

IZRADA PREDNJEG DIJELA VODONEPROPUSNOG KUĆIŠTA ZA ELEKTROMOTOR

Uremović, Domagoj

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:455874>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-05**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

DOMAGOJ UREMOVIĆ

**IZRADA PREDNJEG DIJELA
VODONEPROPUSNOG KUĆIŠTA ZA
ELEKTROMOTOR**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

DOMAGOJ UREMOVIĆ

**IZRADA PREDNJEG DIJELA
VODONEPROPUSNOG KUĆIŠTA ZA
ELEKTROMOTOR**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr.sc. Tihana Kostadin

KARLOVAC, 2024.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-07/ __-01/ __

Ur.broj:
2133-61-04- __-01

Datum:

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

* Ime i prezime	DOMAGOJ UREMOVIĆ	
OIB / JMBG		
Adresa		
Tel / Mob / e-mail		
Matični broj studenta	0123422002	
JMBAG	0248067901	
Studij (za naziv i opis odgovarajućeg studija)	preddiplomski	Xspecijalistički diplomski
Naziv studija	STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO	
Godina diplome	2022.	
Datum podnošenja molbe	10.06.2024.	
Vlastoručni potpis studenta/studentice	Domagoj Uremović	

* Naslov teme na hrvatskom: IZRADA PREDNJEG DIJELA VODONEPROPUSNOG KUĆIŠTA ZA ELEKTROMOTOR

* Naslov teme na engleskom: FABRICATION OF THE FRONT PART OF THE WATERPROOF CASING FOR THE ELECTRIC MOTOR

Opis zadatka:

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu opisati materijale i tehnologije koji će se koristiti u eksperimentalnom dijelu rada. U eksperimentalnom dijelu prikazati, opisati i ilustrirati slikama kompletan postupak izrade prednjeg dijela vodonepropusnog kućišta za elektromotor, koristeći polimerne i kompozitne materijale i FDM tehnologiju. Također napraviti analizu i zaključak, osvrnuvši se na eventualne probleme tijekom izrade. Rad urediti prema Uputama za pisanje završnog rada na Strojarskom odjelu, koje su dostupne na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

NAPOMENA: Obrazac je poželjno ispuniti elektronski. Ukoliko isti niste u mogućnosti ispuniti elektronski, podatke označene* obavezno popuniti čitko velikim tiskanim slovima

IZJAVA

Izjavljujem da sam rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija, navedenu literaturu, podatke s interneta i uz pomoć profesorice Tihane Kostadin.

Karlovac, 2024

Domagoj Uremović

SAŽETAK

Tema završnog rada je primjena kompozitnih materijala u izradi prednjeg dijela kućišta za elektromotor. Cijelo kućište mora bit vodonepropusno.

Elektromotor se nalazi u vodi, pa kućište mora bit hidro dinamičnog oblika kako bi imalo što manji otpor. Kućište je konstruirano u programu za 3D konstruiranje te izrađeno principom koji će biti opisan dalje u radu.

Rad opisuje tehniku, metode, materijale koji se koriste u praktičnom dijelu. Rad uključuje ispis modela kućišta na 3D printeru, izradu kalupa, te izradu funkcionalnog dijela iz kalupa.

Ključne riječi: silikonski kalup, poliuretan, epoksi, PLA, lijevanje.

FABRICATION OF THE FRONT PART OF THE WATERPROOF CASING FOR THE ELECTRIC MOTOR

SUMMARY

The subject of the final paper is the application of composite materials in the production of the front part of the housing for the electric motor. The entire housing must be waterproof.

The electric motor is located in the water, so the housing must be hydrodynamic in order to have as little resistance as possible. The housing was designed in a 3D design program and made according to the principle that will be described later in the paper.

The paper describes the technique, methods, materials used in the practical part. The work includes printing the case model on a 3D printer, making a mold, and making a functional part from the mold.

Keywords: silicone mold, polyurethane, epoxy, PLA, casting.

SADRŽAJ

SAŽETAK	1
SUMMARY	2
POPIS SLIKA	4
POPIS TABLICA	5
POPIS OZNAKA	6
1. UVOD	7
2. TEHNOLOGIJA PRIMIJENJENA U RADU	8
2.1. 3D ispis	8
2.1.1. Povijest aditivne tehnologije	8
2.1.2. Uvodno o 3D ispisu	10
2.1.3. FDM postupak	11
2.2. Silikonski kalupi	16
2.2.1. Vakuumsko lijevanje	16
2.2.2. Postupak izrade silikonskog kalupa	19
2.3. Materijal odljevka	20
2.3.1. Kompoziti s polimernom matricom	20
2.3.2. Poliuretan za lijevanje	22
3. PRAKTIČNI DIO	23
3.1. Postupak izrade	23
3.1.1. Konstrukcija prednjeg dijela	24
3.1.2. 3D ispis	25
3.1.3. Obrada površine modela	29
3.1.4. Priprema modela za izradu kalupa	32
3.1.5. Izrada kalupa za silikonsku gumu	33
3.1.6. Izrada silikonskog kalupa	34
3.1.7. Lijevanje u silikonski kalup	39
4. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA	44
5. ZAKLJUČAK	46
LITERATURA	47
PRILOZI	48

POPIS SLIKA

Slika 1 Rep Rap [4].....	9
Slika 2 Prva isprintana proteza noge i žila [4].....	9
Slika 3 Aditivna tehnologija [4].....	10
Slika 4 Konvencijalna tehnologija [4].....	10
Slika 5 FDM postupak [4].....	12
Slika 6 Izrada silikonskog kalupa i lijevanje prototipa [3].....	19
Slika 7 a) Kompoziti s česticama, b) Kompoziti ojačani vlaknima, c) Slojeviti kompoziti, d) Sendvič konstrukcije [4].....	21
Slika 8 Oblik u presijeku.....	23
Slika 9 Kućište.....	24
Slika 10 Pogled odozgo.....	24
Slika 11 Prusa i3 Pro.....	25
Slika 12 Dio pripremljen za printanje.....	26
Slika 13 Početak printanja.....	27
Slika 14 Proces printanja.....	27
Slika 15 Model sa suport materijalom.....	28
Slika 16 Model nakon obrade brusnim papirom.....	29
Slika 17 Model nakon obrade.....	30
Slika 18 Model nakon nanošenja i obrade špric kita.....	31
Slika 19 Model sa pričvršćenim uljevnim kanalom i kanalima za odvod zraka.....	32
Slika 20 Kalup za silikonsku gumu.....	33
Slika 21 Komponente za silikonski kalup.....	34
Slika 22 Odvajač u spreju.....	35
Slika 23 Ulijevanje silikonske gume.....	36
Slika 24 Popunjavanje kalupa.....	37
Slika 25 Popunjeni kalup.....	37
Slika 26 Kalup spreman za vakuumsku komoru.....	38
Slika 27 Rezanje kalupa.....	39
Slika 28 Poliuretanska smola SG 2000 L.....	40
Slika 29 Ulijevanje tekućeg poliuretana.....	41
Slika 30 Gotov odljevak.....	42
Slika 31 Drugi dio.....	43

POPIS TABLICA

Tablica 1 FDM materijali [4].....	13
-----------------------------------	----

POPIS OZNAKA

<i>V</i>	<i>m/min</i>	Brzina ispisa
<i>θ</i>	°C	Temperatura
<i>t</i>	<i>min</i>	Vrijeme
<i>HS</i>	<i>Shore</i>	Tvrdoća Shore
<i>E</i>	<i>N/mm²</i>	Vlačna čvrstoća
<i>s</i>	<i>mm</i>	Debljina

1. UVOD

Prototip je prvi primjer proizvoda koji se proizvodi, a služi kao početna točka za izvođenje potrebnih modifikacija, kao model za repliciranje ili kao matrica za proizvodnju kalupa.

Izrada prototipova je eksperimentalni proces kroz koji konstruktori mogu materijalizirati svoje ideje. Izrada prototipova vrlo je koristan proces u raznim sektorima, koji omogućuje ponavljanje dok se ne postigne željeni rezultat. [1]

Aditivna tehnologija ili 3D printanje se najčešće koristi za izradu prototipa kod testiranja oblika, ergonomije i funkcionalnosti. Printani dijelovi još uvijek ne mogu u potpunosti ekvivalentno prezentirati funkcionalnosti proizvoda. Razlog tome je što materijali koji se koriste kod 3D printanja nemaju uvijek ista tehnička svojstva kao materijali od kojih se proizvodi proizvod sve dok tehnologije 3D printanje ne mogu proizvesti izotropne tvorevina. [2]

Silikonski kalupi se koriste za proizvodnju dijelova komplicirane geometrije, proizvodnju prototipova i malih serija. U kalup se najčešće lijevaju epoksi i poliuretanske smole.

2. TEHNOLOGIJA PRIMIJENJENA U RADU

2.1. 3D ispis

Aditivne tehnologije su novi način proizvodnje, koji je omogućen kroz tehnološki napredak (mikroprocesori, mikro kontroleri, tranzistori, CNC tehnologija). Pojavom aditivnih tehnologija dolazi do 4. industrijske revolucije. [4]

Aditivna proizvodnja ima mogućnost prilagoditi se suvremenim zahtjevima tržišta, a to su: povišena kvaliteta proizvoda, individualizacija proizvoda, fleksibilnost pri razvoju i proizvodnji.[4]

2.1.1. Povijest aditivne tehnologije

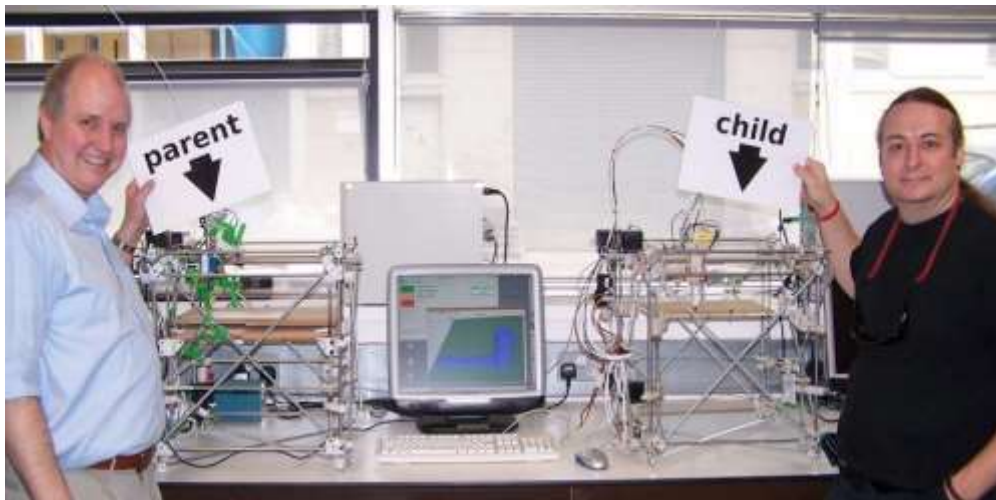
Razvoj aditivnih tehnologija započinje početkom 80-ih godina prošlog stoljeća.

