



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Gépjárműtechnológia Tanszék



TDK dolgozat

**Additív gyártással készített Ti-6Al-4V
próbatestek vizsgálata különböző
gyártási paraméterekkel és ezek hatása
a mechanikai tulajdonságokra**

Készítette:
Péri Bence Péter

Konzulens:
Dr. Bán Krisztián

Budapest, 2022

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	3
1. Irodalmi áttekintés	4
1.1. Additív technológiák történeti áttekintése	4
1.1.1. Szelektív lézeres szinterezés (Selective Laser Sintering, SLS).....	5
1.1.2. Elektronsugaras olvasztás (Electron beam melting, EBM).....	5
1.1.3. Szelektív lézeres olvasztás (Selective Laser Melting, SLM)	6
1.2. SLM technológiával készült Ti-6Al-4V mechanikai tulajdonságairól.....	7
1.3. A szinterezés lézereenergia-sűrűsége	11
2. Mérés bemutatása	14
2.1. Alkalmazott gép ismertetése.....	14
2.1.1. Történelmi áttekintés.....	14
2.1.2. Előnyök hátrányok	15
2.1.3. Alkalmazása	16
2.2. Kutatás jelentősége és célja	17
2.3. Szakítóvizsgálat	17
2.4. A módosított paraméterek bemutatása	19
2.5. Eredmények bemutatása	20
2.5.1. Réteghagyás (skip layer) hatása	21
2.5.2. A pásztázási távolság (distance) hatása.....	22
2.5.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség (power és speed) hatása	24
2.5.4. Gyártási irányok változtatása	26
3. Mérés kiértékelése.....	29
4. Összefoglalás.....	33
5. Köszönetnyilvánítás	34
Irodalomjegyzék.....	35
Ábrajegyzék	36
Mellékletek.....	38

ÖSSZEFOGLALÓ

Az additív gyártásban rengeteg lehetőség és kiaknázatlan terület van még. 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, majd szakító- és ütőmunka vizsgálatot 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.

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 fellelhetőek, 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 ötvözetekből 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 műtétet 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)

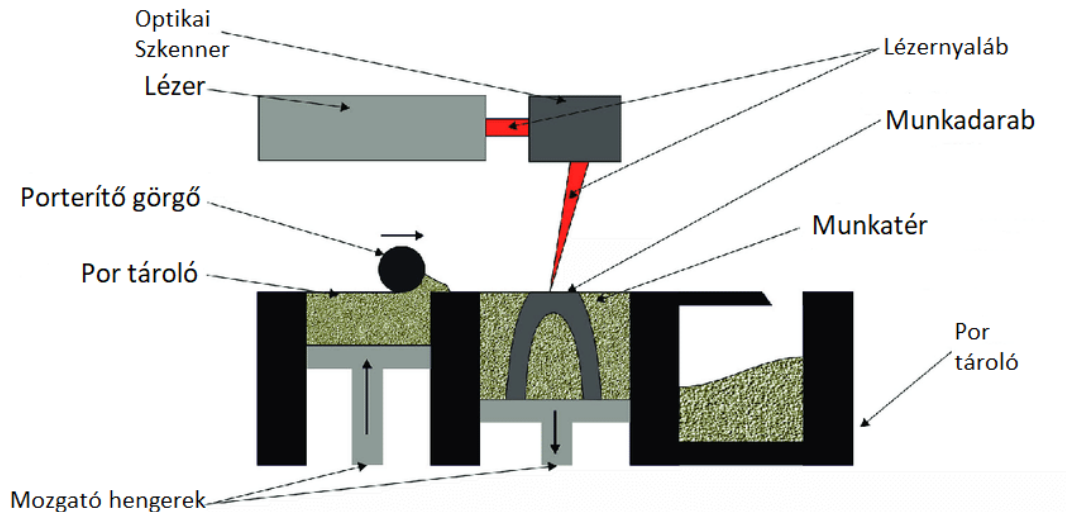
Az EBM, azaz elektronsugaras olvasztás egy viszonylag új, gyorsan fejlődő technológia. A folyamat hasonlít az SLS eljáráshoz azzal a különbséggel, hogy itt nagyfeszültségű elektronsugarat használnak (~30-60 KV) a por olvasztásához, ami egy vákuumkamrában történik az oxidáció elkerülése érdekében. EBM 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 elkészíthetőek. A technológia megengedi olyan, komplex geometriák létrehozását, amik hagyományos technológiákkal elképzelhetetlenek lennének.



Ábra 1-1: SLM technológia elvi vázlatja 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 olvadátkérfelület és kicsi a hozzá tartozó olvadátköteg, 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 strukturája, 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.

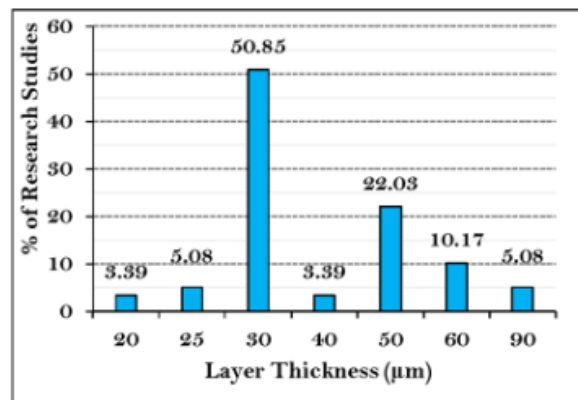
Továbbá azt is megállapították, hogy a hőkezeléseknek is vannak pozitív hatásai a szakítószilárdságra nézve, azonban egy bizonyos hőmérsékletnél magasabb érték esetén már csökkenti az anyag szilárdságát.

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]

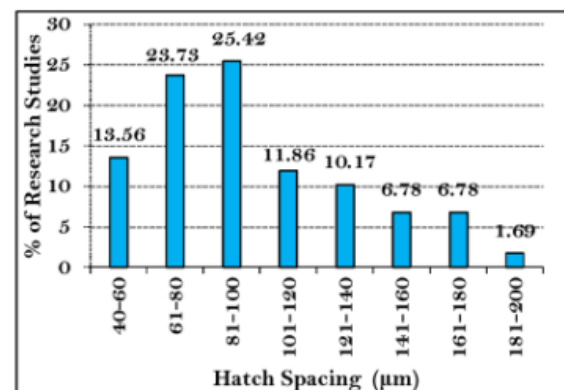
Egy másik, ugyanezen témakörhöz tartozó cikkben Anil Kumar Singla és csapata azt vizsgálták [6], hogy különböző kutatások mire jutottak az SLM folyamat beállításai, hibái és az utókezelések vizsgálata során, és ezeket hasonlították össze. [7], [8], [9], [10], [3] Továbbá megnézték, hogy az általuk választott 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. A (Ábra 1-3) is mutatja, hogy azért nem tudtak teljesen biztos következtetést levonni, mivel a témával foglalkozó kutatások



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]

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]

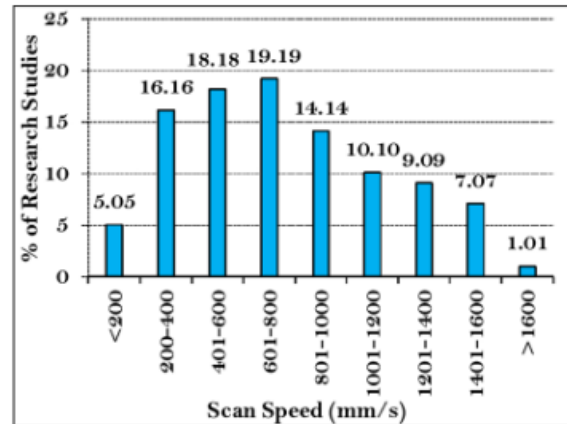
A legtöbb kutatás azt mutatta, hogy az ideális pásztázási sebesség 601-800mm/s között van TI-6AL-4V ötvözeteknél, azonban sok kutatás pedig arra jutott, hogy az optimum 200-600 mm/s között van, mivel, ahogy az a (Ábra 1-4) is látszik a 200-400; 401-600 és 601-800 mm/s közötti pásztázási sebességet találták

optimálisnak a kutatások több mint 50%-ban és nagyjából egységes eloszlásban. Viszont a

