



## RIJEČ UREDNIKA

Poštovani čitatelji,

Pred Vama je prvi broj „Tehničkih znanosti“, glasnika Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, uređen uvažavajući novu koncepciju lista, kojom želimo podići razinu informiranosti članova Akademije i svih zainteresiranih čitatelja o reprezentativnim aktivnostima naših članova te drugim, vjerujemo društveno važnim, aktivnostima Akademije.

Prema novom uređivačkom načelu, svaki idući broj „Tehničkih znanosti“ sadržavat će dio lista koji će biti posvećen prikazu znanstvene ili stručne djelatnosti odabrane tematike, a koji će urediti pozvani urednik - član Akademije. Pored prikaza stručne djelatnosti aktivnih znanstvenika, bit će pozvani i pregledni članci pojedinih tema znanstvenog i kulturno-povijesnog krajobraza Hrvatske, značajnih za djelatnost i društveno poslanje Akademije.

Kako bismo Vas i dalje obavještavali o tekućim događajima iz djelokruga neposrednih zbivanja u životu Akademije, svaki broj sadržavat će također i dio posvećen novostima koje će uređivati poslovna tajnica Akademije Melanija Strika, prof. soc.

Ovom prilikom posebno mi je zadovoljstvo najaviti pozvanog urednika stručnog dijela lista ovog, prvog broja nove koncepcije glasnika „Tehničkih znanosti“, prof. dr. sc. Mladena Šercera. Prof. dr. sc. Mladen Šercer voditelj je Katedre za preradu polimera Zavoda za tehnologiju Fakulteta stojarstva i brodogradnje u Zagrebu i tajnik Odjela strojarstva i brodogradnje Akademije tehničkih znanosti Hrvatske. Stručna tema u uređivačkom fokusu profesora Šercera su aditivne tehnologije te nova (moguća) industrijska revolucija.

Želim Vam ugodno čitanje!

Prof. dr. sc. Zdravko Terze  
Urednik



Euro-CASE



CAETS

## SADRŽAJ

Riječ urednika.....	1
Aditivne tehnologije – 4. industrijska revolucija? .....	1
Optimiranje parametara niskobudžetnog 3D-tiskanja .....	3
Razvoj i izrada polimernog proizvoda s pomoću taložnog očvršćivanja.....	9
Novosti iz HATZ-a .....	15

## ADITIVNE TEHNOLOGIJE – 4. INDUSTRIJSKA REVOLUCIJA?

Suvremeni zahtjevi tržišta postavljaju sve strože zahtjeve pred procese razvoja i proizvodnje. Uz zahtjev za povišenje kvalitete proizvoda i razine fleksibilnosti pri razvoju i proizvodnji, istodobno se nameću zahtjevi za sniženje troškova, a posebice za skraćivanje vremena razvoja i proizvodnje. Dodatni trend koji je sve uočljiviji u pojedinim segmentima tržišta je napuštanje masovne proizvodnje u korist maloserijske, a vrlo često i pojedinačne (personalizirane) proizvodnje (posebice karakteristično za medicinu).

Kako bi se udovoljilo takvim zahtjevima na tržištu, od druge polovine 80-ih godina prošlog stoljeća razvijaju se i primjenjuju suvremeni postupci aditivne proizvodnje. Glavna je značajka tih postupaka dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade cijelog proizvoda. Takvo načelo proizvodnje omogućuje pravljenje vrlo komplicirane geometrije proizvoda koju bi drugim, klasičnim postupcima proizvodnje bilo vrlo teško ili nemoguće načiniti. Dodatna je značajka aditivnih postupaka, da se u načelu proizvodi izravno na opremi za aditivne postupke na osnovi 3D računalnog modela proizvoda, bez potrebe za dodatnim alatima.

**Tehničke znanosti/Engineering Power**, Glasnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske/Bulletin of the Croatian Academy of Engineering

HATZ, 28 Kačić Street, P.O.Box. 59, 10001 Zagreb, Croatia

Vol. 19(1) 2015 – ISSN 1330-7207

e-mail: HATZ@hatz.hr, web: www.hatz.hr

Glavni urednik/Editor-in-Chief: Vladimir Andročec

Urednik/Editor: Zdravko Terze

Urednica Novosti iz HATZ-a/HATZ News Editor: Melanija Strika

Phone: + 385 1 4922 559 Fax: + 385 1 4922 569

Tehnički urednik/Technical Editor: Vladimir Pavlič, GRAPA, Zagreb, Croatia

Tisak/Printed by: Denona d.o.o.

Povijesno gledajući, suvremeni postupci aditivne proizvodnje prošli su nekoliko faza s obzirom na njihovu primjenu, a time i terminologiju. U začetku primjene ti su se postupci uglavnom koristili za *brzu* izradu prototipova (e. *Rapid Prototyping* – RP). Pojam *brzo* treba shvatiti uvjetno, jer je vrijeme potrebno za proizvodnju (prototipova) uvjetovano veličinom proizvoda i debljinom slojeva od kojih se proizvod sastoji. U pravilu, za proizvodnju je potrebno od nekoliko minuta pa do nekoliko dana. To samo po sebi nije *brzo*, no usporedi li se s klasičnim postupcima izrade prototipova ili klasičnom proizvodnjom, svakako postoji vremenska rezerva. Proizvodi načinjeni tim postupcima s kraja prošlog stoljeća uglavnom su se rabili za unaprjeđivanje procesa razvoja proizvoda.

Sljedeći je korak u primjeni suvremenih aditivnih postupaka brza izrada čitavih alata i kalupa ili njihovih ključnih elemenata (e. *Rapid Tooling* – RT). Riječ je o primjeni postupaka aditivne proizvodnje za izradu polimernih, keramičkih ili metalnih alata i kalupa koji zbog načela slojevite gradnje omogućuju bitno skraćivanje vremena proizvodnje geometrijski najzahtjevnijih dijelova alata i kalupa. Dodatno, kada je riječ o kalupima za injekcijsko prešanje polimera, RT postupci omogućuju izradu optimiranih kanala za temperiranje koji idealno prate oblik kalupne šupljine (e. *conformal cooling*), čime je moguće bitno skratiti vremena ciklusa injekcijskog prešanja i povisiti kvalitetu proizvoda.

Daljnji razvoj materijala koji se rabe pri suvremenim postupcima za aditivnu slojevitom proizvodnju doveo je do izravne maloserijske ili pojedinačne proizvodnje gotovih proizvoda (e. *Rapid Manufacturing* – RM, *Direct Digital Manufacturing* – DDM). Riječ je o postupcima koji omogućuju proizvodnju bez potrebe za dodatnim alatima, stoga su u slučajevima pojedinačne proizvodnje ili maloserijske proizvodnje najčešće jedino razumno rješenje.

Nakon dugogodišnjega snažnog razvoja i proširene primjene RP/RT/RM postupaka, 2009. godine konstituirana je međunarodna komisija *ASTM International Committee F42 za postupke aditivne proizvodnje*, a njezin je prvi zadatak bio terminološki definirati te postupke. Kako pojam *brzo* pri uporabi aditivnih postupaka ima relativno značenje, definiran je pojam aditivne proizvodnje (e. *Additive Manufacturing* – AM) kao krovni pojam. Međunarodna komisija *ASTM International Committee F42* definira aditivnu proizvodnju kao *proces povezivanja materijala pri pravljenju objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno suptraktivnom načinu proizvodnje*. Sinonimi su: aditivna izrada, aditivni procesi, aditivne tehnike, aditivna slojevita proizvodnja, slojevita proizvodnja, izrada slobodnih oblika.

Unaprjeđenje sustava za postupke aditivne proizvodnje te primjenjivih materijala (prema broju i kvaliteti) omogućuje proizvodnju konačnih proizvoda za velik broj različitih primjena. Povijesno, najviše se proizvodnih primjena AM postupaka temeljilo na uporabi polimernih proizvoda, dok je primjena metala za AM postupke nagli razvoj doživjela tek posljednjih godina. Razlog je u razvoju novih generacija sustava za preradu praškastih

metala, koji mogu preraditi materijale kao što su nehrđajući čelici, titanove legure, kobalt-krom, zlato i slično.

Mnogi vide uporabu AM postupaka kao jedan od najvažnijih pristupa koji će biti pokretač proizvodne ekonomije u budućnosti, odnosno smatraju ih pokretačima 4. industrijske revolucije. Kako se AM postupci uglavnom temelje na slojevitom pravljenju proizvoda, većina tradicionalnih načela konstruiranja s obzirom na proizvodnju (e. *Design for Manufacturing* – DFM) više ne vrijedi. Proizvodi načinjeni AM postupcima mogu imati podreze i visoko kompleksne detalje, koje nije moguće načiniti klasičnim postupcima proizvodnje. Primjena AM postupaka također pozitivno utječe na okoliš smanjenjem emisije ugljičnog dioksida sa stajališta samog proizvoda, ali i cijeloga proizvodnog sustava. Prije svega, razlog je u aditivnom načinu pravljenja proizvoda, koji generira mnogo manju količinu otpada u usporedbi s klasičnim obradama odvajanjem čestica (suptraktivni postupci) ili postupcima praoblikovanja kao što su injekcijsko prešanje ili lijevanje. To je posebice izraženo u slučaju AM sustava za proizvodnju metalnih proizvoda.

Jedna od glavnih prednosti primjene AM postupaka pri proizvodnji jest smanjenje ili potencijalno uklanjanje potrebe za izradom alata. Oslobođeni ograničenja koja donose kalupi i alati, AM postupci omogućuju proizvođačima ekonomičnu proizvodnju već od unikatnih proizvoda. Oblik proizvoda, veličina, količina i zahtijevana kvaliteta osnovni su čimbenici koji određuju troškove svakog AM proizvoda. Kako raste omjer između veličine i kompleksnosti, AM postupci postaju sve manje primjenjivi. Drugim riječima, ako je potrebno načiniti relativno male i kompleksne proizvode, AM postupci izvrstan su izbor za njihovu proizvodnju. Obrnuto, veliki proizvodi relativno jednostavnih oblika nisu dobri kandidati za proizvodnju AM postupcima, iako će se s vremenom, razvojem bržih i jeftinijih AM sustava, to vjerojatno promijeniti.

Razvoj i primjena postupaka aditivne proizvodnje, zahtijevaju suradnju stručnjaka iz različitih područja (strojarstvo, elektrotehnika, medicina, dental, ...) na zajedničkim projektima, što omogućuje dodatni napredak na tom polju. Takvi projekti omogućuju uključivanje stručnjaka koji nalaze svoj interes u novom području istraživanja i imaju drukčije poglede na rješavanje postavljenih problema, što otvara potpuno nove vidike.

