

# PRORAČUN I IZRADA 3D MODELA ČELNIKA S RAVNIM ZUBIMA

---

**Rem, Matej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:128:836464>

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

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



**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  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MATEJ REM

**PRORAČUN I IZRADA 3D MODELA ČELNIKA  
S RAVNIM ZUBIMA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2022.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**STROJARSKI ODJEL**  
**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

**MATEJ REM**

**PRORAČUN I IZRADA 3D MODELA ČELNIKA**  
**S RAVNIM ZUBIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:  
Marijan Brozović, dipl.ing., v.pred.

KARLOVAC, 2022.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:  
602-11/\_\_\_-01/\_\_\_

Ur.broj:  
2133-61-04-\_\_\_-01

**ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA**

Datum:

* Ime i prezime	Matej Rem		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta	0110616013		
JMBAG	0248059586		
Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija)	<b>X</b> preddiplomski	specijalistički diplomski	
Naziv studija	Stručni studij Strojarstva		
Godina upisa	2016./17.		
Datum podnošenja molbe	15.12.2021		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

\* Naslov teme na hrvatskom:

**PRORAČUN I IZRADA 3D MODELA ČELNIKA S RAVNIM ZUBIMA**

\* Naslov teme na engleskom:

**CALCULATION AND PRODUCTION OF 3D MODELS OF FLOT-TOOTHED LEADERS**

Opis zadatka:

- Općenito o prijenosnicima snage
- Izraditi proračun čelnika s ravnim zubima prema zadanim parametrima
- Izraditi 2D i 3D crtež
- Izraditi print 3D modela čelnika sa ravnim zubima
- U analizi dobivenih rezultata objasniti zbog čega se rade zupčanici sa pomakom profila.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći navedenu literaturu te stečena znanja tijekom studija.

Matej Rem

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem svojim kolegama koji su me tokom studija bodrili da napredujem i usavršavam se u svojoj struci, svom mentoru koji mi je pomagao u realizaciji završnog rada i svojoj obitelji koja je poticala i hrabrila moj trud tokom studiranja.

Matej Rem

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je uviđanje osnova prijenosnika snage koje često susrećemo, te detaljni prikaz i opis čelnika s ravnim zubima. U početnom dijelu opisujem prijenosnike kao jednu cjelinu, a zatim slijedi detaljniji uvod u čelnike s ravnim zubima i njihovoj primjeni. Napisan je proračun pomaka zuba za zadane čelnike te opisano zašto se isti izrađuju. Uz to se opisuju detalji koji su važni za čelnike, te vrste prijenosnika, njihove specifičnosti i materijali od kojih se izrađuju. Izrađeni su i tehnička dokumentacija i stvarni model čelnika: nacrt u programu SolidWorks i 3d printani čelnik u kućištu pomoću 3d printera modela Original Prusa Mini+.

Ključne riječi : Čelnici, zupčanici, pomak zuba, 3d printanje

## SUMMARY

The theme of this final work is getting acquainted with the power carriers we most often encounter and a detailed presentation and description of the leader with straight teeth. The initial part describes the power carriers as a whole, after which follows a more detailed introduction to leaders with straight teeth and their application. A tooth displacement calculation for the given leaders was also written and why they are made. In addition, details are described that are important for leaders, types of carriers, their specifics and materials from which they are made. In addition, a blueprint and a real model have been drafted for this type of leader: blueprint in the Solidworks program and a 3d printed model using a 3d Printer model Original Prusa Mini+.

Keywords : Leaders, gears, tooth movement, 3d printing

## SADRŽAJ

SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	V
POPIS SLIKA .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
1. UVOD .....	1
1.1 Prijenosnici snage (zupčani prijenosnici) .....	1
2. OBLICI ZUPČANIKA I NJIHOVA PODJELA .....	3
2.1 Zupčanici .....	3
2.2 Čelnici .....	4
2.3 Vrste ozubljenja zupčanika .....	6
2.4 Materijali zupčastih prijenosnika .....	8
2.5 Bitna obilježija mehaničkih prijenosnika .....	10
3. CILINDRIČNI ČELNICI SA RAVNIM ZUBIMA .....	13
3.1 Nulti V čelnici .....	13
3.2 Podrezivanje .....	14
3.3 Pomak profila .....	16
4. PRORAČUN ČELNIKA SA RAVNIM ZUBIMA .....	17
5. OBLIKOVANJE I NACRT .....	23
5.1 Općenito o programu Solidworks .....	23
5.2 Modeliranje zupčanika u programu SolidWorks 2016 .....	25
5.3 Sklapanje (Assembly) .....	27
6. ADITIVNA TEHNOLOGIJA .....	28
6.1 Općenito o 3D printerima .....	28
6.2 Metode 3D printanja .....	29
6.3 Izbor materijala za printanje .....	30
6.4 Program za izradu G koda .....	33
7. Zaključak .....	35
8. Literatura .....	36



## POPIS SLIKA

Slika 1: Struktura i nazivlje specifičnih oblika zupčanika s karakterističnim prikladno oblikovanim zubima .....	1
Slika 2: Opis rada zupčanika .....	2
Slika 3: Početni oblici čelnika.....	3
Slika 4: Podijele prema obliku boka .....	4
Slika 5: Podjela prema obliku zupčanika .....	5
Slika 6: Dodirnica kuta i dodirnica evolventnog ozubljenja .....	6
Slika 7: Nastanak profila boka cikloidnog zupca .....	7
Slika 8: Plastični (nemetalni) zupčanici .....	9
Slika 9: Metalni zupčanici .....	9
Slika 10: a) reduktor, b) prenosni omjer 1:1, c) multiplikator .....	10
Slika 11: Kinematske kružnice i njihove obodne brzine .....	11
Slika 12: Odnosi brzina pri dodiru bokova zupčanog para .....	12
Slika 13: Karakteristične veličine čelnika s ravnim zubima .....	13
Slika 14: Granični broj zuba nulti čelnika s ravnim zubima.....	14
Slika 15: Podrežanost zuba zupčanika.....	15
Slika 16: Pomak profila zuba .....	16
Slika 17: Prikaz sučelja programa SOLIDWORKS 2016 .....	23
Slika 18: Prikaz opcija modeliranja programa SOLIDWORKS 2016 .....	24
Slika 19: Opcija Part sa izabranima plane-om u skechu - tlocrt .....	25
Slika 20: Prostorni prikaz modela - početni osnovni model iz kojeg se modelira zupčanik.....	25
Slika 21: Prostorni prikaz modela - zupčanik br.1 sa 22 zuba.....	26
Slika 22: Prostorni prikaz modela - zupčanik br.2 sa 55 zuba.....	26
Slika 23: Prostorni prikaz modela - u opciji Assembly.....	27
Slika 24: Prostorni prikaz modela - reduktor u opciji Assembly.....	27
Slika 25: Prikaz 3D printera Original Prusa Mini+.....	28
Slika 26: Pule materijala filameta u različitim bojama .....	30
Slika 27: Različite vrste mlaznica .....	31
Slika 28: Podjela polimera materijala.....	31
Slika 29: Kategorije materijala.....	32
Slika 30: Sučelje programa Prusa Slicer sa ubačenim modelom zupčanika br.2 .....	33
Slika 31: Sučelje programa Prusa Slicer sa ubačenim modelom zupčanika br.1 .....	33
Slika 32: Proces printanja zupčanika br.1.....	33
Slika 33: Zupčanik br.1.....	33

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	[mm]	Debljina zupčanika
$b_1$	[/]	Faktor veličine strojnog dijela kod savijanja i uvijanja
$b_2$	[/]	Faktor kvalitete površine
$C$	[kp]	Dinamička nosivost ležaja
$C_{potr}$	[kp]	Potrebna dinamička nosivost ležaja
$C_2$	[/]	Pomoćni faktor u utvrđivanju faktora zareznog djelovanja kod uvijanja vratila
$d$	[mm]	Promjer vratila
$d_1$	[mm]	Preliminarni diobeni promjer manjeg zupčanika
$d_{1,2}$	[mm]	Diobeni promjer manjeg, odnosno većeg zupčanika
$d_a$	[mm]	Tjemeni promjer
$d_f$	[mm]	Podnožni promjer
$f_d$	[/]	Pogonski faktor
$f_L$	[/]	Faktor vijeka trajanja
$f_n$	[/]	Faktor broja okretaja
$f_t$	[/]	Temperaturni faktor smanjenja nosivosti
$F_{bn}$	[N]	Normalna zubna sila okomita na dodirnu liniju
$F_t$	[N]	Prosječna vrijednost obodne sile na diobenom promjeru
$i$	[/]	Prijenosni omjer
$L_h$	[h]	Trajnost ležaja u radnim satima
$m$	[mm]	Modul
$n$	[ -1 s ]	brzina
$P_2$	[W]	Predana snaga
$S_{post}$	[/]	Postojeća sigurnost
$S_{potr}$	[/]	Potrebna sigurnost
$T$	[Nm]	Okretni moment koji prenosi zupčanik
$T_{naz}$	[Nm]	Nazivni okretni moment
$x$	[/]	Faktor pomaka profila
$Z_{1,2}$	[/]	Broj zubi manjeg i većeg zupčanika
$\alpha$	[°]	Zahvatni kut (normirani=20°)
$\alpha_w$	[°]	Pogonski zahvatni kut V-parova
$\beta_{kt}$	[/]	Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja vratila za odnose $D/d \neq 1,4$
$\beta_{kt14}$	[/]	Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja vratila za odnose $D/d = 1,4$
$\eta_{uk}$	[/]	Ukupni faktor korisnog učinka
$\varphi$	[/]	Faktor udara $t$
$\tau_t$	[MPa]	Torziono opterećenje
$\tau_{tdop}$	[Mpa]	Dopušteno torziono naprezanje

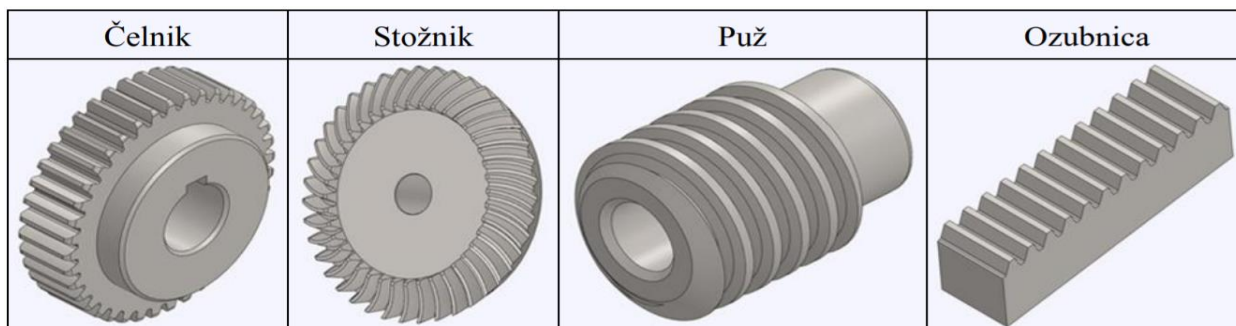
# 1. UVOD

## 1.1 Prijenosnici snage (zupčani prijenosnici)

Jedni od glavnih i najčešće korištenih strojnih elemenata za prijenos snage odnosno gibanja su zupčanici. U praksi razlikujemo razne vrste zupčanika. Također, mogu se podijeliti prema materijalu od kojeg su izrađeni. Zupčani par nastaje od skupine (najmanje 2) u zahvatu zupčanika te se to naziva zupčani prijenosnik. Pomoću zupčanih prijenosnika prenosi se gibanje i okretni moment, te dolazi do naprezanja u korijenu zuba zupčanika uslijed normalne (kontaktne) sile  $Fb$  koja djeluje na bok zuba. Pošto se zupčanici neprekidno rotiraju, mijenja se i sila na stranicu zuba kao i njen krak do korijena zuba, te dolazi do naprezanja u smjeru tangente na prijelaznu krivulju korijena zuba. Zato naprezanje u korijenu zuba nije konstantno, već se mijenja kako zub zupčanika prolazi kroz zahvat sa zubom susjednog zupčanika. Također, da bi prilagodili potrebe snaga pogonskih strojeva za njihovu namjenu i korištenje, moramo imati neku vrstu posrednika između pogonskog i radnog stroja. Tu počinjemo koristiti prijenosnike kao uređaje koji služe za prilagođavanje mehaničke energije stroja. Prijenosnici se dijele na mehaničke, hidrauličke, pneumatske i električne.

Prijenosnici se koriste :

- Kao reduktori kada je za pogon radnog stroja brzina rotacije izlaznog vratila pogonskog stroja prevelika
- Kao multiplikatori kada je za pogon radnog stroja brzina rotacije izlaznog vratila pogonskog stroja premala
- Kada osi rotacije izlaznog vratila pogonskog stroja i ulaznog vratila radnog stroja nisu kolinearne
- Kada je smjer rotacije izlaznog vratila pogonskog stroja suprotan od potrebnoga smjera rotacije ulaznog vratila radnog stroja
- Kada je za jedan radni stroj potrebno koristiti više pogonskih strojeva
- Kada se jedan pogonski stroj koristi kao pogon za više radnih strojeva
- Ako je potrebni izbjeći kritičnu brzinu vrtnje



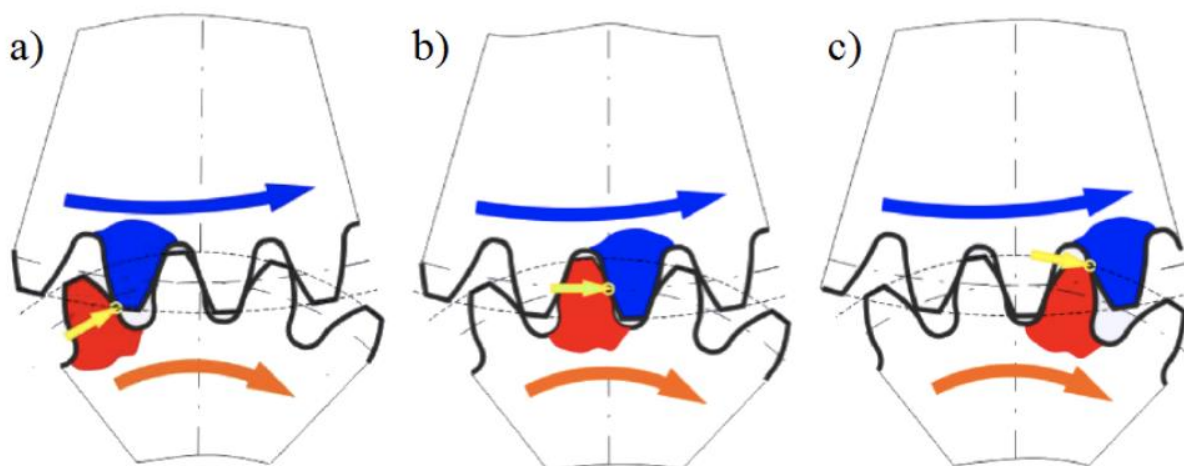
Slika 1. Struktura i nazivlje specifičnih oblika zupčanika s karakterističnim prikladno oblikovanim zubima. Izvor [2].

Jedan od bitnih uvjeta za naglasiti je uvjet prijenosa okretajućeg momenta. Kod prijenosnika sa zupčanicima je bitna tangencijalna nepokretnost konekcije vratilo-zupčanik. Bez toga uvjeta se dešava da se zupčanik vrti u vratilu ili česta pojava da se vratilo okreće u zupčaniku a da ne dobivamo nikakav okretni moment zadanog zupčanika na željeno vratilo. Da bi zupčanici bili u okretnom pokretu moraju biti ispunjena dva uvjeta. Korišteni zupčanici moraju posjedovati isti modul, broj zubaca svih zupčanika mora sadržavati cijeli broj zubaca i mora biti istovjetan broju njegovih koraka.

