



# ARIS L2-4445: Določitev parametrov in optimizacija selektivnega laserskega taljenja Ti6Al4V z grobim prahom

Avtorji naloge:

**Dr. Simon Malej**  
**Dr. Aleksandra Kocijan**

**Poročilo pripravil:**

Dr. Simon Malej

**Vodja laboratorija:**

dr. Irena Paulin

**Direktor:**

izr. prof. dr. Matjaž Godec

## 1. UVOD

Poročilo je povezano s poročanjem v okviru ARIS projekta L2-4445 z naslovom: Razvoj naprednih Ti6Al4V komponent rezervoarja za letalsko industrijo s hibridno SLM/DED dodajno tehnologijo za 1. poročevalno obdobje glede na časovnico projekta. Poročilo vsebuje osnovni pregled literature, določitev parametrov tiskanja Ti6Al4V s selectivnim laserskim taljenjem in prvi del optimizacije.

## 2. PREGLED LITERATURE O HIBRIDNI GRADNJI

Posamezna komponenta ima lahko več pozitivnih lastnosti, če je izdelana z uporabo več kot ene tehnike obdelave. Hibridna gradnja (HAM iz ang. Hybrid Additive Manufacturing) združuje prednosti dveh tehnologij, ki daje izdelku lastnosti, zmogljivosti, kompleksnosti, ki niso na voljo z eno samo tehniko [1]. Pri HAM gre običajno za kombinacijo tehnologije 3D tiska in konvencionalnih procesov izdelave kovin [2]. V nekaterih primerih HAM združuje tudi dve tehnologiji 3D tiska[3]. V procesni verigi so lahko tudi sekundarni postopki skupaj s tehniko 3D tiska, npr. lokalno kovanje [3]. Raziskanih je bilo veliko kombinacij. Kombinacije lahko vključujejo:

- konvencionalno izdelane polizdelke + SLM (Selektivno lasersko taljenje) [4]
- elektro obločno 3D tiskanje z žico in in-situ lokalno kovanje[3]
- SLM + elektro obločno 3D tiskanje z žico [5]

Zelo zanimiva kombinacija, ki je predmet projekta sta tehnologiji SLM in DED (direktno navarjanje) v procesni verigi [6–8]. SLM omogoča izdelavo geometrijsko kompleksnih delov z dobro natančnostjo (0,01–0,5 mm) in hrapavostjo površine ( $R_a = 7.8\text{--}11.1 \mu\text{m}$  [9] ali več [10]), dobre mehanske lastnosti in malo po procesiranja (pogosto je potrebna mehanska obdelava funkcijskih površin in odstranitev prahu)[11–14]. Slabost SLM procesa je hitrost tiskanja ( $2\text{--}180 \text{ cm}^3/\text{h}$ ) in velikost delov je omejeno z velikostjo komore [13]. DED postopek lahko izdelava delno kompleksne dele, omogoča visoko hitrost navarjanja  $125\text{--}500 \text{ cm}^3/\text{h}$  in ima večje komore [12,15–17]. Komponente izdelane z DED postopkom imajo slabše mehanske lastnosti, srednjo natančnost (0.1–1 mm), večjo površinsko hrapavost ( $R_a = 20\text{--}50+ \mu\text{m}$ ) v primerjavi s SLM procesom [14,18]. Mehanske lastnosti DED so pogosto nižje od SLM, zaradi večje povprečne velikosti zrn, večje širine stebričastih zrn, obsežnejše segregacije in večje volumske deleže primarnih strjevalnih faz, ki nastanejo zaradi počasnejšega ohlajanja [19].

S kombinacijo SLM in DED tehnologij, želimo izdelati srednje do velike, optimizirane dele po znižanih proizvodnih stroških. Proizvodnja optimiziranih delov bi lahko znatno zmanjšala težo, hkrati pa ohranila trdnost dela. Predlagani princip izdelave predstavlja velik potencial za različne letalske aplikacije npr. bionični rezervoarji. Poleg zmanjšanja kompleksnosti sistema glede števila delov, se skrajša tudi čas dobave in zniža skupne stroške končne montaže. Podoben pristop smo testirali in raziskali na nikljevi superzlitini Inconel 625 in 718 ter titanovi zlitni Ti6Al4V, kjer smo zgradili komponento za satelit [6]. Ugotovili smo, da različne mikrostrukture delov DED in SLM ter toplotni pojavi med procesom gradnje vplivajo na mehanske lastnosti HAM delov[6,20].