Uz interdisciplinarnost, koja zahtijeva maksimalno iskorištavanje potencijala postupaka aditivne proizvodnje, ne smije se smetnuti s uma ni odgovarajuće obrazovanje budućih stručnjaka, koji će inovativnim i kreativnim idejama pomicati granice mogućnosti razvoja i proizvodnje novih proizvoda. Takve pomake mogu im omogućiti jedino postupci aditivne proizvodnje. Nažalost, institucije za formalno obrazovanje još nisu spremne maksimalno iskoristiti nove aditivne postupke kao edukacijsko i didaktičko pomagalo. Jedan od izazova u budućnosti je promijeniti postojeće paradigme konstruiranja i proizvodnje, jer AM postupcima moguće je ostvariti gotovo sve – alati nisu više uvijek potrebni, sklopovi se mogu načiniti kao jedna

komponenta, proizvodi se sada mogu načiniti od dva ili više materijala u jednom ciklusu. Pojava jeftinijih sustava za aditivne postupke povećava dostupnost tih postupaka širem krugu obrazovnih ustanova, ali i većem broju pojedinaca, pa se može očekivati da će aditivni postupci i njihova primjena u budućnosti promijeniti način razmišljanja većine, a time i način obrazovanja novih stručnjaka.

Za uspjeh aditivnih postupaka, i nakon desetaka godina istraživanja, još je uvijek potrebno svladati određene prepreke. Fizički čimbenici kao što su točnost i preciznost, kvaliteta površine, ponovljivost i izbor materijala, jedna su skupina prisutnih prepreka. Međutim, iako su mogućnosti koje pružaju aditivni postupci sve očitije te iako oni sve brže prodiru i u konvencionalna (tradiciji okrenuta) okruženja, najveća prepreka koju valja svladati u daljnjem uspješnom razvoju i primjeni AM postupaka nalazi se u glavama pojedinaca i tvrtki koji teško prihvaćaju nova načela i prednosti koje donose ti postupci. Još uvijek postoji određen otpor primjeni AM postupaka, prije svega zbog njihova nepoznavanja te vrlo

često, kao posljedica toga, njihove nepravilne uporabe i posljedično negativne percepcije.

Nedvojbena je, međutim, kako je nova (r)evolucija već počela. Ona se događa na dvama područjima, koja su donedavno bila gotovo potpuno odvojena. Riječ je o informacijskim tehnikama i proizvodnim aditivnim tehnikama koje se temelje na gradnji proizvoda u slojevima. Udružena, ta dva područja nude potpuno nove poslovne mogućnosti. Danas se postupcima aditivne proizvodnje mogu načiniti gotovo svi mogući polimerni proizvodi, dijelovi letjelica, zubne proteze, medicinski implantati, namještaj, čak i čitave kuće, bilo što, a ograničenje je jedino mašta. Nadalje, za takvu proizvodnju nisu potrebni veliki proizvodni pogoni i velik broj zaposlenika. Dovoljan je vrlo mali prostor, već danas gotovo svakomu dostupna oprema za aditivne postupke i dobra ideja. A svjedoci smo da njih ne nedostaje.

Damir Godec, Mladen Šercer  
Sveučilište u Zagrebu,  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



Damir Godec

*Damir Godec, Ivan Vidović, Mladen Šercer*  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

## OPTIMIRANJE PARAMETARA NISKOBUDŽETNOG 3D TISKANJA

### Sažetak

*Niskobudžetni 3D printeri, temeljeni na postupku taloženja i očvršćivanja (eng. Fused Deposition Modeling – FDM), postaju sve više dostupni gotovo svakome tko želi "tiskati" svoje ideje. Na tržištu niskobudžetnih 3D printera postoji veći broj uređaja s različitim mogućnostima podešavanja parametara. Jedan od najvažnijih parametara za ocjenu kvalitete 3D tiskanih dijelova je dimenzijska stabilnost nakon tiskanja (iznos stezanja) i dimenzijska točnost 3D tiskanog dijela. Kako bi se mogli pripremiti računalni modeli koji će rezultirati tiskanim dijelovima točnih dimenzija, potrebno je analizirati utjecaj pojedinih podesivih parametara na 3D printeru na dimenzije tiskanog dijela. U okviru rada, načinjena je analiza na izradi dijela s referentnom geometrijom. Analiza je obuhvatila utjecaj temperature i brzine glave za tiskanje niskobudžetnog 3D printera na dimenzijsku točnost tiskanog dijela.*

*Ključne riječi: optimiranje parametara 3D tiskanja; niskobudžetni 3D printeri; dimenzijska stabilnost tiskanog dijela*

### 1. UVOD

3D tiskanje postaje sve više svakodnevnica svakog pojedinca ili tvrtke koji se bave razvojem i proizvodnjom, posebice novih proizvoda. Djelomično je to moguće zahvaliti pojavom niskobudžetnih 3D printera koji su postali dostupni gotovo svakome. Trošak početne investicije pri nabavi 3D printera, koji se kreće od svega nekoliko stotina eura, trošak materijala (već od nekoliko desetaka eura po kilogramu), kao i relativno jednostavno i jeftino održavanje 3D printera, omogućili su veliki porast primjene tih printera u različitim projektima; od vizualizacije, preko izrade prototipova, pa sve do izrade konačnih proizvoda. Upravo ovaj posljednji segment zahtijeva od korisnika detaljnije poznavanje utjecaja pojedinih parametara niskobudžetnih 3D printera na svojstva gotovog proizvoda, kako bi se mogli proizvoditi proizvodi odgovarajuće kvalitete, posebice kada je riječ o proizvodima koji su sastavni dio sklopa [1].

Trenutačno na tržištu postoji veći broj niskobudžetnih uređaja u kombinaciji s nekoliko postupaka aditivnih tehnologija. U radu je provedeno istraživanje s pomoću uređaja MakerBot Replicator 2X, koji radi na načelima postupka Fused Deposition Modelling (FDM).

## 2. EKSPERIMENTALNI SUSTAV

Eksperimentalni dio istraživanja sastoji se od ispitivanja utjecaja podesivih parametara 3D tiskanja na dimenzijsku točnost i postojanost dimenzija referentnog modela, te optimiranje tih parametara obzirom na postizanje željenih dimenzija proizvoda. Za potrebe provedbe istraživanja korišten je odgovarajući eksperimentalni sustav koji se sastoji od opreme (3D printer, pomična mjerka), odgovarajućeg materijala (ABS plastika), odgovarajućeg plana pokusa kao i metode optimiranja definiranih parametara na ciljana svojstva referentnog proizvoda.

### 2.1. Referentni proizvod

Prije početka provedbe istraživanja razvijen je referentni model. Riječ je o kutijastom modelu (slika. 1), čije su osnovne dimenzije navedene u tablici 1.

Tablica 1. Referente dimenzije modela

Duljina (mm)	100,0
Širina (mm)	25,0
Visina (mm)	10,0
Duljina otvora (mm)	20,0
Širina otvora (mm)	16,0
Debljina stijenke (mm)	2,0



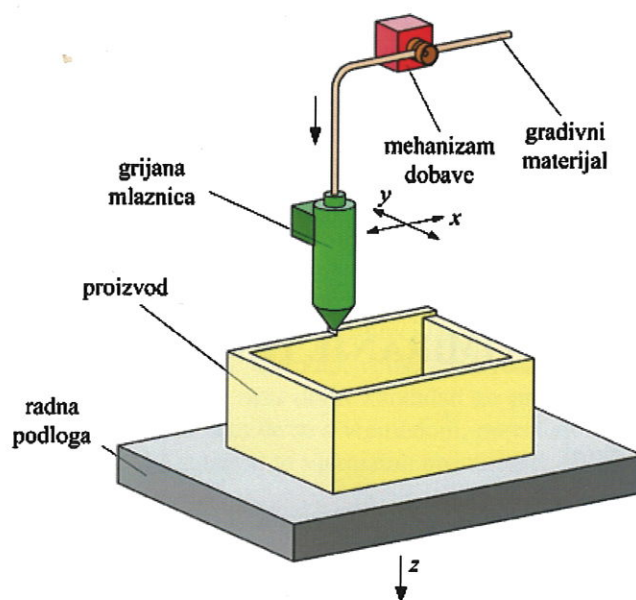
Slika 1. Referentni model

Sve navedene dimenzije, osim debljine stijenke, bit će veličine koje će se pratiti tijekom istraživanja i na temelju njih će se zaključivati o utjecaju pojedinog parametra 3D tiskanja na dimenzijsku točnost i stabilnost načinjenih proizvoda.

### 2.2. 3D printer

Tijekom istraživanja korišten je niskobudžetni 3D printer MakerBot Replicator 2x. Riječ je o 3D printeru koji radi na načelima postupka Fused Deposition Modelling (FDM) na kojima radi i većina niskobudžetnih 3D printera.

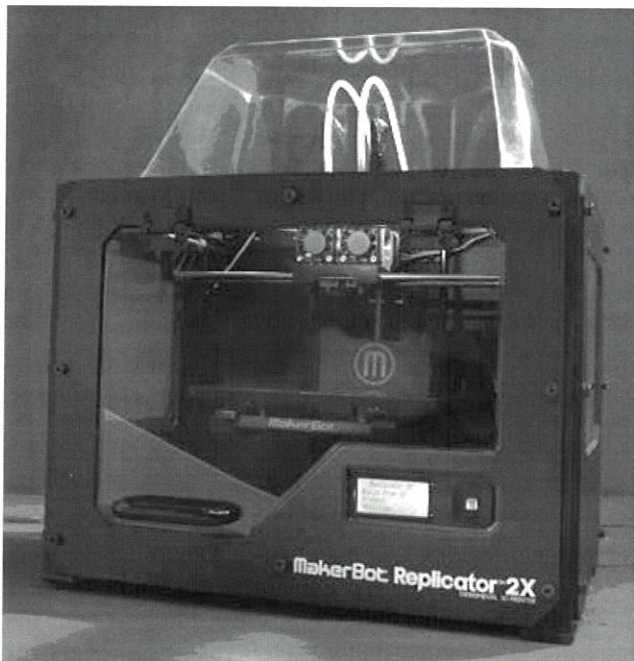
FDM postupak temelji se na načelima troosnog NC obradnog centra. Kroz mlaznicu, upravljanu s pomoću računala u sve tri osi, prolazi polimerni materijal u obliku žice koji se u mlaznici zagrijava i tali (slika 2). Materijal napušta mlaznicu u kapljevitom stanju, a pri sobnoj temperaturi vrlo brzo očvršćuje. Tijekom građenja proizvoda, materijal se ekstrudira i polaže na željena mjesta u vrlo finim slojevima. Prednosti postupka FDM očituju se u tome što nije potreban laser, manja je potrošnja energije, nema zahtjeva za hlađenjem i ventilacijom, jednostavna uporaba, relativno mala investicija, niski troškovi održavanja, male izmjere uređaja (nema zahtjeva za odvojenim radnim prostorom), nema vitopenjenja proizvoda. [2,3]



Slika 2. Načela FDM procesa [2,3]

Osnovni nedostaci FDM postupka prije svega se odnose na funkcionalnost proizvoda, koja je ograničena izborom materijala, vrlo je često nužna izrada podupora, nužna je naknadna obrada proizvoda, vidljive su linije između slojeva, čvrstoća proizvoda je snižena u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva, oscilacije temperature tijekom postupka mogu dovesti do delaminiranja (raslojavanja) proizvoda. [2,3]

3D printer MakerBot Replicator 2X, uređaj je koji radi na načelima tzv. Fused Filament Fabrication, koja je izvedenica FDM postupka (slika 3). Za izradu modela, prototipova i proizvoda, uređaj koristi ABS žicu promjera 1,75 mm, rastaljuje je i s pomoću glave printera nanosi na željeno mjesto u obliku rastaljene plastične niti promjera 0,4 mm. Pri tome, proizvođač printera navodi



Slika 3. MakerBot Replicator 2X [5]

preciznost podešavanja nanošenja sloja koja se kreće od 300 do 100  $\mu\text{m}$ , dok za preciznost pozicioniranja glave printera navode vrijednosti 11  $\mu\text{m}$  u ravnini XY i 25  $\mu\text{m}$  u smjeru osi z [4].

