

GYÁRTÁSI PARAMÉTEREK VÁLTOZTATÁSÁNAK HATÁSA ADDITÍVAN GYÁRTOTT TITÁN ALKATRÉSZEK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA

THE EFFECT OF CHANGING MANUFACTURING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM COMPONENTS

Hlinka József^{ORCID:0000-0001-8737-6913 1*}, Péri Bence^{ORCID:0009-0009-8607-1849 1},

Fendrik Ármin^{ORCID:0000-0001-6510-444X 2}, Bán Krisztián^{ORCID: 0000-0001-9262-1784 1}

¹ Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország

² MouldTech Systems Kft., Zalaegerszeg, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2023.1.ENG.005>

Kulcsszavak:

additív gyártás
Ti-6Al-4V
DMLS
gyártási paraméter

Keywords:

Additive Manufacturing
Ti-6Al-4V
DMLS
manufacturing parameter

Cikktörténet:

Beérkezett 2021. szeptember 27
Átdolgozva 2021. november 10
Elfogadva 2021. november 20

Összefoglalás

Az additív gyártási technológiák napjaink feltörekvő alkatrész-előállító módszerei. A fém alapanyagok esetében adottak a technológia sajátosságai, azonban az anyagféleségek és a különböző eljárások miatt teljes mértékben nem ismert minden lehetőség. Vizsgálatainkban fémek közvetlen lézeres szinterelési (DMLS) technológiájával, Ti-6Al-4V alapanyagból gyártott próbatesteken, különböző gyártási paraméterek változtatásának, mechanikai tulajdonságokra való hatásait elemeztük.

Abstract

Additive manufacturing technologies are today's most upcoming methods for manufacturing components. For metallic materials, the specific features of the technology are given, but not all the possibilities are fully known due to the different material properties and process parameters. In this article we analysed the effects on mechanical properties of different manufacturing process parameters on specimens made of Ti-6Al-4V using direct metal laser sintering (DMLS).

1 Bevezetés

Az additív gyártás a jelenkori gyártástechnológiák között a legnagyobb fejlődést és növekedést megvalósító módszer. A modern gyártástechnológia kulcsfontosságú eleme lett az ipar és a kutatóközpontok számára [1]. Az additív gyártási folyamat egyik előnye, hogy bonyolult geometriával rendelkező alkatrészek állíthatók elő rövid idő alatt, kevesebb hulladékot termelve a hagyományos technológiákhoz képest. Ez a tulajdonság a fenntarthatóság irányába mutat [2]. A fémek közvetlen lézeres szinterelési (DMLS) technológiájánál vagy más néven szelektív lézeres olvasztásánál

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 1 463 1943
E-mail cím: hlinka.jozsef@kjk.bme.hu

(SLM), 20 μm és 60 μm közötti vastagságú vékony fémpor rétegeket terítenek egy fém alaplemezre, majd a számítógéppel megtervezett és felszeletelt gyártandó termékmodell megfelelő részein lézersugár pásztáz végig, és a fémpor szemcséit összeolvasztja. A rétegenkénti építés addig folytatódik, amíg a számítógép segítségével tervezett (CAD) modellnek megfelelő alkatrész elkészül. A DMLS és SLM gyártási módszer kedvez a Ti-6Al-4V alapanyagból gyártott alkatrész tulajdonságainak [3]. Rehme és Emmelmann 130 paramétert határozott meg, amely a gyártási folyamatot befolyásolja, melyek közül 13 jelentős befolyással van a gyártott alkatrész tulajdonságaira [4]. A nagy befolyással bíró gyártási paraméterek a lézersugár foltátmérője, a lézersugár teljesítménye, a szkennelési sebesség (scan speed), a szomszédos pásztázási vonalak középvezetési távolsága (hatch distance), a szkennelési stratégia (scan strategy, hatching mode), a rétegvastagság és az oxigén koncentráció a gyártási folyamat során [5]. Elsayed és szerzőtársai befolyásoló tényezőként említették a fémpor szemcsék méretét és morfológiáját, valamint a lézersugárzás által bevitt hőmennyiséget [6]. Costa és társai hat gyártási paraméter (lézersugár teljesítmény, szkennelési sebesség, pásztázási vonalak távolsága, építési irány, szkennelési stratégia, rétegvastagság) hatását vizsgálták SLM technológiával gyártott Ti-6Al-4V alkatrészek tömörségére [7]. A szakirodalom vizsgálata után megállapítható, hogy fontos megvizsgálni azt, hogy az igényeket, milyen gyártási paraméterekkel lehet legjobban teljesíteni.

Ugyanazt az alkatrészt különböző gyártási paraméterekkel elkészítve különbözhet a kész alkatrész sűrűsége, mechanikai tulajdonságai, gyártási ideje és költsége, a gyártási folyamat termelékenységére. A lézersugár működési módját és működési idejét változtató beállítások segítségével olyan gyártási paramétereket határoztunk meg, amelyekkel nem teljes mértékben tömör alkatrészek hozhatók létre, hanem kismértékű szándékos belső anyaghiányossággal rendelkezők, azonban rövidebb idő alatt elkészülhetnek. Így a legnagyobb költségelemet jelentő gyártási idő csökkenthető, ezzel az alkatrész teljes gyártási költsége is mérsékelhető.

