



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

TDK DOLGOZAT



BME
Gépjárműtechnológia
Tanszék

Gyártási paraméterek változtatásának hatása additív gyártással készített Ti-6Al-4V próbatestek maradó feszültségére

Készítette:

Péri Bence Péter

Konzulens:

Dr. Bán Krisztián

Budapest, 2024.



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. A szinterezés lézerenergia-sűrűsége	8
1.3. Maradó feszültség.....	11
1.4. A maradó feszültség mérése	12
1.5. Maradó feszültség mérése konzolos megközelítéssel	13
1.6. Kapcsolódó irodalmak maradó feszültség vizsgálatairól	15
1.7. Korábbi méréseim bemutatása.....	17
2. Mérés bemutatása	20
2.1. Alkalmazott gyártó berendezés ismertetése	20
2.2. Alkalmazott mérőberendezés ismertetése	21
2.3. Maradó feszültség számítása	22
2.3.1. Vertikális kényszerből eredő feszültségeloszlás meghatározása	23
2.3.2. Horizontális kényszerből eredő feszültségeloszlás meghatározása	25
2.3.3. Normál irányú feszültségeloszlás.....	27
2.4. A módosított paraméterek bemutatása	28
3. Kutatás jelentősége és célja.....	30
4. Eredmények bemutatása.....	31
4.1. Réteghagyás (skip layer) hatása a maradó feszültségre	33
4.2. A pásztázási távolság (distance) hatása a maradó feszültségre	34
4.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség (power és speed) hatása a maradó feszültségre.....	35
4.4. Pásztázási irányok változtatásának hatása a maradó feszültségekre	36
4.5. Paraméterváltoztatások hatása a gyártási időkre	37
4.5.1. Réteghagyás hatása a gyártási időkre.....	38
4.5.2. Pásztázási távolság hatása a gyártási időkre	39
4.5.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatása a gyártási időkre	39



5. A Mérések kiértékelése	41
6. Összefoglalás.....	45
7. Köszönetnyilvánítás	47
Irodalomjegyzék.....	48
Ábrajegyzék	49
Táblázat	51
Melléklet.....	52



ÖSSZEFOGLALÓ

Az additív gyártás napjainkban egy dinamikusan fejlődő gyártási eljárás, rengeteg lehetőséggel és kiaknázatlan területtel. Ezen belül is az SLM (Selective Laser Melting) technológia, amivel a dolgozat keretein belül bővebben foglalkozom, egy új lehetőséget ad pl. személyre szabott 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. Korábbi méréseim során szakítóvizsgálatot végeztem rajtuk egy tanszéki kutatási projekt keretében. A mérések eredményei alapján megvizsgáltam, hogy a változtatások mennyiben befolyásolták a próbatestek mechanikai jellemzőit, illetve értelmeztem az eredményeket az anyagszerkezeti jellemzők és a gyártáskori termikus előélet függvényében. Ezt a vizsgálatot folytattam kibővítve maradó feszültség méréssel, a változtatások hatásának átfogóbb megismerésének céljából az eredményeket pedig ebben az esetben is az anyagszerkezeti jellemzők és a gyártáskori termikus előélet függvényében értelmezem.



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 olvasztják 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 alkalmas, 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 a lézerrel. 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

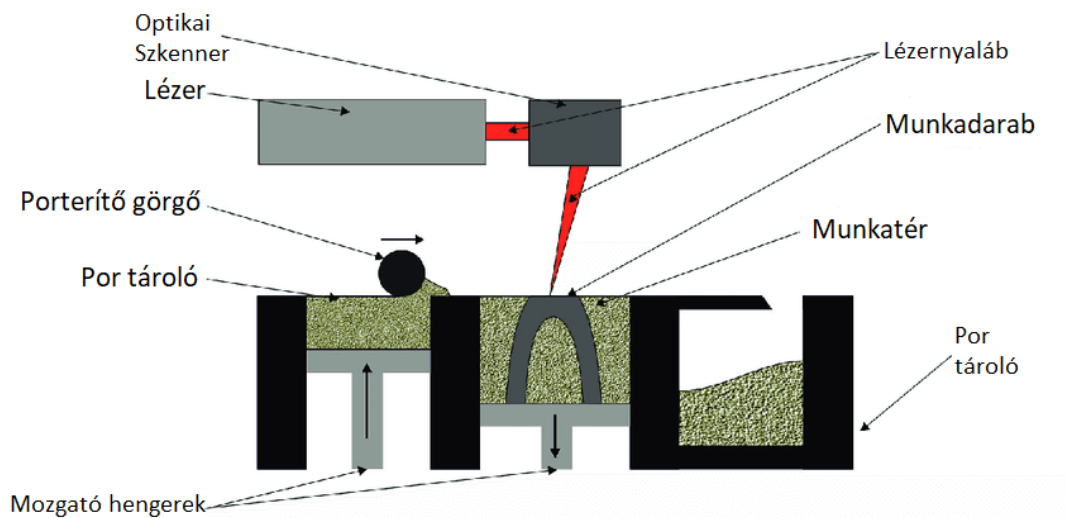


technológiával akár egy űrközpontban fellépő alkatrészhiányt is tudnak orvosolni, csupán egy CAD modellre van szükségük, és helyben el tudják készíteni a hiányzó alkatrészt. [2]

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) építik fel egy lézersugár segítségével. A gép elteríti egy porrétetet, 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 porrétetet 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 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 olvadáktócsa környezetében, illetve mivel nagy az olvadékelület 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, nemcsak 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. A szinterezés lézereenergia-sűrűsége

Az SLM eljárás célja megfelelően sűrű és anyaghibáktól 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. Azonban vannak az úgynevezett gyártási paraméterek, amiket tudunk állítani, melyek optimalizálásával próbálunk jobb tulajdonságokkal bíró anyagokat előállítani.

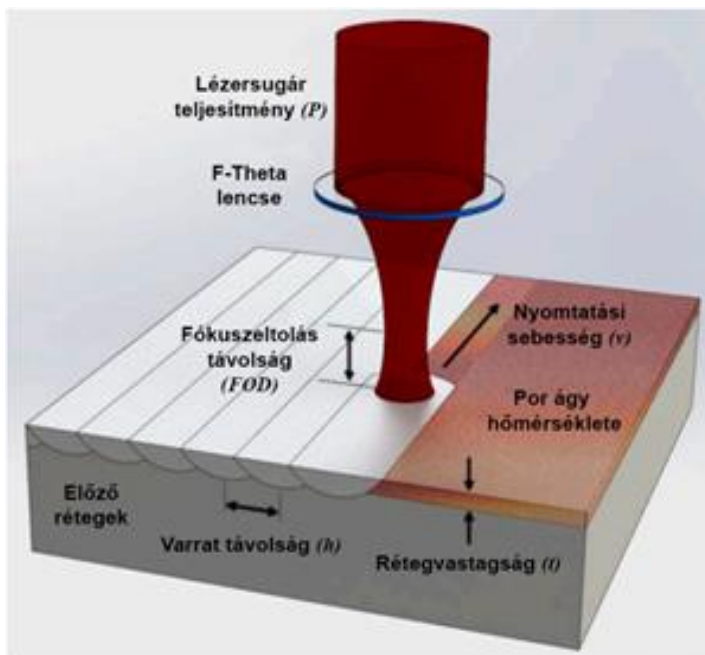
Egy adott anyag esetében az E lézerenergia-sűrűség, az SLM folyamat során egy egységnyi térfogatú porra vonatkozik és a következő képlet alapján számítható.

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

1. egyenlet: Szinterezés lézerenergia-sűrűsége [J/mm^3] [4]

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). Ezek az értékek a (Ábra 1.2) ábra segíts könnyebben értelmezhetőek.

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



Ábra 1.2: Sematikus ábra az SLM technológia paramétereiről [4]

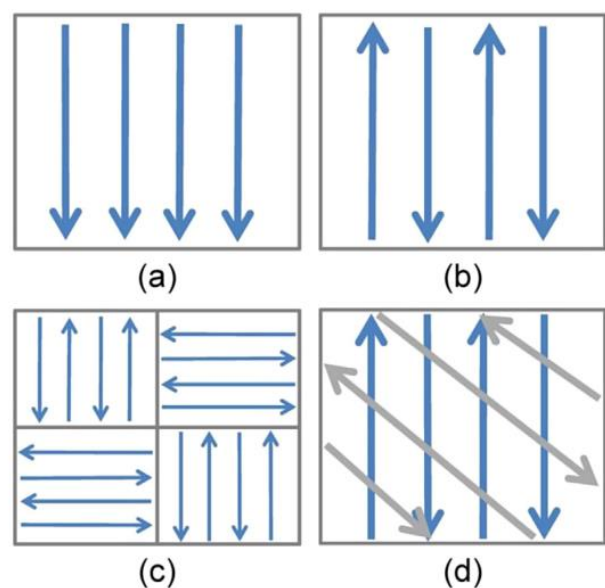
távolságot csökkentjük, a lézer energiasűrűsége nő, ebből kifolyólag a por hőmérséklete is. Mivel a magasabb energiasűrűség nagyobb mértékű olvadást tesz lehetővé, azaz nagyobb térfogat átolvasztását, ebből kifolyólag nagyobb sűrűséget kapunk a folyamat végeztével. Az SLM eljárásnál a por teljes megolvadása 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 egyedül a sebességet növeljük, 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, ami a (Ábra 1.2) ábrán is megfigyelhető. 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 vonalakból áll, azonban előfordulhatnak kör vagy spirál lefedettségek is. A pásztázási minta megváltoztatható egy rétegen belül vagy különböző rétegekben is. Amint az ábrán (Ábra 1.3) 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

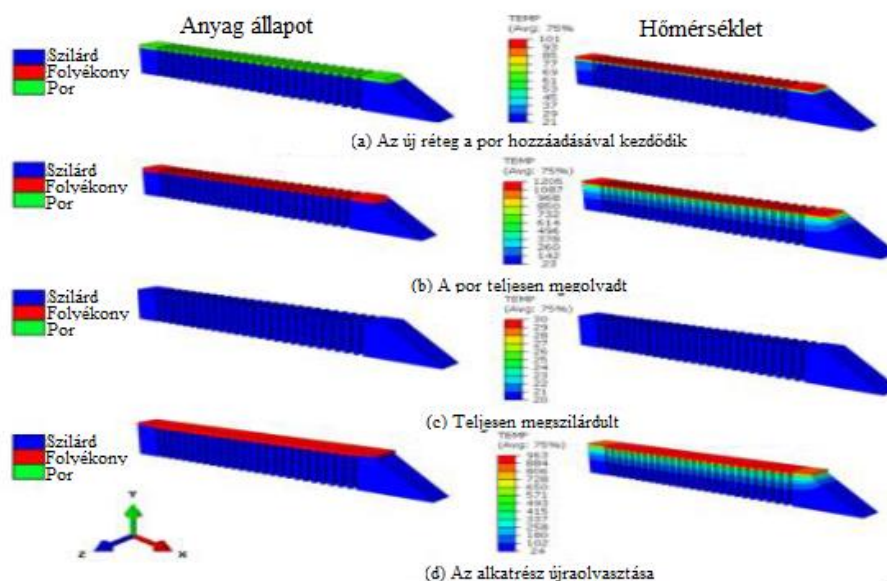


Ábra 1.3: Különböző pásztázási minták összehasonlítása [4]

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. [4]

1.3. 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 SLM esetben a hőmérsékletváltozás okozta zsugorodás, illetve elsősorban, szilárd fázisú fázisátalakulások okozta fajtérfogatváltozás. 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 1.4) is, ami az anyagállapotot és hőmérséklet-változást mutatja be a test egy rétegének 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. [5]



Ábra 1.4: Anyagállapotot és hőmérséklet-változást mutatja be a test egyrétegének gyártása közben [5]



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

1.4. 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 roncsolásmentes vizsgálatokra. A roncsolásos módszerek során az alkatrész károsodik, vagy megváltozik, a feszültség feloldása érdekében. Ezzel szemben a roncsolásmentes vizsgálatoknál a feszültség mérése az alkatrész megváltoztatása nélkül történik meg.

