

3D-TISK

Mitja Bukovec, Matjaž Finšgar

STROKOVNI ČLANEK

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor

POVZETEK

Razcvet 3D-tiska se je začel z izumom računalnika leta 1940, ki je pripeljal do razvoja različnih modernih tehnik in tehnologij. Tehnologija 3D-tiska zajema računalnik, laser, skener in tiskalnik, ki skupaj v procesu dodajanja materiala plast na plast ustvarjajo tridimenzionalni objekt. 3D-tisk obsega širok spekter področij, kot so na primer tekstilna, jedrska in vesoljska industrija, medicina in kemija, kjer moramo uporabiti točno določeno strukturo materiala. Za dober končen produkt se uporabljajo le taki materiali, da bo končna geometrija izdelka ustrezala vsem potrebnim lastnostim.

Ključne besede: 3D-tisk, CAD, SLA, FDM, PBF, DED, lab-on-a-chip

3D printing

ABSTRACT

Development of 3D printing expanded with the invention of the computer in 1940 which has led to the development of different modern techniques and technologies. 3D printing technology includes computer, laser, printer and scanner, which work together in a process of adding material layer-by-layer to create a three-dimensional object. 3D printing is commonly employed in different fields, e.g. textile, nuclear and aerospace industry, medicine and chemistry, where we need to employ a specific structure. For a good final product only those materials can be used that give final geometry which satisfies all needed properties.

Keywords: 3D printing, CAD, SLA, FDM, PBF, DED, lab-on-a-chip

1 UVOD

Tridimenzionalni tisk (3D-tisk), poznan tudi kot aditivna proizvodnja (AP), je hitro rastoča tehnologija za izdelovanje trdnih prostorskih objektov z digitalnimi načrti v programskem okolju CAD (*computer aided design*). Koncept temelji na ustvarjanju tridimenzionalnega objekta z dodajanjem materiala plasti na plasti [1, 2].

Cenovno ugodni in najpogostejši uporabljeni materiali so polimlečna kislina (PLA), akrilonitril butadienstiren (ABS), polietilen teraftalat glikol (PETG), termoplastični elastomeri (TPE) in poliamid (PA) [3]. Zaradi izjemnega razvoja v zadnjih desetih letih je postal 3D-tisk prisoten v številnih aplikacijah, od hitre proizvodnje prototipov, neposredne proizvodnje in popravil keramičnih, plastičnih, kovinskih in kompozitnih materialov do večjih panog, kot so tkivno inženirstvo, ekologija, gradbena, letalska, vesoljska in avtomobilska industrija. Gre za nov proizvodni način, ki industriji doda fleksibilni dizajn, zmanjša porabo energije in skrajša čas [4–7].

2 ZGODOVINSKI PREGLED

Z izumom prvega tiskarskega stroja okrog leta 1440 se je reprodukcija besedila in slik ter razširjanje informacij bistveno izboljšala. V preteklih nekaj desetletjih je tiskarska tehnologija napredovala iz dvo-dimenzionalnega tiska na tridimenzionalni. Pravzaprav začetki 3D-tiska segajo dobrih 150 let nazaj z željo po gradnji topografske karte iz 2D-podatkov, dejansko pa je 3D-tisk začel delovati v začetku 90. let [1, 8, 9]. Z raziskovalnimi prizadevanji v 60. in 70. letih 20. stoletja so se razvile prve moderne tehnike, vključno s fotopolimerizacijo, ki so bile omogočene z izumom računalnika leta 1940, z razvojem fotopolimerizirajoče smole (DuPont) leta 1950 in s komercialno razpoložljivostjo laserjev v letu 1960. Prav tako je sledil napredek v računalniškem načrtovanju (CAD) in njegovih orodij ter v računalniško podprti proizvodnji CAM (angl. computer aided manufacturing).