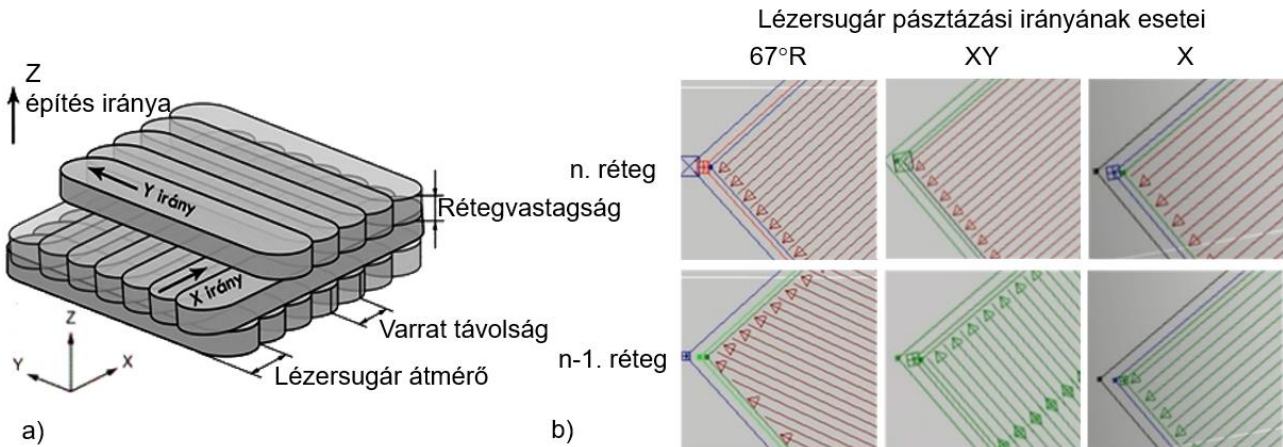
Jelen vizsgálatainkban a pásztázási stratégiának (hatching mode), a szomszédos pásztázási vonalak középvezetési távolságának, a kihagyott réteg számának (skip layer), a lézersugár teljesítménynek, valamint a szkennelési sebességnek a hatását vizsgáltuk az alkatrész mechanikai tulajdonságaira.

2 Kísérleti vizsgálati módszerek

A próbatestek EOS M100 típusú DMLS additív gyártóberendezéssel készültek, teljesen új állapotú EOS Ti64 porból. A különböző gyártási paraméterekkel készített próbatesteknél alkalmazott technológiai módosításokat az 1. táblázat mutatja. A pásztázási vonalak távolsága elnevezés alatt a lézersugár pályájának oldalirányú lépés távolságát értjük. A rétegről rétegre történő építés során, egy réteg elkészítése, a por terítéséből és az aktuális keresztmetszeten a lézersugár végigpásztázásából áll. A lézersugár a pásztázás során nem csak a legutoljára elterített port olvasztja meg, hanem az az alatti rétegeket is. A kihagyott réteg érték jelentése, hogy az építés során a lézeres pásztázás megtörténik-e minden porterítés után vagy csak minden második vagy harmadik terített réteg után. Ezzel a módszerrel a réteg összeolvasztásához szükséges idő csökkenthető úgy, hogy a rétegek közötti folytonosság nem szűnik meg. További vizsgált paraméterek az elemi varrat előállításához használt lézersugár teljesítmény és mozgatási sebesség. A gyári beállításhoz képest növeltük a lézersugár teljesítményét és mozgatási sebességét is. Ez a két változtatás együttesen abba az irányba módosította a gyártási folyamatot, hogy nagyobb sebességgel előállíthatóvá válnak azok az elemi varratok, amiből több ezret vagy tízezret kell megvalósítanunk egy adott réteg vagy alkatrész esetében.

A gyártások során különböző lézersugár vonalvezetések hatását is vizsgáltuk. Gyári beállítás szerint 67° -ként forogtatja a gyártó berendezés az egyes rétegek pásztázási irányát. Az 1. b) ábrán látható vonalvezetéseknel az X jelű esetben a pásztázási irány forogtatását kikapcsoltuk, az XY jelű esetben a pásztázási irány 90° -os elforgatását alkalmaztuk. Az 1. b) ábra bemutatja különböző pásztázási stratégiák esetében a lézersugár útját egymást követő rétegek esetében. Az 1. a) ábra a jellemző rétegepítési paramétereket mutatja be a pásztázási irány 90° -os elforgatása esetében.