Néhány jellemzőbb maradó feszültségvizsgálati 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. [6]

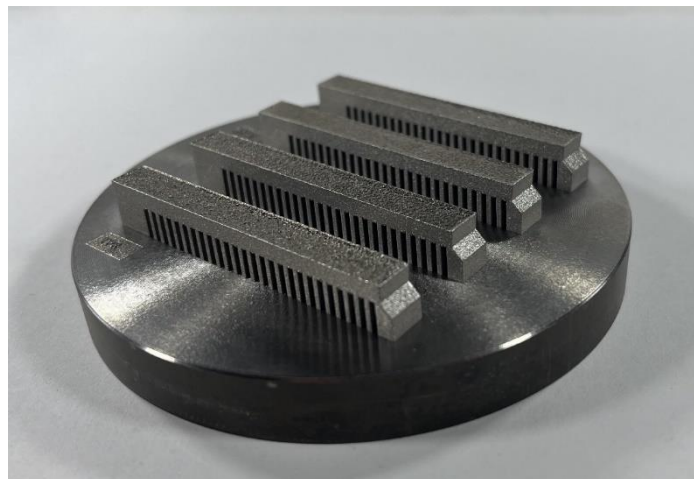
Technikák	Előnyök	Hátrányok
Lyukfúrás	Gyors, egyszerű Széles körben elérhető Hordozható Sokféle anyagnál alkalmazható Mély lyuk fúrható így vastag alkatrészeknél is használható	Adatok értelmezése Roncsolásos Korlátozott feszültség érzékenység és felbontás
Röntgendiffrakció	Sokoldalú, széles körben elérhető Sokféle anyagnál alkalmazható Hordozható berendezés Macro és micro RS	Alapvető mérés Laboratoriumi berendezések, kis alkatrészek
Szinkrotron	Röntgensugarak jobb penetrációja és felbontása Mélylégi 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	Vízzel 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 1.5 Maradó feszültség mérési technikák [6]

1.5. Maradó feszültség mérése konzolos megközelítéssel

Az alkatrész megbízhatóságának biztosítása érdekében a maradó feszültségek szintjét pontosan meg kell mérni és elemezni. Az additív gyártással készített Ti-6Al-4V 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 Ti-6Al-4V-ből. A konzolt tartó lábak támasztják meg a gyártás során, majd ezeket a gyártás végeztével 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. [7]

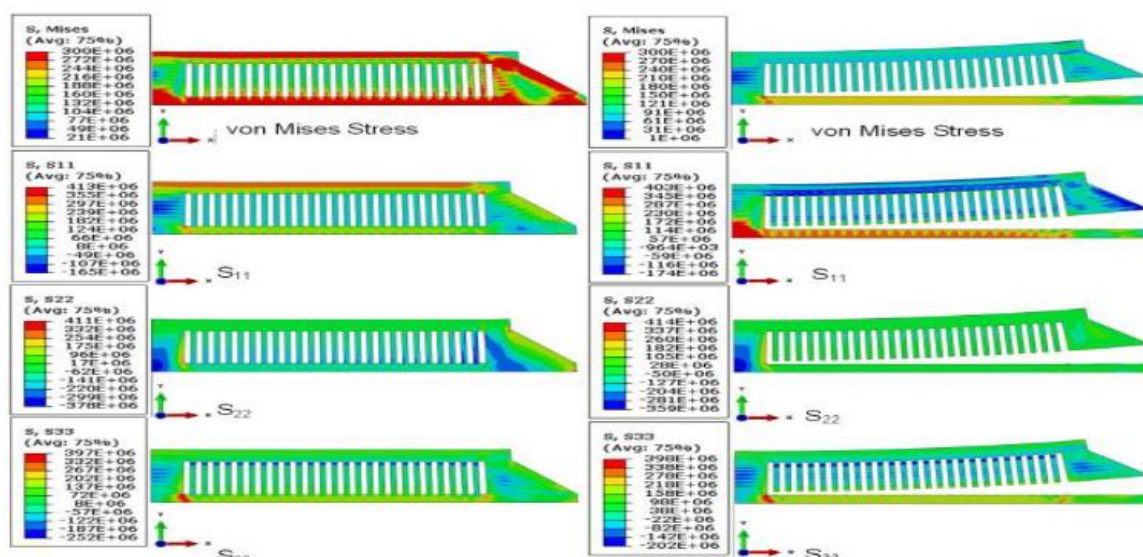


Ábra 1.7: A vizsgált konzolos tartó levágás előtt (saját kép)



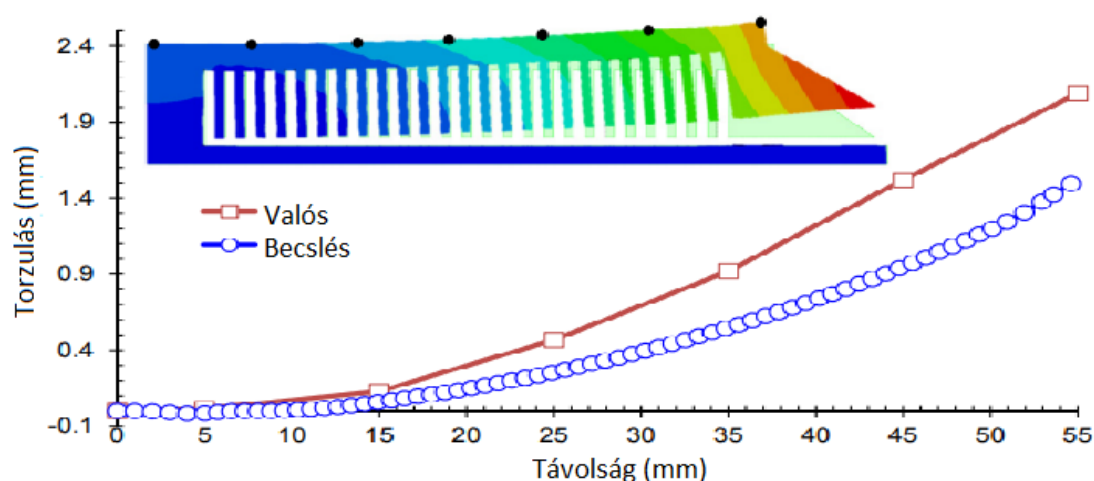
Ábra 1.6 A vizsgált konzolos tartó levágás után (saját kép)

A lenti ábra megmutatja (Ábra 1.8) von Mises feszültséget négy jellemző esetben az építési platformról való levágás előtt és után a levágás után bemért konzolok esetében.



Ábra 1.8: von Mises feszültséget három jellemző esetben az építési platformról való levágás előtt és után. [5]

Az alkatrész várható torzulásának megbecsülését szimulációval is el szokták végezni, amint az az alábbi ábrán is látható (Ábra 1.9), 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 1.9: Szimulációs előre jelzés [5]

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 lézerpasztázás 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 Ti-6Al-4V 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 Ti-6Al-4V esetében, az alacsony hővezetőképessége miatt. A konzolos-módszernek köszönhetően azonban fontos betekintést nyerhetünk az anyagok viselkedésébe és lehetséges alkalmazhatóságára. [5]

1.6. Kapcsolódó irodalmak maradó feszültség vizsgálatairól

Az SLM technológia paramétereinek változtatásáról és ennek hatásáról sok tanulmány készült, mivel rengeteg beállítás van, amiket kombinálni lehet. Alábbiakban összefoglalok párat, melyek az általam elvégzett kísérlethez hasonló témát dolgoztak fel, és megnézem, hogy milyen következtetésekre jutottak.

Elsőként Haide Ali [8] és társai egy átfogó tanulmányt készítettek a lézerteljesítmény és az pásztázási sebesség változásának hatásáról az energiasűrűség állandó értéken tartása mellett, és ez alapján vizsgálták a maradó feszültség kialakulását, hogy milyen hatással van SLM Ti-6Al-4V alkatrészek mechanikai tulajdonságára. Ezen felül megnézték a rétegvastagság hatását a maradó feszültségre és a mechanikai tulajdonságokra a folyamat paramétereinek egyedi optimalizálásával.

Méréseik során arra jutottak, hogy állandó energiasűrűség esetén egyenes arányosság van a teljesítmény, a hűtési sebesség és a hőmérsékleti gradiensek, valamint fordított az expozíció, a hűtési sebesség és a hőmérsékleti gradiensek között. Az összes minta martenzites mikroszerkezetet eredményezett, függetlenül a teljesítménytől és az expozíció kombinációjától, mivel a hűlési sebességek minden esetben 410 °C/s -nál gyorsabbak voltak. Állandó energiasűrűség esetén alacsonyabb teljesítmény és magasabb expozíció kombinációja alacsonyabb maradó feszültséget eredményezett az SLM Ti-6Al-4V alkatrészekben. 150 W és



133 μ s teljesítmény és expozíciós idő kombináció eredményezte a lealacsonyabb hűtési sebességet és hőmérsékleti gradienst. Állandó energiasűrűség mellett a folyáshatár nem mutatott számottevő változást a teljesítmény és az expozíció függvényében.

Három különböző rétegvastagság (25, 50 és 75 μ m) maradó feszültségre, mikroszerkezetére és mechanikai tulajdonságra gyakorolt hatását vizsgálták SLM Ti-6Al-4V az alkatrészekre. Fordított arányosságot fedeztek fel a rétegvastagság és a hűtési sebesség között, mivel a rétegvastagsággal az olvadáktócsa méret is nőtt. A rétegvastagság és a hőmérsékleti gradiensek szintén fordítottan arányosak. Ezt is, mint már korábban, a martenzites mikroszerkezettel és a nagy hűlési sebességgel magyarázza a szerző. Arra jutottak, hogy a rétegvastagság fordítottan arányos a maradó feszültséggel és 75 μ m-es rétegvastagság eredményezte a legkisebb maradó feszültséget a lassabb hűlési sebesség és a kisebb hőmérsékleti gradiens miatt. A folyáshatárnál és a nyúlásnál fordított arányosságot tapasztaltak a rétegvastagsággal szemben. A 25 μ m-es rétegvastagság a legnagyobb folyáshatárt és nyúlás értékeket eredményezte SLM Ti-6Al-4V alkatrészek esetében. Ezt azzal magyarázták, hogy a mintákban nem voltak láthatóak rétegek közötti hibák.

A következő vizsgálat során Sinan Önder [9] és társa a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség változásának hatásait vizsgálták állandó energiasűrűség mellett, és azt, hogy ez hogyan hat a mechanikai tulajdonságokra, maradó feszültségre, a mikroszerkezetre és a relatív sűrűségre.

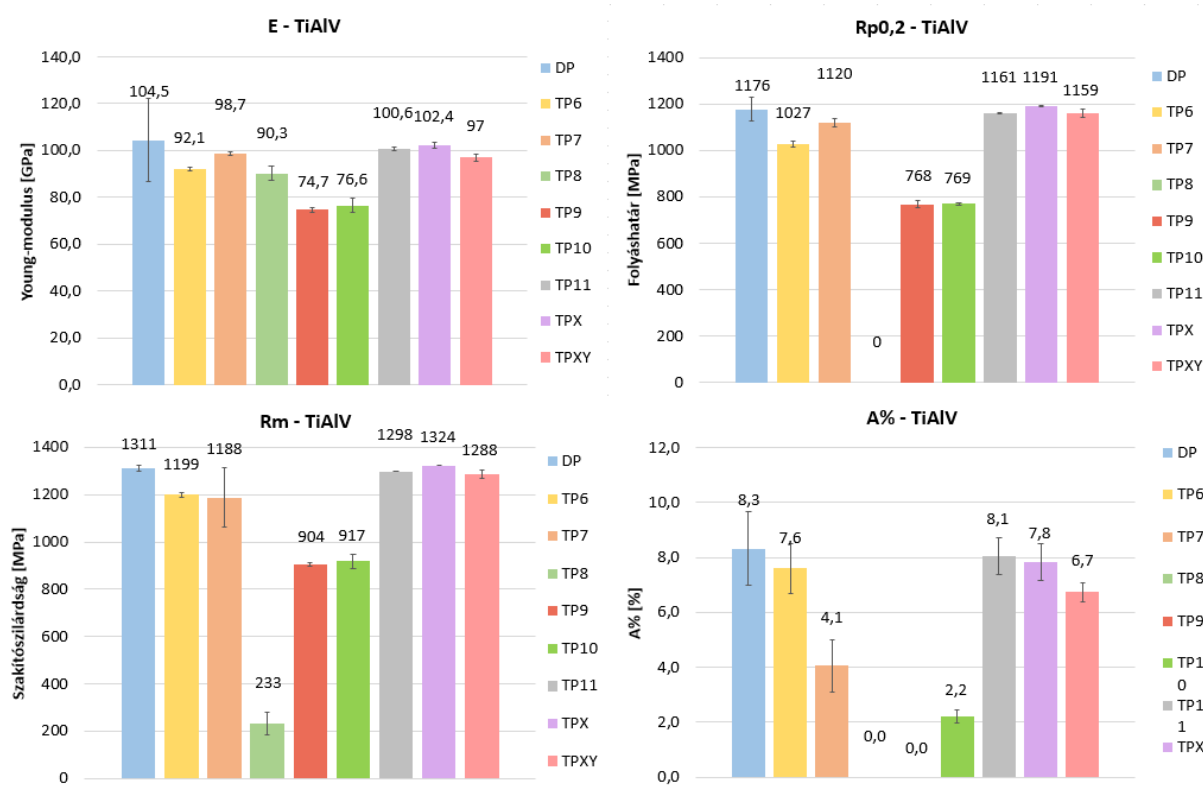
A következő következtetések vonták le:

- (1) Amikor az összes maradó feszültség görbét, a relatív sűrűségeredményeket és a szakítóvizsgálati eredményeket külön-külön értékelték; az volt megfigyelhető, hogy állandó energiasűrűségnél a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség változtatása nem növelte vagy csökkentette jelentősen a maradó feszültséget, a szakítószilárdságot, a százalékos nyúlás és a relatív sűrűség értékeit.
- (2) Valamennyi próbatestnél teljesen martenzites mikroszerkezet volt megfigyelhető a korábbi β - szemcsékben. Mikropórusok, gömbölyű pórusok és éles repedésszerű pórusok voltak megfigyelhetők az összes mintában.
- (3) Megfigyelték, hogy állandó energia sűrűséggel történő gyártás során a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség változtatása nem okozott jelentős különbséget a próbatestek mikrokeménységi értéke között.
- (4) Megfigyelték, hogy a porozitás aránya a próbatestekben jelentős hatással volt a szakítószilárdságra.



1.7. Korábbi méréseim bemutatása

Korábbi méréseim során a jelenlegi vizsgálattal megegyező, additív gyártással készített Ti-6Al-4V próbatesteket vizsgáltam azonos paraméterbeállításokkal. A mérés során szakítóvizsgálatot végeztem, ahol a célom a számomra legfontosabb mechanikai jellemzők összehasonlítása volt. Amik a Young-modulus vagy rugalmassági modulus (E), a szakítószilárdság (Rm), a terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár (Rp0,2) és a százalékos nyúlás (A) voltak.



Ábra 1.10: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra [9]

Az ábrán (Ábra 1.10) látható a fent említett mechanikai tulajdonságok oszlopdiagramjai azonos beállítás szerint csoportosítva. 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 0.1) a mellékletek közt található meg.

A mérés során a paraméterváltoztatásokat mindig az alap gyári paraméterbeállításhoz hasonlítottam.



Elsőként az egy és két rétegkihagyást vizsgáltam meg melynek értékei a TP7 és TP8 a fakó narancssárga és zöld oszlopokban láthatók meg. Itt azt tapasztaltam, 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 játszott a DP-hez képest elmaradó 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.

