

# Konstrukcija i brza izrada prototipnog alata za kompozitni izradak od ugljičnih vlakana

---

Šuša, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:560672>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**KONSTRUKCIJA I BRZA IZRADA PROTOTIPNOG ALATA ZA  
KOMPOZITNI IZRADAK OD UGLJIČNIH VLAKANA**

Rijeka, rujan 2023.

Marin Šuša

0069074756

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**KONSTRUKCIJA I BRZA IZRADA PROTOTIPNOG ALATA ZA  
KOMPOZITNI IZRADAK OD UGLJIČNIH VLAKANA**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Jurković

Komentor: izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Rijeka, rujan 2023.

Marin Šuša

0069074756

Rijeka, 10. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**  
Predmet: **Alati i naprave**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Marin Šuša (0069074756)**  
Studij: **Preddiplomski stručni studij strojarstva**

Zadatak: **Konstrukcija i brza izrada prototipnog alata za kompozitni izradak od ugljičnih vlakana / Design and rapid tool prototyping for carbon fiber composites product**

### Opis zadatka:

Izrada prototipnih alata danas je nezamisliva bez primjene aditivnih tehnologija. U ovom radu zadatak je koristeći neku od dostupnih aditivnih tehnologija izraditi prototipni alat za izradak od ugljičnih vlakana. Za definirani izradak potrebno je konstruirati 3D model alata, te temeljem toga dobiti fizički prototipni alat. U usporedbi sa konvencionalnim materijalima izratci od kompozita s ugljičnih vlakana zbog svojih prednosti našli su široku primjenu u industriji. Cilj je u ovom radu dobiti u radioničkim uvjetima uporabljiv kompozitni izradak od ugljičnih vlakana što predstavlja veliki problem.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Zoran Jurković  
\_\_\_\_\_  
Izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Robert Basan

## **IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA**

Ovim putem izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno prema zadatku koristeći literaturu i stečeno znanje tijekom studiranja na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, uz nadzor i savjete mentora prof. dr. sc. Zorana Jurkovića i izv. prof. dr. sc. Daria Iljkića.

## **ZAHVALA**

Ovim putem se zahvaljujem prof. dr. sc. Zoranu Jurkoviću što me je prihvatio kao mentor za završni rad, te na izdvojenom vremenu i savjetima.

Također, zahvaljujem se komentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na savjetima prilikom izrade rada.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA.....	2
2.1. Povijesni razvoj aditivne tehnologije .....	2
2.2. Princip rada 3D printera .....	2
2.3. Postupci aditivne tehnologije.....	4
2.4. Stereolitografija (SLA).....	5
2.4.1. Prednosti: .....	6
2.4.2. Nedostaci: .....	7
2.4.3. Materijali.....	7
2.5. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS, Selective Laser Sintering) .....	7
2.5.1. Prednosti: .....	8
2.5.2. Nedostaci: .....	9
2.5.3. Materijali.....	9
2.6. Modeliranje topljenim depozitima (FDM, Fused Deposition Modeling).....	9
2.6.1. Prednosti: .....	10
2.6.2. Nedostaci: .....	11
2.6.3. Materijali.....	12
2.7. Brza izrada prototipova .....	14
3. KOMPOZITI OD SJECKANIH UGLJIČNIH VLAKANA .....	15
3.1. Povijest .....	15
3.2. Svojstva .....	15
3.3. Postupak izrade.....	16
3.4. Primjena.....	17
4. MODELIRANJE I BRZA IZRADA PROTOTIPNOG ALATA.....	19
4.1. Modeliranje izratka.....	19
4.1.1. CAD softver .....	19
4.1.2. Postupak modeliranja.....	19
4.2. Konstruiranje alata.....	22
4.2.1. Smjernice .....	22
4.2.2. Modeliranje alata .....	22

4.3.	Brza izrada prototipnog alata.....	28
4.3.1.	Softver za pripremu.....	28
4.3.2.	Postupak pripreme modela.....	29
5.	IZRADA KOMPOZITNOG IZRATKA SA KOMPRESIJSKIM ALATOM .....	32
5.1.	Materijal za izradu kompozitnog izratka .....	32
5.2.	Postupak izrade.....	33
5.2.1.	Podaci za pripremu komponenti: .....	33
5.2.2.	Izrada: .....	33
6.	ZAKLJUČAK .....	36
	LITERATURA .....	37
	POPIS SLIKA .....	38
	SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLJESKOM JEZIKU.....	40



## 1. UVOD

Proizvodnja je oduvijek bila sinonim za velike tvornice, skupe alate i sofisticirane proizvodne linije, ali napretkom tehnologije i razvojem novih strojeva danas je moguće izrađivati 3D modele i prototipove puno ekonomičnije i brže nego na klasičan način.

Aditivna tehnologija, kolokvijalno nazvana 3D printanje, kao revolucionarna tehnologija postaje sve popularnija u zadnje vrijeme tako da 3D printeri nisu više rezervirani samo za industrijsku primjenu već su dostupni i za hobby i edukativne svrhe. Zbog sve zahtijevnijih potreba tržišta, razvoj aditivne tehnologije omogućio je proizvodnju dijelova koji prije nisu mogli biti proizvedeni niti jednom drugom tehnologijom.

Jedan od vrlo korisnih benefita aditivne tehnologije je mogućnost da se prije proizvodnje nekog predmeta ili strojnog dijela može vidjeti kako on izgleda u realnosti i da li odgovara sklopu za koji je namijenjen, te se uz nekoliko iteracija i korekcija uz minimalne troškove mogu korigirati eventualne greške na 3D modelu prije skupocijene izrade samog predmeta strojnom obradom npr.

Također, aditivnom tehnologijom je moguće proizvesti prototipove i dijelove direktno iz 3D modela bez korištenja specijalnih alata, a isto tako moguće je proizvesti prototipne jednokratne alate i alate za manje serije što je opisano u ovom radu.

## **2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA**

### **2.1. Povijesni razvoj aditivne tehnologije**

Povijest aditivne tehnologije seže u 80-te godine prošlog stoljeća kada je u Japanu dr. Kodami podnio zahtjev za prijavu patenta Rapid Prototyping (RP) tehnologije. Takva tehnologija omogućila bi brži i jeftiniji način izrade prototipova za razvoj proizvoda unutar industrije ali dr. Kodami nije ispunio uvjet od jedne godine za predaju specifikacije patenta te je time izgubio patentno pravo [1].

Nekoliko godina kasnije tim francuskih stručnjaka se je okušao u istom ali usprkos ineresu i znanjem za stereolitografiju morali su odustati zbog manjka poslovnih i investicijskih interesa.

1986. godine Charles Hull (3D Systems) je patentirao prvi stereolitografski pisač, odnosno proces tiska u kojem se 3D modeli dobivaju iz digitalnih zapisa, slaganjem uzastopnih slojeva materijala jedan na drugi. Prvi SLA printer je bio neprecizan ali je pokazao da se i najzahtjevniji dijelovi mogu proizvesti takvim načinom.

Daljni razvoj nije tekao brzo sve do zadnjih 20 godina, tj. 2006. godine kada su razvijeni printeri koji rade na principu selektivnog laserskog sintetiziranja te omogućuju masovnu upotrebu tehnologije 3D printanja pri proizvodnji industrijskih dijelova, a kasnije se šire i na druga područja.

Glavna prekretnica dogodila se 2007. godine otvaranjem Desktop Factory-a čiji je cilj bila proizvodnja printera za širu upotrebu.

### **2.2. Princip rada 3D printera**

Aditivna tehnologija je proces kreiranja fizičkog objekta na temelju 3D digitalnog modela.

Aditivna proizvodnja je zajednički naziv za tehnologije koje se temelje na istom principu a to je pretvorba 3D modela u trodimenzionalni fizički objekt dodavanjem materijala sloj po sloj.

Moderno 3D printanje započinje izradom virtualnog dizajna objekta odnosno 3D modela koji se želi proizvesti. 3D model se izrađuje pomoću CAD (Computer Aided Design) softvera. CAD datoteka za ispis se može dobiti pomoću CAD softvera ili 3D skenera. Korištenjem CAD aplikacija povećava se produktivnost te se skraćuje vrijeme od razvitka ideje do izrade gotovog proizvoda.

Spreman 3D model tada se u CAD softveru sprema pod ekstenzijom .STL [2].

Takva .STL datoteka se učitava u jednom od softvera za „slice“ odnosno rezanje te se u njemu podešavaju svi bitni parametri za printanje kao što su:

- orijentacija izratka
- pozicija izratka na stolu
- brzina ispisa
- visina sloja
- ispunjenost samog izratka (može biti od 0 – 100%)
- debljina stijenke
- potporni materijal
- hlađenje mlaznice
- temperatura mlaznice
- temperatura stola

Nakon odabranih željenih parametara, sve zajedno se sprema i dobiva ekstenziju .GCODE.

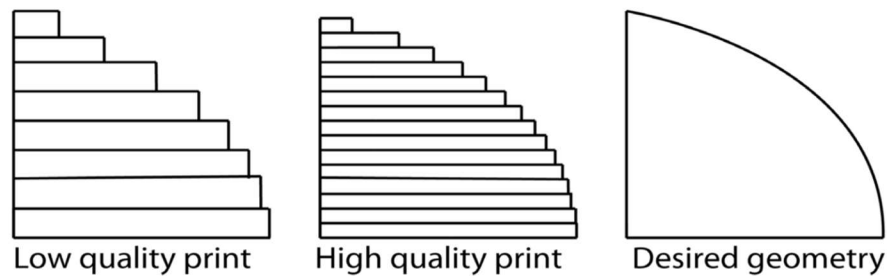
Datoteka učitana na 3D printeru se ispisa sloj po sloj, a o navedenim parametrima ovisi trajanje printanja te kvaliteta ispisa odnosno predmeta. (Slika 2.1.)



Slika 2.1. Postupak dobivanja predmeta od 3D modela do gotovog proizvoda

Što se kvalitete izratka tiče, preporuča se koristiti čim manji promjer mlaznice i čim nižu debljinu printanog sloja. Iskustveno se npr. za promjer mlaznice 0.4mm odabire visina sloja 0,2mm.

Povećavanjem promjera mlaznice, a uz to i visine sloja smanjuje se rezolucija odnosno kvaliteta izratka (Slika 2.2).



*Slika 2.2. Utjecaj visine sloja na kvalitetu površine*

Prednosti 3D printanja su mogućnost izrade kompliciranijih predmeta nego što se može dobiti klasičnom strojnom obradom i u kraćem vremenu.

Ograničenje u aditivnoj tehnologiji trenutno predstavljaju samo dostupni materijali koji se koriste za izradu predmeta. Trenutno su dostupni polimerni materijali (akrilne i epoksidne smole, PA, PMMA, PS, PAEK, TPE, ABS, PC, PLA, PE, PP, PVC, PET, PET-G), metali (cink, aluminij, bronca, nehrđajući čelik, legure titana, kobalt-krom, berilij-bakra, visokolegirani čelik, volfram, ugljični čelik) i keramika. Postoji mogućnost printanja objekata (nanošenjem slojeva betona) te plovila i dr.

### **2.3. Postupci aditivne tehnologije**

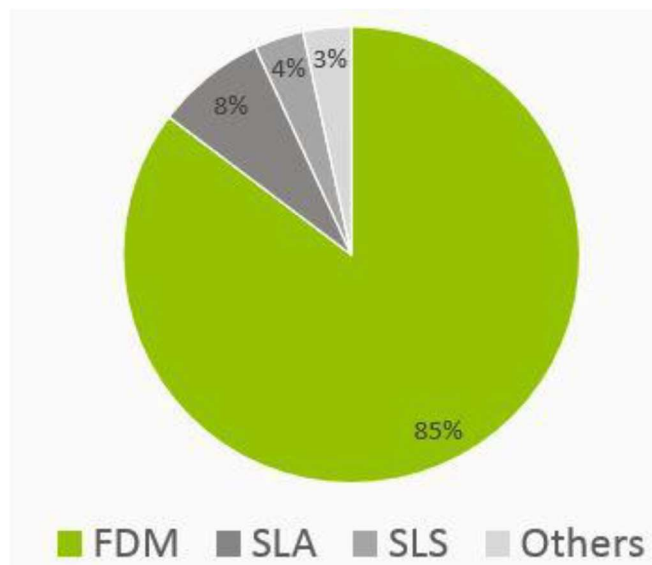
Aditivna proizvodnja se prema vrsti materijala dijeli na postupke koji upotrebljavaju materijale u tekućem, čvrstom stanju i prah. Važniji postupak kod kojeg se rabi čvrsti materijal je taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling, FDM/FFF), postupak koji upotrebljava kapljevine materijale je stereolitografija (eng. Stereolithography, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. Digital Light Processing) i PolyJet, dok su postupci koji rabe prah selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (eng. 3D Printing, 3DP).