A próbatestek gyártása során az alkalmazott építési rétegvastagság 20 μm volt. A gyártás után, a mechanikai vizsgálatok előtt, a próbatestekről üvegszemcsés szórással távolítottuk el a gyártás során a felülethez tapadt alapanyag szemcséket.



1. ábra a) Rétegepítési példa a pásztázási irány 90°-os elforgatása esetében [8], b) Lézersugár pásztázási irányai a gyártás során az n. és n-1. réteg esetében

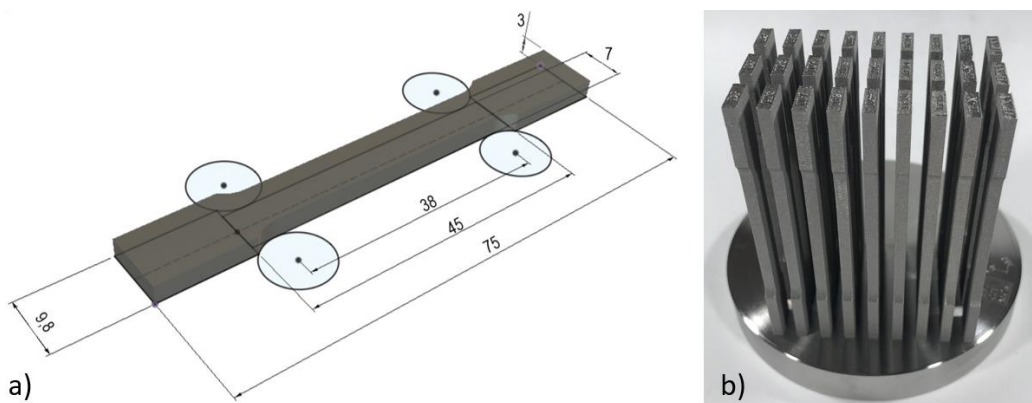
1. táblázat A vizsgált technológiai módosítások összefoglalása

Változtatott paraméter	Beállítások jelölése és a változtatott értékek								
	DP (gyári)	TP6	TP7	TP8	TP9	TP10	TP11	TP12	TP13
pásztázási vonalak távolsága [mm]	0,06	0,12	0,06	0,06	0,18	0,24	0,06	0,06	0,06
kihagyott réteg [-]	0	0	1	2	0	0	0	0	0
lézersugár teljesítmény [W]	100	100	100	100	100	100	150	100	100
felt mozgatási sebesség [mm/s]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	2100	1400	1400
lézersugár pásztázási irány [-]	67°	67°	67°	67°	67°	67°	67°	X	XY

2.1 Szakítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatok célja, hogy a gyártási folyamat változtatásainak hatását meghatározzuk a statikus mechanikai tulajdonságokra. A próbatestek geometriai méreteit és nyomtatási helyzetét a platformon a 2. ábra mutatja. A szakítási irány megegyezik a Z építési iránnyal. Minden próbatesttípusból 3 darabon végeztünk mérést.

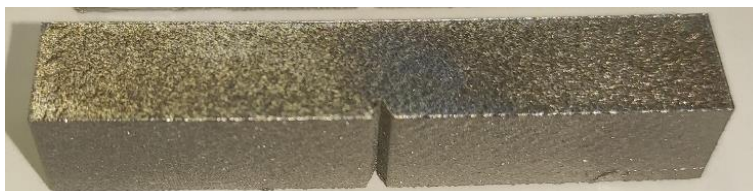
A szakítóvizsgálatot Zwick Z250 szakítógéppel végeztük az EN 10002 szabványnak megfelelően. A szakítási sebesség 2 mm/min, a befogási távolság 47 mm volt. A nyúlásmérést Mercury Monet DIC optikai nyúlásmérő rendszerrel végeztük 26 mm kezdeti jeltávolsággal. A kezdeti jeltávolságot két fekete pont jelzi a próbatesteken.



2. ábra A szakító próbatestek a) geometriai mérete, b) nyomtatási helyzete a platformon

2.2 Ütőmunka-vizsgálat

A különböző paraméterekkel legyártott próbatesteken Charpy-féle ütőmunka-vizsgálat szerinti ütőmunkát határoztunk meg (MSZ EN ISO 14556:2001, MSZ EN ISO 148-1:2017, MSZ EN ISO 148-2:2017, MSZ EN ISO 148-3:2017) az alkatrész eltörésekor elnyelt energia meghatározásához. A vizsgálatokhoz alkalmazott 10x10 mm keresztmetszetű V bemetszésű ütőmunka próbatestet a 3. ábra mutatja. Az ütőmunka-vizsgálathoz alkalmazott kalapács tömege 15 kg.