V letih po 1980 in v začetku leta 1990 se je povečalo število patentov (Murutani, Japonska; André, Francija; Hull, ZDA) in akademskih publikacij, kar je pripeljalo do razvoja novih tehnologij. Charles Hull velja za enega najbolj zaslužnih za razvoj 3D-sistemov, saj je kot prvi s podjetjem začel tržiti 3D-tehnologijo z aparati stereolitografije [8, 10]. V zadnjih dvajsetih letih je 3D-tisk doživel silovit razvoj v mnogih tehnikah: LBM, FDM, SLS, SLM, DMM, EBM idr. [7, 8, 10, 11].

3 PROGRAMSKA OPREMA

3.1 Računalnik

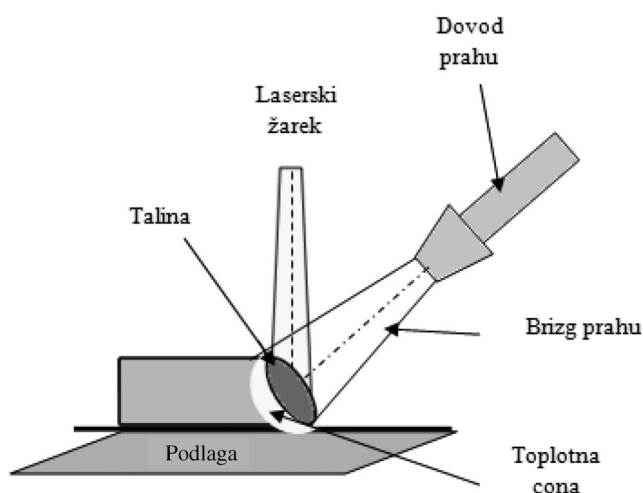
Bistvena značilnost za razvoj računalnikov, kot uporabno orodje, je njihova sposobnost za opravljanje nalog v realnem času. 3D-tisk v celoti izkorišča veliko pomembnih značilnosti računalniške tehnologije tako neposredno kot tudi posredno, vključujoč procesorske moči, grafične sposobnosti, nadzor stroja, omrežje in povezavo z drugimi deli celotnega procesa. Računalnik je bistvenega pomena, saj brez njega ni mogoče prikazati 3D-grafične podobe.

Primarni postopek 3D-tiskanja izhaja iz zasnove CAD, saj si z njo pomagamo pri oblikovanju velikih zgradb in mikroprocesorjev v nanometrskem merilu, prav tako pa zajema veliko teorije, povezane s posebno vrsto izdelka, vključno z geometrijskim, električnim, toplotnim, dinamičnim in statičnim vedenjem. Večina sistemov CAD sedaj hitro deluje, kar je rezultat izboljšav v računalniški tehnologiji in tudi v

načinu predstavljanja in shranjevanja podatkov. Še posebej hitro so se razvile aplikacije, kjer je mogoče ustvariti CAD-podobe, ki jih je težko ločiti od dejanskih fotografij, prav tako pa so se izboljšali čas procesa, natančnost, kompleksnost in uporabnost [10, 12].

3.2 Laser

Laserji imajo pomemben vpliv na najrazličnejših področjih, kot so telekomunikacije, instrumentacija, medicina, računalništvo in tudi zabava. Laserji zagotavljajo visoko intenzivno energijo, ki jo lahko kontrolirano premikamo, zato so idealni kandidati za uporabo v 3D-tisku. Obstajata dve vrsti laserjev: utrjevalni in grelni. Pri uporabi fotopolimerizirajoče smole je zahteva, da se uporabi laserska energija z določeno frekvenco, ki bo povzročila, da se smola strdi. V tem primeru se navadno uporabi laser v UV-območju. Za segrevanje je potreben laser, ki proizvede dovolj toplotne energije, da lahko zareže v plast trdnega materiala, da se lahko prah stali ali da se material vžge.



Slika 1: Shema laserskega delovanja

Pri procesih, kjer se uporablja prah (slika 1), je pomembno, da se material stali brez ustvarjanja prevelike izgube toplote, ker, ko se energija laserja odstrani, se talina spet hitro strdi. V preteklosti so, da bi zagotovili dovolj energije, uporabljali cevne laserje, v današnjem času pa je mnogo proizvajalcev prešlo na tehnologijo trdnega stanja, da bi zagotovili večjo učinkovitost in zanesljivost, ki povečuje trajnostno dobo [10, 13].

