

## ISTRAŽIVANJE KARAKTERISTIKA PROCESA 3D PRINTANJA (3DP)

### RESEARCH OF 3D PRINTING PROCESS CHARACTERISTICS

**Adis Fajić, dipl.ing,**  
Federalno ministarstvo razvoja,  
poduzetništva i obrta  
Mostar

**doc.dr. Dragi Tiro, dipl.ing,**  
Univerzitet „Dž. Bijedić“  
Mašinski fakultet  
Mostar

**dr.sc.Tomislav Galeta, dipl.ing,**  
Strojarski fakultet  
Slavonski Brod

**mr. Alan Topčić, dipl.ing,**  
Univerzitet u Tuzli  
Mašinski fakultet

#### REZIME

*Proces 3D printanja kao i sve Rapid Prototyping tehnologije koje svoj rad zasnivaju na oblikovanju "slobodne forme" okarakterizirane su u većoj ili manjoj mjeri određenim stepenom odstupanja proizvedenih dijelova od polaznog 3D CAD modela. U cilju determiniranja veličine odstupanja u radu je izvršena analiza dimenzionalne tačnosti prototipova zasnovanih na bazi škorba i gipsa proizvedenih procesom 3D printanja, kao i analiza troškova proizvodnje istih.*

**Ključne riječi:** 3D printanje, preciznost, troškovi

#### ABSTRACT

*3D printing process, as well as all other Rapid Prototyping technologies, which found their work on "free form" shaping, is more or less characterized by certain level of departing from produced parts of initial 3D CAD model. With the aim to determine the size of departure, the analysis of dimensional precision of prototypes formed on the basis of starch and gypsum produced by 3D printing process, as well as the analysis of their production expenses are conducted in this paper.*

**Key words:** 3D printing, precision, expenses

#### 1. UVOD

Izbor postupka proizvodnje zahtjeva odgovarajući metodološki pristup, koji se svodi na iznalaženje najbolje veze između samog procesa i zahtjeva konstruktora, tj. neodvojivo je povezan s konstrukcijskim oblikovanjem i izborom materijala. Svaki proizvodni proces mora osigurati željenu kvalitetu za zadani materijal, oblik, dimenzije, stanje površine, tolerancije izratka uz minimalne troškove i vrijeme izrade [1]. Dakle, za usporedbu i izbor postupka proizvodnje svaki proizvodni postupak prikladno je opisati navedenim skupom atributa.

Razvojem materijala i sistema za Rapid Prototyping dolazi do sve šire implementacije ovih tehnologija u različitim područjima ljudskih aktivnosti. Jedna od tehnologija koja nudi iznimno povoljan odnos cijene, primjene i kvaliteta dobivenih proizvoda je proces 3D printanja. Ovaj RP proces zasnovan je na generisanju čvrste strukture dijela sukcesivnim nanošenjem i učvršćivanjem gradivnog praha koji u zavisnosti od željene primjene

proizvedenih dijelova može biti zasnovan na: gipsu, škrobu, keramici, itd, te implementaciji odgovarajućih operacija postprocesuiranja.

### **1.1. Poligon i ograničenje istraživanja**

Ispitivanje opravdanosti primjene 3DP procesa izvršeno je neposrednim praćenjem procesnih koraka izrade modela kroz identifikaciju karakteristika procesa utvrđenih teoretskim istraživanjem. U tu svrhu snimano je vrijeme izrade dva seta od 3 komada prototipova od materijala na škrobnjoj (elastični model) i gipsnoj osnovi (kruti model), i izvršen proračun pojedinačnih troškova izrade. Također je mjerena dimenziona tačnost procesa u funkciji primjenjenih materijala. 3D modeliranje prototipova je izvršeno u softveru SolidWorks 2003, dok je definiranje radnih parametara rađeno u softveru ZPrint 6.2.

Izrada dijelova izvršena je na 3D printeru Z310, proizvođača Z Corporation Burlington, USA. Elastični prototip (simetričan dio sa sferičnom površinom i detaljem rupe malog promjera) je izrađen od praška zp15e, veziva zb51 i naknadno infiltriran elastomerom. Kruti prototip (simetričan dio sa tankim rebrima i detaljem za uskočni spoj) izrađen je od praška zp102, veziva zb56 i naknadno infiltriran cijanoakrilatom.