A következőként a pásztázási távolság változtatásának hatását vizsgáltam meg a mechanikai tulajdonságokra nézve. A változásokat itt is az alap paraméterbeállításhoz viszonyítva néztem. 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. Ennél a beállításnál érdemes megjegyezni, hogy a lézer fókuszolt 0,04 mm, azaz a 0,12 mm pásztázási távolság a fókuszolt 3-szorosának fele meg, a 0,24 mm-es pedig a 6-szorosának. Emiatt előfordulhat, hogy bizonyos sávok csak a második réteg ráolvasztásánál olvadnak egybe. Ez pedig a porozitásmérések során is megmutatkozik növekvő porozitás formájában.

A tulajdonságaikat tekintve jól látszik a TP6 esetében, hogy mind a négy tulajdonsága egységesen csökkent az alap paraméterbeállításhoz képest, azonban nem olyan nagymértékben. A TP9 hasonló arányban csökkent a TP6- hoz képest, mint az alap paraméterbeállításhoz 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.



A következő módosítás a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség változtatása volt. Az alap paraméterbeállítással rendelkező próbatestek 100 watt és 1400 mm/s értékekkel készültek. Ebben az esetben egy próbatestcsoport készült amit TP11-nek neveztem el, az ábrán pedig szürkével jelöltem. Mindkét értéket egyszerre változtattuk meg, a teljesítmény értékét 150 wattra és a sebességet pedig 2100 mm/s-ra emeltük meg úgy, hogy közben a fajlagos energiabevitel azonos maradt az alap (DP) beállítások energiabevitelével.

Megfigyeltem, 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, pár százalékos eltérést jelent csupán, ami 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-energiasűrűség állandó maradjon, ami belátható az (1. egyenlet) alapján is.

Végül pedig a pásztázási irányok változtatását hatását hasonlítottam össze. Az alap paraméterbeállításnál 67 fok-os rétegenkénti szögelfordulással dolgozik a gép. Ehhez képest a TPX esetében minden réteg párhuzamos volt. A TPXY-nál pedig rétegenként 90 fok volt a szög elfordulás. Illetve ezeken kívül még lényeges gyártási paraméter, hogy a próbatestek vertikális irányba lett gyártva.

A diagram alapján elmondható, hogy a változtatások hatására TPX rugalmassági modulusa és nyúlása kicsit alulmaradt az alap paraméterbeállításhoz képest. Azonban a folyáshatárban és szakítószilárdságban felülmúlta a gyári beállításokat. A TPXY viszont mindegyik vizsgált mérőszám alapján kisebb értéket adott az alap gyári paraméterbeállítás értékéhez képest. [7]



2. MÉRÉS BEMUTATÁSA

2.1. Alkalmazott gyártó berendezés ismertetése



A dolgozatban vizsgált próbatestek legyártása során az EOS M 100 DMLS additívgyártó berendezést használtuk, amiben a DMLS mozaikszó a Direct Metal Laser Sintering kifejezést jelenti, amit lényegében az SLM technológiának egy levédett mozaikszava. [10]

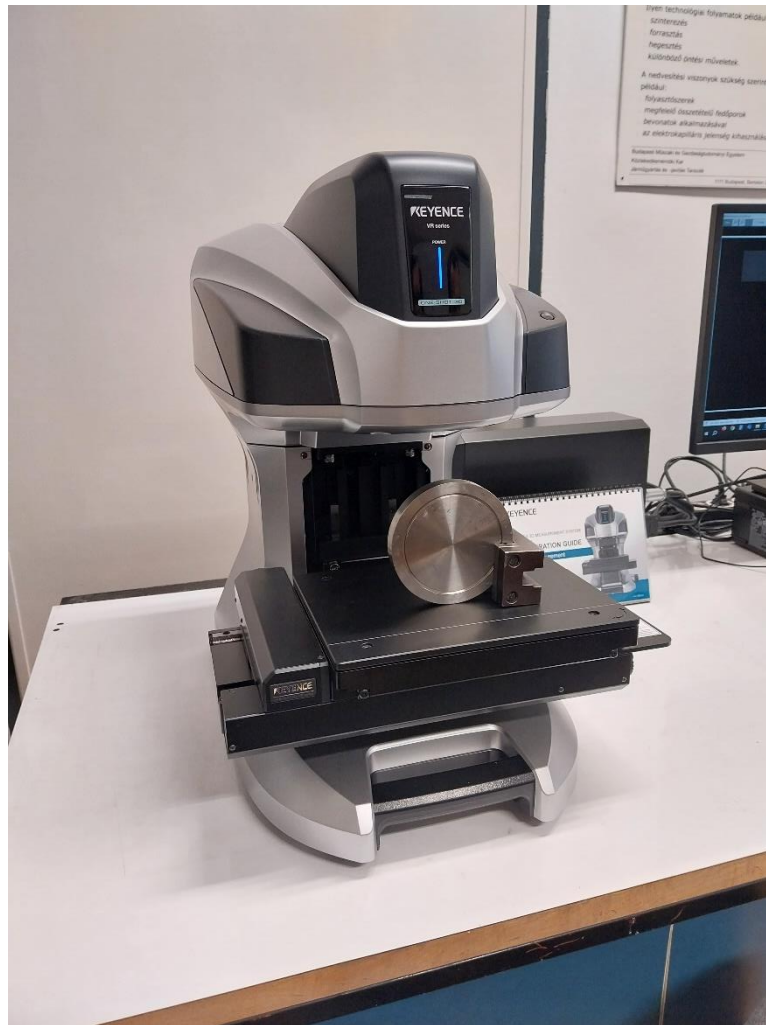
Ábra 2.1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS [14]

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 [14]

2.2. Alkalmazott mérőberendezés ismertetése

A maradó feszültség mérését konzolos (cantilever) módszer segítségével végeztem, amire a későbbiekben bővebben is kitérek. A legyártott konzolos mintát pedig egy Keyence VR 5200 típusú mérőberendezés segítségével mértem. Először beszkeneltem a mintát, majd a hozzá tartozó software segítségével ki tudtam nyerni a számomra szükséges méreteket.



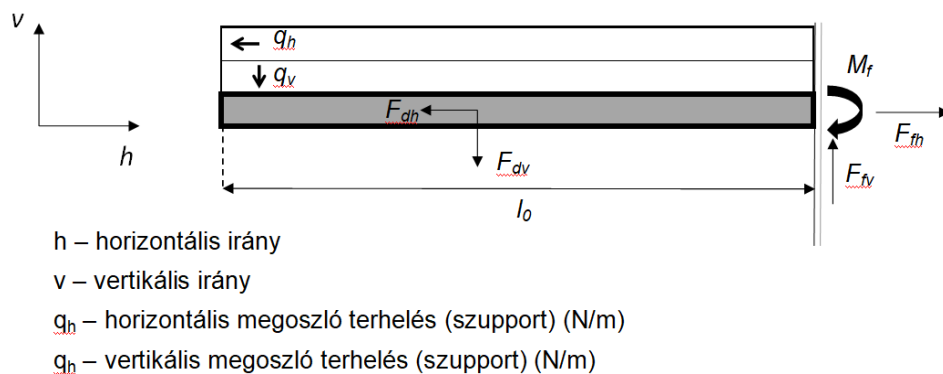
Ábra 2.3 Keyence VR 5200 Mikroszkóp a BME laboratóriumában. (Saját kép)

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. [11]

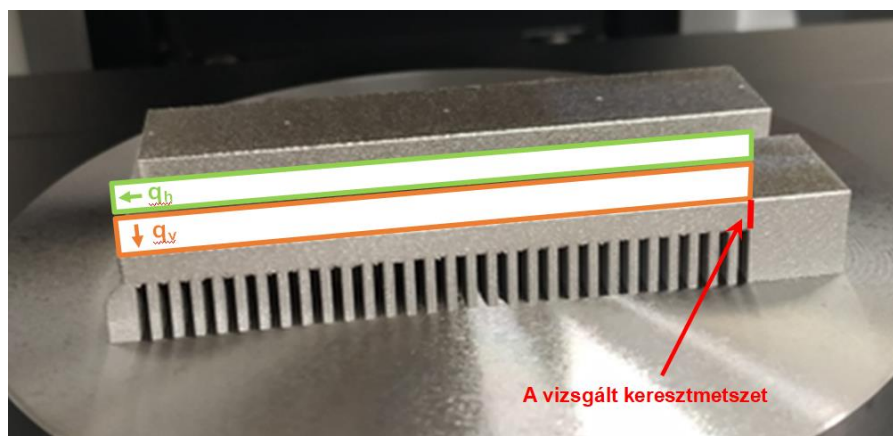
2.3. Maradó feszültség számítása

A maradó feszültség számszerűsíthető egy mechanikai modellel. Ezt a Vrabel Imre és Kovács Péter által kidolgozott módszer segítségével tettem meg. Azonban a mérés során kicsit eltértem a módszertől mivel alkalmazkodnom kellett a saját mérésem adta nehézségekhez, illetve szerettem volna megkönnyíteni és javítani az eljárást mivel, ahogy Vrabel Imre és Kovács Péter is tapasztalta jelenleg elég jelentős a mérés szórása. [12]

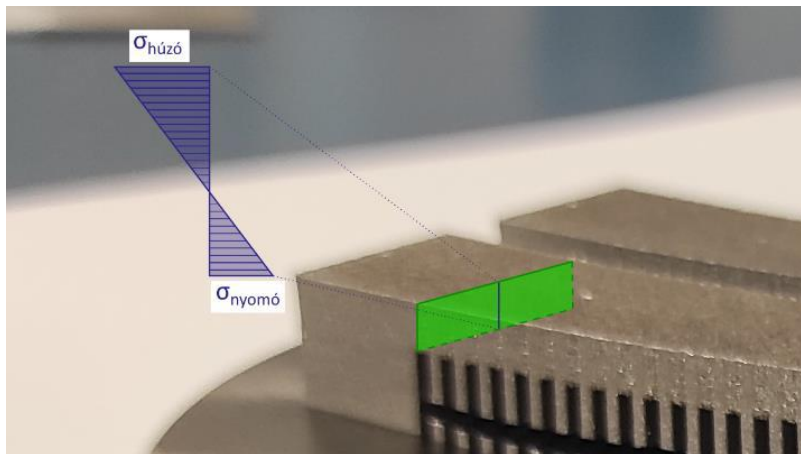
Ennek során a Keyence mérőberendezés által beszkenelt konzolos próbatestek levágás előtti és utáni alakjából a mechanikai modellben meghatározott vertikális és horizontális kényszerek (szupport) számolhatók, és ezek összegzésével számítható a maradó feszültségeloszlás közelítő értéke a befogási keresztmetszetben.



Ábra 2.4: Mechanikai modell [12]



Ábra 2.5: Mechanikai modell szemléltetése [12]

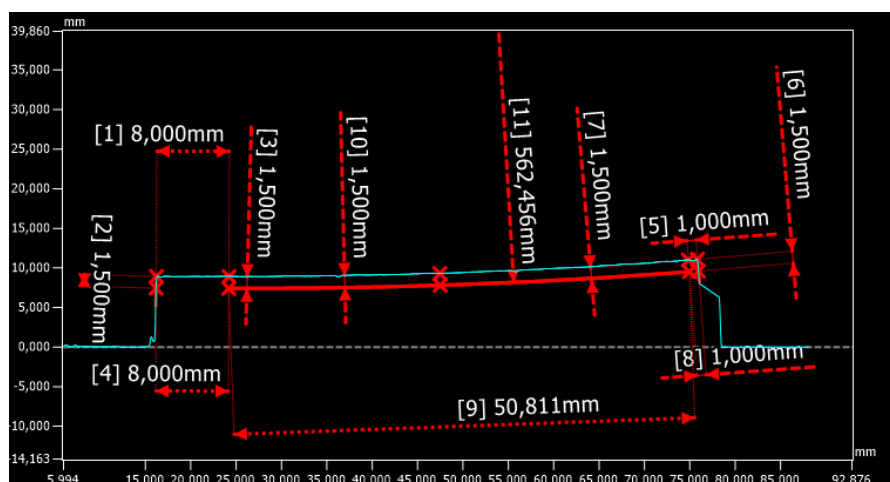


Ábra 2.6: Befogási keresztmetszet feszültségeloszlása [12]

A modellben a lábak vertikális és horizontális megoszló terhelésekkel vannak helyettesítve, ahogy ez az ábrákon is látható (Ábra 2.5, Ábra 2.6). A számítási módszer szemléltetése végett a következő pontokban egy kiválasztott próbatest, ami az M247-3 sorozat TPX paraméterbeállítását, ennek feszültségeloszlását lépésről-lépésre levezetem a módszer könnyebb megértése céljából.

2.3.1. Vertikális kényszerből eredő feszültségeloszlás meghatározása

A vertikális kényszerből (szupport) adódó feszültségeloszlás meghatározásához első lépésként a konzolos próbatest felhajlás utáni görbületi sugarát kell meghatározni. Ezt egy körív illesztésével tudtam megtenni, ahogy az a képen is látszik (Ábra 2.7). Ez egy egyszerűsítést jelent, mivel a konzol hossza mentén a görbületi sugar változik. A görbületi sugar illesztésének módszerét, majd a horizontális kényszer számításánál részletezem.



Ábra 2.7: M247-3 platform TPX paraméterbeállítással gyártott próbatestre illesztett görbületi sugar



A tisztán hajlított konzol semleges szála pontosan középen helyezkedik és mivel a horizontális megnyúláshoz meghatározom 1,5 mm mélységben a görbületet, ezért ennek a sugarát könnyen le tudom mérni. Tehát a görbületi sugár értéke 562,456 mm.

