterbeállításhoz képest a lézer-energiásűrűség állandó maradjon, ahogy ez a képletéből is látszik (1. egyenlet).



Ábra 2-27: Power és speed változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

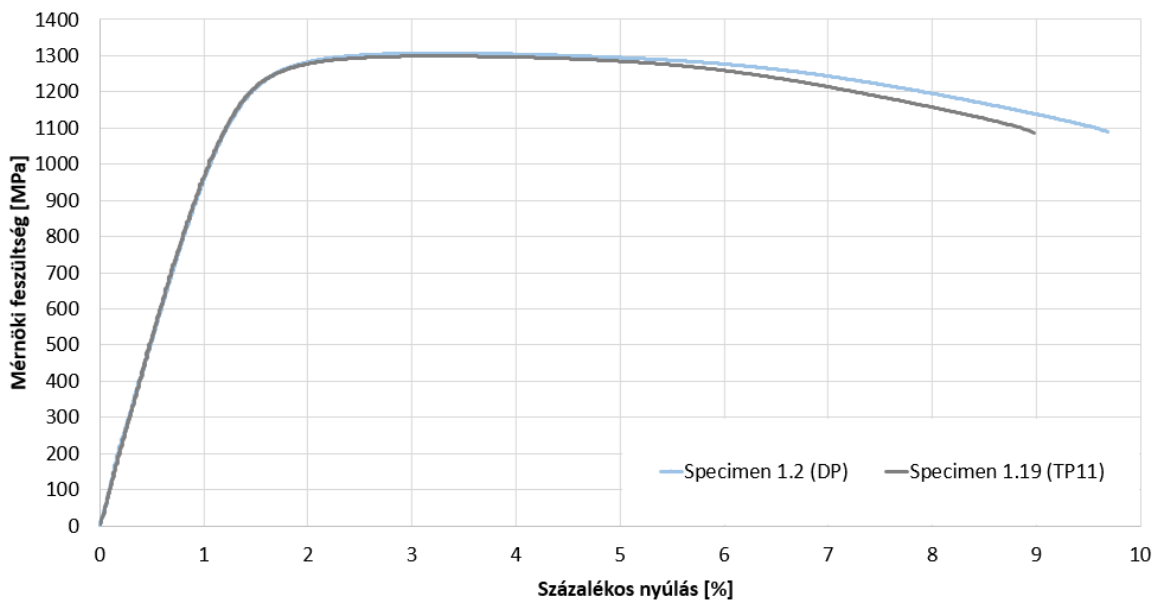


Ábra 2-29: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2



Ábra 2-28: TP11 minta szakadási felülete Specimen 1.19

A fenti két próba test szakadási felületéből is látszik, hogy a szerkezetük hasonló, ami további magyarázatot ad a megegyező viselkedésre.



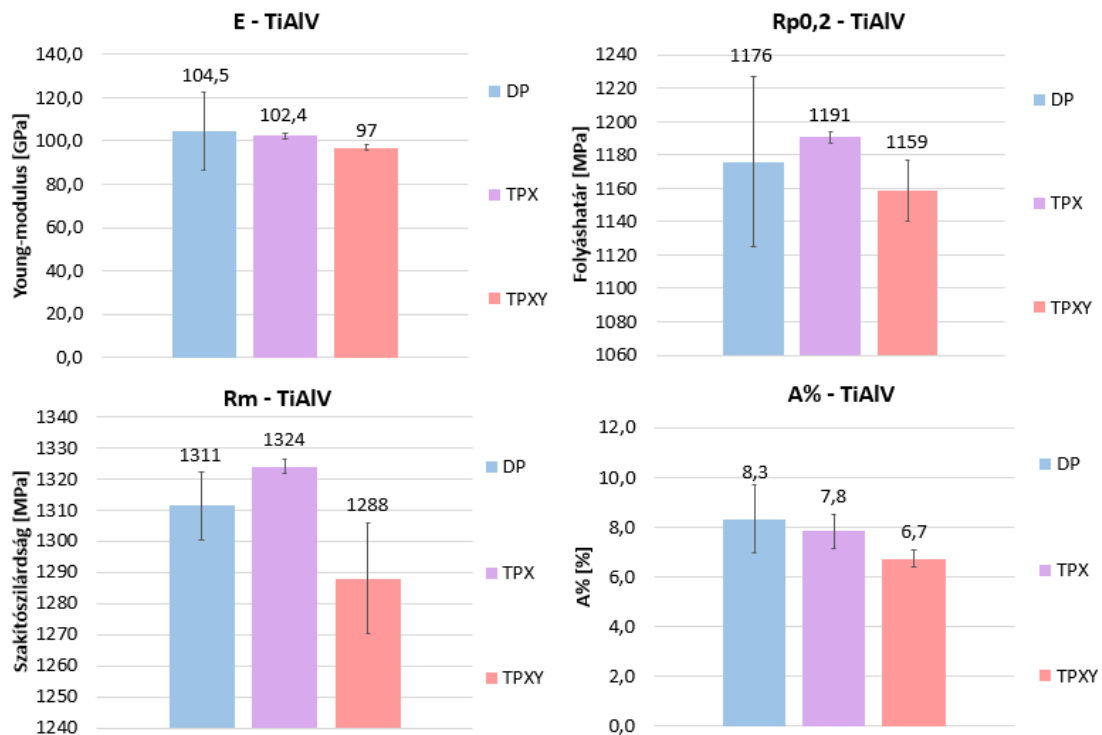
Ábra 2-30: Power és speed változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása

Az (Ábra 2-30) ábrán feltüntetett szakítódigram is alátámasztja az előző ábrákon láthatókat, hogy a kettő diagram szinte azonosan fut egymással.