Printer ima mogućnost regulacije nekoliko parametara tiskanja, a za provedbu istraživanja kao podesivi parametri izabrani su temperatura glave printera i brzina pomicanja glave printera.

Za potrebe mjerenja dimenzija korištena je ručna digitalna pomična mjerka preciznosti 0,01 mm.

### 2.3. Plan pokusa

Prije provedbe istraživanja, potrebno je izabrati odgovarajući plan pokusa s pomoću kojeg je moguće dobiti najveći mogući broj informacija, uz istodobno provođenje najmanjeg broja stanja pokusa. Kako se pri planiranom istraživanju očekuju interakcije između podesivih parametara 3D printera, za provedbu pokusa izabran je nepotpuni faktorski plan pokusa na dvije razine [6].

Za potrebe provedbe statističke obrade dobivenih podataka primijenjen je računalni program DesignExpert. Pomoću istog programa provedeno je i optimiranje podesivih parametara na temelju tzv. *funkcije poželjnosti*. Pri tome se tijekom optimiranja u obzir uzimaju poželjne vrijednosti promatranih svojstava načinjenih proizvoda tzv. *odzivi* (u ovom slučaju promatrane dimenzije proizvoda), koje mogu biti minimalne, maksimalne ili ciljane.

Kao rezultat takvog optimiranja očekuje se dobivanje kombinacije podesivih parametara 3D tiskanja koji rezultiraju proizvodima dimenzija što sličnijih onima definiranim 3D računalnim modelom uz uzimanje u obzir općenite vrijednosti stezanja materijala od kojeg su proizvodi načinjeni.

### 3. ANALIZA REZULTATA POKUSA

Eksperimentalni dio istraživanja proveden je na temelju izrade referentnog proizvoda (slika 1). U okviru istraživanja, kroz provedbu pokusa, pratit će se utjecaj dva podesiva parametra 3D printera na dimenzije navedene u tablici 1. Riječ je o brzini pomicanja glave printera i temperaturi glave printera. Rasponi podesivih parametara korišteni za potrebe provedbe pokusa nalaze se u tablici 2.

Tablica 2. Vrijednosti podesivih parametara

Faktor	Naziv	Jed.	Donja granica	Gornja granica
A	Brzina glave	mm/s	30,0	150,0
B	Temperatura glave	°C	220,0	260,0

Provedeni frakcionirani faktorski plan pokusa se u ovom slučaju sastojao od 7 stanja pokusa (tablica 3), kojima su obuhvaćene sve kombinacije podesivih parametara na donjoj i gornjoj granici, kao i u središtu pokusa, gdje su načinjena dva ponavljanja radi utvrđivanja greške pokusa. Stanja pokusa bila su izvođena slučajnim redoslijedom.

Tablica 3. Plan pokusa – stanja

Stanje	Brzina glave mm/s	Temperatura glave °C
1	30	220
2	30	260
3	90	240
4	90	240
5	90	240
6	150	220
7	150	260

#### 3.1. Analiza vremena izrade

Tijekom provedbe pokusa, osim promatranja navedenih dimenzija proizvoda, usporedila su se i vremena izrade modela u pojedinom stanju pokusa. Raspolagalo se s tri vrste podataka: vremenom izrade koje je predvidio računalni program za pripremu modela prije izrade (MakerWare), vremenom izrade koje je predvidio 3D printer nakon učitavanja datoteke i zadavanja parametara i stvarno vrijeme izrade. Rezultate usporedbe tih vremena prikazuje tablica 4.

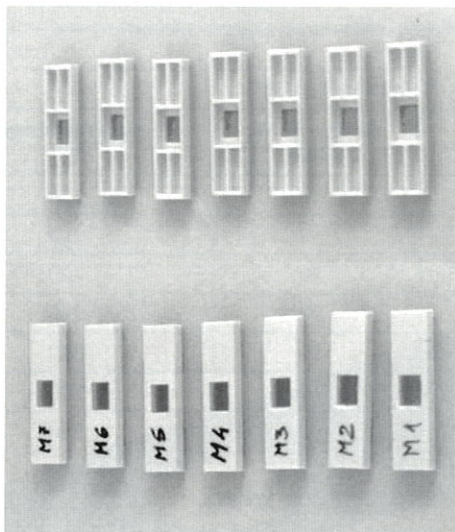
Tablica 4. Analiza vremena izrade

	A (mm/s)	B °C	MakerWare (min)	3D printer (min)	Stvarno (min)
1	30	220	95	59	58
2	30	260	95	61	60
3	90	240	65	49	48
4	90	240	65	49	48
5	90	240	65	49	48
6	150	220	60	48	46
7	150	260	60	48	46

Iz tablice 4 vidljivo je kako računalni program predviđa izradu modela s greškom koja seže i do gotovo 40 %, pri čemu je najveća greška uz najmanju brzinu pomicanja glave. Pri većim brzinama pomicanja glave 3D printera, razlike u vremenima izrade bitno su manje, a u usporedbi sa stvarnim vremenom, greška u predviđanju iznosi do 25 %.

### 3.2. Analiza utjecaja podesivih parametara

Pri analizi utjecaja podesivih parametara na promatrane dimenzije referentnih proizvoda (prikazani na slici 7), provedena su 3 mjerenja: prvo odmah nakon izrade i uklanjanja poduporne strukture, drugo nakon 24 sata od izrade i treće nakon 48 sati od izrade. Ovakvim pristupom se htjelo analizirati eventualne promjene u dimenzijama kroz 48 sati nakon izrade. ABS je amorfni plastomer, kod kojeg se ne očekuju bitne promjene u dimenzijama nakon izrade.



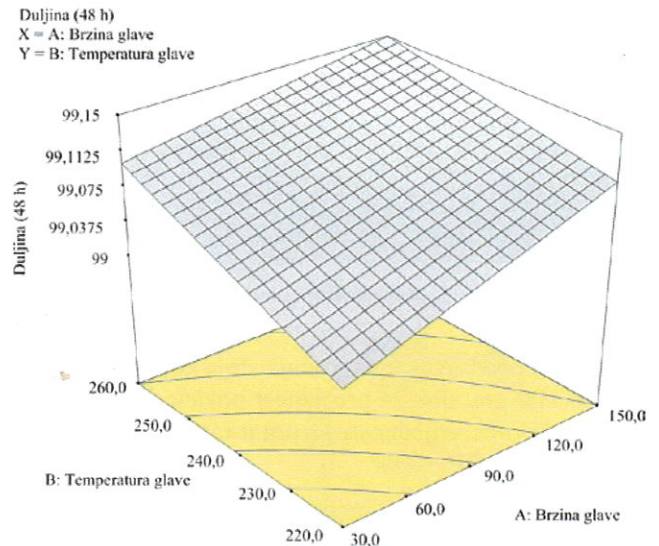
Slika 4. Izrađenih 7 referentnih proizvoda

Od materijala se očekuje da se radi zagrijavanja, taljenja i očvršćivanja hlađenjem, stegne u rasponu 0,6 do 0,8 %, što je uobičajeno za ABS.

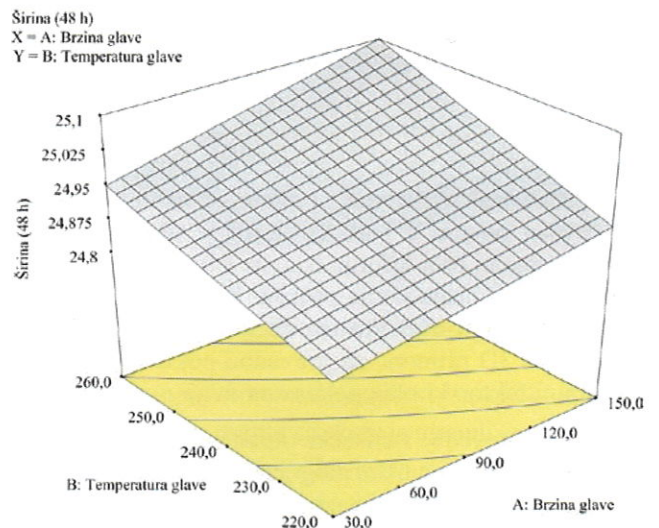
Kada se analiziraju promjene dimenzija nakon 48 sati, moguće je uočiti promjene u duljini i visini referentnih proizvoda u rasponu do 1 %, međutim, kada je riječ o visini proizvoda, promjene te dimenzije iznose i do 4 %. Najveća promjena visine dobivena je u stanju pokusa s najmanjom brzinom pomicanja glave i najmanjom temperaturom glave 3D printera. U ostalim stanjima ta je promjena u rasponu do 2,5 %, dakle gotovo dvostruko manje, no ipak u većem rasponu od ostalih promjena dimenzije.

Pri analizi promjene dimenzija otvora na proizvodu, također se mogu uočiti veće promjene (do 3,5 %), pri čemu je ovdje riječ o povećanju dimenzija, u odnosu na pojavu smanjenja vanjskih dimenzija proizvoda. Ovdje

je očito riječ o prekomjernom stezanju materijala, najvjerojatnije izazvanom geometrijom proizvoda (rebra u blizini otvora), koje je nastalo unutar prvih 24 sata nakon izrade te se gotovo ustabililo u sljedećih 24 sata. Za potrebe rada, analiziran je utjecaj izabranih podesivih parametara na promatrane dimenzije proizvoda nakon 48 sati. Slike 5 do 9 prikazuju ovisnosti dimenzija proizvoda o brzini pomicanja i temperaturi glave 3D printera. Istodobno se promatra utjecaj svakog od pojedinačnih parametara kao i utjecaj njihove interakcije.