- 1970. g. – 2D printeri u svom usponu. Javlja se ideja za 3D printerom.
- 1980. g. – razvoj rapid-prototyping. Dr. Kodama podnosi zahtjev za patent SLA postupak, što mu nije uspjelo.
- 1986. g. – Charles Hull dobiva patent za SLA postupak. To je ujedno i prvi postupak aditivne proizvodnje.
- 1986. g. – Charles Hull osniva 3D systems. Najveća i najutjecajnija tvrtka na području aditivnih tehnologija.
- 1989. g. – Tvrtka 3D systems kupuje patent SLS postupka proizvodnje Charla Deckarda.
- 1992. g. – Scott Crump patent za FDM. Danas najrasprostranjeniji postupak.
- Do sredine 2000-ih 3D printere isključivo koriste velike tvrtke, koje imaju puno kapitala za male serije.
- 2005. g. – Događa se revolucija. RepRap pokret. Dr. Bowyer (U.K.) vodi projekt samoreplicirajućeg printera.

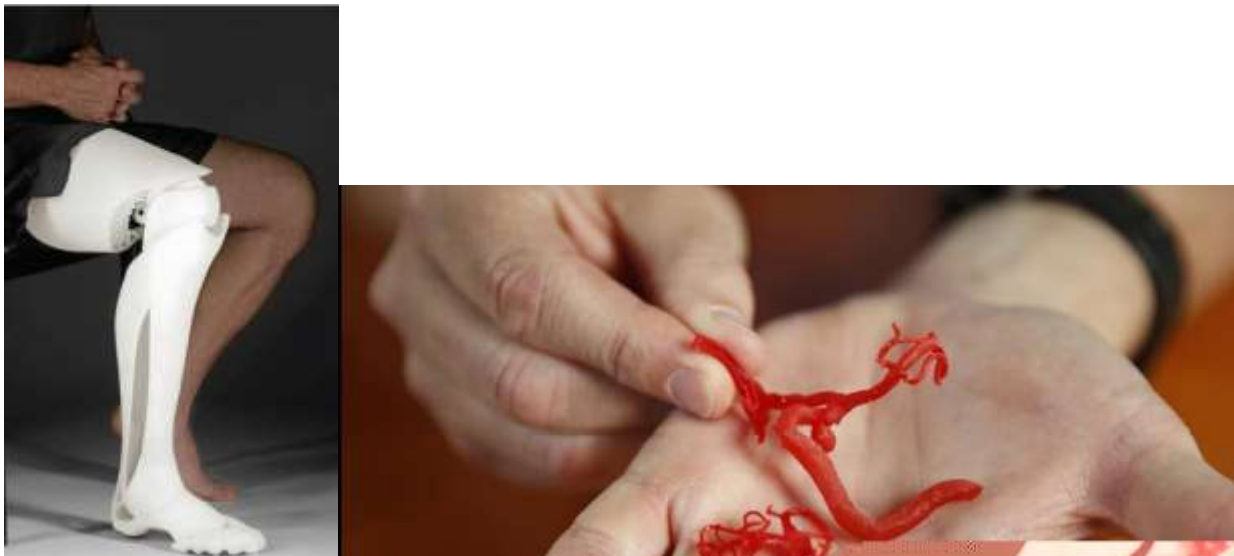
- 2008. g. – prva isprintana proteza noge.
- 2009. g. – prva isprintana žila.
- 2012. g. – Javnost je upoznata s 3D printerima. Ugrađena prva isprintana čeljust.
- 2014. g. – Isprintan prvi funkcionalni automobil. [4]

Slika 27 prikazuje Rep Rap pokret, kojim je započeta revolucija, gdje jedan 3D printer napravi dijelove za drugi. [4]

Slika 28 prikazuje isprintane bio kompatibilne dijelove koji se koriste u zdravstvene svrhe.



Slika 1 Rep Rap [4]

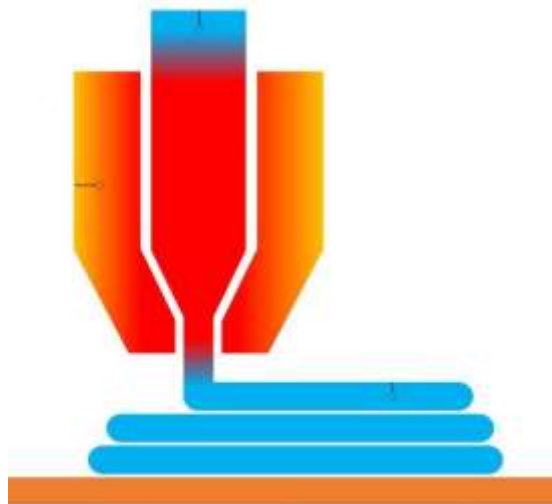


Slika 2 Prva isprintana proteza noge i žila [4]

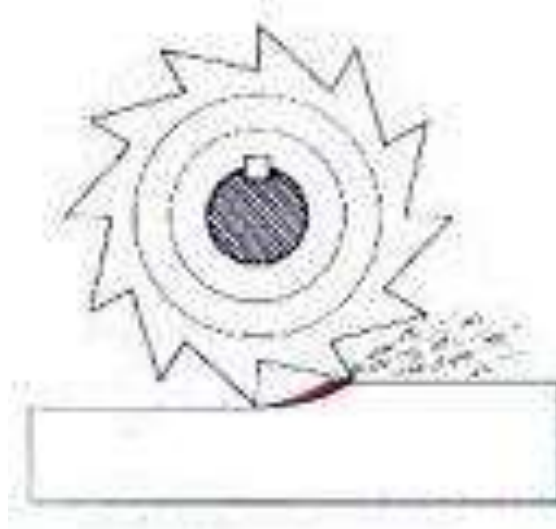
2.1.2. Uvodno o 3D ispisu

3D ispis omogućava brzo i ekonomičnu izradu prototipa i dijelova komplicirane geometrije. [4]

Kod 3D printanja se model radi gradnjom (dodavanjem) materijala, sloj po sloj, dok se kod konvencionalne proizvodnje materijal oduzima odvajanjem čestica. Slika 3 prikazuje princip rada aditivnih tehnologija, slika 4 prikazuje princip rada konvencionalne obrade odvajanjem čestica. [4]



Slika 3 Aditivna tehnologija [4]



Slika 4 Konvencijalna tehnologija [4]

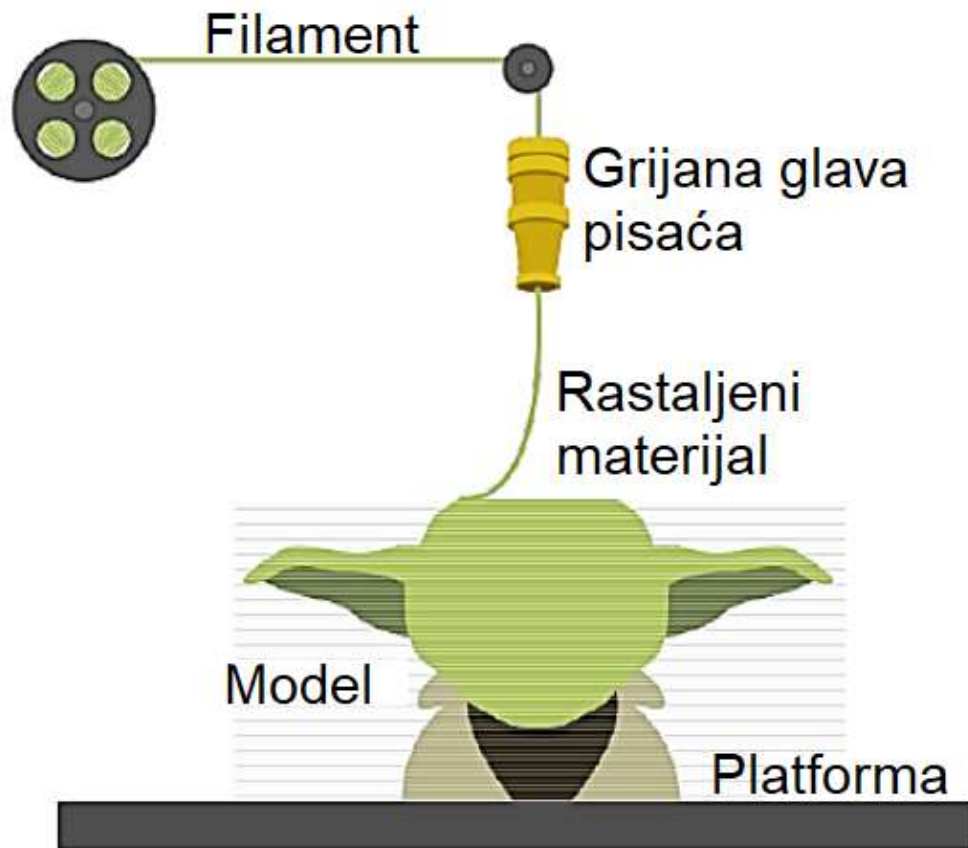
Postupkom 3D printanja se mogu proizvesti predmeti komplicirane geometrije, u relativno kratkom vremenu i bez potrebe za dodatnim koracima. Nije potreban plan procesa proizvodnje niti posebni alati. Nedostatak je to što trenutno možemo raditi samo s određenim materijalima. [4]

2.1.3. FDM postupak

FDM je kratica za “fused deposition modeling“, poznat je i kao FFF (fused filament fabrication) postupak. [4]

Ovaj postupak 3D printanja se kao i svaki postupak printanja temelji na dodavanju materijala sloj po sloj. Visina sloja ovisi o debljini mlaznice (od 0.05 do 0.4 mm). Što je debljina mlaznice manja vrijeme ispisa će se povećati, površina će biti kvalitetnija (finija), ali se smanjuje mehanička otpornost na udarce i pritisak. U nastavku je opisan način rada FDM printera. [4]

Način rada FDM printera: Materijal se naziva filament. Nalazi se u obliku žice određenog promjera. Zupčanci u glavi pisača uvlače filament do grijača. Grijači tope polimer. Rastopljena plastika izlazi kroz mlaznicu koja je određenog promjera, i nanosi se na platformu za ispis u sloju. Platforma može biti grijana, što omogućuje bolje prijanjanje prvog sloja. Po završetku sloja, glava pisača se pomiče za debljinu sloja prema gore, i počinje s ispisom sljedećeg sloja. Predmet može biti ispunjen materijalom koliko odredimo u postocima. Ispuna može biti u različitim oblicima od kojih svaki ima drugačija mehanička svojstva. Slika 5 prikazuje FDM postupak printanja. [4]



Slika 5 FDM postupak [4]

Pri ispisu mora se obratiti pažnju kod izrade prvog sloja. Materijal mora dobro "uhvatiti" podlogu. Drugi problem je "Wrapping", do njega dolazi zbog neravnomjernog hlađenja slojeva. Također prilikom pripreme predmeta u softveru se treba obratiti pažnja kako je predmet okrenut, gdje i kako postaviti potporni materijal. [4]

Na kvalitetu ispisa se može utjecati pomoću određenih parametara. Oni utječu na kvalitetu ispisa i ovise o vrsti materijala. [4]

Parametri pisača su:

- Brzina ispisa – s povećanjem brzine ispisa smanjuje se kvaliteta površine,
- Temperature mlaznice – ovisi o materijalu, pri kojoj se temperature tali,
- Visina sloja – što je visina sloja manja to je kvaliteta površine bolja,
- Brzina uvlačenja filameta – ovisi o brzini ispisa i visini sloja. Ne smije biti ni prevelika ni premala jer će predmet biti nepravilnog oblika i dimenzija. [4]

Tablica 1 prikazuje materijale koji se koriste kod FDM postupka, njihova svojstva i primjenu.