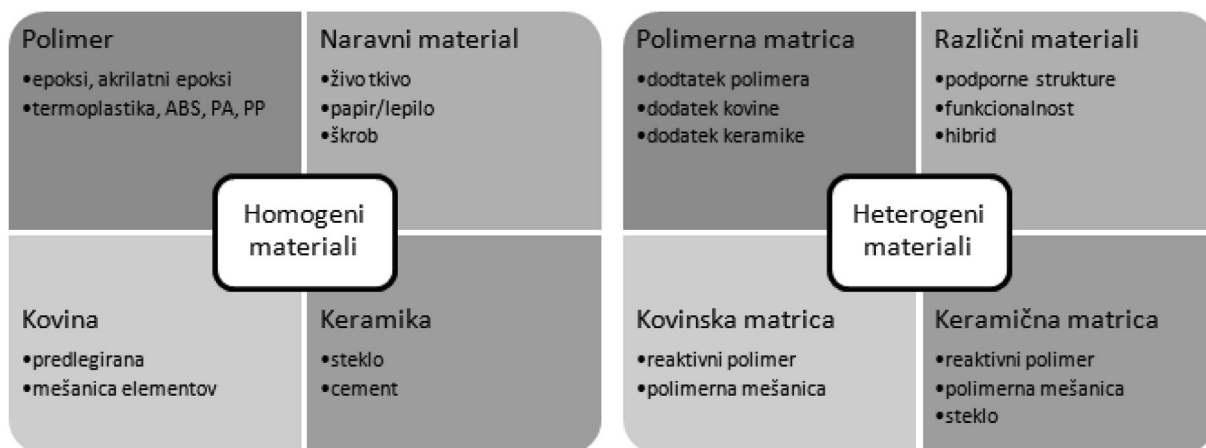
3.3 Skener

S skenerjem lahko na različne načine izdelamo 3D-model, in sicer obstajata dve vrsti kontaktnih skenerjev in nekontaktni način digitalnih skenerjev. Razlika med njima je ta, da so kontaktni skenerji tisti, ki zbirajo informacije s fizičnim dotikom objekta, oboji pa nato uporabljajo zbrane točke za digitalizacijo predmeta in jih prevedejo v 3D-model. Uporaba kontaktnih skenerjev je široka, saj obstajajo v različnih oblikah in tudi cenah, niso pa priporočljivi pri skeniranju organskih snovi.

Nekontaktni skenerji se bolj uporabljajo za skeniranje umetniških del, in sicer v dveh oblikah – aktivni in pasivni. Aktivni nekontaktni skenerji za zbiranje informacij uporabljajo strukturirano luč laserja, ki preleti objekt. Skener meri čas potrebne svetlobe, ki gre iz skenerja do objekta in se nato vrne v skener. Predstavnik pasivnega nekontaktnega skenerja je fotogrametrija, kjer laserski žarek aktivno ne raziskuje površine objekta [13].

3.4 Tiskalnik

V zadnjih letih sta se razvili predvsem tehnologiji tiskanja s črnilom ali s kapljicami. Izboljšanje resolucije in zmanjševanje stroškov je pripeljalo do večbarvnega tiskanja v visoki ločljivosti. Sprva so se uporabljale barve z nizko viskoznostjo, ki so bile vstavljene v tiskalnik pri sobni temperaturi. Sedaj je



Slika 2: Materiali, uporabni pri 3D-tisku

mogoče ustvariti veliko višje tlake v komori za tvorjenje kapljic, tako da je mogoče natisniti materiale z višjo viskoznostjo in celo staljene materiale. Razvoj takih tiskalnikov pomeni proizvodnjo z nizkimi stroški, visoko ločljivostjo in prepustnostjo [10].