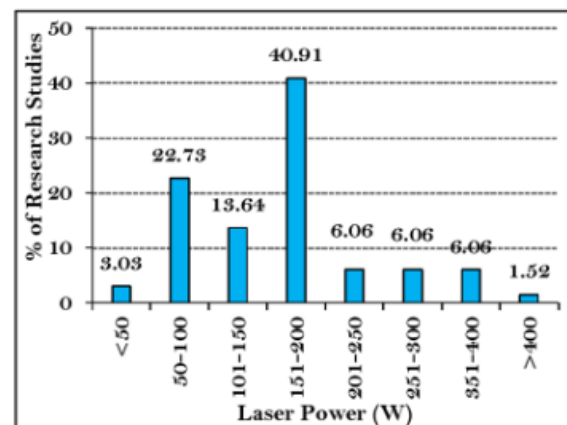
legjobb pásztázási sebesség értékének meghatározásával nem csak az a probléma, hogy nagy eltérések születtek, hanem a paraméterek egymástól való függése is nehezíti ennek értelmezését, ezért nem mindegy, hogy a vizsgált kísérleteknél, milyen különböző beállítások (például lézerteljesítmény) mellett érték 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 talált optimálisnak a lézer teljesítményét, azonban 22,73% 50-100 W közöttire 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, izosztikus 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.

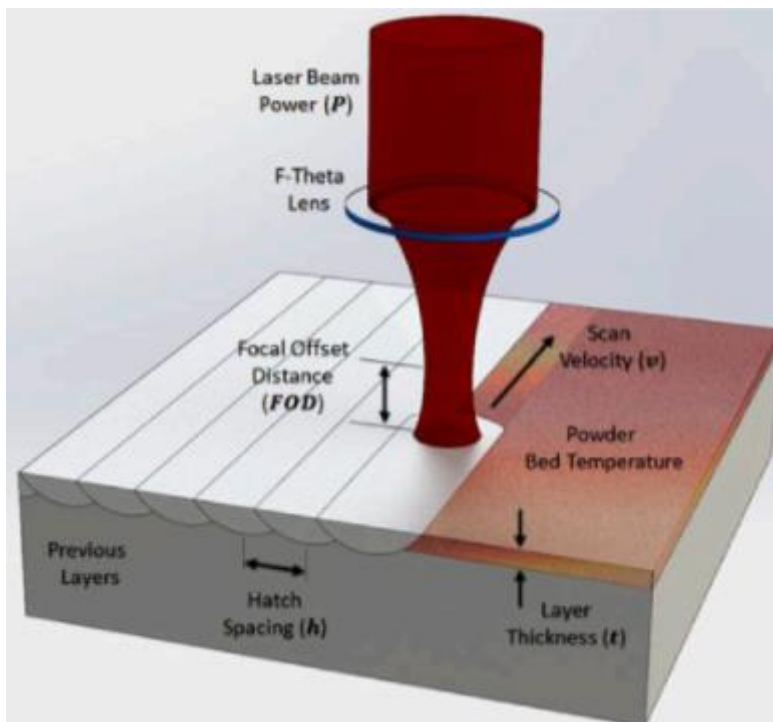
$$E = \frac{P}{v * t * S}$$

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 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



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

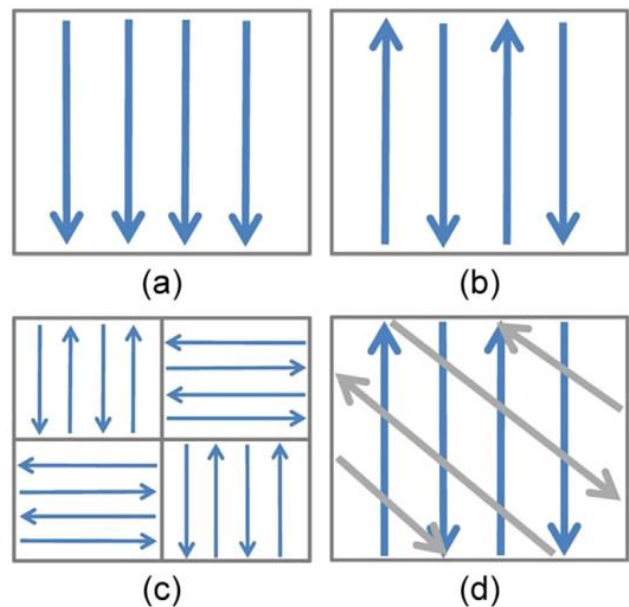
kell venni az eszköz lézerteljesítményét is, mivel ha csak simán, növeljük a sebességet, az a minőség romlását eredményezheti. A rétegvastagság [t] befolyásolja a porréteg megolvasztásához szükséges lézerenergia-sűrűséget, illetve később a megszilárduláshoz szükséges időt. A rétegvastagság fontos jellemzője 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 lézerefókusz 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 bejárás geometria határozza meg. Ezt, az úgynevezett gyártási mintát különböző módon lehet megválasztani, de általában párhuzamos vonalakkal 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

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]



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

2. MÉRÉS BEMUTATÁSA

2.1. Alkalmazott gép ismertetése



Ábra 2-1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS [15]

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.

[12]

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 [15]

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. [12]

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 ötvözött 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 ötvözött fémporok felhasználását, ideértve az acélokat, rozsdamentes acélokat, alumíniumot, titánt, nikkelötvözeteket 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. [12]

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 helyállnak 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.

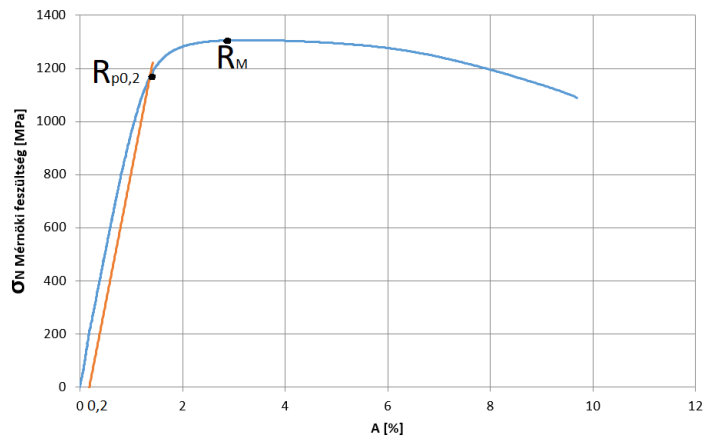
Tehát a technológia és az additív gyártó berendezések számos területen használhatóak és nagy jövő áll előttük. [12]

2.2. 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 technológia költségei redukálnának.