## **2. ANALIZA VREMENA IZRADE PROTOTIPOVA**

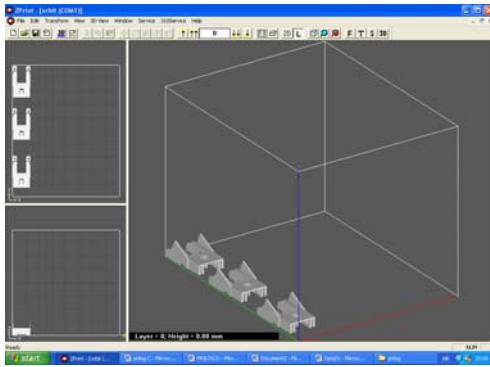
Jedna od glavnih pokretačkih snaga proizvodnih firmi, neprestana je potreba za kraćim rokovima razvoja novih proizvoda i smanjenja troškova, kako bi se zadržala profitabilnost i konkurentnost. Na slici 2.1. je prikazan procesni tok izrade krutog prototipa od elemenata pripreme gradivnih parametara u ZPrint softveru do infiltriranja cijanoakrilatom, a u tabeli 2.1. su respektivno prikazana vremena izrade oba prototipa.

Analizom vremena izrade, može se zaključiti da se kompletan procesni tok izrade prototipova može realizovati u jednom danu. Prilikom izrade seta od dva ili više komada istovremeno (ovisno o prostornom kapacitetu gradnje RP mašine) vrijeme preprocesuiranja se ne povećava kao ni vrijeme sušenja modela u RP mašini i naknadnog toplotnog tretmana. Dakle, uvećava se samo vrijeme fizičkog procesuiranja prototipova (ZPrint 6.2 softver), i multiplikativno se uvećava vrijeme ostalih faza postprocesuiranja.

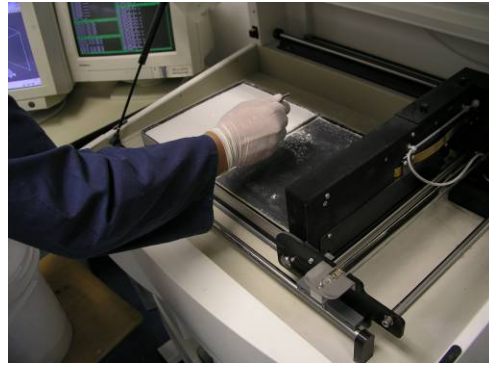
## **3. PRORAČUN TROŠKOVA IZRADE PROTOTIPOVA**

Većina ulaznih parametara za proračun ukupnih troškova ispisa na ZCorp 3D printeru je definisana u ZPrint softveru i oni obuhvataju:

- vrstu materijala (bazni prah i vezivo),
- ukupnu površinu i volumen modela,
- ukupno vrijeme ispisa i broj otisnutih tačkica,
- model 3D printera i
- kolor tip izrade (jednobojni ili višebojni).



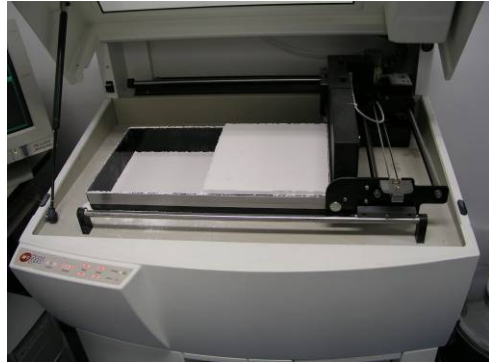
1.



2.



3.



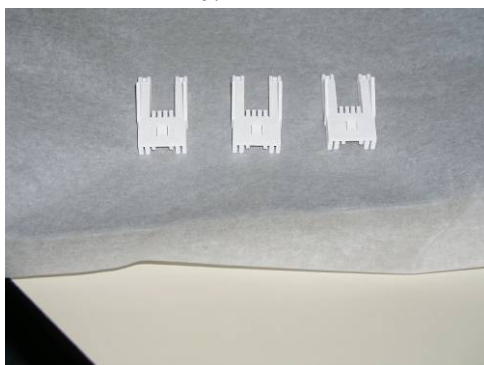
4.



5.



6.



7.