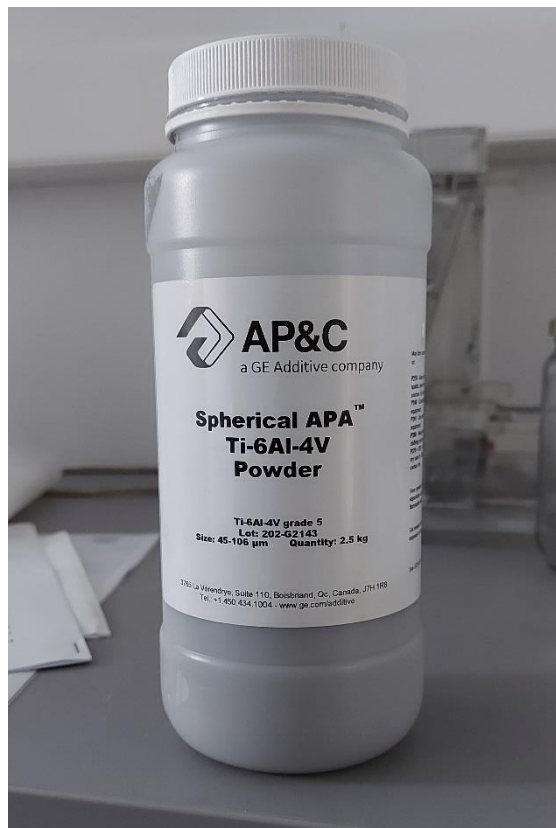
Titanova Ti6Al4V ima odlično specifično trdnost ter dobre korozijske lastnosti [21]. Pogosto se uporablja v vesoljski in letalski industriji [22]. Komponente izdelane iz Ti6Al4V, bi lahko imele koristi od HAM pristopa gradnje. Konvencionalna proizvodnja delov iz Ti6Al4V je kompleksna in draga. Visoka cena izhaja iz dragih ekstrakcijskih in drugih nadaljnjih postopkov [23]. Ti6Al4V je zahteven za obdelavo s tradicionalnimi metodami, kot sta vroče preoblikovanje in mehanska obdelava. Zato je proizvodnja delov iz Ti6Al4V z uporabo HAM tehnologij privlačna alternativa. 3D tiskanje Ti6Al4V delov z uporabo različnih tehnologij, kot sta SLM in DED, so bili obsežno raziskani [24–27].

HAM pristop s tehnologijama SLM in DED, je v raziskavah omejeno na izdelavo ravnega spoja, kar je razmeroma enostavno. Raven spoj ne povzroča nastanek makro in mikro napak kot je to linijska in plinska poroznost [3–5]. Zlitina Ti6Al4V izdelana s tehnologijo SLM ima visoko trdnost zahvaljujoč srednje velikim

stebričastim kristalnim zrnom in mikrostrukturi sestavljene iz lamel  $\alpha$  in  $\beta$  faze [28,29]. Ob neustrezni toplotni obdelavi je lahko raztezek pri porušitvi majhen (cca. 10%), zaradi  $\alpha'/\alpha$  mikrostrukture po tiskanju. Mikrostruktura  $\alpha'/\alpha$  je nezaželena ker negativno vpliva na žilavost in odpornost na utrujanje. Zato je po postopku SLM potrebno žarjenje pod temperaturo  $\beta$ -premene (od 800 °C do 950 °C) [25]. Žarjenje pod premeno  $\beta$ -faze pretvori  $\alpha'/\alpha$  mikrostrukturo v  $\alpha+\beta$  mikrostrukturo [24,25]. Zlitina Ti6Al4V izdelana po postopku DED ima podobno  $\alpha'/\alpha$  mikrostrukturo kot SLM postopek z razliko, da so stebričasta zrna veliko večja [20,27]. DED je dobro znan postopek, ki se običajno uporablja za popravila delov visoke dodane vrednosti. Na osnovi literature je toplotna obdelava po DED postopku tipično žarjenje za popustitev napetosti [30]. Ta pristop je bil potreben za preprečevanje sprememb osnovnih lastnosti popravljenih delov. Ker so nastale mikrostrukture približno enake za SLM [29] in DED [27], bo verjetno toplotna obdelava HAM Ti6Al4V delov manj problematična [20], kot za Inconel 718 [6].

### 3. DOLOČITEV PARAMETROV TISKANJA POSTELJNE TEHNOLOGIJE ZA Ti6Al4V Z GROBIM PRAHOM

V prvem delu projekta smo optimizirali gradnjo Ti6Al4V vzorcev s posteljno tehnologijo in uporabili bolj grob prah. Osnovna ideja je, da s prahom, ki je cenejši izdelamo komponente s podobnimi lastnostmi. Prah, smo ga uporabili je isti kot se ga uporablja za DED postopek. Ti6Al4V prah smo kupili pri podjetju AP&C iz Kanade, z velikostjo zrn med 45 in 105 $\mu$ m (Slika 1).



Slika 1: Posoda s sferičnim Ti6Al4V prahom proizvajalca AP&C.

