ISPITIVANJE ZATEZNIH SVOJSTAVA UZORAKA NAPRAVLJENIH 3D PRINTANJEM FDM POSTUPKOM OD PLA MATERIJALA

INVESTIGATION OF TENSILE PROPERTIES OF SAMPLES FROM PLA MATERIAL MADE BY 3D PRINTING FDM PROCESS

Josip Kačmarčik
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici
Bosna i Hercegovina

Branka Muminović
Institut „Kemal Kapetanović"
Univerzitet u Zenici
Bosna i Hercegovina

Aldin Ćosić
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici
Bosna i Hercegovina

Mustafa Hadžalić
Institut „Kemal Kapetanović"
Univerzitet u Zenici
Bosna i Hercegovina

REZIME
U radu su ispitana zatezna svojstva uzorka izrađenih FDM postupkom pomoću komercijalnog 3D printera Ultimaker S5. Ispitano je 12 epruvera izrađenih od PLA materijala od dva različita dobavljača, dimenzija prema ISO 527-2. Istraživan je utjecaj gustoće popune i položaja uzorka prilikom 3D printanja (orijentacija materijala). Očekivano je zabilježeno slabljenje zateznih svojstava sa manjom popunom kod 3D printanja. Uočen je utjecaj orijentacija materijala dobivenog 3D printanjem na zatezna svojstva. Manja zatezna čvrstoća je registrirana kod uspravno printanih epruveta, gdje su uzorci ispitivani u pravcu okomitom na ravni između različitih slojeva kod 3D printanja.

Ključne riječi: 3D printanje, FDM, PLA, zatezna svojstva

ABSTRACT
In this paper, tensile properties of the samples manufactured with FDM process using commercial 3D printer Ultimaker S5 are investigated. Twelve specimens made from PLA material from two different vendors, with dimensions according to ISO 527-2, are tested. Infill density and sample position during 3D printing (material orientation) are researched. As expected, decrease of tensile strength with decrease of infill density is registered. The influence of orientation of material made with 3D printing is observed. Lower tensile strength is registered in upright printed specimens, where specimens are tested in direction perpendicular to planes between different layers in 3D printing.

Keywords: 3D printing, FDM, PLA, tensile properties

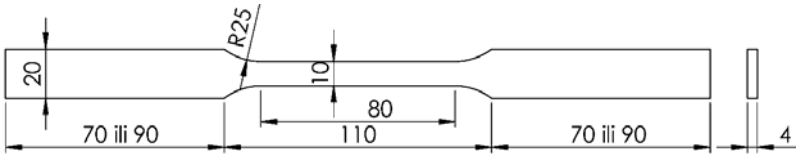
1. 3D PRINTANJE

Veliki razvoj tehnologije 3D printanja u posljednjim decenijama je doveo do njene široke primjene u brojnim poljima nauke i industrije [1,2]. Najpristupačnija, najekonomičnija i najviše primjenjiva tehnologija 3D printanja u posljednjim godinama je FDM (*Fused Deposition Modeling* - modeliranje topljenim depozitom) kod koje je proces zasnovan na ekstruziji i topljenju termoplastičnog materijala (filamenta) kroz zagrijanu mlaznicu te slaganju na postolje po prethodno definiranoj putanji, gdje se filament hladi i ukrućuje te tvori 3D element [1]. Za ovaj postupak se mogu primijeniti filamenti od različitih polimernih materijala gdje je PLA (poliaktid) najjeftiniji, najpraktičniji i najviše korišten.

Za uspješnu primjenu dijelova dobivenih 3D printanjem od PLA materijala u različitim konstrukcijama ili mehanizmima, neophodno je poznavati različita mehanička svojstva materijala koji se dobije nakon aditivnog postupka proizvodnje. Ispitivanje na zatezanja je fundamentalni i široko korišteni test za ispitivanje mehaničkih svojstava različitih materijala koji pruža osnovne informacije o mehaničkom ponašanju materijala neophodnu dizajnerima. Kako je FDM 3D printanje relativno nova tehnologija, mehanička svojstva dobivenog materijala i njegovo ispitivanje još uvijek imaju dosta nepoznanica i tema su različitih istraživanja (3-5). 3D printanje FDM postupkom uključuje velik broj procesnih parametara kao što su: materijal filamenta, gustoće popune unutrašnjeg volumena dijela materijalom, rastojanje između slojeva, orijentacija dijela na postolju mašine kod izrade, brzina i temperatura printanja itd. Svi ovi parametri mogu imati uticaj na konačne karakteristike proizvode, te samim tim i na mehanička svojstva. U ovom radu je istražen utjecaj gustoće popune i orijentacije materijala u odnosu na postolje i pravac 3D printanja (slaganje slojeva ekstrudiranog i zagrijanog materijala) na zatezna svojstva.