Zupčasti prijenosnici se dijele na :

- Prijenosnike sa stalnim prijenosnim omjerom
- Prijenosnike sa mogućnošću mjenjanja prijenosnog omjera - mjenjači brzina
- Razdjelne prijenosnike – pogon na više vrtatila istovremeno

Iz slike 2. može se vidjeti prikaz rada prijenosnika sa zupcima u 3. faze. a) uspostavljanje kontakta zuba gornjeg i donjnjeg zupčanika, b) zubi se valjaju jedan po drugom uz zaokretanje zupčanika i c) prekida se kontakt bokova zuba.



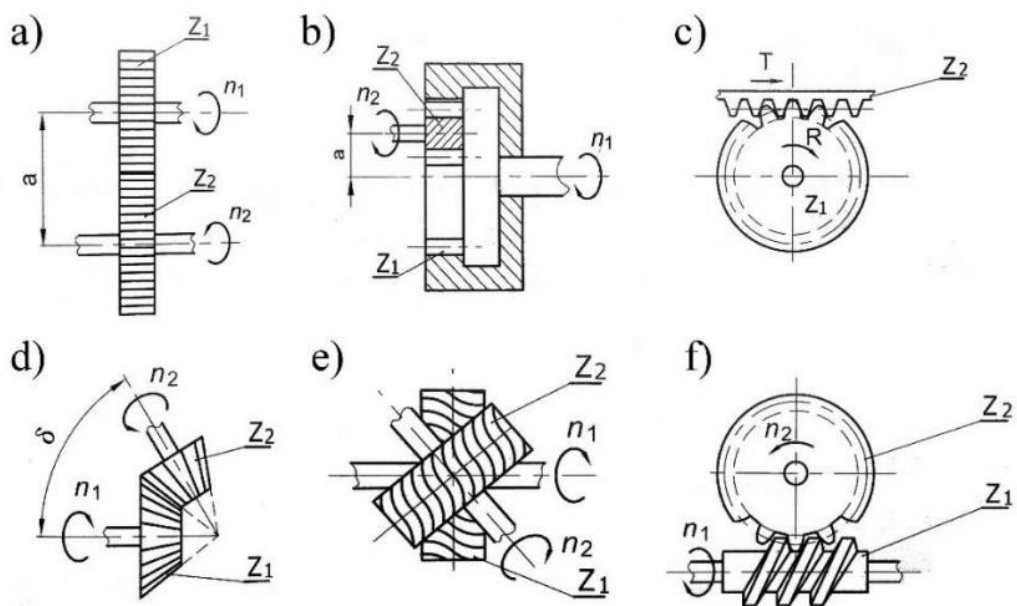
Slika 2. Opis rada zupčanika. Izvor[2].

## 2. OBLICI ZUPČANIKA I NJIHOVA PODJELA

### 2.1 Zupčanici

Najčešća podjela zupčanika je ovisno o njihovom obliku koji je također ovisan o osi. Razlikuju se po obliku uzdužne crte boka zupca i po obliku tijela. Prema obliku tijela i uzdužne crte boka zupca razlikujemo ove zupčanike:

- čelnici s ravnim, kosim, strelastim, pomaknutim i lučnim zupcima
- stožnici s ravnim, kosim, spiralnim, lučnim i evolventnim zupcima
- vijčanici koji imaju zavojne zupce
- puž i pužno kolo koji isto imaju zavojne zupce

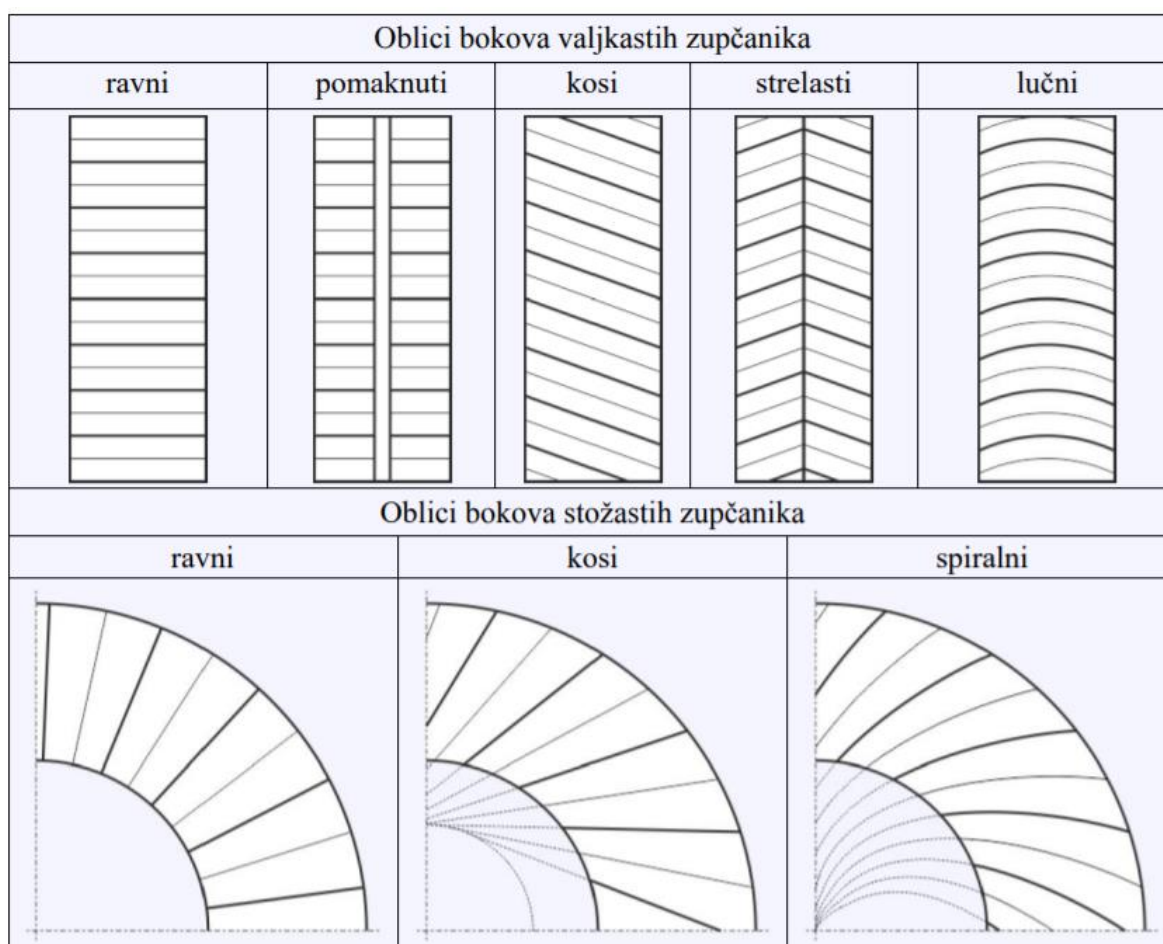


Slika 3. Početni oblici čelnika: Izvor [4].

- a) čelnici vanjskog ozubljenja
- b) čelnici unutarnjeg ozubljenja
- c) zupčana letva
- d) stožnici
- e) vijčanci
- f) puž i pužno kolo

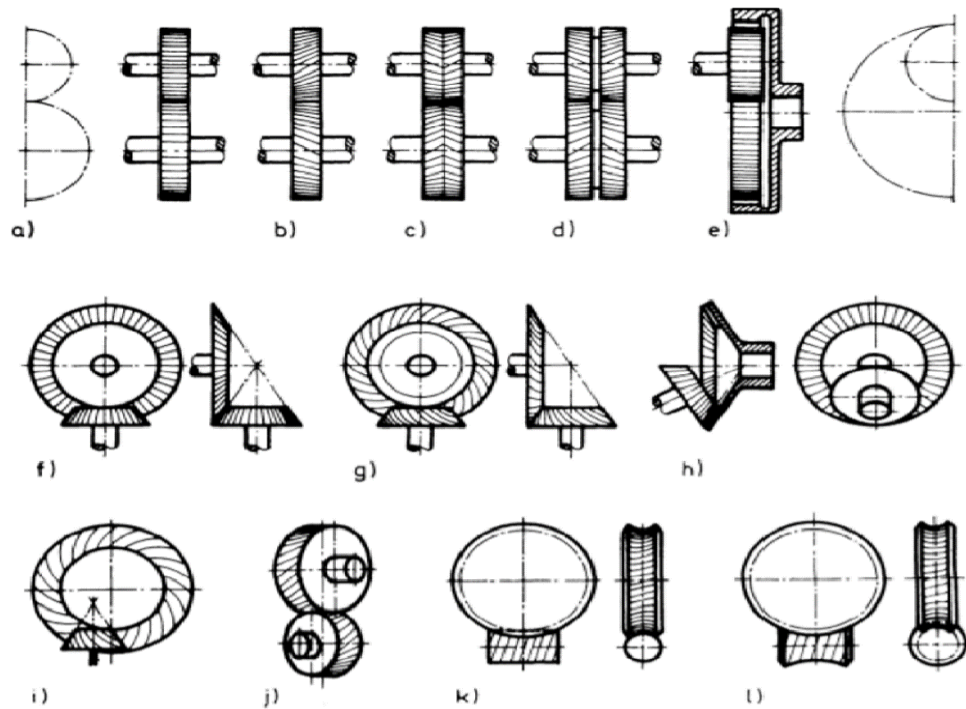
## 2.2 Čelnici

Čelnici su najčešće korišteni tip zupčanika koji se koriste za pokretanje (prijenos) zupčanika sa usporednim osima. Mogu biti napravljeni sa vanjskim i unutarnjim ozubljenjem, a oblici bokova koji se koriste kod zubaca mogu biti: ravan, kosi, strjelasti, lučni i pomaknuti. Korištenjem čelnih zupčanika u jednom stupnju prijenosa zupčanicima sa ravnim zubima može se postići prijenosni omjer oko 8, a korištenjem nekih drugih zupčanika (na primjer sa kosim zubima) može se postići prijenosni omjer i do 20. Na temelju jednostavnosti izrade i cijene izrade u današnjoj proizvodnji najčešće se koriste čelnici sa ravnim zubima. Za razliku od čelnika sa ravnim zubima, čelnici sa kosim zubima uspijevaju omogućiti tiši i mirniji rad zbog većeg stupnja prekrivanja zubaca i postižu veći prijenosni omjer nego čelnici sa ravnim zubima. Ako nam je potreban kontinuirani i ugrađen prijenos koristiti ćemo čelnike sa pomaknutim zubima, jer pomak omogućuje da je prijenos zuba konstantan, isto tako kao i kod čelnika sa kosim zubima. Ako želimo postići velike aksijalne sile ili ako želimo smanjiti bočno pomicanje između dva čelnika, koristit ćemo čelnike sa strjelastim zupcima, ali njihova izrada je jako skupa. Prema međusobnom položaju vratila i prema obliku zupčanika razlikujemo 12 vrsta prijenosnika:



Slika 4. Podijele prema obliku boka. Izvor [2].

- A) Čelnik sa ravnim zubima
- B) Čelnik sa kosim (helikodnim) zubima
- C) Čelnik sa strelastim zubima
- D) Čelnik sa strelastim zubima i istekom za nož (dvostruki čelnici sa kosim zubima)
- E) Zupčane parove sa unutarnjim kosim ili ravnim zubima
- F) Stožnike sa ravnim ili kosim zubima
- G) Stožnike sa zakrivljenim ili strelastim zubima
- H) Stožnike sa unutarnjim zubima
- I) Stožnike sa mimosmjernim osima vratila (hipoidni zupčani parovi)
- J) Vijčanike
- K) Pužne prijenosnike s cilindričnim pužem
- L) Pužne prijenosnike s globoidičnim pužem



Slika 5. Podjela prema obliku zupčanika. Izvor [6].

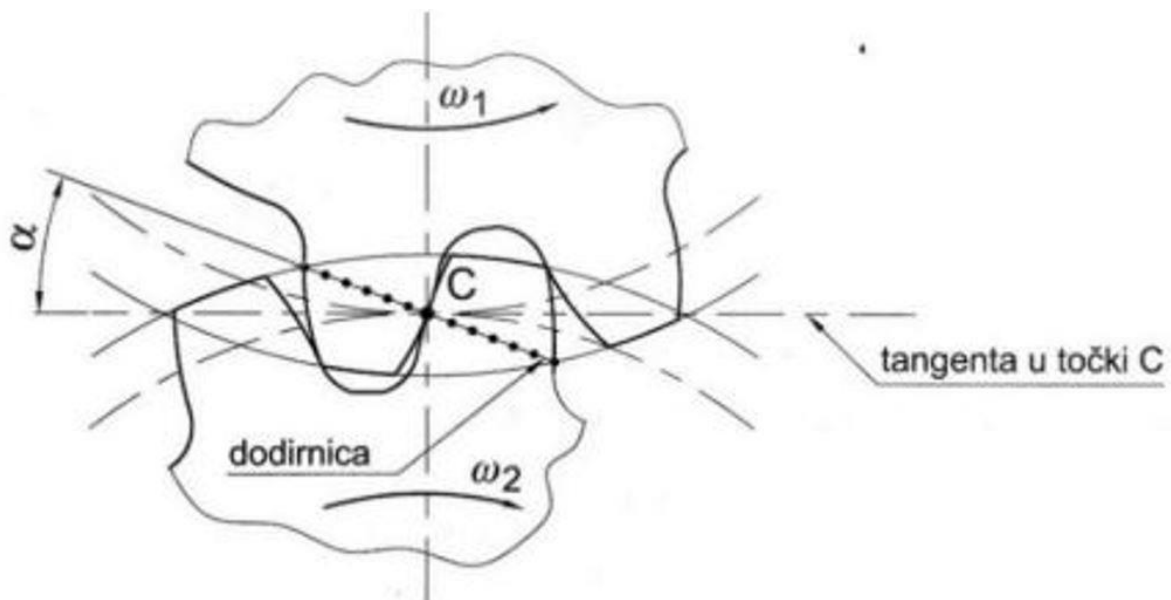
### 2.3 Vrste ozubljenja zupčanika

Zupčanici mogu imati različitu vrstu ozubljenja profila zubi. Sve ima svoja pravila, pa tako i izgled zuba ovisi o zakonu ozubljenja koji zahtjeva da bokovi zuba moraju biti kinematski ispravno oblikovani. Razlikujemo dvije glavne podijele ozubljenja i specijalna ozubljenja:

- Evolventno ozubljenje
- Cikloidno ozubljenje
- Specijalna ozubljenja (satno, čepno, krunsko i cilindrično)

Evolventno ozubljenje je najzastupljenija i najčešća vrsta ozubljenja zupčanika u strojarstvu. Mogu je imati svi oblici zupčanika od čelnika, stožnika, vijčanika, do puža i pužnih kola. Ova vrsta ozubljenja je jednostavna za izradu i zato je najzastupljenija u praksi. Također, pri ugradnji ne zahtijeva veliku preciznost kao npr. cikloidno ozubljenje, pa je i iz tog razloga primjenjivija.