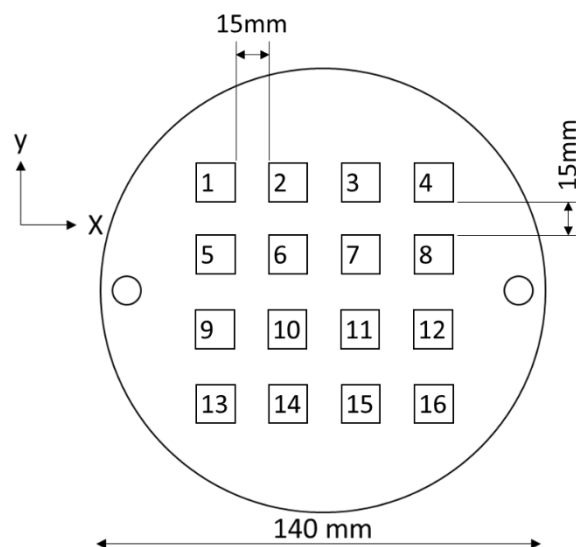
Osnovi literaturi pregled ni pokazal veliko informacij o parametrih za procesiranje grobega prahu s selektivnim laserskim taljenjem. Ker je velikost prahu večja pomeni, da bo debelina sloja večja. Pogosto

je debelina sloja približno od 60% do 80% največje velikosti prahu. Na podlagi tega smo se odločili, da prvo optimizacijo testiramo pri debelini sloja 60 in 80 $\mu\text{m}$ . Pomemben parameter ki povezuje procesne parametre in delež poroznosti je volumska energijska gostota  $E$ . Volumska energijska gostota se izračunana z enačbo 1, kjer je  $P$  moč laserja v  $W$ ,  $v$  hitrost vrstičenja v  $\text{mm/s}$ ,  $h$  medlaserska razdalja v  $\mu\text{m}$  in  $t$  debelina sloja v  $\mu\text{m}$ . Tipično se za selektivno lasersko taljenje Ti6Al4V s finim prahom uporablja volumska energijska gostota  $50 \text{ J/mm}^3$  ali več. Na osnovi enačbe 1 smo izbrali več parametrov, ki ustrezajo volumski energijski gostoti med 30 in  $100 \text{ J/mm}^3$ . Osredotočili smo se na najvišje hitrosti skeniranja in moči laserja z namenom, da povečamo produktivnost. Tabela 1 prikazuje št. vzorcev, ime vzorcev, moč laserja, hitrost vrstičenja, debelina sloja, medlasersko razdaljo, premer laserskega žarka in volumska energijska gostota, ki smo jih izbrali za 16 različnih vzorcev. Postavitev vzorcev in njihova številka je prikazana na Sliki 2.

Enačba 1	$E = \frac{P}{v * t * H}$ <p>P... Moč laserja, W v... Hitrost vrstičenja, mm/s h... Medlaserska razdalja, <math>\mu\text{m}</math> t... Debelina sloja, <math>\mu\text{m}</math></p>
----------	--

Tabela 1: Št. vzorcev, ime vzorcev, moč laserja, hitrost vrstičenja, debelina sloja, medlasersko razdaljo, premer laserskega žarka in volumska energijska gostota ki smo jih izbrali za 1. optimizacijo.

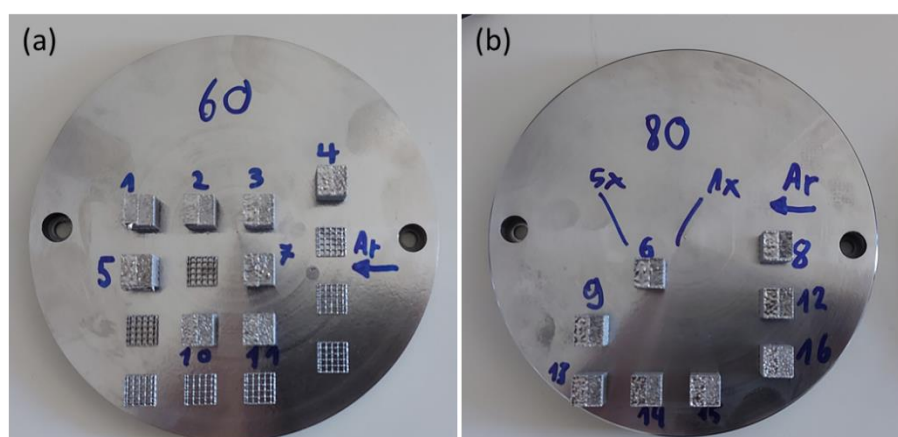
Oznaka na skici	Oznaka vzorca	Moč laserja P, W	Hitrost v rstičenja v, mm/s	Debelina sloja t [ $\mu\text{m}$ ] prah	Medlaserska razdalja H [ $\mu\text{m}$ ]	Premer laserskega žarka d [ $\mu\text{m}$ ]	Volumska energijska gostota E, $\text{J/mm}^3$
1	AK1	350	1000	60	60	60	97.22
2	AK2	300	1000	60	60	60	83.33
3	AK3	250	1000	60	60	60	69.44
4	AK4	200	1000	60	60	60	55.56
5	AK5	350	1100	60	60	60	88.38
6	AK6	300	1100	60	60	60	75.76
7	AK7	250	1100	60	60	60	63.13
8	AK8	200	1100	60	60	60	50.51
9	AK9	350	800	80	80	80	68.36
10	AK10	300	800	80	80	80	58.59
11	AK11	250	800	80	80	80	48.83
12	AK12	200	800	80	80	80	39.06
13	AK13	350	900	80	80	80	60.76
14	AK14	300	900	80	80	80	52.08
15	AK15	250	900	80	80	80	43.40
16	AK16	200	900	80	80	80	34.72



Slika 2: Postavitev vzorcev in št. vzorca na osnovni plošči za posteljni način gradnje.

