

## IZRADA CILINDRIČNOG KLIZNOG LEŽAJA TEHNOLOGIJOM 3D ŠTAMPE MANUFACTURING A CYLINDRICAL PLAIN BEARING BY 3D PRINTING TECHNOLOGY

Miloš Ristić, *Visoka tehnička škola strukovnih studija Niš, Aleksandra Medvedeva 20, Niš.*  
Milan Pavlović, *Visoka tehnička škola strukovnih studija Niš, Aleksandra Medvedeva 20, Niš.*  
Živko Simić, *Visoka tehnička škola strukovnih studija Niš, Aleksandra Medvedeva 20, Niš.*

**Sadržaj** – *Aditivne tehnologije su svojim snažnim razvojem zauzele veliko i značajno mesto u savremenoj proizvodnji. Ne samo kada je reč o izradi prototipova ili pripremi za maloserijsku proizvodnju, već i u samoj proizvodnji konačnih proizvoda koji se odmah mogu koristiti. U ovom radu biće reči o 3D štampi kao jednoj od najzastupljenijih aditivnih tehnologija, kao i samoj izradi nedostajućeg cilindričnog kliznog ležaja. Opisan je način modeliranja katalošskog ležaja kao i sam tok izrade ležaja na 3D štampaču kako bi taj deo zauzeo svoje mesto u funkcionalnom sklopu mašine.*

**Ključne reči:** Aditivne tehnologije; Aditivna proizvodnja; 3D štampa; Cilindrični klizni ležaj.

**Abstract** - *Additive technologies with their strong development have occupied a great and important place in modern manufacturing. Not only when it comes to making prototypes or preparation for small batch production, but also in the production of final products that can be used immediately. In this article we will discuss 3D printing as one of the most common additive technologies, as well as manufacturing the missing cylindrical plain bearing. There is a description of modeling a catalog bearing and a process of manufacturing a bearing on 3D printer in order for this part to take its place in functional assembly of the machine.*

**Key words:** Additive technologies; Additive Manufacturing (AM); 3D Printing; Cylindrical plain bearing.

### 1. UVOD

Proizvodni procesi, tržišno orijentisani, zahtevaju adekvatno angažovanje svih zainteresovanih strana, sa ciljem dobijanja kvalitetnog, lako dostupnog i jeftinog finalnog proizvoda koji potpuno odgovara tržištu. Korišćenje novih tehnologija u sprezi sa računarima i savremenim softverima je, pored substraktivnih i formativnih procesa obrade, uticalo na razvoj aditivnih obradnih procesa, karakterističnih za brze proizvodne tehnologije [1]. Brze proizvodne tehnologije su svoju prvu primenu imale u brzom razvoju prototipova (engl. rapid prototyping) [2]. Ove tehnologije imaju velike tehničko tehnološke mogućnosti i brojne prednosti u poređenju sa drugim metodama, ali imaju i određena ograničenja i nedostatke [3]. Zbog toga je važno razumeti njihove osobine, kako bi se za određeni model proizvoda, shodno geometriji, topologiji i funkcionalnim karakteristikama definisanim naponsko-deformacionom analizom, prepoznala i izabrala adekvatna tehnologija izrade. U ovom radu je predstavljena upotreba 3D štampe, kao aditivne tehnologije, za izradu nedostajućeg kliznog ležaja. Nakon detektovanja problema i sveobuhvatne analize, izrađen je CAD 3D model kliznog ležaja. Njegova geometrija, uz pravilno pozicioniranje u prostoru predviđenom za izradu proizvoda, prevedena je u STL fajl koji je pogodan za generisanje G koda. Ovaj kod se najčešće koristi za kontrolu obradnih operacija CNC mašina, pa je kao takav korišćen i na 3D štampaču Pangu i3 [4] na kome je proizvod izrađen.

### 2. KONSTRUISANJE I MODELIRANJE PROIZVODA

Usled prestanka rada mašine, detaljnim pregledom i analizom, utvrđeno je da je došlo do otkaza cilindričnog kliznog ležaja. Usled vremenske nemogućnosti dobavljača da potrebni ležaj, koji je katalošskog tipa [5], dostavi u što kraćem roku, odlučeno je da se prema poznatim parametrima izradi odgovarajući ležaj. Cilindrični klizni ležaj, prikazan na slici 1, je proizvod kompanije ELESA iz Italije sa oznakom GN-706.2 [5]. Navedeni ležaj predstavlja sklop koji se sastoji od cilindričnog kliznog ležaja i imbus vijka M6×20.