Ezek alapján a hajlító nyomaték a (2) egyenlettel kapható meg, ami a befogási keresztmetszetre vonatkozik.

$$M(l_0) = \frac{I * E}{R(l_0)} = \frac{33,75 \text{ mm}^4 * 110000 \text{ MPa}}{562,456 \text{ mm}} = 6,5615 \text{ Nm}$$

2. egyenlet: Befogási keresztmetszetben számolt hajlító nyomaték TP8 paraméterbeállítással esetén

$$\sigma_v(y) = \frac{M * y}{I}$$

3. egyenlet: Vertikális kényszerből eredő feszültség y távolságban a keresztmetszet súlyponti tengelyétől

σ_v – a vertikális terhelésekből származó feszültség

M – a hajlítónyomaték a befogási keresztmetszetben

y – távolság a súlyponti tengelytől

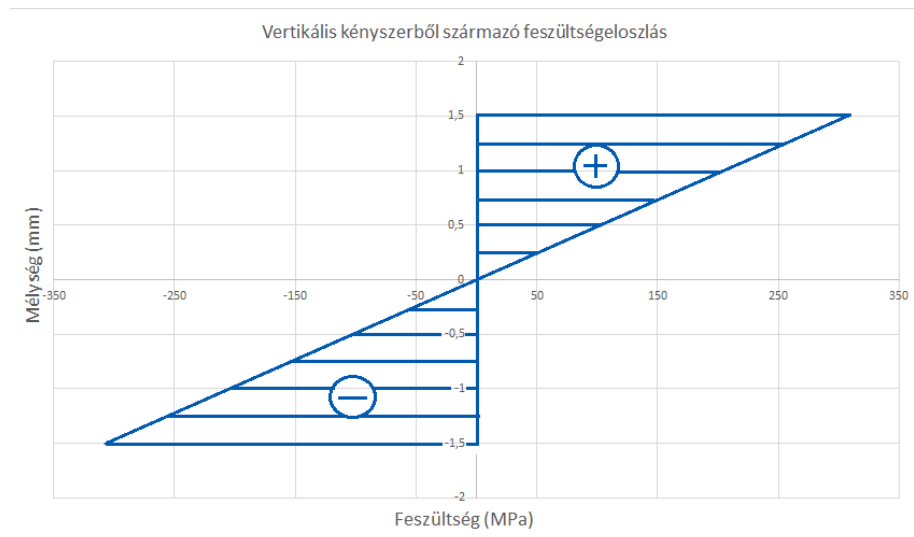
I – a keresztmetszet inerciája

Ezek alapján a vertikális kényszerből eredő, befogási keresztmetszeten kialakuló feszültségeloszlást a hajlító nyomaték segítségével a (3) egyenlet alapján lehet meghatározni. A feszültségértékeket a súlyponti tengelytől mért távolság mentén 0,5 mm-es osztásközökkel számítottam, ahogy az a (Táblázat 2-1) táblázaton is látható.

y (mm)	Vertikális kényszerből eredő feszültség (MPa)
1,5	293,356
1	195,571
0,5	97,785
0	0,000
-0,5	-97,785
-1	-195,571
-1,5	-293,356

Táblázat 2-1: Vertikális kényszerből eredő feszültségértékek a súlyponti tengelytől számítva TPX paraméterbeállítás esetén

A feszültségeloszlást a próbatest magasságának függvényében megközelítőleg az (Ábra 2.8) ábra szemlélteti. [12]



Ábra 2.8: TPX paraméterbeállítás esetén a vertikális kényszerből származó feszültségeloszlás a befogási keresztmetszetben

2.3.2. Horizontális kényszerből eredő feszültségeloszlás meghatározása

A befogási keresztmetszetére merőleges feszültségeloszlás meghatározásához a vertikális kényszerből (szupport) adódó feszültségen kívül szükség van a konzol hosszirányú kényszeréből (szupport) adódó feszültségre is, ahogy az látható a (Ábra 2.4) ábrán. Mivel ez a kényszer merőleges a keresztmetszetre, egyenletes feszültségeloszlást eredményez a befogási keresztmetszetben.

A feszültség számítása érdekében meg kell mérni a nyúlást a test 1,5 mm-es mélységében.

Itt látható a már korábban említett eltérés Kovács Péter és Vrábel Imre módszerétől, mivel nekik rendelkezésükre állt egy oldalnézet a próbatestről, könnyebben meg tudták határozni a semleges szál helyzetét méréssel. Viszont én ezt nem tudtam elvégezni, mivel több próbatestet készítettem egy platformon, mint ahogy az korábban (Ábra 1.7, Ábra 1.6) ábrákon is látszott. Így egy felülnézeti kép segítségével készítettem egy metszetet a próbatestekről, ahogy az a (Ábra 2.7) ábrán is látszik, amin meghatároztam a méréshez szükséges pontokat, majd erre illesztettem a körívet. Megmértem a kijelölt ív metszőjét szakaszának hosszát és sugarát, amik ebben az esetben 50,811 mm és 562,456 majd ezek segítségével határoztam meg az ívhosszt, ami azonos a levágás utáni hossz értékkel.



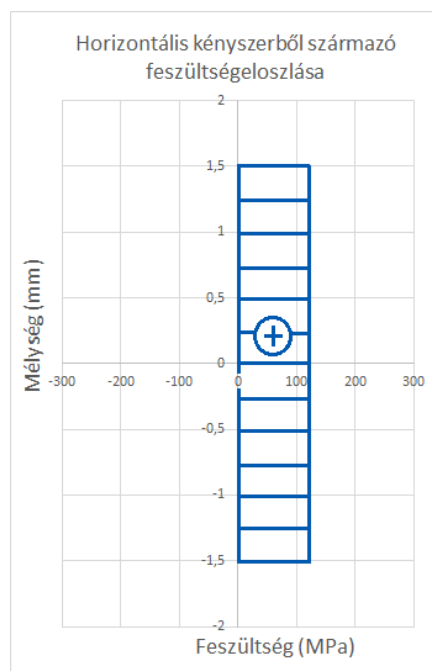
Tehát a levágás előtt a próbatest hossza 50,855 mm volt, levágás után pedig a számítás alapján 50,8283 mm.

Ezek alapján az (4) egyenletből kiszámítható a horizontális megoszló terelés, mint a szupport jelentette kényszer) értéke.

$$q_h = \frac{2 \cdot \Delta l_i \cdot S \cdot E}{l_0^2}$$

4. egyenlet: A modellben használt horizontális megoszló terelés számítása

Ebből már számítható a horizontális kényszerből adódó feszültségeloszlás, ami 115,533 N/mm². Ez a feszültségérték az egész befogási keresztmetszeten belül azonos. A horizontális kényszerből származó feszültségeloszlás közelítő értéke a (Ábra 2.9) ábrán látható. [12]

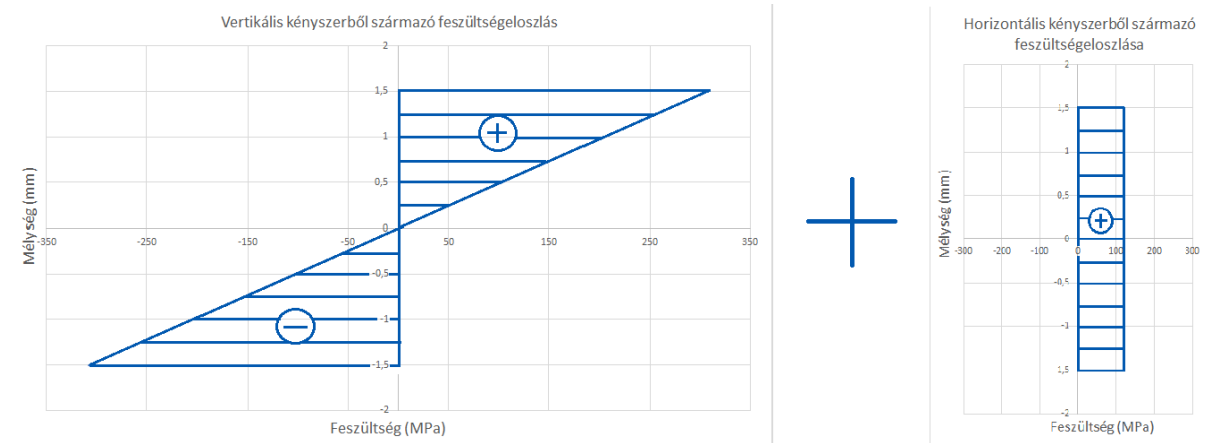


Ábra 2.9: TPX paraméterbeállítás esetén a horizontális kényszerből származó feszültségeloszlása



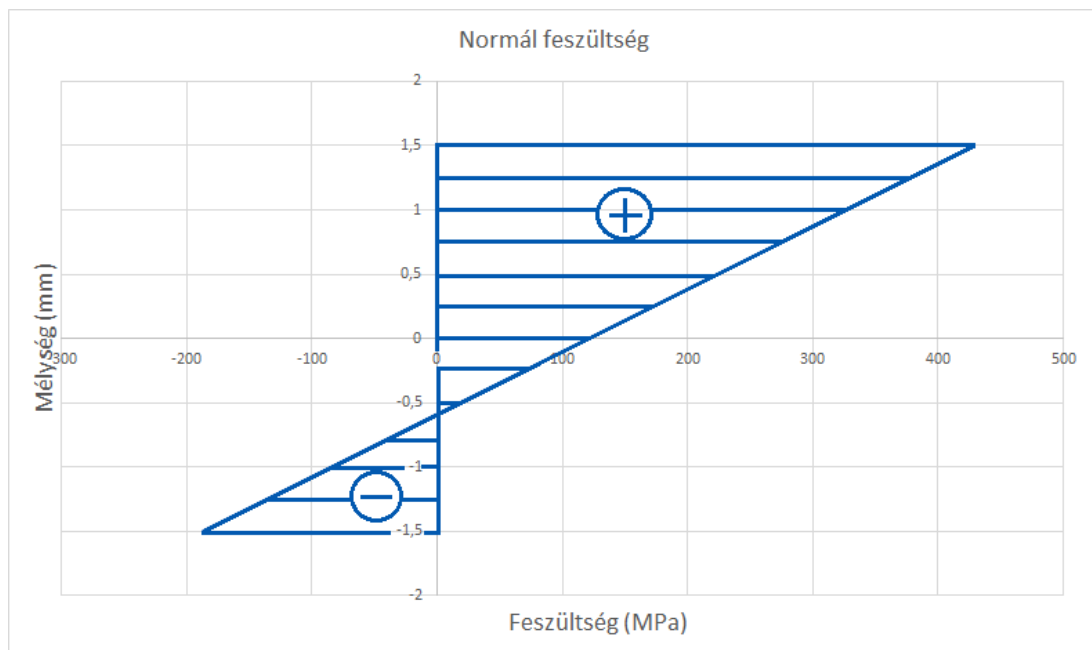
2.3.3. Normál irányú feszültségeloszlás

A két feszültség komponens összegzése az alábbi ábrán (Ábra 2.10) látható.



Ábra 2.10: Vertikális és horizontális kényszerekből (szupport) adódó feszültségkomponensek összegzése

A befogási keresztmetszetre merőleges összegzett feszültség-eloszlás a horizontális és a vertikális kényszerekből adódó feszültségkomponensek összegeként adódik ki (Ábra 2.11).



Ábra 2.11: TPX paraméterbeállítás esetén a két feszültség komponens összegzése



Az összegzett feszültségértékeket a befogási keresztmetszeten (Táblázat 2-2) tartalmazza.

[12]

y (mm)	Összegzett feszültség (MPa)
1,5	408,889
1	311,104
0,5	213,318
0	115,533
-0,5	17,747
-1	-80,038
-1,5	-177,823

Táblázat 2-2: Összegzett feszültség értékek TPX paraméterbeállítás esetén befogási keresztmetszetben

2.4. A módosított paraméterek bemutatása

A mérés során felhasznált konzolszerű próbatestek a (Táblázat 2-3) 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 használtam 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 2-3 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 2-3 Konzol minták gyártási paraméterei

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 pásztázzunk, 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 a két pásztázási sáv átfedése, ami a szemcsék újra olvadásának 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.



3. KUTATÁS JELENTŐSÉGE ÉS CÉLJA

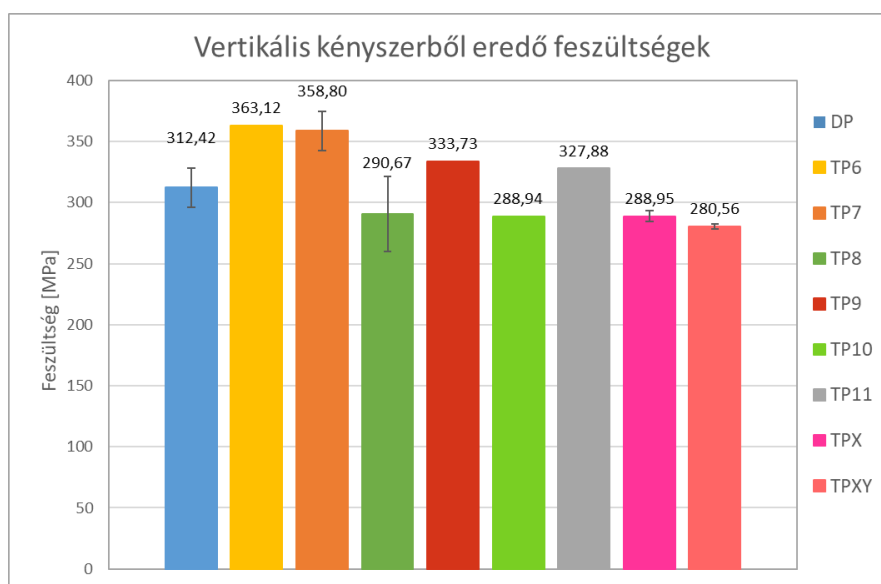
Az additív technológiák témakörében azért szükséges kutatni, mert annak ellenére, hogy a folyamat nem annyira új, még rengeteg dolog van, amit nem tudunk róluk. Ebben az sem segít, hogy körülbelül tíz paraméter van, amit egy test legyártásakor állítani tudunk, ami az anyag végleges minőségét jelentősen 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 összehasonlításánál. Tehát ezért volt szükség a méréseim 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. Ezért fontos lenne, a gyártási idő csökkentése, mert ezáltal tudnám növelni a termelékenységet és azzal a technológiára költségei is redukálódnának.