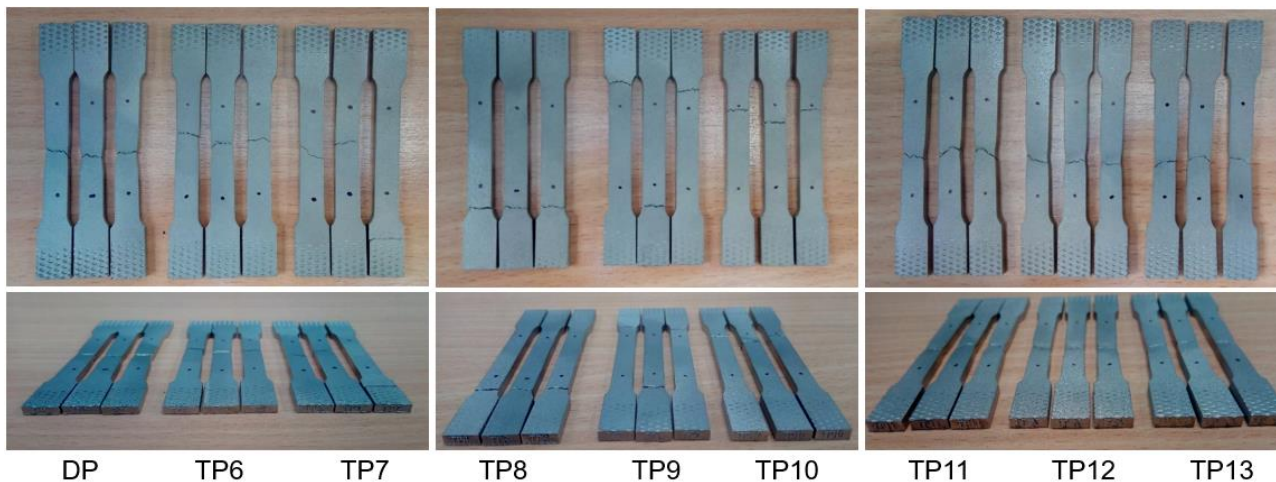
3. ábra Vizsgálatokhoz alkalmazott additívan gyártott ütőmunka próbatest (DP)

3 A vizsgálatok eredményei

3.1 Szakítóvizsgálat eredmények

A 4. ábrán a próbatestek láthatóak a szakítóvizsgálat után. A 5. ábrán látható minden paraméterbeállítás mérnöki feszültség-százalékos nyúlás diagramjára egy-egy jellemző példa. Az ábrán egyedül a TP8-as minta görbéjét nem lehet beazonosítani, mivel a ridegtörés miatt nem látható kontrakciós szakasz, szinte a rugalmas tartományban szakadt el a minta, így a többi próbatest szakítógörbéjéhez igazodik.

A szakítóvizsgálat görbéit kiértékelve meghatároztuk a rugalmassági (Young-) modulust (E), az egyezményes folyáshatárt ($R_{p0,2}$), a szakítószilárdságot (R_m) és a százalékos, fajlagos szakadási nyúlást (A). Az eredmények átlaga és szórása minden egyes paraméterbeállításra az 6. ábrán láthatók.