2.8.4. Gyártási irányok változtatása

Az (Ábra 2-31) ábrán lévő diagram a különböző koordináták szerinti pásztázási irányok változtatását hasonlítja össze. Az alap paraméterbeállításnál a pásztázási irány rétegenként 67 fok-os szögben változott. A TPX esetében minden réteg párhuzamos volt. A TPXY-nál pedig rétegenként 90 fokkal elfordult a pásztázási irány. Ezen belül mindegyik próbatest vertikális irányba lett gyártva.

Az (Ábra 2-31) ábrán is látható diagram alapján elmondható, hogy a változtatások hatására TPX rugalmassági modulusa és nyúlása kicsit alulmaradt az alap paraméterbeállításához képest. Azonban a folyáshatárban és szakítószilárdságban felülmúlta a gyári beállításokat. A TPXY viszont mindegyik vizsgált mérőszám alapján kisebb értéket adott a DP értékéhez képest, viszont nem nagymértékben.



Ábra 2-31: Gyártási irányok hatása a mechanikai tulajdonságokra



Ábra 2-32: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2

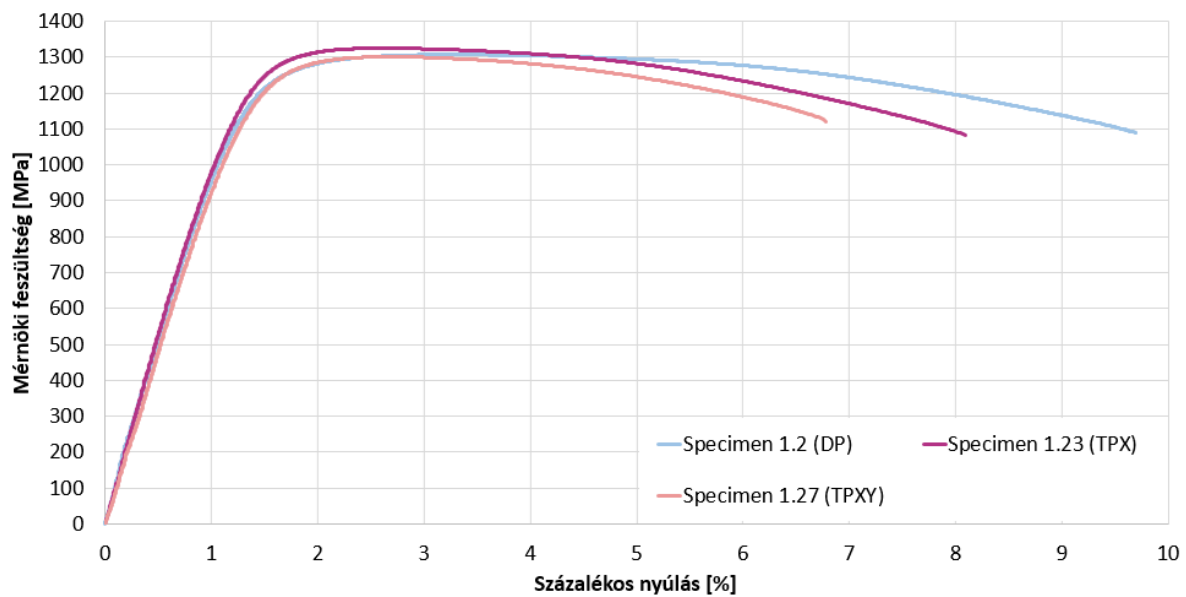


Ábra 2-34: TPX minta szakadási felülete Specimen 1.23



Ábra 2-33: TPXY minta szakadási felülete Specimen 1.27

A képeken az látszik az eddigiektől eltérve, hogy itt az alap paraméterbeállítással rendelkező próbatest szerkezete tűnik porózusabbnak a másik pálcákhoz képest, ez a TPX esetében akár magyarázatot is adhat a jobb mechanikai tulajdonságaira, viszont a TPXY gyengébb jellemzőire nem. Kiolvasható még, hogy mindkét TP ridegedik DP-hez képest, mivel lecsökkent a szakadási nyúlásértékük.



Ábra 2-35: Gyártási irányváltoztatások három jellemző szakítódigramjának összehasonlítása

A szakítódigramon is látható, hogy a TPX folyáshatára magasabban van, mint a DP mintáé, viszont meredekebben csökken (kontrahál), és végül előbb elszakad, ezzel a megnyúlásának értéke is kisebb lesz.

2.9. Gyártási idők változása a paraméterbeállításokkal

A korábbi mérésekből a következtetések levonása után konzolos próbatesteket gyártottunk, hogy az előző mérés sorozatok alapján legkedvezőbbnek tűnő TP11-es paraméterbeállítás

			TP11			
			Sebesség 2100mm/s Teljesítmény 150W			
Anyag:Ti64	1 db henger modell		DP			
Platform kitöltöttség	Átmérő	Felület	Gyártási idő		Gyártási idő	Idő változás
	mm	mm ²	óó:pp		óó:pp	%
10%	31,62	785,40	4:30		3:47	84%
20%	44,72	1570,80	6:45		5:22	80%
30%	54,77	2356,19	8:59		6:56	77%
40%	63,25	3141,59	11:14		8:31	76%
50%	70,71	3926,99	13:27		10:05	75%
60%	77,46	4712,39	15:41		11:40	74%
70%	83,67	5497,79	17:55		13:14	74%
80%	89,44	6283,19	20:09		14:48	73%
90%	94,87	7068,58	22:24		16:23	73%

Táblázat 2-2: DP és TP11 paraméter beállítások gyártási idejének összehasonlítása a platform kitöltöttség függvényében

maradófeszültségét az alap paraméterbeállítást össze tudjam hasonlítani. Ahogy az a már korábban is említett ábrán (Ábra 2-5) is látszik az alap paraméterbeállítás és TP11-es paraméterbeállításokkal készített konzolos tartók egy platformra lettek gyártva a gyártási idő csökkentése érdekében. A következő ábrákon (Ábra 2-5) a konzolos tartók levágás előtt és a (Ábra 2-6) levágás után, a képen jól látható, hogy a konzol felhajlott a maradó feszültség hatására.