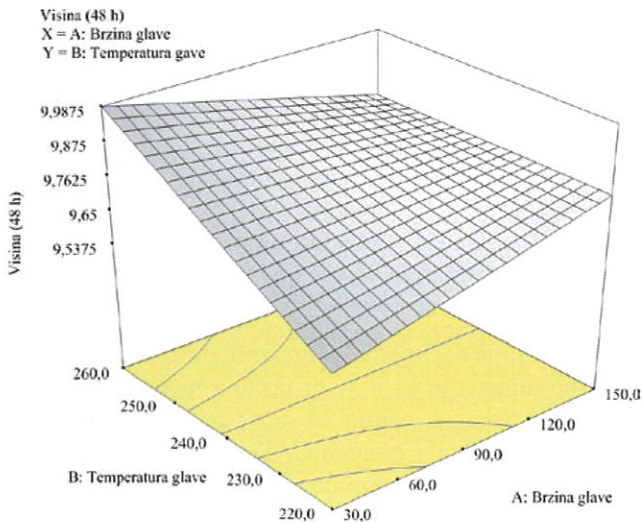
Slika 5. Utjecaj na duljinu proizvoda



Slika 6. Utjecaj na širinu proizvoda

ANOVA analiza je u slučaju duljine proizvoda pokazala kako niti jedan od parametara i njihova interakcija nemaju signifikantni utjecaj na postizanje te dimenzije.

Vrijednost duljine referentnog proizvoda moguće je predvidjeti pomoću izabranih podesivih parametara pomoću polinoma drugog stupnja koji glasi:



Slika 7. Utjecaj na visinu proizvoda

$$\text{Duljina} = 98,36 + 3,12 \cdot 10^{-3} \cdot A + 2,81 \cdot 10^{-3} \cdot B - 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot B \quad (1)$$

Pri analizi utjecaja parametara na širinu proizvoda, ANOVA analiza pokazuje kako su oba parametra, zajedno s interakcijom, signifikantni. Pri tome najveći utjecaj imaju oba parametra pojedinačno.

Polinom drugog stupnja kojim je moguće predvidjeti vrijednost širine proizvoda glasi:

$$\text{Širina} = 24,02 - 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot A + 3,44 \cdot 10^{-3} \cdot B + 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot B \quad (2)$$

Na visinu proizvoda signifikantno utječu temperatura glave printera i interakcija temperature i brzine glave, dok sama brzina pomicanja glave nema signifikantnog utjecaja.

Predviđanje visine proizvoda moguće je pomoću sljedeće jednadžbe:

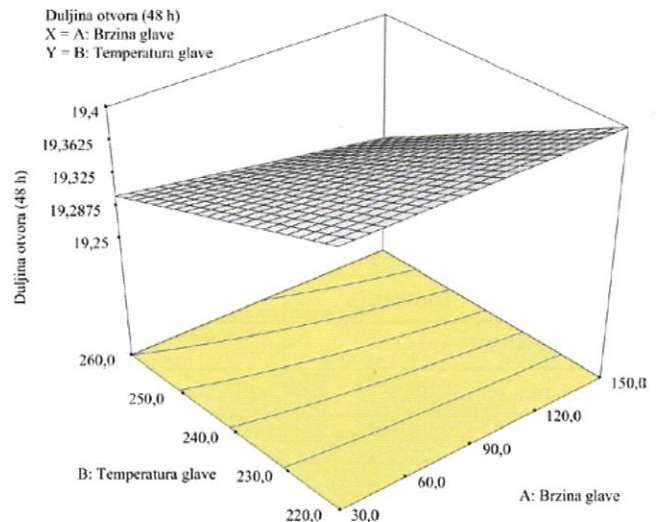
$$\text{Visina} = 6,41 + 0,022 \cdot A + 0,014 \cdot B - 9,37 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot B \quad (3)$$

U slučaju dimenzija otvora na referentnom proizvodu (slika 8 i slika 9), niti jedan od parametara 3D tiskanja nije se pokazao signifikantnim, kao ni njihova interakcija. Međutim, ovdje valja napomenuti kako temperatura glave printera ima i do 5 puta veći utjecaj od brzine pomicanja glave.

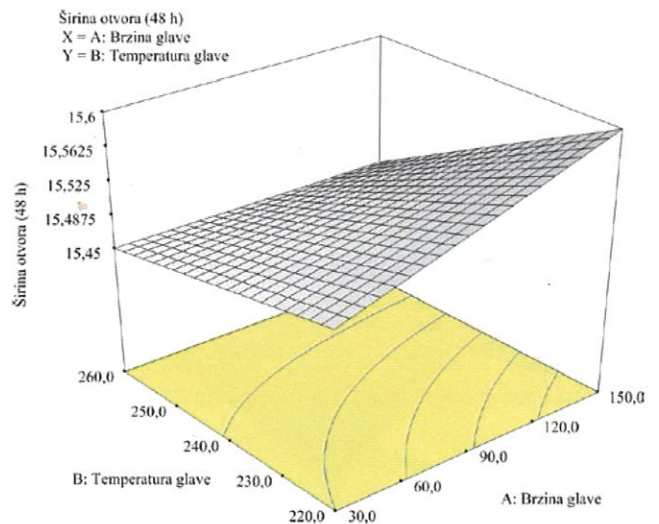
Obje dimenzije otvora moguće je predvidjeti pomoću sljedeća dva polinoma drugog stupnja:

$$\text{Duljina-o} = 19,88 + 2,23 \cdot 10^{-3} \cdot A - 2,19 \cdot 10^{-3} \cdot B - 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot B \quad (4)$$

$$\text{Širina-o} = 15,61 + 5,42 \cdot 10^{-3} \cdot A - 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot B - 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot A \cdot B \quad (5)$$



Slika 8. Utjecaj na duljinu otvora



Slika 9. Utjecaj na širinu otvora

### 3.3. Optimiranje

U okviru optimiranja podesivih parametara, potrebno je definirati kombinaciju parametara (brzine pomicanja i temperature glave 3D printera) kako bi se postigle željene dimenzije. Pri tome valja definirati i odgovarajuće kriterije koje je moguće primijeniti na sve promatrane dimenzije istodobno ili u cilju parcijalnog optimiranja samo na dio njih.

U ovom radu primijenjeno je kompleksno optimiranje koje podrazumijeva uzimanje u obzir svih promatranih ciljanih vrijednosti dimenzija proizvoda. Promatranim dimenzijama su zadane ciljane vrijednosti koje sadrže stezanje ABS-a u iznosi 0,8 % (tablica 5).

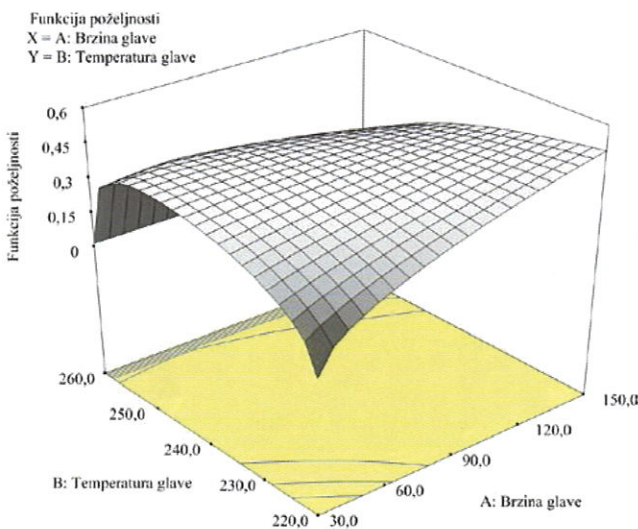
Tablica 5. Ciljane vrijednosti

Dimenzija	Vrijednost
Duljina proizvoda (mm)	99,2
Širina proizvoda (mm)	24,8
Visina proizvoda (mm)	9,92
Duljina otvora (mm)	19,84
Širina otvora (mm)	15,87

Nakon provedenog optimiranja dobivena je kombinacija brzine pomicanja glave 3D printera i temperature glave, kao i postizive vrijednosti promatranih dimenzija proizvoda (tablica 6). Pri tome vrijednost funkcije poželjnosti u optimalnom slučaju iznosi 0,495 (slika 10).

Tablica 6. Rezultati optimiranja

Parametar / Dimenzija	Vrijednost
Brzina glave (mm/s)	150,0
Temperatura glave (°C)	220,0
Duljina proizvoda (mm)	99,1
Širina proizvoda (mm)	24,9
Visina proizvoda (mm)	9,75
Duljina otvora (mm)	19,4
Širina otvora (mm)	15,6



Slika 10. Funkcija poželjnosti

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran utjecaj dva podesiva parametra niskobudžetnog 3D printera: brzine pomicanja glave i temperature glave printera na postizanje odgovarajućih dimenzija referentnog proizvoda kutijastog oblika. Prema očekivanjima, temperatura glave pokazala se kao daleko signifikantniji parametar za određivanje dimenzijske točnosti proizvoda od brzine pomicanja glave, osim u slučaju širine proizvoda, kada se i brzina glave pokazala signifikantnim parametrom. Tijekom optimiranja parametara, dobivene su vrijednosti pomoću kojih se mogu očekivati vrijednosti dimenzija proizvoda najbližih ciljanim vrijednostima koje su određene na temelju CAD modela i pretpostavljene vrijednosti stezanja ABS od 0,8 %.

Rezultati optimiranja upućuju na to da je referentni proizvod najbolje tiskati uz najnižu temperaturu primijenjenu u pokusu (220 °C), uz najveću brzinu pomicanja glave (150 mm/s). Iz same fizike polimera jasno je da će se materijali pri prolasku kroz manji temperaturni raspon od čvrstog u rastaljeno stanje i obrnuto, manje i stegnuti, a sam proces očvršćivanja je kraći, pa rastaljeni materijal koji se nanosi slobodno u prostoru (u radnoj komori 3D printera) brže očvršćuje i zadržava željeni oblik i dimenzije.

Pri mjerenjima načinjenih referentnih proizvoda sve promatrane dimenzije su u svim fazama mjerenja (odmah nakon 3D tiskanja, nakon 24 sata i nakon 48 sati) bile manje od dimenzija zadanih CAD modelom, što je bilo i očekivano uslijed stezanja ABS. No kod dimenzija otvora na proizvodu, nakon 24 i nakon 48 sati uočeno je blago povećanje dimenzija. Takvo ponašanje proizvoda (materijala) moguće je objasniti geometrijom proizvoda, jer se sa sve četiri strane oko otvora nalaze rebra s lokalnim mjestima zadebljanja stijenke. Njihovo hlađenje uzrokuje deformaciju otvora i nastale promjene u smislu povećanja dimenzija u usporedbi s dimenzijama utvrđenim mjerenjem odmah nakon 3D tiskanja.

Iako provedba ovakvih pokusa ima relativno usku primjenu, spoznaje do kojih se dolazi daju smjernice kako podešavati parametre niskobudžetnih 3D printera u cilju postizanja što kvalitetnijih tiskanih dijelova. Iznimno je bitno da korisnici 3D printera stvaraju vlastitu bazu podataka o podešenim parametrima i postignutim svojstvima za različite obitelji proizvoda kako bi se postizivi rezultati mogli što kvalitetnije predvidjeti i bez provedbe pokusa.

#### ZAHVALA

Članak je dio istraživanja u okviru projekta *Povišenje učinkovitosti razvoja i proizvodnje polimernih proizvoda*, financiranog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. Autori zahvaljuju Ministarstvu na financiranju tog projekta.

