

# TRIBOLOŠKA SVOJSTVA POLIMERNIH MATERIJALA

---

**Arlov, Nino**

**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:128:565315>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-12**



**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

STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

NINO ARLOV

**TRIBOLOŠKA SVOJSTVA POLIMERNIH  
MATERIJALA**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

NINO ARLOV

**TRIBOLOŠKA SVOJSTVA POLIMERNIH  
MATERIJALA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Tihana Kostadin, prof.struč.stud.

KARLOVAC, 2024. godina



**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	NINO ARLOV		
OIB / JMBG		---	
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail	---		
Matični broj studenta	0123422007		
JMBAG	0248069493		
Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski	<b>X</b> specijalistički diplomski	
Naziv studija	<b>STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA</b>		
Godina upisa	2022.		
Datum podnošenja molbe	12.06.2024.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: TRIBOLOŠKA SVOJSTVA POLIMERNIH MATERIJALA

Naslov teme na engleskom: TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMERS

**Opis zadatka:**

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu opisati polimere i njihova tribološka svojstva, zatim obradu odvajanjem čestica polimernih materijala, posebno glodanje polimera, te usporediti sa istom obradom metalnih materijala. Također opisati upotrebu steznih naprava. U eksperimentalnom dijelu rada opisati korištene materijale, tehnologije i opremu, te Izraditi stezne naprave od polimernih materijala strojnom obradom CNC glodanjem. Napraviti 3D model stezne naprave i CAM program. U eksperimentalnom dijelu napraviti stezanje materijala različitim silama stezanja, za pojedine materijale. Nakon toga usporediti tribološka svojstva stezne naprave i obradka koji se steže. Rezultate mjeriti 3D skeniranjem, te usporediti odstupanje od početnog 3D modela. Na kraju napraviti analizu rezultata i zaključak. Rad urediti prema uputama, kako je navedeno na web stranicama Veleučilišta.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ja – student Nino Arlov, matični broj 0123422007, upisan u IV. semestar Stručnog diplomskog studija strojarstva, akademske godine 2022./2023., radio ovaj diplomski rad samostalno, primjenom znanja koje sam stekao na Veleučilištu u Karlovcu tijekom cjelokupnog obrazovanja, te uz pomoć mentorice dr.sc. Tihana Kostadin, kojoj se ovim putem zahvaljujem. Zahvaljujem joj se na pomoći tijekom pisanja diplomskog rada i na svom stručnom znanju koje mi je pružila tijekom studiranja. Također zahvaljujem se asistentu mag.ing.mech. Tomislavu Šančiću na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu zahvalu upućujem djevojci Luciji i cijeloj obitelji na pruženoj podršci tijekom cijelog studiranja i pisanja ovog diplomskog rada.

Karlovac, 06.06.2024.

Nino Arlov

---

## **SAŽETAK**

Diplomski rad se sastoji od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog. U teorijskom dijelu radu opisana su polimerni materijali i njihova svojstva osobito tribološka svojstva, opisana je obrada odvajanjem čestica kod polimernih materijala s posebnim naglaskom na glodanje polimera. Opisane su stezne naprave i njihova primjena.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je cjelokupna tehnologija izrade testnih uzoraka nabava materijala, izrada CAM programa za strojnu obradu uzoraka i sama strojna obrada. Zatim proračun steznih sila za pritezanje uzoraka koristeći se referentnim vrijednostima dobivenih iz nabavnog kataloga materijala uzoraka. Nakon toga napravljeno je 3D skeniranje uzoraka kako bi se provjerile i usporedile vrijednosti deformacija nastalih na uzorcima prilikom stezanja. Na temelju svih informacija izveden je zaključak o ovom radu.

Ključne riječi: polimeri, tribološka svojstva polimera, obrada odvajanjem čestica, stezna naprava, 3D skener

## **SUMMARY: TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMERS**

The thesis consists of two parts, theoretical and experimental. In the theoretical part of the work, polymer materials and their properties, especially tribological properties, are described, the processing of polymer materials by particle separation is described, with a special emphasis on polymer milling. Clamping devices and their application are described.

In the experimental part of the work, the entire technology of making test samples, procurement of materials, creation of a CAM program for machine processing of samples and the machine processing itself were carried out. Then the calculation of the clamping forces for tightening the samples using the reference values obtained from the procurement catalog of sample materials. After that, a 3D scan of the samples was made in order to check and compare the values of the deformations that occurred on the samples during clamping. Based on all the information, a conclusion was drawn about this work.

Keywords: polymers, tribological properties of polymers, particle separation processing, clamping device, 3D scanner

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1 Povijesni razvoj .....	2
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1 Osnove polimera .....	3
2.2 Struktura polimera .....	4
2.2.1 <i>Plastomeri</i> .....	5
2.2.2 <i>Elastomeri</i> .....	6
2.2.3 <i>Duromeri</i> .....	6
2.3 Fizička stanja polimera .....	7
2.4 Svojstva polimernih materijala .....	9
2.4.1 <i>Tribološka svojstva polimera</i> .....	10
2.5 Primjena polimernih materijala .....	12
3. OBRADA POLIMERNIH MATERIJALA ODVAJANJEM ČESTICA.....	13
3.1 Svojstva alata za obradu polimernih materijala odvajanjem čestica.....	14
3.2 Hlađenje alata kod obrade odvajanjem čestica polimera .....	16
3.3 Načini obrade odvajanjem čestica.....	16
3.3.1 <i>Tokarenje</i> .....	16
3.3.2 <i>Bušenje</i> .....	18
3.3.3 <i>Razvrtavanje</i> .....	19
3.3.4 <i>Piljenje</i> .....	19
3.3.5 <i>Glodanje</i> .....	20
3.4. Parametri obrade kod tehnologije glodanja .....	24
4. STEZNE NAPRAVE .....	26
4.1 Elementi stezne naprave .....	27
4.2 Podjela stezних naprava .....	28
4.3 Naprave za tehnologiju glodanja .....	29
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	31
5.1. Ispitivani materijali .....	31
5.1.1. <i>Poliamid</i> .....	31
5.1.2. <i>Polietilen</i> .....	32
5.1.3. <i>Polioksimetilen</i> .....	33