Svaka od navedenih metoda ima drugačiji postupak, materijale, performanse i svojstva krajnjeg proizvoda. Odabrana metoda ovisi o zahtjevima korisnika. Tri najčešće korištena su:

- stereolitografija (SLA)
- selektivno lasersko srašćivanje (SLS)
- taložno očvršćivanje – FDM/FFF metoda

Ove tri vrste uglavnom se razlikuju prema stanju sirovina prije printanja.

Prema zastupljenosti, najčešće se koristi FDM tehnologija printanja (Slika 2.3.)



*Slika 2.3. Zastupljenost 3D tehnologija*

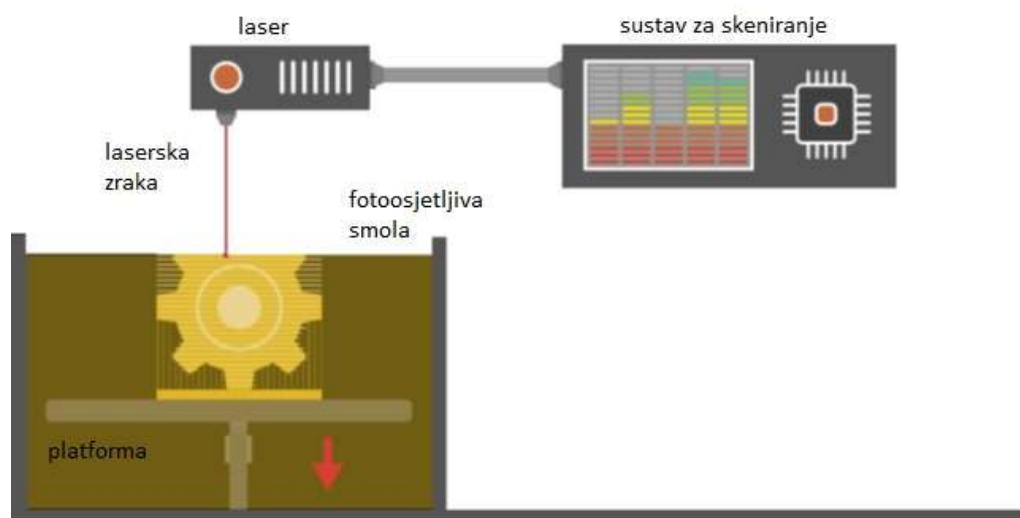
#### **2.4. Stereolitografija (SLA)**

SLA je originalna 3D tehnologija, te je ona preteča ostalim trodimenzionalnim tehnikama. Stereolitografija je nastala 80-ih godina u Americi, a patentirao ju je Charles W. Hull [3].

Tehnologija koristi tekući fotopolimer, smolu i UV laser kako bi se isprintao predmet sloj po sloj. (Slika 2.4.)

Proces započinje izradom 3D CAD datoteke. Datoteka se digitalno „izrezuje“ u seriju paralelno horizontalnih presjeka koji se predaju stroju za izradu jedan po jedan. Platforma je uronjena u smolu, dok UV laserski snop usmjeren lećom iscrtava oblik zadan parametrima. Pri prolazu laserske zrake, tekućina prelazi iz tekućega u čvrsto agregatno stanje formirajući na taj način konturu modela. Dio smole ozračen UV zrakom očvršćuje se i tako dobivamo sloj zadanog predmeta koji printamo. Princip postupka zasniva se na uporabi lasera i fotopolimerne tekućine. Laser projicira te presjeke na sirovinu baziranu na tekućini te se tako sirovina očvršćuje. Svaki izrađeni sloj se pomiče prema dolje po z-osi prema parametrima. Stereolitografija zahtjeva korištenje potpornih dijelova kod printanja kako ne bi došlo do deformacija tijekom samog postupka. Nakon printanja predmet se u UV komori dodatno učvršćuje.

Stereolitografija se najčešće koristi kod proizvodnje šupljih dijelova s debljim stijenkama.



Slika 2.4. Izrada stereolitografijom

#### 2.4.1. Prednosti:

- brzina izrade
- precizna izrada, visoka dimenzijska točnost
- dobra završna površina, glatke površine
- automatiziranost procesa

#### 2.4.2. Nedostaci:

- visoka cijena izrade i održavanja
- ograničen broj upotrebljivih materijala
- visoka cijena uređaja i materijala
- izrađeni predmeti su slabijih mehaničkih svojstava, krhki

#### 2.4.3. Materijali

Prilikom postupka stereolitografije može se koristiti nekoliko vrsta materijala koji su u tekućem stanju. 2000-ih godina tvrtka 3D Systems je razvila materijal SL 5240 koji se uz SL 7540 i danas koristi. Materijali su godinama poboljšavani, a najveći napredak je dobiven korištenjem smole (eng. Epoxy). Takvi materijali su poznatiji pod nazivom Acrylic Clear Epoxy Systems (ACES). Materijale SL 5240 i SL 7540 se može svrstati pod termoplastiku.

#### Primjena

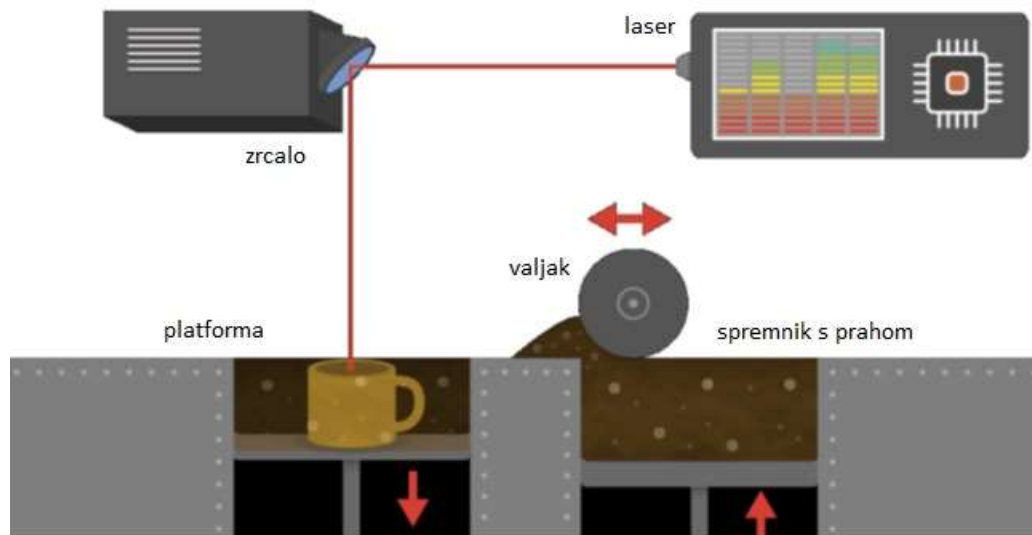
Glavna primjena predmeta proizvedenih procesom stereolitografije je u svrhu konceptnih modela, ali se često kao alati za probu prije proizvodnje, za izradu kalupa prilikom lijevanja, medicinske svrhe, testiranje oblika i dr.

### **2.5. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS, Selective Laser Sintering)**

SLS je proces 3D printanja na bazi tehnologije sinteriranja (postupak spajanja čestica praha reakcijama u čvrsto stanje). Razvijeno je 1987. godine, a 1992. godine lansirano na tržište. Materijal za izradu SLS-a dolaze u obliku praha koji se spaja snažnim laserskim zrakama ugljičnog dioksida kako bi se dobio konačni proizvod. Laserska zraka usmjerava se na materijal koji se uslijed visoke temperature sinterira. Pod visokom temperaturom se između čestica praha povećava adhezija, tako da se prah grupira u veću krutinu točno određenog oblika (Slika 2.5.) Fizikalne karakteristike proizvoda stvorenih sinteriranjem mogu se lako mijenjati promjenom gustoće, stvaranjem legura ili daljnjim pečenjem, a gotov proizvod može biti i mnogo čvršći nego onaj napravljen konvencionalnim metodama [4].

Sav višak praha služi kao potporna konstrukcija pa nema potrebe za dodatnim potpornim materijalima kao kod FDM tehnologije. SLS tehnologijom moguće je napraviti posve funkcionalne finalne proizvode. Čvrsti produkti se odvajaju od nesinteriranog praha i čiste komprimiranim zrakom i medijem za pjeskarenje. Prikupi se i ponovno koristi 50% neiskorištenog praha.

Proces koji uključuje SLS tehnologiju ima vjerojatno najveći raspon dostupnih materijala, budući da se mnogi metali mogu sinterirati.



*Slika 2.5. Izrada selektivnim laserskim sinteriranjem*

#### 2.5.1. Prednosti:

- prototipovi odličnih mehaničkih svojstava
- izraci se mogu koristiti za funkcionalna ispitivanja
- primjena većeg broja metalnih materijala
- nije potreban potporni materijal (strukture)
- nema viška materijala, neupotrebjeni prah se može iskoristiti za slijedeći izradak
- bolja mehanička svojstva izratka od onih izrađenih STL
- kratka završna obrada



### 2.5.2. Nedostaci:

- uređaj je velik
- korištenjem nekih materijala dolazi do stvaranja otrovnih plinova
- visoka nabavna cijena uređaja
- zrnata površina izratka
- velika potrošnja električne energije

### 2.5.3. Materijali

SLS tehnologiju se može svrstati pod rapid manufacturing ili pod rapid tooling tehnologiju.

Jedan je od važnijih procesa izrade prototipova s obzirom na najveći raspon kompatibilnih materijala za uporabu.

Primarni materijali korišteni u ovome procesu su polikarbonatni prašci, uz njih su korišteni: vosak, polimerno – metalni prašak, parafin, polimeri, najloni, razne čelične legure i karbonati.

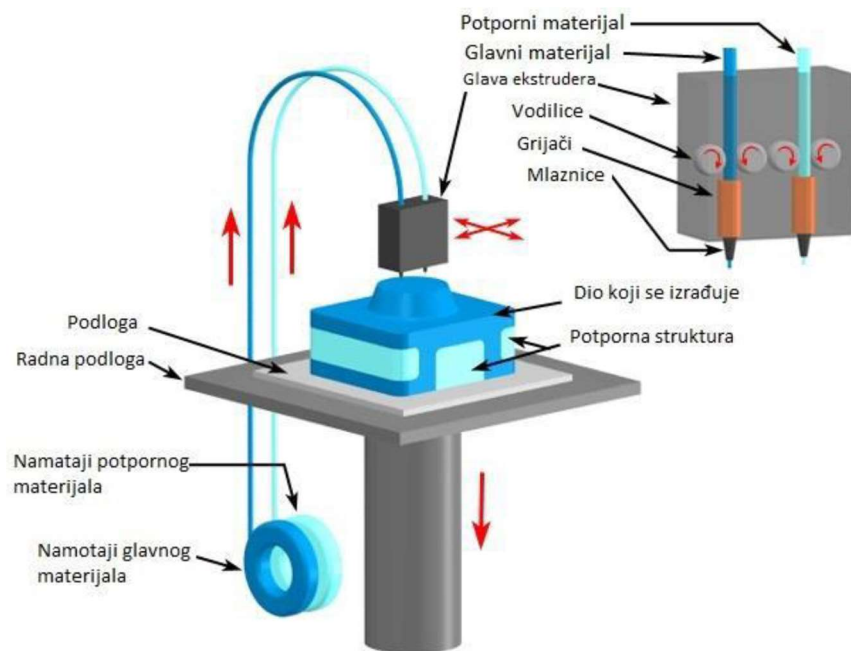
## **2.6. Modeliranje topljenim depozitima (FDM, Fused Deposition Modeling)**

Printanje nanošenjem rastopljenog materijala (FDM, eng. Fused Deposition Modeling) razvijeno je 1980-ih godina u svrhu konceptnog modeliranja tj. u svrhu brze izrade modela za provjeravanje grešaka na proizvodima, za testiranje aerodinamičnosti i dr. [5].

Daleko najrašireniji postupak aditivne proizvodnje zbog pristupačnosti uređaja, niske cijene i jednostavnosti korištenja.