#### LITERATURA

- [1] <http://www.makerbot.com/robohand-press-assets/> (19.08.2014.)
- [2] Gebhardt, A., 2003, *Rapid Prototyping*, Carl Hanser Verlag, München
- [3] Noorani, R., 2006, *Rapid Prototyping – principles and applications*, John Wiley & Sons
- [4] N.N., 2013, *Replicator 2X – User Manual*, MakerBot
- [5] [http://makerbot-blog.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2013/01/MakerBot\\_Replicator2X\\_low\\_1.jpg](http://makerbot-blog.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2013/01/MakerBot_Replicator2X_low_1.jpg) (19.08.2014.)
- [6] R.J. Del Vecchio, R.J., 1997, *Understanding Design of Experiments*, Carl Hanser Verlag, München





Mladen Šercer

Nino Krznar, Mladen Šercer, Ana Pilipović  
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

## RAZVOJ I IZRADA POLIMERNOG PROIZVODA POMOĆU TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA

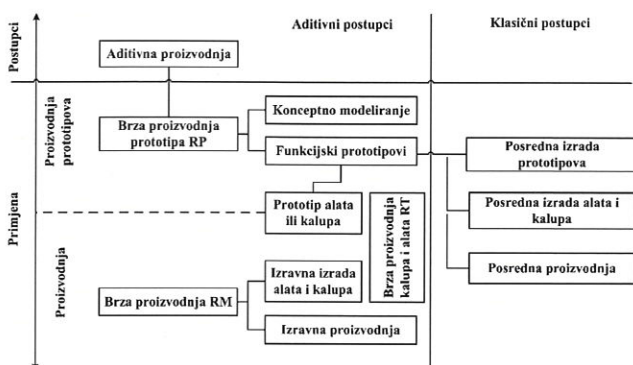
Razvoj novog proizvoda posebno je složen, jer uključuje razumijevanje mnogih područja oblikovanja, od estetskog oblikovanja do poznavanja mehaničkih i uporabnih svojstava proizvoda. Također posebnost polimernih materijala, a i njihova prerada predstavlja poteškoće pri razvoju samog proizvoda.

U današnje vrijeme, aditivni postupci, pogotovo za male serije sve više zamijenjuju klasične postupke prerade. Također značajnim razvojem niskobudžetnih printera moguće je načiniti proizvod komplicirane geometrije u kratkom vremenu i niske cijene na temelju želja svakog pojedinca.

### 1. UVOD

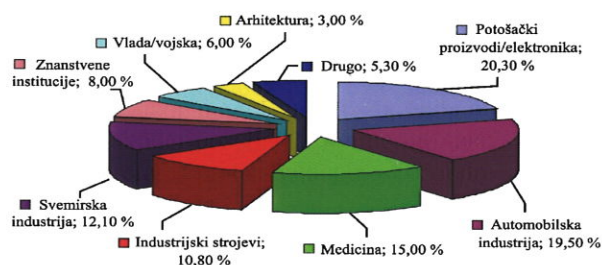
Aditivnim postupcima (AM) moguće je izraditi fizičke modele, prototipove, dijelove kalupa i alata i funkcionalne dijelove iz 3D računalnog modela tijekom konstruiranja pomoću računala (CAD), komplicirane geometrije koje je teško ili uopće nije moguće napraviti nekim drugim postupcima. [1]

Aditivni postupci dijele se od izrade prototipova do posredne primjene tih prototipova u klasičnim postupcima prerade (slika 1). Kako su se tehnologije razvijale, postupci su našli sve veću primjenu na različitim područjima. Najviše se upotrebljavaju za proizvodnju potrošačkih proizvoda/elektronike, zatim u automobilskoj industriji i medicini, dok najmanje u arhitekturi (slika 2). Slika 3 prikazuje strukturu primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina.

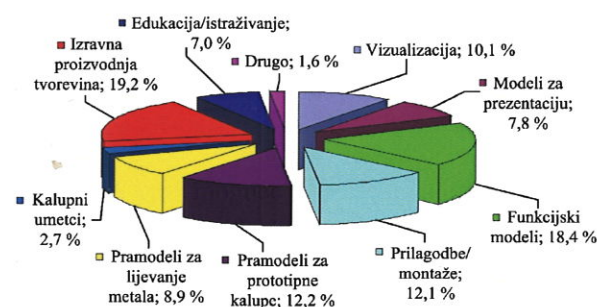


Slika 1. Podjela aditivnih postupaka [2]

AM postupci upotrebljavaju se za izradu tvorevina od metala, keramike i polimera u obliku kapljevine, praha, žica, folija, itd. Prema vrsti materijala dijele se na:



Slika 2. Područja primjene AM postupaka u 2012. godini [3]



Slika 3. Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini [3]

- kapljevine materijale (npr. stereolitografija – SLA, PolyJet, očvršćivanje pomoću digitalno obrađenog svjetlosnog signala – DLP)
- materijale u obliku praha (npr. selektivno lasersko srašćivanje – SLS, 3D tiskanje – 3DP)
- krute materijale (npr. taložno očvršćivanje – FDM, laminiranje objekata – LOM)

Princip aditivne proizvodnje može se shvatiti kao što je prikazano na slici 4, tj. iz 3D modela konstruiranog pomoću računala izrežu se slojevi podjednake debljine i slažu se jedan na drugi. Rezultat takvog slaganja je stepenasti izgled površine. [2]



a.)

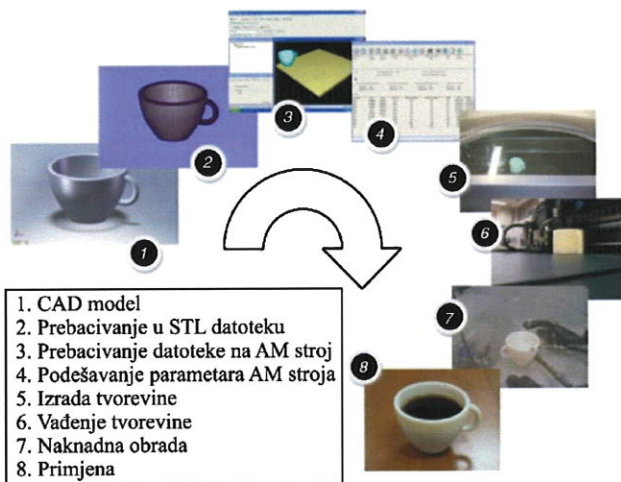
b.)

Slika 4. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a.) prikaz slaganja slojeva, b.) 3D tvorevina

## 2. FAZE IZRADE TVOREVINA ADITIVNIM POSTUPCIMA

U svim postupcima proizvodnje faze izrade su iste i sa-  
stoje se od (slika 5) [4]:

- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- prebacivanje STL datoteke na AM stroj
- podešavanje parametara AM stroja
- izrada tvorevine
- vađenje tvorevine
- naknadna obrada, ako je potrebna
- primjena



Slika 5. Faze AM postupaka [4]

Prvi korak svih AM postupaka je izrada trodimenzionalnog geometrijskog modela u nekom CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. godine tvrtka *3D Systems* uvodi STL datoteku (e. *Standard Tessellation Language*), koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta. STL datoteka nema boje, pa je 2009. godine uvedena AMF datoteka (e. *Additive Manufacturing File*) koja uz STL postaje standard za AM postupke i čini osnovu za rezanje u slojeve na čemu se temelje AM postupci. AMF datoteka može dati opis materijala i boje pojedinog volumena i boju svakog trokuta u mreži. [5, 6]

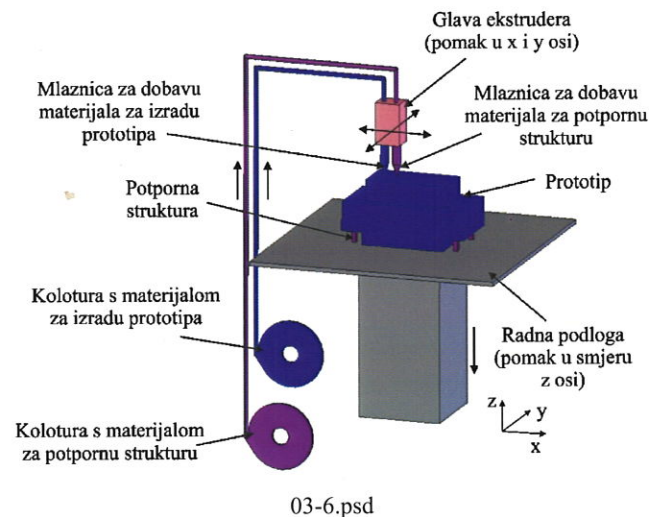
U nekim postupcima (npr. SLA, FDM, PolyJet) potrebno je izraditi potpurnu strukturu koja bi trebala slijediti obod donjeg sloja tvorevine, uključujući njegove uglove. Podupiranjem, cijelo područje dna tvorevine sprječava vitoperenje tvorevine tijekom izrade slojeva. [6]

Nakon podešavanja parametara stroja (debljina sloja, snaga, brzina itd.) slijedi izrada tvorevine i nakon završetka zadnjeg sloja vađenje gotove tvorevine. Prilikom vađenja potrebno je paziti da je temperatura u radnom prostoru stroja dovoljno niska za sigurno rukovanje tvorevinom. U nekim postupcima (npr. stereolitografija, 3DP) potrebno je naknadno umreživanje da se završi proces polimerizacije, i poboljšaju mehanička svojstva, jer unutarnji dijelovi slojeva možda nisu u potpunosti očvršćeni. Slijedi naknadno

obrađivanje (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, obrada površine, bojanje itd.). [4]

## 3. POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆIVANJA

Postupak taložnog očvršćivanja je aditivni postupak kod kojeg polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz mlaznicu, zagrijava se i tali. Iz numerički upravljane mlaznice izlazi materijal u omekšanom stanju, a pri sobnoj temperaturi ubrzo očvršćuje te se polaže na željena mjesta. Stoga je važno održavati temperaturu materijala malo iznad temperature očvršćivanja. [7] Cijeli sustav je u temperiranoj okolini (pri temperaturi neposredno ispod tališta materijala), pa se smanjuje potrošnja energije. Nakon izrade prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu novog sloja i ekstrudira se novi sloj. Shematski prikaz postupka taložnog očvršćivanja dan je na slici 6.