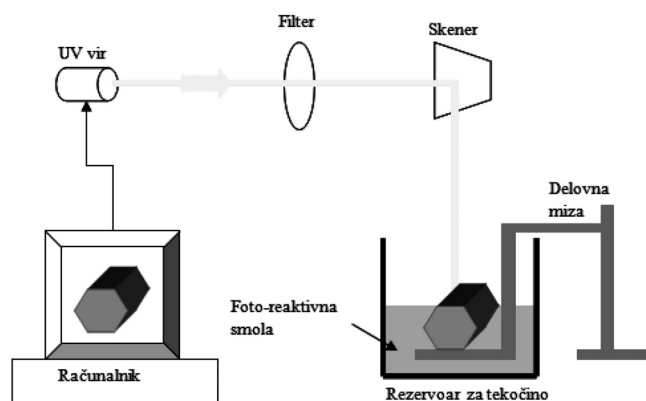
3.5 Material

Celoten proces 3D-tiska vključuje uporabo različnih materialov, ki imajo ključno vlogo pri samem procesu, zato moramo predvideti, kakšna je njihova struktura. Uporaba idealnega materiala se bo izražala v končni geometriji izdelka, ki mora imeti odlične mehanske, električne, elektromagnetne, kemične in toplotne lastnosti, prav tako pa morajo presegati tiste iz konvencionalno predelanih materialov, biti stroškovno učinkoviti in okolju prijazni. Surovine, ki se uporabljajo, so lahko v obliki tekočine, prahu ali plošče in so navadno iz plastike in drugih polimerov, kovine ali keramike. **Slika 2** prikazuje različne materiale, ki se uporabljajo pri tehniki 3D-tiska [10, 14–16].

4 TEHNIKE 3D-TISKA

4.1 Stereolitografija (SLA)

SLA je 3D-tehnika tiskanja, ki temelji na sušenju fotoreaktivne smole z UV-laserjem oz. podobnim močnim virom in je znana po svoji visoki natančnosti in odlični končni površini materiala. Je najpogosteje uporabljena tehnika in se uporablja tako v raziskovalnih študijah kot tudi v komercialni proizvodnji. Model (**slika 3**) je zasnovan s programsko opremo CAD in CT/MRI (angl. *computer tomography/magnetic resonance imaging*), kjer se podatki skenirajo in potem prenesejo na stereolitografski aparat za gradnjo. Laserski žarki so računalniško vodeni in tvorijo prvo trdno plast, presežek se odloži kot tekočina. Postopek se ponavlja, dokler ni končana zadnja plast materiala. SLA ima tudi slabe lastnosti, ker pri uporabi foto ob-



Slika 3: SLA-model

čutljivih materialov dobimo slabe mehanske lastnosti, ko so ti izpostavljeni UV-svetlobi [17–19].

4.2 Ciljno (kondenzirano) nalaganje (FDM)

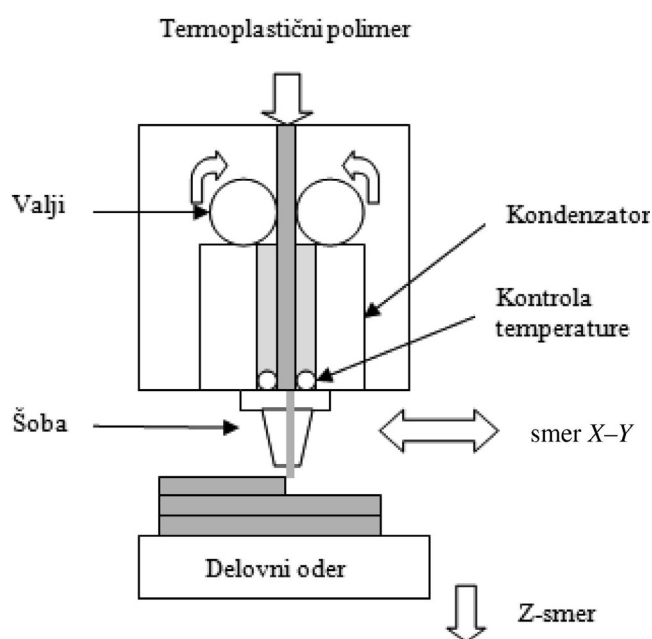
FDM (angl. *fused deposition modeling*) je ena izmed najbolj razširjenih 3D-tehnik, narejena v poznih 80. letih in je v primerjavi s tradicionalnimi tehnikami proizvodnje veliko hitrejša pri izdelavi prototipov kompleksnih oblik z uporabo termoplastičnih snovi, kot so ABS, polifenilen sulfid (PPS) in PLA [19, 20]. Danes se ta tehnologija uporablja na številnih področjih, med katerimi so vesoljska tehnologija, medicina, gradbeništvo in tudi kultura. Zaradi širjenja poceni 3D-tiskalnikov je FDM-tehnologija dostopna širšemu krogu ljudi in uporabna tudi doma ali v pisarni [21].