Slika. 1. Cilindrični klizni ležaj GN-706.2

### 3. IZBOR ODGOVARAJUĆE TEHNOLOGIJE IZRADA

Poznato je da postoji veliki broj proizvodnih procesa koji se karakterišu raznovrsnim operacijama i zahvatima i na taj način uspevaju da odgovore na zahteve izazova konstrukcije. Jasno je da svaki metod izrade ima svoje prednosti i nedostatke i da se ne može izabrati jedna univerzalna metoda izrade za sve proizvode, već se sveobuhvatnom analizom dolazi do optimalne metode ili nekoliko metoda koje će se koristiti pri izradi proizvoda.

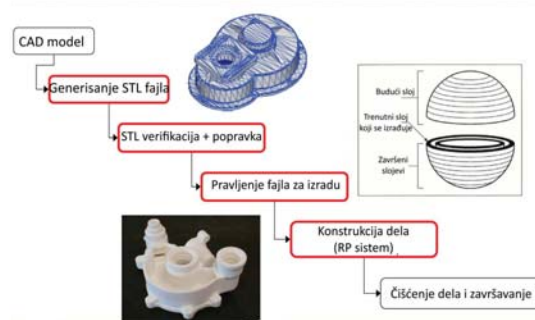
U cilju odabira odgovarajućeg procesa proizvodnje određenog proizvoda, potrebno je pronaći potrebne karakteristike tog proizvoda sa mogućnostima procesa. Na osnovu fizičke suštine, sve procese obrade možemo podeliti u tri grupe: Substraktivni procesi obrade, Formativni procesi obrade i Aditivni procesi obrade [1].

U substraktivne procese obrade spadaju procesi obrade gde se do željenog oblika predmeta obrade, tj. proizvoda dolazi skidanjem, odnosno uklanjanjem materijala. Ovaj tip obrade obuhvata većinu procesa mašinske obrade: glodanje, struganje, bušenje, sečenje, sečenje laserom, vodenim mlazom, elektroeroziona obrada žicom (EDM), itd. Kod formativnih procesa obrade, čvrst ili polučvrst materijal se pod pritiskom dovodi u željeni oblik proizvoda. Konačni oblik proizvoda se dobija plastičnom deformacijom osnovnog materijala ili livenjem osnovnog materijala u kalupe. U formativne procese obrade spadaju: livenje, savijanje, kovanje, livenje pod pritiskom, itd. Zajednička karakteristika ova dva tipa procesa je da se za obradu koristi jedan ili više alata, kao i jedna ili više alatnih mašina. Ipak, pre početka proizvodnje, potrebno je adekvatno definisati tehnološki postupak, a zatim odabrati odgovarajuću mašinu ili mašine sa alatima koja može da izvrši zahteve date tehnološkim postupkom. Aditivni procesi obrade [6] su bazirani na spajanju čestica ili slojeva materijala u cilju dobijanja željenog oblika finalnog proizvoda. Proces aditivne proizvodnje AM (engl. *Additive Manufacturing*) ne koriste alate, niti zahtevaju posebno podešavanje mašine, pa je vreme pripreme proizvodnje skraćeno, te se ove tehnologije nazivaju i RP – brze proizvodne tehnologije (engl. *Rapid Prototyping*) ili direktne proizvodne tehnologije (engl. *Direct Manufacturing*). Karakteristika ovih tehnologija je da fizički objekat, odnosno finalni proizvod nastaje dodavanjem određenog materijala sloj po sloj sve do potpunog završetka procesa izrade. Svaki od slojeva predstavlja poprečni presek konačnog proizvoda u odgovarajućoj ravni.