#### 4. TISKANJE VZORCEV

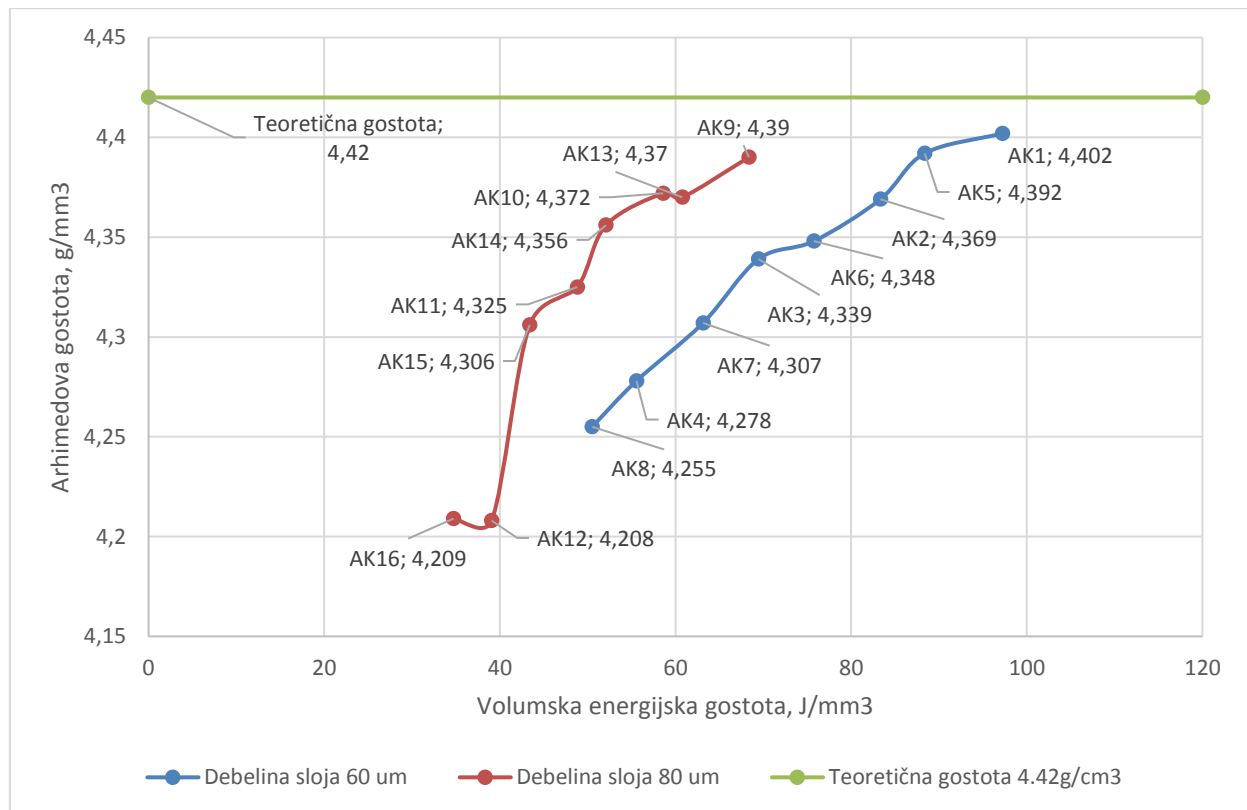
3D tiskanje smo izvedli na tiskalniku Aconity MINI 3D brez ogrevanja podlage in z zamikom sloja  $67^\circ$ . Ker na 3D tiskalniku ne moremo tiskati dveh različnih debelin slojev hkrati, smo tiskanje izvedli 2x. Pri prvem tiskanju smo natisnili vzorce kjer je bila debelina sloja  $60\mu\text{m}$  (Slika 3a) in pri drugem  $80\mu\text{m}$  (Slika 3b). Stanje vzorce po tiskanju je prikazano na Sliki 3a za debelino sloja  $60\mu\text{m}$  in b za  $80\mu\text{m}$ . Vizualna preiskava vzorcev po tiskanju ni pokazala večjih napak. Po pregledu smo vzorce odstranili s podlage in jih pripravili za analize. Vzorcem smo določili gostoto s tehtnico Satorius Entris II Essential Line in z dodatkom za merjenje gostote YDK03. Za medij smo uporabili absolutni etanol (CAS n° 64-17-5). Po meritvah gostote smo vzorce prerezali in pripravili metalografski obrus. Vzorcem smo v poliranem stanju s svetlobno mikroskopijo posneli napake v mikrostrukturi. Svetlobno mikroskopijo smo naredili na mikroskopu ZEISS Axio Imager Z2m.