Slika 2.1. Elementi procesnog toka na RP radnom mjestu (1-priprema gradivnih parametara u Z Print softveru, 2- priprema printera, 3- slojevita proizvodnja, 4- okončanje procesa sušenja i otvaranje printera, 5- prenos RP dijelova u kompresionu jedinicu, 6- čišćenje strujom komprimiranog zraka, 7- zeleni modeli i infiltriranje zelenih modela cianoakrilatom)

Tabela 2.1. Ukupna vremena izrade po koracima 3DP procesog toka (prikaz prosječnog vremena pojedinačne izrade i seta od 3 komada za elastične i krute modele)

Procesni koraci	Vrijeme izrade			
	Elastični model		Kruti model	
	[min/kom]	[min/set]	[min/kom]	[min/set]
<b>CAD modeliranje</b>				
Dizajniranje modela i pretvaranje u STL format	60		120	
<b>Preprocesuiranje</b>				
Komunikacija s kupcem (razmjena i provjera STL modela)	30		30	
Priprema gradivnih parametara za ispis u Zprint softveru	30		30	
Priprema printera (umetanje odgovarajućeg praha i veziva)	30		30	
<b>Izrada modela</b>				
Fizičko procesuiranje (Zprint v 6.2)	54	65	36	43
Sušenje modela u prahu radi ojačavanja veziva (Zprint v 6.2)	45		45	
<b>Postprocesuiranje</b>				
Vađenje modela iz praha	10	30	10	30
Čišćenje modela strujom komprimiranog zraka	15	45	15	45
Toplotni tretman (na 70 <sup>0</sup> C) radi isparenja eventualno zaostale vlage	30		30	
Ojačavanje modela infiltrantom	30	90	30	90
<b>Ukupno</b>	<b>334</b>	<b>455</b>	<b>376</b>	<b>493</b>

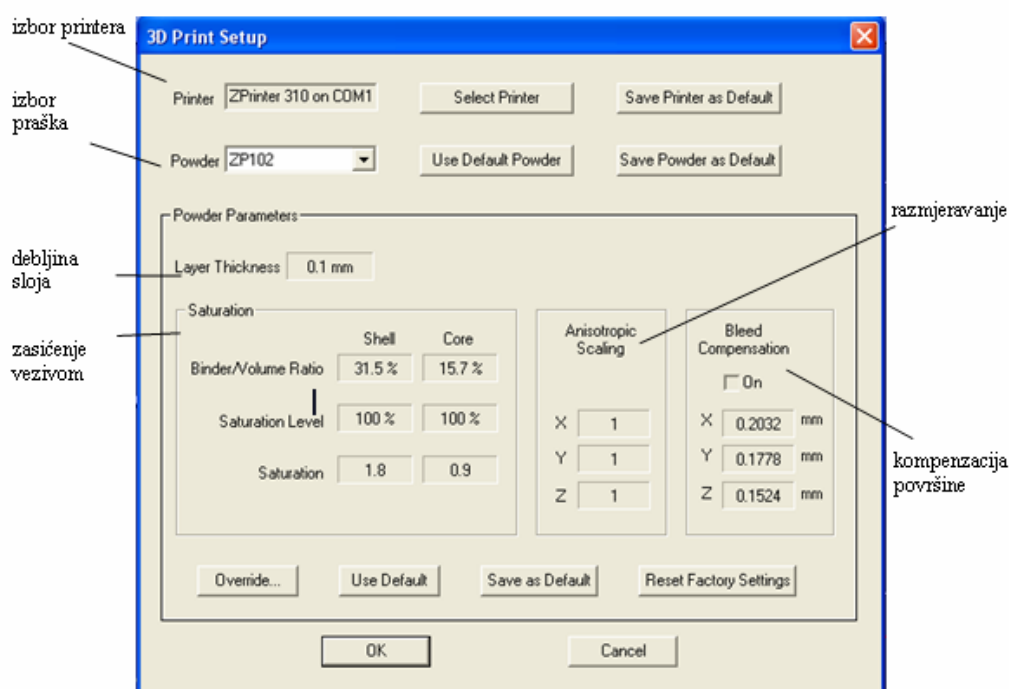
Pored ovoga na ukupnu cijenu izrade utiče i tip ojačivača (infiltranta) i ukupno vrijeme rada djelatnika. Na osnovu navedenih parametara u razvijenoj softverskoj aplikaciji (Excel) vrši se obračun proizvodnih troškova koji se uvećavaju za iznos poreza i odgovarajuću dobit, čime se formira konačna tržišna cijena prototipa. Analizom tržišno dostupnih RP tehnologija jasno se uočava ekonomičnost ovoga RP procesa do te mjere da je proces 3D printanja tržišni lider sa aspekta troškova materijala [4]. Prikaz proračuna troškova pojedinačnog ispisa elastičnog prototipa prikazan je u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Proračun troškova ispisa elastičnog modela