Gre za sistem (**slika 4**) iztiskanja termoplastičnega polimera, ki je v obliki filameta navadno kot navita žarilna nitka. Ta je potisnjen v grelno komoro, kjer se segreva do zmečkanja in taljenja. Komora je povezana s programirano šobo, ki se vklaplja in izklaplja ter tako pod tlakom prisili raztaljen material skozi. Rezultat strnjenelega materiala je 3D-model, ki se v procesu kot plast na plast nalaga v x -, y - in z -oseh [18–20, 22].

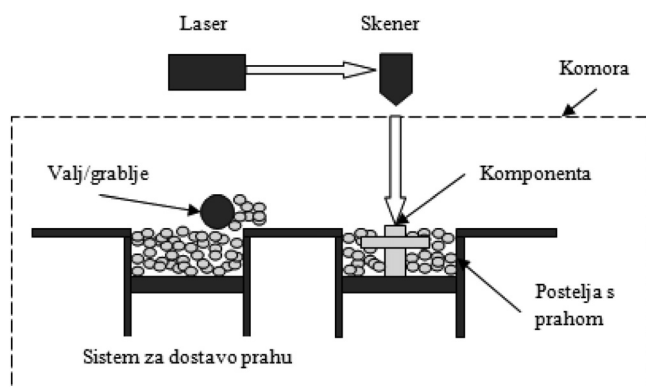
4.3 Kovinske tehnike

Tehnika prahu (PBF)

PBF-tehnika (angl. *powder bed fusion*) zajema tri tipične procese: selektivno lasersko sintranje/taljenje SLS/SLM (*selective laser sintering/melting*), neposredno lasersko sintranje kovin DMLS (*direct metal laser sintering*) in taljenje z uporabo elektronskega



Slika 4: FDM-model



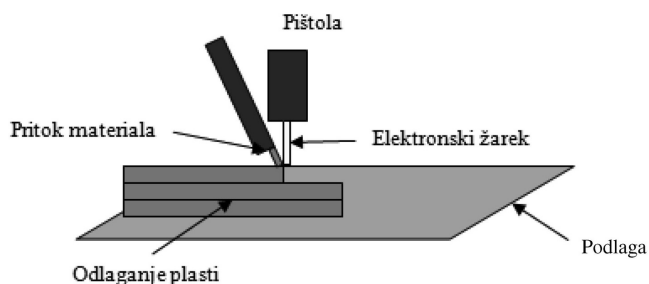
Slika 5: PBF-model

žarka EBM (*electron beam melting*). Postelja s prahom se ustvari z grabljenjem prahu po delovnem območju, vir energije (elektronski ali laserski žarek) je programiran tako, da zagotavlja energijo na površino postelje, kjer zasinja ali zataji prah v želeno obliko. Dodatni prah se potem spet nabira po delovnem območju in postopek se ponovi, dokler se ne ustvari trdna tridimenzionalna komponenta. Tehnika se uporablja za ojačenje kompozitnih vlaken v zračnih plovilih brez posadke. Model PBF-tehnike je prikazan na **sliki 5** [7, 23, 24].