A fenti táblázat (Táblázat 2-3) az alap paraméterbeállítás és a TP11- es paraméter változtatás gyártási idejét tartalmazza különböző platform kitöltöttségi szinteknél a TP11- es paraméter változtatás hatása jól látható az idő változásokban.

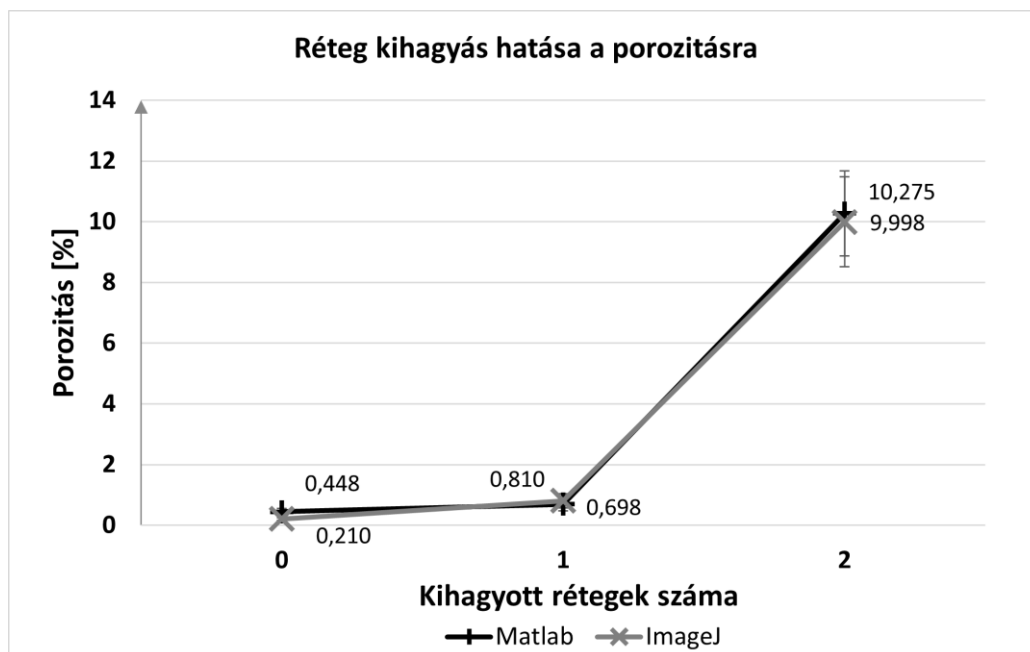
3. MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE

Eredményeimet két szempont szerint igyekeztem értelmezni. Az egyik a szinterezés lézer-energiásűrűsége. Természetesen, ebben az esetben, csak a szinterezésre becsatolt összes energiát tudom könnyen kiszámítani, a hasznosult energiát már nem. A másik szempont a beállítások által okozott szerkezeti porozitás mértéke. A vizsgált paraméterek és a 1. egyenlet felhasználásával kiszámítottam az egyes paraméterbeállításokhoz tartozó lézer-energiásűrűséget, és kiegészítettem vele a gyártási paraméter táblázatot.

Skip layer [-]		1	2				0
Distance [mm]	0,12			0,18	0,24		0,06
Speed [mm/s]						2100	1400
Power [W]						150	100
Energia [J/mm ³]	29,7619	29,7619	19,8413	19,8413	14,881	59,5238	59,5238
	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	DP

Táblázat 3-1: Gyártási paraméterek az energia sűrűséggel kiegészítve

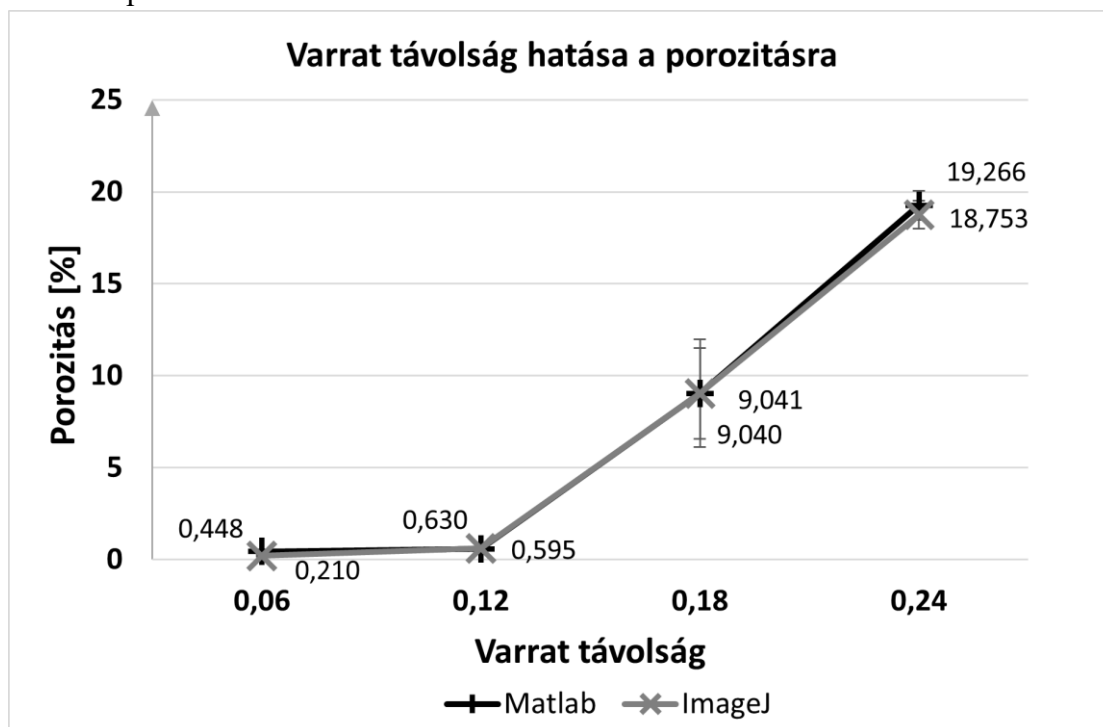
A (Táblázat 3-1) táblázaton megfigyelhető energiasűrűség [J/mm³] (amit energiának jelöltem) és a próbatestek porozitás vizsgálat eredményével, értelmezni tudom az előzőekben taglalt mechanikai tulajdonságokat, mivel mind az energiasűrűség, mind a porozitás nagyban befolyásolja ezeknek az értékét. A használt porozításvizsgálati eredményeket csiszolatok számítógépes képelemzésével végezték el. [14]