#### 4. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Aditivne tehnologije koriste virtuelne modele izrađene u odgovarajućem CAD softveru, čime se dobija površinski ili solid model sa odgovarajućom geometrijom i zapreminom [7]. Izrađeni model se zatim konvertuje u STL fajl format koji aproksimira površinu modela povezujući tri najbliže nekolinearne tačke modela u veoma male trouglove. U slučaju da model poseduje izrazito zakrivljene površine, onda se broj trouglova, potrebnih da bi se opisao i definisao model, znatno uvećava. Istovremeno, zapremina modela se transformiše u tanke slojeve. Dešava se da STL fajlovi budu neispravni zbog grešaka u modeliranju ali i usled nesavršenosti CAD-STL interfejsa pa se mogu javiti geometrijske greške tipa: praznine (pukotine, otvori) tj. nedostajući poligoni, preklapajući poligoni ili degenerisani poligoni gde su ivice poligona kolinearne, kao i višeznačnost u topologiji. Ovi nedostaci se najčešće ručno otklanjaju i prilagođavaju RP softveru mašine koji generiše seriju poprečnih preseka pomoću algoritma za isecanje (engl. *slicing algorithm*). Redosled koraka pri izradi proizvoda aditivnim tehnologijama prikazan je na slici 2.

Izrada proizvoda se vrši sukcesivnim slaganjem slojeva, na osnovu definisane geometrije, čime se dobija kompletan predmet odnosno proizvod. Kao i kod ostalih procesa obrade, početni korak u izradi proizvoda je izbor materijala. Početno stanje materijala može biti čvrsto, tečno ili gasovito.



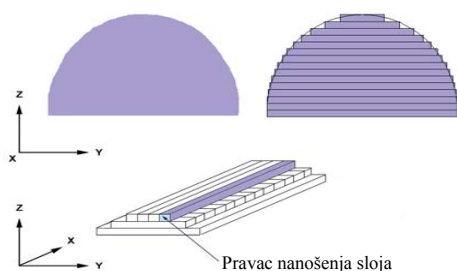
Slika 2. Tok izrade proizvoda RP tehnologijom

Materijal koji je u čvrstom stanju može biti u obliku praha, granulata, žice ili laminata, što zavisi od tehnologije koju koristi uređaj. Prikaz često korišćenih aditivnih tehnologija i njihovih osnovnih materijala dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Prikaz osnovnih materijala za određene aditivne tehnologije

Tip	Tehnologije	Materijali
Ekstruzija	Fused deposition modeling (FDM)	Termoplastike, topljivi metali, jestivi materijali, gume, glina za oblikovanje, plastelin.
	Fused Filament Fabrication (FFF)	
	Robocasting ili Direct Ink Writing (DIW)	Keramički materijali, metalne legure, keramal, kompozitni materijali sa metalom, kompozitni materijali sa keramikom.
Blaga polimerizacija	Stereolithography (SLA)	Fotopolimer.
	Digital Light Processing (DLP)	
Powder Bed	Powder bed i 3D printing (3DP)	Bilo koja legura metala, polimerni prahovi, gips.
	Electron-beam melting (EBM)	Bilo koja legura metala, kao i legure titanijuma.
	Selective laser sintering (SLS)	Termoplastike, metalni prahovi, keramički prahovi.
	Direct metal laser sintering (DMLS)	Bilo koja legura metala.

Kod aditivnih tehnologija, vreme izrade konačnog proizvoda i kvalitet njegove površine zavisi, pored izabrane tehnologije, i od orijentacije modela u radnom prostoru mašine. Kod zakrivljenih površina, usled slojevite prirode gradnje modela, dolazi do pojave efekta stepenica što takođe utiče na kvalitet površine. Efekat stepenica je posledica aproksimacije veličine poprečnog preseka. U slučaju geometrijskog modela poprečni presek se kontinuirano menja, ali prilikom proračuna poprečnih preseka koji odgovaraju sukcesivnim slojevima prototipa, dolazi do diskontinuiteta u njihovoj veličini, koji se manifestuje u obliku stepenica.