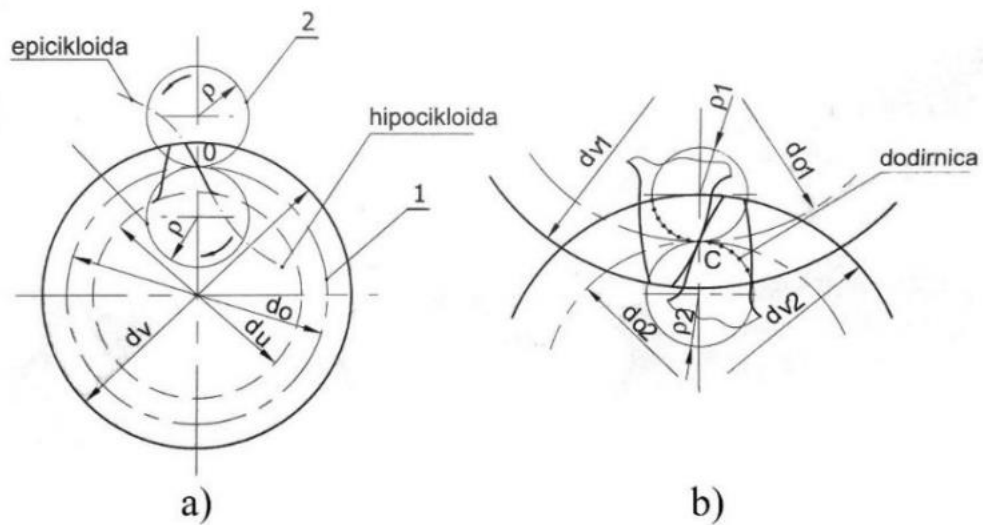
Evolventna krivulja često opisuje jednu točku pravca koja se valja po kružnici. Pravac je zahvatna linija svih bokova zubi i na njoj se nalaze sve točke koje se međusobno dodiruju, a to su bokovi zubaca od ulaska do izlaska zahvatne putanje. Mjesto gdje se dodiruju dodirnica i tangenta kod dodirnih kružnica predstavlja kut u kinematskoj točki koji se također naziva kut dodirnice. Česti iznos kuta koji se pojavljuje je  $\alpha = 20^\circ$



Slika 6. Dodirnica kuta i dodirnica evolventnog ozubljenja. Izvor [6].



Ako bi željeli dobiti puno veći prijenosni omjer, u tom slučaju se koristi ciklodno ozubljenje. Prijenosni omjer kod ciklodnog ozubljenja je veći jer zupčanici imaju mali granični broj zuba. Pri korištenju je primijećeno da su u tom slučaju zupčanici tiši od evolventnog ozubljenja. Također se manje troše i pri zahvatu imaju manje trenje i manje tlakove. Jedan od nedostataka je što im je potrebna jako velika točnost osnog razmaka pri ugradnji i skupi su u procesu izrade. Bok zuba cikloidnog ozubljenja poprima oblik poznate krivulje epicikloide koja opisuje kretanje jedne kružnice oko druge kružnice s centrom u ishodištu. Također ispod nam se nalazi oblik hipocikloide, tj. krivulja kojoj je put označen točkama koje se nalaze na označenoj kružnici koja se kreće bez klizanja unutar druge kružnice.



Slika 7. a) nastanak profila boka cikloidnog zupca. Izvor [13].

- 1 - diobena kružnica,
- 2 - kružnica koja se kotrlja izvana po diobenoj kružnici opisujući cikloidu,
- 3 - kružnica koja se kotrlja po unutarnjoj strani diobene kružnice opisujući hipocikloidu;

b) dodirnica zubaca cikloidnog ozubljenja

## 2.4 Materijali zupčastih prijenosnika

U današnjoj industriji za izradu zupčastih prijenosnika koriste se metali i nemetali te kombinacije metal/nemetal. Da bi odredili materijal za izradu prijenosnika, prvo moramo odrediti gdje se primjenjuje. To nam donosi pitanja o kakvom se opterećenju radi, koja je brzina vrtnje, radna temperatura, otpornost na kemijske i druge radne uvijete...

Sam proces izrade zupčanika od metala najčešće je lijevanje, nakon čega dolazi do dodatne radne obrade ili je prethodno potrebna strojna obrada sirovog materijala.

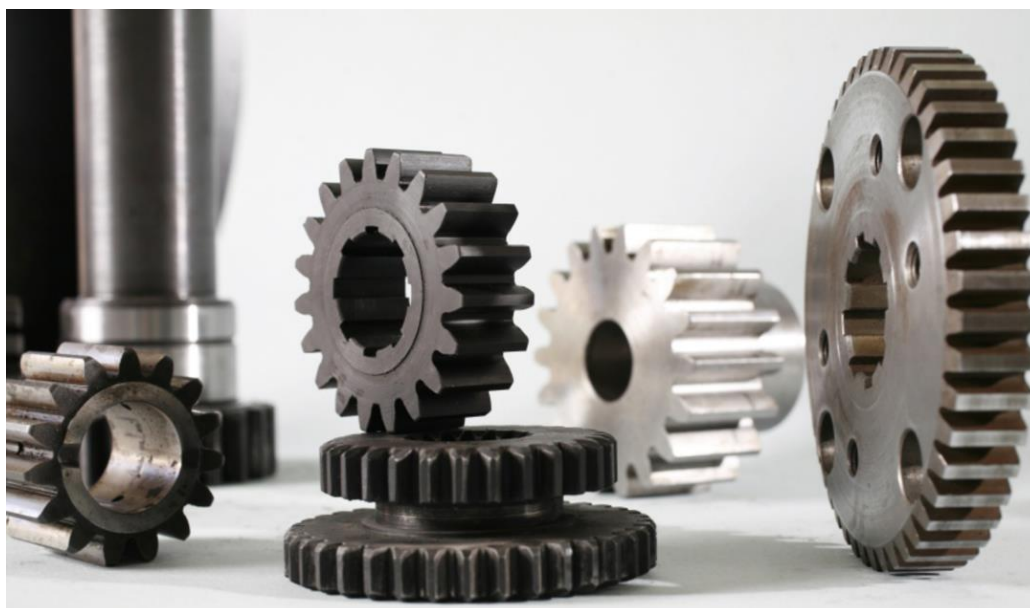
Najčešći metali za izradu zupčanika su:

- ugljični ili legirani čelici – koriste se kod svih vrsta opterećenja, imaju dodatnu obradu nakon izrade toplinskim obrađivanjem.
- aluminijske slitine – koristimo ih kada želimo da zupčanici budu lagani bez velikih opterećenja.
- bronca – ako želimo postići veću brzinu vrtnje s manjim opterećenjem.
- sinterirani materijali za strojne dijelove – Kada želimo proizvesti veliku seriju manjih zupčanika a materijali su najčešće sinterirane bronce i čelici.

Osim metala i nemetala za izradu zupčanika u komercijalne primjene, često se koriste različite vrste polimera kao što su resitex, novotex, vulkan-fiber i razne vrste plastike. Takva vrsta zupčanika ne treba podmazivanje, lagana je i tiha u primjeni. Također se primjenjuju materijali poput kombinacije metalnih i kompozitnih materijala. Stoga polimerni kompoziti imaju polimernu matricu koja može biti ojačana s vlaknima ugljika ili staklenim vlaknima. Zupčanici od kompozita sa metalnom matricom imaju odlična mehanička svojstva.



Slika 8. Plastični (nemetalni) zupčanici. Izvor [13].



Slika 9. Metalni zupčanici Izvor. [15].

## 2.5 Bitna obilježja mehaničkih prijenosnika

Prijenosni omjer i funkcija položaja mehaničkih prijenosnika se smatra jednim od glavnih obilježja u određivanju njihove brzine vrtnje ili brzine prijenosa. Zato smatramo da je omjer brzine rotacije (koji nam govori broj okretaja prijenosa) nekog pogona ili pogonskog člana jedan od glavnih značajki dijela mehaničkog prijenosa kružnog gibanja.

Prijenosni omjer se izračunava izrazom:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

Navedena matematička formula nam govori da prijenosni omjer (  $i$  ) pokazuje u kojem se omjeru mijenja veličina koju mijenjamo u datom trenutku (sila , kutna brzina ili pomak). U izračunavanju prijenosnog omjera dobivamo odnos kutne brzine gibanja pogonskog i izvršenog elementa prijenosa. Također, prijenosni omjer ima važnu ulogu kod remenskih, užnih, lančanih i tarnih prijenosnika.

$\omega_1$  – rad/s kutna brzina

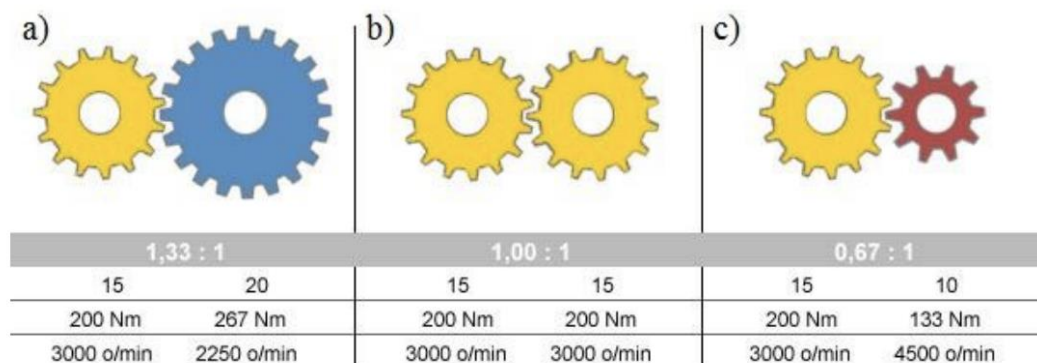
$\omega_2$  – rad/s kutna brzina pokretanja (gonjenja člana)

$n_1$  -  $\text{min}^{-1}$  broj okretaja pogonskog člana

$n_2$  -  $\text{min}^{-1}$  broj okretaja gonjenog člana

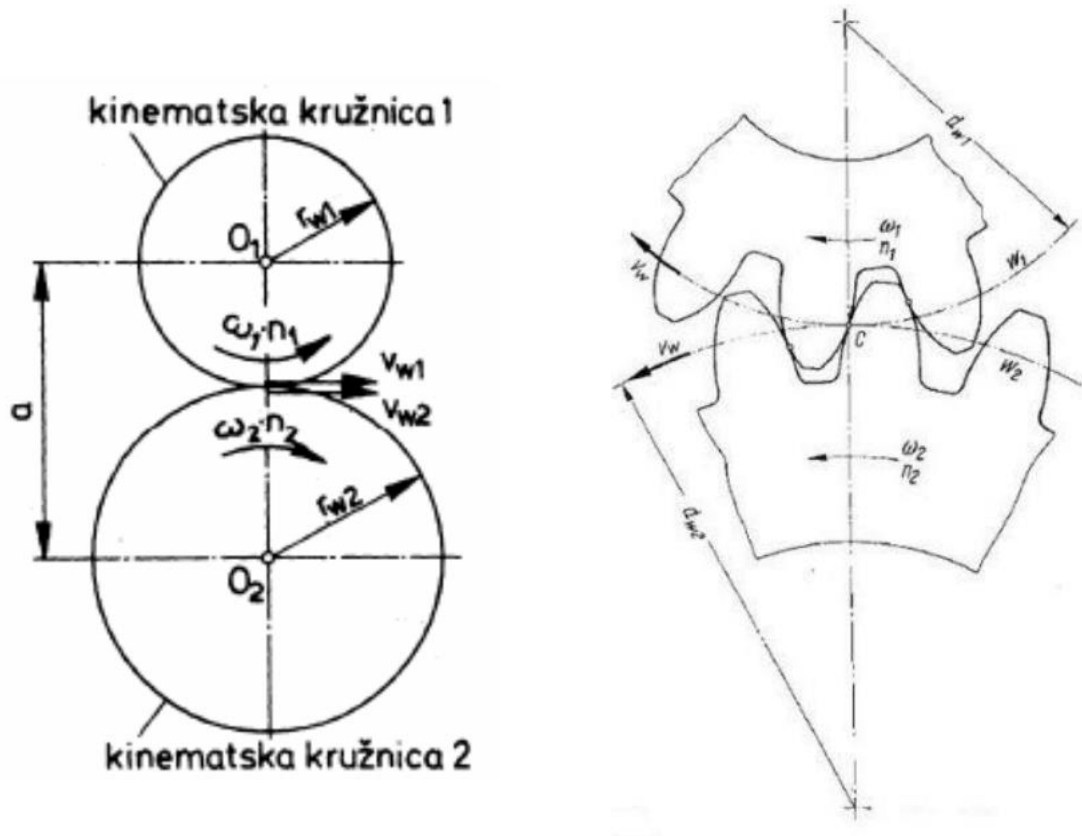
Rezultat dane jednadžbe pokazuje povećanje ulazne kutne brzine (multiplikacije ) ili faktor smanjenja (redukcija). Ako želimo smanjiti brzinu vrtnje radnog stroja, a povećati radni moment, tj. povećati radnu silu stroja, tada nam prijenosni omjer mora biti veći od 1 (  $i > 1$  ) i tada se prijenosnik naziva reduktor. U slučaju da želimo povećati brzinu vrtnje radnog stroja, a smanjiti radni moment, tada nam prijenosni omjer mora biti manji od 1 (  $i < 1$  ) i tada se događa suprotni proces i prijenosnik se naziva multiplikator.

Prijenosni omjer para zupčanika gdje je jedan pogonski, a jedan upogonjeni zupčanik:



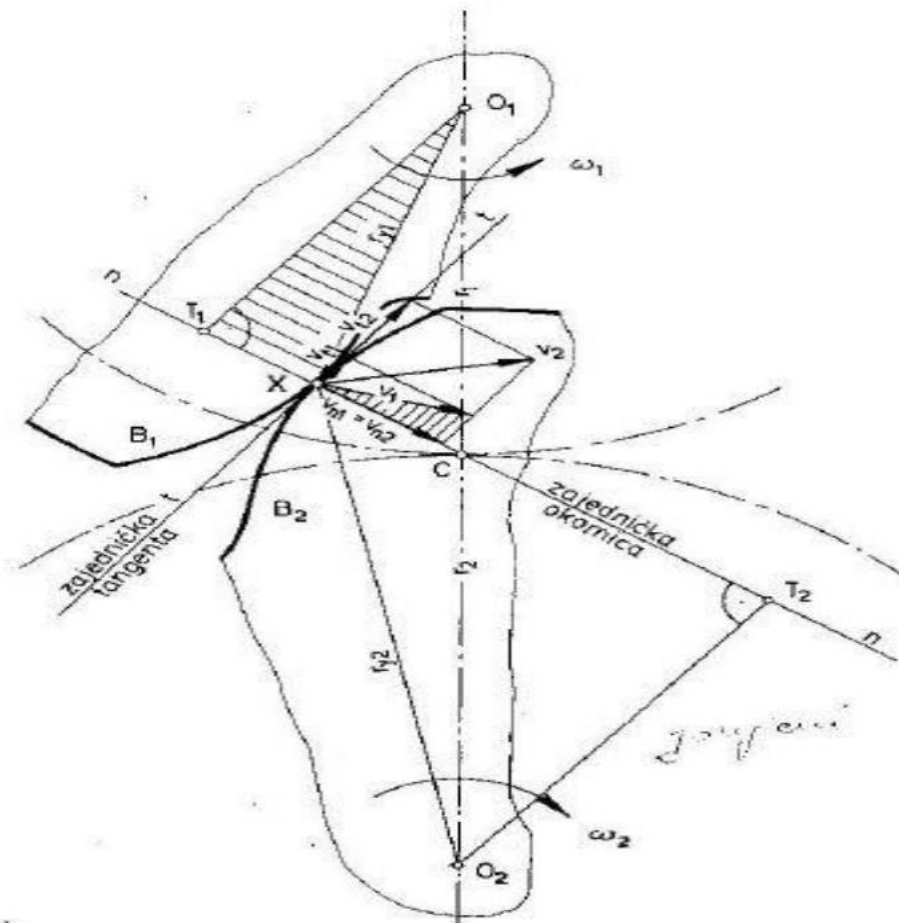
Slika 10. a) reduktor, b) prijenosni omjer 1:1, c) multiplikator Izvor [13].