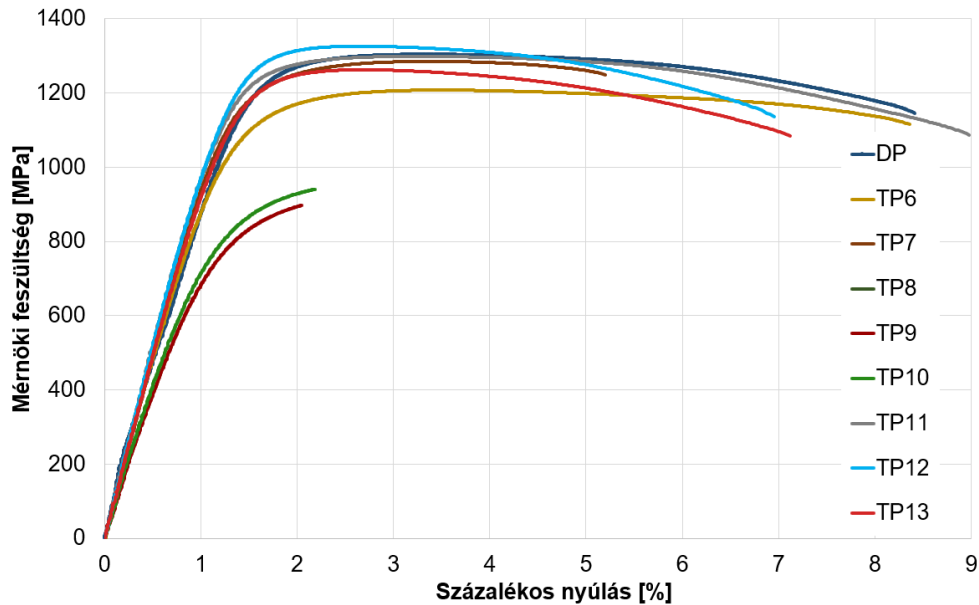


4. ábra A próbatestekről készült fotók a szakítóvizsgálat után

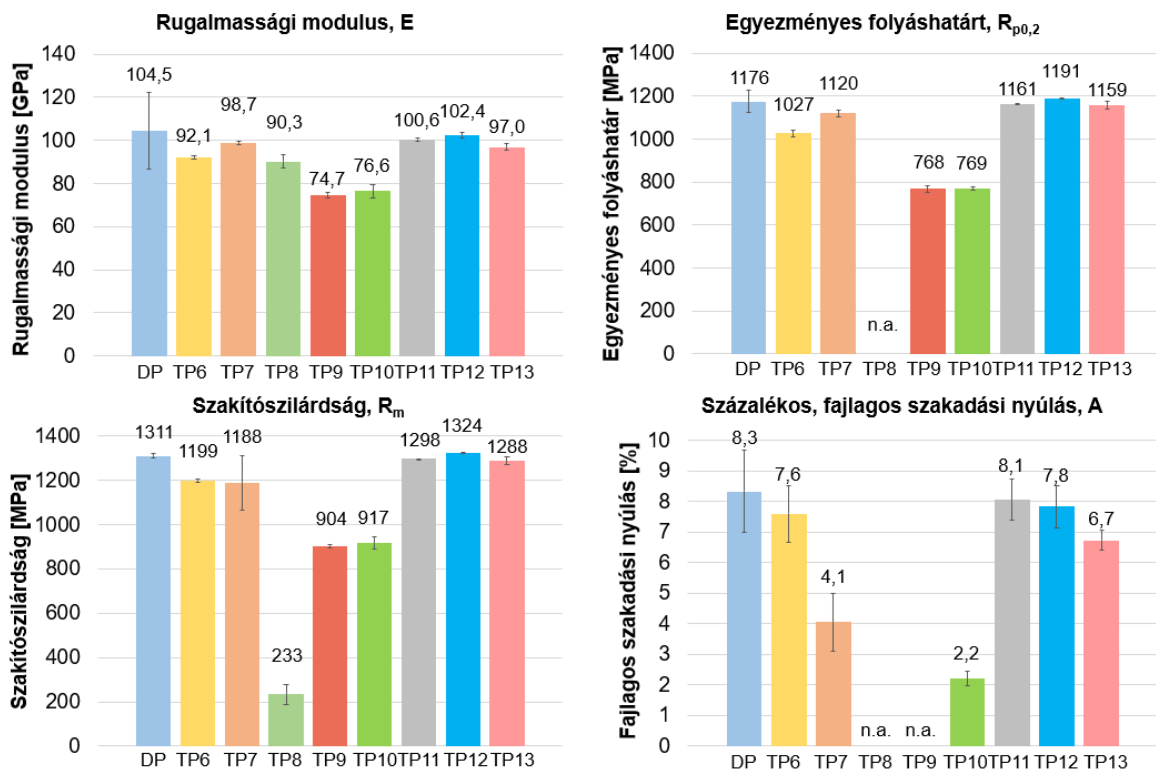
A gyári beállításokkal gyártott esethez (DP) a gyártó által megadott adatok is rendelkezésünkre állnak. A referencia adatokat EOSINT M270-es berendezéssel gyártott, 5 mm átmérőjű, 25 mm eredeti jeltávolságú, hengeres próbatest esetére határozták meg. A szakítóvizsgálat iránya párhuzamos volt az építés Z irányával, a minták hőkezeletlen állapotúak voltak (2. táblázat). Gyári paraméterek alkalmazása esetében az általunk gyártott próbatestek rugalmassági modulus és a szakadási nyúlás értékei megegyeznek a referenciaértékekkel. A szilárdsági értékek esetében kismértékben nagyobb értékeket mértünk. Ennek feltehető oka az eltérő gyártóberendezésben és eltérő geometriájú mintákban keresendő.

2. táblázat Hőkezeletlen Ti-6Al-4V minták mechanikai tulajdonságai a Z építési iránnyal párhuzamosan (gyártó által megadott adatok) [9]

Rugalmassági modulus (E)	110 ± 15 GPa
Egyezményes folyáshatár ($R_{p0,2}$)	1120 ± 80 MPa
Szakítószilárdság (R_m)	1240 ± 50 MPa
Százalékos szakadási nyúlás (A)	10 ± 3 %



5. ábra Az egyes paraméterbeállításokat jól jellemző, kiválasztott mérnöki feszültség-százalékos nyúlás diagramok

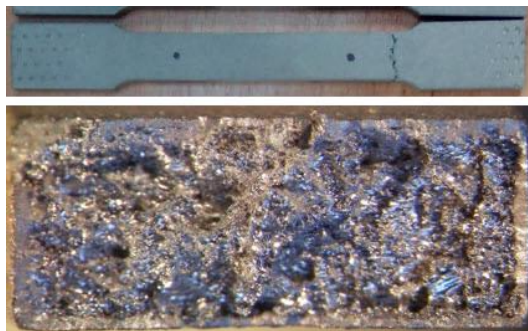


6. ábra A rugalmassági modulus (E), az egyezményes folyáshatárt ($R_{p0,2}$), a szakítószilárdság (R_m) és a százalékos, fajlagos szakadási nyúlás (A) átlagértékei és szórásai az egyes paraméterbeállításoknál