Tablica 1 FDM materijali [4]

Materijal	Svojstva	Primjena
ABS	<ul style="list-style-type: none"> -Čvrst i izdržljiv -Otporan na topline i udarce -Potrebna grijana platforma za ispis -Potrebna ventilacija prostora, zbog otrovnih para prilikom zagrijavanja ABS-a 	-Funkcionalni prototipovi
PLA	<ul style="list-style-type: none"> -Najlakši materijal za FDM ispis -Krut i jak, ali krhak -Manje otporan na topline i kemikalije -Biorazgradiv (proizvodi se od kukuruznog škroba) -Bez mirisa -Upija vlagu iz okoline 	-Konceptijski modeli, koji izgledaju kao prototip
PETG	<ul style="list-style-type: none"> -Niska temperature ispisa -Brza proizvodnja -Otporan na vlagu i kemikalije 	<ul style="list-style-type: none"> -Posude za tekućine i hranu -Mehanički dijelovi -Funkcionalni prototipovi

	<ul style="list-style-type: none"> -Primjenjiv u prehrambenoj industriji -Otporan na UV zračenje 	
Najlon	<ul style="list-style-type: none"> -Jak, izdržljiv i lagan -Čvrst i fleksibilan -Otporan na topline i udarce -Vrlo zahtjevan za ispis 	<ul style="list-style-type: none"> -Funkcionalni prototipovi -Dijelovi otporni na habanje
TPU	<ul style="list-style-type: none"> -Fleksibilan i rastezljiv -Otporan na udarce -Izvršno prigušenje vibracija 	-Fleksibilni prototipovi
PVA	-Topljiv u vodi	Potporni materijal
HIPS	<ul style="list-style-type: none"> -Topljivi materijal u kemijskom limonenu -Najčešće se koristi s ABS-om 	-Potporni materijal
Kompozit (ugljična vlakna, Kevlar, Stakloplastika)	-Krut, jak i izuzetno čvrst	<ul style="list-style-type: none"> -Funkcionalni prototipovi -Šablone -Učvršćenja i alati

Prednosti FDM postupaka:

- Velika popularnost i raširenost,
- Niska cijena pisača,
- Jednostavnost tehnologije,
- Mogućnost korištenja velikog broja materijala. [4]

Mane FDM postupka:

- Vidljivi slojevi,
- Nejednolika čvrstoća u svim smjerovima. [4]

2.2. Silikonski kalupi

Tehnologije za brzu izradu prototipova (Rapid Prototyping - RP) danas su prisutni u širokom spektru industrijskih područja zbog brojnih prednosti koje nude. [3]

Iako je RP relativno nova pojava u industriji, ove moderne tehnologije omogućile su to da se u kratkom vremenu postigne niz ciljeva koje suvremeno tržište zahtijeva, kao npr. skraćeno vrijeme do pojave proizvoda na tržištu i smanjenje cijene proizvoda. Viši stupanj vizualizacije u ranim fazama projektiranja, otkrivanje grešaka projektiranja prije izrade alata i brza izrada alata za proizvodnju prototipova postižu se primjenom RP tehnologija. Razvoj velikog broja RP tehnologija i postupaka doveo je i do toga da se danas njihovom pojedinačnom i kombiniranom upotrebom mogu ostvariti i brza izrada alata (engl. Rapid Tooling – RT) i brza proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing – RM). [3]

RT obuhvaća niz RP tehnika koje se koriste za brzu izradu složenih alata, kalupa i oblika koji se zatim koriste za izradu gotovih dijelova. Tehnike koje su prisutne u praksi su vakuumsko lijevanje[1], lijevanje gipsanih kalupa[2], lijevanje kalupa od smole[3], centrifugalno lijevanje[4], precizni liv i druge. One se najčešće primjenjuju kada se radi o malim serijama proizvoda i kada bi izrada alata uobičajenim postupcima bila jako skupa. Rezultat je kombiniranja RP tehnika s konvencionalnim alatima da bi se od CAD podataka u praksi proizveo kalup za manje vremena i s manje troškova u odnosu na tradicionalne metode. [3]

2.2.1. Vakuumsko lijevanje

Za proizvodnju funkcionalnih dijelova od polimera, metala i keramike, vakuumsko lijevanje u kalupu od silikonske gume predstavlja najfleksibilniji i najčešće korišten RT postupak. [5] Najjednostavnije rečeno, to je lijevanje u vakuumskoj komori koje koristi podtlak u komori da potpuno popuni kalup mješavinom. Time se znatno umanjuje mogućnost pojave mjehurića unutar dijela, a dobivaju se dijelovi vrlo slični po karakteristikama onima koji se izrađuju lijevanjem pod tlakom. [6]

Ovaj postupak karakteriziraju sljedeće prednosti:

- Ekstremno visoka rezolucija. I najsitniji detalji master modela se mogu prenijeti na silikonski kalup, pa čak i otisci prstiju!
- Značajno olakšano vađenje dijelova iz kalupa. Geometrijski detalji koji bi onemogućili vađenje iz tvrdog kalupa, lako se mogu izvaditi iz savitljivog kalupa od silikonske gume. [3]

Prednosti vakuumske lijevanja u odnosu na druge tehnologije:

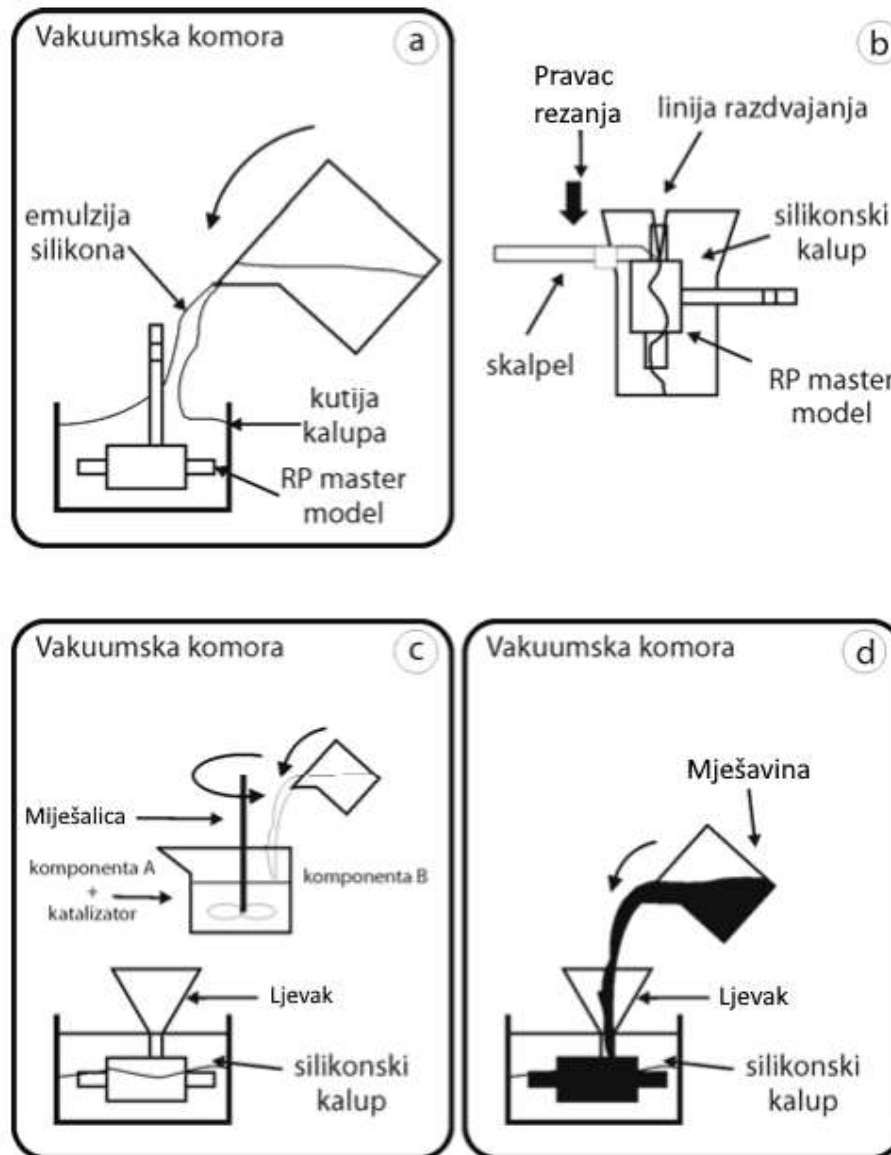
- Vakuumsko lijevanje u silikonske kalupe je idealno za proizvodnju dijelova u manjim serijama (do 50 odljevaka po kalupu, ovisno o korištenom materijalu).
- Cijena kalupa i odljevaka je daleko povoljnija od proizvodnje dijelova injekcijskim brizganjem (za količine do 1000 odljevaka), 3D printanjem (za više od 2 odljevaka) ili strojne CNC obrade.
- Silikonski kalup omogućuje proizvodnju kompliciranih oblika, dijelovi mogu imati potkopavanja, debele i tanke stijenke itd.
- Mogućnost više odljevaka (gnijezda) unutar jednog kalupa.
- Brzina - prvi odljevci mogući su već idući dan.
- Veliki izbor materijala koji imitiraju mnoštvo najpopularnijih plastičnih masa (ABS, PC, PP, HDPE, PA...).
- Jedan kalup za sve materijale.
- Sami materijal može biti u bilo kojoj boji.
- Dijelovi mogu biti transparentni (staklo), tonirani nekom bojom ili mliječni (mutno).
- Dijelovi mogu biti elastični (u rasponu od Shorea 30 do Shorea 90) i obojeani.
- Teksturirana površina dijelova.
- Dijelovi ne zahtijevaju naknadnu površinsku obradu (brušenje, kitanje, poliranje, lakiranje...).
- Vrlo malo stezanje materijala (kalup < 0,1%; odljevak < 0,1%).
- Idealna tehnologija za kopiranje kompliciranih postojećih dijelova (npr. žmigavac oldtimera). [3]

Postupak izrade silikonskog kalupa:

Prvo je potrebno izraditi kalup. Da bi se izradio kalup potrebno je imati tzv. master model dijela koji se želi lijevati. Master model može biti napravljen bilo kojom tehnikom (3D printanjem, tokarenjem, glodanjem, modeliranjem iz gline, plastelina ili klesanjem, piljenjem, spajanjem, varenjem...), ili može biti neki drugi postojeći dio. Važno je napomenuti da ova tehnologija savršeno reproducira sve, pa i najmanje detalje poput rupica, teksture površina (pjeskarena / polirana), pa površina master modela mora biti one kvalitete koja se želi postići na odljevcima. Na master modelu se potom odredi podjelna linija te se po njoj zalijepi ljepljiva folija ili traka. Također, svi otvori na podjelnoj liniji se moraju prekriti folijom. Potom se od pločastog materijala izradi kutija odgovarajućih dimenzija u koju se postavlja i fiksira master model, te se dodaju uljevni kanali i ventilacijski otvori. Izračuna se potrebna količina silikona za kalup, odmjerne se silikon i katalizator te se izmiješaju. Nakon miješanja silikon se stavlja u posebnu vakuum komoru kako bi se iz smjese uklonili svi mjehurići zraka (deaerizacija). Nakon deaerizacije silikon se pažljivo ulije u kalup, te se sada cijeli kalup s master modelom i silikonom još jednom deaerizira. Nakon 12 h na sobnoj temperaturi (ili 3 h na 70 °C) kalup se može rastvoriti, razrezati i master model izvaditi. Izrada kalupa ne uništava master model, on ostaje netaknut. Sljedeće je lijevanje dijelova. Potrebno je izračunati volumen dijela, te se na preciznoj laboratorijskoj vazi izvažu komponente poliuretanske (PU) smjese. Ukoliko je dijelove potrebno bojati, dodaje se pigment u jednu od komponenata (Polyol). Komponente i prethodno zagrijani silikonski kalup se stavljaju u stroj za vakuumsko lijevanje, te se i još uvijek odvojene komponente deaeriziraju. Nakon deaerizacije komponente se izmiješaju (još uvijek pod vakuumom) te se uliju u kalup. Nakon što se kalup popuni vakuumska komora se puni atmosferskim tlakom, te se kalup stavlja u peć zagrijanu na 70 °C na 45 do 180 min. ovisno o materijalu. Nakon katalizacije materijala odljevak se može izvaditi iz kalupa i proces se može ponoviti. Na odljevku je potrebno odrezati uljevak i eventualne odzračnike i dio je gotov. Puna deklarirana svojstva materijal dobiva nakon 24 sata. [5]

2.2.2. Postupak izrade silikonskog kalupa

Kalup je napravljen od silikonske gume u kojoj je kalupna šupljina identična modelu.