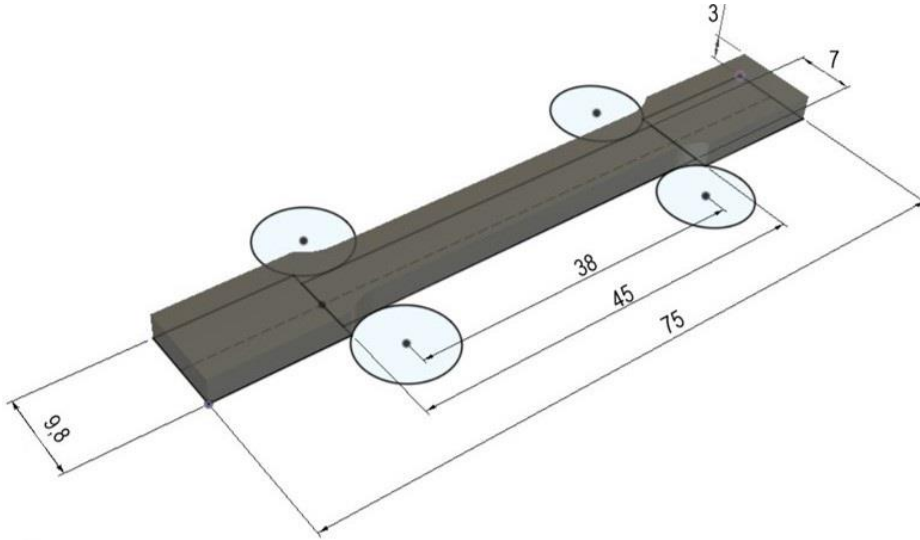
2.3. Szakítóvizsgálat

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 keresztmetszetével, 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



Ábra 2-3: Ti-6Al-4V szakítódiagram

meredeksége alapján határozható meg). A szakítószilárdságot az ábra (Ábra 2-3) R_m -el és az egyezményes folyáshatárt $R_{p0,2}$ -vel jelöli (ezt úgy határoztam meg, hogy 0,2% maradó



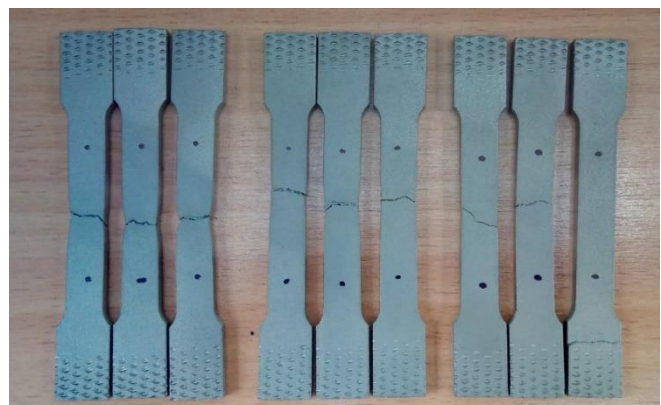
Ábra 2-4: A szakító próbatetek geometriai mérete [14]

nyúláshoz tartozó pontból egy, a rugalmas szakasszal párhuzamos egyenest húztam, ahol ez az egyenes metszi a szakítódiagramot, ott található az $R_{p0,2}$ érték). A százalékos, fajlagos szakadási nyúlás, ami a próbatet szakadás után mérhető megnyúlása az eredeti jeltávolság százalékában.

A szakítóvizsgálat során a szakítódiagramon 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 laborjában 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 2-5: Mérés során elszakított próbatetek

2.4. 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 „default” paramétert (gyári, javasolt alapbeállítást) jelenti. A 0 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

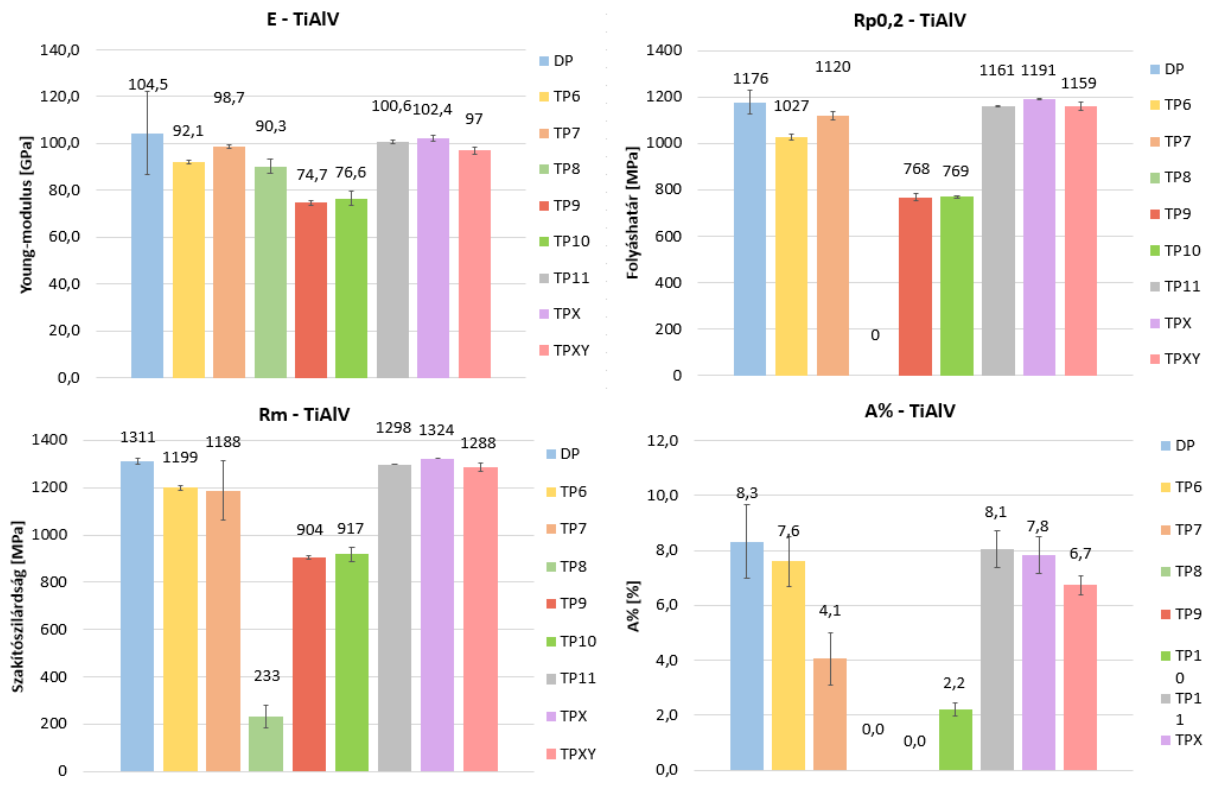
A táblázatban található változtatott paraméterek a következőket jelentik. A „Skip layer” vagy is a réteghagyás annyit takar, hogy hány lefektetett porrétegenként pásztázzuk végig lézerrel a keresztmetszet, például az 1-es „skip layer”-nél minden második réteget pásztázunk, amíg 2-nél minden harmadikat. 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 a „default” paraméterekhez képest nagyobb értékek megadásával próbáltam elérni.



Ábra 2-6: Legyártott próbatestek [14]

2.5. Eredmények bemutatása

A vizsgálat során először a default paraméterekre 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).

