

Uticaj tehnologije 3D štampe na dimenzionu tačnost proizvoda

Obrad Spaić, Mirjana Jokanović, Aleksandra Koprivica, Srđan Ćurić

Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Trebinje, BiH

obrad.spaic@fpm.ues.rs.ba, mirjana.jokanovic@fpm.ues.rs.ba,

aleksandra.koprivica@fpm.ues.rs.ba, srdjan.curic@fpm.ues.rs.ba

Sažetak—Danas se složeni trodimenzionalni objekti često proizvode procesima 3D štampanja iz računarskih dizajna (CAD modela), obično uzastopnim dodavanjem materijala sloj po sloj, zbog čega se nazivaju i aditivnom proizvodnjom. Zbog svojih brojnih prednosti, kao što su: ekonomičnija proizvodnja dimenzionalno prihvatljivih oblika, te relativno velika brzina štampe, uglavnom su u upotrebi 3D printeri koji kao osnovnu komponentu koriste plastičnu nit, koja se topi i istiskuje kroz metalnu diznu, te lijepi za podlogu ili prethodni sloj, prema komandama G koda, koje dobija iz odgovarajućeg softvera. Debljina sloja se kreće od 0.15 mm do 0.2 mm, a površina koja se formira ima jasno slojevitou strukturu. U radu je prikazana uporedna analiza dimenzione tačnosti objekta izrađenog inkjet postupkom - 3D printerom koji za materijal koristi plastiku, u odnosu na objekat štampan iz praha i vezivnog sredstva FDM postupkom, za različite debljine slojeva.

Ključne riječi—dimenziona tačnost; 3D štampa.

I. UVOD

Razvoj informacionih tehnologija i Interneta, te konstantna promjenljivost navika i potreba kupaca postavljaju visoke zahtjeve pred proizvođače različitih vrsta proizvoda. Sa jedne strane se očekuje da isti budu što jeftiniji i što kvalitetniji, a sa druge strane, kao imperativ se nameće što kraće vrijeme proizvodnje. Kao jedno od rješenja za prethodno postavljene kriterijume može se smatrati aditivna proizvodnja, koja ima veliku primjenu u procesu razvoja novih proizvoda.

S obzirom na svoju fleksibilnost i kvalitet izrađenih dijelova, ove tehnologije se danas sve više primjenjuju, kako u izradi alata za proizvodnju, tako i za izradu završnih proizvoda, najčešće u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji.

Glavne prednosti metoda aditivne proizvodnje, u odnosu na konvencionalne čine: univerzalnost, tj. za izradu modela različitih geometrijskih oblika nije neophodna posebna priprema uređaja i opreme, mogućnost izrade finalnih sklopova, minimalan gubitak materijala, visoka mogućnost kombinovanja više materijala i sl.

Jedan od ključnih koraka u procesu aditivne proizvodnje je izbor, prilagođavanje i podešavanje informacija o procesu,

gdje je uključena i debljina sloja. To direktno utiče na kvalitet i dimenzionu tačnost štampanog objekta.

Dimenziona tačnost modela predstavlja stepen saglasnosti između proizvedene dimenzije i njene prethodno dizajnirane specifikacije [1].

M. N. Islam je, na osnovu svojih istraživanja, došao do zaključka da su posmatrane dimenzije u xy ravni uvijek ispod prethodno definisanih, dok su dimenzije u pravcu z ose uvijek iznad onih definisanih specifikacijama. Isti autor takođe, naglašava da su dimenzije rupe uvijek ispod dozvoljenih [1].

John Kechagias i dr. navode da je dimenziona tačnost spoljnih dimenzija pod uticajem kretanja sječiva i debljine sloja, dok su dimenzione tačnosti unutrašnjih dimenzija u funkciji debljine sloja [2].

Hirpa G. Lemu u svojoj studiji apostrofira da se dimenziona odstupanja dešavaju na printanim modelima i da veličina odstupanja zavisi od vrste formata prenosa datoteke [3].

G. Arumaikkannu i dr. istraživali su uticaj parametara aditivne proizvodnje na kvalitet štampanog objekta i otkrili da su debljina sloja i orijentacija gradnje modela signifikantni [4].

II. TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE

Tehnologije za aditivnu proizvodnju su komercijalno prvi put upotrijebljene 1987. godine, od strane proizvođača 3D Systems. Do danas je razvijen veliki broj postupaka, koji se po određenim karakteristikama mogu svrstati u zajedničke grupe. Radi uvođenja sistematizacije, standardi ISO i ASTM su klasifikovali ove mnogobrojne procese u sedam osnovnih grupa [1]:

- Fotopolimerizacija u kadi,
- Fuzija praškastog materijala,
- Laminacija folija,
- Vezivna 3D štampa,
- Ekstrudiranje materijala,
- Direktna 3D štampa,

TABELA I.

SISTEMATIZACIJA POSTUPAKA NA OSNOVU ISO/ASTM STANDARDA [5]

GRUPA	NAČIN GENERISANJA KONTURE	KOMERCIJALNI NAZIV TEHNOLOGIJE	SKR.
Fotopolimerizacija u kadi	laser, projektor, printerska glava	Stereolitografija	SLA
Fuzija praškastog supstrata	laser, mlaz elektrona	Selektivno lasersko sinterovanje Selektivno lasersko topljenje Topljenje mlazom elektrona Direktno lasersko sinterovanje metala	SLS SLM EBM DMLS
Laminacija folija	laser, nož	Proizvodnja laminiranih objekata Laminacija plastičnih folija	LOM PSL
Vezivna 3D štampa	printerska glava	Vezivna 3D štampa	3DP
Ekstrudiranje materijala	glava ekstrudera	Deponovanje istopljenog filameta	FDM
Direktna 3D štampa	printerska glava i UV	PolyJet, PolyJet Matrix	PJ

- Nanošenje materijala primjenom usmjerene energije.

Detaljniji prikaz svake grupe postupaka, sa načinom generisanja konture (sloja) i komercijalnim nazivima tehnologija, prikazan je u tabeli I. Klasifikacija je izvršena po kriterijumu načina generisanja konture, odnosno sloja, koji je direktna posljedica vrste osnovnog materijala koji se koristi u procesu. Prije uvođenja standardizacije, podjela sistema je vršena na osnovu vrste osnovnog materijala, pa su, shodno tome, sistemi dijeljeni na sisteme kod kojih je osnovni materijal [5]:

1. fluid u tečnom stanju (tečni fotopolimer),
2. u praškastom stanju i
3. čvrstom stanju (folije).

Generalno, sve tehnologije aditivne proizvodnje mogu se objasniti na isti način.

Prvobitno se, korišćenjem odgovarajućih softvera, formira 3D računarski model (CAD model), koji je zatim potrebno izvesti u datoteku, čitljivu uređaju (STL, WRL, WRML, 3DS, OBJ). Sljedeći korak predstavlja podjelu objekta na slojeve, prema zadatim parametrima, te podešavanje štampača. Nakon toga, model se izrađuje na uređaju. Zavisno od tehnologije koja se koristi, poslednja faza obuhvata postprocesiranje, koje podrazumijeva finalnu obradu štampanog objekta (infiltracija, uklanjanje potpora, bušenje, farbanje i sl). Prethodno navedeno ilustrovano je na Sl. 1.

Razvojem novih tehnologija aditivne proizvodnje, izrada finalnih, funkcionalnih dijelova i sklopova, spremnih za



Slika 1. Šema aditivne proizvodnje [6]

ugradnju u složene sisteme, postala je imperativ. Kako bi se obezbijedile mehaničke karakteristike objekata, koje su identične ili vrlo slične dijelovima izrađenim konvencionalnim metodama, poslednjih godina se dosta radi na razvoju novih i poboljšanju postojećih materijala.

Najčešće korišćeni materijali u sistemima aditivne proizvodnje su materijali na bazi polimera (plastični materijali), ali se u poslednje vrijeme sve veći akcenat stavlja na metalne materijale, keramike i kompozite. Kao polimerni materijali, najčešće se koriste fotoosjetljive polimerne smole, zatim ABS, PLA, PMMA, PP, PVC, kao i polimeri ojačani staklom, keramikom i sl. Od metalnih materijala koriste se, kako čisti metalni prahovi, tako i legure, najčešće nerđajući čelici, legure aluminijuma, hroma, kobalta, nikla, itd [5].