Ábra 3-1: Réteg kihagyás hatása a porozitásra [14]

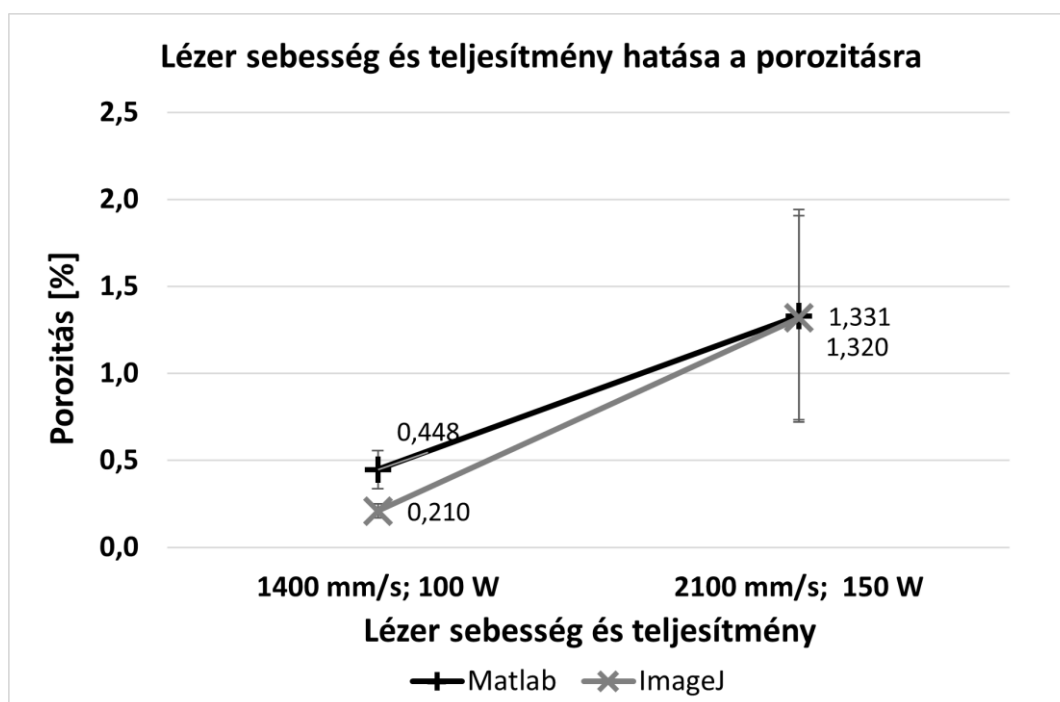
A „skip layer” változtatás esetében, aminek mechanikai jellemzőit az (Ábra 2-16) ábra tartalmazza, azt tapasztaltam, hogy 1 „skip layer” esetén is csökkentek a szilárdsági és alakváltozási értékek azonban 2 „skip layer”-nél drasztikus elridegédést tapasztaltam. Ez a csökkenés az energiasűrűségnél is megfigyelhető, azonban az (Ábra 3-1) ábrán is látható porozításvizsgálat az egyes próbatestek százalékos porozitásértékein keresztül tökéletesen visszaadja a szakítópróba során tapasztaltakat. Ez alapján jobban megérthetőek a „skip layer” 2 alacsony értékű mechanikai jellemzői és ridegsége, mivel ahogy az ábrán is látható 1 „skip layer”-nél kicsivel emelkedett a próbatest százalékos porozitása és 2 „skip layer”-nél pedig jelentősen, 1% körüli értékről 10%-ra, és ez okozhatta a mechanikai értékek romlását.

A pásztázási távolság változtatásánál, aminek mechanikai tulajdonsága és bővebb leírása az (Ábra 2-21) ábrán található. (Azonban azt fontos hozzátenni, hogy a fókuszolt 0,04 mm, vagyis a legkisebb távolság esetében nincs átfedés. Ez azt is jelenti, hogy az olvadéktócsa szabadon terülhet, és inkább az alsó réteggel olvad egybe.) A vizsgálat során azt tapasztaltam, hogy a távolság megduplázásakor egységesen csökkent minden mechanikai érték (szilárdsági és alakváltozási), majd miután háromszorosára emeltem, tovább csökkent. Négyszeres pásztázási távolság nem várt módon, közel azonos értéket adott a háromszorossal. Az első két értéknél a csökkenése az energia sűrűségből is kimutatható azonban a négyszeres értékre ebből sem kaptam választ.



Ábra 3-2: Varrat távolság hatása a porozításra (eddig pásztázási távolságként hivatkoztam rá) [14]

Az (Ábra 3-2) ábrán látható porozitásvizsgálat is csak a kétszeres, háromszoros pásztázási értékeknél tapasztalt csökkenést magyarázza meg a számomra a porozitás százalékos érték növekedésével, mivel ez rontja az anyag mechanikai tulajdonságait. A négyszeres távolság mechanikai jellemzői ez alapján is eltérnek a várt eredménytől. Azonban az kijelenthető, hogy a 0,12 mm-es távolság esetében inkább a kisebb energiabevitel, azaz az alsóbb rétegek kisebb mértékű áthőkezelődése, illetve kisebb maradó feszültségek okozzák a változásokat, míg a nagyobb távolságoknál inkább a porozitás növekedése van hatással a mechanikai tulajdonságokra.