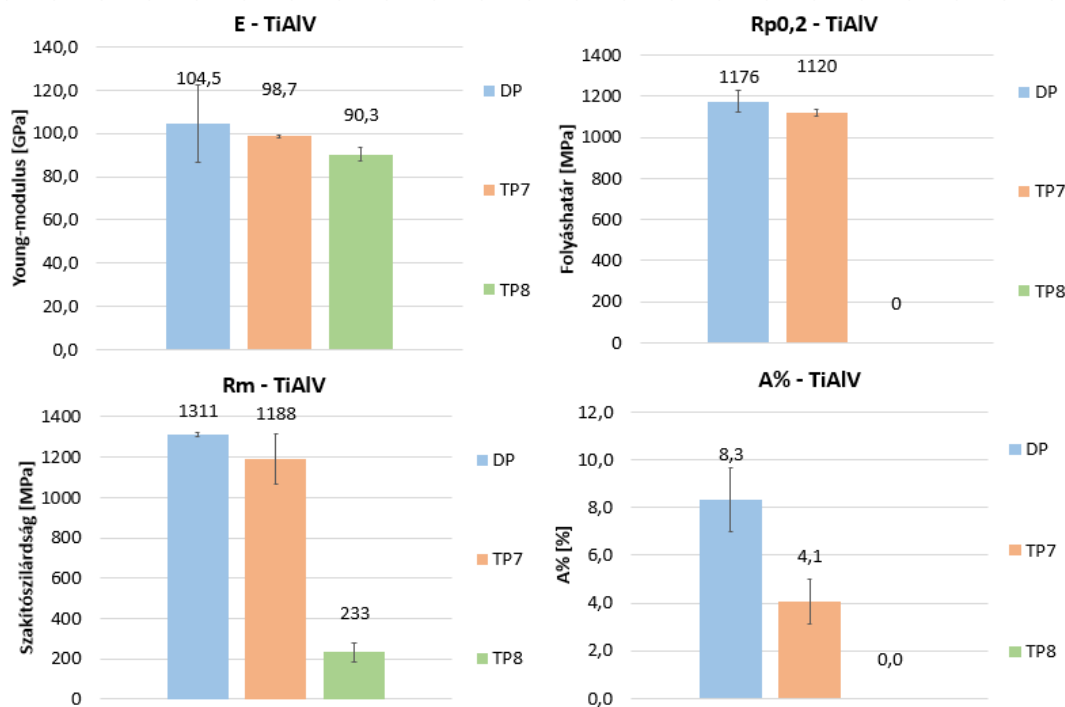


Ábra 2-7: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra

Az Ábra 2-7-en 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 szakítódiagramok összefoglaló ábrája (Ábra 0-2) a mellékletek közt találhatóak meg.

2.5.1. Réteghagyás (skip layer) hatása

Az alábbi diagram segítségével a „default” paraméterrel 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.

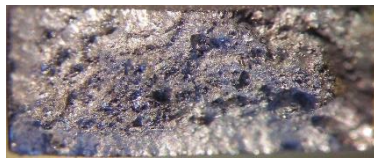


Ábra 2-8: Skip layer változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

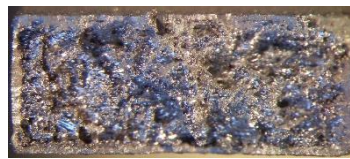
Az Ábra 2-8-on lévő diagramokból látszik, hogy a rétegek kihagyásának következtében az anyag egyre ridegebb lett. Egy kihagyott réteg nem befolyásolta jelentősen a folyáshatárt, azonban két kihagyott rétegnél, egyik próbatestnél sem sikerült kiértékelni sem az egyezményes folyáshatárt, sem a szakadási 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 anyag ridegsége és a porozitása is közre játszott 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 2-11: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2

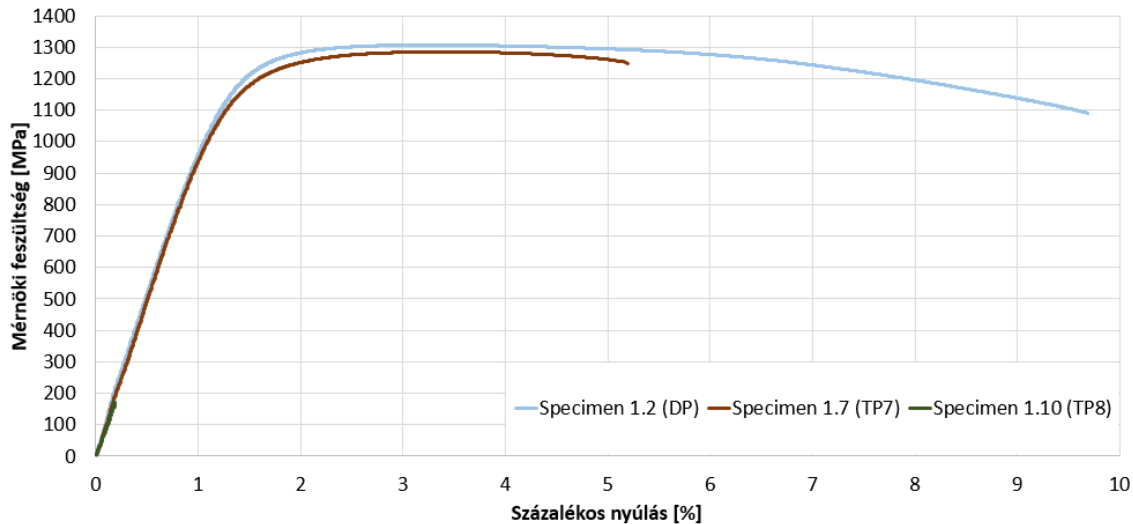


Ábra 2-10: TP7 minta szakadási felülete Specimen 1.7



Ábra 2-9: TP8 minta szakadási felülete Specimen 1.10

Mint a mellékelt ábrák is mutatják, a réteghagyások 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.

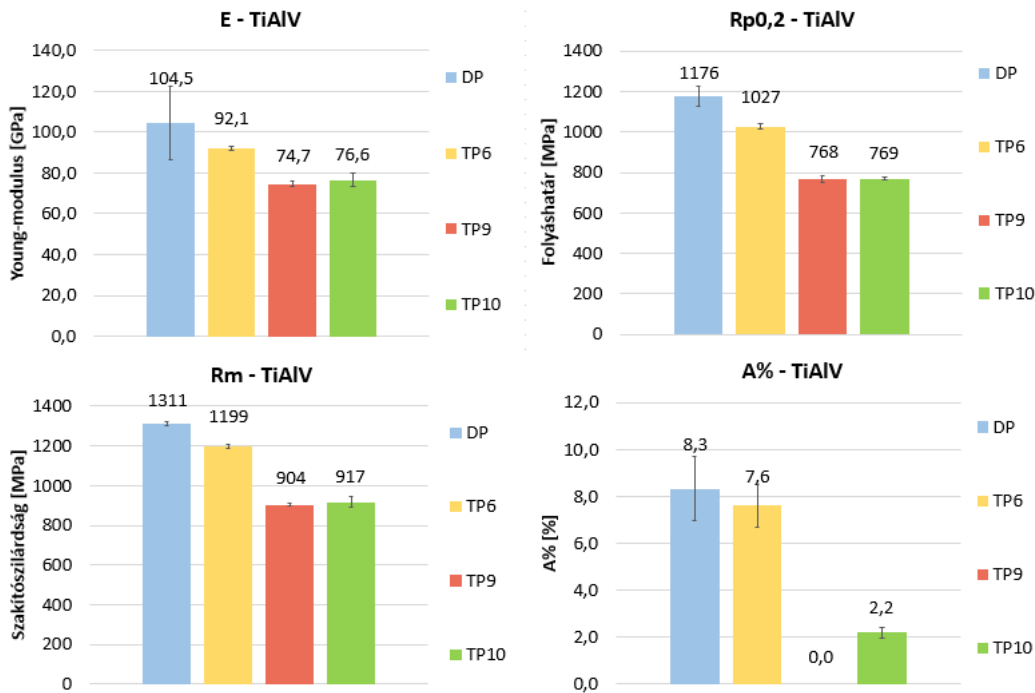


Ábra 2-12: Skip layer változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása

Az Ábra 2-12-en látható szakítódigramokról 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.

2.5.2. A pásztázási távolság (distance) hatása

Az (Ábra 2-13) ábrán is látható diagram segítségével a pásztázási távolság változtatásának hatását lehet megvizsgálni a tulajdonságokra nézve. A kék oszlop csak úgy, mint az előző diagramon, a „default” paramétert 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 a „default” paraméteréhez képest, azonban nem olyan nagy mértékben.