Jelenlegi mérésem során korábban elvégzett kísérletek eredményeit felhasználva szeretnék még átfogóbb képet kapni a paraméter változtatás hatásairól. Ennek érdekében megvizsgáltam a konzolos tartókban ébredő maradó feszültséget. Majd egy korábbi porozitás vizsgálat eredményei és az energiasűrűség értékei alapján értelmeztem, és próbáltam kapcsolatot keresni, és következtetéseket levonni a kapott eredmények alapján.

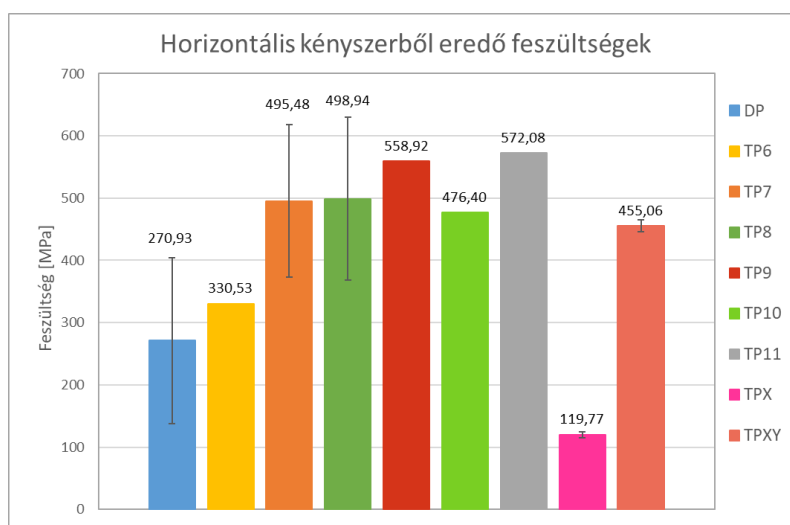


4. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

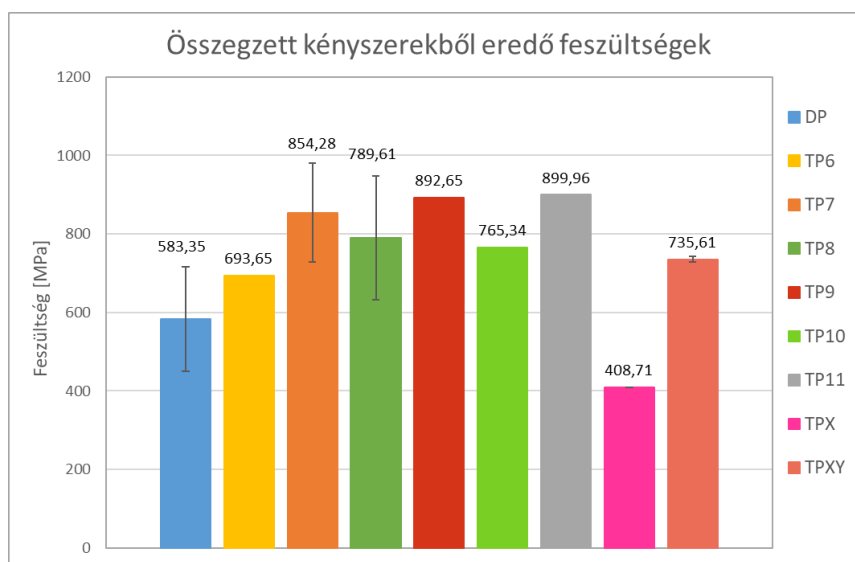
A vizsgálat során először az alap paraméterbeállítással csináltam meg a maradó feszültség vizsgálatot, majd a többi értéket ehhez tudtam hasonlítani. Az egyes minták esetében már nem a feszültségeloszlást számoltam ki a befogási keresztmetszetre, hanem annak csak a maximális értékét vettem, mint a feszültség szintet jól jellemző adat. Az összehasonlítást a vertikális és horizontális hosszváltozások és a vertikális, horizontális kényszerekből adódó, valamint összegzett feszültségek alapján végzem el. Azért fontos ezeket külön-külön is vizsgálni, mert, ahogy már korábban is írtam, a vertikális magasságváltozást és az ebből számolható feszültségeket nagyobb pontossággal tudtam mérni, így azokat az eredmények sokkal kisebb mérési hibával terheltek.



Ábra 4.1: A paraméter változtatások hatása a vertikális kényszerből eredő feszültségekre



Ábra 4.3: A paraméter változtatások hatása a horizontális kényszerből eredő feszültségekre



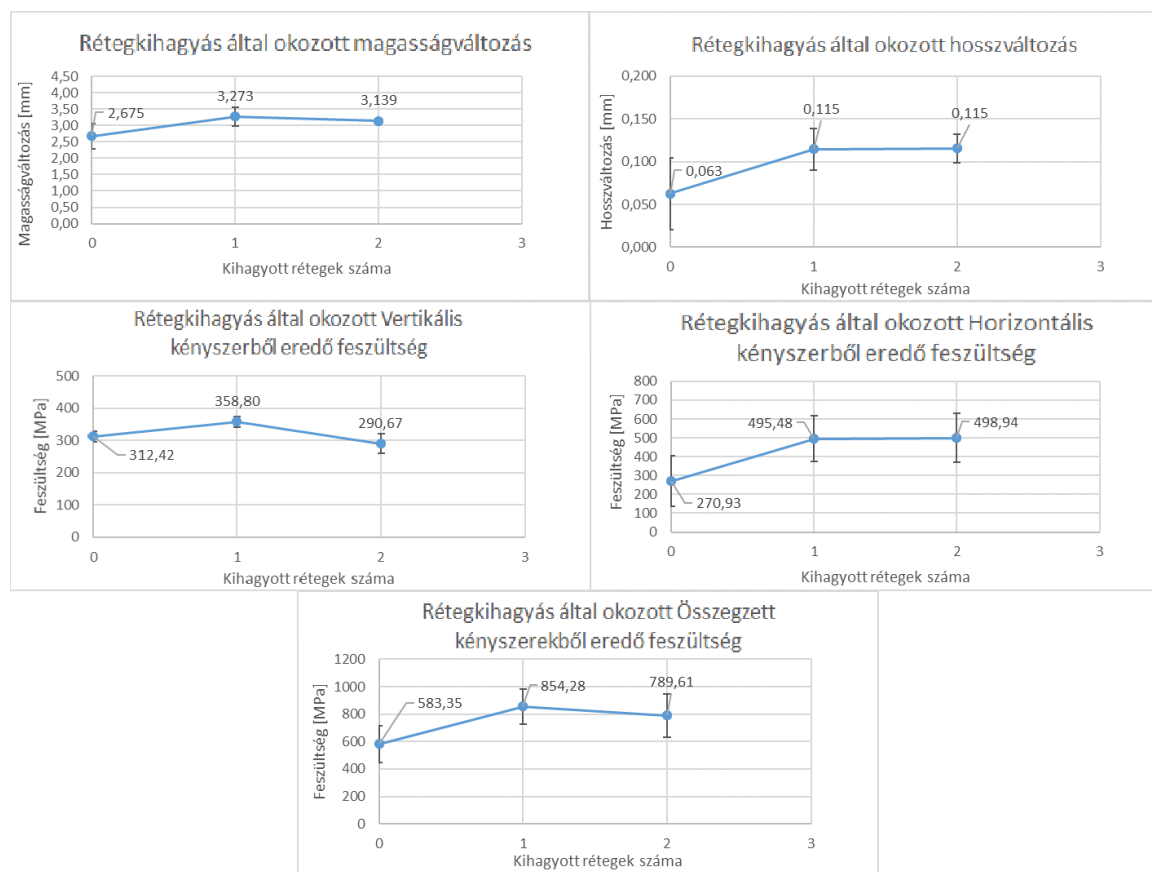
Ábra 4.2: A paraméter változtatások hatása az összegzett kényszerből eredő feszültségekre

Az ábrákon (Ábra 4.1, Ábra 4.3, Ábra 4.2) láthatóak a fent említett feszültségek oszlopdiagramjai azonos beállítás szerint csoportosítva. Több paraméterbeállításnál is végeztem többszöri méréseket a megbízhatóbb eredmények érdekében. Ezekben az esetekben a kiértékelt adatok átlaga és szórása szerepel az oszlopdiagramokon, az egyszerűbb összehasonlítás és a mérési pontosság szemléltetésének érdekében. Így a szórás segítségével szemléltethető a fentebb említett mérési pontatlanság a vertikális és horizontális kényszerekből adódó feszültségek között. Azonban itt hozzá kell tenni, hogy a legtöbb ismételt mérés száma három volt, amiből nem lehet messzemenő következtetéseket levonni, azonban a TDK kereteibe most csak ennyi fért bele.



4.1. Rétegkihagyás (skip layer) hatása a maradó feszültségre

Az alábbi diagramok segítségével az alap paraméterbeállítással készített és a „skip layer”-en változtatott próbatestek magasság-, hosszváltozás és a befogási keresztmetszetben ébredő maximális feszültségértékeit fogom összehasonlítani.



Ábra 4.4: Rétegkihagyás által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben

Az ábrán (Ábra 4.4) lévő diagramok 0, 1 és 2 rétegkihagyással készített paraméterbeállítások hatása látható melyek a DP, TP7 és TP8 jelöléssel vannak ellátva. Ezekkel a paraméter beállítással két ismétlő mérést is készítettem így megtudtam nézni az eredmények szórását. Az alap paraméter beállításról öt darab ismétlő mérés készült a pontosabb eredmények érdekében.

Az eredmények jól vissza adják, hogy a magasság megváltozás a vertikális a hosszváltozás pedig a horizontális terhelésből eredő feszültségből származik. Illetve látható, hogy a próbatestek, hosszváltozása lényegesen kisebb a magasság változáshoz, képest ez is nagyban hozzájárul a mérésének nehézségéhez, valamint, hogy kis hosszváltozás is jelentős feszültség

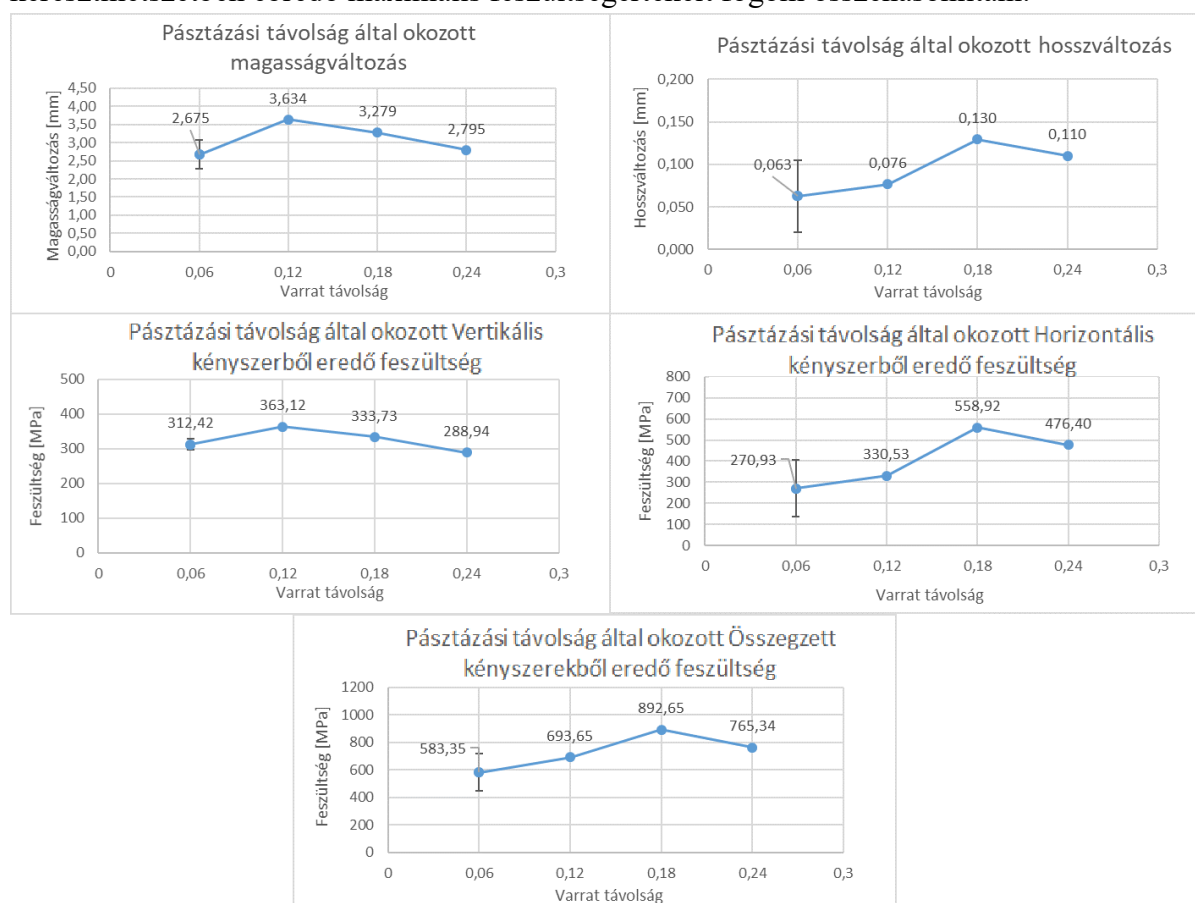


változást tud eredményezni. Tehát ezért is az eredmények bemutatásánál a magasság megváltozásra tesztek megállapításokat.

Az eredmények jól mutatják, hogy az alap paraméterbeállításhoz képest egy rétegkihagyás megnöveli, a próbatestben ébredő feszültségeket viszont két réteg kihagyásnál ez a tendencia nem folytatódik, és a feszültségek csökkennek, és még az is előfordult, hogy az alap paraméterbeállítás feszültség értékeinél kisebb értéket kaptam.

4.2. A pásztázási távolság (distance) hatása a maradó feszültségre

Az alábbi diagramok segítségével az alap paraméterbeállítással készített és a pásztázási távolság változtatásával gyártott próbatestek magasság-, hosszváltozás és a befogási keresztmetszetben ébredő maximális feszültségértékeit fogom összehasonlítani.