Ova se tehnologija zasniva na izradi pomoću čvrstih materijala na principu ekstruzije kroz mlaznicu. Plastično vlakno (termoplastika) namotano na kolutu konstantno se dobavlja i ekstrudira kroz mlaznicu maloga promjera. Mlaznica je zagrijana na temperaturu višu od temperature taljenja plastike te se materijal topi i nanosi u slojevima. Prolaskom plastike kroz mlaznicu, mlaznica se kreće u x-y ravnini i kreira sloj te se plastika trenutno stvrdnjava. Nakon završetka nanošenja jednog sloja, radni stol vrši posmak po Z-osi te započinje nanošenje idućeg sloja (Slika 2.6.). FDM omogućava izradu funkcionalnih dijelova materijalima istog ili približno istog sastava kao što je gotov proizvod.

S obzirom na to da se dobava materijala vrši kroz mlaznicu malog promjera i izravno se nanosi na prethodno očvršćeni sloj, mala je količina neiskorištenog materijala.



*Slika 2.6. Izrada topljenim depozitima*

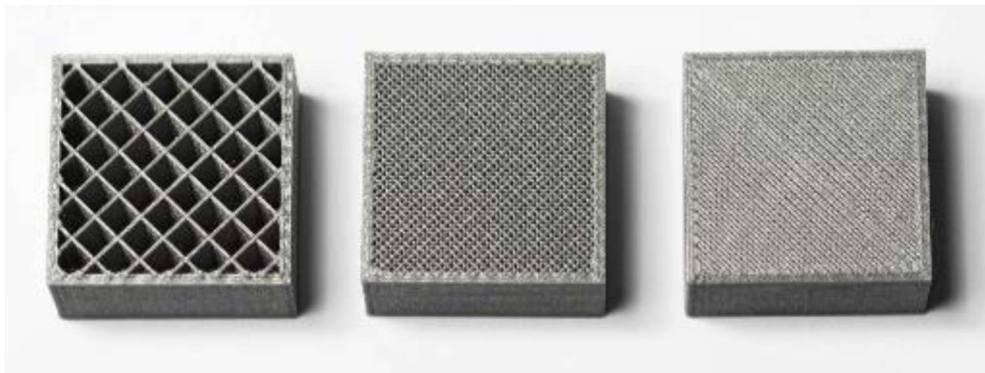
#### 2.6.1. Prednosti:

- manja potrošnja energije
- nema posebnih zahtjeva za hlađenjem i ventilacijom
- cijenovno pristupačni printeri i materijal
- niski troškovi održavanja
- jednostavnost primjene
- mogućnost izrade više predmeta istovremeno
- male dimenzije uređaja

### 2.6.2. Nedostaci:

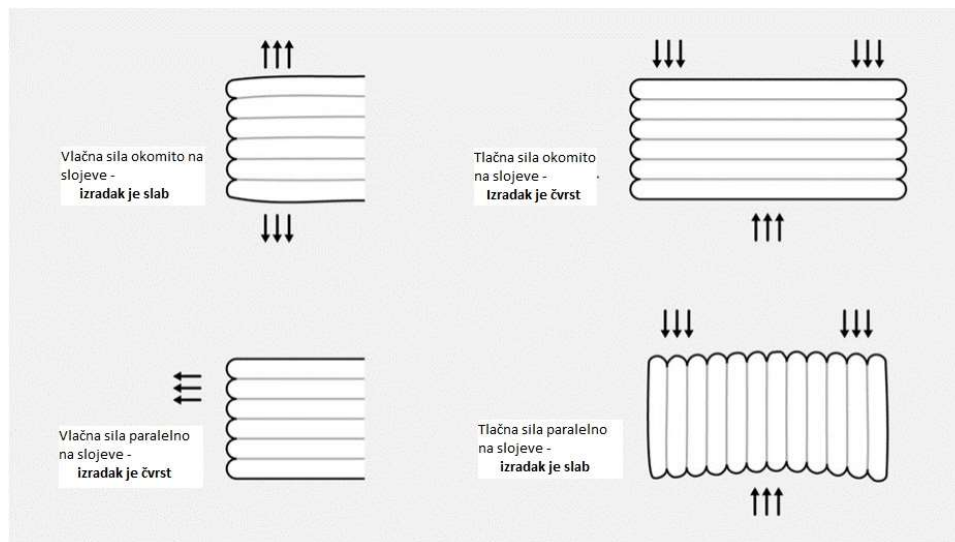
- funkcionalnost prototipova ograničena izborom materijala
- za geometrije u prevjesu nužan potporni materijal
- ograničena veličina izrađenih dijelova
- vidljive linije između slojeva
- nepredvidljivo skupljanje materijala

Modeli printani FDM postupkom uobičajeno se printaju sa djelomičnom ispunom kako bi se smanjilo vrijeme trajanja ispisa i količina potrošenog materijala dok se vanjska kontura modela izrađuje u nekoliko paralelnih prolaza kako bi model zadržao određenu čvrstoću (Slika 2.7.).



*Slika 2.7. Različiti postoci ispune modela FDM postupkom*

S obzirom na sam postupak izrade nanošenja materijala sloj po sloj, modeli nastali FDM postupkom imaju izraženu anizotropiju odnosno njihova čvrstoća na vlak po z-osi je uvijek nešto niža od čvrstoće u xy ravnini, te se mora obratiti pozornost prilikom orijentacije modela prije izrade ukoliko je takav predmet opterećen vanjskim silama (Slika 2.8.)



Slika 2.8. Karakteristike FDM 3D printanog izratka uslijed djelovanja sila u odnosu na slojeve

### 2.6.3. Materijali

Osnovni materijali koji se koriste kod FDM postupka su termoplastični polimeri:

#### 1. PLA (eng. Poly-Lactic Acid)

- najčešće korišteni materijal
- tzv. bioplastika (dobiva se iz kukuruza, a ponekad i iz šećerne trske)
- prirodno razgradiv
- dobra završna površina
- slabije čvrstoće od ABS-a i PETG
- niže temperature printanja
- nema opasnih plinova prilikom printanja
- jeftin
- minimalno skupljanje i vitoperenje prilikom printanja

#### 2. ABS (eng. Acrylonitrile Butadiene Styrene)

- ekološki stabilan, moguće ga je reciklirati
- manje gustoće nego PLA
- dobra vučna čvrstoća i čvrstoća na savijanje
- dobar za izradu dijelova umjereno funkcionalne primjene

- stvaraju se plinovi prilikom printanja
- moguće je izravnati tragove slojeva printanja sa acetonom
- podložan savijanju prilikom ispisa

### **3. PETG (eng. Polyethylene Terephthalate Glycol)**

- PET modificiran glikolom za bolju izdržljivost
- dobra završna površina, slična kao kod PLA
- jako izdržljiv, fleksibilniji od PLA i ABS ali i mekši
- idealan za printanje većih ali i funkcionalnih modela zbog malog skupljanja
- ostavlja tanke niti plastike na kraju svakog sloja (eng. stringing) koje je potrebno ukloniti

### **4. TPE (eng. Thermoplastic Elastomers)**

- izrađen od tvrde plastike i gume
- za izradu elastičnih modela

### **5. TPU (eng. Thermoplastic Polyurethane)**

- najčešće korišten kao materijal za printanje elastičnih modela
- dobra otpornost na udarce i vibracije
- teško se printa

### **6. NYLON (Polyamide)**

- čvrst i polu savitljiv
- visoka otpornost na udarce i ogrebotine
- tendencija uvijanju prilikom printanja
- materijal za printanje izložen vlazi stvara probleme prilikom printanja

## **2.7. Brza izrada prototipova**

Proces dizajniranja, izrade prototipova i izrade alata za proizvodnju može biti najskuplji i najdugotrajniji dio ciklusa razvoja proizvoda. Ovisno o složenosti alata, rokovi isporuke mogu biti od više tjedana do mjeseci, uz visoke troškove. Kao rezultat toga, proces iteracija može biti dugotrajan, a promjene na alatu mogu odgoditi proizvodnju mjesecima i još više povećati troškove. Srećom, napredak u 3D printanju visoke čvrstoće iznjedrio je održiva rješenja.

3D printanje nudi način izrade prototipova i iteracije dizajna alata prije nego što ide u konačnu proizvodnju, smanjujući troškova i vrijeme razvoja. Mnogi alati se mogu izraditi 3D printanjem iz kompozita ili metala, što još više pojednostavljuje proces. Mogućnost printanja injekcijskih i kompresijskih alata, umetaka, jezgri i drugih alata uklanja potrebu za CAM-om, omogućuje složeniji dizajn dijelova bez straha od eskalacije troškova i oslobađa vrijedne resurse

### 3. KOMPOZITI OD SJECKANIH UGLJIČNIH VLAKANA

#### 3.1. Povijest

Kompoziti od sjeckanih ugljičnih vlakana su uvedeni u komercijalnu upotrebu krajem 2000-ih godina kada je talijanski proizvođač automobila Lamborghini pokušavao smanjiti troškove izrade kompozitnih dijelova i ubrzati proizvodnju. Jedan od ciljeva Lamborghinija bio je zamijeniti upravljačke poluge ovjesa od kovanog aluminija koje se koriste u proizvodnim procesima s upravljačkim polugama ovjesa od ugljičnih vlakana [12, 13, 14].

Lamborghini se je udružio s tvrtkom Callaway Golf Company i Sveučilištem Washington te su zajedno poduzeli opsežna istraživanja i razvoj kako bi razvili materijal vrhunske otpornosti na zamor i vlagu, visoke otpornosti na oštećenja, nižeg modula elastičnosti u usporedbi s aluminijem, velike mehaničke izdržljivosti i veće prilagodljivost potrebama dizajnera proizvoda.

#### 3.2. Svojstva

- mogućnost izrade kompozitnih dijelova zahtjevnijih geometrija koje sa standardnim tkanim ugljičnim vlaknima nije moguće izraditi
- brzina izrade
- mogućnost automatiziranog procesa izrade
- otpornost na habanje
- mehaničke karakteristike kompozita slične aluminiju

Glavna razlika između običnih tkanih ugljičnih vlakana i sjeckanih ugljičnih vlakana (poznatih i kao kovani kompozit, *eng. forged carbon*) je u tome što se izrađuju ili od paste ili od sitno nasjeckanih ugljičnih vlakana koja su naizmjenično orijentirana. Nema jasnog uzorka jer su vlakna usmjerena posve nasumično, tako da je svaki gotov proizvod jedinstven za sebe.

Gotov proizvod ima potpuno drugačiju estetiku u odnosu na svoj tkani pandan i površina više nalikuje na mramor nego na pleteni materijal.

### 3.3. Postupak izrade

Nasjeckana ugljična vlakna se postavljaju u kompresijski alat te se unutra ulijeva smola, a zatim se sve skupa stisne visokim pritiskom pomoću preše (Slika 3.1.). Nakon 10 – 30 minuta kalup se otvara i proizvod je gotov.

Ovisno o vrsti smole (matrice) kalup može biti na sobnoj temperaturi ili zagrijan.

Osim od čelika, alate je moguće izrađivati i nekom od aditivnih tehnologija čime je uvelike povećana fleksibilnost proizvodnje. (Slika 3.2.)



*Slika 3.1. Hidraulična preša sa grijanim alatom*



*Slika 3.2. Alat izrađen od kompozitnih materijala aditivnom tehnologijom*



Sa razvojem tehnologije u današnje vrijeme se sjeckana ugljična vlakna mogu dobiti i recikliranjem kompozita izrađenih od tkanih ugljičnih vlakana, a tako dobivena vlakna se dalje mogu koristiti i u kombinaciji sa staklenim, poliesterskim i armidnim vlaknima kao ojačanje pri izradi novih kompozita.