Slika 3: Stanje vzorcev po 3D tiskanju z debelino sloja  $60\mu\text{m}$  (a) in  $80\mu\text{m}$  (b).

## 5. REZULTATI 1. OPTIMIZACIJE ZA POSTELJNI NAČIN GRADNJE

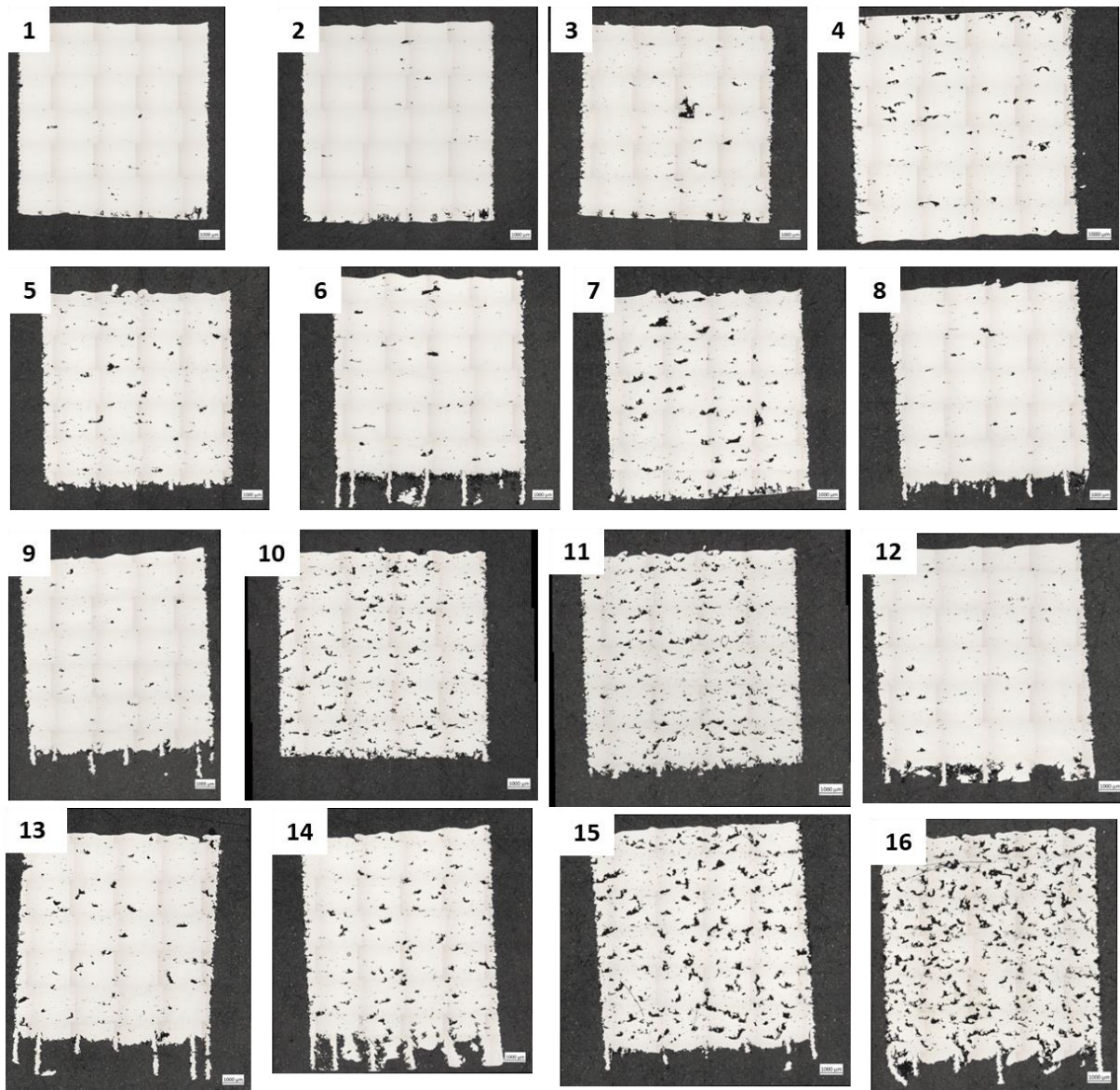
Slika 4 prikazuje graf Arhimedova gostota v odvisnosti od volumske energijske gostote, za vzorce kjer je debelina sloja 60 $\mu$ m in 80 $\mu$ m. Na Sliki 4 je narisana tudi zelena linija, ki prikazuje teoretično gostoto titanove zlitine Ti6Al4V. Teoretična gostota je približno 4.42g/cm<sup>3</sup>. Pri debelini sloja 60 $\mu$ m in 80 $\mu$ m lahko vidimo, da se gostota vzorcev povečuje z volumsko energijsko gostoto. Kljub visoki volumski energijski gostoti, vzorci niso dosegli teoretične gostote titanove zlitine Ti6Al4V. Največjo gostoto (4.402g/cm<sup>3</sup>) je dosegel vzorec AK1 (Slika 4). Gostota vzorcev, ki je manjša od teoretične pomeni, da so vzorci porozni. Manjša kot je gostota, večja je poroznost vzorcev.