A 4. ábrán látható, hogy a TP8 és TP9 minták minden próbatestje esetében a szakadás az eredeti jeltávolságon kívül esett (nyakban szakadt a próbatest), ezért a szakadási nyúlás értékeit (A) nem lehetett meghatározni. A TP8 minta esetében az $R_{p0,2}$ sem volt kiértékelhető, a minták ridegen törése miatt. Összefoglalóan elmondható, hogy a TP8, TP9 és TP10 beállítások okoztak jelentős elridegedést. Ezeknél a mintáknál nem volt kontrakció sem, a TP8 és TP9 minták nyakban szakadtak. Jelentős volt a ridegedés a TP7 minta esetén is. Az egyes beállítások hatásának elemzéséhez az azonos típusú paramétermódosítások hatását szükséges összehasonlítani.

3.1.1 Kihagyott réteg paraméter hatása

A kihagyott réteg paraméter hatásának vizsgálatához a DP, TP7 és TP8 próbatestek eredményeit szükséges összevetni. Egy réteg kihagyása már jelentős ridegedést okozott (jelentősen csökkent a A értéke), de még látható a mérnöki feszültség-százalékos nyúlás diagramban a kontrakciós tartomány. Ekkor még az E és a $R_{p0,2}$ is a szórásérték közelében változott, míg a R_m csökkent (ennek szórása megnőtt). Egy kihagyott réteg esetében, két réteget szükséges a lézersugárral átolvastani, így kevesebb energia jut az alsóbb rétegek megeresztődésére, illetve több rétegösszeolvadási hiba lehet a szerkezetben. A TP8 minta esetében egyértelműbb a rétegösszeolvadási hiba hatása. A próbatest egy rövid, rugalmas jellegű szakasz után elszakadt. A próbatestek nyakban szakadtak, de a 7. ábra keresztmetszeti képén jól látható, hogy szinte kontrakció nélküli rideg törésről van szó.



7. ábra TP8, kihagyott rétegek száma = 2 beállítással gyártott próbatest szakítóvizsgálat után

3.1.2 Pásztázási vonalak távolsága paraméter hatása

A pásztázási vonalak távolságának növelésével az átolvastott sávok távolsága növekszik, azaz az átfedés közöttük csökken. Ez egyre kisebb mértékű megeresztődést és több összeolvadási hibát eredményezhet. Az egyre növekvő pásztázási távolságok összehasonlítása a DP, TP6, TP9 és TP10 próbatestek szakítóvizsgálati eredményeinek vizsgálatából látható (6. ábra). A TP6-os minta esetében a szilárdsági értékek kismértékű csökkenése és kismértékű ridegedés (szakadási nyúlás csökkenése) volt tapasztalható. Feltehetően a kisebb megeresztődés és a több összeolvadási hiba együtt okozhatja a jelenséget. Jelentősebb változások, mint pl. az egyezményes folyáshatár csökkenése a TP9 és a TP10 esetében volt mérhető. A két minta szinte kontrakció nélkül szakadt, a szakadási nyúlásuk kicsi volt. A TP9 jelű minták esetében minden próbatest nyakban szakadt, azaz a szakadási nyúlás nem volt kiértékelhető, azonban a többi mért mutatószámból következtetve hasonló érték következtethető ki, mint a TP10 esetében. A pásztázási vonalak távolságának a gyári érték háromszoros vagy négyszeres mértékre emelése esetében feltehetően összeolvadási hibák is szerepet játszanak az eredményekben.

3.1.3 Lézersugár teljesítmény és folt mozgási sebesség paraméterek hatása

A pásztázási sebesség növelése a meglévő anyagrészek újrakezelődésének (megeresztődésének) mértékét csökkenti, míg az összeolvadási hibák mennyiségét növelheti. A lézersugár teljesítmény növelése a megeresztődés mértékét növeli, az összeolvadási hibák számát csökkentheti. A bevitt vonali energiamentesség a DP és a TP11 gyártási paraméterei esetében is megegyezett, 0,0714 J/mm volt, azonos foltátmérő mellett. Feltehetően ennek köszönhető, hogy a DP és a TP11 minták mechanikai tulajdonságai között nem volt lényeges eltérés.