### 3.4. Primjena

Zbog jedinstvenog izgleda i karakteristika, ovaj materijal se može upotrebljavati u raznim područjima (Slike 3.3., 3.4., 3.5.):

- zbog estetike, kao prvi sloj u kalupu koji je kasnije prekriven tkanim ugljičnim vlaknima
- proizvodnja ravnih panela, jednostranih ili dvostranih
- presvlačenje predmeta (eng. skinning)
- izradi manje strukturno opterećenih dijelova (krov, vrata, aerodinamički paketi te razni dijelovi unutrašnjosti automobila)
- poklopci motora



*Slika 3.3. Retrovizor automobila*



*Slika 3.4. Stražnji spojler automobila*



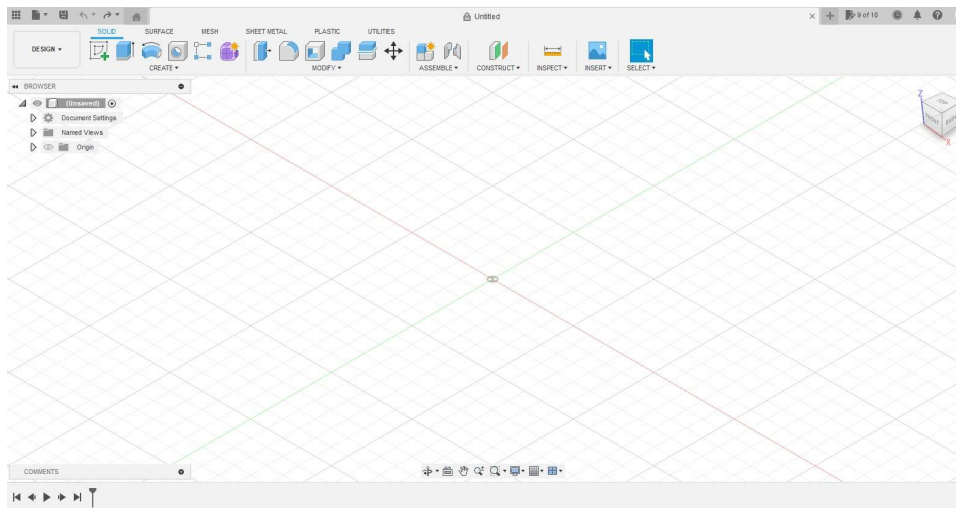
*Slika 3.5. Poklopac i ručica kvačila od motocikla*

## 4. MODELIRANJE I BRZA IZRADA PROTOTIPNOG ALATA

### 4.1. Modeliranje izratka

#### 4.1.1. CAD softver

Za modeliranje izratka, a nakon toga i konstruiranje alata korišten je softver Fusion 360 (Slika 4.1). To je jedan od Autodeskovih 3D softvera temeljen na „cloudu“ (online spremanje podataka) koji se osim za CAD koristi i za CAM, CAE i PCB. Sa njime se mogu dizajnirati proizvodi koji će osigurati funkcionalnost, formu i estetiku. Reducira se vrijeme dizajniranja i projektiranja, a osigurava se kvalitetan proizvod sa simulacijom i generativnim alatima za dizajn. [8].

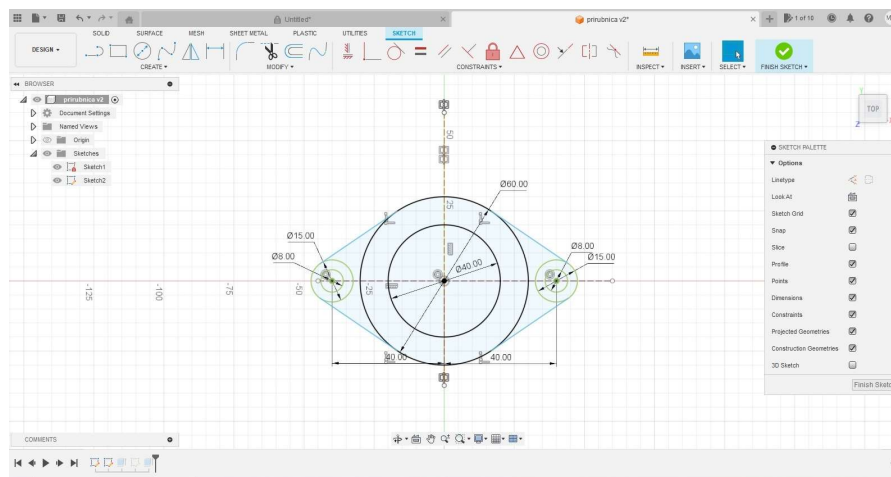


*Slika 4.1. Radna površina softvera Fusion 360*

#### 4.1.2. Postupak modeliranja

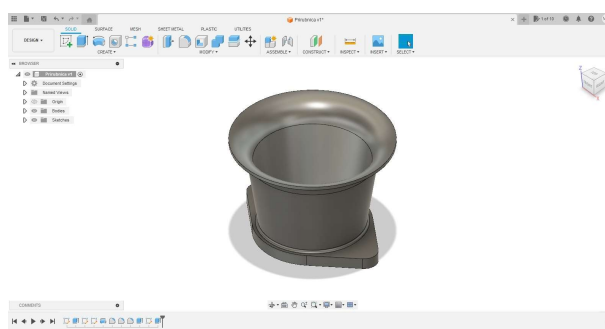
Strojni dio koji je modeliran u svrhu izrade alata je dio usisnog kolektora tj. neovisnih klapni gasa od motora s unutrašnjim izgaranjem

Modeliranje se započinje u „Design“ načinu rada sa 2D skicom i pogledom iz tlocrta te svim kotiranjima (Slika 4.2).

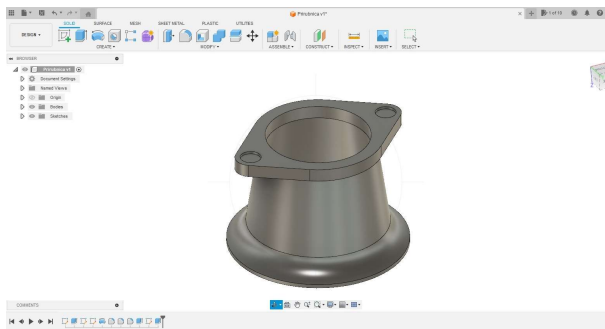


*Slika 4.2. Skica prirubnice*

Nakon izrade 2D nacrt, izlazi se iz „Drawing“ moda u „Design“ mod te se pomoću naredbi „Extrude“ i „Revolve“ iz skice dobije funkcionalni 3D model (Slike 4.3. i 4.4.).

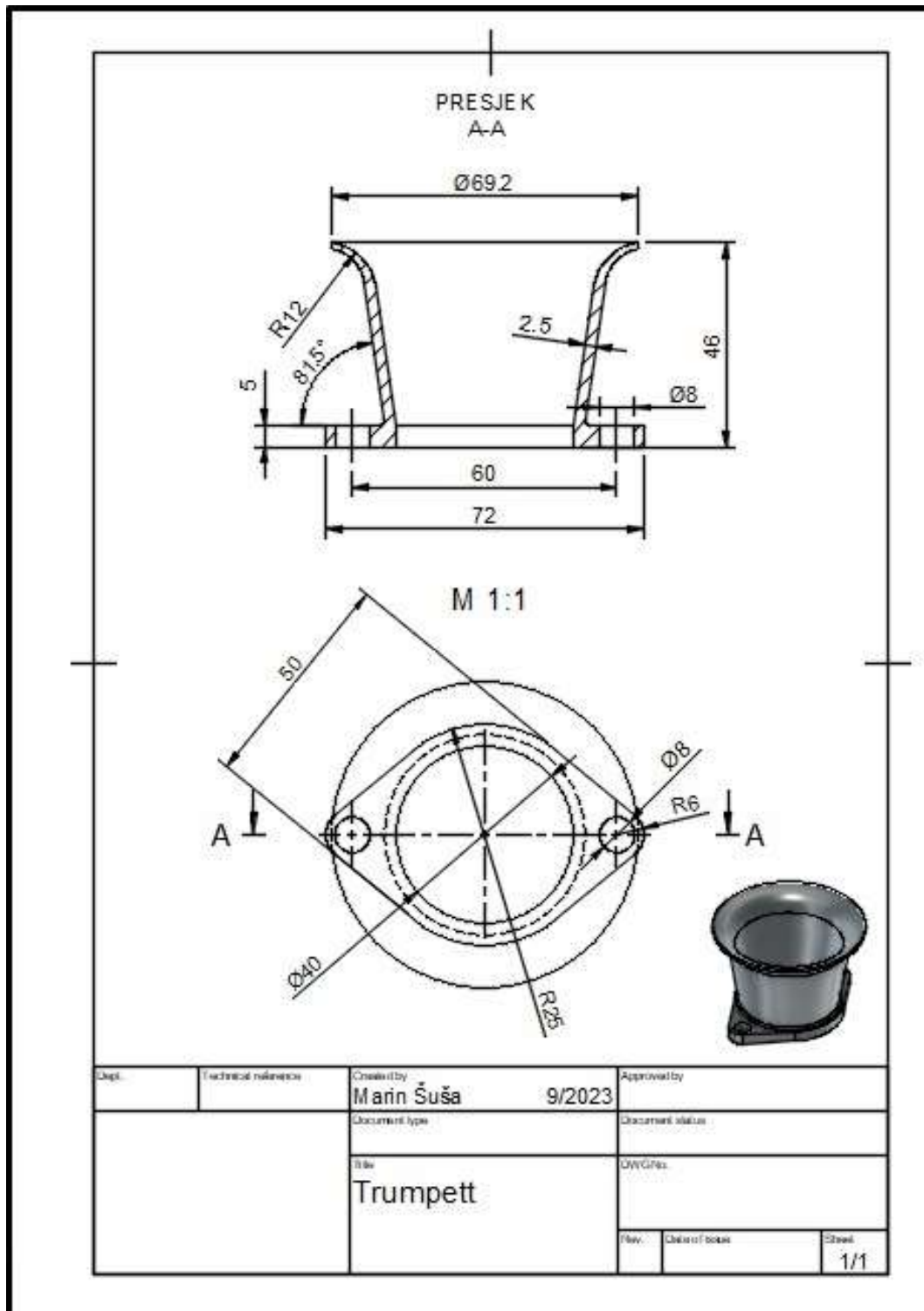


*Slika 4.3. Model izratka – pogled odozgo*



*Slika 4.4. Model izratka - pogled odozdo*

Nakon modeliranja napravljen je i 2D nacrt izratka (Slika 4.5.)

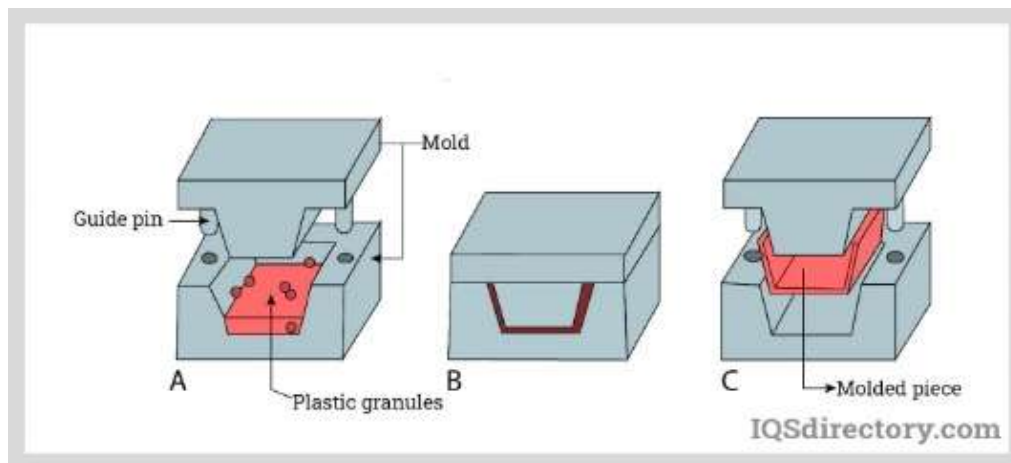


Slika 4.5. Nacrt izratka

## 4.2. Konstruiranje alata

### 4.2.1. Smjernice

Ovakav alat se konstruira slično kao alati za kompresijsko prešanje termoreaktivnih sintetičkih materijala. Fiksna polovica je ona u koju se ubacuje smjesa materijala koji se želi izraditi, a pomična polovica ili jezgre ulaze u fiksnu stranu. Kada se polovice alata zatvore, između njih ostaje šupljina koja definira oblik izratka (Slika 4.6.) [15, 16, 17].