**Slika 3.** Zavisnost izrade proizvoda u slojevima (desno) prema CAD modelu (levo), shodno prostornoj orijentaciji modela

Kod izrade proizvoda upotrebom aditivnih tehnologija, u zavisnosti od njegovog oblika i geometrije, nije moguće obrazovati odmah čvrst model koji je sposoban da nosi gornje slojeve materijala. Ovaj problem je zastupljen prilikom izrade proizvoda koji imaju viseće elemente, koji nemaju odgovarajući oslonac a u toku izrade se ne može postići njihova dovoljna krutost. Zbog toga se, prilikom izrade, dodaju noseće ili žrtvovane strukture čiji je zadatak sprečavanje deformacije visećih elemenata ili njihovih delova. U nekim slučajevima se noseća struktura postavlja između platforme i modela kako bi se kasnije olakšalo odvajanje prototipa od platforme. Materijal noseće strukture često nije istih karakteristika kao materijal prototipa, već je obično slabiji kako bi se olakšalo njegovo uklanjanje tokom postprocesiranja (prikazanih u tabeli 2) [8], mehaničkim putem ili pomoću odgovarajućih rastvarača. Pri projektovanju proizvoda, kao i pri odabiru odgovarajuće aditivne tehnologije, treba voditi računa o tome da predimenzionisane noseće strukture povećavaju vreme izrade, a da nedovoljno čvrste strukture ili njihovo nepostojanje, dovode do urušavanja predmeta izrade.

**Tabela 2.** Važne operacije postprocesiranja za razne aditivne procese

Aditivne tehnologije					
Postprocesiranje	SLS	SLA	3DP	FDM	LOM
Čišćenje	da	da	da	ne	da
Očvršćavanje	ne	da	po potrebi	ne	ne
Finiširanje	da	da	da	da	da

## 5. TEHNOLOGJA 3D ŠTAMPE

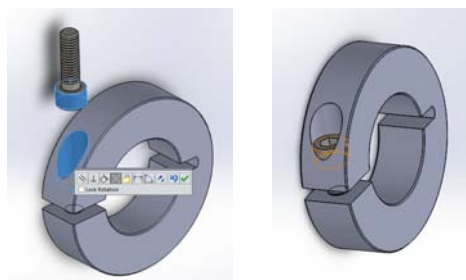
Jedan od široko upotrebljivanih procesa izrade trodimenzionalnih proizvoda je 3D štampa, koja je bazirana na formiranju finalnog proizvoda korišćenjem FDM (Fused Deposition Modeling) ili FFF (Fused Filament Fabrication) tehnologije. FDM je aditivna proizvodna tehnologija, često korišćena za modeliranje i izradu prototipova a radi na principu dodavanja materijala u slojevima. Ova tehnologija je bazirana na trodimenzionalnom CAD modelu proizvoda koji se procesuirao kao STL fajl, matematički izračunava i postavlja odgovarajuću orijentaciju za proces izrade. Ako je potrebno, automatski se dodaje i konstrukcija za fiksiranje odnosno noseće ili žrtvovane strukture. Materijal koji se koristi za izradu finalnog proizvoda je termoplastika koja se doprema u glavu (ekstruder), gde se topi na određenoj temperaturi. Ekstruder se kreće po putanji potrebnoj radi pravilnog nanošenja slojeva, koja je definisana CAD modelom. Materijal se nanosi po slojevima od dna predmeta izrade ka vrhu, određene debljine, u zavisnosti od karakteristike samog 3D štampača. Podloga na koju se nanosi materijal u slojevima mora biti zagrejana do određene temperature, kako bi početni

slojevi predmeta izrade bili stabilni. Delovi koji imaju unutrašnje otvore sa horizontalnim površinama teško se izađuju FDM tehnologijama jer ne postoji način za otklanjanje noseće strukture.

## 6. IZRADA KLIZNOG LEŽAJA NA 3D ŠTAMPAČU

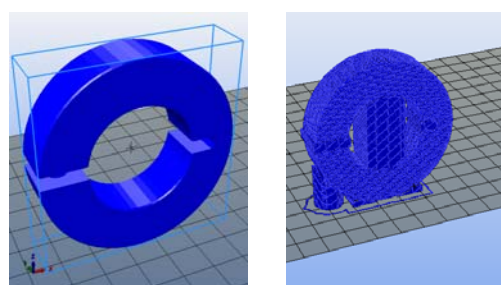
Cilindrični klizni ležaj, koji je potrebno izraditi na 3D štampaču predstavlja sklop koji se sastoji od cilindričnog kliznog ležaja i imbus vijka M6x20, pa će i iz dva dela biti izrađen na 3D štampaču.

