



## KUTIJA ELEKTRONIKE – STRUKTURNA ANALIZA I IZRADA <sup>5)</sup>

### Rezime

*Rezime: Aditivna proizvodnja pomaže organizacijama da uštede u procesu projektovanja i da smanje troškove realizacije prototipova. U ovom radu analizirana je kutija elektronike. Kućište je modelirano u nekom od 3D softverskih paketa, zatim je urađena strukturna analiza i na kraju je izrađen model na 3D štampaču. Kutija je izrađena od biorazgradivog termoplastičnog materijala PLA. Ideja ovog rada je da se pokaže kako aditivna tehnologija može da zameni konvencionalnu tehnologiju na onim mestima koja nisu kritična i rizična. Strukturna analiza pokazala je da plastično kućište može da izdrži opterećenje od 150 daN. To je važno sa aspekta izrade plastičnog proizvoda umesto metalnog.*

*Ključne reči: Aditivna proizvodnja, PLA, Kutija elektronike, Strukturna analiza, 3D štampa.*

### 1. UVOD

Aditivna proizvodnja (AP) se koristi za proizvodnju prototipova, modela, komponenti i delova uz upotrebu različitih materijala, kao što su: plastika, metal, keramika, staklo i kompozit [1]. Primena AP daje mogućnost uklanjanja različitih izvora otpada, koji se javljanju tokom proizvodnje.

AP predstavlja revolucionarni iskorak, jer se delovi realizuju prema digitalnom prikazu (3D modelu). Na taj način su isključeni konvencionalni postupci izrade delova: obrada rezanjem, kovanjem i livenjem [2]. Takođe, primenjuje se u proizvodnji sofisticiranih proizvoda, koja podrazumeva upotrebu novih materijala i realizaciju kompleksne geometrije. Određeni proizvodi se prilagođavaju potrebama kupaca, uz poštovanje zahteva projekatana. U tom kontekstu, AP može da postane ključna tehnologija za masovnu proizvodnju proizvoda.

Tehnologija 3D štampe omogućava izmene na modelu pre puštanja u proizvodnju. Ove izmene je jednostavno realizovati pomoću nekog od raspoloživih CAD programa. Konceptualni CAD model na računaru kasnije se realizuje kao 3D objekat na štampaču [2]. Međutim, prema Cupari dr. [3] za 3D štampu potrebno je napredno tehničko znanje u pripremi, zadavanju parametara, kao i pri samom postupku realizacije štampe.

### 2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA - ZNAČAJ

Aditivna tehnologija ima primenu u sledeća tri slučaja, [4,5,6]:

- razvoj i izrada prototipova (brza izrada prototipova);
- razvoj i izrada alata (brzi alati) i
- brza proizvodnja.

Prikaz 3D modela centralnog dela kutije i radne površine sa teorijskom putanjom brizgaljke, dat je na slici 1. Prema Bose i dr. [7], za postizanje što bolje preciznosti i rezolucije na 3D štampačima, potrebno je da rastojanje između slojeva bude što manje, koje isključivo zavisi od karakteristika materijala i parametara konstrukcije. S tim u vezi, korišćena je popunjenost od 100%. Program Ultimaker Cura deli model na tanke slojeve, posmatrano po vertikali. Pre procesa realizacije i ispisa \***gcod**, program nudi mogućnost simulacije postupka AP za 3D model koji će biti realizovan. Vizualizacijom procesa izrade na 3D štampaču jasnije se

<sup>1)</sup>dr Danijela Živojinović, prof. strukovnih studija, Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd, odsek: kompjutersko-mašinsko inženjerstvo ([danijela.zivojinovic@yahoo.com](mailto:danijela.zivojinovic@yahoo.com))