Slika 6 Izrada silikonskog kalupa i lijevanje prototipa [3]

Slika 1. prikazuje princip tehnologije vakuumnog lijevanja koju čine sljedeće operacije: (a) nalijevanje silikonske gume, (b) razdvajanje kalupa, (c) miješanje epoksija ili polimera, i (d) ulijevanje mase u kalup. Kalup se suši dok se ne stvrdne, onda se na tako dobivenom stvrdnutom silikonskom kalupu skalpelom formira linija razdvajanja. Master model se zatim

izvadi iz kalupa, a na njegovom mjestu ostaje šupljina. Polovice kalupa se onda sastave, i ulijeva se materijal. To može biti epoksi, poliuretan,... a ulijevanje se izvodi u vakuumu da bi se izbjegle nepravilnosti uslijed zarobljenog zraka. Ovi kalupi se najčešće koriste za vakuumsko lijevanje. U kalupu od silikonske gume može se izradi do 20 poliuretanskih dijelova, prije nego što dođe do pucanja. [3]

2.3. Materijal odljevka

Materijal odljevka bi trebao biti što sličnijih svojstava materijalu iz kojeg će se dio proizvoditi.

Današnji izbor materijala je mnogobrojan, od raznih epoksi i poliuretanskih smola za ovaj način proizvodnje prototipa.

2.3.1. Kompoziti s polimernom matricom

Kompozitni materijali su materijali dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstva s ciljem dobivanja materijala takvih svojstva kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Osnovne komponente su: vlakna i matrica. Oni su međusobno povezani i složeni u više slojeva. Vlakna kompozitu daju čvrstoću, a matrica drži vlakna na mjestu i daje im formu. Kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali. [4]

Kompoziti mogu biti:

- Metalno-metalni,
- Metalno-keramički,
- Metalno-polimerni,
- Keramičko-polimerni,
- Keramičko-keramički,
- Polimerno-polimerni,
- Polimerno-metalni. [4]

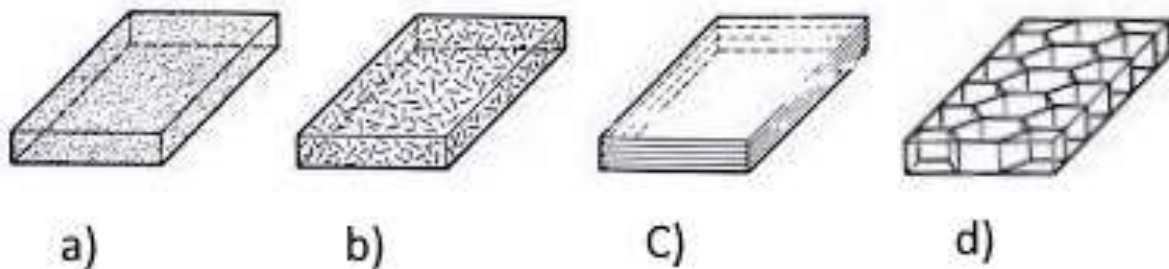
Matrica je osnova kod kompozitnih materijala.

Temeljna podjela kompozita (prema materijalu matrice):

- Metalni kompoziti,
- Keramički kompoziti,
- Polimerni kompoziti. [4]

Podjela prema ojačanju:

- Kompoziti s česticama,
- Kompoziti ojačani vlaknima,
- Slojeviti kompoziti I sendvič konstrukcije. [4]



Slika 7 a) Kompoziti s česticama, b) Kompoziti ojačani vlaknima, c) Slojeviti kompoziti, d) Sendvič konstrukcije [4]

Matrica je epoksi ili poliester smola. Kompozit se dobiva kemijskom reakcijom otvrdivača i smole. Nastaje čvrst polimer koji je netaljiv pri povišenoj temperaturi. [4]

Karakteristike:

- Dobra korozijska postojanost,
- Velika čvrstoća u odnosu na masu,
- Dobra otpornost na UV zračenje. [4]

2.3.2. Poliuretan za lijevanje

Poliuretan za lijevanje je polimer u tekućem stanju koji ima određeno vrijeme skrućivanja.

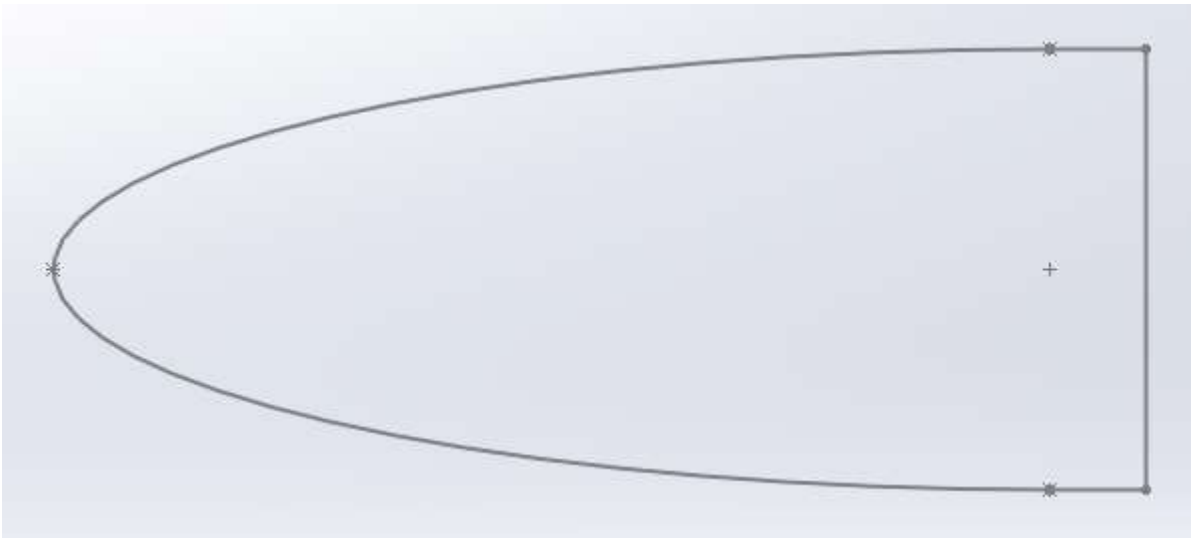
Može biti različite tvrdoće i gustoće. Dobiva se miješanjem dvije komponente A i B u određenom omjeru. Ima homogena svojstva po cijelom presjeku.

3. PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu je opisan postupak izrade prednjeg dijela kućišta uz opisane probleme i primijenjena rješenja tijekom izrade.

Dio je vlastite izrade, rađen samostalno uz savjete stručnih osoba.

Dio mora biti takvog oblika da ima što manji otpor u tekućini, zato je odabran oblik elipse. Slika 8 prikazuje oblik dijela u presjeku.



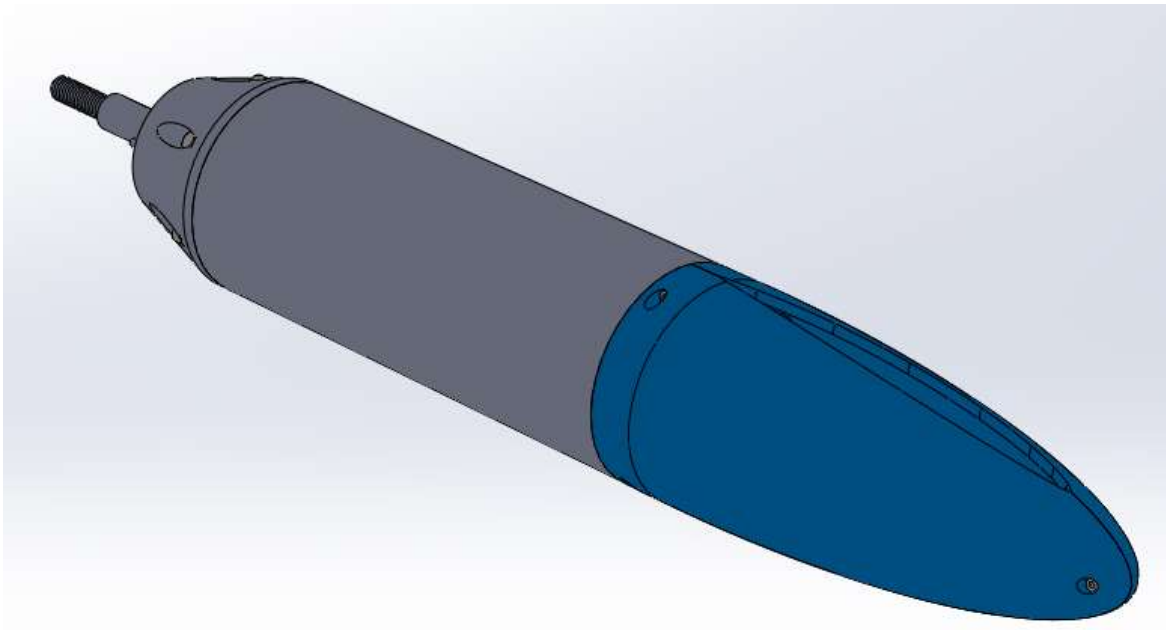
Slika 8 Oblik u presijeku

3.1. Postupak izrade

Postupak izrade spada u aditivnu tehnologiju, FDM i lijevanje u silikonske kalupe koja se koristi za proizvodnju prototipova ili malih serija.

3.1.1. Konstrukcija prednjeg dijela

Dio je konstruiran u programu za 3D konstruiranje. Konstruiran je tako da ima što manji otpor u vodi prilikom kretanja. Određenih je dimenzija, koje definiraju promjer motora i profil kojeg dio prekriva. Slika 9 prikazuje kompletan sklop kućišta elektromotora. Plavom bojom je označen prednji dio koji je opisan u radu. Dio se sastoji od dva identična dijela koji su spojeni vijcima.



Slika 9 Kućište

Na slici 10 je prikazano kućište odozgo, gdje se vidi profil kojeg kućište pokriva.



Slika 10 Pogled odozgo

3.1.2. 3D ispis

Dio je isprintan na FDM 3D printeru, iz PLA materijala. Nije potrebno raditi dva modela jer su obje strane simetrične.

Priprema za 3D printanje:

Model u 3D programu je potrebno spremiti kao STL datoteku, te se kao takva otvara u programu za 3D printanje. Datoteka se pretvara u G kod, te se određuju parametri ispisa.