U prvoj fazi izrade navedenog sklopa, na osnovu tehničke dokumentacije, upotrebom određenog CAD softvera, izrađeni su 3D modeli delova sklopa, a zatim su odgovarajućim relacijama spojeni u sklop (Slika 4) [9].



**Slika 4.** 3D model sklopa cilindričnog kliznog ležaja

Nakon izrade 3D modela sklopa, isti je izvežen kao STL fajl. S obzirom da se radi o sklopu koji sadrži dva dela, softver je izvežao dva STL fajla, po jedan za ležaj i vijak. Izvezeni STL fajlovi se uvoze u specijalizovani softver (Slika 5) koji, na osnovu toga, generiše G kod (Slika 6), koji se zatim preko USB veze šalje 3D štampaču. G kod predstavlja niz programskih redova koji sadrže neophodne informacije o poziciji izradka, načinu izrade i dr., kako bi se proizvod ispravno izradio. Tokom generisanja G koda, softver je automatski dodao noseću strukturu radi čvršće i tačnije izrade zadatog dela. Ova struktura je samo oslonac tokom izrade koji ima malu gustinu materijala, kako bi se nakon završetka, uklonila mehaničkim putem [9].



**Slika 5.** Prikaz modela u specijalizovanom softveru

Nakon generisanja G koda, 3D štampač počinje se realizacijom zadatog G koda, odnosno vrši pozicioniranje u koordinatni početak i podešavanje temperature ekstrudera i podloge. Za potrebe izrade cilindričnog kliznog ležaja i vijka, podešeno je da je temperatura ekstrudera 220 °C, dok je temperatura podloge 70 °C. Ležaj se kreira korišćenjem FDM, odnosno FFF tehnologije po principu dodavanja ABS plastike u slojevima, sloj po sloj. Vršni se ravnomerno dodavanje sloja materijala po spoljašnjoj konturi kao i ispuna unutrašnjosti. Nakon završetka procesa izrade ležaja, ekstruder se automatski vraća u početni položaj, a izrađen deo se ručno odstranjuje sa podloge.

```

; Default start code          G1 X104.342 Y65.700 E0.21055
G28 ; Home extruder          G1 X105.231 Y66.142 E0.22741
G1 Z15 F1000                 G1 X106.133 Y66.368 E0.24319
M107 ; Turn off fan         G1 X106.133 Y63.700 E0.28849
G90 ; Absolute positioning  G1 F3360 X122.500 Y80.922
M82 ; Extruder in absolute mode E2978.04823
M190 S55                     M107
; Activate all used extruder G1 F2400 E2974.04823
M104 T0 S220                 G0 F9000 X122.500 Y80.922 Z64.993
G92 E0 ; Reset extruder position ; Default end code
; Wait for all used extruders to reach ;G1 X0 Y0 Z130 ; Get extruder out of
temperature                  way. Uncomment to use!
M109 T0 S220                 M107 ; Turn off fan

```

Slika 6. Izvod iz generisanog G koda

3D štampač koji je korišćen za izradu prikazanog cilindričnog ležaja je Pangu I3-C [4] i služi za osnovnu i nezahtevnu izradu 3D modela, pa se njime izrađuju proizvodi koji ne zahtevaju povećanu tačnost kao i sam oblik proizvoda. Osnovne karakteristike 3D štampača Pangu I3 su:

- dimenzije radnog prostora: 210x200x195 mm;
- materijal za štampu: ABS i PLA;
- prečnik osnovnog materijala (žice): 1,7mm - 3mm;
- podesiva debljina sloja: 0,2-0,4 mm;
- tačnost štampe (tolerancije): 0,1mm.

Prilikom izrade proizvoda na 3D štampaču, jako je bitna početna faza izrade 3D modela, jer se upravo u toj fazi vrši odabir osnovne ravni za modeliranje. Odabirom jedne od osnovnih ravni, dobijeno je da je tok izrade veoma nestabilan, prvi slojevi se odvajaju od podloge, dok je noseću strukturu za otvor sa navojem veoma teško ukloniti, a navoj na zavrtnju praktično ne postoji. Međutim, ponovnom izradom 3D modela iz druge osnovne ravni, dobijen je ležaj sa nosećom strukturom (Slika 7).