Kako bi ostvarili konstantan prijenosni omjer zupčanika moramo na vratilo navući dva cilindra koja se stalno dodiruju i uspješno prenose gibanje bez ikakvog klizanja. Da bi postigli uvjete valjanja bez klizanja, možemo to ostvariti samo uz uvjete jednakih obodnih brzina obaju kinematskih kružnica  $v_{w1} = v_{w2}$ . Takav tip cilindra se naziva kinematski cilindar. Ako takvu vrstu cilindra presiječemo na pola okomito na os vrtnje, dobit ćemo kinematske kružnice. Kinematski pol nam je dodirna točka kinematske kružnice. Uvjete jednakih obodnih brzina za obje kinematske kružnice omogućava nam ispunjenje uvjeta valjanja bez klizanja.



11. Kinematske kružnice i njihove obodne brzine. Izvor [1].

Da bi imali konstantan prijenos na zupčanicima i da bi prijenosni omjer u svakom dijelu ostao kontinuiran, smatra se da bokovi zubiju moraju imat određen oblik koji im to omogućava. Tijekom cijelog procesa zahvata zubiju njihove stjenke moraju biti u međusobnom dodiru, dodirivajući jedna drugu i na taj način omogućavati međusobno gibanje. Takvu vrstu kretanja, koja omogućuje da dva zupčanika koji se cijelo vrijeme dodiruju imaju različitu brzinu kretnje, možemo dobiti samo pomoću zakona kinematike. Taj zakon nam govori da je stalan dodir dvaju tijela koja se kreću različitim brzinama moguć samo ako njihove komponente brzina okomite na tangente trenutnih točaka dodira (normalne komponente  $V_{n1}$  i  $V_{n2}$ ) imaju isti smjer i iznos.

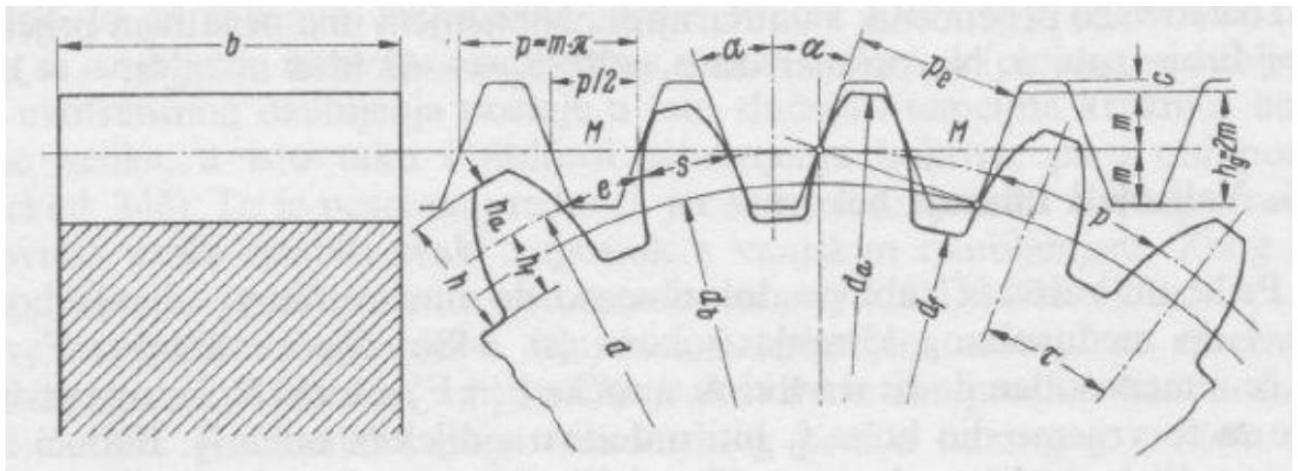


Slika 12. Odnosi brzina pri dodiru bokova zupčanog para. Izvor [4].

### 3. CILINDRIČNI ČELNICI SA RAVNIM ZUBIMA

#### 3.1 Nulti V čelnici

Nulti V čelnici su cilindrični čelnici sa ravnim zubima koji su vezani svojim dimenzijama na način da je diobna kružnica oznake  $d$  na kojoj se mjeri razmak od zuba do zuba jednaka sa kinematskom kružnicom, što je svakodnevni slučaj kod nultog para zupčanika. U poklapanju ovakva dva para zupčanika ne mora nužno doći do poklapanja diobnih kinematskih kružnica.



Slika 13. Karakteristične veličine čelnika s ravnim zubima. Izvor [11].

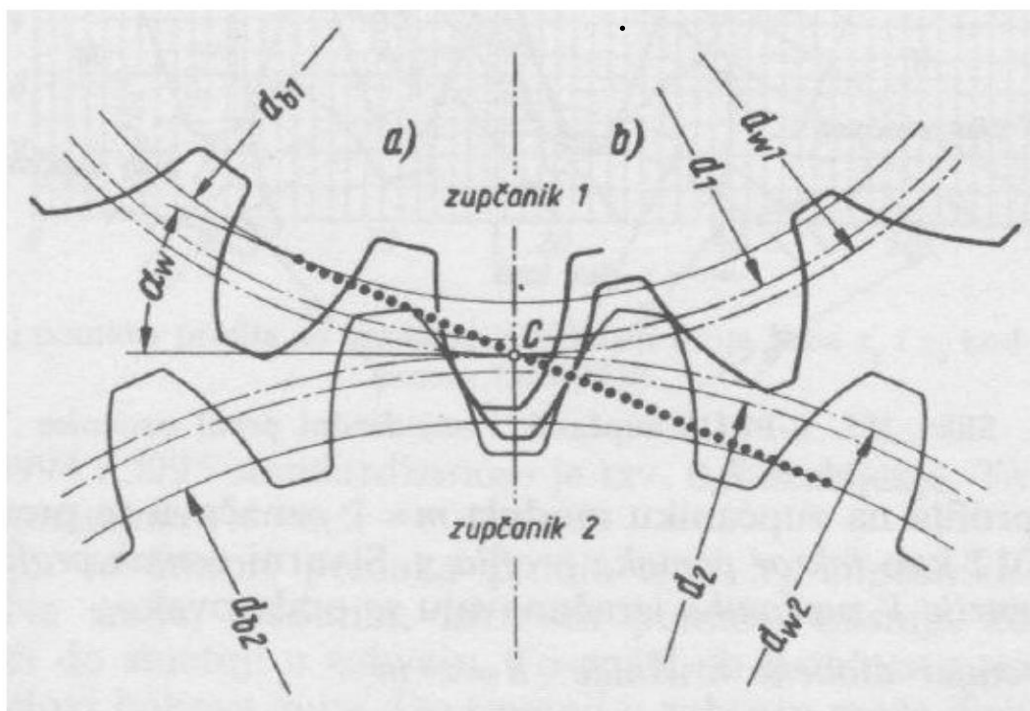
Prikazan je nulti čelnik u zahvatu sa osnovnom ozubnicom. Oznake sa slike predstavljaju:

- $d$  promjer diobene kružnice
- $d_a$  promjer tjemene kružnice,
- $d_f$  promjer podnožne kružnice,
- $d_b$  promjer temeljne kružnice,
- $h$  ukupna visina zuba,
- $h_a$  tjemena visina zuba,
- $h_f$  podnožja visina zuba,
- $h_g$  zajednička visina zuba zupčanog para,
- $p$  korak
- $p_e$  korak zahvata,
- $s$  debljina zuba,
- $e$  širina udubine,
- $\alpha$  standardni kut zahvatne linije  $=20^\circ$  (kut nagiba profila osnovne ozubnice),
- $\tau$  je diobeni korak,
- $b$  širina zuba

### 3.2 Podrezivanje

Materijal na zubu nije potrebno skidati u korijenu zuba kod dodirivanja većeg zuba i manjeg. Iz tog razloga se određuje granični broj zuba. Ta se pojava naziva podrezivanje, a nju možemo smanjiti određivanjem graničnog broja zubi ili pomaka profila. Kod ravnog ozubljenja često se uzima kao minimalni broj zuba 14 ili (granični) 17 jer mala podrezanost pri izradi koju čini alat ne šteti. Kod V-Plus zupčanika se radi pomak profila ili promjena osnovog razmaka. Pozitivan pomak se postiže razmicanjem jednog zupčanika od drugog. Bitno je naglasiti da se povećanjem pomaka profila povećava kut, pa se nakon toga naziva pogonski kut zahvatne linije  $\alpha_w > \alpha$ . Na taj način se povećavaju i kinematske kružnice na promjeru  $d_{w1}$  i  $d_{w2}$ . Da bi i dalje imali isti zahvatni zub, (pravilan kontinuiran) potrebno je povećanu tjemenu i bočnu zračnost do koje je došlo uslijed povećanja osnovog razmaka svesti na prvotnu mjeru.

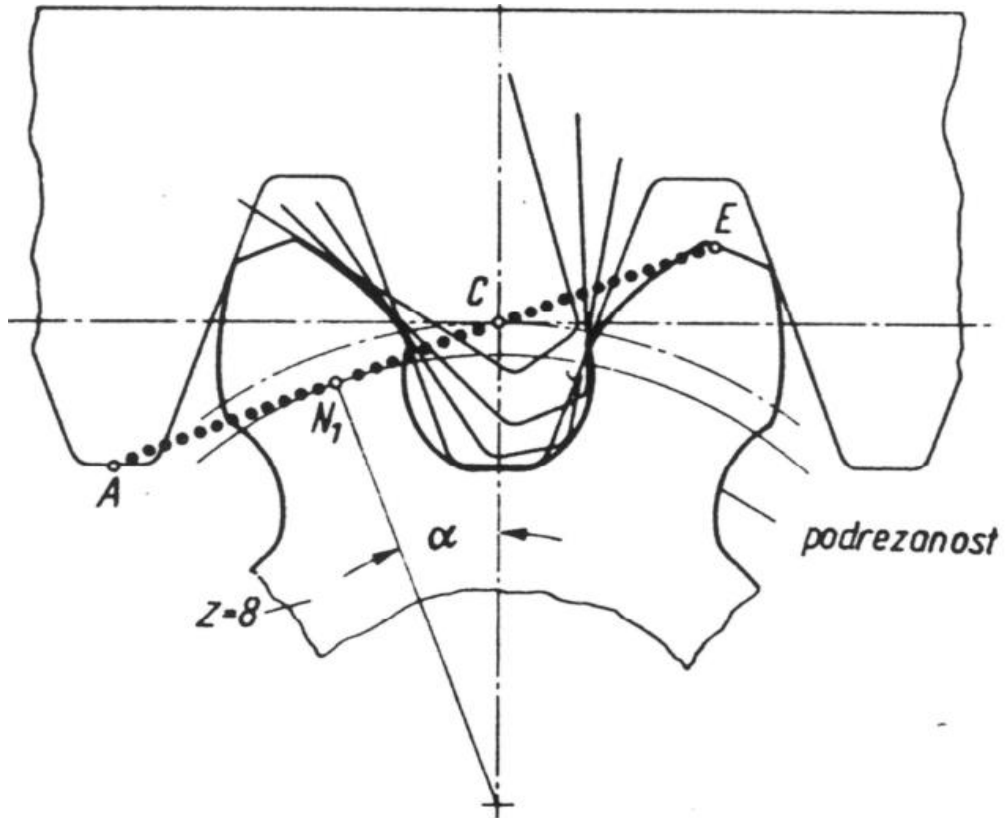
Takav pomak na pravu mjeru možemo postići tako da se poveća kružnica tjemena i produže bokovi do nove kružnice. Isto tako da se povećaju podnožja kružnica i da se pomaknu svi lijevi bokovi zupčanika 1. na lijevu stranu.



Slika 14. Granični broj zuba nulti čelnika s ravnim zubim. Izvor [11].

Česti slučaj podrezanosti možemo smanjiti tako da povećamo broj zuba malog zupčanika.





Slika 15. Podrezanost zuba zupčanika. Izvor [16].

Minimalni broj zuba nultog vanjskog ozubljenja iznosi

$$z_g = 2/\sin^2\alpha \quad \text{kod } \alpha = 20^\circ \quad z_g = 17$$

Pošto je mala podrezanost dopuštena kod  $\alpha = 20^\circ$  računa se  $z_g = 14$ .

### 3.3 Pomak profila

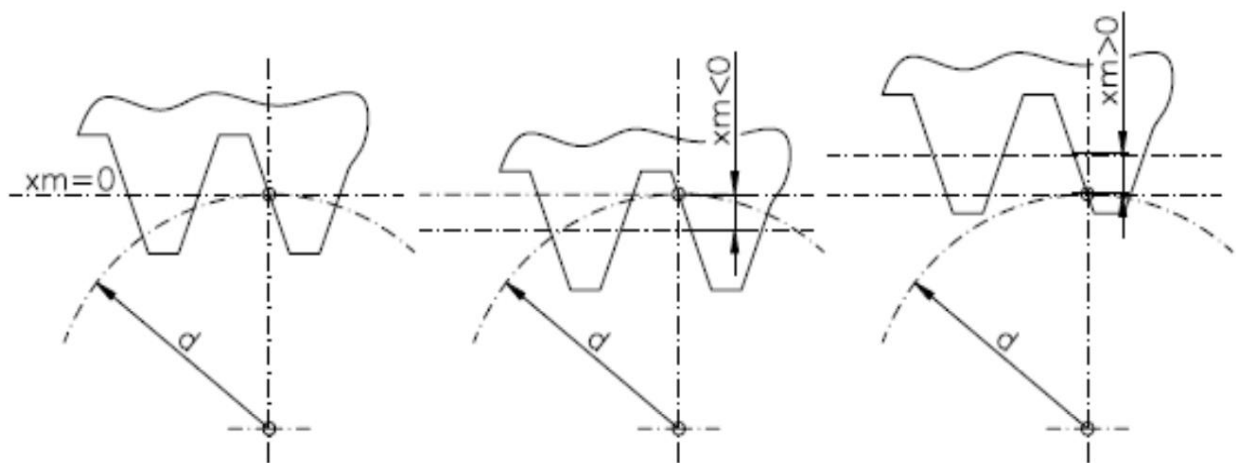
Jako bitna stvar koja utječe na podrezivanje korijena zuba je pomak profila. Kada udaljavamo alat od zupčanika i povećavamo pomak profila smanjujemo opasnost od podrezivanja i na taj način možemo izraditi zupčanike sa brojem zubiju manjim od 14 i da kod njih ne dolazi do podrezivanja tj. slabljenja zubiju u korijenu.

Zupčanici sa pomakom profila se izvode radi:

- Mogućnost postizavanja standardnog osnog razmaka
- Mogućnost izrade zupčanika s manjim brojem zubi bez pojave podrezivanja
- Postizavanja boljih svojstava ozubljenja: npr. povećanje opteretivosti korijena i bokova zubi, povećanje stupnja prekrivanja, poboljšavanje uvjeta klizanja, izbjegavanje zašiljenosti zuba

Pomak profila ne utječe na promjenu promjera profila diobnog ili temeljnog kruga jer je promjer diobnog kruga  $d = mz$ , a promjer temeljnog kruga  $db = d \cos \alpha$ .

Pomak profila, koji se definira kao umnožak faktora pomaka profila ( $x$ ) i modula ( $m$ ), može biti pozitivan ili negativan.



Slika 16. Pomak profila zuba. Izvor [1].

#### 4. PRORAČUN ČELNIKA SA RAVNIM ZUBIMA

Na trostepenom prijenosniku prema skici, predviđeno je da je pogonska snaga 2. stupnja prijenosnika  $p=20.4\text{kW}$ ,  $n=23,6\text{ s}^{-1}$ , faktor  $K_1=1.2$ . Prijenosni omjer 2. stupnja prijenosnika usvojen je  $i=2.5 \pm 1\%$ . Usvojeno je da broj zubi bude  $z_3=22$ ,  $m=2.5\text{mm}$ , da zubi budu cementirani i kaljeni, kvalitete 7. Osni razmak  $a=100\text{mm}$ . Potrebno je dimenzionirati zupčanike, kontrolirati stupanj prekrivanja i kontrolirati da li se naprezanje korijena i bokova zubi kreće u dopuštenim granicama.