Parametri printanja:

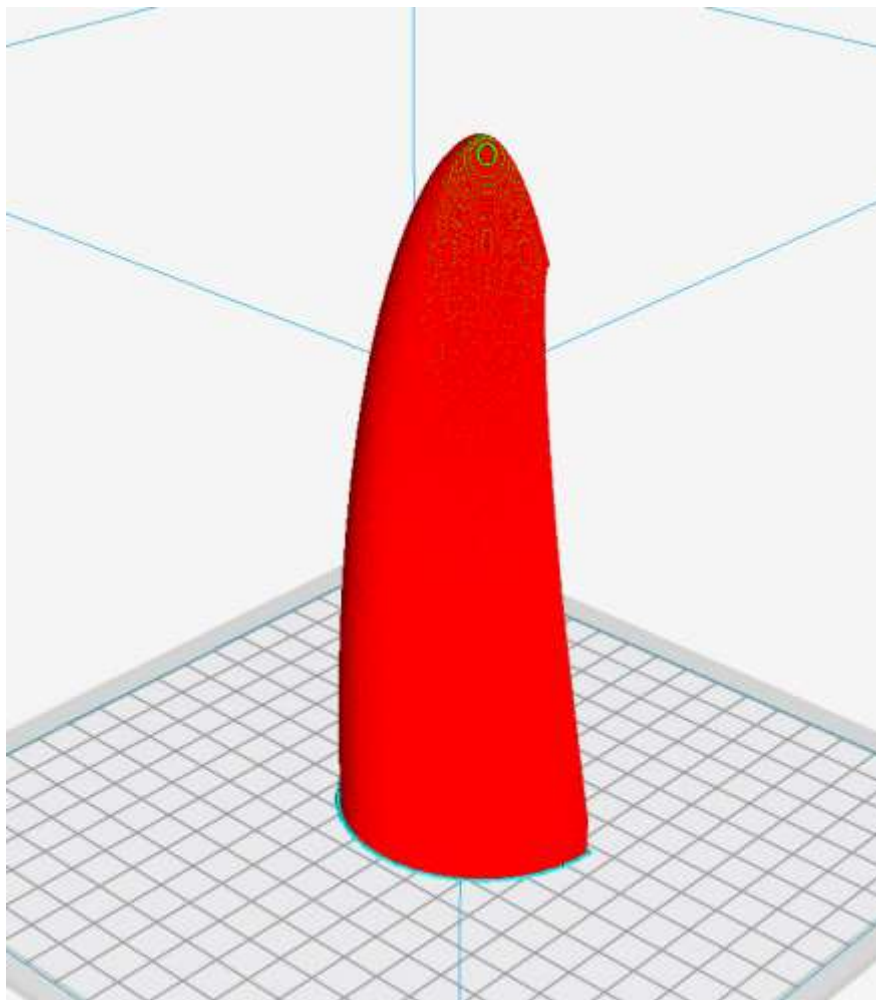
- Ispuna: 15%
- Temperatura mlaznice: 210 °C
- Temperatura platforme: 50 °C

Slika 11 prikazuje 3D printer na kojem je model napravljen.



Slika 11 Prusa i3 Pro

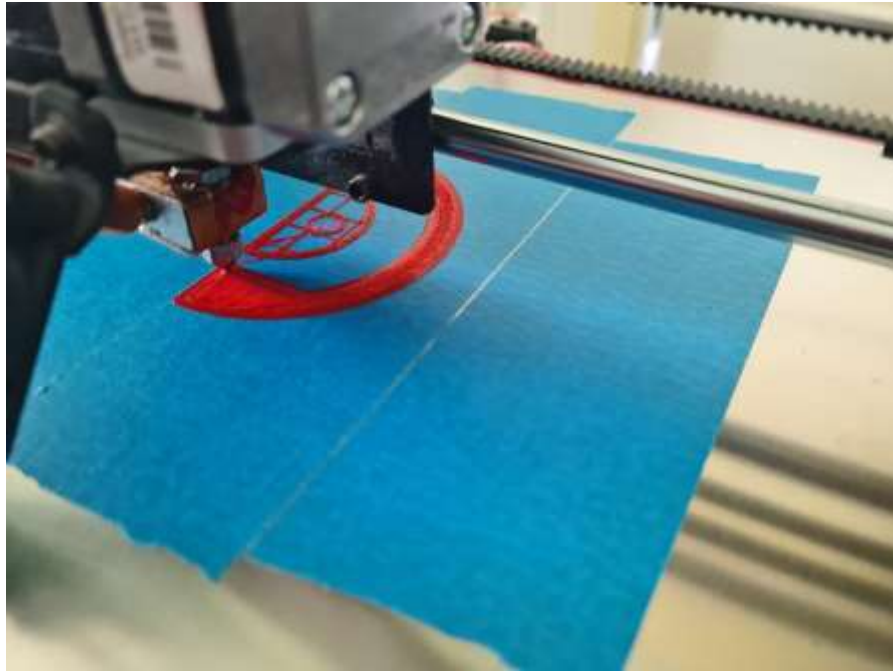
Slika 12 prikazuje dio spreman za printanje pripremljen po gore zadanim parametrima. Vrijeme printanja je 4 h i 15 min.



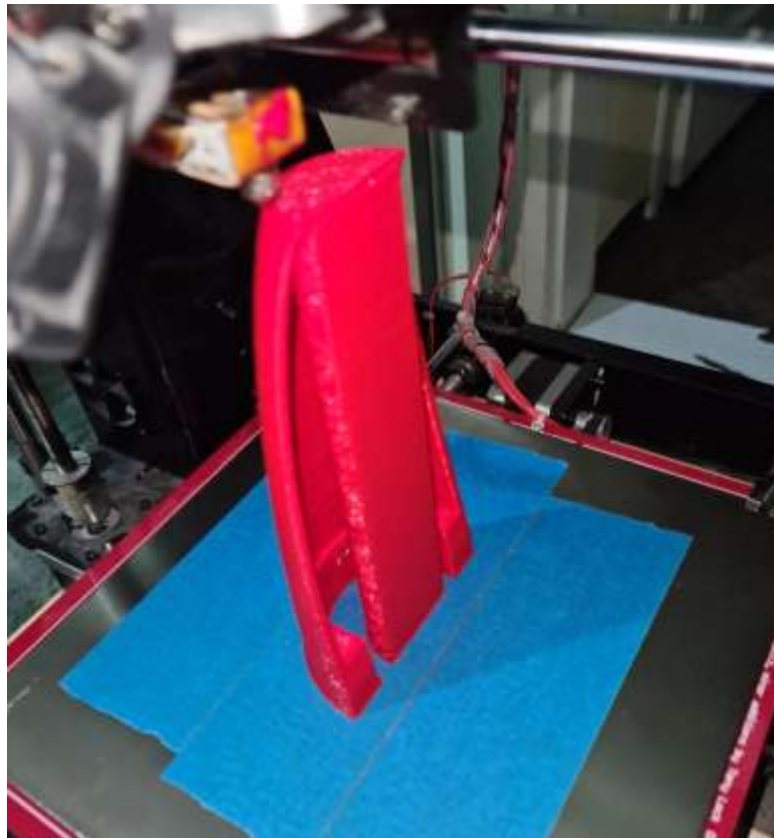
Slika 12 Dio pripremljen za printanje

Nakon pripreme modela za printanje, priprema se 3D printer. Potrebno ga je kalibrirati, mora se zagrijati mlaznica i platforma na radnu temperature. Kada se to obavi kreće se s printanjem.

Slika 13 i Slika 14 prikazuju model u procesu printanja. Na slici 13 se vidi suport materijal koji je potreban zbog naglog prijelaza.



Slika 13 Početak printanja



Slika 14 Proces printanja

Nakon završetka printanja model se uklanja s platforme. Predviđeno vrijeme printanja bilo je 4 h i 15 min, stvarno vrijeme je bilo 4 h i 23 min.

Slika 15 prikazuje isprintani model nakon printanja sa suport materijalom. Potrebno je ukloniti suport materijal, nakon čega slijedi daljnja obrada.

Model se mora obraditi tako da mu površina bude savršena, jer se na konačnom postupku izrade poznaju sve nepravilnosti na površini.



Slika 15 Model sa suport materijalom

3.1.3. Obrada površine modela

Nakon uklanjanja suport materijala površina modela se obrađuje brusnim papirom, jer FDM postupak printanja ostavlja tragove od slojeva. Te tragove je potrebno što više poravnati.

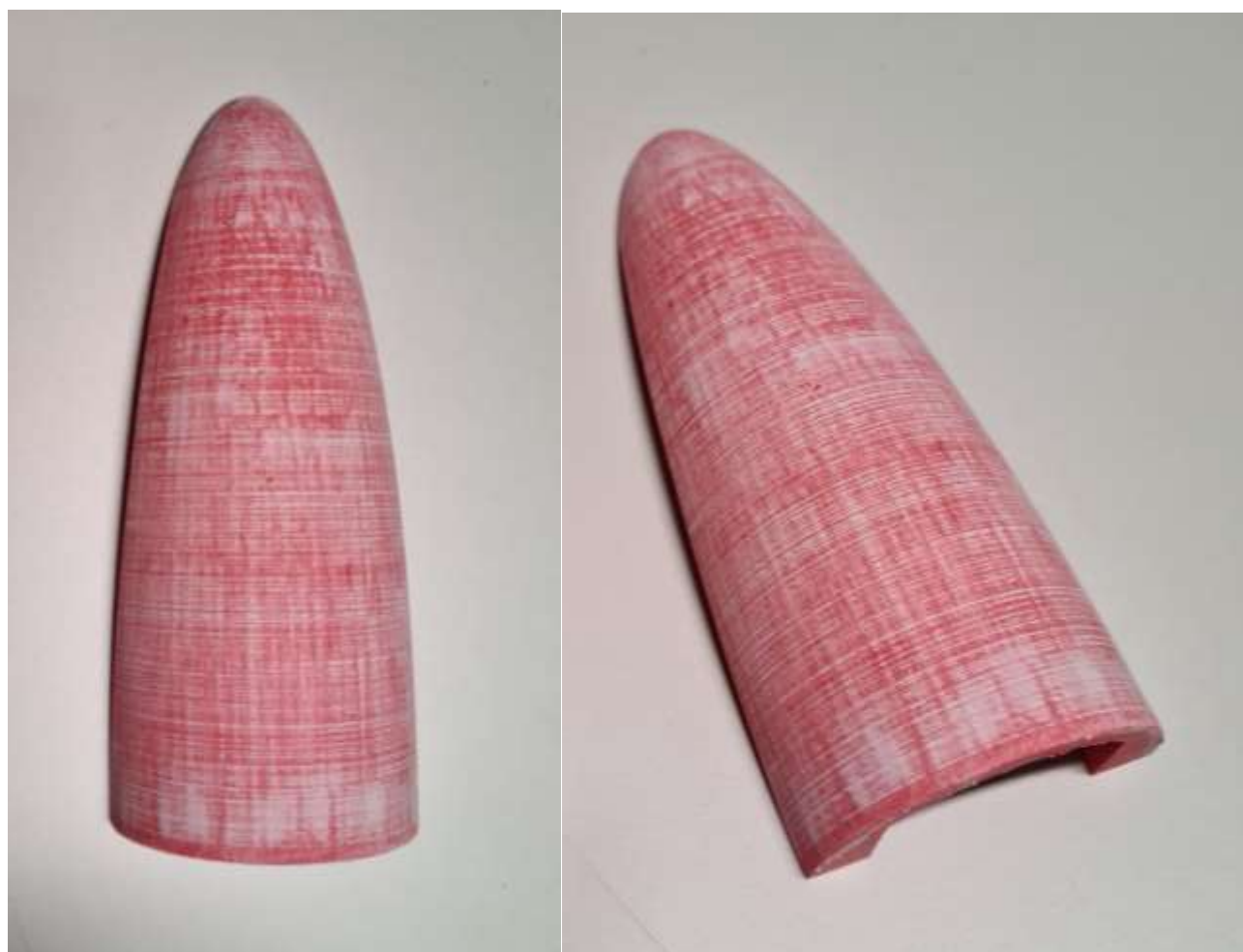
Slika 16 prikazuje model nakon obrade brusnim papirom.