Slika 4: Graf Arhimedova gostota v odvisnosti od volumske energijske gostote za vzorce kjer je debelina sloja 60 $\mu$ m in 80 $\mu$ m. Na grafu je narisana tudi zelena linija, ki prikazuje teoretično gostoto titanove zlitine Ti6Al4V.

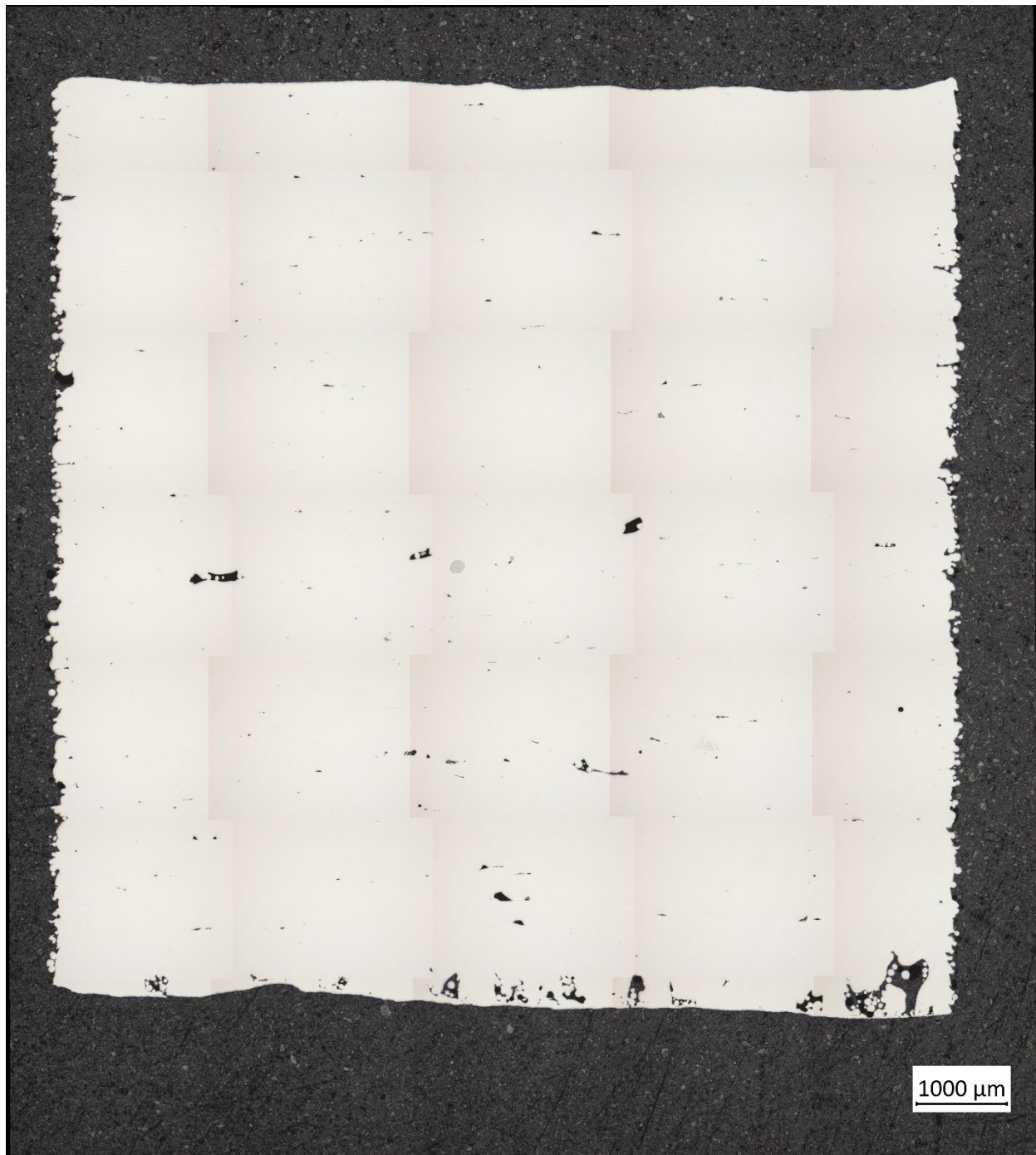
Mikroskopija vzorcev v prerezu (Slika 5 od vzorca 1 do 16) pokaže iste zaključke kot meritve gostote. Vzorec AK1 ima najmanjši delež napak, sledi vzorec AK2, ki ima tudi drugo največjo gostoto (Slika 4). Na sliki 6 je prerez vzorca AK1 prikazan bolj detajlno. Iz Slike 5 lahko vidimo da vzorec AK1 vsebuje velike linijske makro napake, ki nastanejo, ker laser ni pretalil celotnega volumna prahu. Tovrstne napake lahko nastanejo tudi zaradi neenakomernega nanašanja prahu z rezilom. Ker ima vzorec 1 gostoto manjšo kot