Oznake i primjedbe proračun dimenzija zupčanika 2. stupnja

Zupčanik  $z_3$  : broj zubi :  $z_3=22$  (Zadano iz zadatka)

Zupčanik  $z_4$  : broj zubi :

$$z_4=i z_3=2.5*22=55 \quad (2)$$

Osni razmak (računska veličina  $a_r$ ) :

$$a_r = \frac{z_3+z_4}{2} m = \frac{22+55}{2} * 2.5 = 96.25 \quad (3)$$

Diobni promjer :

$$d_3 = z_3 m = 22*2.5=55 \text{ m} \quad (4)$$

$$d_4 = z_4 m = 55 * 2.5 = 137.5 \quad (5)$$

Pogonski kut zahvate crte ako je osni razmak zadan :

$$\cos \alpha_w = \frac{z_3+z_4}{2 a} m \cos \alpha = \frac{22+55}{2*100} * 2.5 \cos 20 = 0.904 = 25,25 \quad (6)$$

Broj faktora pomaka profila :

$$x_3+x_4 = \frac{(z_3+z_4)(\text{ev } \alpha_w - \text{ev } \alpha)}{2 \tan \alpha} = \frac{(22+55)(\text{ev } 22,25 - \text{ev } 20^\circ)}{2 \tan 20} = 1.695 \quad (7)$$

Ovisnosti od broja zubi :

$$x^3 \text{ max} = 0,71 \text{ za kaljene zube sa } S_a = 0,4 \text{ m i može pri } z_3 = 22 \text{ znositi } x^3 \text{ max} = 0,71 \quad (8)$$

$$x^4 = 0,9857 \text{ za } z_4 = 55 \text{ može biti } x^4 \text{ u odnosu na zašiljenost } x^4 > 1 \quad (9)$$

Pomak profila : iz dobivenih vrijednosti (8),(9)

$$x^3 m = 0,71 * 2,25 = 1,775 \text{ mm} \quad (10)$$

$$x^4 m = 0,9857 * 2,5 = 2,4643 \text{ mm} \quad (11)$$

Promjeri kinematskih kružnica :

$$d_{w3} = d_3 \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 55 \frac{\cos 20^\circ}{\cos 25,25^\circ}, d_{w3} = 57,7 \text{ mm} \quad (12)$$

$$d_{w4} = d_4 \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 137,5 \frac{\cos 20^\circ}{\cos 25,25^\circ}, d_{w4} = 142,93 \text{ mm} \quad (13)$$

Promjeri tjemnih kružnica, polumjeri tjemnih kružnica : sa izračunatim vrijednostim (4) i (5) dobivamo :

$$d_{a3} = d_3 + 2 m + 2 x_3 m = 55 + 2 * 2,5 + 2 * 1,775 \quad (14)$$

$$d_{a3} = 63,55 \text{ mm}$$

$$r_{a3} = 31,775 \text{ mm}$$

$$d_{a4} = d_4 + 2 m + 2 x_4 m = 137,5 + 2 * 2,5 + 2 * 2,4643 \quad (15)$$

$$d_{a4} = 147,42 \text{ mm}$$

$$r_{a4} = 73,71 \text{ mm}$$

Polumjeri podnožnih kružnica pri tjemenoj zračnosti  $c = 0,25 \text{ m}$  , Zupčanik  $z_3$  :

$$d_{f3} = d_3 - 2 m - 2 c + 2 x_3 m = 55 - 2 * 2,5 - 2 * 0,25 * 2,5 + 2 * 1,77 \quad (16)$$

$$d_{f3} = 52,3 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_4$  :

$$d_{f4} = d_4 - 2 m - 2 c + 2 x_4 m = 137,5 - 2 * 2,5 - 2 * 0,25 * 2,5 + 2 * 2,4643 \quad (17)$$

$$d_{f4} = 136,18 \text{ mm}$$

Postojeća tjemena zračnost :

$$c = a - \frac{d_{a3} + d_{f4}}{2} = 100 - \frac{63,55 + 36,18}{2} \quad (18)$$

$$c = 0,135 < C_{min} = 0,12 * m = 0,12 * 2,5 = 0,3 \text{ mm}$$

Skraćenje jemene visine zuba :

$$k m = \alpha_r + (x_3 + x_4) m - a = 96,5 + (0,71 + 0,9857) * 2,5 - 100 \quad (19)$$

$$k m = 0,4893 \text{ mm}$$

Skraćeni tjemeni promjeri :

$$\text{Zupčanik } z_3 : d_{ak3} = d_{a3} - 2 k m = 63,55 - 2 * 0,4893 \quad (20)$$

$$d_{ak3} = 62,57 \text{ mm}$$

Zupčanik  $z_4$  :

$$d_{ak4} = d_{a4} - 2 k m = 147,42 - 2 * 0,4893 \quad (21)$$

$$d_{ak4} = 146,44 \text{ mm}$$

Promjeri temeljnih kružnica i polumjera temeljnih kružnica :

$$\text{Zupčanik } z_3 : d_{b3} = d_3 \cos \alpha = 55 * \cos 20^\circ \quad (22)$$

$$d_{b3} = 51,68 \text{ mm}$$

$$r_{b3} = 25,84 \text{ mm}$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : d_{b4} = d_4 \cos \alpha = 137,5 * \cos 20^\circ \quad (23)$$

$$d_{b4} = 129,2 \text{ mm}$$

$$r_{b4} = 64,6 \text{ mm}$$

Stupanj prekrivanja :

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{g_{\alpha}}{p_c} = \frac{g_{\alpha}}{p \cos \alpha} = \varepsilon_3 + \varepsilon_4 - \varepsilon_{\alpha} \quad (24)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sqrt{r_{ak3}^2 - r_{b3}^2}}{\pi m \cos \alpha} = \frac{\sqrt{31,285^2 - 25,84^2}}{\pi 2,5 \cos 20^{\circ}} = 2,39$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\sqrt{r_{ak4}^2 - r_{b4}^2}}{\pi m \cos \alpha} = \frac{\sqrt{73,22^2 - 63,6^2}}{\pi 2,5 \cos 20^{\circ}} = 4,67$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\alpha \sin \alpha_w}{\pi m \cos \alpha} = \frac{100 * \sin 25,25^{\circ}}{\pi 2,5 \cos 20^{\circ}} = 5,78$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 2,39 + 4,67 - 5,78 = 1,28$$

Proračun opteretivosti naprezanja u korijenu zuba zupčanika :

$$\sigma_{F3} = \frac{F_{t3}}{b_{3m}} Y_{F3} Y_{\varepsilon} K_{Fa} \sigma_{FP3} \quad (25)$$

$$\sigma_{F4} = \frac{F_{t4}}{b_4 m} Y_{F4} Y_{\varepsilon} K_{Fa} \sigma_{FP4}$$

$$T_3 = \frac{P}{\omega} = \frac{10^3 20,4}{2 \pi 2} = \frac{10^3 * 20,4}{2 \pi 23,6} = 137,1 \text{ Nm} = 137 100 \text{ Nmm}$$

$$F_{t3} = F_{t4} = K_1 \frac{2T_3}{d_3} = 1,2 \frac{2 * 137 100}{55} = 5980 \text{ N}$$

Širina zuba : Odabrano  $\lambda = 20$  ,  $b = \lambda m = 20 * 2,5 = 50 \text{ mm}$ , što je niže nego što predviđa tablica.

To je učinjeno radi dvaju zupčanika koji se nalaze na vratilu, male dimenzije zupčanika a time i male dimenzije vratila, što opet izaziva veći progib.

Faktor oblika zuba :

$$Y_F = f(z, x), \beta = 0 \quad (26)$$

$$\text{Zupčanik } z_3 : Y_{F3} = f(z_3, X_3) = 2.05 \quad (27)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : Y_{F4} = f(z_4, X_4) = 1.97 \quad (28)$$

Faktor učešća opterećenja :

$$Y_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_{\alpha}} = \frac{1}{1.28} = 0,78 \quad (29)$$

Pomoćni faktor raspodjele  $q_L$  :  $q_L = f(d_4, m, \text{kvalitete}, \frac{F_{t3}}{b})$ ;

$$\frac{F_{t3}}{b} = \frac{5980}{50} = 119,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (30)$$

$$q_L = f(137,5 \text{ mm}; 2,5 \text{ mm}; \text{kval. } 7; \frac{5980}{50} = 119,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}) q_L = 0,77$$

Faktor raspodjele opterećenja na pojedine zube  $K_{Fa}$  :

$$q_L = 0,77 < \frac{1}{\varepsilon_\alpha} = 0,78 \text{ bit } \text{će } K_{Fa} = 1 \quad (31)$$

Naprezanja korijena zuba :

$$\text{Zupčanik } z_3 : \sigma_{F3} = \frac{F_{t3}}{b \cdot m} Y_{F3} Y_\varepsilon K_{Fa} = \frac{5980}{50 \cdot 2,25} 2,05 \cdot 0,78 \cdot 1 \quad \sigma_{F3} = 76,5 \text{ N/mm}^2 = 76,5 \text{ Mpa} \quad (32)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : \sigma_{F4} = \frac{F_{t4}}{b \cdot m} Y_{F4} Y_\varepsilon K_{Fa} = \frac{5980}{50 \cdot 2,25} 1,97 \cdot 0,78 \cdot 1 \quad \sigma_{F4} = 73,5 \text{ N/mm}^2 = 73,5 \text{ Mpa} \quad (33)$$

Dopušteno naprezanje zuba :

$$\text{Zupčanik } z_3 : \sigma_{FP3} = \frac{\sigma_F \lim_3}{S_{F3}} \quad (34)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : \sigma_{FP4} = \frac{\sigma_F \lim_4}{S_{F4}} \quad (35)$$

Materijal :

Zupčanik  $z_3$  : Odabran čelik 1220  $\sigma_F \lim_3 = 230 \text{ N/mm}^2 = 230 \text{ Mpa}$

$$\sigma_H \lim_3 = 1600 \text{ N/mm}^2 = 1600 \text{ Mpa} \quad (36)$$

Zupčanik  $z_4$  : : Odabran čelik 1220  $\sigma_F \lim_4 = 230 \text{ N/mm}^2 = 230 \text{ Mpa}$

$$\sigma_H \lim_4 = 1600 \text{ N/mm}^2 = 1600 \text{ Mpa} \quad (37)$$

Faktor sigurnosti :

$$\text{Zupčanik } z_3 : S_{F3} = 1.5 \quad (38)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : S_{F3} = 1.5 \quad (39)$$

Ovisno o postojećm uvjetima pogona

Dopušteno naprezanje u korijenu zuba:

$$\text{Zupčanik } z_3 : \sigma_{FP3} = \frac{\sigma_F \lim_3}{S_{F3}} = \frac{230}{1.5} = 153 \text{ N/mm}^2 = 153 \text{ Mpa} \quad (40)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : \sigma_{FP4} = \frac{\sigma_F \lim_4}{S_{F4}} = \frac{230}{1.5} = 153 \text{ N/mm}^2 = 153 \text{ Mpa} \quad (41)$$

Kontrola da li su naprezanja u korijenu manja od dopuštenih :

$$\text{Zupčanik } z_3 : \sigma_{F3} = 76,5 \text{ N/mm}^2 < : \sigma_{FP3} 153 \text{ N/mm}^2 = 153 \text{ Mpa} \quad (42)$$

$$\text{Zupčanik } z_4 : \sigma_{F4} = 73,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{FP4} 153 \text{ N/mm}^2 = 153 \text{ Mpa} \quad (43)$$

Kontrolni pritisak u kinematskom polu C :

$$\sigma_H = Z_M Z_H Z_\varepsilon \sqrt{\frac{U+1}{u} \frac{F_{t2}}{b d_3} K_{Ha}} \leq \sigma_{HP} \quad (44)$$

Faktor materijala  $Z_M$  Za čelik na čelik :

$$Z_M = 190 \sqrt{\text{N/mm}^2} = 190 \sqrt{\text{MPa}} \quad (43) \quad (45)$$

Faktor oblika zuba :

$$Z_H, Z_H = f\left(\frac{X_3 + X_4}{Z_3 + Z_4}\right) : \quad (45)$$

$$\text{Za } f = \left(\frac{0,71 + 0,9857}{22 + 55}\right) = 2,2$$

Faktor prekrivanja za opterećenje bokova Z :

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1,28}{3}} = 0,95 : \quad (46)$$

Prijenosni omjeri broja zubi u :

$$u = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{55}{22} = 2,5 \quad (47)$$

Faktor raspodjele sile u odnosu na opterećenju blokova :

$$K_{H\alpha} = 1 + 2 \left(\frac{1}{Z^2} - 1\right) * (q_L - 0,5) = 1 + 2 \left(\frac{1}{0,95^2} - 1\right) * (0,78 - 0,5), K_{H\alpha} = 1 \quad (48)$$

Kontakno naprezanje u kinematskom polu C :

$$\sigma_H = Z_M Z_H Z_\varepsilon \sqrt{\frac{U+1}{u} \frac{F_{t2}}{b d_3} K_{Ha}} \leq \sigma_{HP} = 190 * 2,2 * 0,95 \sqrt{\frac{2,5+1}{2,5} \frac{5980}{50*50} * 1}, \sigma_H = 965 \text{ N/mm}^2 = 965 \text{ Mpa} \quad (49)$$

Koeficijent sigurnosti bokova  $S_H$  :

$$S_H = 1,3 \text{ Ovisi o postojećim uvjetima pogona}$$

Dopušteno kontaktno naprezanje  $\sigma_{HP}$  :

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = \frac{1600}{1,3} = 1231 \text{ N/mm}^2 = 1231 \text{ Mpa} \quad (50)$$

Kontrola da li je kontaktno naprezanje bokova niže od dopuštenog kontaktnog naprezanja :

$$\sigma_H = 965 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{HP} 1231 \text{ N/mm}^2 - \text{ za bok 1} \quad (51)$$

$$\sigma_H = 965 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{HP} 1231 \text{ N/mm}^2 - \text{ za bok 2} \quad (52)$$



## 5. OBLIKOVANJE I NACRT

### 5.1 *Općenito o programu Solidworks*

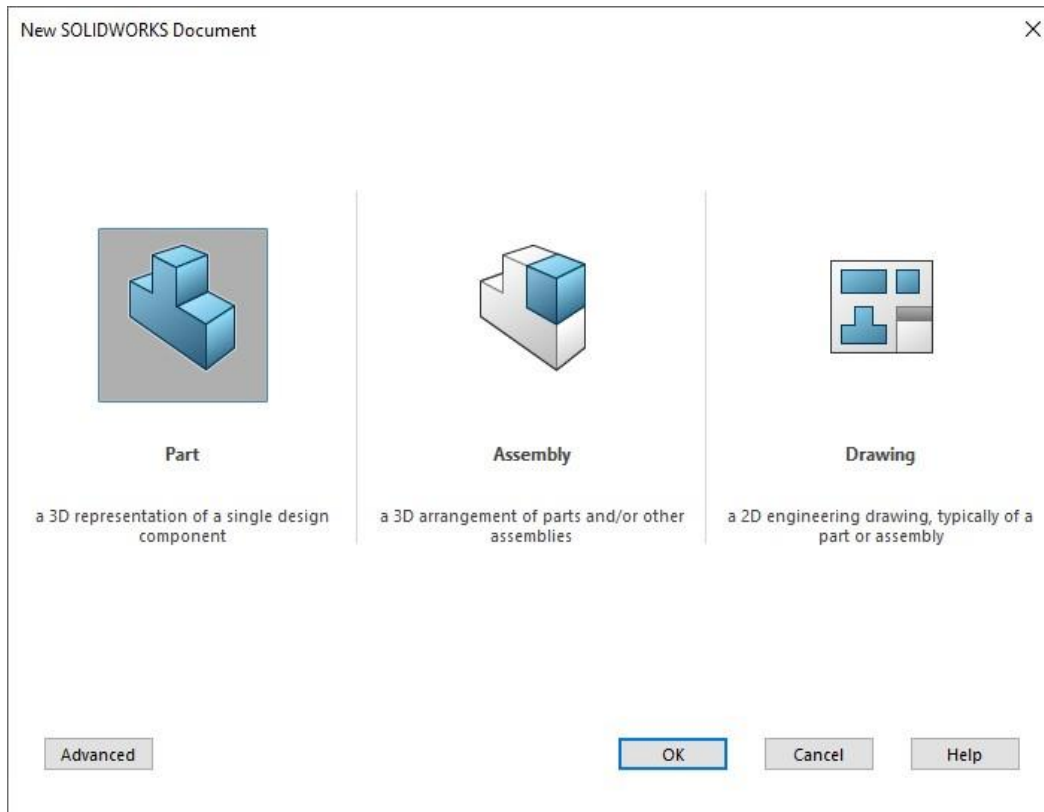
SolidWorks je softver za računalno pomaganje pri projektiranju 2D ili 3D modela. Koristi princip parametarskog oblikovanja i generira tri vrste međusobno povezanih datoteka. Ovaj CAD softer je poznat po svojoj jednostavnosti korištenja i intuitivnosti. Osnivač Jon Hirschtick počeo je raditi na SolidWorksu 1993. godine s timom programera kako bi CAD (computer aided design) učinio dostupnijim, a godine 1995. objavljena je prva verzija softvera. Izdaje ga Dassault Systèmes, francuska multinacionalna kompanija koja razvija CAD programe. Prema njihovim izvorima više od dva milijuna inženjera i dizajnera u više od 165 000 tvrtki koristi SolidWorks. Primjena je vrlo široka, od automobilske broderske i zrakoplovne industrije, za električne i elektroničke komponente i instalacije, znanstvene potrebe, u razvoju medicinskih uređaja, medicinskih implantata, potrošačke tehnologije i sl. Izrada modela u SolidWorksu obično počinje s 2D skicom (iako su dostupne i 3D skice). Skica se sastoji od geometrije, kao što su točke, linije, lukovi, elipse (osim hiperbole). Mjere i kote se dodaju crtežu, kako bi definirali veličinu i lokaciju geometrije.