DMLS- in EBM-tehniki se največ uporabljata. Da se ustrezno zasinjata dva dela, se pri DMLS-tehniki uporablja kovinski prah in visoko zmogljivi laser. Ta metoda je sposobna proizvajati zelo goste dele, vendar, da bi dosegli odlične tesnosti plina ali tlaka, je potrebna končna obdelava produkta. Številne aplikacije EBM pa najdemo v letalski, vesoljski in avtomobilski industriji, prav tako pa se v medicini uporabljajo za ortopedske vsadke [7, 19].

Neposredno energijsko odlaganje (DED)

Nekaj najpomembnejših tehnik, ki spadajo v tehnologijo DED (angl. *direct energy deposition*) (**slika 6**), so selektivno lasersko varjenje LENS (*laser engineered net shaping*), direktno nanašanje kovine DMD (*direct metal deposition*) in uporaba proste oblike elektronskega žarka EBFFF (*electron beam free form fabrication*). Osnova DED-tehnologije se osredinja na toplotno energijo, ki povzroča taljenje materiala (prah ali žica) takoj, ko se ta odlaga. LENS je tip DED-pro-



Slika 6: DED-model

cesa, ki gradi sloj na sloj komponente iz datotek .stl z laserskim žarkom. Ta stali kovinski prah na kontaktni točki na točno določenem mestu.

Na podoben način deluje tudi EBFFF, le da ta uporablja laserski žarek v vakuumu, da ustvari majhne taline na površini podlage. Prav tako pri DMD se tok kovinskega praha dovaja v talilni bazen, da se ustvari tanek sloj in da se poveča volumen. Naslednja plast je nato zgrajena na prejšnji plasti, s čimer se ustvari končni 3D-produkt. DMD je primeren za popravilo že obstoječih orodij ali za izdelavo povsem novih [7, 25, 26].

4.4 Kemijske in biokemijske lab-on-a-chip tehnike

V zadnjih nekaj letih je razvoj 3D-tiska na *lab-on-a-chip* (laboratorij na čipu) napravah postal zelo zanimiv tako na kemijskem kot tudi na biokemijskem področju. Izdelava funkcionalnih miniaturnih enot pri uporabi koncepta sloj na sloj v enem samem postopku je poenostavljena in nadzorovana, poleg tega je mogoče integrirati vse analitične faze, ki potekajo v laboratoriju; predpriprava vzorca, prenos reagenta, mešanje, reakcije, ločitev in določitev. Prav tako ima ta tehnika številne pozitivne lastnosti, kot so visoka ločljivost, nizki stroški, raznolikost materiala, prihranek časa in osebna prilagoditev. Zato so tehnike lab-on-a-chip uporabne na številnih področjih in tehnikah [18, 27–30]:

- kolorimetrija
- elektrokemija
- (elektro)kemiluminiscenca
- masna spektrometrija
- celice in njihova ločitev
- dostava zdravil
- gojenje bakterij
- proteini
- človeško tkivo
- DNA-preizkusi ...

5 SKLEP

Kopičenje delov sloj za slojem, aditivna proizvodnja, je v zadnjem času postala možnost za serijsko proizvodnjo, saj je zaradi raznolikosti in raznovrstnosti končnih izdelkov povpraševanje vedno večje. Uporaba različnih materialov plastike, keramike, papirja, polimerne matrice idr. omogoča razvoj 3D-tehnologije na številnih področjih, kot so tekstilna, letalska, vesoljska in jedrska industrija, arhitektura, medicina, kemija idr. 3D-tisk ima potencial za preoblikovanje znanosti in tehnologije na nizkocenovne naprave, ki so prej zahtevale velike in drage namenske objekte. Tako bo tehnologija zaradi cenovno dostopnih

materialov in programske opreme postala dostopna skoraj vsakemu človeku.