2. PRIPREMA EPRUVETA FDM POSTUPKOM

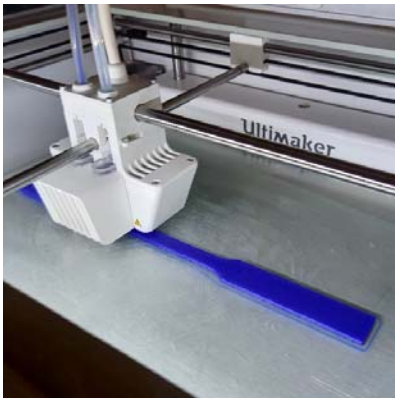
Izrada uzoraka FDM postupkom 3D printanja je urađena u okviru IDEALAB laboratorije Mašinskog fakulteta u Zenici. Upotrijebljen je komercijalni 3D printer Ultimaker S5 Pro Bundle [6]. Priprema G-koda za proces printanje je obavljena u open source softveru proizvođača, Ultimaker Cura [7], na osnovu CAD modela u .stl formatu napravljenih u komercijalnom softveru Solidworks [8]. Za ispitivanje zateznih svojstava materijala dobivenih 3D printanjem ne postoje posebni standardi, te je ovdje, kao i u drugim radovima [3-5] primijenjen EN ISO 527 standard koji definira određivanje zateznih svojstava plastike. Kod izrade CAD modela, dimenzije epruveta su definirane u skladu s ovim standardnom, slika 1.



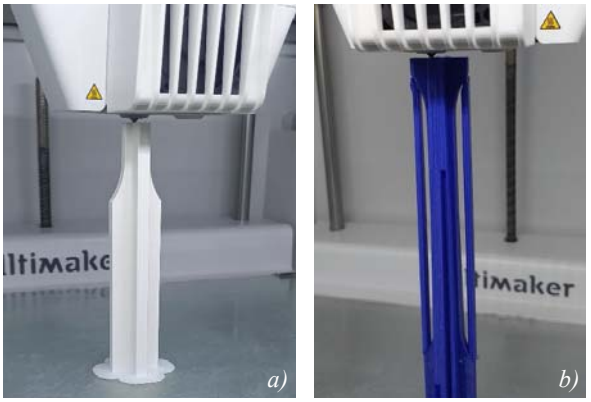
Slika 1. Epruveta prema EN ISO 527, dimenzije u mm.

Izrađeno je ukupno 12 epruveta, po 6 u dvije boje od različitih dobavljača, od plavog PLA filamenta PRIMASELECT [9] i bijelog 3D REPUBLIKA [10], kod kojih je mijenjana gustoća popune uzoraka i orijentacija kod printanja. Za unutrašnju popunu je korišten trougaoni uzorak (*infill pattern*) u tri nivoa gustoće popune (10%, 50% i 90%), gdje je su za svaki nivo uzorci printani u položenom (slika 2) i u uspravnom položaju (slika 3). Ostale postavke kod printanja su bile u skladu sa preporukama proizvođača za normalni kvalitet, tj. standardne postavke u softveru Ultimaker Cura. Zbog velikog broja parametara ovdje će se navesti samo neki najvažniji kao: visina sloja 0,15 mm, početna visina sloja 0,2 mm, brzina printanja 70 mm/s, temperatura printanja 210 °C. Kod printanja u uspravnom položaju primjenjene su različite

vrste potpora radi smanjivanja vibracija. Prvobitno je pokušano dodatno ukrutiti epruvetu kod printanja sa dva potporna stubića sa strane (slika 3a), međutim to se nije pokazalo dovoljno. Kod printana sljedećih uzorka bočni stubići su povećani, a dodane su i potpore na suženom dijelu (slika 3b). Nažalost, problem vibracija se nije uspio u potpunosti ukloniti što je rezultiralo slabijim kvalitetom oblika i površina uzoraka na gornjem kraju (u većoj ili manjoj mjeri) kao što se može vidjeti na slici 4b. Iz istog razloga su epruvete namijenjene uspravnom printanju bile nešto kraće, sa dužinom prihvatnog dijela od 70 mm, umjesto 90 mm kao kod položeno printanih epruveta (slika 1).