Slika 17. Prikaz sučelja programa SOLIDWORKS 2016

SolidWorks sadrži 3 načina rada:

- Part (za izradu pojedinačnih modela)
- Assembly (za izradu sklopova)
- Drawing (za izradu tehničke dokumentacije)

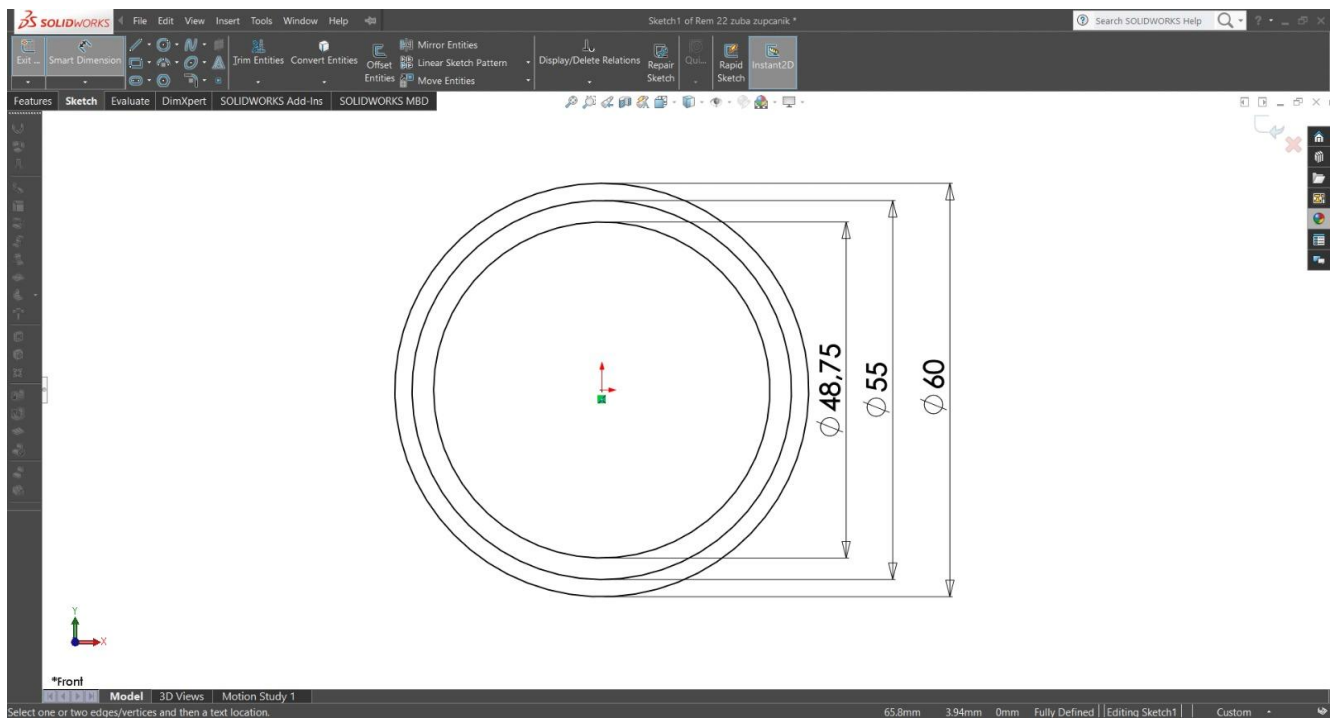


Slika 18. Prikaz opcija modeliranja programa SOLIDWORKS 2016

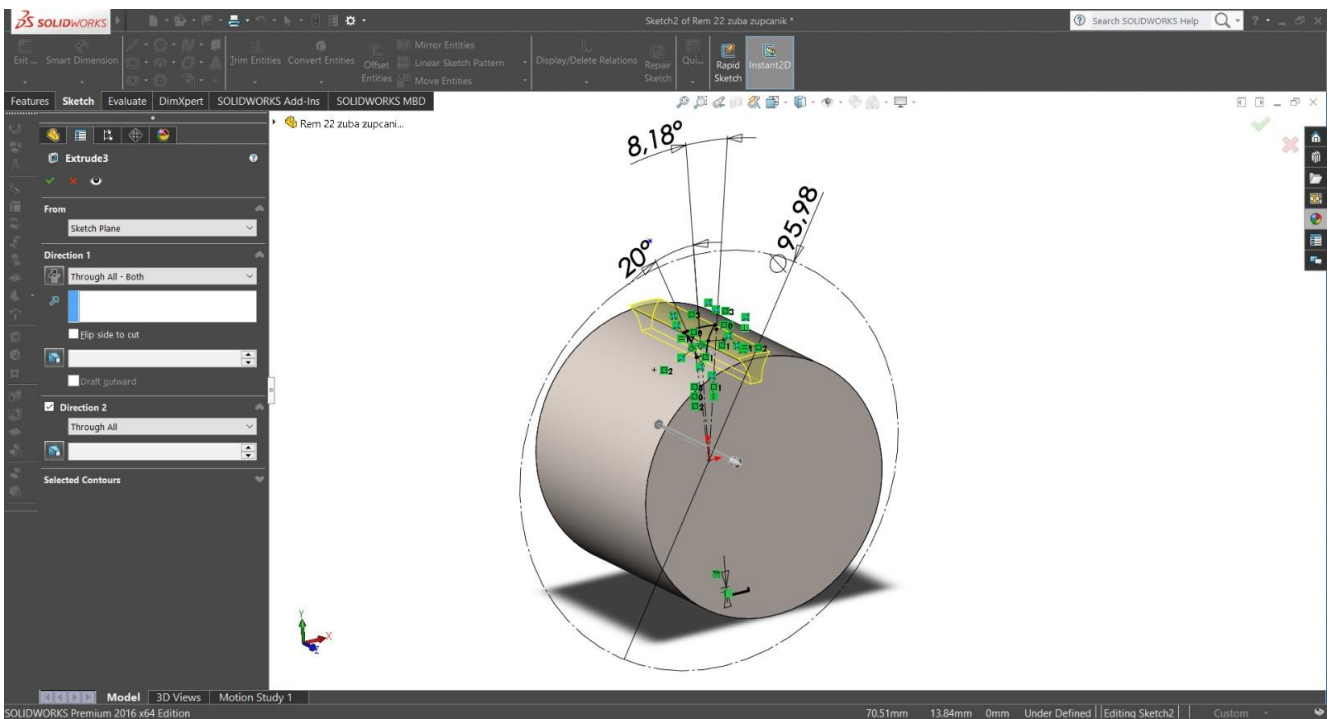
Nakon proračuna zupčanika izrađujemo nacrt u programu SolidWorks koji će nam služiti u izradi 3d modela.

Opcija Part koja se nalazi u paketu SolidWorksa nam omogućuje izradu jednog dijela modela - u našem slučaju jednog zupčanika, kojeg kasnije možemo sa opcijom Assembly spajati u više modeliranih dijelova.

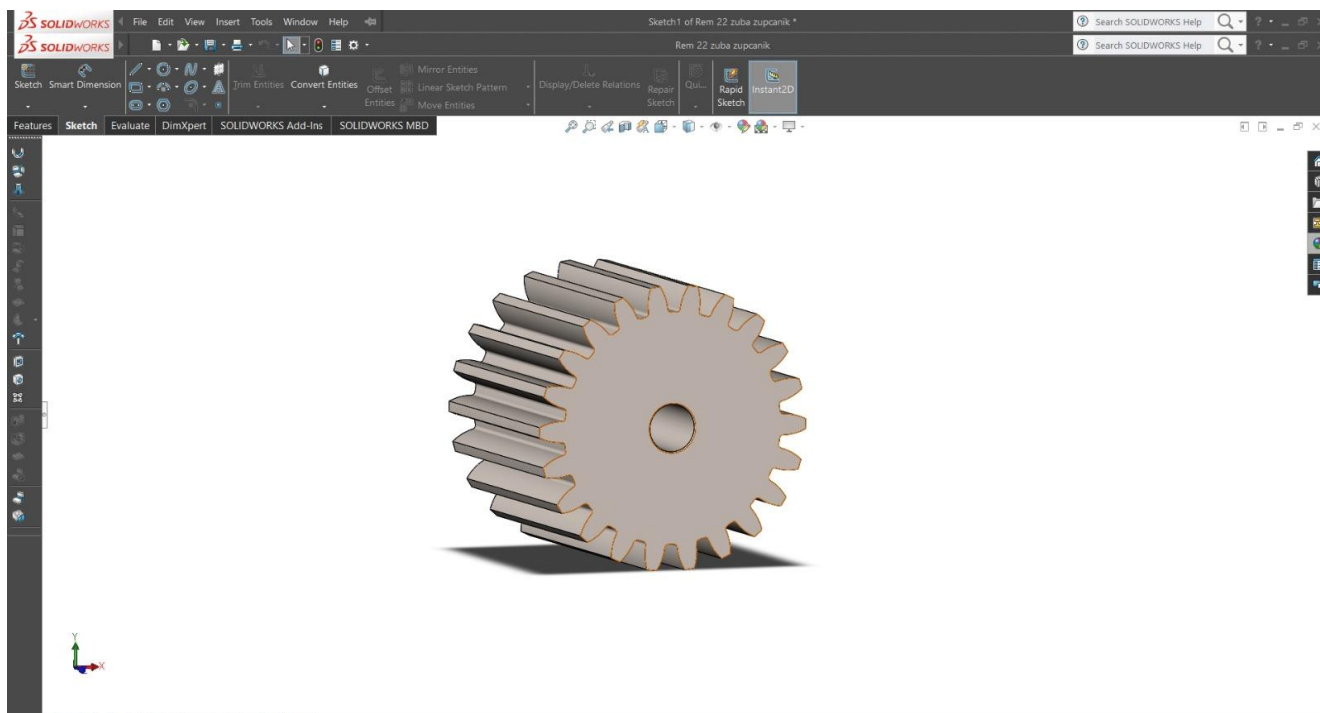
## 5.2 Modeliranje zupčanika u programu SolidWorks 2016



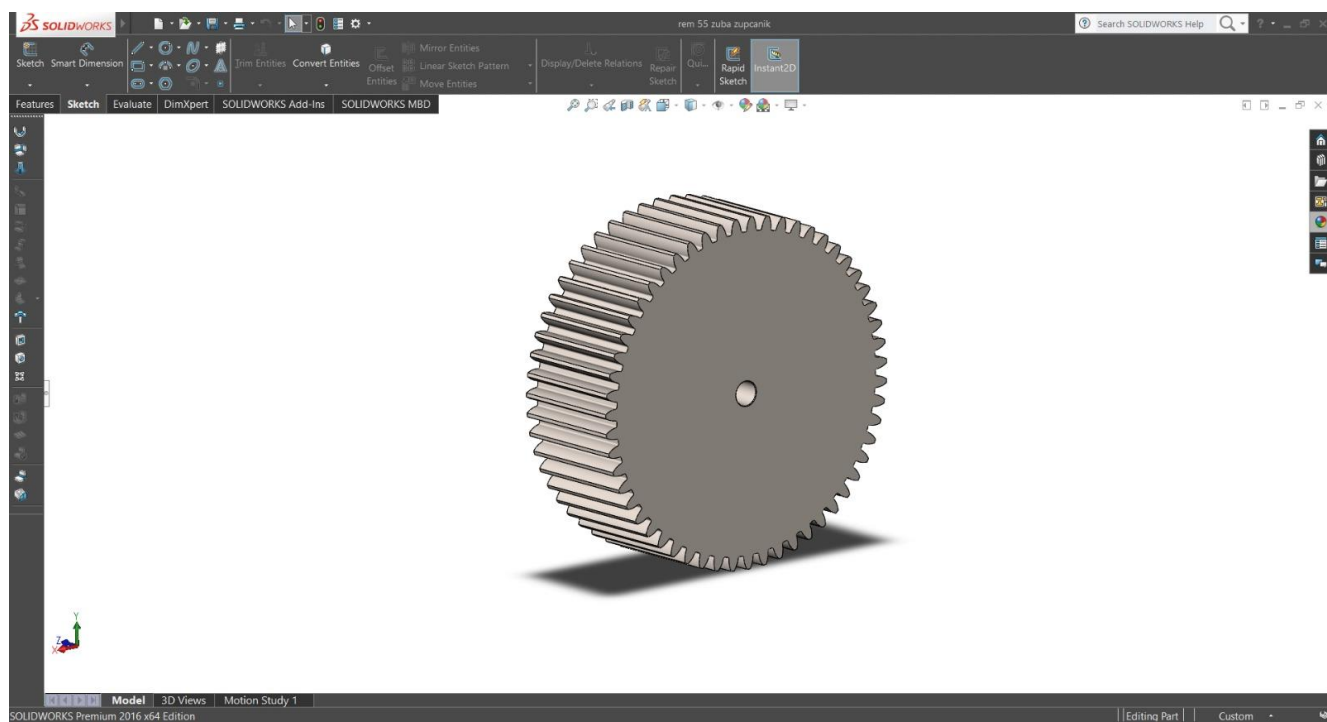
Slika 19. Opcija Part sa izabranima plane-om u skechu - tlocrt



Slika 20. Prostorni prikaz modela - početni osnovni model iz kojeg se modelira zupčanik