Ábra 2-13: Distance változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

A TP9 hasonló arányban csökkent a TP6-hoz képest, mint az a „default” paraméterhez 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 2-16: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2



Ábra 2-15: TP6 minta szakadási felülete Specimen 1.5

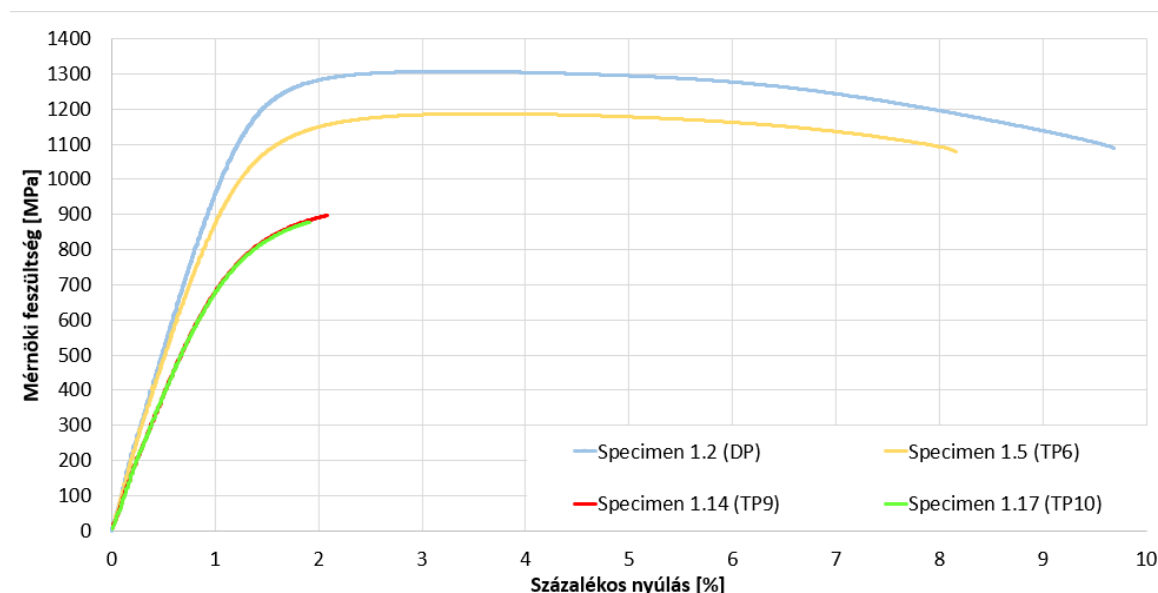


Ábra 2-17: TP9 minta szakadási felülete Specimen 1.14



Ábra 2-14: 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 2-18: Distance változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása

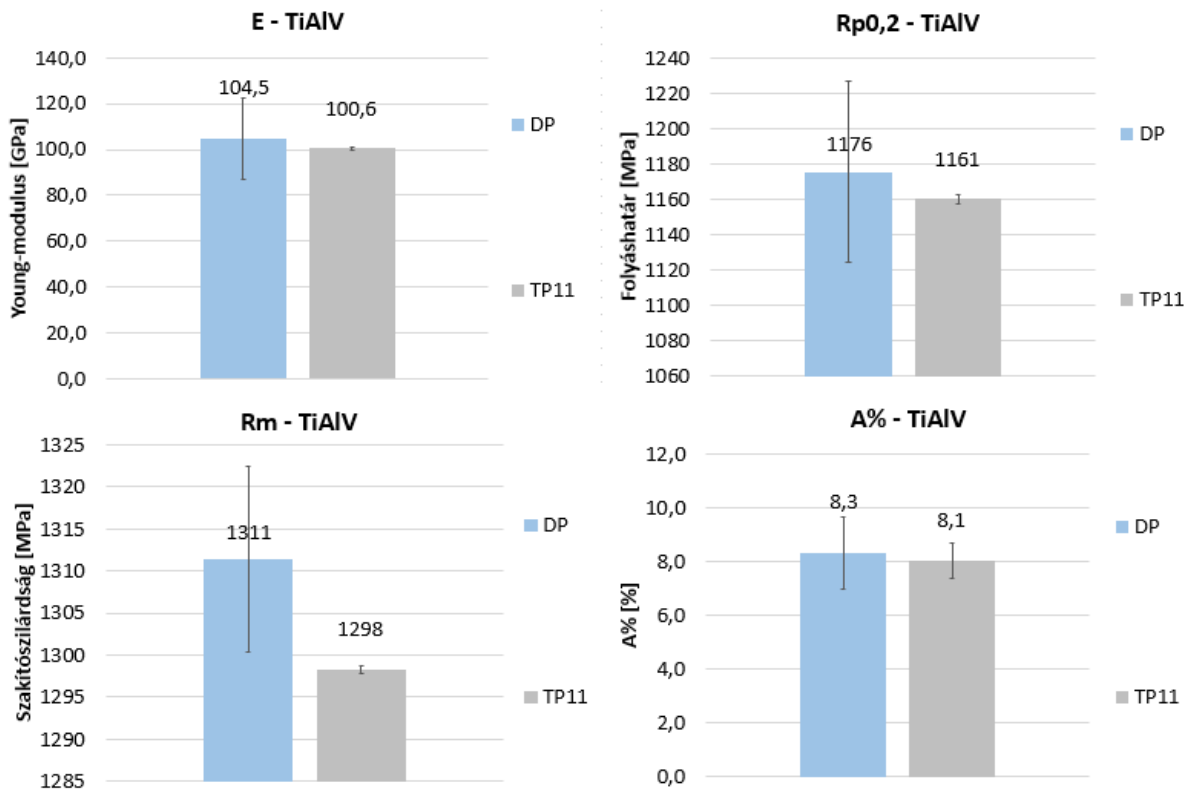
Az (Ábra 2-18) ábrán megfigyelhető szakítódiagramok is alátámasztják, amit az oszlopdiagramból kiolvastam, vagyis a TP6 csökkenését a DP-hez képest, illetve a TP10 nem követi a csökkenési sémát, és szinte megegyezik a TP9-cel.

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

Az (Ábra 2-19) ábrán lévő diagramon a „power”, azaz lézerteljesítmény és a „speed”, a pásztázási sebesség változtatás hatása figyelhető meg. A „default” 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 2-19) ábrán megfigyelhető, hogy a TP11-nél a változtatások következtében kicsivel csökkentek a szilárdsági és alakváltozási értékek a „default” 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 a „default” paraméterhez képest a lézer-energiasűrűség állandó maradjon, ahogy ez a képletéből is látszik (1. egyenlet).



Ábra 2-19: Power és speed változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra

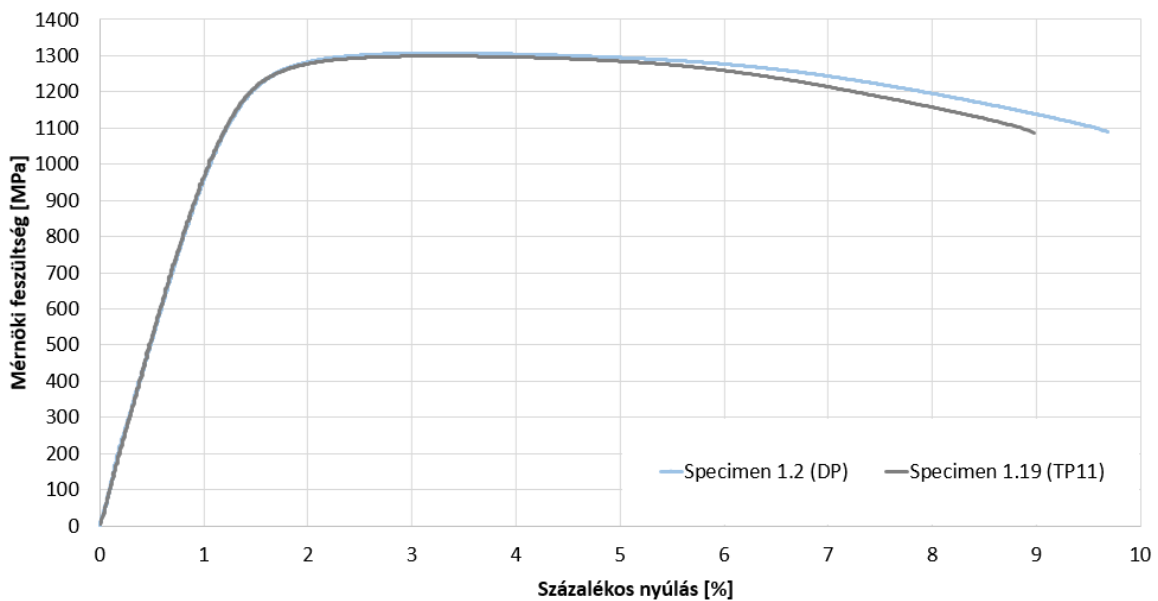


Ábra 2-21: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2



Ábra 2-20: 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.