Slika 2. Izrada epruvete (printanje) u položenom položaju

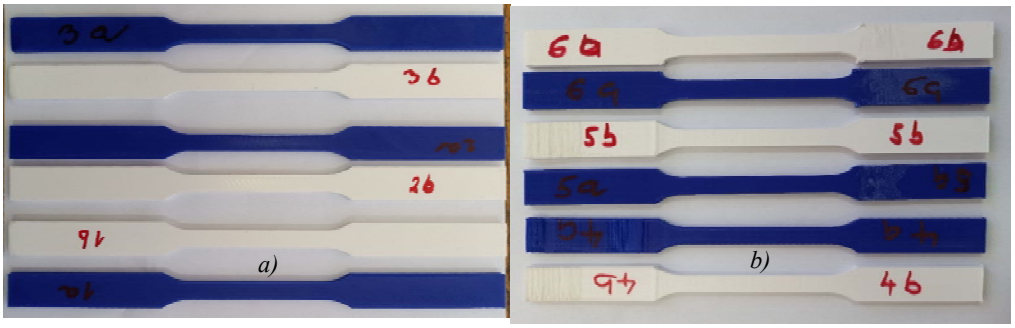


Slika 3. Izrada (printanje) epruvete u uspravnom položaja sa različitim potporama a) i b)

Epruvete su označne kombinacijom brojčane i slovne oznake, gdje su sve oznake sa karakteristikama epruveta navedene u tabeli 1. Brojčane oznake od 1 do 3 označavaju epruvete položeno printane, a od 4 do 6 uspravno printane, sa različitim nivoima gustoće popune, dok slovne oznake a i b označavaju PLA materijal od različitih proizvođača (i različitih boja). Fotografije svih izrađenih epruveta su na slici 4.

Tabela 1. Oznake i karakteristike epruveta.

Oznaka	1a	2a	3a	4a	5a	6a	1b	2b	3b	4b	5b	6b
Gustoća popune	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%	10%	50%	90%
Položaj kod printanja	položen			uspravan			položen			uspravan		
Materijal	plavi PLA PRIMASELECT						bijeli PLA 3D REPUBLIKA					

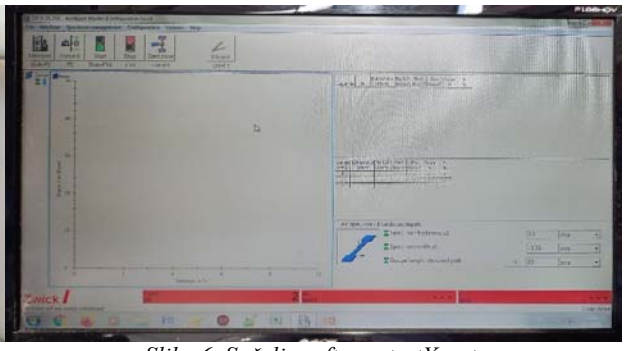


Slika 4. Epruvete izrađene 3D printanjem u a) položenom položaju i b) uspravnom položaju.

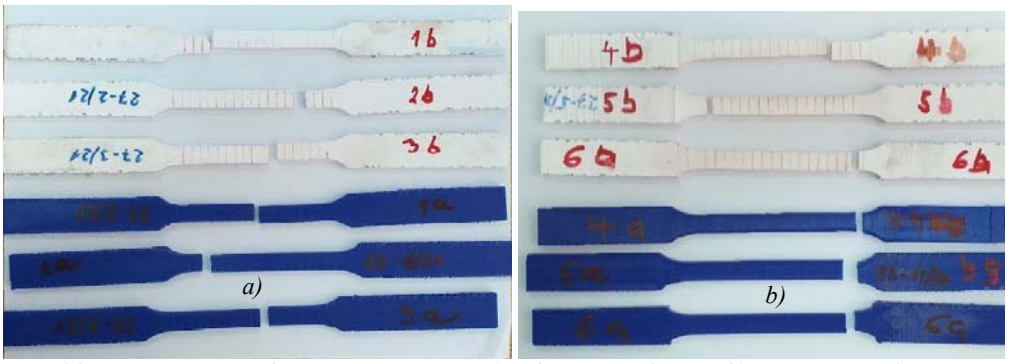
3. ISPITIVANJE NA ZATEZANJE

Ispitivanje na zatezanje je obavljeno u Mehaničkom ispitnom i kalibracionom laboratoriju Instituta „Kemal Kapetanović“ u Zenici, na univerzalnoj hidrauličnoj mašini za statička ispitivanje „Amsler“ u kombinaciji sa elektroničnim ekstenziometrom Zwick, slika 5. Ispitivanje je praćeno i rezultati mjerenja su dobiveni pomoću putem softvera testXpert, slika 6. Ispitivanje je uspješno obavljeno za sve epruvete printane u položenom položaju (oznake 1-3), dok za epruvete printane u uspravnom položaju nije bilo moguće dobiti sve rezultate. Izgled epruveta nakon ispitivanja je prikazan na slici 7.