Slika 7. Tok izrade cilindričnog kliznog ležaja sa nosećom strukturom

Kvalitet cilindrične površine je nešto slabiji ali je bolji pristup nosećoj strukturi za otvor sa navojem, a navoj na zavrtnju je jasno izražen. Takav pristup korišćen je za dobijanje finalnog proizvoda, prikazanog na slici 8.



Slika 8. Izrađeni cilindrični klizni ležaj

Ovaj proces karakteriše moguća pojava skupljanja i krivljenja predmeta u toku izrade jer se istopljeni osnovni materijal ekstrudira kroz ekstruder i hladi pri deponovanju na podlogu, pri čemu se, usled brzog hlađenja, javljaju naponi koji naprežu model.

## 5. ZAKLJUČAK

Stalni razvoj tehnoloških procesa doveo je do toga da se, pored konvencionalnih procesa obrade (substraktivni i formativni procesi) i široko primenjenih nekonvencionalnih postupaka razvijaju i brze proizvodne tehnologije, gde se deo uglavnom proizvodi dodavanjem materijala (aditivni procesi).

Međutim, integracija aditivnih tehnologija sa računarom i savremenim softverima dovodi do toga da se geometrijski zahtevan proizvod može direktno proizvesti iz 3D CAD modela na jednoj mašini, jednom tehnologijom, bez korišćenja drugih alata, dodatne reorijetacije delova i sklapanja delova, uz veliku uštedu u procesu projektovanja kao i same izrade, pri čemu su ukupni troškovi znatno smanjuju.

Cilindrični klizni ležaj, prikazan u ovom radu, izrađen upotrebom 3D štampača i FDM tehnologije, geometrijski odgovara zahtevima konstrukcije. Ipak, FDM tehnologija 3D štampe ne obezbeđuje dovoljan kvalitet hrapavosti površina kao i samu čvrstoću materijala, pa je neophodna dodatna obrada.

Glavna prednost ovog proizvoda je svakako cena proizvoda koja u ovom slučaju nije prešla 1 US\$, odnosno za potrebe izrade vijka je utrošeno 171 mm, a za ležaj 2782 mm ABS plastike, kao osnovnog materijala. Brzina izrade ovog proizvoda kreće se oko 120 minuta, zavisno od zahtevane gustine i načina nanošenja slojeva. Svakako treba napomenuti da postoje daleko kvalitetniji 3D štampači koji mogu da izrade visokokvalitetan kompleksan deo koji može da odgovori u potpunosti svim zahtevima konačnog proizvoda pa bi se on, kao takav, i koristio kao konačan proizvod, a ne samo kao privremeni deo ili prototip.

## LITERATURA

- [1] M. Trajanović, N. Grujović, J. Milovanović, V. Milivojević, *Računarski podržane brze proizvodne tehnologije*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2008.
- [2] eFunda, Inc. "*Rapid Prototyping: An Overview*", eFunda.com. Retrieved 2015-12-05
- [3] M. Ristić, "*Tehnološka ograničenja brzih proizvodnih tehnologija*", IMK-14, Vol.1 2011, pp 25-32.
- [4] Pangu I3-C 3D, *Printer user manual*, RP3D Tech Co.
- [5] Eles&Ganter, *Katalog proizvoda*, <http://elesa-ganter.partcommunity.com/> posećeno: 2015-10-10
- [6] S. Dimov, T. Pham, *Rapid Manufacturing : The Technologies and Applications*, Springer Verlag, 2001.
- [7] Excell, Jon. "*The rise of additive manufacturing*". The Engineer. Retrieved 2013-10-30
- [8] N. Grujović, *Brza izrada prototipova – rapid prototyping*, skripta izdata u okviru projekta WUS Austria CDP+ 141/2004. Mašinski fakultet Kragujevac, 2005.
- [9] Ž. Simić, *Izrada cilindričnog kliznog ležaja pomoću 3D štampe*, Završni rad, Visoka tehnička škola Niš, 2015.