Osim prethodno pomenutih, moguće je upotrebljavati i razne vrste keramičkih prahova na bazi cinka ili aluminijuma, zatim prahove na bazi gipsa, celuloze, razne vrste pješčanih prahova, biokompatibilne prahove i sl [5].

III. 3D ŠTAMPAČI

Tehnologija, koju koriste 3D štampači za formiranja čvrstih objekata, jedinstvena je po tome što se zasniva na dodavanju i spajanju materijala u slojevima, što je suprotno klasičnim metodama, kao što su glodanje, struganje, brušenje itd, kod kojih se objekti formiraju procesima mehaničkog uklanjanja materijala. Do danas je razvijeno više 3D tehnologija koje, kao materijal, koriste: drvo, polimere, metal, gips, skrob, keramiku, te kompozite u raznim oblicima. Među ovim tehnologijama značajno mjesto zauzimaju Ekstrudiranje materijala (FDM) i Vezivna 3D štampa (3DP).

FDM (Fused Deposition Modeling) je tehnologija za izradu 3D modela polaganjem rastopljenog materijala (plastomera industrijskog kvaliteta) slojevito, sloj na sloj. Proces se sastoji u zagrijavanju plastomera do polutekućeg stanja i taloženja u finim slojevima duž putanje ekstrudera. Ova tehnologija predstavlja dobru kombinaciju čvrstoće i završne površinske obrade, po prihvatljivoj cijeni i vremenu

proizvodnje. Jedan od 3D štampača koji rade na principu FDM tehnologije je i Granty – S, Sl. 2.



Slika 2. Granty - S [7]

Ovaj model štampača omogućava lako uklanjanje modela, i rješavanje problema sa štampanjem objekata većih dimenzija. Jedna od njegovih najvažnijih karakteristika je ekonomična proizvodnja prototipova. Na ovom štampaču je moguća izrada 3D modela željenog objekta, tačnosti +/- 0,10 mm, od plastike, karbonskih vlakana, metala, drveta i sl.

3DP (3D Print) tehnologija se odnosi na grupu tehnologija koje za izradu objekata koriste procese bazirane na inkjet tehnici. Štampači koji rade na ovoj tehnologiji sastoje se od glave s mlaznicama za doziranje veziva, spremnika sa prahom, radne površine i valjka za nivelisanje praha. Postupak se zasniva na nanošenju sloja praha, nakon čega glava za štampanje raspršuje vezivno sredstvo i po potrebi boju. Jedan od štampača ove tehnologije je ZPrinter 450, Sl. 3 [4], baziran na glavnom materijalu u obliku praha, koji omogućava visoku tačnost, štampanje u boji, i štampanje složenih struktura. Krajnji rezultat je model sa teksturom u obliku keramike, koji može biti vrlo složenog oblika.

ZPrinter 450 sadrži najnovije funkcije koje automatizuju i pojednostavljuju proces 3D štampanja u boji. Ugodan dizajn i jednostavnost, u kombinaciji sa kompozitnim materijalima visokih performansi, omogućili su široku upotrebu ovog štampača. Važno je, takođe, naglasiti da se dobija precizan model prototipa od 450 DPI u boji, pet do deset puta brže od ostalih štampača za istu namjenu.



Slika 3. ZPrinter 450 [4]

ZPrinter 450 nudi mogućnost štampanja prototipa proizvoda različitih dizajna, reljefnih mapa, ljudskih srca, arhitektonskih modela (kako bi građevinski radnici imali jasniju sliku planova dizajna itd.), što ga stavlja na listu jednog od najpouzdanijih i najkvalitetnijih štampača. Njegova najveća prednost je, svakako, mogućnost štampanja prototipova u boji [4].