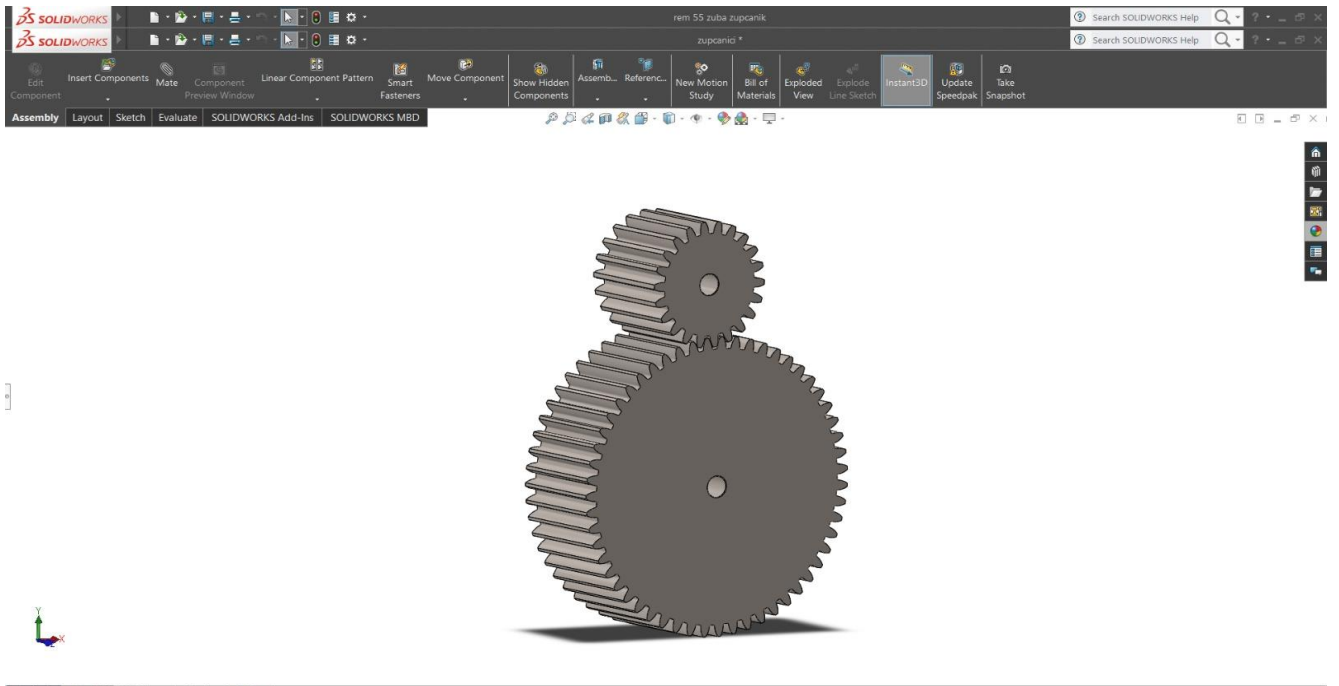
Slika 21. Prostorni prikaz modela - zupčanik br.1 sa 22 zuba



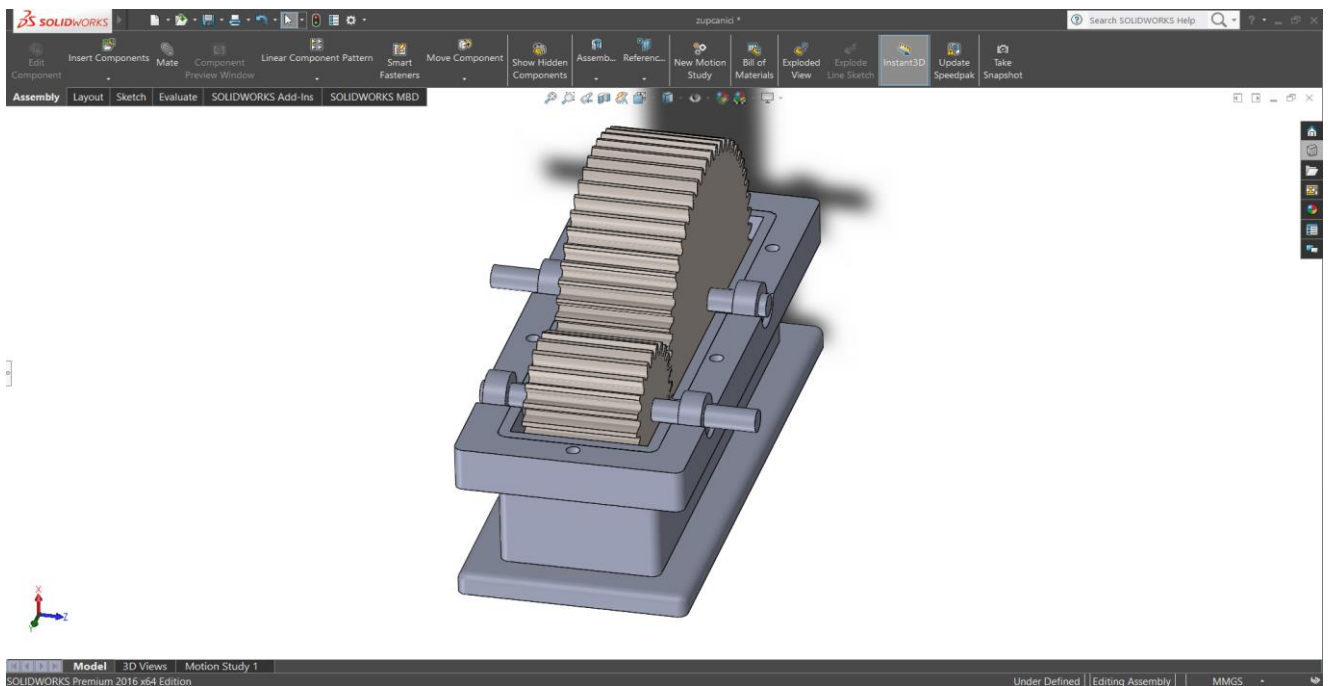
Slika 22. Prostorni prikaz modela - zupčanik br.2 sa 55 zuba

### 5.3 Sklapanje (Assembly)

Nakon izrade zupčanika br.1 i zupčanika br.2 u opciji Part, prelazimo u opciju Assembly. U opciji Assembly pomoću komande Insert unosimo oba zupčanika i stavljamo ih na određene pozicije. Osi su im u međusobno paralelnom odnosu a zubci su postavljeni u pozicije za pokretanje.



Slika 23. Prostorni prikaz modela - u opciji Assembly

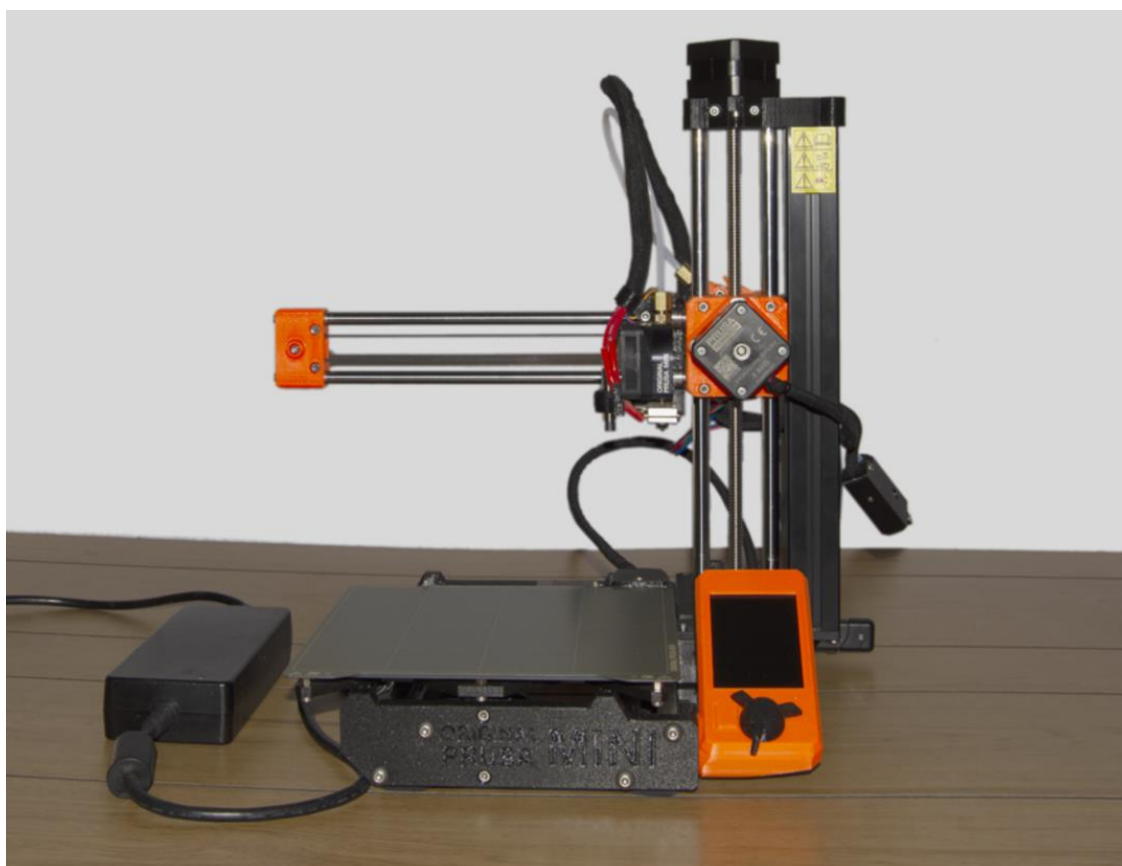


Slika 24. Prostorni prikaz modela zupčanici- reductor u opciji (Assembly)

## 6. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

### 6.1 *Općenito o 3D printerima*

U sklopu mojeg završnog rada 3D model zupčanika je napravljen na 3D printeru pomoću aditivne tehnologije. Aditivna tehnologija ili tehnologija aditivne proizvodnje je proces dodavanja materijala u slojevima. 3D printeri su jedni od načina korištenja aditivne tehnologije te su danas vrlo popularni uređaji za prikaze modela ili nekih uzoraka. Printer koji sam ja koristio za izradu je Original Prusa Mini+. Original Prusa Mini+ je mali printer koji proizvodi kompanija Prusa, njegove dimenzije zauzimaju obujam izrade od samo 180 mm x 180 mm x 180 mm. Jedna od jako zanimljivih stvari ovoga printera je ta što je skoro 80 % dijelova samog printera 3D printano. Sve od kućišta je ekstrudirano do gumba na sučelju. Glavni okvir je izrađen od ekstrudiranog metala, a grijani krevet je izrađen od stakla. Uređaj ne zahtjeva veliko fizičko održavanje i vrlo je jednostavan za upotrebu za razliku od većih modela.



Slika 25. Prikaz 3D printera Original Prusa Mini+

## **6.2 Metode 3D printanja**

3D printanje je precizan postupak izrade modela iz različitih materijala koji se može primjenjivati za izradu medicinskih pomagala, industrijskih dijelova, tehnoloških modela i prototipova, umjetničkih proizvoda kao što su nakit ili namještaj, te čak i za izradu čitavih objekata kao što su jednostavne građevine i objekti. 3D printeri ovisno o svojoj kvaliteti i snazi omogućavaju velike mogućnosti ispisa i visoku preciznost i kvalitetu proizvoda. Također, moguće su i kombinacije više materijala i boja istovremeno, kako bi se postigao bolji efekt ispisa. Nešto više o vrstama aditivne tehnologije:

### **FDM tehnologija - ekstrudiranje plastike**

Ova tehnologija gradi 3d modele sloj po sloj od osnove do vrha modela, zagrijavanjem i istiskivanjem termoplastičnog vlakna.

### **PolyJet tehnologija - ubrizgavanje polimera**

Ova tehnologija gradi 3d modele nanošenjem slojeva konzervirajućeg tekućeg foto polimera na podlogu. Koristeći UV svjetlost, fiksira se kapljica tekućeg foto polimera, nastaju fini slojevi i stvara se precizan 3d model.

### **Stereolitografija - lasersko sinteriranje**

Uređaj polimerizira materijal laserskom zrakom sloj po sloj, a u svakom sloju laser polimerizira model i potpornu strukturu.

### **SAF tehnologija**

Uređaj nanosi polimerni prah i apsorpcijsku tekućinu koje ozračuje infracrvenim zračenjem, te na taj način prekriva čitav tlocrt volumena i postiže visoku brzinu printanja. Po završetku postupka printani komadi ostaju zarobljeni u prahu.

### **P3 tehnologija**

Ova tehnologija polimerizira smolu u otvorenom spremniku, te koristeći UV svjetlost i široki spektar senzora polimerizira se čitav presjek modela s velikom preciznošću. Ova metoda daje najkvalitetniji i najdetaljniji model u odnosu na prethodne metode.

### 6.3 Izbor materijala za printanje

Materijali za 3d printanje su najčešće različite vrste polimernih materijala. Filamenti su razne vrste plastičnih materijala u obliku žice namotane na kalup. Jedna od osnovnih karakteristika svakog materijala je promjer žice. Postoje dvije vrste promjera koje su naj zastupljenije, a to su 1.75mm i 3mm odnosno 2.85mm.



Slika 26. Pule materijala filamenta u različitim bojama. Izvor [18].

Jedna od jako bitnih napomena je vrsta mlaznica na 3d printeru. Mlaznica je jedan od sastavnih dijelova 3d printera i jako je bitno koju vrstu mlaznice koristimo. Sama mlaznica prenosi rastopljenu pastiku na zagrijanu ploču 3d printera. Razlikujemo nekoliko vrsta mlaznica koje imaju različitu vrstu primjene ovisno o vrsti materijala koja se koristi.

Neke od vrsta su :

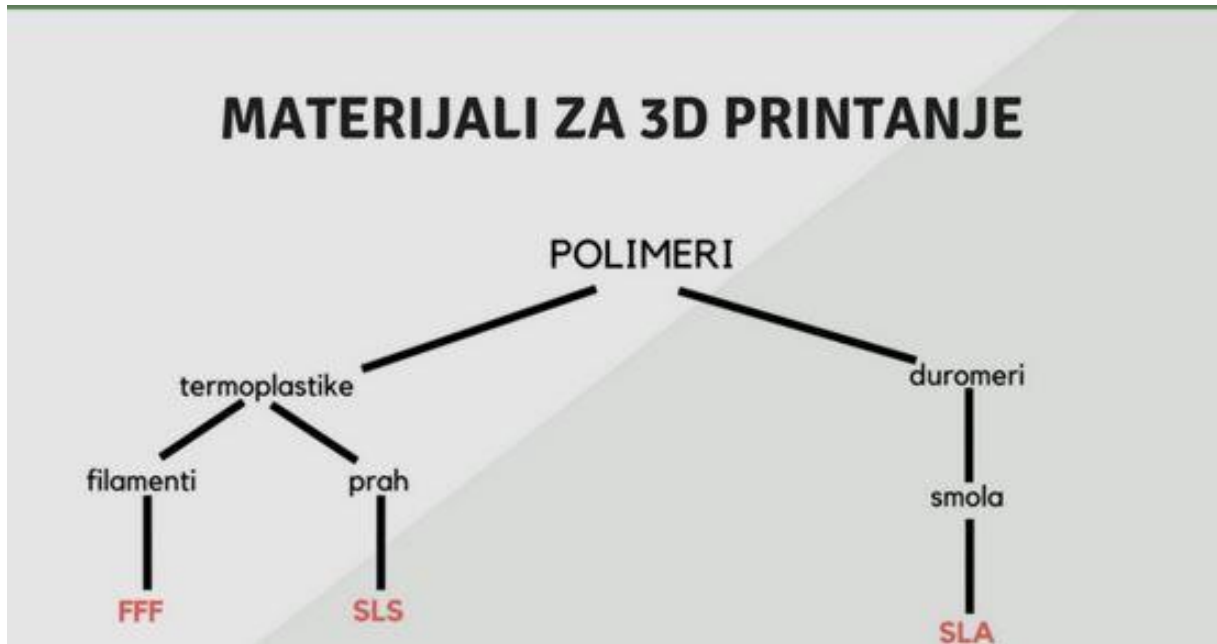
- Mlaznica od mesinga
- Mlaznica od čelika
- Mlaznica od ojačang čelika