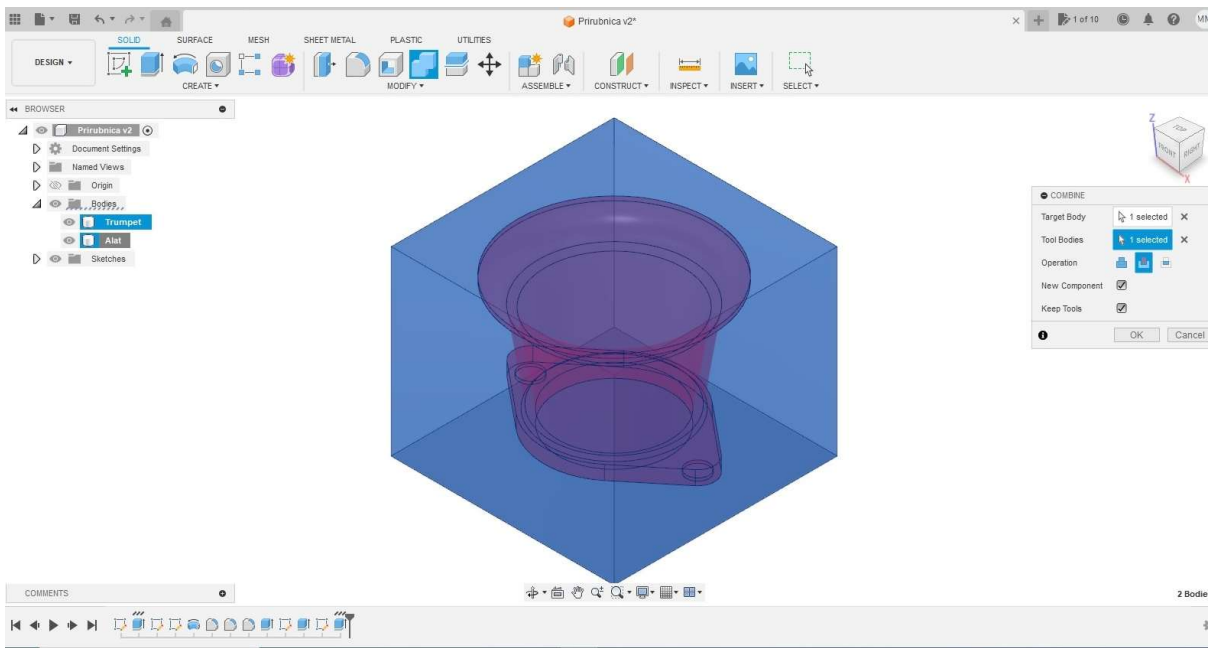
Slika 4.6. Shematski prikaz kompresijskog alata

### 4.2.2. Modeliranje alata

Iz dobivenog 3D modela sada je potrebno konstruirati alat za dobivanje izratka iz kompozita od sjeckanih ugljičnih vlakana.

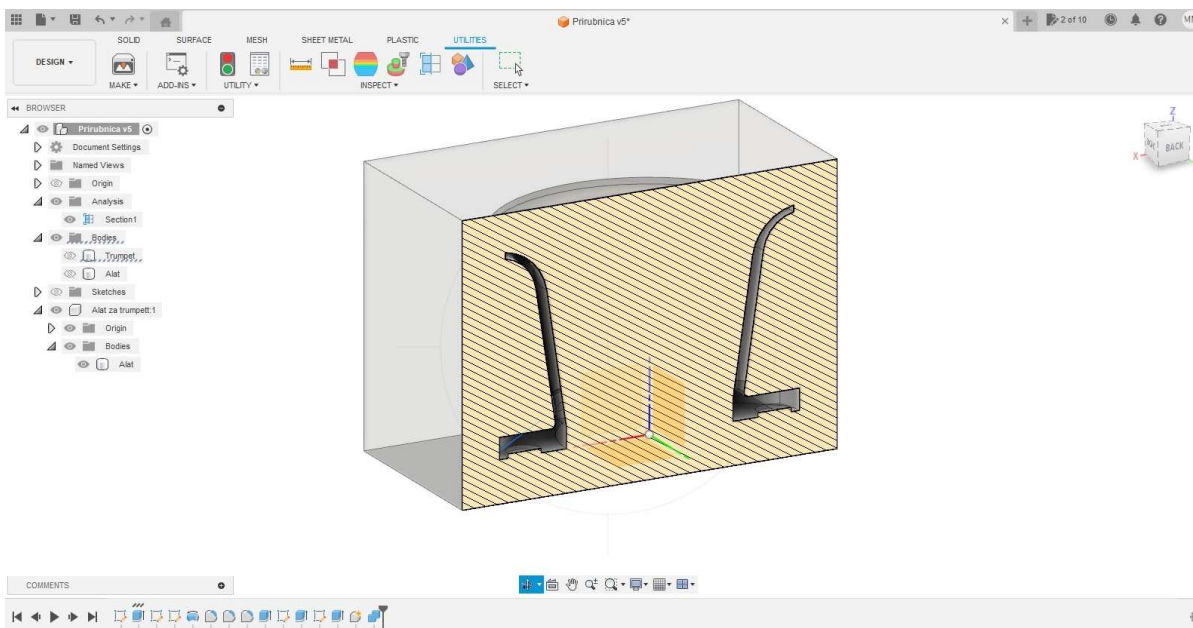
U „Design“ modu se preko postojećeg modela izrađuje „kocka“ koja prekriva cijeli model, a to su zapravo gabariti željenog alata.

Preko naredbe „Combine“ i podnaredbe „Join“ unutar alata se formira gravura koja odgovara modelu izratka (Slika 4.6.).



*Slika 4.7. Formirana gravura unutar alata*

Nakon toga u izborniku „Utilities“ odabire se naredba „Section analysis“ koja „reže“ cijeli sklop u svrhu lakšeg daljnjeg modeliranja (Slika 4.7.)



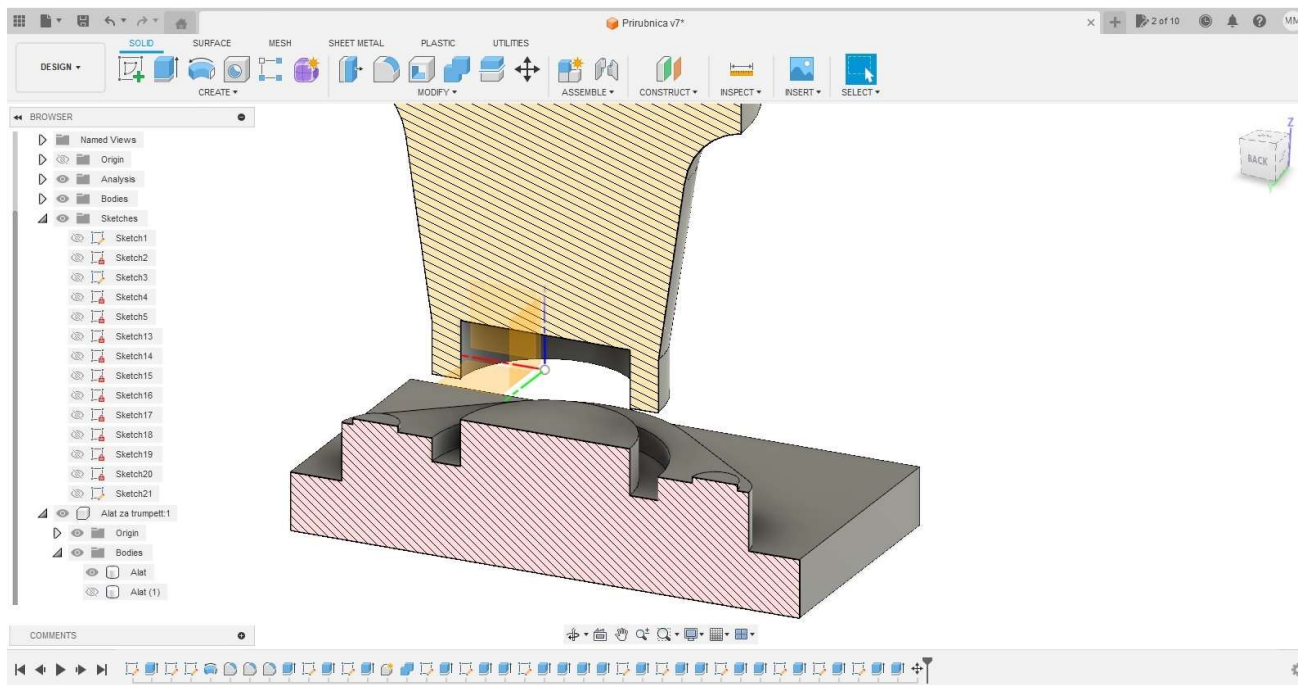
*Slika 4.8. Alat u presjeku*

Slijedeći korak je da se projecira konture koje ocrtavaju donji i gornji rub gravure u obliku skica koje nakon toga preko komande „Extrude“ služe za otvaranje šupljina u alatu čije mjesto dolaze klizači.

Tako razdvojena jezgra od alata se sada dijeli na 2 dijela – gornji i donji klizač.

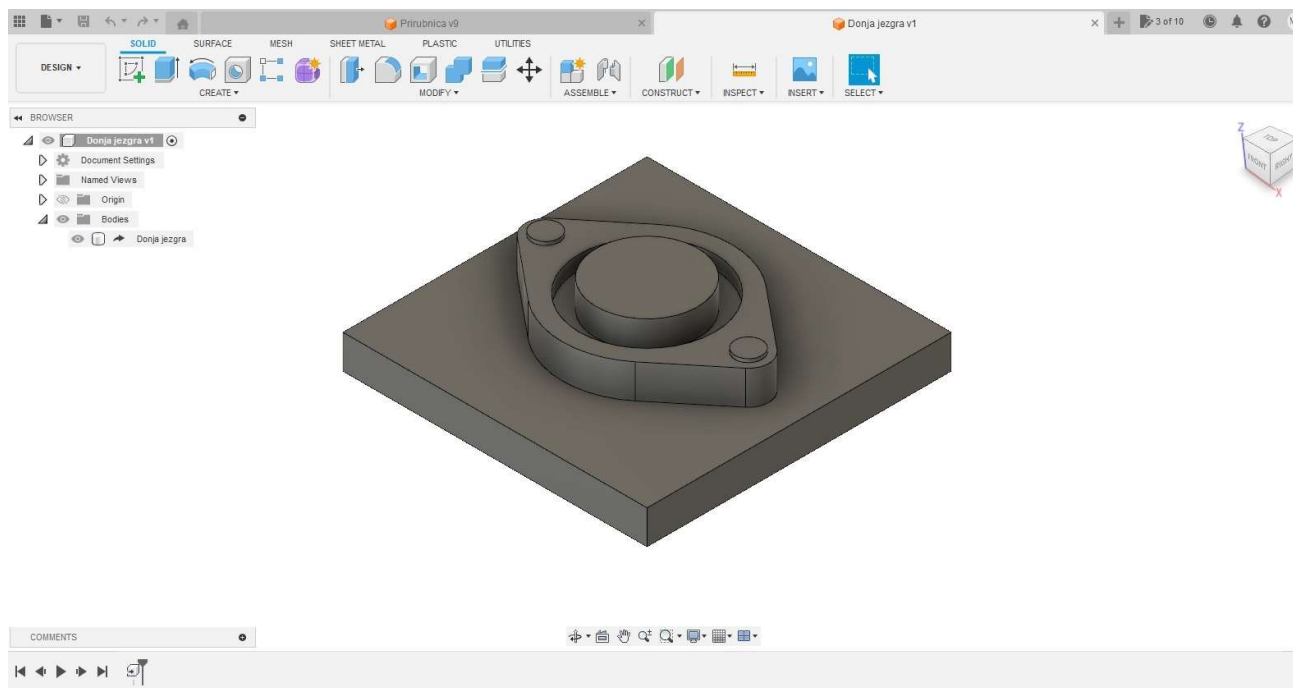
Oni se naredbom „Press/Pull“ produžavaju do ruba alata s gornje i donje strane te se na njihovim krajevima modeliraju veći kvadratni završeci koji služe da bi se povećala površina prilikom kasnijeg stiskanja.

Također, na spoju oba klizača izvedeno je kratko vođenje koje služi za preciznije pozicioniranje samih klizača u alatu. (Slika 4.8.).