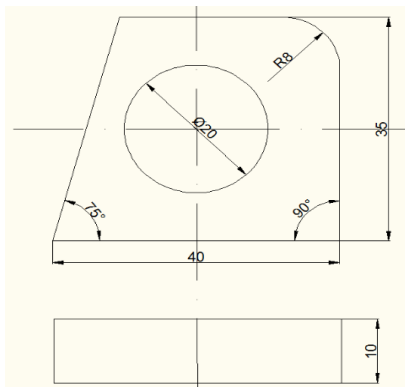
IV. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalna ispitivanja su izvedena u laboratorijama, na Fakultetu za proizvodnju i menadžment Trebinje. Primjenom softvera AutoCad 2013, nacrtan je 2D crtež objekta za ispitivanje, Sl. 4, a zatim na osnovu 2D modela, kreiran 3D model, prikazan na Sl. 5.

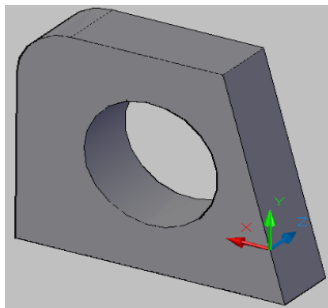
Kreirani 3D model je transportovan u STL datoteku, čitljivu 3D štampačima, nakon čega je izvršeno štampanje objekta na dva različita 3D štampača: ZPrinter 450 i Granty – S. Štampanje je izvršeno u horizontalnom položaju objekta, tako da su dužina i širina objekta obrazovale horizontalnu (xy) ravan, a debljina osu z.

Jedan od uticajnih faktora na dimenzionu tačnost štampanog objekta je debljina sloja. Zbog toga je štampanje objekta izvedeno sa svim debljinama slojeva raspoloživim na 3D štampačima. Raspoložive debljine slojeva na 3D štampačima: ZPrinter 450 i Granty-S, kao i broj slojeva za štampanje objekta debljine 10.00 mm pri odgovarajućoj debljini sloja prikazani su u Tabeli II.

Iz Tabele II se vidi da je kod štampača ZPrinter 450 najmanja debljina sloja 0.0875 mm, a najveća 0.125 mm. Kod štampača Granty-S minimalna debljina sloja je 0.125 mm, a maksimalna 0.2 mm.

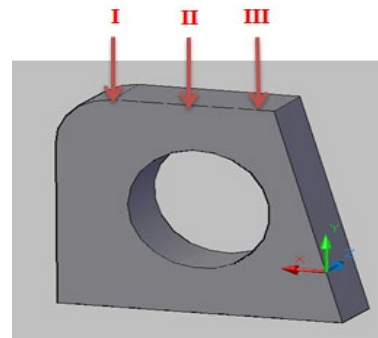


Slika 4. 2D crtež modela

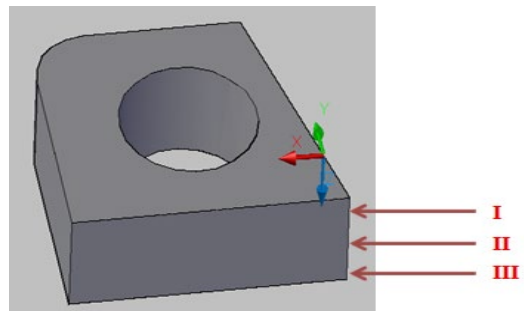


Slika 5. 3D model

Slika 6. Isprintani modeli



Slika 7. Mjesta mjerenja visine



Slika 8. Mjesta mjerenja dužine

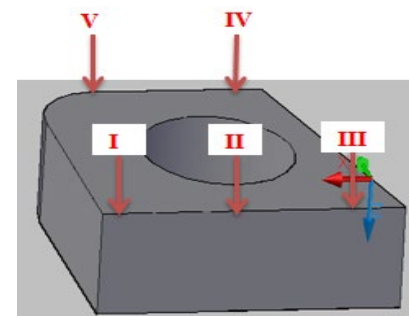
TABELA II. VELIČINA DEBLJINE SLOJEVA I BROJ SLOJEVA

	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
ZPrinter 450				
Debljina sloja	0.125	0.1125	0.1	0.0875
Broj slojeva	80	89	100	114
Granty-S				
Debljina sloja	0.2	0.175	0.15	0.125
Broj slojeva	50	57	67	80

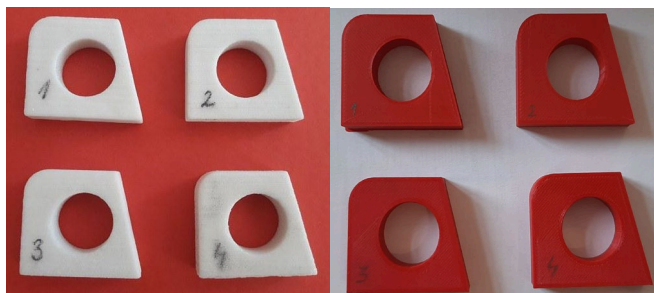
Bijeli modeli na Sl. 6 štampani su na 3D štampaču ZPrinter 450, a crveni na štampaču Granty-S.