<p>Upute:                      1. Uvesti svoju .STL datoteku u ZPrint program.                      2. Pokrenuti stavku procjene vremena ispisa (File&gt;Print Time Estimator) i odrediti vrijeme i broj točkica.                      3. Pokrenuti stavku "View&gt;Calculate Part Statistics" i odrediti volumen i površinu.                      4. Unijeti rezultate u odgovarajuća polja ispod.</p>									
<b>Podaci modela</b>		<b>Unijeti ispod podatke</b>							
Opis		Gumena stopa							
Površina modela	175,61	cm <sup>2</sup>	iz Zprinta: Samo površina modela koja se ojačava, bez potpore.						
Ukupni volumen	57,57	cm <sup>3</sup>	iz Zprinta: Ukupni volumen, uključujući potporu.						
Prah	ZP15e-Srebro								
Vrijeme ispisa	00:54	hh:mm	iz Zprinta: uključujući potporu.						
Točkica	1474	milijuni točkica	iz Zprinta: uključujući potporu.						
Ojačivač	Elastomer								
Model stroja	Z310		20,00 €	sat rada stroja zanemaren					
Jedno ili višebojno	Jednoboje								
Vrijeme rada djelatnika	2:00	hh:mm	15,00 €	bruto cijena sata rada djelatnika					
Cijena praha po cm <sup>3</sup>	0,0205 €								
	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Otisnuto točkica [milijardi]	Vezivo korišteno [cm <sup>3</sup> ]	Ojačivač korišten [cm <sup>3</sup> ]	Troškovi praha	Troškovi veziva	Troškovi ojačivača	Ukupni troškovi stroja	Cijena ispisa po cm <sup>3</sup>
Opis modela	57,57	1,474	34,4	17,56	1,10 €	5,96 €	1,10 €	8,32 €	0,14 €
Gumena stopa									
<b>Hapomena:</b>									
								Amortizacija ispisne glave:	2,24 €
Za smolu i cijanokrilat pretpostavljena infiltracija do 2 min u model.								Troškovi stroja:	8,32 €
Za vosak pretpostavljena infiltracija kroz cijeli volumen modela.								Troškovi djelatnika:	30,00 €
								<b>Ukupni troškovi:</b>	<b>48,88 €</b>
									<b>0,85 €</b>

#### 4. ANALIZA DIMENZIONIRANJE TAČNOSTI PROIZVEDENIH 3DP DIJELOVA

Iako se 3DP proces proizvodnje dijelova odlikuje veoma dobrim karakteristikama sa aspekta varijabilne debljine gradivnog sloja, čime se postiže dobra interpolacije zaobljenih površina [2], ipak detaljnom analizom proizvedenih dijelova-prototipa mogu se utvrditi dimenzionalna odstupanja između baznog CAD modela i gotovog proizvoda-prototipa. U cilju determiniranja veličine navedenih odstupanja prezentirani su rezultati istraživanja (tabela 4.1.) do kojih se došlo uspoređivanjem CAD modela i gotovih proizvoda. Obzirom da postoje brojni faktori koji mogu različito uticati na postizanje tačnosti izrade, bitno je istaći da je analiza vršena samo u funkciji upotrebljivanih materijala. Bazni procesni parametri poput debljine sloja, faktora dimenzioniranja u tri pravca i vrijednosti zasićenja veziva po presjeku dijela (omotač i jezgro) su uzeti preporučeno od proizvođača sistema sa različitim vrijednostima za različite materijale (slika 4.1.).



Slika 4.1. Prozor za definiranje radnih parametara 3DP procesa [3].

Kao što se može vidjeti u tabeli 4.1, kruti prototip (anizotropne vrijednosti skaliranja za sve ose su 1) na gipsnoj osnovi rezultirao je većim dimenzijama u odnosu na CAD model, dok elastični prototip (anizotropna vrijednosti skaliranja za xy ravan je 1,015, dok je duž z ose gradnje 1,025) na škrobnoj osnovi ima negativnu toleranciju izrade, tj. ima izraženo skupljanje. Takođe, može se primjetiti da oba prototipa imaju procentualno najveća dimenziona odstupanja u pravcu gradnje duž z ose, odnosno tačnost izrade elastičnog modela je 96,34 [%], dok kruti model ima tačnost 99,08 [%].