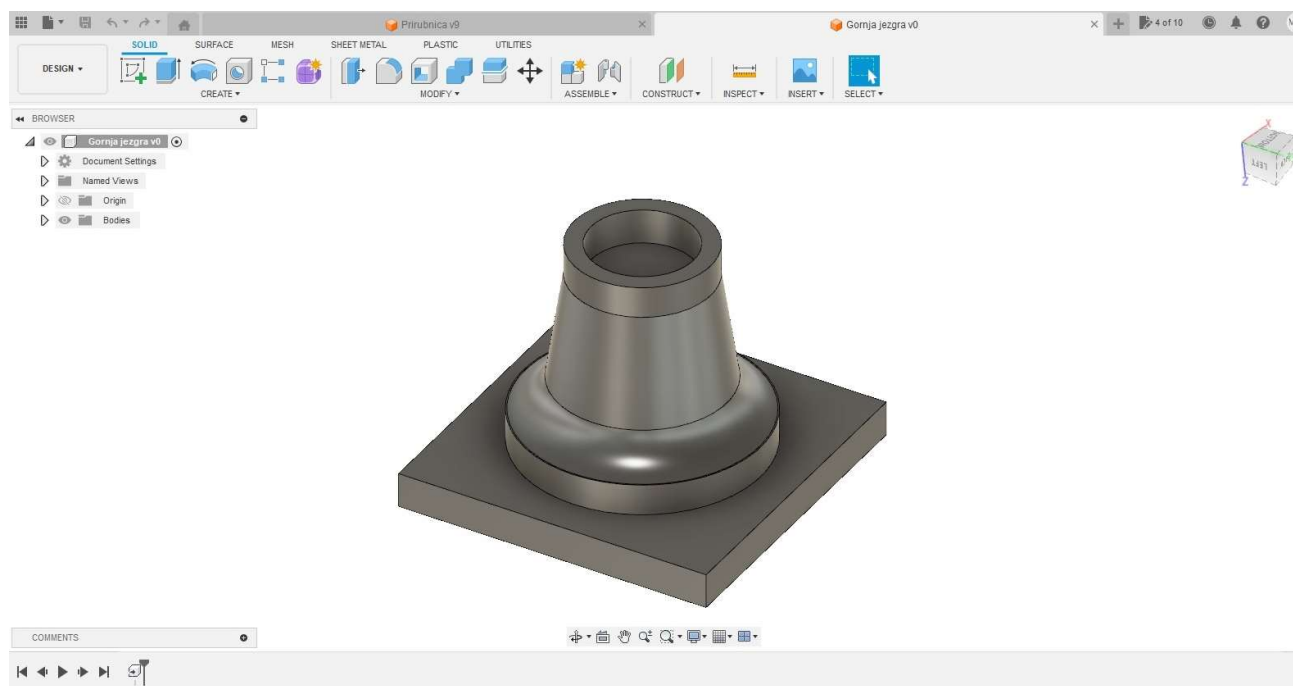


*Slika 4.9. Detalj centriranja i vođenja klizača*





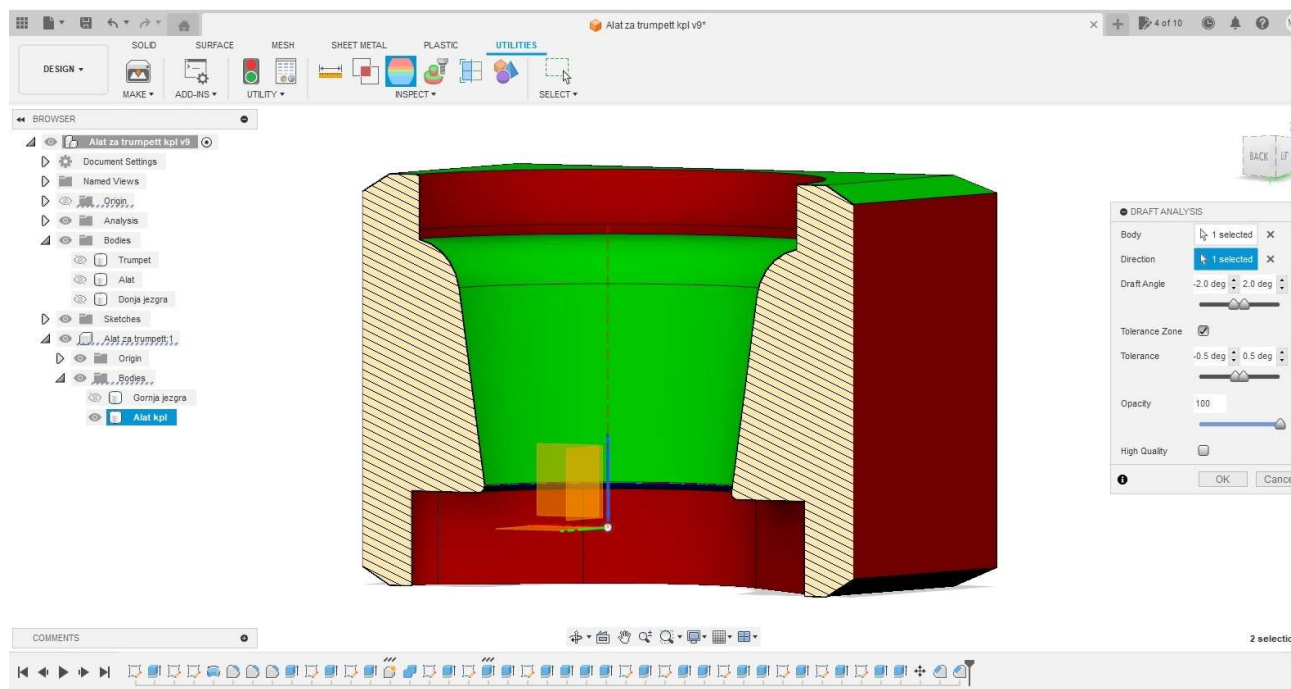
*Slika 4.10. Modelirana donja jezgra*



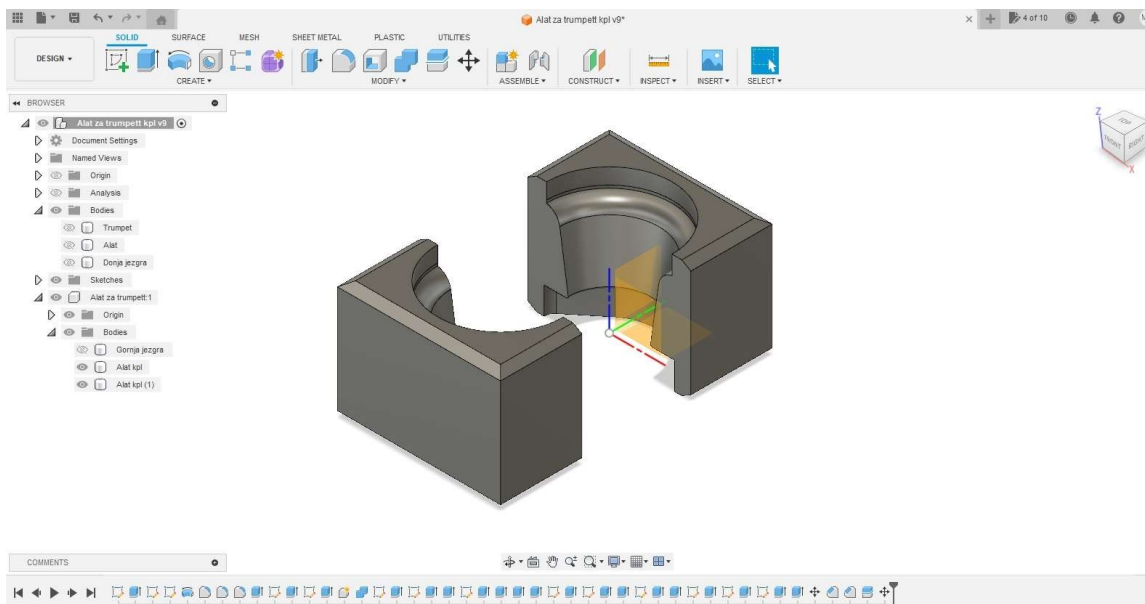
*Slika 4.11. Modelirana gornja jezgra*

Dok je uključena naredba „**Section analysis**“, na alat se primjenjuje naredba „**Draft analysis**“ koja prikazuje opasne zone koje nemaju kut izvlačenja u osi otvaranja, a zbog samog postupka izrade komada iz kompozita sa sjeckanim ugljičnim vlaknima, na takvom alatu kutevi izvlačenja bi samo otežali sam postupak (Slika 4.11.).

Zbog toga se, a i zbog same geometrije izratka alat pomoću naredbe „**Split body**“ dijeli na dvije polovice i time se kasnije olakšava vađenje izratka (Slika 4.12).



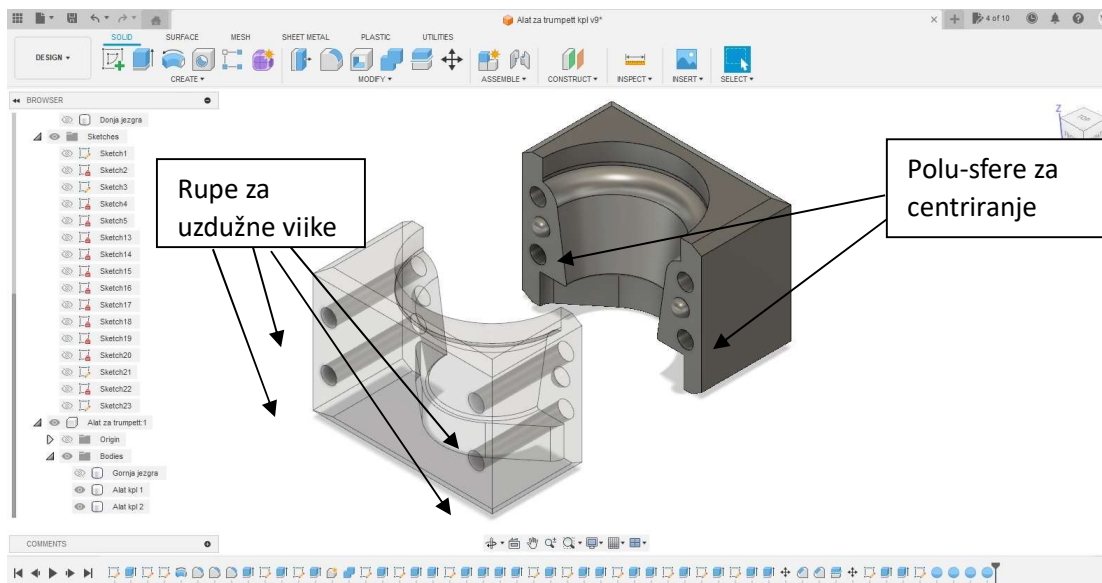
*Slika 4.12. Crvenom bojom označena područja bez kuta izvlačenja unutar gravure*



*Slika 4.13. Alat podijeljen na dvije polovice*

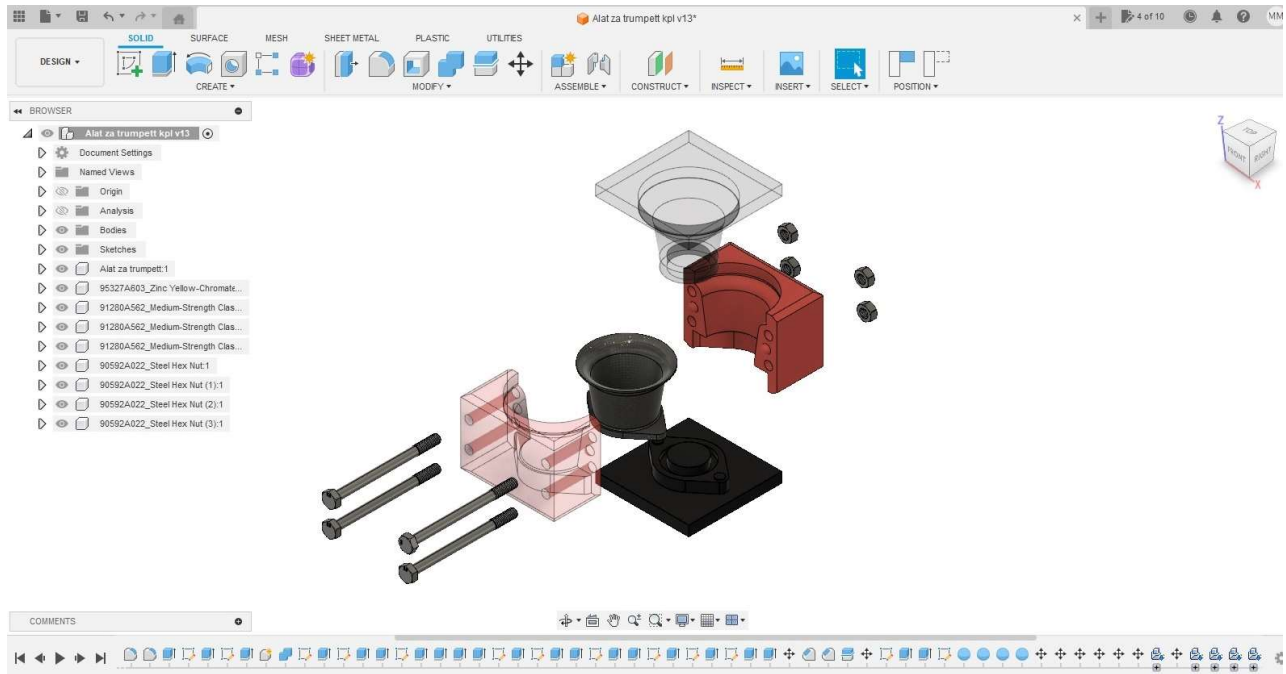
Na kraju su kroz obje polovice napravljene rupe za vijke koji ih drže spojenima prilikom same izrade.

Između polovica alata su dodane i polu-sfere koje služe za međusobno centriranje pomičnih polovica (Slika 4.13.).