Nakon štampanja izvršeno je mjerenje dimenzija objekata (visine $h = 35$ mm, dužine $l = 40$ mm i debljine $s = 10$ mm) na svim modelima prikazanim na Sl. 6. Dužina i širina objekta su mjerene na tri mjerna mjesta, Sl. 7 i Sl. 8, a debljina na pet mjernih mjesta, Sl. 9.

Rezultati mjerenja modela štampanih na ZPrinteru 450 prikazani su u Tabeli III, a na printeru Granty - S u Tabeli IV.



Slika 9. Mjesta mjerenja debljine



Iz rezultata mjerenja se vidi da je za modele štampane na štampaču ZPrinter 450 odstupanje srednje vrijednosti širine pri debljini sloja 0.0875 mm pozitivno i dužine pri debljini sloja 0.125 mm jednako nuli, a odstupanje srednje vrijednosti širine i dužine (dimenzija u xy ravni) za ostale debljine slojeva kao i za

TABELA III. DIMENZIJE MODELA ŠTAMPANOG NA ŠTAMPAČU ZPRINTER 450

Veličina	Mjesto mjerenja	Debljina sloja			
		0.0875	0.100	0.1125	0.125
Širina	I	35.06	34.83	34.81	34.77
	II	35.04	34.79	34.83	34.74
	III	35.05	34.75	34.83	34.74
	Srednja vrijednost	35.05	34.79	34.82	34.75
Dužina	I	39.73	39.70	39.71	40.03
	II	39.81	39.71	39.74	40.06
	III	39.78	39.76	39.75	39.92
	Srednja vrijednost	39.77	39.72	39.73	40.00
Debljina	I	10.56	10.32	10.17	10.15
	II	10.55	10.22	10.16	10.12
	III	10.35	10.20	10.18	10.10
	IV	10.58	10.39	10.34	10.27
	V	10.44	10.19	10.22	10.13
	Srednja vrijednost	10.50	10.26	10.21	10.15

TABELA IV. DIMENZIJE MODELA ŠTAMPANOG NA ŠTAMPAČU GRANTY - S

Veličina	Mjesto mjerenja	Debljina sloja			
		0.125	0.15	0.175	0.2
Širina	I	34.92	34.91	34.79	34.78
	II	34.9	34.90	34.78	34.79
	III	34.93	34.92	34.79	34.78
	Srednja vrijednost	34.92	34.91	34.79	34.78
Dužina	I	39.88	39.87	39.81	39.79
	II	39.89	39.86	39.77	39.78
	III	39.92	39.88	39.80	39.80
	Srednja vrijednost	39.89	39.87	39.79	39.79
Debljina	I	9.45	9.53	9.67	9.67
	II	9.53	9.58	9.66	9.66
	III	9.55	9.59	9.62	9.61
	IV	9.53	9.59	9.65	9.63
	V	9.55	9.53	9.66	9.65
	Srednja vrijednost	9.52	9.56	9.65	9.64

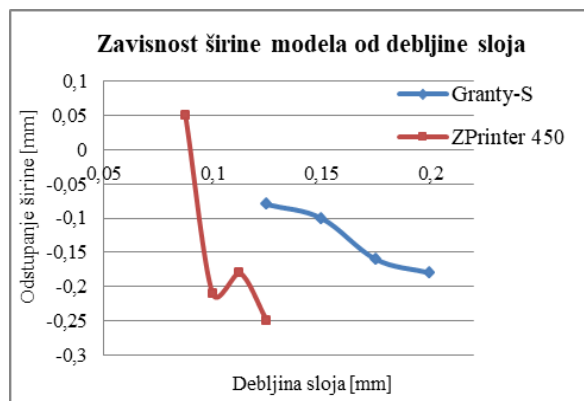
sve debljine slojeva za modele štampane na štampaču Granty-S negativno. Odstupanje visine od nazivne mjere za modele štampane na štampaču ZPrinter 450 je pozitivno, a na štampaču Granty-S negativno, za sve debljine slojeva.