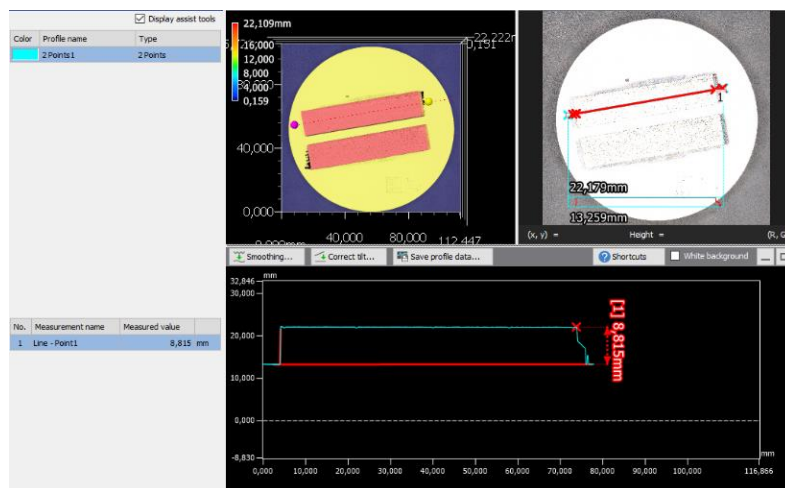
Ábra 3-3: Lézer sebesség és teljesítmény hatása a porozitásra [14]

A lézerteljesítmény és sebesség változtatása során az volt a cél, hogy azonos maradjon a térfogatra vett energiasűrűség, ahogy ez a (Táblázat 3-1) táblázaton is látszik. Ez azért volt fontos, mert ez egy elég jó irányzatnak tűnt a folyamat gyorsítására. Ez a várakozásoknak megfelelően be is igazolódott, mivel az (Ábra 2-27) ábrán látható mechanikai tulajdonságokból is kiolvasható, hogy a két beállításnál nagyon hasonló mechanikai karakterisztikák és értékek jöttek ki, és az (Ábra 3-3) ábrán látható porozitásvizsgálat diagram is alá támasztja ezt. Mivel ahogy a fenti ábrán is megfigyelhető a két anyag porozitása 1,5%-os eltérésen belül esik, amit ha az előző vizsgálatokkal össze hasonlítok, amiknek eltérési tartománya 10-20% közé esik, még inkább rávilágít az különbség kicsi méretére.

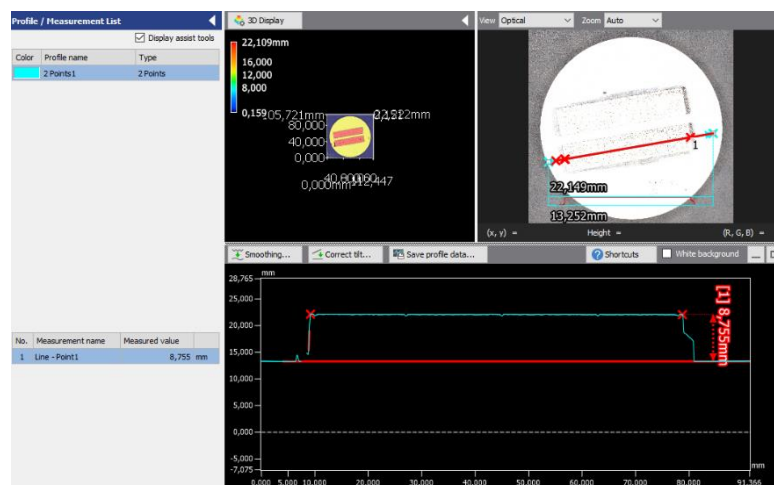
Végül pedig a TPX és TPXY módosításokról elmondható, hogy mivel azoknál csak pásztázási irányváltoztatás volt, nem meglepő, hogy hasonló anyag jellemzőket tapasztaltam náluk a szakítóvizsgálat során. Tehát a TP11 egy jó választás, mert a mechanikai tulajdonságok nem térnek el nagyon, csökken a gyártási idő, és ugyanolyan energiabevitelrel gyártott, mint az alap paraméterbeállításnál. Ennek megfelelően azt várom, hogy a maradó feszültségek tekintetében sem lesz nagy változás.

3.1. Eredmények validálása maradó feszültség méréssel

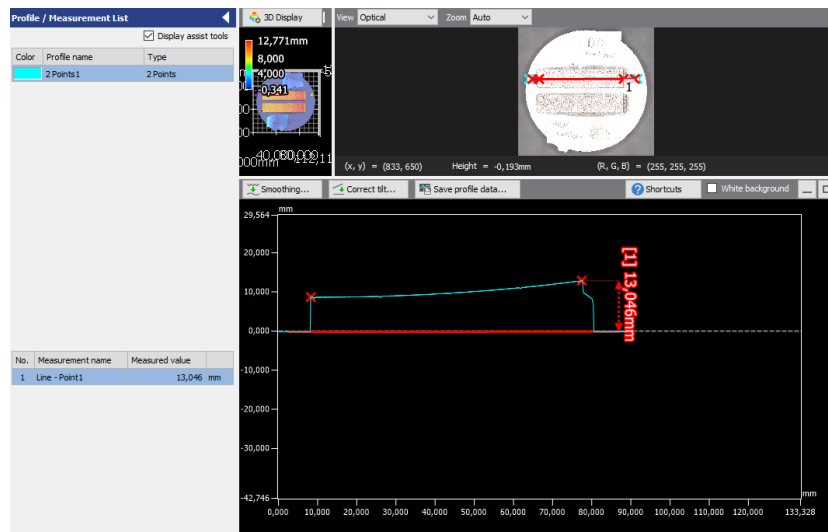
A korábbi mérések alapján kiválasztottam a legkedvezőbb tulajdonságokkal bíró paraméter beállítást és konzolos módszerrel maradó feszültség vizsgálatot végeztem rajta. Két próbatestet gyártattam az összehasonlítás érdekében a TP11 és az alap paraméterbeállításnál.