6 LITERATURA

- [1] T. Rayna, L. Striukova, *Technological Forecasting and Social Change*, 102 (2016), 214–224
- [2] S. Dul, L. Fambri, A. Pegoretti, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85 (2016), 181–191
- [3] M. Alssabbagh, A. A. Tajuddin, M. Abdulmanap, R. Zainon, *Radiation Physics and Chemistry*, in press (2017)
- [4] M. Adamkiewicz, B. Rubinsky, *Cryobiology*, 71 (2015) 3, 518–521
- [5] P. Wu, J. Wang, X. Wang, *Automation in Construction*, 68 (2016), 21–31
- [6] J. S. Mohammed, *Methods in Oceanography*, 17 (2016), 97–117
- [7] T. Duda, L. V. Raghavan, *IFAC-PapersOnLine*, 49 (2016) 29, 103–110
- [8] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65 (2016) 2, 737–760
- [9] Z.-X. Low, Y. T. Chua, B. M. Rayb, D. Mattia, I. S. Metcalfe, D. A. Patterson, *Journal of Membrane Science*, 523 (2017), 596–613
- [10] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, New York, 2015, 498 str.
- [11] X. Ren, H. Shao, T. Lin, H. Zheng, *Materials & Design*, 101 (2016), 80–87
- [12] A. Zolfagharian, A. Z. Kouzani, S. Y. Khoo, A. A. Moghadam, I. Gibson, A. Kaynak, *Sensors and Actuators A: Physical*, 250 (2016), 258–272
- [13] A. J. Pinkerton, *Optics & Laser Technology*, 78 (2016) Part A, 25–32
- [14] J. J. Beaman, C. Attwood, T. L. Bergman, D. Bourell, S. Hollister, D. Rosen, *Additive/subtractive manufacturing research and development in Europe (2004)*, www.wtec.org/additive/report/front-matter.pdf (zadnjič dostopano: 1. 8. 2017)
- [15] S. L. N. Ford, *Journal of International Commerce and Economics*, sept. 2014, 35
- [16] D. Bourell, M. Leu, D. Rosen, *Roadmap for Additive Manufacturing – Identifying the Future of Freeform Processing*, The University of Texas at Austin, 2009
- [17] H. Wu, Y. Cheng, W. Liu, R. He, M. Zhou, S. Wu, X. Song, Y. Chen, *Ceramics International*, 42 (2016) 15, 17290–17294
- [18] Y. Zhang, S. Ge, J. Yu, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85 (2016) Part C, 166–180
- [19] S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh, *Journal of Manufacturing Processes*, 25 (2017), 185–200
- [20] Y. Jin, Y. Wan, B. Zhang, Z. Liu, *Journal of Materials Processing Technology*, 240 (2017), 233–239
- [21] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, G. Pappalettera, *Polymer Testing*, 58 (2017), 249–255
- [22] A. Dorigato, V. Moretti, S. Dul, S. H. Unterberger, A. Pegoretti, *Synthetic Metals*, 226 (2017) 7–14
- [23] W. E. Frazier, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (2014) 6, 1917–1928
- [24] J. Frketic, T. Dickens, S. Ramakrishnan, *Additive Manufacturing*, 14 (2017), 69–86
- [25] S. Wolff, T. Lee, E. Faierson, K. Ehmann, J. Cao, *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016) Part 2, 397–405
- [26] S. Pouzet, P. Peyre, C. Gorny, O. Castelnau, T. Baudin, F. Brisset, C. Colin, P. Gadaud, *Materials Science and Engineering: A*, 677 (2016), 171–181
- [27] C. Hongzhou, G. Shuping, W. Wenju, L. Li, W. Lulu, D. Linjun, L. Jingmin, R. Xiaoli, B. Li, *Journal of Dermatological Science*, 85 (2017) 2, 71–76
- [28] K. Adamski, W. Kubicki, R. Walczak, *Procedia Engineering*, 168 (2016), 1454–1457
- [29] Z. Shu, O. Pabst, E. Beckert, R. Eberhardt, A. Tünnermann, *Materials Today: Proceedings*, 3 (2016) 3, 733–738
- [30] R. Walczak, K. Adamski, A. Pokrzywnicka, W. Kubicki, *Procedia Engineering*, 168 (2016), 1362–1365
- [31] M. Bridgette, *3D technology in fine art and craft: exploration of 3d printing, scanning and milling*, Focal Press, Burlington, 2016