3.1.4 Pásztázási stratégia paraméter hatása

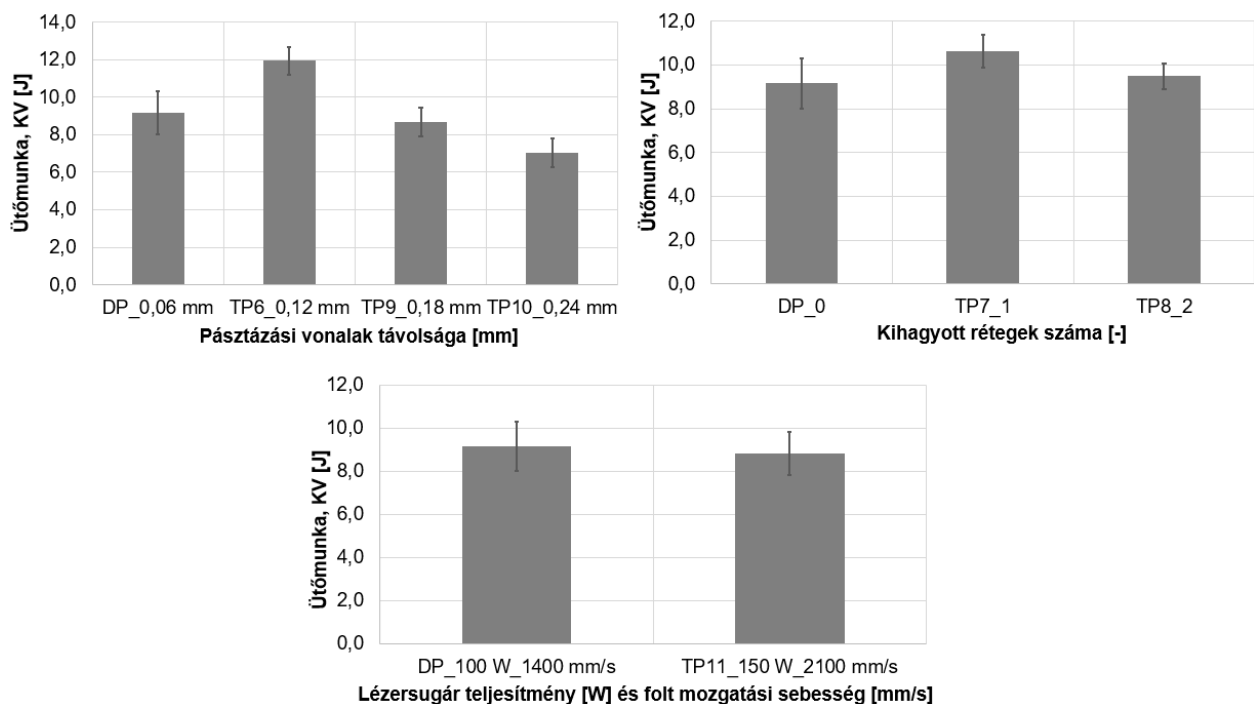
A pásztázási stratégia a rétegek közötti pásztázási irány változását adja meg. Ez befolyásolhatja az összeolvadási hibák számát, az áthőkezelődés mértékét és a minták anizotrópiáját is. A három vizsgált pásztázási stratégiát a DP, TP12 és TP13 próbatesteken alkalmaztuk. A pásztázási irányok változtatása kisebb eltéréseket okozott a mechanikai tulajdonságokban. Jelentősebb eltérés a szakítószilárdságban és a szakadási nyúlásban volt tapasztalható, de az utóbbi is csak az egyszeres szórásmezőhöz közeli értékkel módosult. A próbatestek szakításának iránya minden esetben megegyezett az építési iránnyal, ez okozhatja a kismértékű eltéréseket. Nagyobb eltérést a mechanikai tulajdonságokban feltehetően az építési irányra merőlegesen lehetne kimérni.

3.2 Ütőmunka vizsgálatok eredményei

Különböző pásztázási vonaltávolság értékekkel gyártott alkatrészek esetén mért ütőmunka (KV) értékeket mutat a 8. ábra. A gyári pásztázási vonaltávolságot növelve látható, hogy az alkatrész ütőmunkája növekszik. A gyári értékhez képest (0,06 mm) az ütőmunka átlaga 0,12 mm pásztázási vonaltávolság értéknél ~30% növekedést mutat. A 0,12 mm távolság feletti pásztázási vonalak távolságának további növelésével az ütőmunka értéke csökken.

A vizsgált próbatestek átlagai, a gyári adatokhoz képest, 1 réteg kihagyása esetén nagyobb ütőmunkát eredményeznek ~16%-kal. Várhatóan az alkatrész porozitásra és egyéb tulajdonságokra is hatással van a változtatott beállítás. Az egy lépésben összeolvasztandó pormennyiséget tovább növelve a gyári értékhez közeli, a mérés szórásstartományán belüli ütőmunkaérték adódott.

A lézersugár teljesítményének és a folt mozgatási sebességének változtatása a DP paraméterekről a TP11 próbatestek gyártási paramétereire, kismértékű szórásstartományon belüli csökkenést eredményezett a próbatestek ütőmunka értékeinek átlagában.