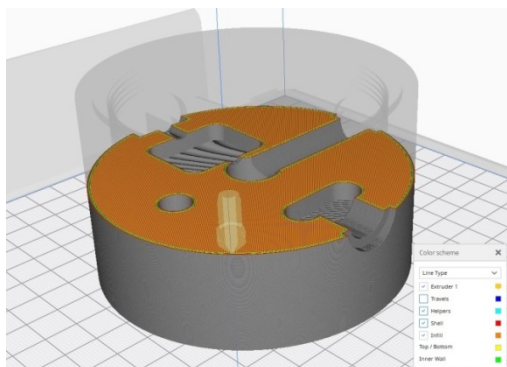
<sup>2)</sup>prof. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([jsvorcan@mas.bg.ac.rs](mailto:jsvorcan@mas.bg.ac.rs))

<sup>3)</sup>dr Marija Baltić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([mbaltic@mas.bg.ac.rs](mailto:mbaltic@mas.bg.ac.rs))

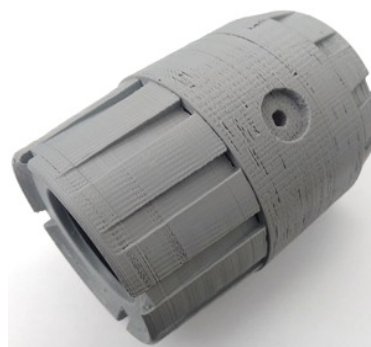
<sup>4)</sup>prof. dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([asimonovic@mas.bg.ac.rs](mailto:asimonovic@mas.bg.ac.rs))

<sup>5)</sup>Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, Republika Srbija

uočavaju potencijalne greške i to pre samog postupka proizvodnje. Pravovremenim otklanjanjem grešaka vrši se ušteda u vremenu i troškovima izrade dela.



*Slika 1. Prikaz radne površine Ultimaker Cura*



*Slika 2. Realizovana kutija od PLA (bez obrade)*

Pri realizaciji kutije elektronike korišćeni su sledeći parametri: 1) 215°C za brizgaljku (printing temperature), 2) 60°C za podlogu (build plate temperature), 3) 50 mm/s, brzina štampe (print speed), 4) 70 mm/s, brzina kretanja brizgaljke u praznom hodu (travel speed) i 5) 90/-45/0/+45, orijentacija ispune (infill orientation).

Prilikom formiranja slojeva, veoma važnu ulogu igraju: temperature topljenja u brizgaljki i temperature radne podloge. U ovom slučaju, PLA postaje tečan na temperaturi od 150°C, zatim se zagreje do tačke topljenja do 210°C i nakraju procesa se ohladi [8]. Ovde postoji rizik, da će hlađenje po slojevima biti nelinearno, što na kraju daje nepravilan oblik i dimezije dela (netačna geometrija). U tom slučaju, treba obezbediti da temperaturna razlika između brizgaljke i radnog dela bude što manja.

Kompletno realizovana kutija elektronike na 3D štampaču prikazana je na slici 2. Sa slike se može uočiti da postoje mnoge nepravilnosti u realizaciji definisanih površina što zahteva dodatnu obradu. Međutim, to u pomenutom smislu nije predmet ovog rada.

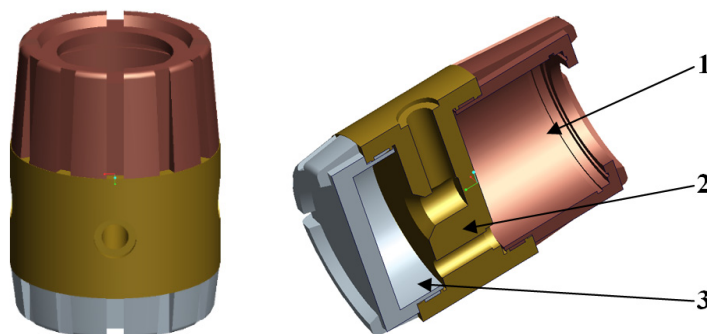
### 3. STRUKTURNA ANALIZA SKLOPA KUTIJE

#### 3.1. Ulazni podaci

Ideja ovog rada je da se ispita kutija elektronike koja je izrađena na 3D štampaču. Realizacijom kutije, projektantima je omogućeno da isprave eventualne greške nastale tokom procesa projektovanja, ali i da se izvrše dodatne modifikacije prema zahtevima krajnjih korisnika.