Srednje vrijednosti odstupanja mjerenih veličina (širine, dužine i debljine) od nazivnih mjera prikazane su dijagramima na Sl. 10, Sl. 11 i Sl. 12.

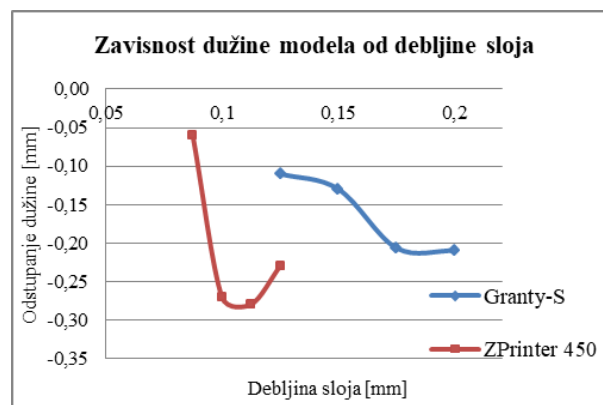
Sa dijagrama iz Sl. 10 se vidi da se odstupanje širine od nazivne mjere za modele štampane na oba 3D štampača povećava sa povećanjem debljine sloja, s tim što je kod štampača Granty-S znatno manje i odstupanje i povećanje odstupanja sa povećanjem debljine sloja. Za modele štampane na štampaču ZPrinter 450 minimalno odstupanje širine modela od nazivne mjere iznosi +0.05 mm pri debljini sloja od 0.825 mm, a maksimalno -0.25 mm, pri debljini sloja od 0.125 mm. Za modele štampane na štampaču Granty-S minimalno odstupanje širine modela od nazivne mjere iznosi -0.08 mm, pri debljini sloja od 0.125 mm, a maksimalno -0.18 mm, pri debljini sloja od 0.2 mm.

Odstupanje dužine od nazivne mjere za modele štampane na oba štampača je negativno, s tim što je kod modela štampanih na štampaču Granty-S manje odstupanje i manje zavisi od debljine sloja, Sl. 11.

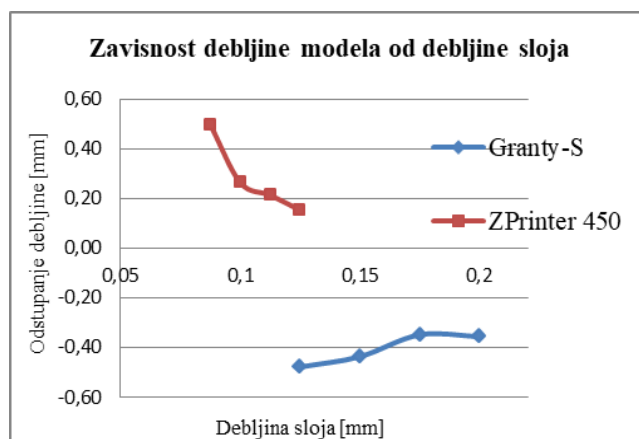
Za modele štampane na štampaču ZPrinter 450 minimalno odstupanje srednje vrijednosti dužine modela od nazivne mjere iznosi -0.25 pri debljini sloja od 0.825 mm, a maksimalno -0.25 mm pri debljini sloja od 0.10 i 0.1125 mm.



Slika 10. Zavisnost širine modela od debljine sloja



Slika 11. Zavisnost dužine modela od debljine sloja



Slika 12. Zavisnost debljine modela od debljine sloja

Za modele štampane na štampaču Granty-S minimalno odstupanje dužine modela od nazivne mjere iznosi -0.11 mm,

pri debljini sloja od 0.125 mm, a maksimalno -0.22 mm, pri debljini sloja od 0.175 i 0.20 mm.