*Slika 4.14. Polovice alata sa rupama za vijke i polu-sferama za centriranje*

Modeli alata i jezgri se u CAD softveru spremaju u datoteku pod ekstenzijom .STL što je preduvjet za učitavanje istih u nekom od softvera za pripremu modela za printanje.



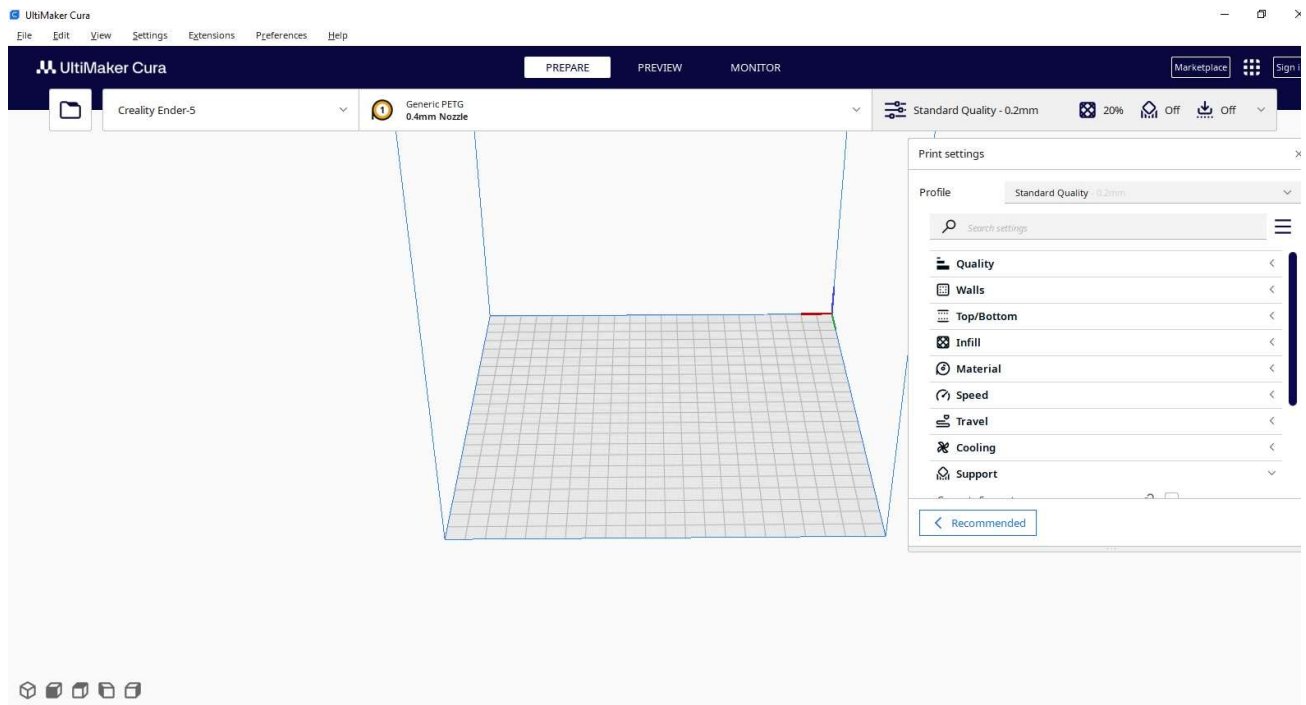
Slika 4.15. Kompletni alat

### 4.3. Brza izrada prototipnog alata

#### 4.3.1. Softver za pripremu

Softver koji služi za pripremu modela koji se želi printati naziva se *slicer*. Najčešće korišteni softveri za tu namjenu su Cura, PrusaSlicer, Bambu lab,...

U ovom radu se je koristio softver Cura 5.4.0 od tvrtke UltiMaker (Slika 4.5.). To je *open-source* softver, dakle besplatno dostupan svakome, te je za FDM tehnologiju printanja najčešće korišten [7].



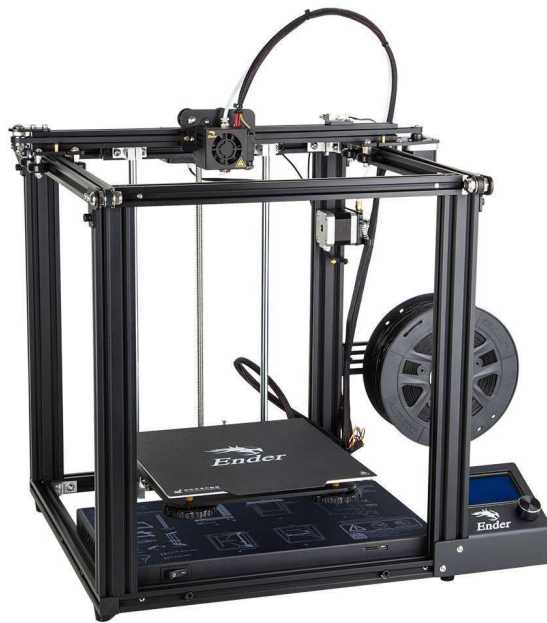
*Slika 4.16. Početno sučelje Cura softvera*

#### 4.3.2. Postupak pripreme modela

Nakon učitavanja modela u *sliceru*, najprije odabiremo orijentaciju modela u prostoru, a zatim i poziciju na stolu printera u odnosu na koordinatni sustav printera. Nakon toga slijedi odabir parametara printanja.

Prilikom prvog instaliranja programa, iz baze podataka se odabire marka i model printera te promjer mlaznice. U ovom slučaju printer je marke Creality, model Ender-5 (Slika 4.16.). slijedećih specifikacija:

- FDM tehnologija
- nazivna snaga **270W**
- promjer mlaznice **0,4mm**. (Slika )
- dimenzije stola/volumen printanja – **220x220x300mm**



*Slika 4.17.. 3D printer Creality Ender-5*



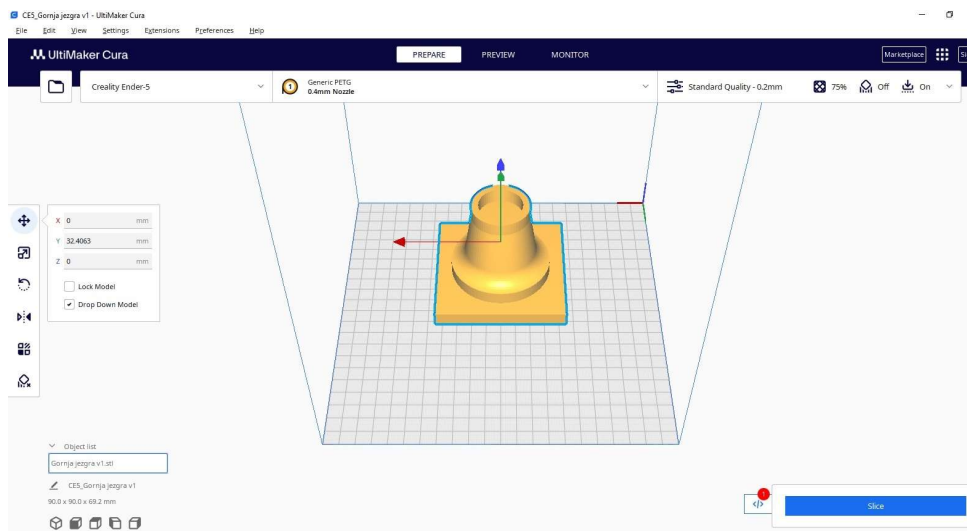
*Slika 4.18. Izgled mlaznice promjera 0,4mm*

Najbitniji parametri koji su odabrani za izradu prototipnog alata i klizača:

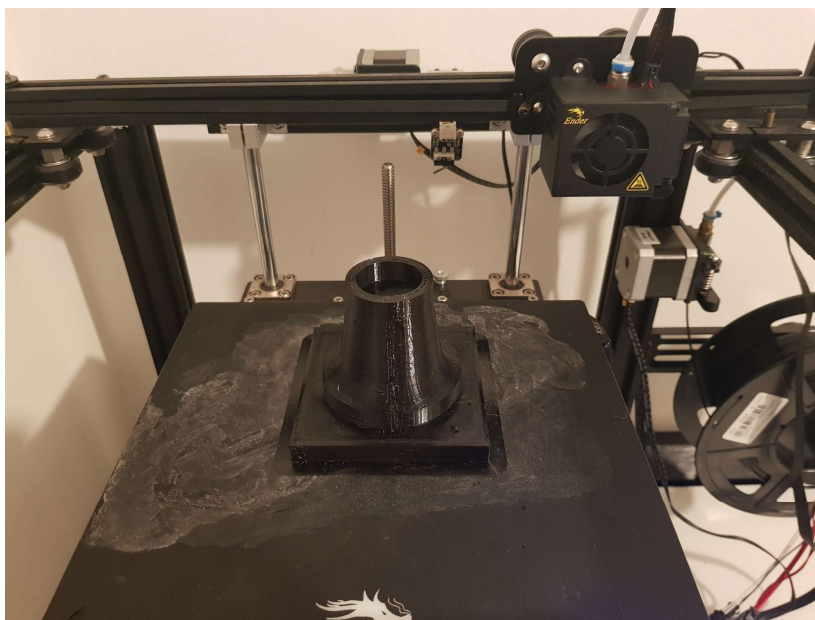
- visina sloja – **0,2mm**
- debljina stijenke – **2mm**
- postotak ispunjenosti materijala – **75%**
- uzorak ispunjenog materijala – **linije**
- temperatura mlaznice – **240°C**
- temperatura stola – **75°C**
- brzina ispisa – **100mm/s**
- materijal printanja – **PETG**
- promjer niti za printanje – **Ø1,75mm**

Nakon odabira svih parametara, klikne se na naredbu *slice* i za nekoliko trenutaka se generira .G-CODE koji sadrži sve odabrane parametre te model „izrezan“ po linijama spreman za ispis (Slika 4.18.).

U opisu je prikazano koliko vremena je potrebno da se izradak isprinta te koliko materijala odnosno niti je potrebno za taj izradak (u gramima).



*Slika 4.19. Primjer modela jezgre alata spremne za 3D printanje*



*Slika 4.20. Gornja jezgra alata u fazi printanja*

## 5. IZRADA KOMPOZITNOG IZRATKA SA KOMPRESIJSKIM ALATOM

### 5.1. Materijal za izradu kompozitnog izratka

Za izradu ovog predmeta korišten je set od tvrtke Easy Composites (Slika 5.1.) [9].

Set se sastoji od:

- 750 g sjeckanih ugljičnih vlakana
- 1 kg IN2 infuzijske smole
- 200 ml AT30 brzi utvrđivač za smolu
- 400 ml RW4 vosak za otpuštanje
- potrošni pribor



Slika 5.1. Set za izradu kompozita



## 5.2. Postupak izrade

Postupak izrade kreće od određivanja volumena izratka. Pošto je izradak modeliran u CAD softveru, jednostavnim klikom na „Properties“ utvrđuje se da volumen ovog izratka iznosi **21580 mm<sup>3</sup>** odnosno **21,58 cm<sup>3</sup>**. Množenjem te vrijednosti sa **1,4** (gustoća ugljičnih vlakana) dobivamo vrijednost **30,212 cm<sup>3</sup> = 30,12 g**.

Dakle, predmet kojeg izrađujemo je težak **30,12 grama**.

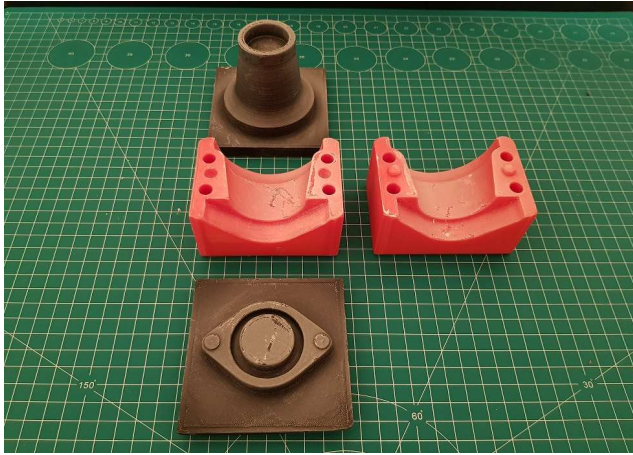
Prema proizvođaču, za izradu kompozita se koristi omjer smole u odnosu na ugljična vlakna **40 ÷ 60** – od ukupne težine predmeta **40% je smola**, a **60% su vlakna**.