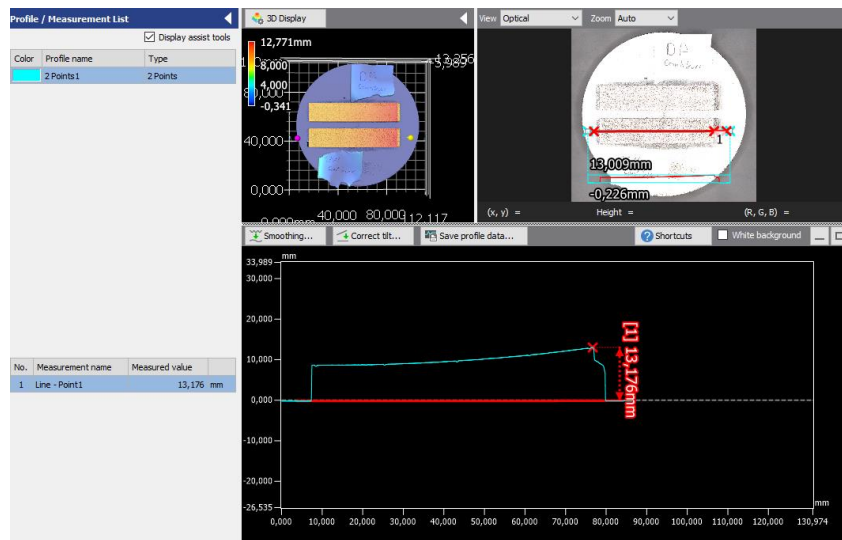
Ábra 3-5 Alap paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése



Ábra 3-4 TP11 paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése



Ábra 3-7 Alap paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése felvágás után



Ábra 3-6 TP11 paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése felvágás után

A mérések számomra kifejezetten kedvező eredményt hoztak, mint látható a két konzol felhajlása közel azonos $DP\ 13,046-8,815=4,231\text{ mm}$ és $TP11\ 13,176-8,755=4,421\text{ mm}$. Tehát kijelenthető, hogy a két konzol maradó feszültsége nagyságrendileg azonos, így a TP11 paraméter változtatás megfelelőnek mondható.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összegezve elmondható, hogy amíg nem változik jelentősen a porozitás, addig a folyamatba becsatolt energiasűrűségnek van jelentősebb hatása a mechanikai tulajdonságokra. A kisebb energiabevitel feltételezhetően csökkenti az alsóbb, szilárd rétegek áthőkezelődését, azaz nagyobb gyártási feszültségek maradnak vissza. Ez eredményezheti a szilárdsági és az alakváltozási értékek csökkenését, azaz ridegedést is. Ha a porozitás jelentősen változik, akkor elsősorban az van hatással a mechanikai viselkedésre. Ez a vizsgálat során tapasztalható is volt, mivel kis változtatások esetén az eredmények minden alkalommal megközelítették az alap paraméterbeállítás értékét, ez a fentebb leírtakkal magyarázható, hiszen ezekben az esetekben nem nagy mértékben nőtt a porozitás, viszont a becsatolt energiasűrűség csökkent, így kisebb volt az alsó rétegek áthőkezelődésének mértéke, azaz nagyobb feszültségek maradtak vissza és ez befolyásolta a mechanikai jellemzők csökkenését. Azonban a további változtatások során, például a „skip layer” esetében megfigyelhető, hogy a porozitás növekedése vette át a szerepet a mechanikai tulajdonságok alakításában, ez nagymértékben lerontotta az anyag minőségét, ebből az következik, hogy a gyártási sebesség növelése érdekében nem érdemes nagyobb „skip layert” beállítani.

A pásztázási távolság további növelése a háromszoros értéknél nem tűnik célra vezetőnek, azonban a négyszeres érték szokatlan viselkedése miatt érdemes lehet további méréseket végezni a témában.

Végül pedig azt tapasztaltam, hogy a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség változtatása jelentősen befolyásolja a gyártás sebességét és az együttes módosításuk kevésbé van hatással a mechanikai tulajdonságokra, ha a bevitt energiasűrűség azonos értéken marad.

Megoldásnak mondható, hogy a két paraméter együttes változtatása az alap paraméterbeállításhoz hasonló anyagtulajdonságot tud produkálni, ha a bevitt energiasűrűség megegyezik a két esetben, ezért vizsgálatának folytatása a folyamat gyorsításának érdekében további lehetőségeket rejthet magában.