U radu je analizirana nosivost sklopa kutije elektronike pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja.

Osnovni elementi kutije elektronike su: 1) poklopac bez otvora, 2) centralni deo i 3) poklopac sa otvorom, videti sliku 3.



*Slika 3. Model sklopa kutije elektronike:*

*1 – poklopac sa otvorom, 2 – centralni deo, 3 – poklopac bez otvora*

Poklopac sa otvorom je dublji, jer se u njemu smešta elektronika i služi za očitavanje podataka ispisanih na displeju elektronike. U poklopcu sa otvorom smešteni su: 1) staklo, 2) plastični odstojnik i 3) Zegerov

uskočni prsten. Komponente sklopa su međusobno povezane posredstvom navoja. Sva tri dela izrađena su od materijala PLA (izotropnog materijala), sa sledećim mehaničkim karakteristikama, videti tabelu 1:

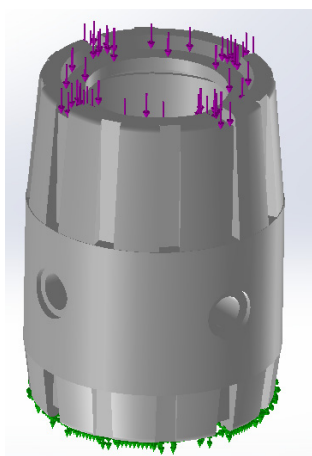
**Tabela 1.** Mehanička svojstva PLA materijala

Oznaka	Opis	Jednica	Vrednost
E	Jangov modul elastičnosti	[N/mm <sup>2</sup> =MPa]	3 500
$\nu$	Poasonov koeficijent	-	0.36
$\sigma_t$	Napon na granici tečenja	[N/mm <sup>2</sup> =MPa]	49.6
$\sigma_m$	Zatezna čvrstoća	[N/mm <sup>2</sup> =MPa]	73

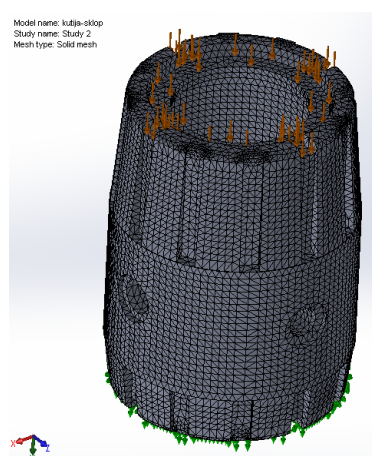
U radu je analiziran uticaj aksijalne (pritisne) sile F na nosivost konstrukcije. Kao maksimalna vrednost opterećenja usvojena je sila od  $F_{max}=150$  daN. U radu je izvršen proračun nosivosti kutije u slučaju da se na istu nehodično, svom svojim težinom, nasloni operater pri radu, odnosno ispituje se situacija izdržljivosti kutije pri dejstvu maksimalno mogućeg opterećenja.

### 3.2. Numerički proračun

Numerički proračun je rađen u okviru programa SolidWorks/Simulation. Izmodelirani su pojedinačni delovi sklopa, a potom su spojeni u sklop, videti sliku 4. Pritisna sila deluje na gornjoj površini poklopca sa otvorom, dok je na suprotnom kraju (donjoj površini poklopca bez otvora) definisano konzolno ukleštenje (svih 6 stepeni slobode su fiksirani) [9].