Slika 16 Model nakon obrade brusnim papirom

Slojevi se i dalje poznaju, zato ih je potrebno popuniti s kitom. S kitom je potrebno prekriti cijeli model u što tanjem sloju, samo da se udubine između slojeva popune kako bi bilo potrebno što manje naknadne obrade.

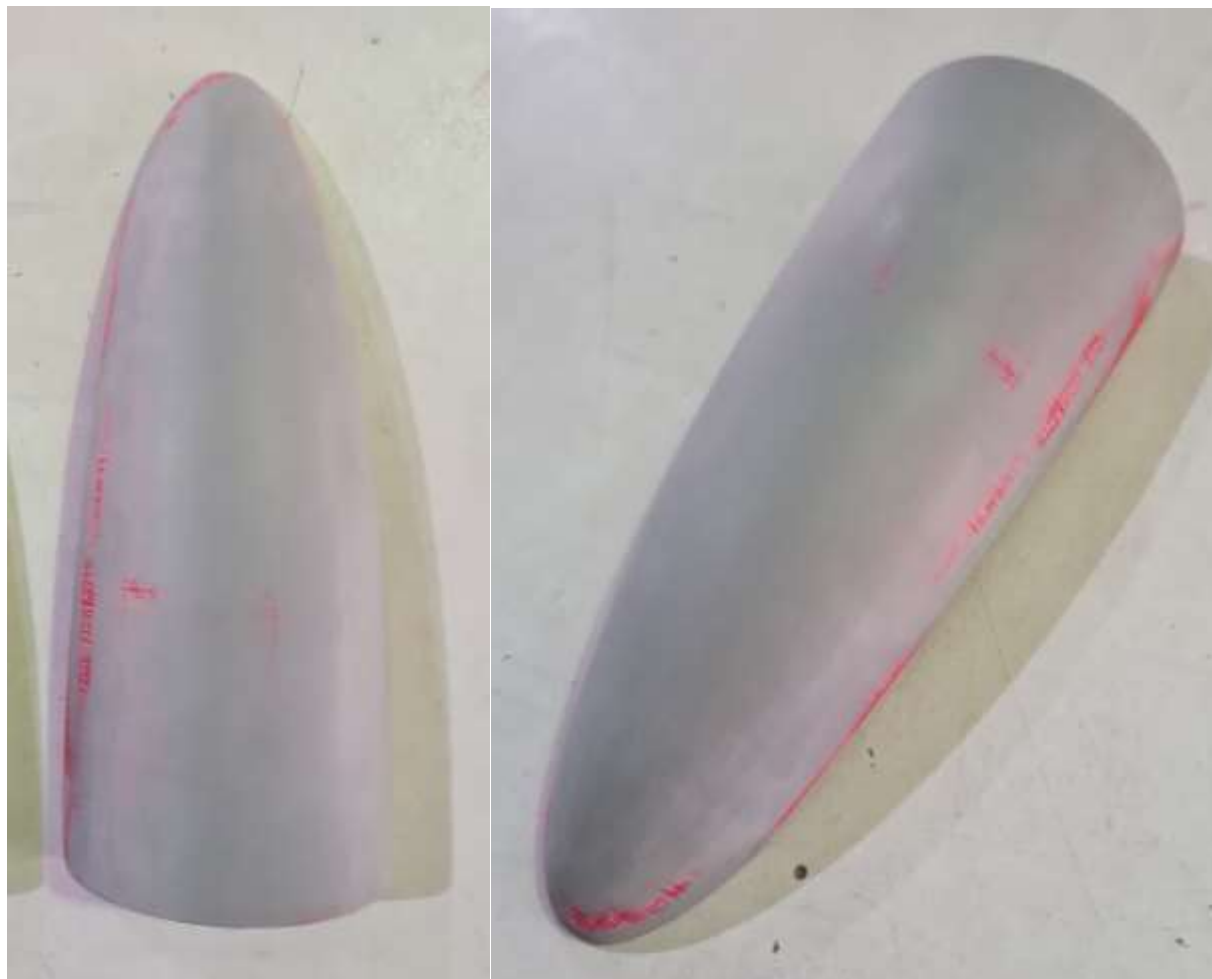
Slika 17 prikazuje model nakon prekrivanja kitom i nakon što je višak kita pobrušen.



Slika 17 Model nakon obrade

Nakon brušenja kita površina je još uvijek ostala pregruba i uz neke male nepopunjene nepravilnosti. Potrebna je finija obrada. Na model je potrebno nanijeti šprickit. On se nanosi špricom za lakiranje. Prije nanošenja, model je potrebno ispuhati zrakom i odmastiti. Špric kit je nanesen u tri tanka sloja. Nakon sušenja je potrebno model obraditi brusnim papirom. Koristio se brusni papir granulacije 240, 320 i 400. Nakon te obrade površina je bila

zadovoljavajuće hrapavosti, odnosno glatkoće. Slika 18 prikazuje model nakon nanošenja špric kita i brušenja brusnim papirom.



Slika 18 Model nakon nanošenja i obrade špric kita

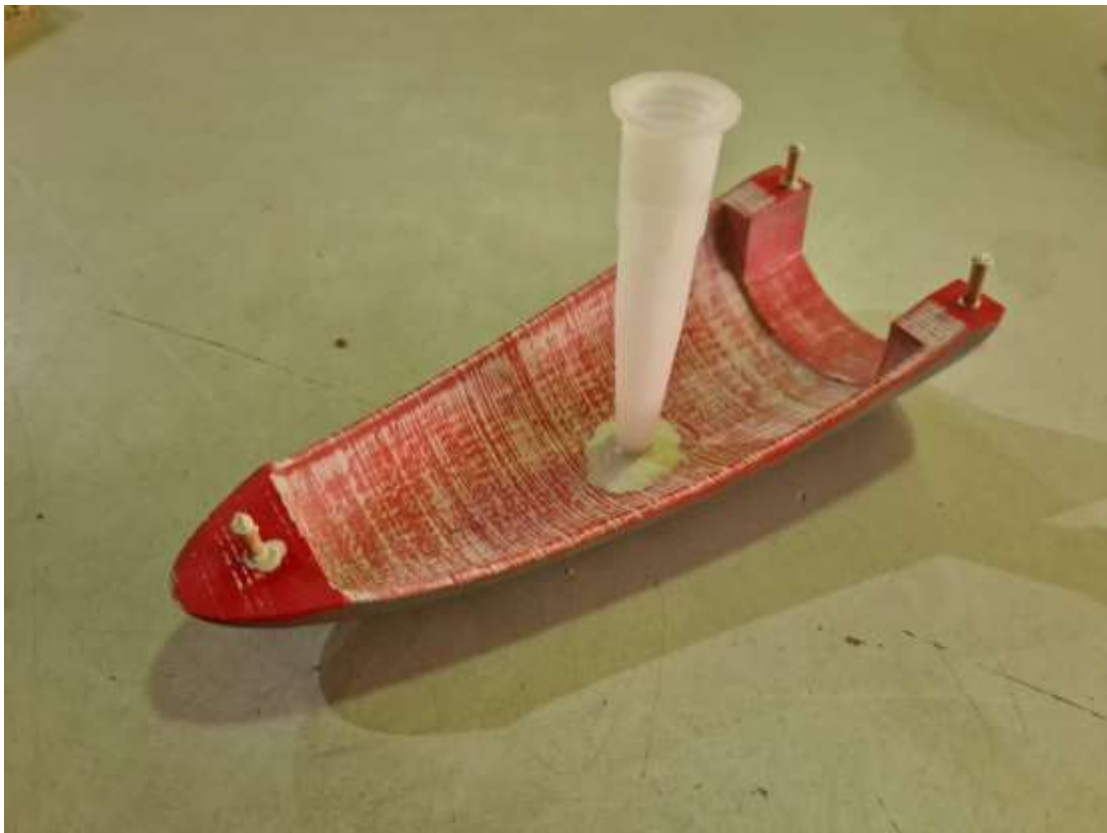
To je završna obrada površine. Potrebno je samo fino obraditi vanjski dio, jer je vidljiv, ostavit će sve nepravilnosti ako ih ima na površini i mora biti što gladi jer mora imati što manji otpor u vodi.

3.1.4. Priprema modela za izradu kalupa

Nakon što je površina obrađena, model se priprema za izradu kalupa.

Prvo je potrebno odrediti u kojem će položaju biti model u kalupu i gdje će biti uljevni kanal i kanali za izlaz zraka. Treba obratiti pažnju gdje će se postaviti kanali za izlaz zraka. Oni moraju biti postavljeni tamo gdje bi zrak mogao ostati zarobljen. Ako zrak ostane zarobljen kalupna šupljina se ne popuni do kraja i ostanu nepopunjena mjesta na gotovom proizvodu.

Stoga se kanali postavljaju na mjesta gdje ima uzvišenja i spuštanja. Kanali moraju ići od kalupne šupljine pa do vrha kalupa. Slika 9 prikazuje model s pričvršćenim štapićima za uljevni kanal i kanale za zrak. Štapići su pričvršćeni voskom.



Slika 19 Model sa pričvršćenim uljevnim kanalom i kanalima za odvod zraka

Model je postavljen u vodoravan položaj i kanali za odvod zraka su postavljeni u sredinu površina koje su paralelne i horizontalne, kasnije u radu će se vidjeti da to možda i nije baš najbolje rješenje.

3.1.5. Izrada kalupa za silikonsku gumu

Nakon određivanja položaja i pripreme modela, potrebno je odrediti dimenzije kalupa i napraviti kalup za lijevanje silikona.

Kod kalupa se mora pripaziti da mu dimenzije nisu premale, odnosno da ima dovoljno mjesta od ruba kalupa do modela sa svih strana da ne bi došlo do savijanja silikona uslijed vlastite težine.

Određene su dimenzije i oblik kalupa. Pravokutnog je oblika i napravljen je od iverala spojenog s vijcima. Slika 20 prikazuje kalup za silikon.



Slika 20 Kalup za silikonsku gumu

3.1.6. Izrada silikonskog kalupa

Silikonski kalup je napravljen tehnikom vakuumskog lijevanja, koja je opisana u teorijskom djelu rada.

Korištena je silikonska guma koja se miješa iz dvije komponente A i B u masenom omjeru 1:1 koja se skrućuje na sobnoj temperaturi. Za kalup ovih dimenzija je potrošena 0.5 kg od svake komponente. Na slici 21 su prikazane korištene komponente za silikonski kalup.

Karakteristike korištene silikonske gume:

- Tvrdoća silikonske gume je 25 Shorea.
- Otporan na temperaturama od -40 °C do +280 °C.
- Vrijeme skrućivanja pri 20 °C 60 min.
- Vrijeme otkupljivanja 6 h.
- Vrijeme dok potpuno ne očvrsne 1 do 2 dana
- Komponenta A tvrdoće 20-25 Shorea
- Vlačna čvrstoća 4 N/mm²



Slika 21 Komponente za silikonski kalup

Komponenta A i B se uliju u posudu i promiješaju laganim pokretima dok tekućina ne postane jednolika. Prilikom miješanja se treba obratiti pozornost da se ne praviju nagli pokreti štapićem za miješanje da ne dođe do rađenja mjehurića.