Ábra 4.5: Pásztázási távolság által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben

Az ábrán (Ábra 4.5) lévő diagramok 0,06; 0,12; 0,18 és 0,24 mm pásztázási távolsággal készített paraméterbeállítások hatását ábrázolják, melyek a DP, TP6, TP9 és TP10 jelöléssel

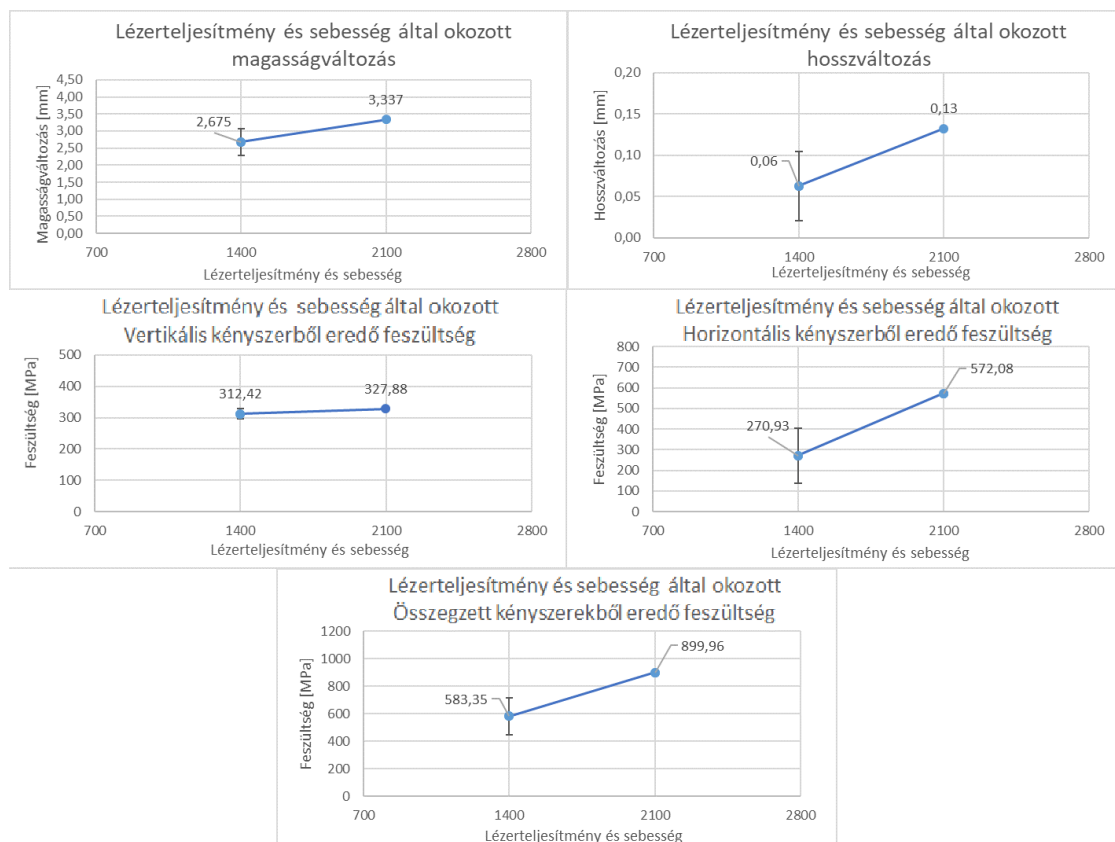


készültek. Ezekkel a paraméterbeállításokkal nem végeztem ismétlő mérést, ezért csak az alap paraméter beállításnak van szórása a diagramokon.

A magasságváltozás és vertikális kényszerből eredő maximális feszültségek diagramja alapján elmondható, hogy a pásztázási távolság növelése megnövelte a próbatestben ébredő feszültségeket az alap paraméterbeállításhoz képest, azonban további változtatások hatására nem folytatódott a növekvő tendencia. 0,18 mm-es távolságnál a maximális feszültségérték megközelítette az alap paraméterbeállítást. 0,24 mm-es távolságnál pedig a gyári beállításhoz tartozó érték alá ment a feszültség.

4.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség (power és speed) hatása a maradó feszültségre

Az (Ábra 4.6) ábrán lévő diagramokon a „power”, azaz lézerteljesítmény és a „speed”, a pásztázási sebesség változtatás hatása figyelhető meg. Az alap paraméterbeállítással



Ábra 4.6: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben

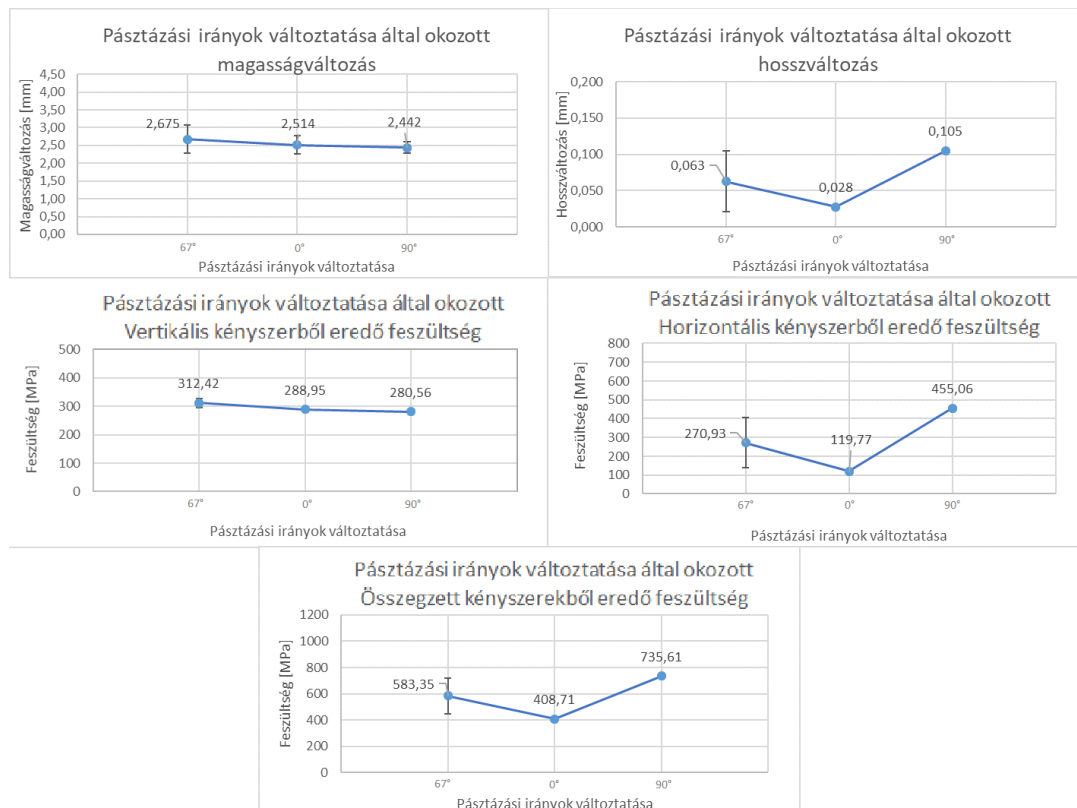


rendelkező próbatestek 100 watt és 1400 mm/s értékekkel készültek. Ebben az esetben egy próbatestcsoport készült amit TP11-nek neveztem el. Mindkét értéket egyszerre változtattam a teljesítmény értékét 150 watt-ra és a sebességet pedig 2100 mm/s-ra emeltem meg.

A TP11 paraméterbeállítással végeztem két ismétlődő mérést is, viszont ezeken a próbatesteken a gyártás során jól látható nyomtatási hiba keletkezett, ezért ezek a próbatestek nem vehetők be a vizsgálat körébe. Az ábrákon látható, hogy a TP11 változtatás hatására a vertikális kényszerből adódó maximális feszültség nem változott jelentősen. Ez a kis eltérés a változtatások ellenére annak köszönhető, hogy a lézerteljesítményt és a sebességet párhuzamosan változtattam meg úgy, hogy az alap paraméterbeállításhoz képest a lézer-energiásűrűség állandó maradjon, ahogy ez a képletéből is látszik (1. egyenlet).

4.4. Pásztázási irányok változtatásának hatása a maradó feszültségekre

Az (Ábra 4.7) ábrán lévő diagram a különböző koordináták szerinti pásztázási irányok változtatását hasonlítja össze. Az alap paraméterbeállításnál a pásztázási irány rétegenként 67



Ábra 4.7: Pásztázási irányok változtatása által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben



fokos szögben változik. TPX esetében minden réteg párhuzamos, azaz 0 fokos elforgatással készült. A TPXY-nál pedig rétegenként 90 fokot fordul a pásztázás iránya.

A TPX és TPXY paraméterbeállítások esetében is végeztem ismétlő mérést mivel a kapott eredmények érdekesnek tűntek és megakartam vizsgálni, hogy mérési hiba okozta azokat vagy valós effektus figyelhető-e meg.

Előzetesen a pásztázási irányváltoztatástól nem vártam jelentős változást a feszültségértékekben, mivel a bevitt lézer-energiásűrűség nem változott, illetve ezzel a beállítással gyártási időt se lehet csökkenteni. Tehát ennél a cél mindössze a pásztázási irányok hatásának megismerése volt. Azonban a kapott eredmények figyelemre méltók, egyrészt a vertikális irányú kényszerekből adódó deformációnál is megfigyelhető csökkenő tendencia miatt. Másrészt ebben az esetben a horizontális kényszerből adódó feszültségek is figyelembe vehetőek, mivel a mért értékek szórása megfelelően kicsi, és itt már egy jelentősebb csökkenés látható a párhuzamos pásztázás esetén.

4.5. Paraméterváltoztatások hatása a gyártási időkre

A gyártási idők hatásának vizsgálata során a réteghagyást, pásztázási távolságot és a lézer teljesítmény és pásztázási sebesség együttes változtatásának hatását néztem meg a gyártási időkre. A pásztázási irányváltoztatásokat nem nézem meg külön, mivel azoknak az idejében nincs számottevő változás az alap paraméterbeállítással szemben. A gyártási időket a tanszéken a gép által megadott idő alapján határozzák meg. Kaptam erről egy táblázatot, amiben százalékos munkafelület kitöltöttséghez meg van határozva a gyártási idő. Ezért én is meghatároztam a gyártani kívánt próbatest felületét, ami 434 mm^2 , ez nagyjából a 100mm átmérőjű munkatérben 5%-os kitöltöttséget jelent. Ez alapján pedig meghatároztam a különböző beállításokkal a gyártási időt, majd ebből azt, hogy az eredeti időszükséglethez képest hány százalékká csökkent a gyártási idő.



4.5.1. Rétegkihagyás hatása a gyártási időkre

A rétegkihagyás egy elég kézenfekvő módja a gyártási idő csökkentésének.

		DP	TP7		TP8	
		Skiplayer 0	Skip layer 1		Skip layer 2	
Anyag:Ti64						
Platform	Felület	Gyártási idő	Gyártási idő	Idő változás	Gyártási idő	Idő változás
kitöltöttség	mm ²	óó:pp	óó:pp	mp	óó:pp	mp
5%	434,00	2:15	1:42	76%	1:30	67%
10%	785,40	4:30	3:24	75%	3:02	67%
20%	1570,80	6:45	4:32	67%	3:48	56%
30%	2356,19	8:59	5:40	63%	4:34	51%
40%	3141,59	11:14	6:46	60%	5:18	47%
50%	3926,99	13:27	7:53	59%	6:04	45%
60%	4712,39	15:41	9:02	58%	6:50	44%
70%	5497,79	17:55	10:09	57%	7:35	42%
80%	6283,19	20:09	11:17	56%	8:22	42%
90%	7068,58	22:24	12:26	56%	9:08	41%

Táblázat 4-1: Réteg kihagyás hatása a gyártási időkre

Ez, mint látható már egy réteg kihagyással 5%-os kitöltöttségnél is jelentős csökkenéssel jár, amit két réteg kihagyása tovább tud fokozni.

Azonban mindkét esetben elmondható, hogy minél nagyobb kitöltöttséggel dolgozunk, annál nagyobb a csökkenés, mivel a rétegkihagyás során is a porterítés jelentős időszükséglete megjelenik, ill. a külső kontúrokat végigpásztazza a lézer, ezért csak a belső kitöltés idejét lehet valójában megtakarítani.



4.5.2. Pásztázási távolság hatása a gyártási időkre

Ebben az esetben is ugyan úgy elmondható, hogy számottevő csökkenések érhetők el minden esetben. Valamint itt is megfigyelhető, hogy nagyobb kitöltöttségeknél jelentősebb csökkentések érhetők el szintén a porterítés időszükséglete és a kontúr végigpásztázása miatt.

		DP	TP6		TP9		TP10	
		Hatch distance 0,06mm	Hatch distance 0,12mm		Hatch distance 0,18mm		Hatch distance 0,24mm	
Anyag:Ti64								
Platform kitöltöttség	Felület	Gyártási idő	Gyártási idő	Idő változás	Gyártási idő	Idő változás	Gyártási idő	Idő változás
	mm ²	óó:pp	óó:pp	mp	óó:pp	mp	óó:pp	mp
5%	434,00	2:15	1:42	76%	1:29	66%	1:23	61%
10%	785,40	4:30	3:24	76%	2:58	66%	2:47	62%
20%	1570,80	6:45	4:33	68%	3:45	56%	3:23	50%
30%	2356,19	8:59	5:42	64%	4:32	51%	3:59	44%
40%	3141,59	11:14	6:48	61%	5:18	47%	4:35	41%
50%	3926,99	13:27	7:57	59%	6:05	45%	5:10	39%
60%	4712,39	15:41	9:05	58%	6:51	44%	5:46	37%
70%	5497,79	17:55	10:14	57%	7:37	43%	6:21	36%
80%	6283,19	20:09	11:22	56%	8:24	42%	6:57	34%
90%	7068,58	22:24	12:30	56%	9:10	41%	7:32	34%

Táblázat 4-2: Pásztázási távolság hatása a gyártási időkre

4.5.3. A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatása a gyártási időkre

A lézerteljesítmény és pásztázási sebesség együttes változtatása a korábbi változtatásokhoz képest kisebb csökkentéseket eredményez, viszont a korábban is látott, alapbeállításokat közelítő eredmények alapján ez a módosítás a legalkalmasabb a gyártási idő csökkentésére. Valamint nagyobb alkatrészek gyártása során már ezzel a módszerrel is jelentős időt lehet megtakarítani.