**Slika 4.** Prikaz dejstva opterećenja na sklopu kutije elektronike



**Slika 5.** 3D model sklopa kutije sa generisanom konačno-elementnom mrežom

Na 3D modelu sklopa kutije, kreirana je konačno-elementna mreža (slika 5), pri čemu je korišćena metoda konačnih elemenata (MKE). U sklopu su formirani tetraedarski i heksaedarski konačni elementi (3D elementi). Na mestima naglih promena geometrije (zarezi, žljebovi i sl.) program automatski generiše sitniju mrežu, kako bi se na mestima potencijalne koncentracije napona izvršio što tačniji numerički proračun. Formirana konačno-elementna mreža sadrži ukupno 181.500 konačnih elemenata.

### 3.3. Dobijeni rezultati proračuna i analiza

Kako bi se analizirala nosivost date konstrukcije sklopa, a potom donele i primenile adekvatne mere u cilju obezbeđenja integriteta konstrukcije, neophodno je izvršiti proračun sledećih veličina:

- von Mises-ov napon u svakoj tački strukture:  $\sigma = \sigma(x, y, z)$ ,
- deformacija strukture:  $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$ ,
- tzv. faktor sigurnosti (*FOS-Factor Of Safety*):  $FOS = FOS(x, y, z)$ .

Von Mises-ov napon predstavlja ekvivalenti (rezultujući) napon u strukturi pod dejstvom aplikovanog opterećenja [9,10]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

Faktor sigurnosti ili koeficijent sigurnosti (*FOS-Factor Of Safety*) se može predstaviti sledećom jednačom [9,10]:

$$FOS(x, y, z) = \frac{\sigma_t}{\sigma(x, y, z)} \quad (2)$$

Kao rezultati proračuna u adekvatnom software-u dobijaju se gore navedene i tražene veličine.

Ukupno je analizirano 9 vrednosti intenziteta sile i to:  $F = \{70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150\}$  daN. Dobijeni rezultati proračuna: distribucija napona u strukturi- $\sigma = \sigma(x, y, z)$ , deformacija strukture- $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$ , kao i raspodela faktora sigurnosti- $FOS = FOS(x, y, z)$ , su prikazani grafički (tabela 2).

**Tabela 2.** Prikaz distribucije von Mises-ovog napona- $\sigma$ , deformacije- $\varepsilon$  i tzv. faktora sigurnosti-FOS

Rezultati	F=70 daN	F=110 daN	F <sub>max</sub> =150 daN
<b>von Mises naponi</b> $\sigma = \sigma(x, y, z)$			
<b>Deformacije</b> $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$			
<b>Faktor sigurnosti-FOS</b>			

Analizom gore prikazanih rezultata proračuna, dolazi se do sledećih zaključaka:

- napon u strukturi ne prelazi vrednost napona na granici tečenja ( $\sigma_t$ ), štaviše značajno je ispod ove vrednosti. Samim tim, sve nastale deformacije u strukturi su male i elastične (povratne). Po prestanku

dejstva sile, struktura se vraća u prvobitno stanje. Dakle, rezultati proračuna ukazuju na to da su deformacije u linearno-elastičnoj oblasti.

- Maksimalne vrednosti napona i deformacije se javljaju na poklopcu sa otvorom. U toj zoni, osim aksijalnog napreznja (pritiska), javlja se i savijanje na tzv. prstenastoj konzoli.
- Faktor sigurnosti je značajno iznad vrednosti 1, što ukazuje na to da naponi koji se javljaju u strukturi pod dejstvom aplikovanog opterećenja su značajno manji od napona na granici tečenja. Što znači da konstrukcija ima deleko veću nosivost od potrebne.
- Na pojedinim mestima u konstrukciji dolazi do lokalnog rasta napona, što je posledica postojanja tzv. koncentratora napona (zarezi, žlebovi i sl.). Ovo se prevazilazi dodavanjem zaobljenja, koji su na modelu tendenciozno ukinuti iz razloga pojednostavljenja numeričkog proračuna.