je teoretična in zaradi velikih makro napak pomeni, da moramo še povečati volumsko energijsko gostoto (manjša laserska moč ali večja hitrost vrstičenja).



Slika 5: Mikrostruktura vzorcev AK1-AK16 v poliranem stanju, posneto z optičnim mikroskopom





Slika 5: Slika prereza vzorca 1 v poliranem stanju, posneta z optičnim mikroskopom.

## 6. ZAKLJUČKI

Prva optimizacija 3D tiskanja grobega Ti6Al4V prahu s tehnologijo selectivnega laserskega taljenja ni bila dovolj. Vzorci niso dosegli teoretične gostote titanove zlitine Ti6Al4V. Optična mikroskopija vzorcev pa je pokazala večje linearne napake, ki so nastale ker celoten volumen ni bil pretaljen. Najboljše rezultate smo dobili, ko smo tiskali z debelino sloja 60μm. Glede na rezultate mora biti volumska energijska gostota 100J/mm<sup>3</sup> ali več, da lahko dosežemo večjo gostoto in eliminiramo makro- in mikro-napake.

## 7. REFERENCE

- [1] M.E. Korkmaz, S. Waqar, A. Garcia-Collado, M.K. Gupta, G.M. Krolczyk, A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry, *Journal of Materials Research and Technology* 18 (2022) 384–395. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.02.085>.
- [2] W.-S. Woo, E.-J. Kim, H.-I. Jeong, C.-M. Lee, Laser-Assisted Machining of Ti-6Al-4V Fabricated by DED Additive Manufacturing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 2020 7:3 7 (2020) 559–572. <https://doi.org/10.1007/S40684-020-00221-7>.
- [3] M. Bambach, I. Sizova, B. Sydow, S. Hemes, F. Meiners, Hybrid manufacturing of components from Ti-6Al-4V by metal forming and wire-arc additive manufacturing, *J Mater Process Technol* 282 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2020.116689>.
- [4] O. Dolev, S. Osovski, A. Shirizly, Ti-6Al-4V hybrid structure mechanical properties—Wrought and additive manufactured powder-bed material, *Addit Manuf* 37 (2021) 101657. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101657>.
- [5] X. Shi, S. Ma, C. Liu, Q. Wu, J. Lu, Y. Liu, W. Shi, Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A* 684 (2017) 196–204. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.12.065>.
- [6] M. Godec, S. Malej, D. Feizpour, Č. Donik, M. Balažic, D. Klobčar, L. Pambaguian, M. Conradi, A. Kocijan, Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Mater Charact* 172 (2021) 110842. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>.
- [7] E. Uhlmann, J. Düchting, T. Petrat, E. Krohmer, B. Graf, M. Rethmeier, Effects on the distortion of Inconel 718 components along a hybrid laser-based additive manufacturing process chain using laser powder bed fusion and laser metal deposition, *Progress in Additive Manufacturing* 6 (2021) 385–394. <https://doi.org/10.1007/S40964-021-00171-9>.
- [8] M. Kumaran, V. Senthikumar, Influence of Heat Treatment on Stainless Steel 316L Alloy Manufactured by Hybrid Additive Manufacturing Using Powder Bed Fusion and Directed Energy Deposition, *Metals and Materials International* (2022) 1–18. <https://doi.org/10.1007/S12540-022-01225-5>.
- [9] A. Kudzal, B. McWilliams, C. Hofmeister, F. Kellogg, J. Yu, J. Taggart-Scarff, J. Liang, Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of Powder Bed Fusion additive manufactured 17-4 stainless steel, *Mater Des* 133 (2017) 205–215. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.07.047>.
- [10] N. Sanaei, A. Fatemi, Analysis of the effect of surface roughness on fatigue performance of powder bed fusion additive manufactured metals, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 108 (2020) 102638. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2020.102638>.