### 5.2.1. Podaci za pripremu komponenti:

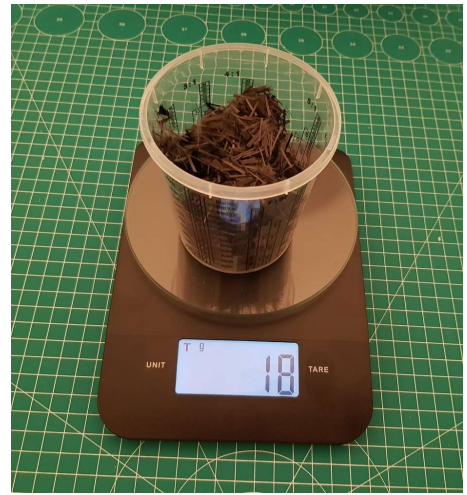
- **18,072 g** – vlakna
- **22,6 g** – smola
- **6,8 g** – utvrđivač

### 5.2.2. Izrada:

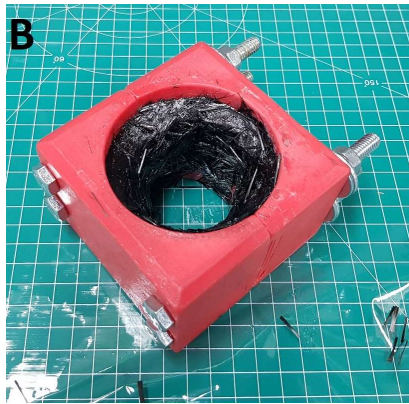
- prema preporuci proizvođača koristi se malo veća količina smole od izračunate
- alat i jezgre se premazuju voskom za otpuštanje u 3 sloja (Slika 5.2.)
- u zasebnim posudama se izmjere potrebne količine komponenti (Slika 5.3.)
- ručno se sa kistom u alat postepeno dodavaju vlakna i smola
- prije stiskanja, ravnomjerno se po alatu rasporedi smjesa
- alat se zatvori i stegne vijcima i ručnim stegama ili škripcem (Slika 5.4 i 5.5.)
- nakon 24 sata i pri sobnoj temperaturi (20°C) izradak je gotov i može se otvoriti alat (Slike 5.6. i 5.7.)



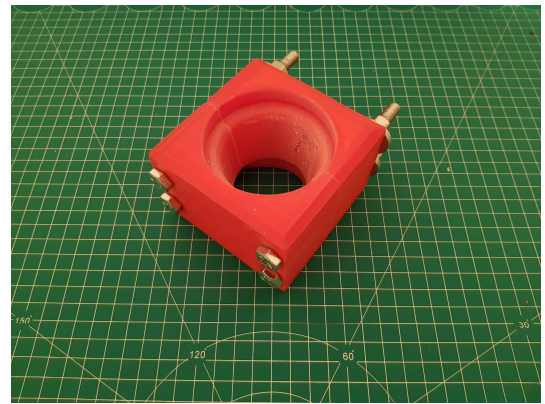
*Slika 5.2. Otvoren i premazan alat*



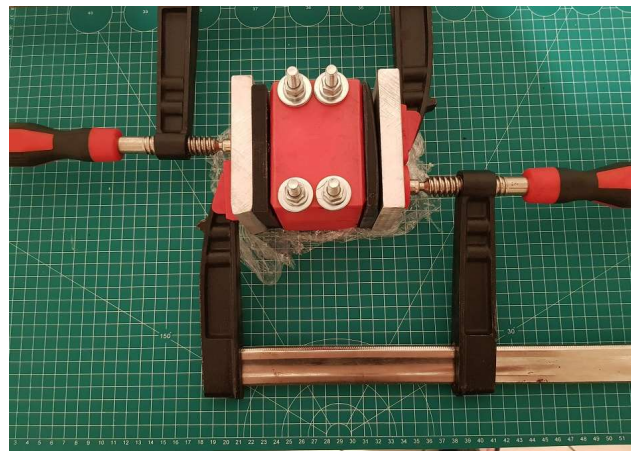
*Slika 5.3. Mjerenje količine ugljičnih vlakana*



*Slika 5.4. Alat napunjen smjesom smole i vlakana*



*Slika 5.5. Sklopljen alat*



*Slika 5.6. Zatvoren alat zategnut stegama*



*Slika 5.7. Izradak neposredno nakon vađenja iz alata*



*Slika 5.8. Finalizirani izradak*

Dobiveni izradak ima odlična mehanička svojstva, po karakteristikama slična aluminiju s time da ima gotovo dvostruko manju gustoću, odnosno dvostruko je lakši.

Uz navedene prednosti, postoje i neka ograničenja vezana uz izradu ovakvih predmeta u radioničkim uvjetima:

- izrada relativno manjih dijelova zbog potrebne velike sile stiskanja alata
- alat iz plastike ne može izdržati velike sile stiskanja
- za izradu većih i geometrijski kompliciranijih predmeta potrebna je hidraulična preša, a s njom i grijani alat izrađen od čelika
- poznavanje rada u CAD softveru i modeliranju alata

## 6. ZAKLJUČAK

Aktivnim tehnologijama se ubrzavaju i olakšavaju poslovi koji su ponekad usporavali razvitak novih proizvoda i projekata, te nisu mogli biti izrađeni ni na jedan drugi način.

Interes za tim tehnologijama je sve veći, a one omogućuju ubrzano istraživanje, te brzu izradu prototipova, alata i naprava.

Pomoću njih je moguće razvoj proizvoda pratiti kontinuirano te ga izraditi i kao 3D model i vidjeti kako on zapravo izgleda u realnosti. Na taj način olakšava se rad u raznim granama industrije.

Najvažnije od svega je da 3D tehnologije omogućuju brzu izradu prototipova te na taj način lakšu vizualnu prezentaciju konstruktoru, krajnjim korisnicima ili zainteresiranim investitorima.

Veliki napredak imaju i na području medicine, a dokazano je da je moguće uz pomoć ljudskih stanica izraditi zamjenski organ, te ga uspješno transplantirati.

Naprednim istraživanjem materijala za 3D printanje, osim brze izrade prototipnih modela, moguće je izraditi i alate za prototipnu i maloserijsku proizvodnju, a time uvelike vremenski i cijenovno smanjiti izradu u odnosu na klasične dostupne tehnologije.

Cilj ovog završnog rada je bio prikazati mogućnosti upotrebe niskobudžetnog FDM printera u izradi kompresijskog alata za izradu kompozita od sjeckanih ugljičnih vlakana.

Takav kompozitni izradak ima mehanička svojstva slična kao aluminijski, pa je tim postupkom moguće izraditi razne prototipne dijelove odličnih mehaničkih karakteristika u skromnijim uvjetima i bez posjedovanja skupih strojeva i alata.

## LITERATURA

### Internet:

- [1] <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-who-invented-the-3d-printer/> , kolovoz 2023.
- [2] <https://all3dp.com/2/stl-to-g-code-how-to-convert-stl-files-to-g-code/> , kolovoz 2023.
- [3] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>, kolovoz 2023.
- [4] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/> , kolovoz 2023.
- [5] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>, kolovoz 2023.
- [6] <https://markforged.com/resources/manufacturing-applications/tooling-development> , rujan 2023.
- [7] <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/> , kolovoz 2023.
- [8] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1&tab=subscription> , rujan 2023
- [9] <https://www.easycomposites.eu/forged-carbon-fibre-kit> , srpanj 2023.
- [10] <https://3dprint.com/259528/thermwood-purdue-3d-printed-composite-molds-to-make-compression-molding-parts/amp/> , rujan 2023.
- [11] <https://www.ric.it/en/about/compression-molding/> , rujan 2023.
- [12] [https://pur-carbon.com/apps/fireamp/blogs/news/what-is-forged-carbon-and-where-did-it-come-from#\\_ftn3](https://pur-carbon.com/apps/fireamp/blogs/news/what-is-forged-carbon-and-where-did-it-come-from#_ftn3) , rujan 2023.
- [13] <https://ulticarbon.com/forged-carbon-fiber/> , kolovoz 2023.
- [14] <https://www.tch-fiberglass.com/forged-carbon-fiber-prodcuts-tch-composites/> , kolovoz 2023.
- [15] <https://www.iqsdirectory.com/articles/rubber-molding/compression-molding.html> , kolovoz '23.
- [16] <https://www.xometry.com/resources/injection-molding/compression-molding/> , kolovoz 2023.
- [17] <https://www.engineeringclicks.com/compression-molding/amp/> , kolovoz 2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Postupak dobivanja predmeta od 3D modela do gotovog proizvoda.....	3
Slika 2.2. Utjecaj visine sloja na kvalitetu površine.....	4
Slika 2.3. Zastupljenost 3D tehnologija.....	5
Slika 2.4. Izrada stereolitografijom.....	6
Slika 2.5. Izrada selektivnim laserskim sinteriranjem.....	8
Slika 2.6. Izrada topljenim depozitima.....	10
Slika 2.7. Različiti postoci ispunje modela FDM postupkom.....	11
Slika 2.8. Različite karakteristike 3D printanog izratka zbog djelovanja sila u odnosu na slojeve...	12
Slika 3.1. Hidraulična preša sa grijanim alatom.....	16
Slika 3.2. Alat izrađen od kompozitnih materijala aditivnom tehnologijom.....	16
Slika 3.3. Retrovizor automobila.....	17
Slika 3.4. Stražnji spojler automobila.....	17
Slika 3.5. Poklopac i ručica kvačila od motocikla.....	18
Slika 4.1. Radna površina softvera Fusion 360.....	19
Slika 4.2. Skica prirubnice.....	20
Slika 4.3. Model izratka – pogled odozgo.....	20
Slika 4.4. Model izratka - pogled odozdo.....	20
Slika 4.5. Nacrt izratka.....	21
Slika 4.6. Shematski prikaz kompresijskog alata.....	22
Slika 4.7. Formirana gravura unutar alata.....	23
Slika 4.8. Alat u presjeku.....	33

Slika 4.9. Detalj centriranja i vođenja klizača.....	24
Slika 4.10. Modelirana donja jezgra.....	25
Slika 4.11. Modelirana gornja jezgra.....	25
Slika 4.12. Crvenom bojom označena područja bez kuta izvlačenja unutar gravure.....	26
Slika 4.13. Alat podijeljen na dvije polovice.....	27
Slika 4.14. Polovice alata sa rupama i polu-sferama za centriranje.....	27
Slika 4.15. Kompletni alat.....	28
Slika 4.16. Početno sučelje Cura softvera.....	29
Slika 4.17.. 3D printer Creality Ender-5.....	30
Slika 4.18. Izgled mlaznice promjera 0,4mm.....	30
Slika 4.19. Primjer modela jezgre alata spremne za 3D printanje.....	31
Slika 4.20. Gornja jezgra alata u fazi printanja.....	31
Slika 5.1. Set za izradu kompozita.....	32
Slika 5.2. Otvoren i premazan alat.....	32
Slika 5.3. Mjerenje količine ugljičnih vlakana.....	32
Slika 5.4. Alat napunjen smjesom smole i vlakana.....	32
Slika 5.5. Sklopljen alat.....	32
Slika 5.6. Zatvoren alat zategnut stegama.....	32
Slika 5.7. Izradak neposredno nakon vađenja iz alata.....	35
Slika 5.8. Finalizirani izradak.....	35

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU

Tema ovog rada je konstrukcija i brza izrada prototipnog alata za kompozitni izradak od ugljičnih vlakana.

Opisana je aditivna tehnologija, najčešće komercijalno korištene vrste aditivnih tehnologija, te njihove karakteristike.

Također, opisana su svojstva i primjena sjeckanih ugljičnih vlakana kod izrade kompozita.

Na kraju je prikazano 3D modeliranje izratka u CAD softveru, modeliranje prototipnog kompresionog alata te priprema 3D modela alata za printanje nakon čega je prikazana izrada kompozitnog izratka od sjeckanih ugljičnih vlakana sa kompresijskim alatom.

**Ključne riječi:** aditivna tehnologija, 3D printanje, 3D modeliranje, ugljična vlakna, kompozitni materijali, brza izrada prototipova.

Topic of this paper is construction and rapid production of a prototype tool for a composite carbon fiber workpiece.

Additive technology, the most commonly commercially used types of additive technologies, and their characteristics are described.

Also, the properties and application of chopped carbon fibers in the production of composites are described.

At the end, 3D modeling of the product in CAD software, modeling of the prototype compression tool and preparation of 3D model of printing tool were presented, after which the production of composite product from chopped carbon fibers with compression tool was presented.

**Keywords:** additive technology, 3D printing, 3D modeling, carbon fibers, composite materials, rapid prototyping.