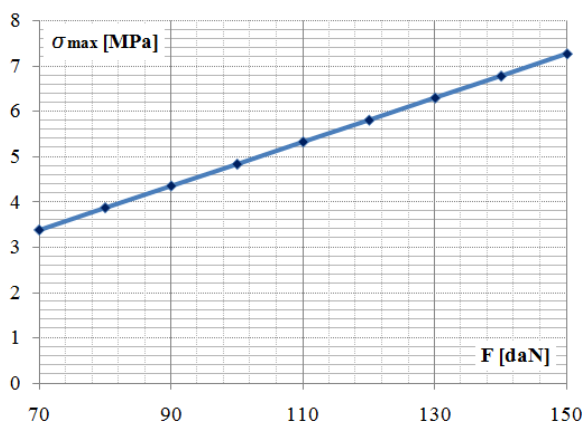
Posebno je analiziran ekstremni slučaj opterećenja pri  $F_{max}=150$  daN. I u slučaju ekstremnih opterećenja, deformacije kutuje su veoma male, što ne remeti samu formu kutije. Samim tim, obezbeđuje se funkcionalnost kutije elektronike, jer je njena osnovna namena da služi za smeštaj elektronike. Takođe, elektronika je bezbedna, tj. neće doći do njenog oštećenja, jer i pod dejstvom maksimalno aplikovanog opterećenja struktura ima integritet. Dakle neće doći do njenog loma niti do pojave većih neželjenih elastičnih, niti do još većih trajnih plastičnih deformacija.

U tabeli 3, analizom spektra vrednosti opterećenja dati su podaci funkcionalne zavisnosti maksimalnog napona- $\sigma_{max}$  i maksimalne deformacije- $\epsilon_{max}$  od intenziteta sile  $F$ . Dobijaju se sledeće zavisnosti:

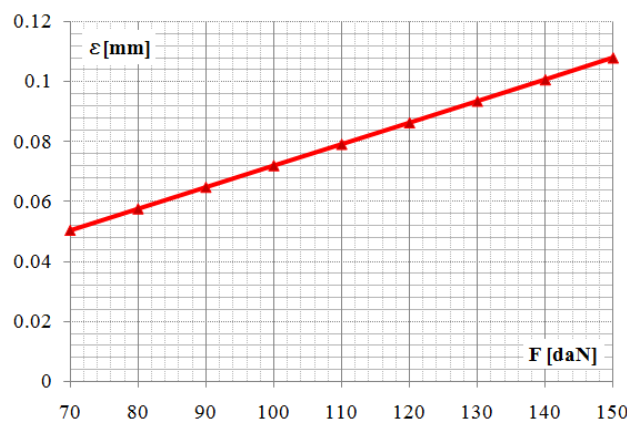
**Tabela 3.** Tabela prikaz zavisnosti maksimalnog napona i maksimalne deformacije od intenziteta sile  $F$

Sila $F$ [daN]	Maksimalni napon - von Mises $\sigma_{max}$ [MPa]	Maksimalna deformacija $\epsilon_{max}$ [mm]
70	3.39	0.0504
80	3.88	0.0576
90	4.36	0.0648
100	4.84	0.0720
110	5.33	0.0792
120	5.81	0.0863
130	6.30	0.0935
140	6.78	0.1007
150	7.27	0.1080

Na dijagramima (slika 6 i slika 7) uočavaju se linearne zavisnosti maksimalnog napona  $\sigma_{max}$ , odnosno maksimalne deformacije  $\epsilon_{max}$  u strukturi od intenziteta primenjenog opterećenja  $F$ .