03-6.psd

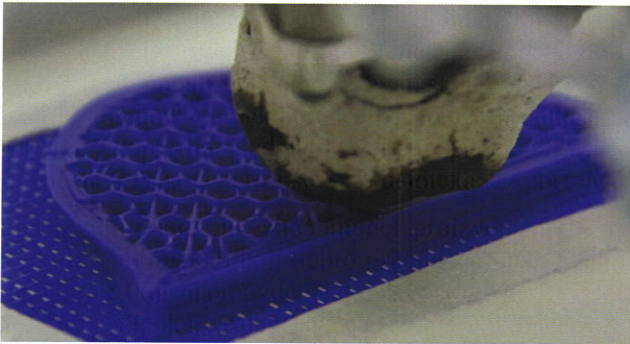
Kod izrade dijelova kompliciranije geometrije potrebno je upotrijebiti potpurnu strukturu (e. *support*). Tada se radi o postupku s dvije mlaznice. Pri tome kroz jednu mlaznicu prolazi gradivni materijal, a kroz drugu materijal za potpurnu strukturu. [7] Potporna struktura je potrebna kod izrade dijelova s kanalima, udubinama, prazninama, uvučenim strukturama ili dijelovima modela koji su u zraku. Gradi se ispod dijela konstrukcije koji visi u zraku tako da se gradivni materijal nanosi na potpurnu strukturu. Materijal potporne strukture je ili topiv u vodi ili otapalima ili se mehanički odstranjuje. [9] Između tvorevine i potporne strukture ostaje određena zračnost, tako da se nakon izrade potporna struktura može lako odvojiti od tvorevine. [7]

Kvaliteta površine tvorevina izrađenih FDM postupkom relativno je gruba, a tvorevine mogu biti porozne. [7]

Postupak taložnog očvršćivanja pojavljuje se u raznim granama industrije i društva, npr. zrakoplovstvo, svemirske letjelice, automobilska industrija, medicina, bijela tehnika, glazba, zabava. [10]

Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura te zatim unutrašnjost. Za proizvodnju debelostjenih tvorevina

unutrašnjost stijenke može biti popunjena različitim strukturama: puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici) i optimalna struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura) (slika 7). [11]



Slika 7. Struktura pčelinjih saća [11]

*Prednosti FDM postupka su:* brzina i sigurnost rada strojeva koji ne primjenjuju otrovne materijale pa nije potreban poseban prostor, postupak izrade je brži nego kod SLA, nije potrebno čišćenje prototipa, nema vitoperenja prototipa, nije potrebno hlađenje, prototipove je moguće pjeskariti, bušiti, bojati, galvanizirati, moguće je ekstrudirati PE-HD, PE-LD, PP, čokoladu, biokompatibilne i/ili biorazgradljive materijale (npr. polikaprolakton (PCL)) i elastomere, a moguće je izraditi istovremeno više prototipova. [12]

*Nedostaci FDM postupka su:* potrebna je naknadna obrada, vrlo često je nužna potporna struktura, nepredvidivo skupljanje materijala, oscilacije temperature mogu dovesti do raslojavanja prototipa, vidljive su linije između slojeva, čvrstoća prototipa je snižena u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva prototipa, niska dimenzijska točnost (može se povećati s debljinom sloja od 0,078 mm koja je dostupna kod skupih strojeva, s tim da se povećava vrijeme izrade). Mlaznice su kružnog presjeka te je zbog toga nemoguće izraditi oštre rubove. Stvaran oblik ovisi o mlaznici i viskoelastičnom ponašanju materijala prilikom očvršćivanja. Brzina ovisi o mogućnostima doziranja materijala kroz mlaznicu. Pri povećanju protoka taljevine može doći do povećanja mase tvorevine. Mehanička svojstva ovisi o položaju prototipa na radnoj podlozi, pogotovo u smjeru z osi. [12]

Materijali koji se primjenjuju u FDM postupku su akrilonitril/butadien/stiren – ABS, polilaktid – PLA, poliamid – PA, polipropilen – PP, polikarbonat – PC, itd. [12]

#### 4. RAZVOJ POLIMERNE TVOREVINE – POKLOPAC PAMETNOG TELEFONA

Konstruiranje 3D modela poklopca pametnog telefona predstavlja najteži korak u izradi konačnog proizvoda. Ponajprije zbog toga što pri izradi nije dostupan kompletan radionički crtež zadanog telefona, nego tek osnovne dimenzije duljine, širine i visine, bez zaobljenih kontura i radijusa koji su teško mjerljivi. Zbog toga

pametni telefon je skeniran na uređaju *Atos Core*, te je model obrađen povratnim inženjerstvom (e. *Reverse Engineering*).

Telefon je skeniran s dvije strane, odnosno u dva projekta. Jedan sa strane poleđine, a drugi sa strane ekrana mobitela. Nakon obrade digitaliziranog zapisa, potrebno je postaviti ravninu simetrije modela što će u fazi 3D modeliranja omogućavati stvaranje zrcalne slike i preslikavanje nekih značajki modela u odnosu na ravninu simetrije. Nadalje je korišten paket *CATIA V5R20*. Nakon toga generira se STL datoteka (Export>Mesh>STL).

Zadovoljavajući model proizvoda treba rezultirati poklopcem koji dobro prijanja za telefon, skida se bez teškoća i omogućuje dobru zaštitu kućišta telefona. Polazna točka za daljnju fazu izrade poklopca je STL datoteka pametnog telefona, prikazana na slici 8.



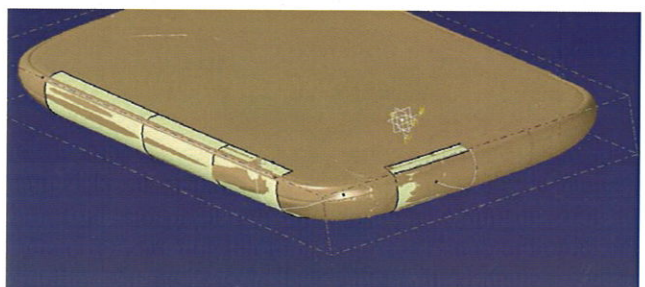
Slika 8. STL datoteka pametnog telefona

#### 4.1. 3D modeliranje površina

Za dobivanje površina iz STL datoteke te prebacivanje površina u čvrsto tijelo, upotrijebljeni su sljedeći moduli programa *Catia V5R20: Generative Shape Design, Digitized Shape Editor, Quick Surface Reconstruction* te *Part Design*.

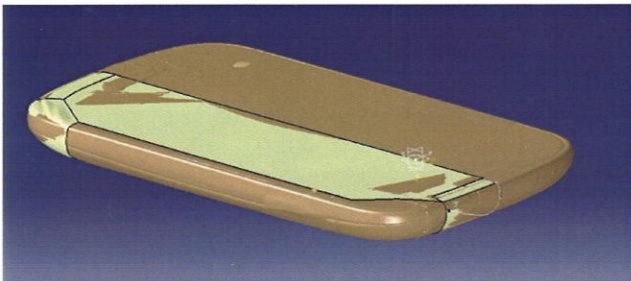
##### 4.1.1. Provlačenje površina i 3D modeliranje – 1. način

U modulu *Generative Shape Design* upotrijebljene su funkcije za provlačenje površina *Sweep*, za spajanje površina *Blend* te na kraju funkcije *Heal* i *Join*. Provlačenje (e. *Sweep*) prikazano je na slici 9.

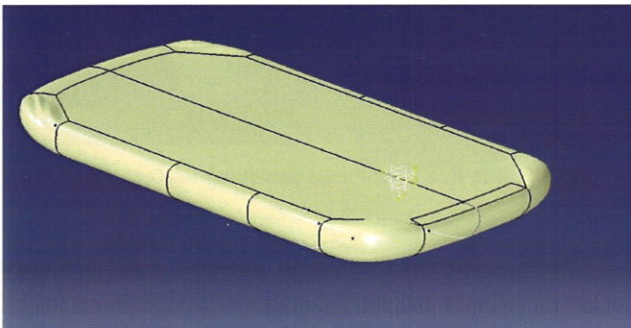


Slika 9. Provlačenje površina

Krivulja koja predstavlja konturu ruba telefona povlači se po drugoj krivulji uzduž telefona te tako čini površinu. Više različitih površina može se spajati funkcijom *Blend* te se tako zatvaraju praznine između povučenih površina. Neke dijelove modela nije moguće dobro zatvoriti funkcijama *Sweep* i *Blend* pa se u tom slučaju može koristiti funkcija *Power Fit* u modulu *Quick Surface Reconstruction*. Funkcija *Power Fit* tvori površinu koja aproksimira STL u području zatvorenih 3D krivulja koje su prethodno zadane. Korištenim funkcijama programa dobivaju se površine koje pokrivaju polovicu telefona te se zrcale oko ravnine simetrije, slika 10 i 11.

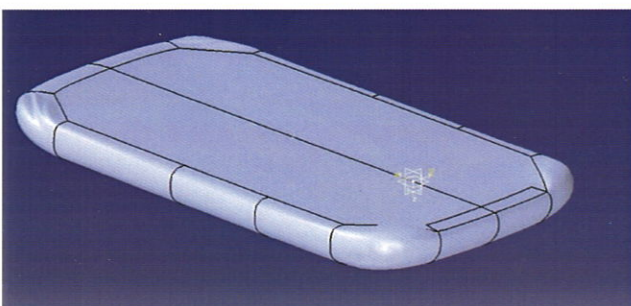


Slika 10. Provlačenje površina i opcija Mirror



Slika 11. Površine pametnog telefona

Nakon dobivanja zrcalne slike površina potrebno je popuniti eventualne zazorke između pojedinih površina, što se postiže funkcijom *Heal*. Funkcija *Heal* spaja sve površine te dodatno zaglađuje nepravilnosti ovisno o zadanim parametrima. Zatim je upotrebljena funkcija *Join* koja spaja sve površine u jednu i dodatno poravnava nepravilnosti (slika 11). Da bi se dobio upotrebljiv 3D CAD model, potrebno je površine prebaciti u čvrsto tijelo (e. *solid*). U modulu *Part Design* upotrebljava se funkcija *Close Surface* te ako nema preklapanja ili razmaka između površina nastaje čvrsti 3D model (slika 12).



Slika 12. 3D model telefona

Model poklopca telefona dobiva se primjenom *boolean* operacije *Remove*. Oko modela telefona načinjen je veći model sličnog oblika s istim koordinatnim sustavom te je od novog modela pomoću operacije *Remove* odstranjen model poklopca ostavljajući prazninu predviđenu za prihvat telefona. Pomoću funkcije *Pocket* izrezani su otvori za razne priključke i tipke. Rezultat je prikazan na slici 13, gdje je prikazano stablo iz kojeg se vidi postupak dobivanja utora i otvora. Nakon što je postupak modeliranja završio, model se sprema kao STL datoteka.

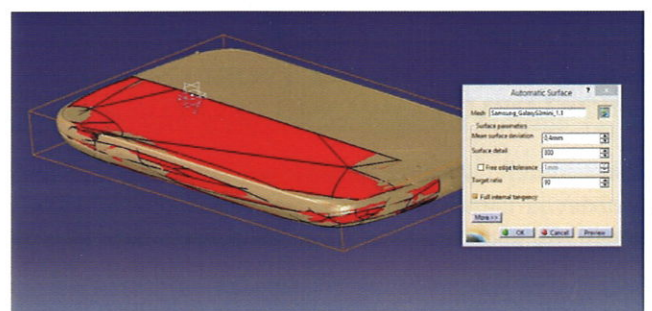
Oblik izrađenog dijela ne odgovara obliku telefona te se ne ostvaruje dobro prijanjanje poklopca za površinu telefona, tj. izrađeni dio nije zadovoljavajuće rješenje.