Slika 27. Različite vrste mlaznica. Izvor [19]

Danas razlikujemo dvije osnovne vrste materijala, a to su termo plastike i duromeri:

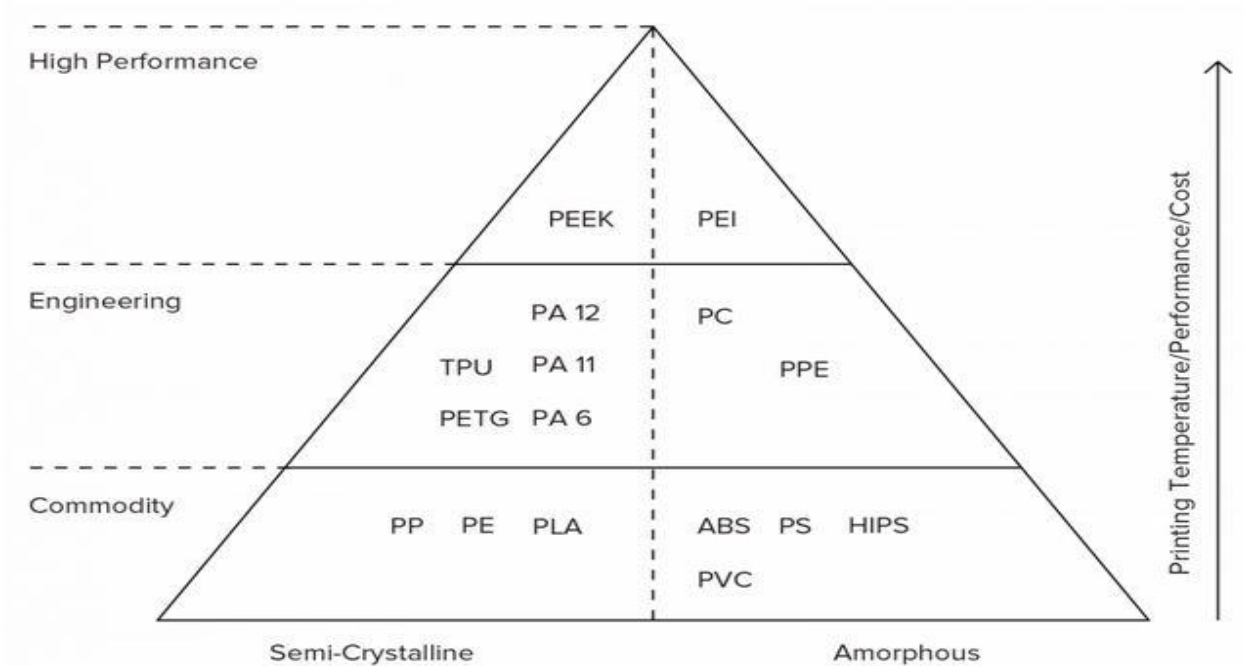


Slika 28. Podjela polimera materijala . Izvor [20].

Termoplasti su jedna od najčešćih vrsta polimera koja je napravljena od polimernih smola. One se tope pri određenoj temperaturi i postaju homogena tekućina. Ove karakteristike nam daju mogućnost reciklaže ove vrste materijala, pošto je ova vrsta reverzibilna i najčešće spadaju pod klasični filament.

Duromeri za razliku od termoplastike se ne mogu sinterirati. Dolaze u obliku tekuće smole osjetljive na svjetlost i koriste se u SLA tehnologiji 3d printanja. Smola se skrućuje u dodiru sa zrakama UV lasera i na taj način poprima oblik zadanog modela.

Polimerni materijali dijele se u više kategorija: materijali za opću primjenu (PLA i ABS), inženjerski materijali (PA, TPU, PETG, ASA) te materijali visoki performansi (PEEK i PEI). Vrste materijala i njihove primjene ovise o zahtjevima i traženoj kvaliteti finalnog modela:



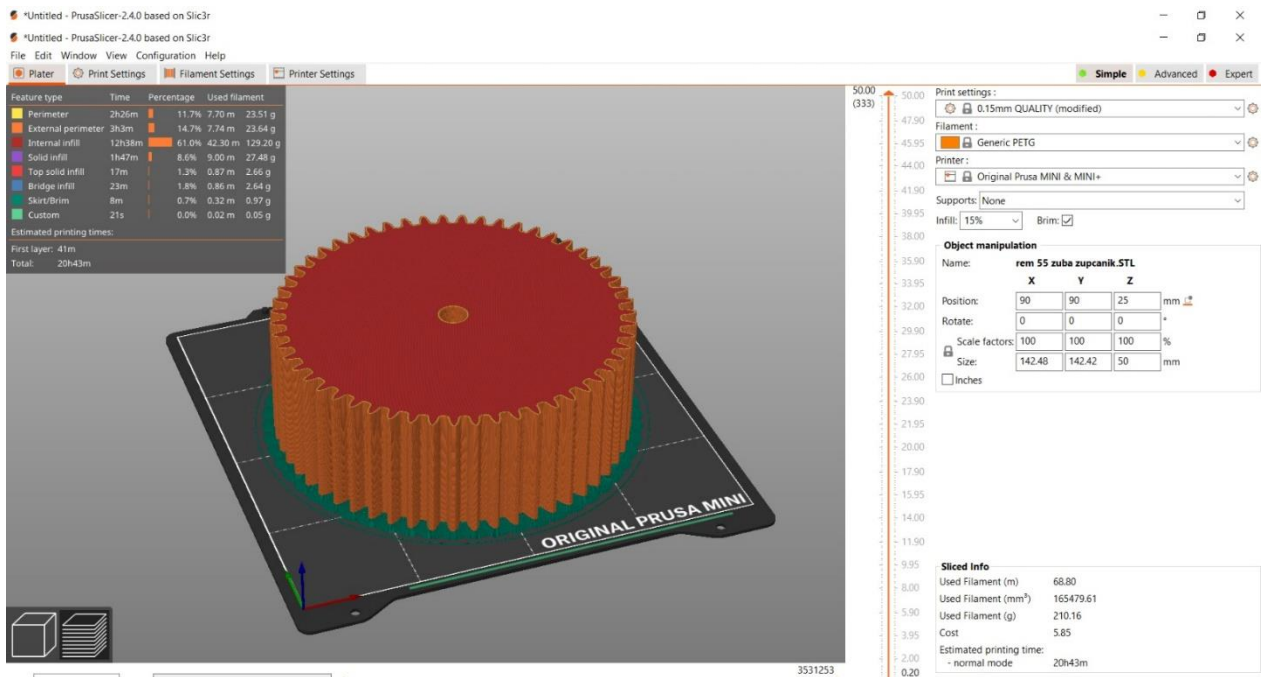
Slika 29. Kategorije materijala. Izvor [21].

Neke od osnovnih vrsta plastike koje se najviše koriste u svijetu su PP, PE, PLA

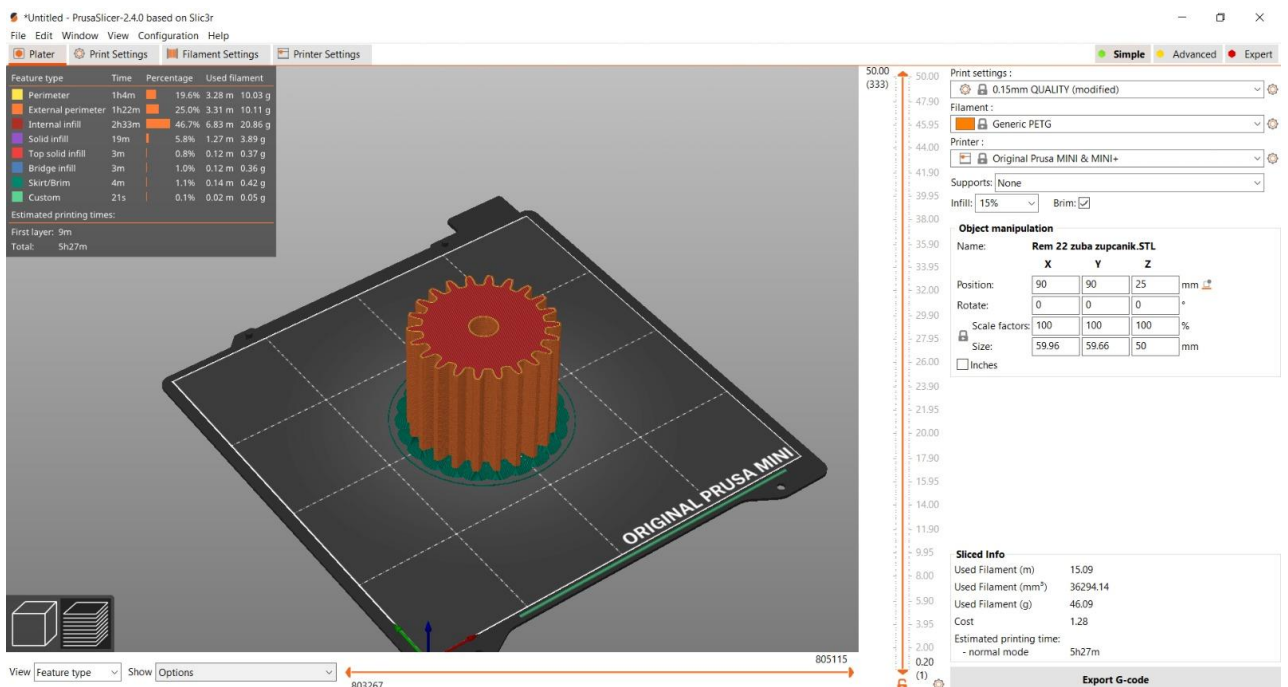
- PE POLIETILEN jedna od najzastupjenijih polimera koje se koriste u svijetu. Isto tako često se koristi u indutriskim segmentima, također je poznati polimer po tome što se koristi pri pakiranju hrane kako bi joj produžila rok trajanja, siguran transport i također koristi se u automobilskoj industriji kao zaštita od ogrebotina kod automobila.
- PP jedn od najpoznatijih polimera koja ima primjenu u prehrabenoj industriji služi za pakiranje hrane i svih tekućina 90% plastičnih boca u svijetu je proizvedeno od te vrste polimera.
- PLA je jedn od najpoznatijih polimera u primjeni za 3d printanje popularn je po to me što je BIO plastika i termoplastika izrađena od prirodnih materijala poput kukuruznog škroba

## 6.4 Program za izradu G koda

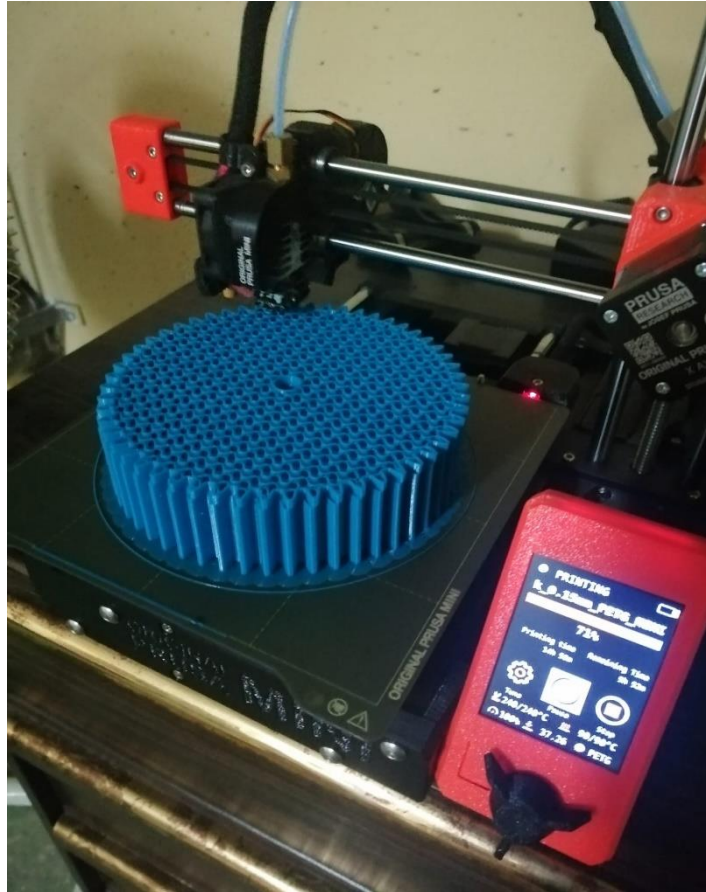
Jedan od bitnijih detalja pri korištenju uređaja, osim samog točnog nacrtanog predmeta kojeg želimo isprintati, je također ispravno korištenje PrusaSlicera. PrusaSlicer je vlastiti in-house program za rezanje i postavljanje postavki prije samog printanja 3D modela. Takav alat otvorenog koda koji sadrži sve alate i opcije koje bi omogućili lakše i bolje printanje je bitno olakšanje pri korištenju samog uređaja.



Slika 30. Sučelje programa Prusa Slicer sa ubačenim modelom zupčanika br.2



Slika 31. Sučelje programa Prusa Slicer sa ubačenim modelom zupčanika br.1



Slika 32. Proces printanja zupčanika br.1



Slika 33. Zupčanik br.1

## **7. Zaključak**

Cilj rada je bio proračun čelnika s ravnim zubima izrada nacrtu zupčanika i 3D modela zupčanika u sklopu kućišta reduktora.

Za vrijeme izrade završnog rada služio sam se programskim paketom SolidWorks 2016. u kojem sam izrađivao 3D model zupčanika. Pratio sam izradu zupčanika na 3D printeru Original Prusa Mini+. Također sam koristio njihov program za izradu G koda PrusaSlicera..

Tijekom izrade svih navedenih zadataka jako mi je pomoglo znanje koja sam stekao tijekom studiranja na fakultetu, ali također mi je pomoglo iskustvo koje sam stekao tijekom svoga radnog vremena u firmi Oiva Inovacije gdje i dalje radim..

## 8. Literatura

- [1] [https://www.unizd.hr/Portals/1/nastmat/S\\_Elementi/Zupcani%20prijenosnici%20Read-Only.pdf](https://www.unizd.hr/Portals/1/nastmat/S_Elementi/Zupcani%20prijenosnici%20Read-Only.pdf)
- [2] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/14-ZupcaniPrijenosnici.pdf>
- [3] Prof. dr ing. EUGEN OBERSMIT Prijenosnici Snage Zbirka zadataka
- [4] Prof. dr ing. EUGEN OBERSMIT Ozubljenja i Zupčanici Zagreb 1981.
- [5] Kolumbić Z. Kozak D, ; Fizika – podloge za studij strojarstva; Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku 2010.  
<http://www.sfsb.hr/~zkolum/Fizika/>
- [6] <https://www.academia.edu/8331421/Zupcanici>
- [7] <https://www.printer3d.hr/savjeti-strucnjaka/materijali-za-3d-printanje/>
- [8] <https://www.3dglobe.net/materijali-za-3d-printanje>
- [9] <https://www.solidworks.com/>
- [10] Strojarski priručnik, Bojan Kraut, Tehnička knjiga zagreb 1976.
- [11] <https://repozitorij.fazos.hr/en/islandora/object/pfos%3A1223/datastream/PDF/view>
- [12] Tehnička enciklopedija Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975  
<https://www.prusa3d.com/>
- [13] <https://core.ac.uk/download/pdf/198101491.pdf>
- [14] <https://hr.build-repair.com/5807170-new-steel-for-gears>
- [15] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unin:1102/preview>
- [16] <https://izit.hr/tehnologije/>
- [17] <https://plastikatrcek.si/en/3d-filaments/>
- [18] <https://www.3dprintaj.com/mlaznice-za-3d-printanje/>
- [19] <https://www.3dglobe.net/materijali-za-3d-printanje>[21]
- [20] <https://www.printer3d.hr/savjeti-strucnjaka/materijali-za-3d-printanje/>