Az újabb vizsgálat elvégzése után, ami a gyártás utáni maradó feszültségre irányult kijelenthető, hogy a TP11-es paraméter változtatás valóban egy jó megoldás lehet a folyamat gyorsítására, és ezzel az alap paraméterbeállításhoz képest ~20%-os gyártási időcsökkentést értem el ahogy az a (Táblázat 4-1) táblázatból is kiolvasható, ami egy ilyen időigényes folyamatnál számottevő időkülönbséget eredményezhet. Így a vizsgálat sikeresnek mondható.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dokumentumban bemutatott új ismeret- és tudásanyag (know-how) a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen, az „Additív gyártás és termelési logisztika” kutatócsoport kutatói munkájának eredményeképpen, a „Hatékonyságnövelt- és intelligens gyártástechnológiák” projektben a Tématerületi Kiválósági Program (TKP) keretében készült. Köszönetemet szeretném kifejezni, Dr. Bán Krisztiánnak, a rengeteg segítségért amit a dolgozat elkészítése során adott és hogy ebbe a munkába a szakítóvizsgálataimmal bekapcsolódhattam, és ez a dolgozat létre jöhetett. Továbbá köszönetet szeretnék még mondani Varga Ferencnek és Szabados Gergelynek a mérésekben való segítségükért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] B. Barta , „Módszer kidolgozása additív technológiával (SLM) gyártott implantátumok összetétel-elemzéséhez,” (*Szakdolgozat*), 2019.
- [2] V. Kaufui és H. Aldo, „A Review of Additive Manufacturing,” 2012.
- [3] T. Lore és V. Frederik, „A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V,” 2010.
- [4] K. AmirMahyar és G. Ian, „The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength,” 2019.
- [5] K. Amir Mahyar és G. Ian, „Investigation on the effect of heat treatment and process parameters,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
- [6] S. K. Anil és B. Mainak, „Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments,” 2021.
- [7] B. Vandenbroucke és J. Kruth, „Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. Rapid Prototyp,” 2007.
- [8] H. Gong és K. Rafi, „Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting,” 2015.
- [9] W. Xu és M. Brandt, „Additive manufacturing of strong and ductile Ti – 6Al – 4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition,” 2014.
- [10] G. Kasperovich és J. Haubrich, „Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting,” 2016.
- [11] W. Frazier, „Metal additive manufacturing: a review,” 2014.
- [12] T. E. Özçelik, „Experimental Residual Stress Mapping of Additive Manufactured Ti6Al4V alloys,” 2023.
- [13] J. Gordon , „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained,” *All3DP*, 2021.
- [14] k. „Wide-Area 3D Measurement System Head VR-5200,” keyence, [Online]. Available: <https://www.keyence.eu/products/microscope/macroscope/vr-3000/models/vr-5200/>.
- [15] K. A. F , L. D. J, F. T. A és G. V. p, „A Review of Residual Stress Measurement Methods- A Guide to Technique Selection,” 2001.

- [16] G. Böhm, „Szakdolgozat,” 2021.
- [17] J. Hlinka, Á. Fendrik és K. Bán, „Gyártási paraméterek változtatásának hatása additívan gyártott titán alkatrész mechanikai tulajdonságaira,” 2022.
- [18] „<https://www.eos.info/en>,” EOS. [Online].

ÁBRAJEGYZÉK

Ábra 1-1: SLM technológia elvi vázlata és részei [1]	8
Ábra 1-2: Az optimálisnak megállapított rétegvastagság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	10
Ábra 1-3: Az optimálisnak megállapított pásztázási távolság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	10
Ábra 1-4: Az optimálisnak megállapított pásztázási sebesség értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	11
Ábra 1-5: Az optimálisnak megállapított lézerteljesítmény értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	11
Ábra 1-6: Sematikus ábra az SLM technológia paramétereiről [1]	13
Ábra 1-7: Különböző pásztázási minták összehasonlítása [1]	14
Ábra 1-8: Anyagállapotot és hőmérséklet változást mutatja be a test egyrétegének gyártása közben	15
Ábra 2-1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS	16
Ábra 2-2: Berendezés fontos tulajdonságai a dolgozat szempontjából [16]	16
Ábra 2-3 Keyence VR 5200 Mikroszkóp a BME laboratóriumában. (Saját kép).....	19
Ábra 2-4 Maradó feszültség mérési technikák [14]	21
Ábra 2-5 A vizsgált konzolos tartólevágás előtt (saját kép).....	22
Ábra 2-6 A vizsgált konzolos tartó levágás után (saját kép).....	22
Ábra 2-11: A szakító próbatestek geometriai mérete [15]	24
Ábra 2-12: Ti-6Al-4V szakítódigram	24
Ábra 2-13: Mérés során elszakított próbatestek	25
Ábra 2-14: Legyártott próbatestek [15].....	26
Ábra 2-15: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra.....	27
Ábra 2-16: Skip layer változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra	28
Ábra 2-17: TP8 minta szakadási felülete Specimen 1.10.....	28
Ábra 2-18: TP7 minta szakadási felülete Specimen 1.7.....	28
Ábra 2-19: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	28
Ábra 2-20: Skip layer változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása	29
Ábra 2-21: Distance változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra.....	30
Ábra 2-22: TP10 minta szakadási felülete Specimen 1.17.....	30

Ábra 2-23: TP6 minta szakadási felülete Specimen 1.5.....	30
Ábra 2-24: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	30
Ábra 2-25: TP9 minta szakadási felülete Specimen 1.14.....	30
Ábra 2-26: Distance változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása.....	31
Ábra 2-27: Power és speed változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra	32
Ábra 2-28: TP11 minta szakadási felülete Specimen 1.19.....	32
Ábra 2-29: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	32
Ábra 2-30: Power és speed változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása	33
Ábra 2-31: Gyártási irányok hatása a mechanikai tulajdonságokra	34
Ábra 2-32: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	34
Ábra 2-33: TPXY minta szakadási felülete Specimen 1.27	34
Ábra 2-34: TPX minta szakadási felülete Specimen 1.23.....	34
Ábra 2-35: Gyártási irányváltoztatások három jellemző szakítódiagramjának összehasonlítása	35
Ábra 3-1: Réteg kihagyás hatása a porozitásra [14].....	37
Ábra 3-2: Varrat távolság hatása a porozitásra (eddig pásztázási távolságként hivatkoztam rá) [14]	38
Ábra 3-3: Lézer sebesség és teljesítmény hatása a porozitásra [14]	39
Ábra 3-4 TP11 paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése	40
Ábra 3-5 Alap paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése.....	40
Ábra 3-6 TP11 paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése felvágás után.....	41
Ábra 3-7 Alap paraméterbeállítással készített konzolos tartó bemérése felvágás után.....	41
Ábra 0-1: Gyártási paraméterek	49
Ábra 0-2: Paraméter változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása	49

TÁBLÁZAT

Táblázat 2-1 Gyártási paraméterek	26
Táblázat 2-2: DP és TP11 paraméter beállítások gyártási idejének összehasonlítása a platform kitöltöttség függvényében	35
Táblázat 3-1: Gyártási paraméterek az energia sűrűséggel kiegészítve	37
Táblázat 0-1: Mérési adatok összefoglaló táblázata.....	49