		DP	TP11	
		Speed 1400mm/s Power 100W	Speed 2100mm/s Power 150W	
Anyag:Ti64				
Platform kitöltöttség	Felület	Gyártási idő	Gyártási idő	Idő változás
	mm ²	óó:pp	óó:pp	mp
5%	434,00	2:15	1:54	84%
10%	785,40	4:30	3:47	84%
20%	1570,80	6:45	5:22	80%
30%	2356,19	8:59	6:56	77%
40%	3141,59	11:14	8:31	76%
50%	3926,99	13:27	10:05	75%
60%	4712,39	15:41	11:40	74%
70%	5497,79	17:55	13:14	74%
80%	6283,19	20:09	14:48	73%
90%	7068,58	22:24	16:23	73%

Táblázat 4-3: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatása a gyártási időkre



5. A MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

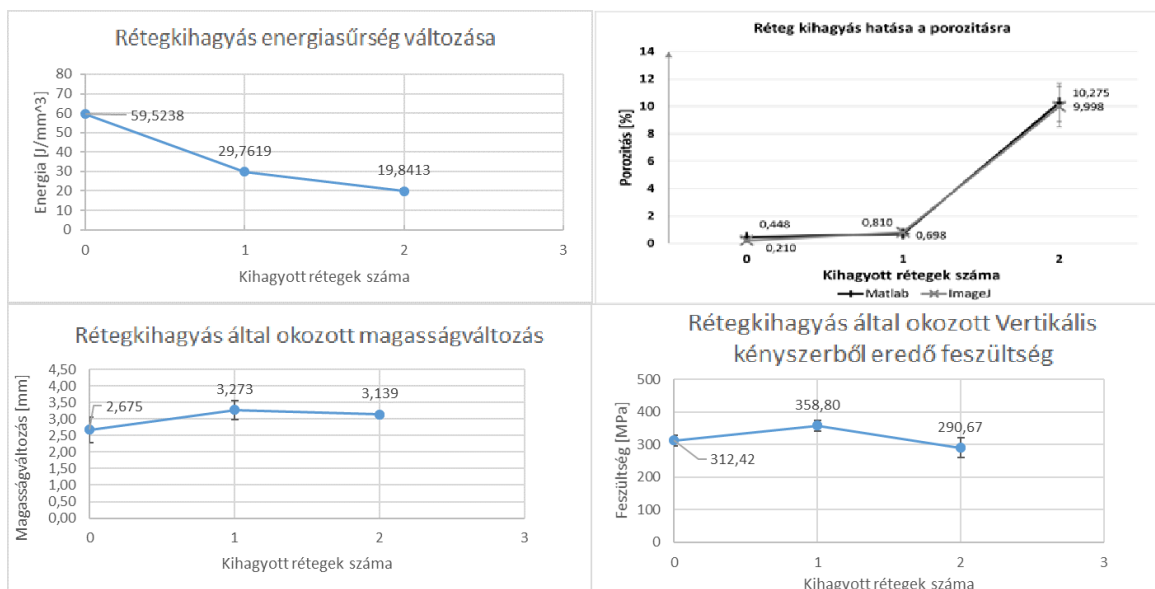
Eredményeim két szempont szerint igyekeztem értelmezni. Az egyik a szinterezés lézer-energiásűrűsége. Természetesen, ebben az esetben, csak a szinterezésre becsatolt összes energiát tudom könnyen kiszámítani, a hasznosult energiát már nem. A másik szempont a beállítások által okozott szerkezeti porozitás 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	0	0
Distance	0,12			0,18	0,24		0,06	0,06	0,06
Speed						2100	1400	1400	1400
Power						150	100	100	100
Energia [J/mm ³]	29,7619	29,7619	19,8413	19,8413	14,881	59,5238	59,5238	59,5238	59,5238
	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TPX	TPXY	DP

Táblázat 5-1: Gyártási paraméterek az energiasűrűséggel kiegészítve

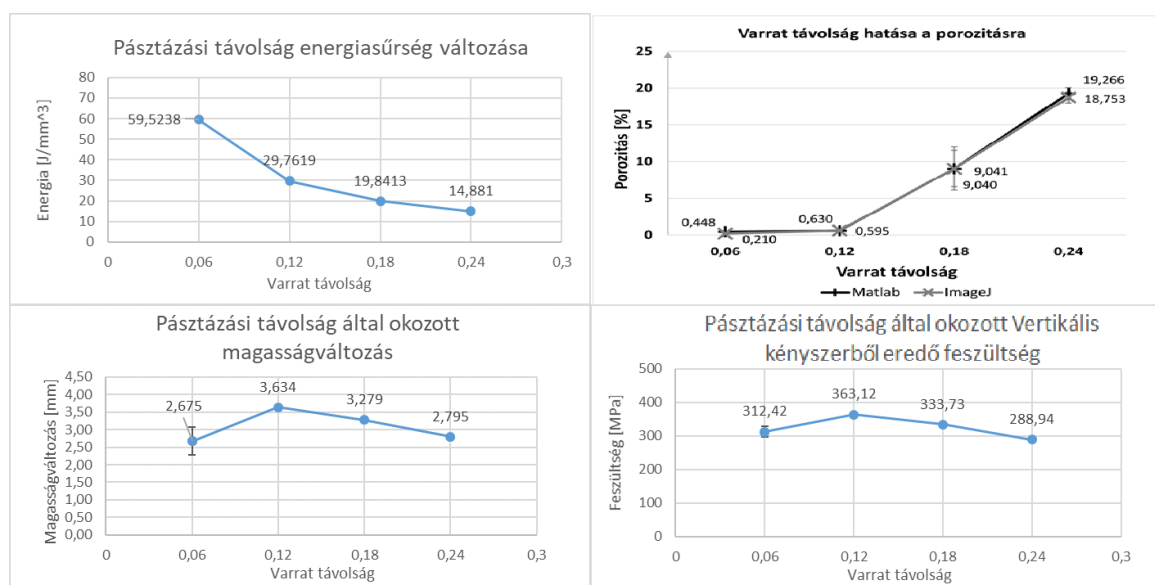
A táblázatban (Táblázat 5-1) látható energiasűrűség [J/mm³] (amit energiának jelöltem) és a próbatestek porozitás vizsgálat eredményeivel értelmezni tudom az előzőekben taglalt tulajdonságokat, mivel mind az energiasűrűség, mind a porozitás nagyban befolyásolja ezeknek az értékét. A használt porozításvizsgálati eredményeket csiszolatok számítógépes képelemzésével végezték el. [13]

Elsőnek a réteg kihagyás eredményeit vizsgáltam meg (Ábra 5.1). Ebben az esetben az volt a feltételezés, hogy mivel az energiasűrűség csökkent, ezért a maradó felhajlás és a vertikális kényszerből adódó feszültség nőni fog. Miután ez nem minden esetben teljesült megvizsgáltam az energiasűrűség és a porozitás alapján is a konzolos tartó felhajlását, és arra a megállapításra jutottam, hogy amíg a porozitás értéke nem változik jelentősen, addig megvalósul az energiasűrűség csökkenés hatására a felhajlás növekedése. Ez annak tudható be, hogy az alsóbb rétegek áthőkezelődése nem tud ugyan olyan szinten végbemenni, mint amikor minden réteg pásztázva van és ez nagyobb maradó feszültségeket okoz a próbatestben. Viszont amikor a porozitás megnő, akkor az veszi át a szerepet, és annak ellenére, hogy továbbra sem tud az anyag relaxálódni a porózus anyagban nem tud akkor a feszültség ébredni. Ez okozza az eredményekben a maximális feszültségek csökkenést.



Ábra 5.1: Rétegkihagyás hatásának értelmezése [13]

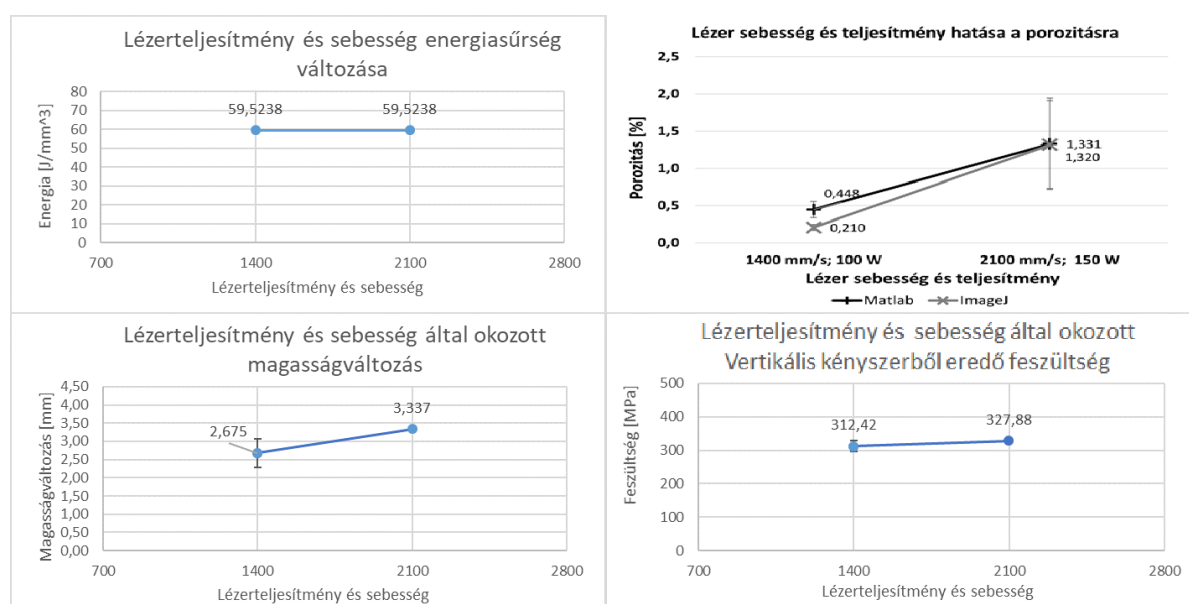
A rétegkihagyáshoz hasonló tendencia figyelhető meg a pásztázási távolságok változtatásánál is (Ábra 5.2). Amíg a porozitás nem változik jelentősen addig az energiasűrűség, ami jobban meghatározza az anyagban fellépő feszültségek változását, azaz itt is az alsóbb rétegek áthőkezelődése csökken. Ez az első 0,12 mm-es változtatásig figyelhető meg. Majd ezután a porozitás növekszik, és átveszi a szerepet a maradó feszültségek alakításában, ezáltal a minimális feszültségértékek csökkenni, kezdenek.



Ábra 5.2: Pásztázási távolságok hatásának értelmezése

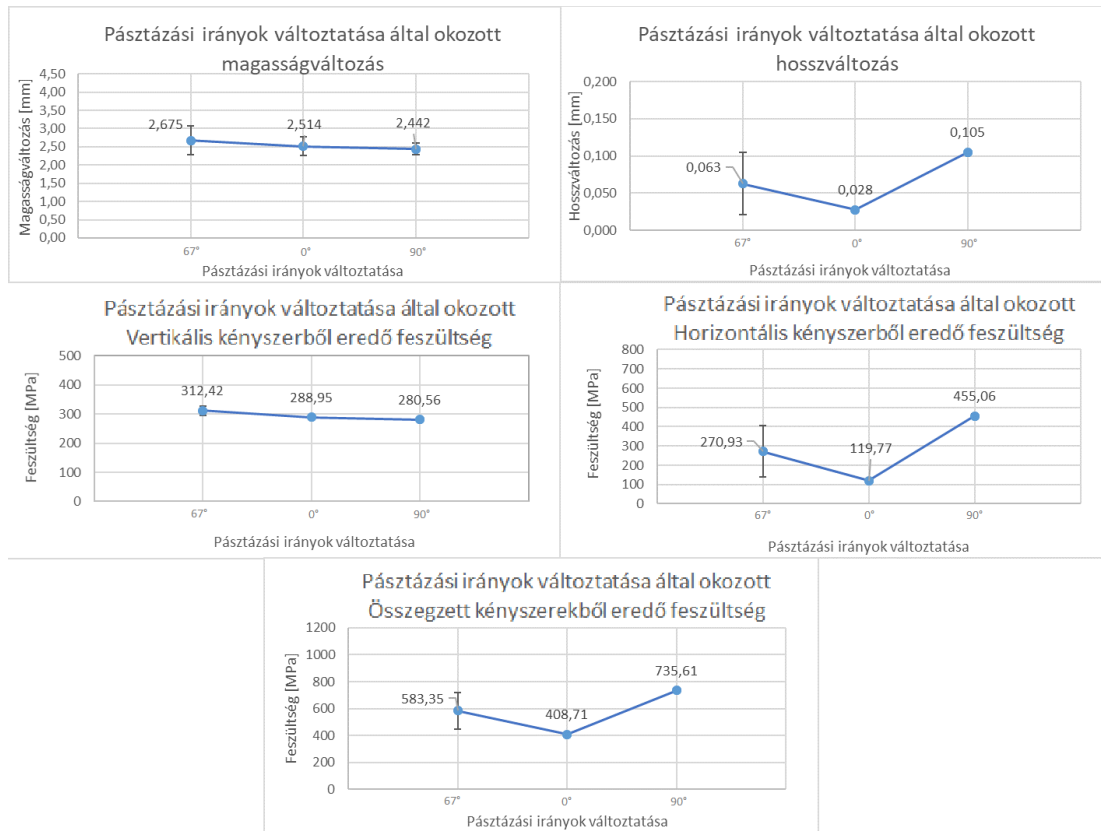


Ahogy azt a mérés bemutatásánál már írtam a pásztázási sebesség és lézerteljesítmény együttes változtatásánál (Ábra 5.3) az a cél, hogy az energiasűrűség azonos értékű legyen, ami korábbi méréseim során jó eredményeket hozott [9]. Ott arra jutottam, hogy ez egy jó alternatíva a folyamat gyorsítására, mivel közel azonos értékeket kaptam az alap paraméterbeállításhoz képest. Ez itt is beigazolódott a vertikális kényszerből eredő feszültségeknél, viszont a magasságváltozás-értékek között nagyobb lett a különbség amit egyrészt mérési hibának, másrészt pedig itt is a rétegek áthőkezelődési hatásának tudtam be. Itt a nagyobb sebesség és teljesítmény miatt a hűlés gyorsabban játszódott le, és emiatt csökkent az alsóbb rétegek áthőkezelődése.