**Slika 6.** Dijagram zavisnosti maksimalnog napona  $\sigma_{max}$  od intenziteta sile  $F$



**Slika 7.** Dijagram zavisnosti maksimalne deformacije  $\epsilon_{max}$  od intenziteta sile  $F$

#### 4. ZAKLJUČAK

Ukoliko se uporede karakteristike kutija napravljenih od dva različita materijala, aluminijuma (Al) i PLA, dolazi se do sledećih zaključaka:

- PLA je jeftiniji materijal (ekonomski aspekt);
- proizvodnja sklopa kutije od PLA je jednostavnija i isplativija;

- masa sklopa kutije napravljene od PLA iznosi  $m_{PLA}=0.639$  kg, dok je masa iste takve kutije od aluminijuma  $m_{Al}=1.380$  kg. To znači daje masa PLA kutije čak više od 2 puta manja u odnosu na sklop proizveden od aluminijuma (gustina  $\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$ , dok je  $\rho_{PLA} = 1250 \text{ kg/m}^3$ ). Proizvodnjom PLA kutije vrši se ušteda u količini upotrebljenog materijala (ušteda u materijalu);
- nosivost sklopa kutije napravljenog od PLA je više nego zadovoljavajuća (strukturni aspekt);
- PLA je reciklabilan (biorazgradiv), tako da je njegovom upotrebom uključen i aspekt zaštite životne sredine.

Analizom svih aspekata dolazi se do zaključka da PLA materijal ispunjava sve potrebne zahteve i da ima prednost u odnosu na dosada upotrebjavani aluminijum, te da se može upotrebiti za izradu sklopa kutije elektronike, ali u ograničavajućem domenu primene.

## 6. LITERATURA

- [1] Lu, B., Li, D., Tian, X.: *Development trends in additive manufacturing and 3D printing*. Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 85-89, 2015.
- [2] Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garrett, B.: *Could 3D printing change the world? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Atlantic Council, Washington DC, 2011.
- [3] Cupar, A., Pogačar, V., Stjepanović, Z.: *Shape verification of fused deposition modelling 3D prints*. International journal of information and computer science, Vol. 4, pp.1-8, 2015.
- [4] Chen, T., Lin, Y. C.: *Feasibility evaluation and optimization of a smart manufacturing system based on 3d printing: a review*. International Journal of Intelligent Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 394-413, 2017.
- [5] Bibb, R., Winder, J.: *A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques*. Radiography, Vol. 16, No. 1, pp. 78-83, 2010.
- [6] Campbell, R.I., De Beer, D.J., Pei, E.: *Additive manufacturing in South Africa: building on the foundations*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 17, No. 2, pp. 156-162, 2011.
- [7] Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A.: *Bone tissue engineering using 3D printing*. Materials today, Vol. 16, No. 12, pp. 496–504, 2013.
- [8] Shah, J., Snider, B., Clarke, T., Kozutsky, S., Lacki, M., Hosseini, A.: *Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.104, No. 9-12, pp. 3679–3693, 2019.
- [9] Jones, R.: *Deformation theory of plasticity*, Bull Ridge Corporation, 2009.
- [10] Young, W.C., Budynas, R.G., Sadegh, A.M.: *Roark's Formulas For Stress And Strain*, Amayon, Vol. 7, New York: McGraw-Hill, 2002.

Danijela Živojinović, Jelena Svorcan, Marija Baltić, Aleksandar Simonović

## ELECTRONIC ENCLOSURE - STRUCTURAL ANALYSIS AND MANUFACTURING

**Abstract:** Additive manufacturing helps organizations to save money in the design process and reduce the cost of prototypes. In this paper, the electronics enclosure is analyzed. The enclosure was modeled in one of the 3D software packages, then a structural analysis was done, and finally, a model was made on a 3D printer. The enclosure is made of biodegradable thermoplastic material PLA. The idea of this paper is to show how additive technology can replace conventional technology in those places that are not critical and risky. Structural analysis has shown that the plastic enclosure can withstand a load of 150 daN. This is important from the aspect of making a plastic product instead of a metal one.

**Key words:** Additive manufacturing, PLA, Electronic enclosure, Structural analysis, 3D printing