Osim navedenih dimenzionalnih odstupanja predstavljenih tabelom 4.1 vizualnim pregledom izrađenih prototipa uočava se viši stepen kvaliteta završne obrade na prototipovima zasnovanim na gipsu kao gradivnom materijalu, nego kod prototipa na bazi škroba. Razlog za ovo nalazi se u karakteristikama gradivnog materijala tj. izraženom afinitetu skupljanja škrobnoga materijala [3].

Tabela 4.1. Dimenziona tačnost 3DP dijelova u funkciji upotrebljenih materijala

<b>KRUTI MODEL (zp102)</b>							
Pravac gradnje	Y	X	Z	Y	X	Z	
CAD model [mm]	L	B	H	l	b	h	
	62	25,67	34	42,3	32,7	12,35	
3DP model [mm]	Mjerenje I	62,3	25,73	34,28	42,68	32,81	12,38
	Mjerenje II	62,22	25,71	34,31	42,3	32,9	12,48
	Mjerenje III	62,18	25,75	34,34	42,42	32,63	12,49
	AS	62,23333	25,73	34,31	42,46667	32,78	12,45
<i>Srednje odstupanje [mm]</i>	<i>0,233333</i>	<i>0,06</i>	<i>0,31</i>	<i>0,166667</i>	<i>0,08</i>	<i>0,1</i>	
Procentualni prikaz [%]	0,376344	0,233736	0,911765	0,394011	0,244648	0,809717	
<b>ELASTIČNI MODEL (zp15e)</b>							
Pravac gradnje	XY		Z	XY		Z	
CAD model [mm]	D	D <sub>1</sub>	H	d	d <sub>1</sub>	h	
	60	35,1	62	7,5	4,7	28,73	
3DP model [mm]	Mjerenje I	60,03	35,25	61,63	7,45	4,6	28,71
	Mjerenje II	59,97	35,09	60,98	7,48	4,61	28,66
	Mjerenje III	60,15	35,12	61,23	7,57	4,87	28,38
	AS	60,05	35,15333	61,28	7,5	4,693333	28,58333
<i>Srednje odstupanje [mm]</i>	<i>0,05</i>	<i>0,053333</i>	<i>-0,72</i>	<i>0</i>	<i>-0,00667</i>	<i>-0,14667</i>	
Procentualni prikaz [%]	0,083333	0,151947	1,16129	0	0,14184	0,5105	
Normalizovani procentualni prikaz [%]	1,42	1,35	3,66	1,5	1,64	2,64	

## 5. ZAKLJUČAK

Analizom dimenzionalne tačnosti proizvedenih prototipova procesom 3D printanja zasnovanih na bazi škroba i gipsa utvrđeno je: veća dimenzionalna tačnost dijelova proizvedenih na bazi gipsa, pri čemu je uočena pozitivna tolerancija istih, dok je kod prototipova na bazi škroba tolerancija negativna, te veći stepen dimenzionalne tačnosti prototipova za oba aplicirana gradivna materijala u smjeru xy ose u usporedbi sa z-osom (cca. 2 puta). Shodno tome, pri razradi procesa 3D printanja u cilju dobivanja optimalne dimenzionalne tačnosti proizvedenih prototipova neophodno je obratiti pažnju na pozicioniranje komada u radnoj komori i izbor adekvatnog materijala za konkretne uslove primjene. Na osnovu naprijed iznesenog jasno se ukazuje na aplikativnost procesa 3D printanja u slučajevima kada su brzina i cijena izrade prioritetni u odnosu na aplikativnosti proizvedenog prototipa.

## 7. LITERATURA

- [1] Chua C. K., Leong K. F., and Lim C. S.: "Rapid Prototyping: Principles and Applications", 2nd Edition, World Scientific, London, Mart 2003.
- [2] D. Dimitrov, K. Schreve, N. de Beer: Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives, Rapid Prototyping Journal; Volume: 12, 2006.
- [3] User Manual ZPrint Software, Version 6.2, Z Corporation
- [4] Steve Upcraft, Richard Fletcher: "The rapid prototyping technologies", Assembly Automation; Volume: 23 Issue: 4; 2003., Research paper