Vrijeme rada s ovom silikonskom gumom je 60 min nakon toga se počinje skrućivati.

Nakon miješanja slijedi ulijevanje u kalup. Kalup i model su prethodno pripremljeni. Model je pričvršćen za dvije letvice tako da bude u ispravnom položaju cijelo vrijeme. Ako ne bi bio pričvršćen silikonska guma bi ga podignula na površinu, jer model ima manju gustoću.

Potrebno je spomenuti da su i kalup i model premazani sprejom koji služi kao odvajač, odnosno da se silikonska guma ne zalijepi za njih kako bi se lakše dali odvojiti nakon skrućivanja. Na slici 22 je prikazan sprej koji služi kao odvajač.

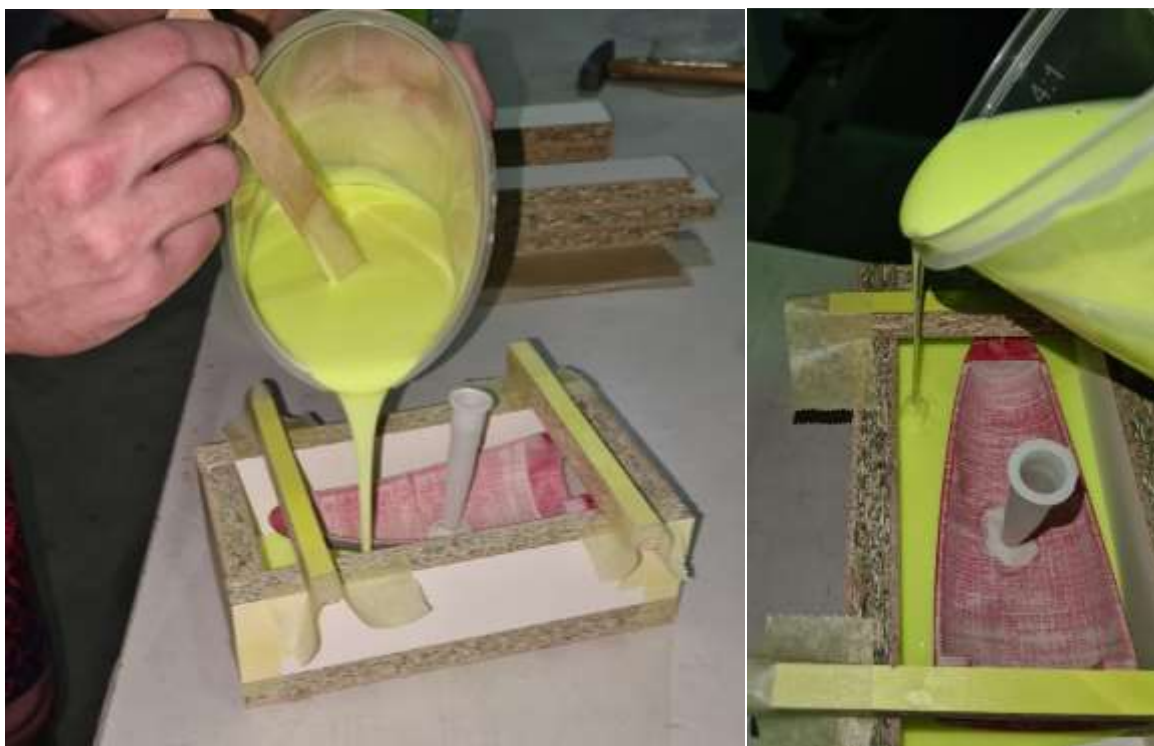


Slika 22 Odvajač u spreju

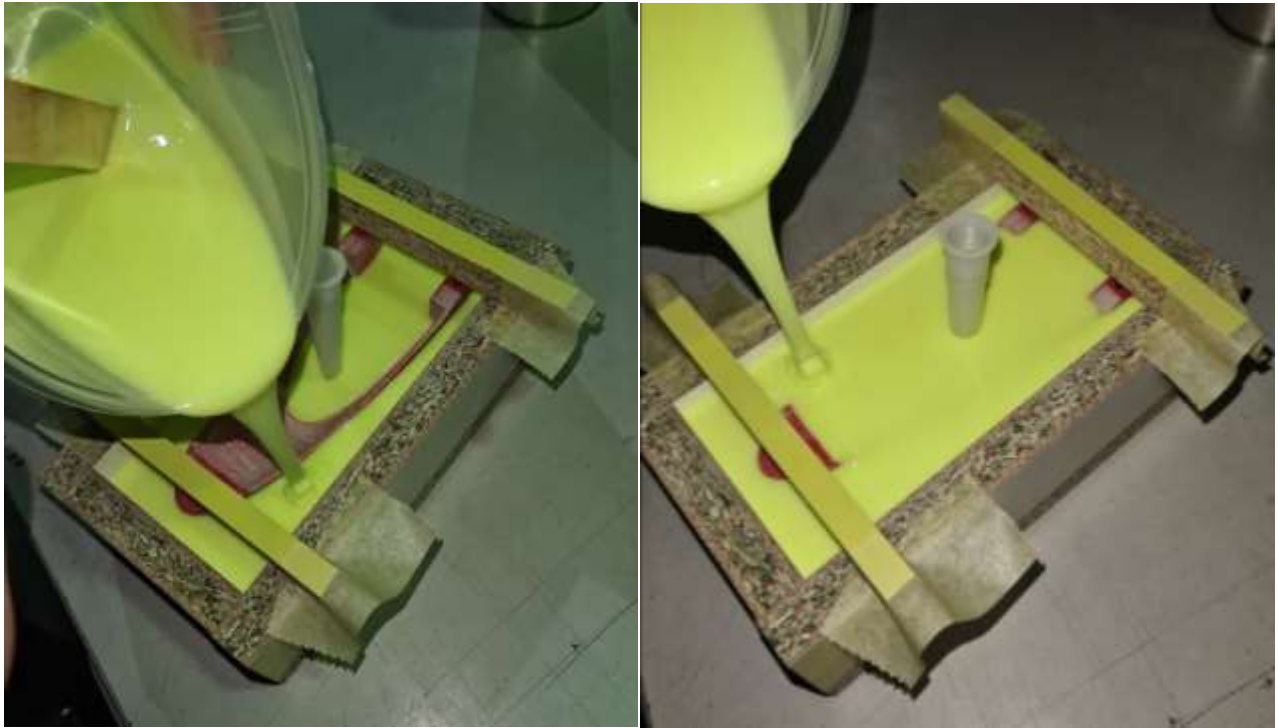
Isprintani model se postavlja u određenu poziciju i počinje se s ulijevanjem silikonske gume. Ona se ulijeva u jedan kut, te se pušta da se sama rasporedi po kalupu i popuni sve praznine. Ulijevanje se mora vršiti polako kako bi bilo što manje zarobljenih mjehurića zraka.

Nakon ulijevanja sve skupa je poželjno staviti u vakuumsku komoru kako bi se odstranili zarobljeni mjehurići zraka i popunile sve praznine ako ih ima uslijed naglih prijelaza. To se odvija pod podtlakom od 0.5 mbar ispod atmosferskog tlaka.

Na slikama od 23 do 26 je prikazano ulijevanje silikonske gume u kalup. Kao što je rečeno u tekstu, ulijevanje počinje u jednom kutu i guma se sama širi po kalupu popunjavajući cijelu šupljinu i "zarobljavajući" model.



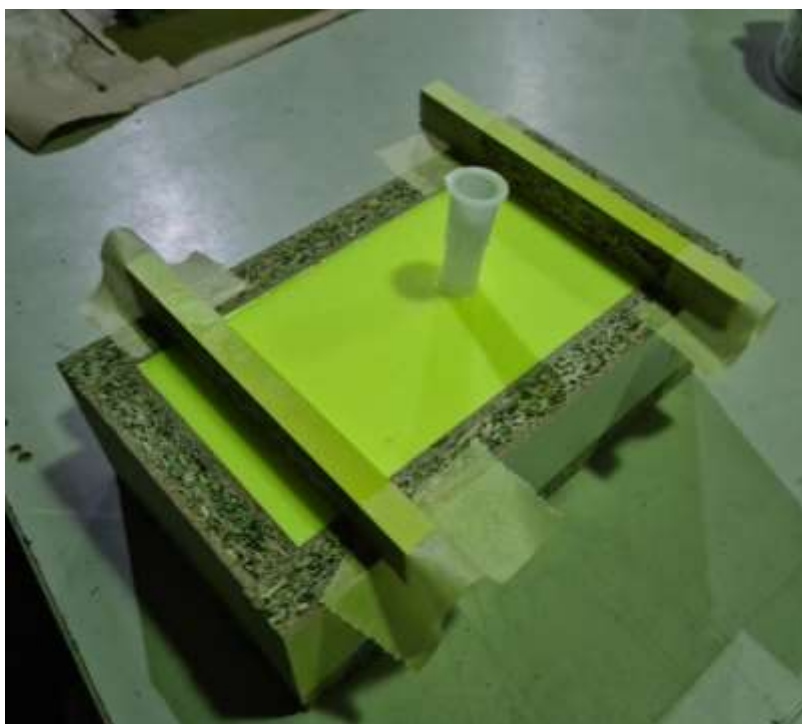
Slika 23 Ulijevanje silikonske gume



Slika 24 Popunjavanje kalupa



Slika 25 Popunjeni kalup



Slika 26 Kalup spreman za vakuumsku komoru

Nakon ispunjenja kalupa, sve skupa se stavlja u vakuumsku komoru na podtlak od 0.5 mbar. U vakuumskoj komori je određeno vrijeme koje je 15 min. nakon čega se vadi iz nje i ostavlja se da se silikonska guma osuši. Proces sušenja je trajao na sobnoj temperature 1 i pol dan.

Nakon što se silikonska guma osušila, vadi se iz kalupa.

Dobiven je pravokutan blok silikonske gume u kojem je "zarobljen" model. Model je potrebno izvaditi iz gumenog kalupa.

Guma se reže na željenom dijelu do modela onoliko da bi se model mogao izvaditi van.

U ovom slučaju je rezano s gornje i donje strane do sredine. Na slici 27 je prikazano gdje je kalup zarezan.



Slika 27 Rezanje kalupa

Nakon rezanja silikonskog kalupa model se vadi iz njega u gotovo neoštećenom stanju. Na modelu su ostale crte od skalpela koje je moguće sanirati i ponovo upotrijebiti model ako je potrebno za izradu novog kalupa.

Kalup se spoji na crtama rezanja, spaja se gotovo savršeno i nepropusno za tekućine, jer silikon ima dobra svojstva spajanja "lijepjenja".

3.1.7. Lijevanje u silikonski kalup

Plan je napraviti dio od epoksi smole i staklenih čestica (siladex). Nakon miješanja tih komponenti bilo je vidljivo da je to dosta gusta smijesa i da možda neće moći popuniti cijeli kalup s obzirom na to da je stijenka relativno tanka.

Stoga je napravljen eksperiment na pokusnom kalupu od iverala. Kalup je pravokutnog oblika s kalupnom šupljinom debljine 4 mm.

Ulijevanjem smjese kroz uljevni otvor kalup se nije mogao popuniti do kraja, zbog njezine gustoće.

Trebalo se pronaći drugo rješenje, koje je bilo da se koristi samo epoksi smola. To je malo riskantno jer je ona krta, a dio je vrh kućišta.