Ábra 5.3: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatásának értelmezése

Végül pedig a pásztázási irány változtatását vizsgáltam meg (Ábra 5.4). Ebben az esetben is a bevitt energiasűrűség változatlan maradt. Itt azt tapasztaltam, hogy a vertikális kényszerből adódó magasságváltozásnál és maximális feszültségben nem történt jelentős változás egyik paraméterbeállításnál sem. Viszont, a horizontális kényszerből adódó hosszváltozásnál és feszültségértéknél jelentősebb változás történt, ami hatásként értelmezhető 0 fokos elforgatásnál a szórást is figyelembe véve. Ez azzal magyarázható, hogy a próbatest pásztázása közel merőleges volt a hossz tengelyére, ezáltal a horizontális kényszerből maradó feszültségek kihőkezelődnek, mivel rövid időn belül párhuzamosan újra végigpásztázza a gép a rétegeket. Ez kedvezőbbnek tűnik a rétegenkénti 67 fokos elforgatáshoz képest, de jelentős anizotrópia feltételezhető ebben az esetben.



Ábra 5.4: Páztázási irányváltatás hatásának értelmezése



6. ÖSSZEFOGLALÁS

Összegzőképpen elmondható, a maradó feszültségeknél is, amit korábbi mérés során már a mechanikai tulajdonságokra megállapítottam, hogy amíg nem változik jelentősen a porozitás, addig a folyamatba becsatolt energiasűrűségnek van jelentősebb hatása az anyag tulajdonságokra. A kisebb energiabevitel feltételezhetően csökkenti az alsóbb, szilárd rétegek áthőkezelődését, ami az anyag relaxációját segítené azaz nagyobb gyártási feszültségek maradnak vissza és ez a maradó feszültség mérése során ki is mutatható. Így a konzolos tartó növekvő felhajlását eredményezi. Korábbi méréseim során arra jutottam, hogy ha a porozitás jelentősen változik, akkor elsősorban az van hatással a mechanikai tulajdonságok változására.

Ezért az egyik feltételezésem, amit meg akartam vizsgálni ez volt, amikor elkezdtem tervezni a kísérletet a másik pedig, hogy az energiasűrűség csökkenés hatására a maradó feszültségek nőni fognak. A mérés során az első feltételezés teljesült is illetve a második is egy darabig, amíg jelentős porozitás nem jelent meg. Ennek a magyarázata az, hogy kisebb becsatolt energia hatására az anyag nem tud olyan mértékben áthőkezelődni és relaxálódni ezért a maradó feszültségek növekszenek benne, viszont amikor megnövekszik a porozitás ennek hatására az anyagban keletkező feszültségek leépülnek.

Ezek a tendenciák jól megfigyelhetők a réteg kihagyás és a pásztázási távolság változtatásánál.

A pásztázási sebesség és lézerteljesítmény változtatásánál, mint már korábban utaltam rá, nem számítottam ekkora különbségre a konzolos próbatestek felhajlása között. Azonban ezt a különbséget is meg lehet magyarázni, mivel annak ellenére, hogy az energia sűrűség a két esetben azonos, a TP11 esetében ez nagyobb teljesítménnyel rövidebb idő alatt játszódik le. Ez nagyobb hősokkot jelent az anyagban, ezáltal a hűlés is gyorsabban játszódik le, így nagyobbak a maradó feszültségek is.

A pásztázási irányváltoztatás eredményei is eltértek az elvárásokhoz képest, viszont ezekre is született egy magyarázat, amivel értelmezni lehet az értékeket. Az alap gyári paraméterbeállításnál, minden réteg között 67° elforgatás történik, melynek célja, hogy ne legyen vagy csak nagyszámú réteg után párhuzamosan pásztázott réteg, ezzel csökkentve az anizotrópiát. Ezzel szemben TPX esetében ez 0° elforgatással zajlik a pásztázás az egymást követő rétegek között TPXY esetében pedig 90° -os forgatással. Így a maradó feszültség



csökkenése ebben az esetben az alsóbb rétegek jobb áthőkezelődésével, és ezáltal azok relaxációjával magyarázható, mivel a TPX és TPXY esetében az egymást követő rétegek párhuzamos pásztázása lényegesen gyakrabban előfordul az alap gyári paraméterbeállításhoz képest.

Tehát ezeket a következtetéseket tudtam levonni a méréseim alapján azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a méréseknek egyes helyeken jelentős hibája volt, illetve, néhány beállításra csak egy-egy mérés született.

Ezek alapján, a folyamat gyorsítása érdekében lehet keresni további beállításokat az alap paraméterbeállítással azonos energiasűrűséggel. Illetve érdemes lehet megnézni a TPX (0 fokos) beállítás által okozott anizotrópia mértékét megfelelő vizsgálatokkal.



7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dokumentumban bemutatott új ismeret- és tudásanyag, a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 számú "Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium" projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási és Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Laboratóriumok pályázati program finanszírozásában valósult meg. Ami miatt köszönettel tartozom részükre.

Továbbá köszönetemet szeretném kifejezni, Dr. Bán Krisztiánnak, a rengeteg segítségért, támogatásért és biztatásért, amit a dolgozat elkészítése során adott. Továbbá köszönetet szeretnék még mondani Dr. Hlinka Józsefnek, Varga Ferencnek, Szabados Gergelynek a mérésekben való segítségükért. Valamint külön köszönet Vrábel Imrének és Kovács Péternek, hogy az általuk kidolgozott módszer segítségével is megvizsgálhattam a paraméterváltoztatást.



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] Lai-Chang-Zang és Hooyar Attar, *Advanced Engineering Materials*, 2016.
- [5] T. E. Özçelik, „Experimental Residual Stress Mapping of Additive Manufactured Ti6Al4V alloys,” 2023.
- [6] 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.
- [7] P. B. Péter, „Eltérő gyártási paraméterek hatása additív gyártással készített Ti-6Al-4V próbatestek mechanikai tulajdonságaira és a maradó feszültségre,” 2023.
- [8] A. Haider, G. Hassan és M. Kamran, „Processing Parameter Effects on Residual Stress,” 2018.
- [9] Ö. Sinan és S. Nurşen, „Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: effects of,” 2022.
- [10] J. Gordon , „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained,” *All3DP*, 2021.
- [11] k. „Wide-Area 3D Measurement System Head VR-5200,” keyence, [Online]. Available: <https://www.keyence.eu/products/microscope/macroscope/vr-3000/models/vr-5200/>.
- [12] I. Vráber , „Maradó feszültség vizsgálata additívan gyártott Ti6AL4V,” 2023.
- [13] G. Böhm, „Szakdolgozat,” 2021.
- [14] „EOS,” [Online]. Available: <https://www.eos.info/en>.



ÁBRAJEGYZÉK

Ábra 1.1: SLM technológia elvi vázlata és részei [1]	8
Ábra 1.2: Sematikus ábra az SLM technológia paramétereiről [4]	9
Ábra 1.3: Különböző pásztázási minták összehasonlítása [4]	10
Ábra 1.4: Anyagállapotot és hőmérséklet-változást mutatja be a test egyrétegének gyártása közben [5]	11
Ábra 1.5 Maradó feszültség mérési technikák [6]	12
Ábra 1.6 A vizsgált konzolos tartó levágás után (saját kép)	13
Ábra 1.7: A vizsgált konzolos tartó levágás előtt (saját kép)	13
Ábra 1.8: von Mises feszültséget három jellemző esetben az építési platformról való levágás előtt és után. [5]	14
Ábra 1.9: Szimulációs előre jelzés [5]	14
Ábra 1.10: A paraméter változtatások hatása a mechanikai tulajdonságokra [9]	17
Ábra 2.1: Alkalmazott berendezés EOS M 100 DMLS [14]	20
Ábra 2.2: Berendezés fontos tulajdonságai a dolgozat szempontjából [14]	20
Ábra 2.3 Keyence VR 5200 Mikroszkóp a BME laboratóriumában. (Saját kép)	21
Ábra 2.4: Mechanikai modell [12]	22
Ábra 2.5: Mechanikai modell szemléltetése [12]	22
Ábra 2.6: Befogási keresztmetszet feszültségeloszlása [12]	23
Ábra 2.7: M247-3 platform TPX paraméterbeállítással gyártott próbatestre illesztett görbületi sugár	23
Ábra 2.8: TPX paraméterbeállítás esetén a vertikális kényszerből származó feszültségeloszlás a befogási keresztmetszetben	25
Ábra 2.9: TPX paraméterbeállítás esetén a horizontális kényszerből származó feszültségeloszlása	26
Ábra 2.10: Vertikális és horizontális kényszerekből (szupport) adódó feszültségkomponensek összegzése	27
Ábra 2.11: TPX paraméterbeállítás esetén a két feszültség komponens összegzése	27
Ábra 4.1: A paraméter változtatások hatása a vertikális kényszerből eredő feszültségekre	31
Ábra 4.2: A paraméter változtatások hatása az összegzett kényszerből eredő feszültségekre.	32
Ábra 4.3: A paraméter változtatások hatása a horizontális kényszerből eredő feszültségekre	32



Ábra 4.4: Réteghagyás által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben	33
Ábra 4.5: Pásztázási távolság által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben	34
Ábra 4.6: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben	35
Ábra 4.7: Pásztázási irányok változtatása által okozott magasság- és hosszváltozások, ill maximális feszültségek a befogási keresztmetszetben	36
Ábra 5.1: Réteghagyás hatásának értelmezése [13]	42
Ábra 5.2: Pásztázási távolságok hatásának értelmezése	42
Ábra 5.3: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatásának értelmezése	43
Ábra 5.4: Pásztázási irányváltoztatás hatásának értelmezése	44
Ábra 0.1: Paraméter változtatások szakítódiagramjainak összehasonlítása	52



TÁBLÁZAT

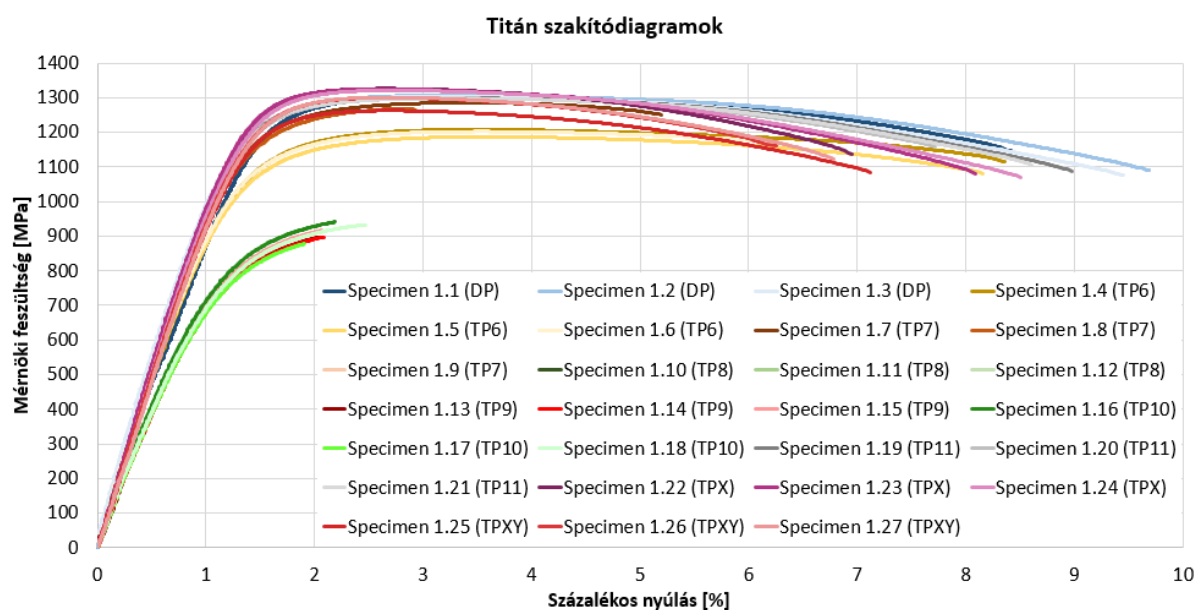
Táblázat 2-1: Vertikális kényszerből eredő feszültségértékek a súlyponti tengelytől számítva TPX paraméterbeállítás esetén	24
Táblázat 2-2: Összegzett feszültség értékek TPX paraméterbeállítás esetén befogási keresztmetszetben.....	28
Táblázat 2-3 Konzol minták gyártási paraméterei	28
Táblázat 4-1: Réteg kihagyás hatása a gyártási időkre	38
Táblázat 4-2: Pásztázási távolság hatása a gyártási időkre	39
Táblázat 4-3: Lézerteljesítmény és pásztázási sebesség hatása a gyártási időkre.....	40
Táblázat 5-1: Gyártási paraméterek az energiasűrűséggel kiegészítve	41
Táblázat 0-1: Mérési adatok összefoglaló táblázata.....	52



MELLÉKLET

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



Ábra 0.1: Paraméter változtatások szakítódigramjainak összehasonlítása