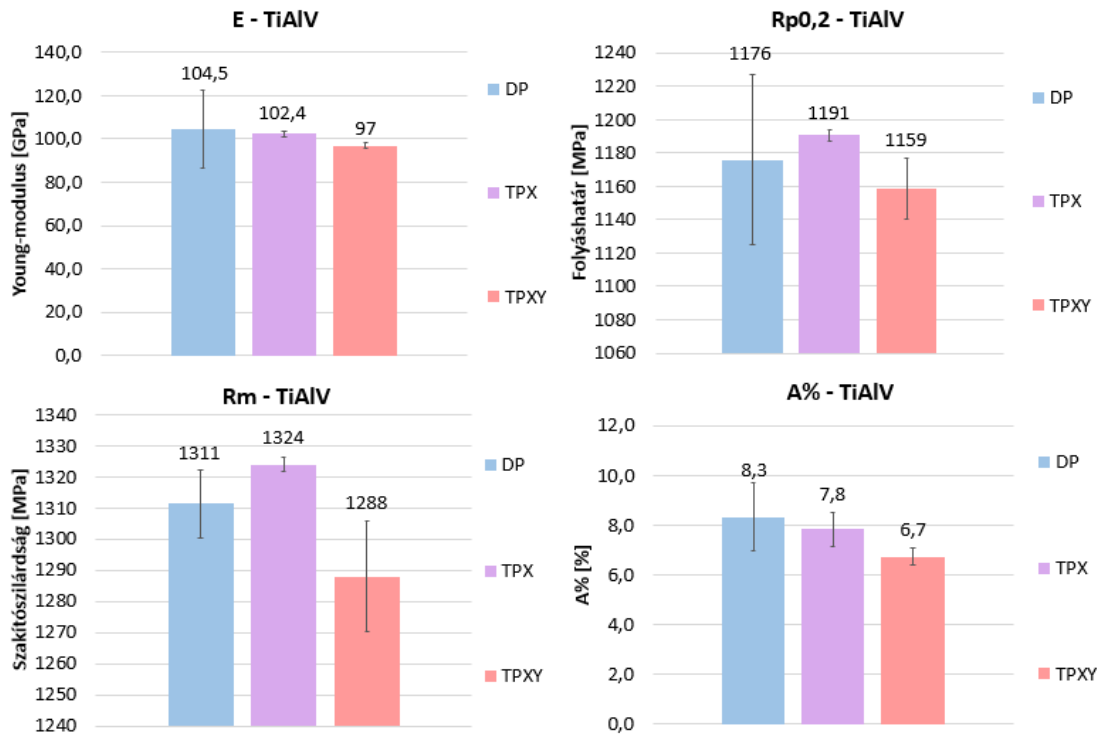
Ábra 2-22: Power és speed változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása

Az (Ábra 2-22) ábrán feltüntetett szakítódiagram is alátámasztja az előző ábrákon láthatókat, hogy a kettő diagram szinte azonosan fut egymással.

2.5.4. Gyártási irányok változtatása

Az (Ábra 2-23) ábrán lévő diagram a különböző koordináták szerinti pásztázási irányok változtatását hasonlítja össze. A „default” beállításnál a pásztázási irány rétegenként 67 fokos 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 2-23) ábrán is látható diagram alapján elmondható, hogy a változtatások hatására TPX rugalmassági modulusa és nyúlása kicsit alulmaradt a „default” paraméteréhez 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 nagy mértékben.



Ábra 2-23: Gyártási irányok hatása a mechanikai tulajdonságokra



Ábra 2-24: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2

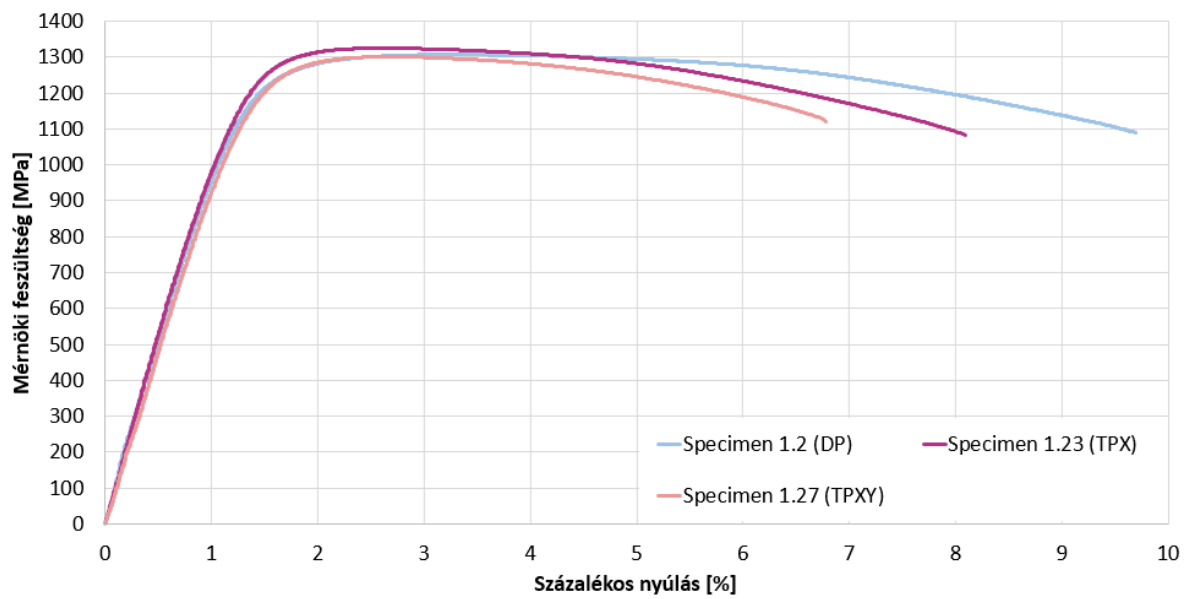


Ábra 2-26: TPX minta szakadási felülete Specimen 1.23



Ábra 2-25: TPXY minta szakadási felülete Specimen 1.27

A képeken az látszik az eddigiektől eltérve, hogy itt a „default” 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 2-27: 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.