Iz Sl. 11 se vidi da je odstupanje srednje vrijednosti visine modela štampanih na štampaču ZPrinter 450 pozitivno i ima maksimalnu vrijednost pri minimalnoj debljini sloja (0.0875 mm). Sa povećanjem debljine sloja odstupanje srednje vrijednosti debljine modela opada i ima minimalnu vrijednost +0.15 mm, pri debljini sloja od 0.125 mm. Odstupanje srednje vrijednosti debljine modela štampanih na štampaču Granty-S ima maksimalnu vrijednost -0.58 mm, pri minimalnoj debljini sloja (0.125 mm) i sa povećanjem debljine sloja opada do -0.36 mm, pri debljini sloja 0.2 mm.

ZAKLJUČAK

3D štampači nude mogućnost izrade proizvoda vrlo složenih oblika u relativno kratkom vremenu, na osnovu 3D modela. Geometrijski oblici, koji se ne mogu postići konvencionalnim proizvodnim tehnologijama, ne predstavljaju problem za 3D štampače. Iz provedenih analiza može se zaključiti da odstupanje dimenzija od nazivne mjere značajno zvisi i od primjenjene tehnologije 3D štampe, kao i od izabrane debljine sloja. Zbog toga tehnologiju 3D štampe i debljinu sloja treba birati u zavisnosti od zahtjevane tačnosti geometrijskih dimenzija.

LITERATURA

- [1] M. N. Islam, B. Boswell, A. Pramanik, "An Investigation of Dimensional Accuracy of Parts Produced by Three-Dimensional Printing", Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 1, 2013.
- [2] J. Kechagias, A. Koutsomichalis, P. Stavropoulos, I. Ntintakis, "Dimensional Accuracy Optimization of Prototypes Produced by PolyJet Direct 3D Printing Technology", Advances in Engineering Mechanics and Materials, 2014, str. 61-65.
- [3] H. G. Lemu, S. Kurtovic, "3D Printing for Rapid Manufacturing: Study of Dimensional and Geometrical Accuracy", IFIP International Federation for Information Processing 2012, str. 470-479
- [4] G. Arumaikkannu, N. A. Kumar. R, Saravaanan, "Study on the Influence of Rapid Prototyping Parameters on Product Quality in 3D Printing", Dostupno

na:<https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2008/2008-43-Arumaikkannu.pdf>

- [5] D. Movrin, "Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe, doktorska disertacija", Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2017.
- [6] M. Šljivić, M. Stanojević, N. Grujović, I. Kuzmanović, Z. Pašalić, "Razvoj industrijskih proizvoda pomoću aditivne proizvodnje", COMETA 2014, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, 2014, str. 103-110.
- [7] https://www.google.ba/search?q=PRINTER+Granty-S&tbm=isch&ved=2ahUKEwib0dytxcvnAhUGG-wKHTDtCxYQ2-cCegQIABAA&oq=PRINTER+Granty-S&gs_l=img.3...11401.12618..12939...0.0..0.201.884.4j3j1.....0....1..gws-wiz-img.oCdHa2TpkQY&ei=F7BDXtvpMla2sAew2q-wAQ&bih=654&biw=1366#imgrc=UNzNQ0eeHbDGsM (Pristupljeno: 10.02.2020. godine)

ABSTRACT

Today, complex three-dimensional objects are often produced by 3D printing processes from computer-aided design (CAD models), usually by the successive addition of material layer by layer, which is why they are also called additive manufacturing. Due to their many advantages, such as: more economical production of dimension-acceptable shapes and relatively high printing speed, 3D printers are mainly used as a basic component using a plastic thread that melts and squeezes through a metal nozzle and is nice for the substrate or previous layer, according to the G code commands it receives from the appropriate software. The thickness of the layer ranges from 0.15 mm to 0.2 mm, and the formed surface has a clearly layered structure. The paper presents a comparative analysis of the dimensional accuracy of an object made by an inkjet process - a 3D printer that uses plastic for a material, relative to an object printed from powder and a binder by the FDM process, for different thicknesses of layers.

THE IMPACT OF 3D PRINTING TECHNOLOGY ON THE DIMENSIONAL ACCURACY OF PRODUCTS

Obrad Spaić

Mirjana Jokanović
Aleksandra Koprivica
Srđan Ćurić