Slika 5. Ispitivanje na zatezanje.

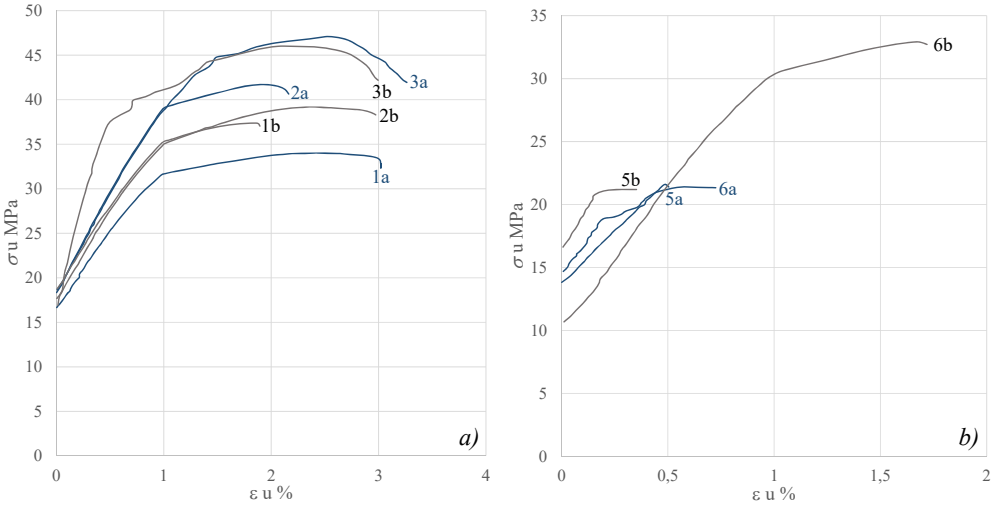


Slika 6. Sučelje softvera testXpert.



Slika 7. Epruvete izrađene 3D printanjem u a) položenom položaju i b) uspravnom položaju nakon ispitivanja na zatezanje i loma.

Dijagrami napon-deformacija su dobiveni za 10 epruveta, i prikazani su na slici 8. Za epruvete 4a i 4b nije bilo moguće dobiti dijagram jer su epruvete pukle prije mjernog područja sile. Kako su pomoću softvera testXpert dobiveni dijagrami sila-deformacija u obliku slika, naknadno je izvršena njihova digitalizacija pomoću softvera WebPlotDigitizer [11] i preračun sile u napon na osnovu površina poprečnih presjeka epruveta. Površine poprečnih presjeka su izračunate na osnovu izmjerenih dimenzija epruveta.



Slika 7. Dijagrami napon-deformacija za epruvete izrađene 3D printanjem u a) položenom položaju i b) uspravnom položaju

Registrirani modul elastičnosti, napon tečenja i zatezna čvrstoća su dati u tabeli 2. Na većini dijagrama se može razlikovati elastični i plastični dio, te je na dijagramima na prelaznim dijelovima približno definirana granica tečenja i očitan napon tečenja. Napon tečenja nije bilo moguće tačno definirati i nije ni registriran za epruvete 6a i 3b, vjerovatno zbog proklizavanja epruveta u čeljustima mašine. Kod epruvete 5a uopšte nije bilo plastičnog dijela dijagrama. Za epruvete gdje je bilo mogućno definirati napon tečenja, modul elastičnosti je izračunat kao odnos $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ na dijelu dijagrama u elastičnom području, dok je za ostale epruvete izračunat taj odnos na početnim, približno linearnim dijelovima dijagrama.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja na zatezanje: napon tečenja (R_e), zatezna čvrstoća (R_m), modul elastičnosti (E)

Oznaka epruvete	1a	2a	3a	4a	5a	6a	1b	2b	3b	4b	5b	6b
R_e / MPa	31,4	39,1	44,7	/	/	/	34,6	35,3	/	/	20,7	30,5
R_m / MPa	34,0	41,7	47,1	/	21,6	21,4	37,4	39,2	46,0	/	21,2	32,9
E / MPa	1537	2055	1780	/	1618	2296	1702	1692	4435	/	2834	1966

4. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČCI

Rezultati ispitivanja zateznih svojstava odgovaraju rezultatima u drugim istraživanjima [3-5]. Zatezna čvrstoća je izmjerena u opsegu od 21,4 MPa do 47,1 MPa sa očekivanim i uočljivim rastom čvrstoće sa povećanjem gustoće popune. Modul elastičnosti je izračunat u opsegu od 1537 MPa do 4435 MPa gdje za ograničeni broj uzoraka nije moguće sigurno utvrditi vezu i ovisnost o istraživanim parametrima printanja. Uočljiva je jasna veza zateznih svojstava sa orijentacijom uzorka tj. slabija zatezna svojstva u pravcu okomitom na podlogu i na ravni između različitih slojeva. Ovo je očigledno posljedica slabije čvrstoće između različitih slojeva u odnosu na vlakna istisnutog materijala u jednom sloju 3D printanog dijela. U ovom pravcu su zabilježena veća odstupanja rezultata, tačnije čvrstoća za epruvetu 6b je bila znatno veća od ostalih, što bi moglo značiti da se mogu očekivati i veće odstupanja zateznih svojstava u ovom pravcu. Nije uočljiva značajna razlika između mehanički svojstava epruveta dobivenih od PLA materijala od različitih proizvođača.

Nedostatak istraživanja je rad na uređaju prvenstveno namijenjenom za ispitivanje metalnih materijala i visokim opsegom mjerne sile za PLA uzorak što je za posljedicu imalo

nemogućnost registracije zatezne čvrstoće za dvije epruvete. Ipak, za te dvije epruvete, 4a i 4b se može konstatirati da je zatezna čvrstoća bila manja od 20 MPa, što potvrđuje prethodno zaključke o slabljenju zateznih svojstava sa smanjivanjem gustoće popune i osobito s uspravnim položajem kod printanja. Također, za dodatne i sigurnije zaključke trebalo bi provesti istraživanje na većem broju uzoraka i poboljšati postupak izrade epruveta u uspravnom položaju osmišljavanjem dodatnih potpora ili drugog oblika epruveta.

Na osnovu rezultata i usporedbom sa rezultatima drugih istraživanja [3-5] može se zaključiti da je proces 3D printanja FDM postupkom pouzdan i da može pružiti ponovljiva zatezna svojstva u pravcu u ravni slojeva kod 3D printanja. Ipak, u pravcu okomitom na ravni slojeva bi se mogla očekivati nešto veća nepouzdanost i promjenljivost zateznih svojstava, što bi trebalo ispitati dodatnim istraživanjima.

Kod primjene 3D printanja treba biti svjestan i uzeti u obzir promjenu zateznih svojstava sa smanjivanjem gustoće popune i osobito sa orijentacijom materijala u odnosu na pravac printanja.

5. REFERENCE

[1] Redwood, B; Schöffer, F.; Garret, B.: The 3D printing handbook: technologies, design and applications, 3D Hubs, 2017.

[2] Baručija, A.; Kačmarčik, J.; Hadžalić, M.: Mujagić, D.;Primjena printanih 3D modela u procesu livenja rezervnih dijelova, 6th Conference „MAINTENANCE 2020“, University of Zenica, Faculty of Mechanical Engineering, Zenica, 2020.

[3] Pandzic, A.; Hodzic, D.; Milovanovic, A.: Effect of infill type and density on tensile properties of plamaterial for FDM process, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, Vienna, 2019

[4] Khatwani, J.; Srivastava, V.: Effect of process parameters on mechanical properties of solidified PLA parts fabricated by 3D Printing process, 3D printing and additive manufacturing technologies. Springer, Singapore, 2019.

[5] Ebel, E.; Sinnemann, T.: Fabrication of FDM 3D objects with ABS and PLA and determination of their mechanical properties, RTejournal, 11, 2014

[6] Ultimaker S5, Ultimaker BV (https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5, pristupljeno 28.04.2021)

[7] Ultimaker Cura, Ultimaker BV (https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura, pristupljeno: 28.04.2021).

[8] Solidworks.com, Dassault Systèmes SolidWorks Corporation (https://solidworks.com, pristupljeno 28.04.2021).

[9] PRIMASELECT™ PLA, PrimaCreator (https://primacreator.com/collections/pla/products/primaselect™-pla?variant=61738769419, pristupljeno 28.04.2021)

[10] PLA 3D Republika 2.85mm 750g, 3D Republika (https://www.3drepublika.com/proizvod/pla-3d-republika, pristupljeno 28.04.2021)

[11] WebPlotDigitizer (https://automeris.io/WebPlotDigitizer, pristupljeno 28.04.2021)