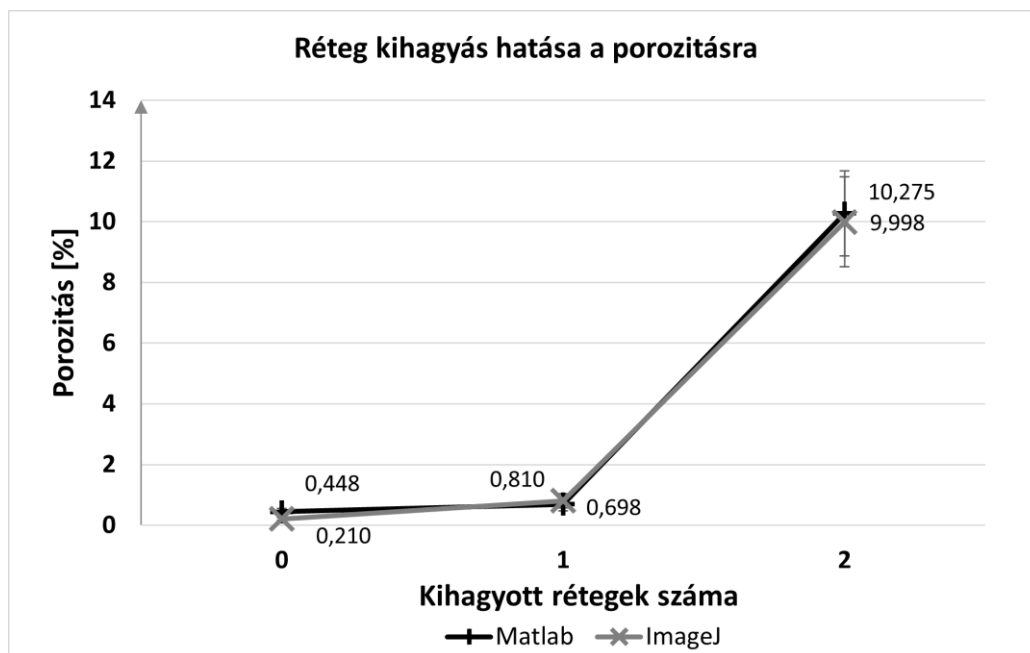
3. MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE

Eredményeimet két szempont szerint igyekeztem értelmezni. Az egyik a szinterezés lézere-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 lézere-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

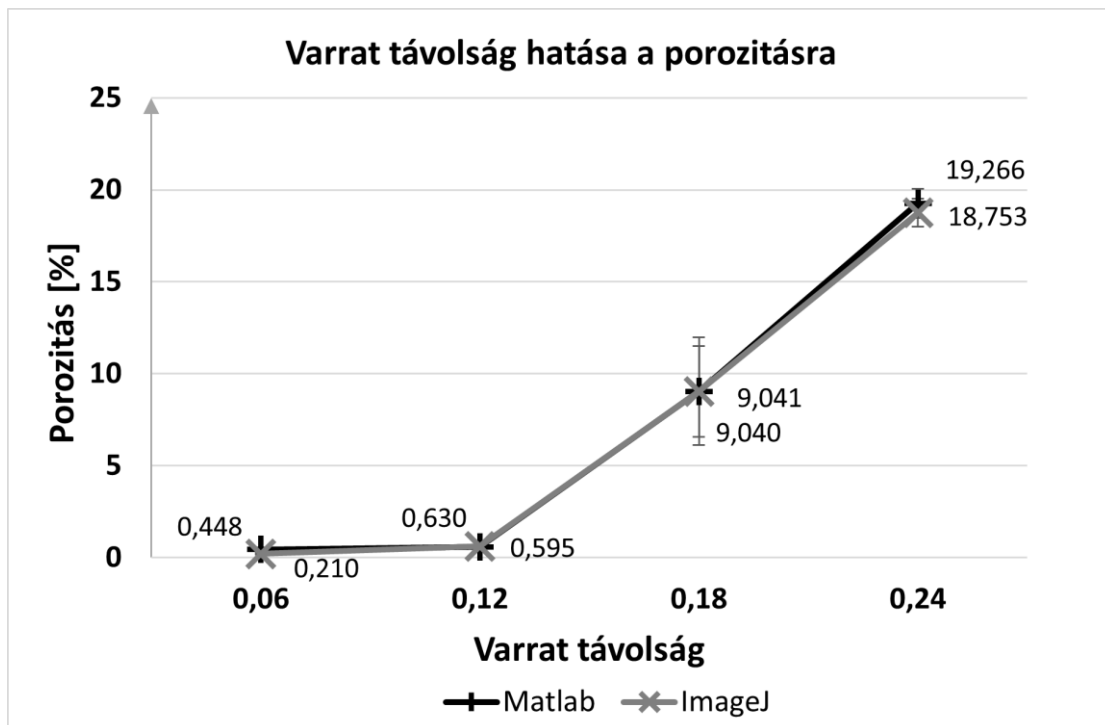
A Táblázat 3-1-ben megfigyelhető energiasűrűség [J/mm³] (amit energiának jelöltem) és a próbatestek porozitás vizsgálat eredményével, értelmezni tudom az előzőekben taglalt mechanikai tulajdonságokat, mivel mind az energiasűrűség, mind a porozitás nagyban befolyásolja ezeknek az értékét. A használt porozításvizsgálati eredményeket csiszolatok számítógépes képelemzésével végezték el. [13]



Ábra 3-1: Réteg kihagyás hatása a porozításra [13]

A „skip layer” változtatás esetében, aminek mechanikai jellemzőit az Ábra 2-8 tartalmazza, azt tapasztaltam, hogy 1 „skip layer” esetén is csökkentek a szilárdsági és alakváltozási értékek azonban 2 „skip layer”-nél drasztikus elrövedést tapasztaltam. Ez a csökkenés az energiasűrűségnél is megfigyelhető, azonban az Ábra 3-1-en is látható porozitásvizsgálat 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.

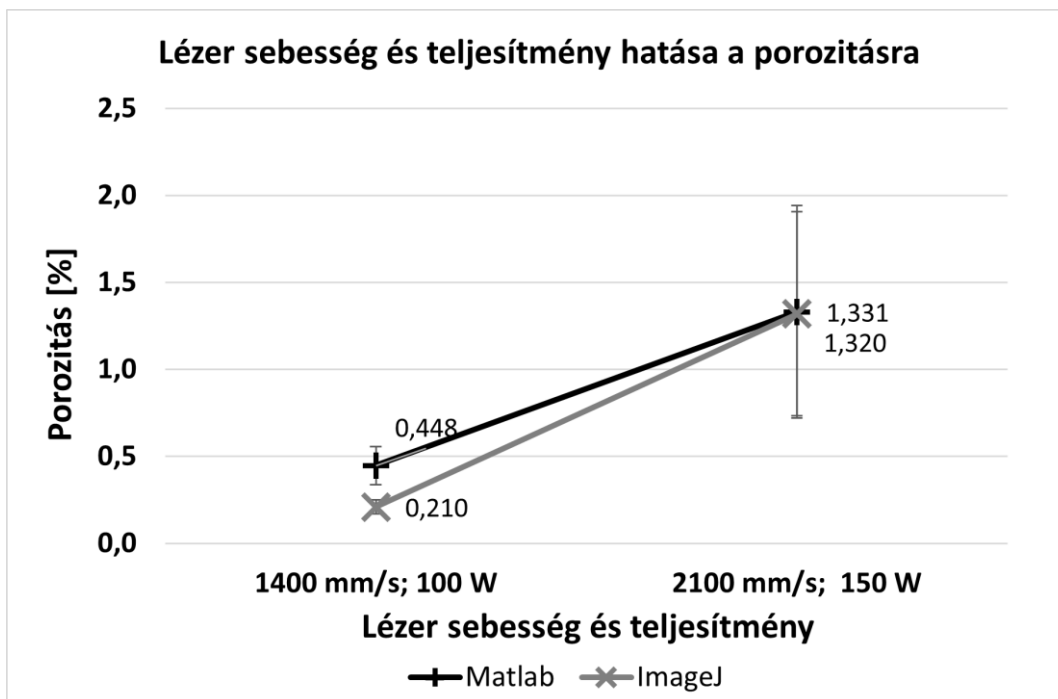
A pásztázási távolság változtatásánál, aminek mechanikai tulajdonsága és bővebb leírása az Ábra 2-13-en található. (Azonban azt fontos hozzátenni, hogy a fókuszolt 0,04 mm, vagyis a legkisebb távolság esetében nincs átfedés. Ez azt is jelenti, hogy az olvadéktócsa szabadon terülhet, és inkább az alsó 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 sűrűségéből is kimutatható azonban a négyszeres értékre ebből sem kaptam választ.