Za eksperiment je napravljen isti pravokutni kalup od iverala, debljine stijenke 4 mm. U ovom slučaju se šupljina popunila skroz. Ali je bio problem krtosti epoksi smole.

Rješenje problema je bilo koristiti poliuretanske materijale za lijevanje.

Korišten je SG 2000 L poliuretanska smola za lijevanje, koja je prikazana na slici 28.



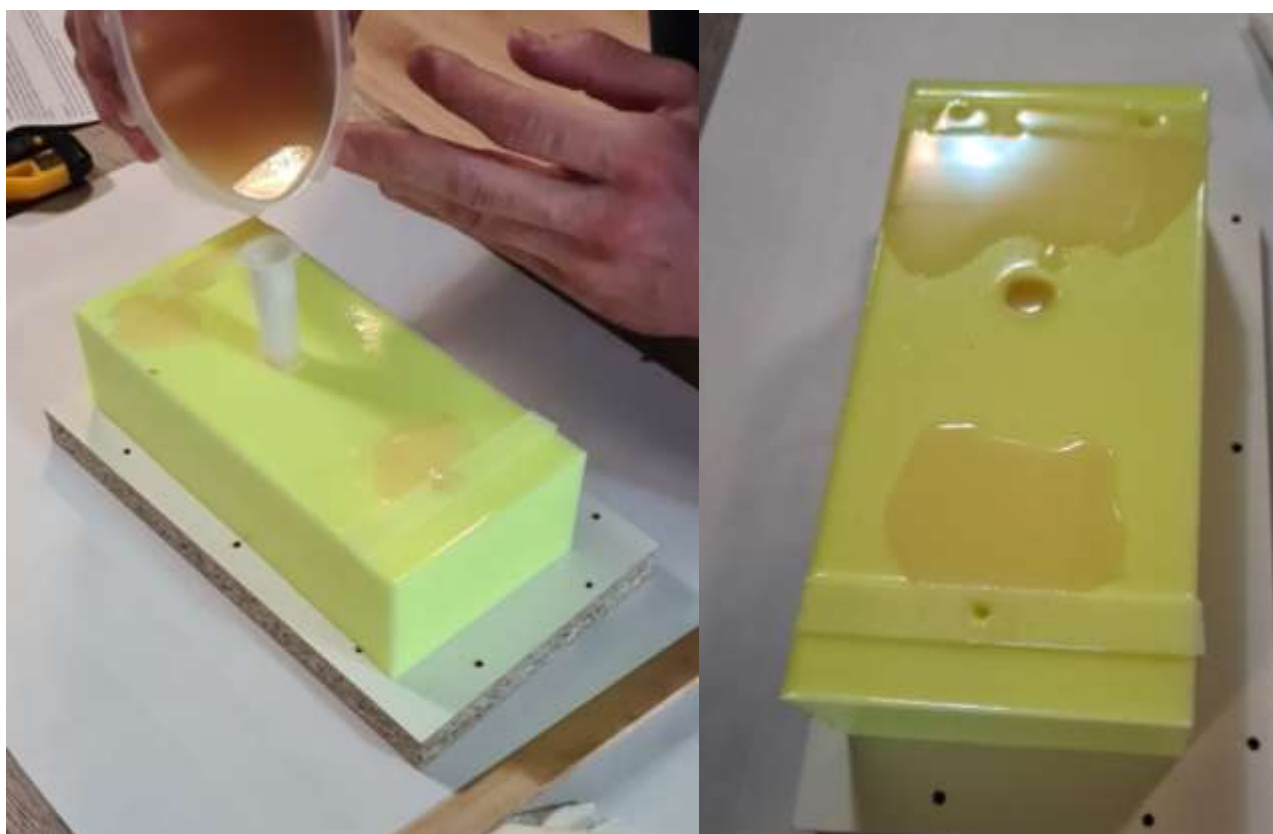
Slika 28 Poliuretanska smola SG 2000 L

Karakteristike poliuretanske smole SG 2000L:

- Za odljevke srednje veličine,
- Za precizne ljevove,
- Tvrdća 70 do 75 Shorea,
- Odljevci debljine od 1 mm do 100 mm,
- Vrijeme skrućivanja 6 do 8 min,
- Omjer miješanja (maseno) 1:1,
- Vrijeme otkalupljivanja je 60 do 90 min pri temperature od 20 °C,
- Linearno skupljanje pri debljini od 5 mm iznosi 0.5%.

Ovakvo lijevanje odlikuje se posebnom kvalitetom i jednostavnošću korištenja. Ovakav proces se može koristiti za odljevke male do srednje veličine, kalupe, modele za lijevanje, replike i prototipove.

Prije početka lijevanja potrebno je protresti obje komponente zasebno, potom se miješaju u zajedničkoj posudi. Treba obratiti pozornost na vrijeme jer je vrijeme skrućivanja kratko u prosjeku 5 min. Nakon miješanja tekući poliuretana se ulijeva kroz uljevni kanal. Ulijevanje se mora raditi polako da bi smjesa ravnomjerno popunila cijelu šupljinu i istisnula sav zrak kroz odzračne kanale. Kalup je pun kada smjesa dođe do vrha kanala za zrak. Na slici 29 je prikazao ulijevanje poliuretana.



Slika 29 Ulijevanje tekućeg poliuretana

Odljevak se stavlja u vakuumsku komoru na tlak od 0.5 mbar, nakon određenog vremena 15 min se vadi iz komore i ostavlja se da se suši na sobnoj temperaturi.

Nakon sušenja odljevak se vadi iz kalupa. Kalup se razdvoji tamo gdje je prorezan, odljevak se izvuče van. Dobije se dio koji je identičan modelu. Potrebno je odstraniti višak materijala od uljevnog kanala i otvora za zrak. To je odstranjeno kidanjem. Slika 30 prikazuje gotov odljevak.



Slika 30 Gotov odljevak

Može se uočiti da na odljevku ima nedostatka. Ti nedostaci su uzrok zarobljenog zraka ostalog uslijed prebrzog ulijevanja poliuretana. Ta greška se može pripisati i pozicioniranju modela. Model se mogao pozicionirati u drugačiji položaj. Ali onda bi se kanali za zrak morali postaviti na vidljivu površinu ili na površinu koju bi bilo teže za obraditi.

Ovakav dio je ne upotrebljiv jer ima previše nepopunjenih mjesta. Stoga je napravljen drugi dio.

Drugi dio je ulijevan opreznije i sporije. Slika 31 prikazuje drugi dio.



Slika 31 Drugi dio

Vidljivo je kako je uslijed sporijeg ulijevanja prisutan znatno manji broj grešaka. Međutim, greške su i dalje prisutne. To bi se možda dalo riješiti malim nagnjanjem kalupa u svim smjerovima nakon lijevanja da zrak izađe. Ili lijevanjem na vibracijskom stolu.

Ove greške se pojavljuju jer su površine vodoravne. Kada bi bile malo konusne zrak bi mogao izaći. Ali su to površine spajanja dvaju dijelova, stoga moraju biti ravne.

Ovakav tip grešaka je moguće naknadno sanirati dodavanjem istog materijala u količini da popuni praznine.

Višak materijala na kanalima za zrak se odstrani brusnim papirom.

4. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA

U danjem tekstu su analizirani problemi koji su nastali prilikom izrade, i rješenja koja su primijenjena.

1. Problem: Gruba površina nakon 3D printanja.

Rješenje: Gruba (hrapava) površina je bila očekivana, pošto se radi o FDM postupku printanja gdje je prijelaz između slojeva izraženiji. Hrapavost površine se riješila nanošenjem kita, zatim brušenje do odgovarajuće hrapavosti površine i tako nekoliko puta dok se nije dobila prihvatljiva površina da se na nju može nanijeti špric kit koji popunjava sve najmanje udubine. Nakon obrade špric kita brusnim papirom površina je bila dovoljno glatka i bez nepravilnosti.

2. Problem: Mjehurići zraka u silikonskoj gumi nastali prilikom miješanja.

Rješenje: Mjehurići se izbjegavaju opreznim i polaganim miješanjem, nakon čaga se silikonska guma stavlja u vakuumsku komoru kako bi se oslobodili svi zarobljeni mjehurići zraka.

3. Problem: Gustoća epoksi smole pomiješane sa staklenim česticama.

Rješenje: Smjesa epoksi smole i staklenih čestica je bila pregusta da bi se rasporedila po cijelom kalupu. Stoga je bilo potrebno dio napraviti iz drugog materijala. Uzet je tekući poliuretan za lijevanje SG 2000 L, koji se pokazao bolji od prvobitno predviđenog materijala. Za razliku od epoksi smole pomiješane sa staklenim česticama, SG 2000 L nije toliko krt što više odgovara funkciji za koju je dio predviđen.

4. Problem: Poroznost odljevka

Rješenje: Nakon vađenja odljevka iz silikonskog kalupa primijećeni su nedostaci, greške nastale uslijed zarobljenog zraka. Odljevak nije bio popunjen do kraja. Ostala su mala nepopunjena mjesta.

Prilikom odlijevanja prvog odljevka ulijevanje se vršilo prebrzo, odliveni materijal je prebrzo popunio kalupnu šupljinu i zarobio zrak na kritičnim mjestima gdje je postojala mogućnost da bi moglo doći do zarobljavanja zraka.

Prilikom odljeva drugog odljevka, ulijevanje se vršilo mnogo sporije. Odljevak je ispao značajno bolje, uz par mjesta gdje je ostao zarobljeni zrak.

Problem zarobljenog zraka bi se mogao riješiti postavljanjem modela u drugačiji položaj u kalupu.

5. ZAKLJUČAK

Prednji dio kućišta je izrađen aditivnim tehnologijama koje uključuju 3D printanje i vakuumsko lijevanje u silikonske kalupe. Izrada je poprilično brza i jednostavna, stoga je primjenjiva prilikom izrade prototipova, modela, replika ili dijelova tijekom razvoja nekog proizvoda gdje postoji mogućnost da će se dio morati malo mijenjati, bilo da se radi o funkcionalnosti ili estetski.

U praktičnom djelu je opisan postupak izrade modela 3D printanjem i obrade njegove površine. Zatim izrada kalupa od iverala za silikonski kalup. Također je opisan postupak izrade silikonskog kalupa i na kraju lijevanje prednjeg dijela kućišta elektromotora.

Tijekom izrade su se pojavljivali problem koji su riješeni i analizirani u prethodnom poglavlju. Na kraju je napravljen dio s manjim brojem grešaka za koje se zna uzrok i kako ih otkloniti.

LITERATURA

- [1] Prototipiranje (prototype3d.eu), pristupljeno 2.5.2024
- [2] Izrada prototipnih alata - 3d printanje - IZIT, pristupljeno 2.5.2024
- [3] NASLOV (ni.ac.rs), pristupljeno 5.6.2024
- [4] PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U IZRADI KRILA ZA HYDROFOIL | repozitorij.vuka.hr, pristupljeno 2.5.2024
- [5] Multiplico - razvoj proizvoda, 3D printanje, vakumsko lijevanje, izrada prototipova i serijska proizvodnja, pristupljeno 5.6.2024
- [6] History of additive manufacturing by Terry Wohlers and Tim Gornet, Wohlers Report 2016
- [7] Damir Godec i Mladen Šercer: Aditivna proizvodnja, udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i bodogradnje, lipanj 2015.
- [8] Skripta Materijali 2, dr.sc. Tihana Kostadin.

PRILOZI

CD