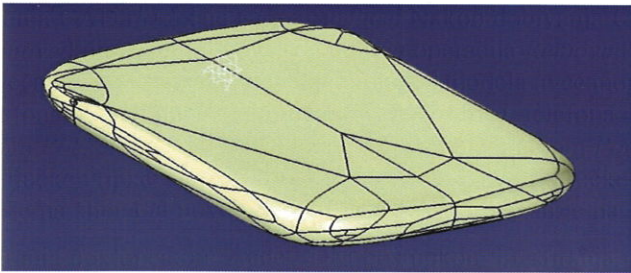
Slika 13. Poklopac u izradi i stablo

#### 4.1.2. Provlačenje površina i 3D modeliranje – 2. način

Oblik modela dobivenog ručnim provlačenjem površina očigledno ima previše odstupanja od točnog oblika telefona te nije postignuta dovoljna točnost prilikom rekonstruiranja. Drugi način dobivanja skupa površina kojima se aproksimira STL je upotreba funkcije *Automatic Surface*. Postavljanjem parametara *Mean surface deviation* i *Surface detail* određuje se devijacija ili odstupanje površine od STL-a u milimetrima te broj površina koje opisuju model. Da bi



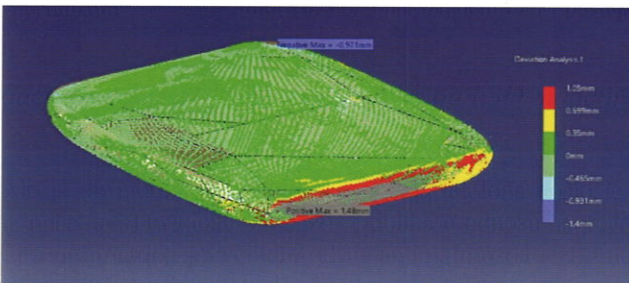
Slika 14. Automatic Surface i parametri



Slika 15. Automatic Surface

se dobio simetričan oblik površina, skup površina se funkcijom *Split* prepolavlja uzduž ravnine simetrije te se jedna strana preslikava na drugu funkcijom *Mirror*, slika 14 i 15.

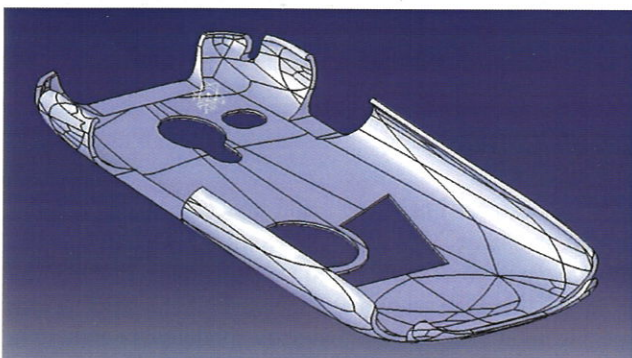
Devijacija ili odstupanje od STL-a je postavljeno na 0,4 mm, a broj površina na 800. Da bi se dobio oblik površina što bliži STL-u, devijacija mora biti što manja, a broj površina što veći. Ipak, pri izboru parametara valja biti oprezan, jer se postiže i veća točnost na mjestima lokalnih nepravilnosti. Zatim treba ručno popraviti određene dijelove površina koji se preklapaju i popuniti zazoru funkcijama *Power Fit*, *Heal* te *Join*. Analizom devijacije ili odstupanja utvrđuju se odstupanja površina od stvarnog STL-a, što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Analiza devijacije 1

Iz slike 16 vidljivo je odstupanje od STL-a od čak 1 mm na jednoj strani modela.

Nadalje, postupak modeliranja poklopca je sličan kao i u prethodnom poglavlju. Dobivene površine se kopiraju te se funkcijom *Offset* pomaknu za 1,2 mm prema van tako da se dobije veći model. Zatim se početne i pomaknute površine prebacuju u čvrsto tijelo pomoću



Slika 17. Model poklopca

funkcije *Close Surface*. Nakon dobivanja CAD modela, upotrebljava se *boolean* operacija *Remove* kojom se odstranjuje model telefona od modela uvećanog za 1,2 mm. Tako se dobije utor za prihvatanje telefona te poklopac debljine stjenke od 1,2 mm. Operacijom *Pocket* izrađuju se potrebni otvori i utori za razne priključke i tipke. Model nove varijante poklopca prikazan je na slici 17.

Nakon izrade FDM postupkom i testiranja poklopca zaključuje se da poklopac ne odgovara obliku telefona. Na slici 18 prikazana je fotografija poklopca izrađenih FDM postupkom koji ne zadovoljavaju svojim oblikom iako je svaka sljedeća varijanta bliža konačnom rješenju.

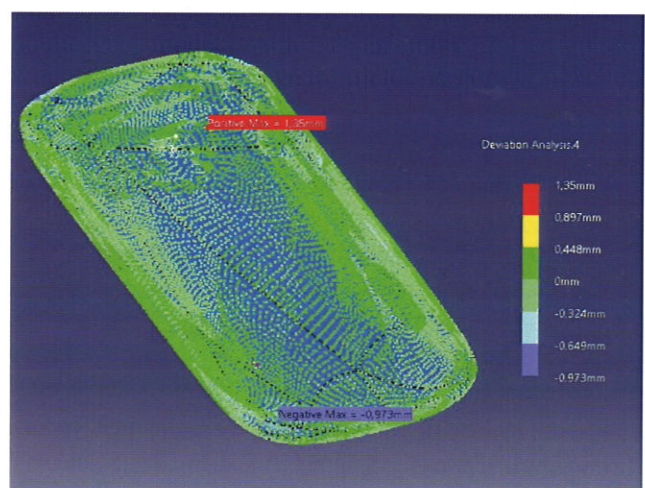


Slika 18. Poklopci izrađeni FDM postupkom

#### 4.1.3. Provlačenje površina i 3D modeliranje – 3. način

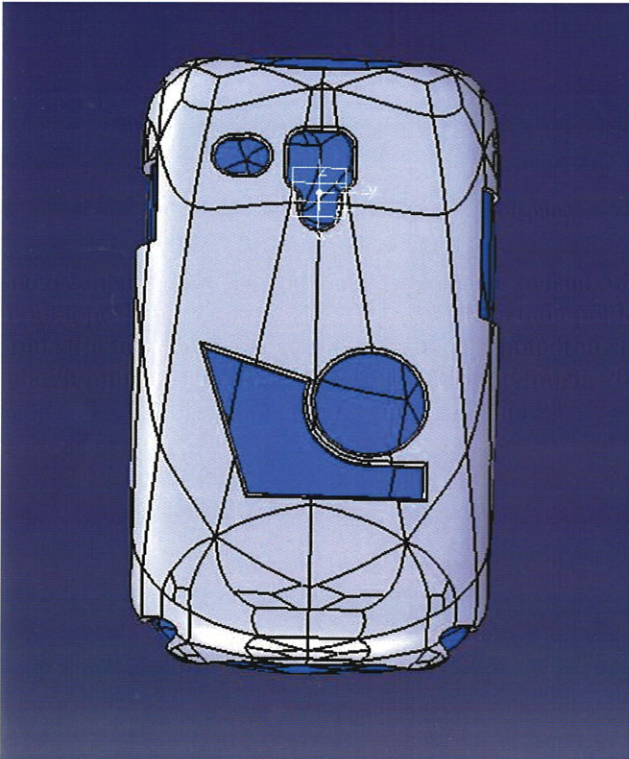
Prilikom izrade 3D modela telefona došlo je do prevelike devijacije dimenzija i oblika u odnosu na početni STL. Razlog prevelikim odstupanjima možda leži u nesimetričnosti mjernog objekta ili netočno postavljenoj ravnini simetrije, a može biti i zbog skupljanja materijala prilikom hlađenja.

Postupak dobivanja površina na STL-u je isti kao i u prethodnom poglavlju. Upotrebljava se funkcija *Automatic Surface*, no bez stvaranja zrcalne slike. Nakon ručnih popravaka preklapanja određenih površina vrši se analiza devijacije oblika površina od STL-a (slika 19).

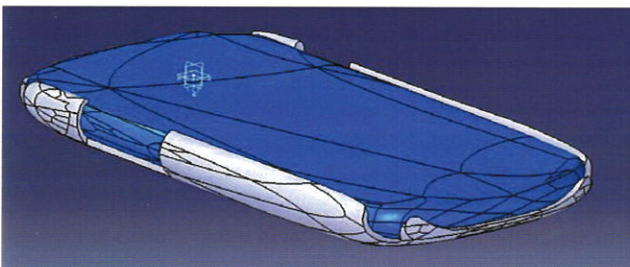


Slika 19. Analiza devijacije 2

Analiza devijacija pokazuje značajno bolje rezultate i vrlo mala odstupanja. Površina se zatim prebacuje u čvrsti CAD model te se *boolean* operacijom *Remove* stvara CAD model poklopca. U ovom slučaju se od CAD modela tijela koje je uvećano za 1,2 mm, iz prethodnog poglavlja odstranjuje novonastali CAD model pametnog telefona. Zatim se operacijom *Pocket* stvaraju potrebni utori i otvori za razne priključke i tipke. Na slikama 20 i 21 prikazan je CAD model poklopca dobivenog postupcima povratnog inženjerstva.



Slika 20. Poklopac – pogled 1



Slika 21. Poklopac – pogled 2

## 5. IZRADA POKLOPCA TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

Prije izrade taložnim očvršćivanjem dimenzije su uvećane za postotak skupljanja ABS materijala.

Parametri izrade taložnim očvršćivanjem su:

- debljina sloja: 0,2 mm
- broj vanjske konture: 2
- gustoća ispune unutrašnjosti: 30 % (slika 22)
- temperatura prerade: 230 °C
- temperatura radne podloge: 110 °C
- brzina izrade ispune: 80 mm/s



Slika 22. Gustoća ispune

Gustoća ispune može se mijenjati ovisno o željenim mehaničkim svojstvima i masi. Za izradu poklopca potrebno je 13 g materijala za model i potpurnu strukturu, dok sam poklopac ima 10 g. Izrada je trajala 70 min. 3D tiškani poklopac prikazan je na slici 23.



Slika 23. Poklopac izrađen FDM postupkom

## 6. ZAKLJUČAK

Aditivni postupci imaju potencijal razviti jednu vrstu industrijske revolucije. Više nisu rezervirani samo za brzu izradu prototipova nego se primjenjuju i u proizvodnji te zbog toga predstavljaju važan set proizvodnih postupaka koji zasigurno imaju svijetlu budućnost. Sposobnost modeliranja unikatnih, personaliziranih proizvoda prilagođenih svakom kupcu je velika prednost, s obzirom da u današnje vrijeme zahtjevi

kupaca i tržište traže mnogo varijanti proizvoda i prilagodljivost kupcu. Ove karakteristike daju konstruktorima mogućnost optimizacije procesa konstruiranja i izrade koja bez aditivnih postupaka nije bila dostupna. Danas su aditivni postupci sve više dostupni po sve nižoj cijeni.