8. ábra Ti-6Al-4V próbatestek ütőmunka átlagértékei és szórásai az egyes gyártási paraméterek esetében

4 Összefoglalás

Az egyes gyártási paraméterek változtatásánál figyelembe kell venni, hogy a változtatás hatása többféle mechanizmuson keresztül is megnyilvánulhat. Ezek közül a legfontosabbak:

- A szerkezet áthőkezelődése: Ez a Ti-6Al-4V ötvözet esetében megeresztődést jelenthet, hiszen a gyorsan hűtött szerkezet, amely az átolvasztás során keletkezett fémolvadék gyors hűlése

miatt alakul ki, elsősorban martenzites szövetszerkezetű. A megeresztődés így általában a szívósság növekedését, pl. a szakadási nyúlás növekedését jelenti.

- Az összeolvadási hibák mennyiségének változása: Az összeolvadási hibák számának növekedése ridegedést okoz.

- Az anizotrópia mértékének növekedése: Ez a tulajdonság eltérő irányban gyártott próbatestek mérésével mutatható ki.

Jelen esetben a legkisebb eltérést a lézersugár teljesítmény és a pásztázási sebesség változtatása okozták. Ez nem meglepő, hiszen a módosítással a vonali energiabevitel a két esetben (DP és TP11) nem változott. A pásztázási mód sem mutatott jelentős változást, feltehetően annak köszönhető, hogy a próbatestek szakítási iránya minden esetben megegyezett az építési iránnyal.

Jelentősebb eltéréseket okozott a különböző pásztázási vonalak távolsága és a réteghagyás módosítása. Mindegyik esetben úgy változtak a paraméterek, hogy a megeresztődés mértékét csökkentették, aminek köszönhetően kismértékben elridegedtek a próbatestek. A nagy paramétermódosítások feltehetően növelték az összeolvadási hibák számát is, amely hatására jelentősebb elridegedés lépett fel. Feltehető, hogy az összeolvadási hibák okozták a mért értékek nagyobb eltéréseit.

Az ütőmunka vizsgálat eredményeire alapozva, egy rétegolvasztás kihagyása esetében nőtt az ütőmunka, majd két kihagyott réteg esetében csökkent. Ebből következtethető, hogy az alkatrész szívóssága tekintetében az optimális porterítési vastagság a gyári értéknél nagyobb. Különböző pásztázási vonalak távolságának növelése is hasonló eredményeket mutatott. A megolvasztott sávok átlapolódásának optimuma a gyári beállításoktól nagyobb pásztázási sávtávolságra tehető.

Jelen kutatásban csak statikus szempontból vizsgáltuk az alkatrészeket. Kifáradási szempontból is nagy jelentősége lehet az egyes gyártási paraméterek változtatásának.

Köszönetnyilvánítás

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozta. Projekt címe: „Innovatív és újszerű megoldásokra épülő többcélú merevszárnyú drón és a fejlesztéséhez szükséges kompetenciák létrehozása”. A pályázat azonosítószáma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. A szerzők ezúton is köszönik a pénzügyi támogatást.

Irodalomjegyzék

- [1] Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; Martina, F.: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, CIRP Annals, Vol. 65, Issue 2, 2016, pp. 737-760, ISSN 0007-8506, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [2] Mehrshad, M.; Alireza, V.; Amir D.; Behzad, F.: Chapter 2 - The benefits of additive manufacturing for sustainable design and production, In Sustainable Manufacturing, Elsevier, 2021, pp. 29-59, ISBN 9780128181157, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818115-7.00009-2>.
- [3] Li, Z.; Kucukkoc, I.; Zhang, D.; Liu, F.: Optimising the process parameters of selective laser melting for the fabrication of Ti6Al4V alloy, Rapid Prototyping Journal, Vol. 24 No. 1, 2018, pp. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0045>
- [4] Rehme, O.; Emmelmann, C.: Reproducibility for properties of selective laser melting products, Lasers in manufacturing; LIM 2005, AT-Verlag, 2005, pp. 227-232, ISBN 3000164022.
- [5] Ferrar, B.; Mullen, L.; Jones, E.; Stamp, R.; Sutcliffe, C. J.: Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance, Journal of Materials Processing Technology, Vol 212, Issue 2, 2012, pp. 355-364. ISSN 0924-0136, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.020>.
- [6] Elsayed, M.; Ghazy, M.; Youssef, Y.; Essa, K.: Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants, Rapid Prototyping Journal, Vol. 25 No. 3, 2019, pp. 433-447, DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2018-0112>
- [7] Costa, A.; Buffa, G.; Palmeri, D.; Pollara, G.; Fratini, L.: Hybrid prediction-optimization approaches for maximizing parts density in SLM of Ti6Al4V titanium alloy, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol 33, 2022, pp. 1967–1989, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01938-9>
- [8] Launhardt, M.; Drummer, D.: Determination of the fundamental dimension development in building direction for laser-sintered parts, Journal of Polymer Engineering, Vol. 39 No. 2, 2019, pp. 197-206, DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2018-0204>
- [9] EOS Titanium Ti64 Material data sheet https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/titan/ti64/eos_ti64_9011-0014_9011-0039_m290_mds_06-22_en.pdf (2022.10.29.)