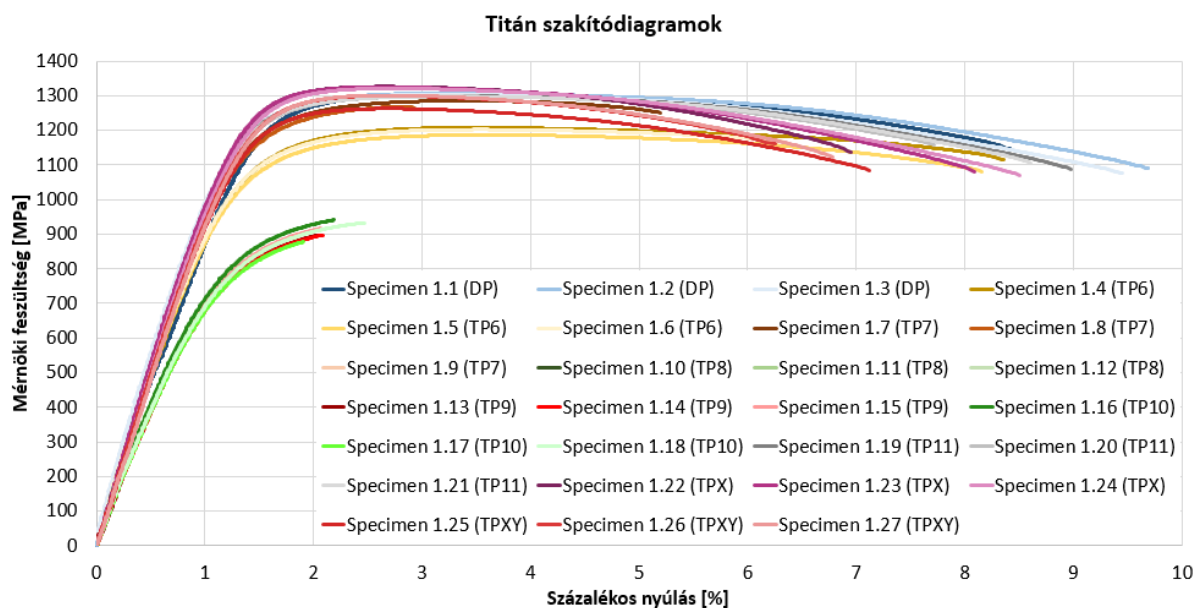
MELLÉKLETEK

Minta	Jelölés	Young Modulus(Gpa)	Rm(MPa)	Rp0,2(MPa)	A(%)	Átlag E	Átlag Rm	Átlag Rp0,2	Átlag A%	Szórás E	Szórás Rm	Szórás Rp	Szórás A%
1.1 régi	01	124,38	1312	1119	7,7								
1.2 régi	02	106,92	1320	1215	6,9								
1.3 régi	03	109,61	1322	1200	8,0								
Specimen 1.1	(Dp)	82,5	1303	1209,2	8,4								
Specimen 1.2	(Dp)	98,8	1307	1173	9,6	104,5	1311	1176	8,3	17,74	11,01	50,99	1,34
Specimen 1.3	(Dp)	104,8	1303	1139	9,4								
Specimen 1.4	(TP6)	92,7	1208	1033	8,3								
Specimen 1.5	(TP6)	92,7	1187	1007	8,2	92,1	1199	1027	7,6	0,85	8,83	14,84	0,92
Specimen 1.6	(TP6)	90,9	1202	1042	6,3								
Specimen 1.7	(TP7)	98,3	1285	1134	5,2								
Specimen 1.8	(TP7)	98,2	1268	1105	2,9	98,7	1188	1120	4,1	0,68	124,88	16,74	0,94
Specimen 1.9	(TP7)	99,7	1012	-	-								
Specimen 1.10	(TP8)	90,1	170	-	-								
Specimen 1.11	(TP8)	94,2	247	-	-	90,3	233	-	-	3,15	47,13	-	-
Specimen 1.12	(TP8)	86,5	283	-	-								
Specimen 1.13	(TP9)	76,3	897	754	-								
Specimen 1.14	(TP9)	73,7	898	760	-	74,7	904	768	-	1,14	8,73	16,21	-
Specimen 1.15	(TP9)	74,1	916	791	-								
Specimen 1.16	(TP10)	80,9	941	773	2,2								
Specimen 1.17	(TP10)	73,7	878	759	1,9	76,6	917	769	2,2	3,10	28,00	7,12	0,24
Specimen 1.18	(TP10)	75,2	933	775	2,48								
Specimen 1.19	(TP11)	101,6	1299	1157	9								
Specimen 1.20	(TP11)	99,6	1298	1162	7,7	100,6	1298	1161	8,1	0,82	0,47	2,62	0,66
Specimen 1.21	(TP11)	100,5	1298	1163	7,5								
Specimen 1.22	(TPX)	102,4	1326	1195	6,9								
Specimen 1.23	(TPX)	103,9	1325	1190	8,1	102,4	1324	1191	7,8	1,27	2,16	3,30	0,68
Specimen 1.24	(TPX)	100,8	1321	1187	8,5								
Specimen 1.25	(TPXY)	96	1263	1135	7,1								
Specimen 1.26	(TPXY)	98,9	1300	1162	6,3	97,0	1288	1159	6,7	1,37	17,68	18,12	0,33
Specimen 1.27	(TPXY)	96	1301	1179	6,8								

Táblázat 0-1: Mérés adatok összefoglaló táblázata

Skip layer [-]		1	2				0
Distance [mm]	0,12			0,18	0,24		0,06
Speed [mm/s]						2100	1400
Power [W]						150	100
	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	DP

Ábra 0-1: Gyártási paraméterek



Ábra 0-2: Paraméter változtatások szakítódigrammainak összehasonlítása