Odabir FDM postupka i niskobudžetnih pisaača za izradu poklopca pametnog telefona pokazao se kao dobro rješenje za izbor postupka izrade. FDM postupak je jednostavan, brz i jeftin te daje zadovoljavajuću kvalitetu proizvoda s obzirom na namjenu, a i omogućuje jeftinu izradu svake faze konstrukcije prilikom mijenjanja i popravljanja 3D računalnog modela.

## Zahvala

Ovaj rad je nastao u sklopu projekta *Aditivne tehnologije za mala i srednje velika poduzeća – AdTecSME*. Autori žele zahvaliti Europskoj uniji za sufinanciranje ovog projekta i tvrtci Topomatika na digitalizaciji.

## Literatura

- [1] Wohlers, T.T.: *Wohlers Report 2009 – State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, SAD, 2009.
- [2] Gebhardt, A.: *Understanding Additive Manufacturing, Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [3] Wohlers, T.T.: *Wohlers Report 2012 – Additive Manufacturing, State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, SAD, 2012.
- [4] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, SAD, 2010.
- [5] Noorani, R.: *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, John Wiley & Sons Inc., SAD, 2006.
- [6] Kunwoo, L.: *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison – Wesley Longman Inc., Reading, Massachusetts, 1999, ISBN 0-201-38036-6.
- [7] Godec D., Krsnik I., Šercer M.: *Od ideje do gotovoga polimernog proizvoda*, Polimeri, 31(2010)2, str.71-76, Zagreb, 2010.
- [8] XPress 3D, <http://express.redeyeondemand.com/Default.aspx>, 18.03.2015.
- [9] Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Technology Introduction and Business Implications*, Frontiers of Engineering 2011: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2011 Symposium, University of Louisville
- [10] *Fused deposition modeling*, <http://www.solidconcepts.com/technologies/fused-deposition-modeling-fdm/>, 18.03.2015.
- [11] Pilipović, A., Šercer, M., Valentan, B.: *Use of low-cost 3D printers and the influence of parameters on the precision and mechanical properties*, 13th International scientific conference on production engineering – CIM 2011, str.187-194, 16-18.06.2011., Biograd na moru, Hrvatska.
- [12] Pilipović, A.: *Influence of processing parameters on the properties of polymer prototype*, Doctoral thesis, Faculty of Mechanical engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2012.

## NOVOSTI IZ HATZ-a

Akademija tehničkih znanosti Hrvatske održala je 13. svibnja 2015. u Auli Sveučilišta u Zagrebu svoju jubilarnu 30. godišnju (izbornu) skupštinu na kojoj su izabrani novi suradnici, novi međunarodni član i novi počasni članovi Akademije, kojima su tom prigodom dodijeljene diplome o članstvu. Diplome su također dodijeljene i novim emeritusima i članovima Akademije, koje je unaprijedilo Predsjedništvo Akademije na svojoj 10. sjednici, koja je održana 20. travnja 2015. Na istoj sjednici Predsjedništvo je donijelo i odluku o dodjeli medalja i diploma članovima osnivačima Akademije te odluku o dobitnicima nagrada Akademije za 2014. godinu. Priznanja i nagrade, kao i diplome novim podupirućim članovima Akademije, također su dodijeljeni na Skupštini, koju su članovi i brojni uzvanici ocijenili vrlo uspješnom. O tome će naši članovi biti detaljnije obaviješteni na internetskim stranicama Akademije: [www.hatz.hr](http://www.hatz.hr) Nakon Skupštine, aktualno brojno stanje članstva Akademije je sljedeće:

Članovi Akademije	104
Emeritusi Akademije	67
Međunarodni članovi Akademije	11
Suradnici Akademije	78
Počasni članovi Akademije	10
Podupirući članovi Akademije	48
<b>UKUPNO</b>	<b>318</b>

Dodjele nagrada, priznanja, diploma i medalja Akademije na Skupštini rezultat su niza aktivnosti koje je Akademija poduzela krajem 2014. i u prvoj polovici 2015., odnosno raspisivanja Javnog poziva za predlaganje kandidata za nove članove HATZ-a, Javnog poziva za predlaganje kandidata za nove počasne i međunarodne članove HATZ-a, Internog poziva za unaprjeđenje članova u emerituse Akademije, odnosno suradnika u članove Akademije te Natječaja za dodjelu nagrada HATZ-a za 2014. godinu.

Tijekom 2013. i 2014. Akademija tehničkih znanosti Hrvatske je, zajedno s Akademijom medicinskih znanosti Hrvatske, Akademijom pravnih znanosti Hrvatske i Akademijom šumarskih znanosti, pristupila realizaciji Sporazuma o suradnji koji su ove četiri sestrinske akademije potpisale 2012. Osnovani su Savjet i Koordinacija četiri akademije, koji vrlo uspješno surađuju, organiziraju zajedničke aktivnosti i skupove te zajednički nastupaju pred državnim institucijama, posebno u cilju reguliranja, odnosno zadržavanja znanstvenog statusa akademija te postupka reakreditacije.

Akademija je 2014. potpisala i Sporazum o suradnji s Hrvatskom akademijom znanosti i umjetnosti te nam je osobito zadovoljstvo što smo na taj način i formalizirali odličnu suradnju s ovom najuglednijom i najznačajnijom

hrvatskom znanstvenom i kulturnom institucijom. Iste godine potpisali smo i Sporazum o suradnji s Hrvatskim inženjerskim savezom, a jedna od prvih i vrlo uspješnih zajedničkih aktivnosti proizišlih iz tog Sporazuma je Dan inženjera RH, koji je održan u ožujku 2015. u Zagrebu pod pokroviteljstvom HAZU.

U 2014. naša je Akademija također s Hrvatskom akademijom znanosti i umjetnosti i Leksikografskim zavodom Miroslav Krleža potpisala Protokol o suradnji na projektu "Hrvatska tehnička enciklopedija" te i na tom polju s ovim uglednim institucijama ostvarujemo izvrsnu suradnju.

Akademija je u 2014. potpisala još jedan važan sporazum i to s Gradom Zagrebom: Sporazum o suradnji na projektu "Potresni rizik Grada Zagreba – infrastruktura, stanovništvo, građevine i kulturna dobra". Suradnju od strane Akademije koordinira Odjel građevinarstva i geodezije, a od strane Grada Zagreba Gradski ured za upravljanje u hitnim situacijama.

Akademija je u 2014. u organizaciji Odjela bioprocenog inženjerstva HATZ-a i Biotehničkog centra HATZ-a izdala "Annual 2013 of the Croatian Academy of Engineering", koji sadrži radove i prezentacije sudionika 2. međunarodnog simpozija "Vera Johanides" – Biotehnologija u Hrvatskoj do 2020. Glavni i odgovorni urednik publikacije je prof. emer. dr. sc. Zlatko Kniewald, tajnik Odjela bioprocenog inženjerstva i član Predsjedništva Akademije. U 2015. Akademija je izdala svoju jubilarnu monografiju "Twenty Years of the Croatian Academy of Engineering (HATZ) 1993-2013", koja sadrži povijesni pregled aktivnosti Akademije u proteklih 20 godina od njezina osnivanja, kao i novi "Who is Who in the Croatian Academy of Engineering". Glavni i odgovorni urednik monografije je prof. dr. sc. Vladimir Andročec, predsjednik Akademije.

U 2014. uspješno je finaliziran europski projekt "SETA – South European Transport Axis Baltic-Adriatic", u koji je HATZ uključena putem svoga Centra za prometno inženjerstvo.

Akademija je u proteklih godinu dana bila pokrovitelj i (su)organizator brojnih znanstvenih i stručnih skupova. Ovdje ćemo ukratko istaknuti samo neke od skupova u (su)organizaciji Akademije:

- Predavanje prof. dr. sc. Ivana Đikića "Tehnološki napredak i biomedicina u 21. stoljeću" (svibanj 2014., Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske i Akademija medicinskih znanosti Hrvatske);
- Obzor 2020 – Program Svemir: Znanstvena radionica "Gdje je RH? I kako se uključiti?" (lipanj 2014., Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Agencija za mobilnost i programe EU i Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu);
- Predavanje prof. dr. sc. Aleksandra V. Efremova (Moscow Aviation Institute), „Progress in Pilot Vehicle System Approach to Solution of Flight Safety and Manual Control Problems“ (listopad 2014., Zagreb,

Akademija tehničkih znanosti Hrvatske i Društvo sveučilišnih nastavnika i drugih znanstvenika u Zagrebu);

- Predavanje g. Đure Horvata, dipl. ing., direktor Tehnixa d. d., „MBO-T – Technology of the Future of Sustainable Communal Waste Management“ (listopad 2014., Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Tehnix d. d. i Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu);
- Okrugli stol "Ima li mjesta za napredak naprednih materijala u Hrvatskoj?" (studeni 2014., Zagreb, Odbor za suradnju s gospodarstvom i regionalnu suradnju HATZ-a i Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu);
- Predavanje prof. dr. sc. Marijana Bošnjaka, emeritusa Akademije "Simulacijsko odgonetavanje bioprocenih zagonetki i popratno pogodovanje međustrukovne suradnje (Primjersko pojašnjavanje)", (studeni 2014., Zagreb, Odjel kemijskog inženjerstva HATZ-a, Odjel bioprocenog inženjerstva HATZ-a i Prehrambeno-biotehnološki fakultet u Zagrebu);
- Dan inženjera Republike Hrvatske (ožujak 2015., Zagreb, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Hrvatski inženjerski savez i Akademija tehničkih znanosti Hrvatske);
- Okrugli stol "Nužnost izgradnje nizinske, dvokolosične i elektrificirane željezničke pruge Rijeka–Zagreb–Botovo kao dijela Koridora XI: Baltik–Jadran, odnosno Rute C-65" (ožujak 2015., Rijeka, Centar za prometno inženjerstvo HATZ-a i Sindikat prometnika vlakova Hrvatske);
- Tribina "Informacijske i komunikacijske tehnologije u gospodarstvu i na sveučilištu" (ožujak 2015., Osijek, Odjel sustava i kibernetike HATZ-a i Elektrotehnički fakultet u Osijeku);
- Zajednička tribina Savjeta akademija: Prof. dr. sc. Krešimir Ćosić, član HATZ-a, "Multidisciplinarna metrika za predviđanje mentalne spremnosti/rezilijantnosti za obavljanje stresnih poslova" (travanj 2015., Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Akademija medicinskih znanosti Hrvatske, Akademija pravnih znanosti Hrvatske i Akademija šumarskih znanosti);
- Zajednička tribina Savjeta akademija: Prof. dr. sc. Željko Krznarić, "Meditranska dijeta – farmakonutrijenti, nutrigenomika i epigenomika" (travanj 2015., Zagreb, Akademija medicinskih znanosti Hrvatske, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Akademija pravnih znanosti Hrvatske i Akademija šumarskih znanosti);
- Predavanje dr. sc. Ane Branke Jerbić i prof. dr. sc. Marija Cifreka, člana Akademije, "Primjena elektroencefalografskih signala za ostvarivanje sučelja između mozga i računala" (svibanj 2015., Zagreb, Odjel sustava i kibernetike HATZ-a i Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu).

Melanija Strika, prof. soc.  
Urednica Novosti iz HATZ-a