Ábra 3-2: Varrat távolság hatása a porozításra (eddig pásztázási távolságként hivatkoztam rá) [13]

Az Ábra 3-2-ön 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.

A lézerteljesítmény és sebesség változtatása során az volt a cél, hogy azonos maradjon a térfogatra vett energiasűrűség, ahogy ez a Táblázat 3-1-en is látszik. Ez azért volt fontos, mert



Ábra 3-3: Lézer sebesség és teljesítmény hatása a porozításra [13]

ez egy elég jó irányzatnak tűnt a folyamat gyorsítására. Ez a várakozásoknak megfelelően be is igazolódott, mivel az Ábra 2-19-on látható mechanikai tulajdonságokból is kiolvasható, hogy a két beállításnál nagyon hasonló mechanikai karakterisztikák és értékek jöttek ki, és az Ábra 3-3-on 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.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összegezve elmondható, hogy amíg nem változik jelentősen a porozitás, addig a folyamatba becsatolt energiasűrűségnek van jelentősebb hatása a mechanikai karakterisztikára. 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 a „default” paraméter 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 a „default” paraméteréhez hasonló anyagtulajdonságot tud produkálni, ha a bevitt energiasűrűség megegyezik a két esetben, ezért vizsgálatának folytatása a folyamat gyorsításának érdekében további lehetőségeket rejthet magában.

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, hogy ebbe a munkába a szakítóvizsgálataimmal bekapcsolódhattam, és ez a dolgozat létre jöhetett.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] B. Barta , „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] J. Gordon , „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained,” *All3DP*, 2021.
- [13] G. Böhm, „Szakdolgozat,” 2021.
- [14] J. Hlinka, Á. Fendrik és K. Bán, „Gyártási paraméterek változtatásának hatása additívan gyártott titán alkatrész mechanikai tulajdonságaira,” 2022.
- [15] „<https://www.eos.info/en>,” EOS. [Online].

ÁBRAJEGYZÉK

Ábra 1-1: SLM technológia elvi vázlata és részei [1]	7
Ábra 1-2: Az optimálisnak megállapított rétegvastagság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	9
Ábra 1-3: Az optimálisnak megállapított pásztázási távolság értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	9
Ábra 1-4: Az optimálisnak megállapított pásztázási sebesség értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	10
Ábra 1-5: Az optimálisnak megállapított lézerteljesítmény értékek a vizsgált kutatások százalékában [6]	10
Ábra 1-6: Sematikus ábra az SLM technológia paramétereiről [1]	12
Ábra 1-7: Különböző pásztázási minták összehasonlítása [1]	13
Ábra 2-1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS [15]	14
Ábra 2-2: Berendezés fontos tulajdonságai a dolgozat szempontjából [15]	14
Ábra 2-3: Ti-6Al-4V szakítódigram	17
Ábra 2-4: A szakító próbatestek geometriai mérete [14]	18
Ábra 2-5: Mérés során elszakított próbatestek	18
Ábra 2-6: Legyártott próbatestek [14]	19
Ábra 2-7: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra	20
Ábra 2-8: Skip layer változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra	21
Ábra 2-9: TP8 minta szakadási felülete Specimen 1.10	21
Ábra 2-10: TP7 minta szakadási felülete Specimen 1.7	21
Ábra 2-11: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	21
Ábra 2-12: Skip layer változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása	22
Ábra 2-13: Distance változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra	23
Ábra 2-14: TP10 minta szakadási felülete Specimen 1.17	23
Ábra 2-15: TP6 minta szakadási felülete Specimen 1.5	23
Ábra 2-16: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	23
Ábra 2-17: TP9 minta szakadási felülete Specimen 1.14	23
Ábra 2-18: Distance változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása	24
Ábra 2-19: Power és speed változtatás hatása a mechanikai tulajdonságokra	25
Ábra 2-20: TP11 minta szakadási felülete Specimen 1.19	25

Ábra 2-21: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	25
Ábra 2-22: Power és speed változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása	26
Ábra 2-23: Gyártási irányok hatása a mechanikai tulajdonságokra	27
Ábra 2-26: DP minta szakadási felülete Specimen 1.2	27
Ábra 2-24: TPXY minta szakadási felülete Specimen 1.27	27
Ábra 2-25: TPX minta szakadási felülete Specimen 1.23	27
Ábra 2-27: Gyártási irányváltatások három jellemző szakítódiagramjának összehasonlítása	28
Ábra 3-1: Réteg kihagyás hatása a porozitásra [13]	29
Ábra 3-2: Varrat távolság hatása a porozitásra (eddig pásztázási távolságként hivatkoztam rá) [13]	30
Ábra 3-3: Lézer sebesség és teljesítmény hatása a porozitásra [13]	31
Ábra 0-1: Gyártási paraméterek	38
Ábra 0-2: Paraméter változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása	38

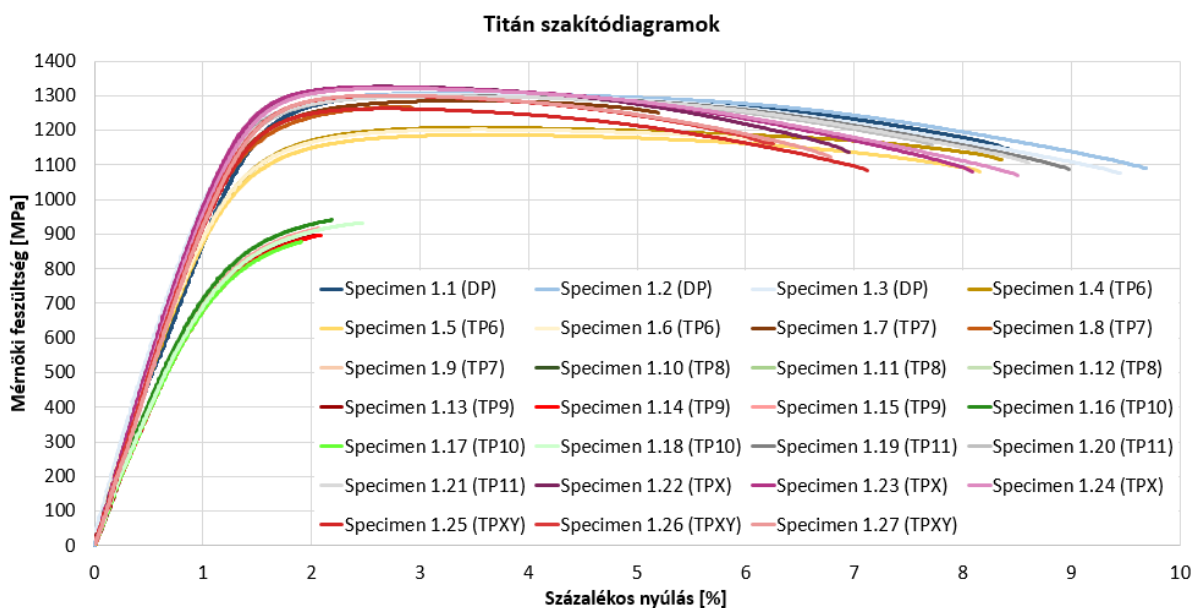
MELLÉKLETEK

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: Mérési 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 szakítódiagramjainak összehasonlítása