- [11] B. Barroqueiro, A. Andrade-Campos, R.A.F. Valente, V. Neto, Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3 (2019) 52. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030052>.
- [12] N. Kladovasilakis, P. Charalampous, I. Kostavelis, D. Tzetzis, D. Tzovaras, Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: a comprehensive review, *Progress in Additive Manufacturing* 6 (2021) 349–365. <https://doi.org/10.1007/S40964-021-00180-8>.
- [13] A. Khorasani, I. Gibson, J. Kozhuthala Veetil, & Amir, H. Ghasemi, A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers, (n.d.). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05361-3>.
- [14] S. Gruber, C. Grunert, M. Riede, E. López, A. Marquardt, F. Brueckner, C. Leyens, Comparison of dimensional accuracy and tolerances of powder bed based and nozzle based additive manufacturing processes, *J Laser Appl* 32 (2020) 032016. <https://doi.org/10.2351/7.0000115>.
- [15] Y. Zhang, L. Wu, X. Guo, S. Kane, Y. Deng, Y.G. Jung, J.H. Lee, J. Zhang, Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review, *J Mater Eng Perform* 27 (2018) 1–13. <https://doi.org/10.1007/S11665-017-2747-Y>.
- [16] Optomec Inc., LENS 1500 ADDITIVE MANUFACTURING CONTROLLED ATMOSPHERE SYSTEM, (n.d.). [https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/11/LENS-1500-AM-CA\\_WEB1018.pdf](https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/11/LENS-1500-AM-CA_WEB1018.pdf) (accessed May 31, 2022).
- [17] H. Siva Prasad, F. Brueckner, A.F.H. Kaplan, Powder incorporation and spatter formation in high deposition rate blown powder directed energy deposition, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101413>.
- [18] K. Vartanian, L. Brewer, K. Manley, T. Cobbs, POWDER BED FUSION vs. DIRECTED ENERGY DEPOSITION BENCHMARK STUDY: MID-SIZE PART with SIMPLE GEOMETRY, (2018). [https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2018/06/PBF-vs-DED-BENCHMARK-STUDY\\_7March\\_2018-03.pdf](https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2018/06/PBF-vs-DED-BENCHMARK-STUDY_7March_2018-03.pdf) (accessed June 1, 2022).
- [19] J. Wang, X. Zhou, J. Li, J. Zhu, M. Zhang, A comparative study of Cu–15Ni–8Sn alloy prepared by L-DED and L-PBF: Microstructure and properties, *Materials Science and Engineering: A* 840 (2022) 142934. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2022.142934>.
- [20] S. Malej, M. Godec, C. Donik, M. Balazic, R. Zettler, T. Lienert, L. Pambaguian, Hybrid additive manufacturing of Ti6Al4V with powder-bed fusion and direct-energy deposition, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145229>.
- [21] M. Donachie, *Titanium: A Technical Guide*, ASM International (2000).
- [22] V. Anil Kumar, R.K. Gupta, M.J.N.V. Prasad, S.V.S. Narayana Murty, Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review, *J Mater Res* 36 (2021) 689–716. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00104-w>.

- [23] M. Jackson, K. Dring, A review of advances in processing and metallurgy of titanium alloys, <https://doi.org/10.1179/174328406X111147> 22 (2013) 881–887. <https://doi.org/10.1179/174328406X111147>.
- [24] M.T. Tsai, Y.W. Chen, C.Y. Chao, J.S.C. Jang, C.C. Tsai, Y.L. Su, C.N. Kuo, Heat-treatment effects on mechanical properties and microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser powder bed fusion, *J Alloys Compd* 816 (2020) 152615. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.152615>.
- [25] P. Kumar, U. Ramamurty, Microstructural optimization through heat treatment for enhancing the fracture toughness and fatigue crack growth resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy, *Acta Mater* 169 (2019) 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.03.003>.
- [26] S.M.J. Razavi, F. Berto, Directed Energy Deposition versus Wrought Ti-6Al-4V: A Comparison of Microstructure, Fatigue Behavior, and Notch Sensitivity, *Adv Eng Mater* 21 (2019) 1900220. <https://doi.org/10.1002/ADEM.201900220>.
- [27] B.E. Carroll, T.A. Palmer, A.M. Beese, Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing, *Acta Mater* 87 (2015) 309–320. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2014.12.054>.
- [28] M.T. Tsai, Y.W. Chen, C.Y. Chao, J.S.C. Jang, C.C. Tsai, Y.L. Su, C.N. Kuo, Heat-treatment effects on mechanical properties and microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser powder bed fusion, *J Alloys Compd* 816 (2020) 152615. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152615>.
- [29] C.M. Cepeda-Jiménez, F. Potenza, E. Magalini, V. Luchin, A. Molinari, M.T. Pérez-Prado, Effect of energy density on the microstructure and texture evolution of Ti-6Al-4V manufactured by laser powder bed fusion, *Mater Charact* 163 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2020.110238>.
- [30] S. Shrestha, R.P. Panakarajupally, M. Kannan, G. Morscher, A.L. Gyekenyesi, O.E. Scott-Emuakpor, Analysis of microstructure and mechanical properties of additive repaired Ti-6Al-4V by Direct Energy Deposition, *Materials Science and Engineering: A* 806 (2021) 140604. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2020.140604>.