5.2. CAD/CAM stvaranje steznog prihvata .....	34
5.3. Odabir alata .....	37
5.4. Strojna izrada steznog prihvata .....	38
5.5. Stezanje unutar prihvata sa različitim silama.....	41
5.6. Mjerenje deformacija pomoću 3D skeniranja.....	46
5.6.1. <i>Općenito o 3D skeneru</i> .....	46
5.6.2. <i>Upotreba tehnologije plavog svijetla u procesu skeniranja</i> .....	48
5.6.3. <i>Proces pripreme ispitnih uzoraka za skeniranje</i> .....	48
5.6.4. <i>3D skeniranje ispitnih uzoraka</i> .....	50
6. ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH SKENIRANJEM.....	52
7. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA .....	58

## POPIS SLIKA

Slika 1. Područja primjene polimernih materijala[3] .....	1
Slika 2. Prirodni polimer(polisaharid) [5] .....	3
Slika 3. Osnovni oblici makromolekulnih struktura polimernih materijala(plastomeri, elastomeri, duromeri) [1] .....	4
Slika 4. Makromolekulna struktura amorfnih plastomera[6] .....	5
Slika 5. Makromolekulna struktura kristalastih plastomera[6] .....	6
Slika 6. Umrežavanje duromera pomoću dodataka i topline[7] .....	7
Slika 7. Termomehanička krivulja: $T_g$ – staklište, $T_f$ – tecište, $T_m$ – talište, $T_d$ - razgradište[1] .....	8
Slika 8. Prikaz ispitivanja trenja[9] .....	11
Slika 9. Rezni alat s jednom oštricom(nožem) [10] .....	15
Slika 10. Prikaz geometrije alata za tokarenje polimera[1] .....	17
Slika 11. Prikaz tokarenja polimernog materijala[12] .....	17
Slika 12. Prikaz bušenja polimernog materijala[13] .....	18
Slika 13. Prikaz alata za rezanje polimernih materijala[11] .....	20
Slika 14. Načini obrade kod procesa glodanja[14] .....	22
Slika 15. Prikaz alata za glodanje polimernog materijala[1] .....	23
Slika 16. Prikaz parametara obrade glodanjem[15] .....	25
Slika 17. Elementi stezne naprave[17] .....	27
Slika 18. Prikaz stezne naprave za glodanje[17] .....	30
Slika 19. Prikaz modela u programu Fusion 360 .....	34
Slika 20. Prikaz modela u prvoj fazi obrade(čeono glodanje) .....	35
Slika 21. Prikaz modela u fazi bušenja provrta .....	36
Slika 22. Prikaz VHM vretenasto glodalo[20] .....	37
Slika 23. Spiralno svrdlo s cilindričnom drškom za bušenje[20] .....	37
Slika 24. Prikaz NC zabušivača[20] .....	38
Slika 25. CNC glodalica DMU 50eco .....	38
Slika 26. Prikaz steznog prihvata tijekom strojne obrade .....	39
Slika 27. Stezni priхват od PA-Poliamid .....	40
Slika 28. Stezni priхват od PE-Polietilen .....	40
Slika 29. Stezni priхват od POM- C –Polioksimetilen .....	41
Slika 30. Prikaz probnog uzorka izrađenog od aluminijsa .....	41
Slika 31. Prikaz stezne naprave .....	42
Slika 32. Prikaz stezanja prihvata unutar stezne naprave .....	43
Slika 33. Prikaz deformacije kod stezanja Polietilena - PE .....	46
Slika 34. Samoljepljive referentne točke .....	49
Slika 35. Pravilno pozicioniranje mjernog uzorka u radnom volumenu .....	50
Slika 36. Prikaz pripremljenog uzorka za skeniranje .....	51
Slika 37. Virtualni prikaz skeniranog uzorka u softveru GOM Inspekt .....	51
Slika 38. Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Poliamida - PA .....	52
Slika 39. Mjerenja deformacija priхват broj 1 Poliamid-PA .....	52
Slika 40. Mjerenja deformacija priхват broj 2 Poliamid – PA .....	53

Slika 41. Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Polietilena – PE .....	54
Slika 42. Mjerenje deformacija prihvata broj 1 Polietilen - PE.....	54
Slika 43. Mjerenje deformacija prihvata broj 2 Polietilen – PE.....	55
Slika 44. Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Polioksimetilena - POM C.....	55
Slika 45. Mjerenje deformacija prihvata broj 1 Polioksimetilen POM-C .....	56
Slika 46. Mjerenje deformacija prihvata broj 2 Polioksimetilen POM-C .....	56

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled nekih svojstava polimernih materijala[6].....	9
Tablica 2. Prikaz nekih područja primjene polimernih materijala[1].....	12
Tablica 3. Prednosti i nedostaci polimernih materijala[4].....	12
Tablica 4. Režimi rada prilikom razvrtavanja[11].....	19
Tablica 5. Parametri glodanja polimernih materijala[11].....	23
Tablica 6. Karakteristike Poliamida[19].....	32
Tablica 7. Karakteristike Polietilena[19].....	33
Tablica 8. Karakteristike Polioksimetilena[19].....	33
Tablica 9. Parametri za CNC glodalicu DMU 50eco[21].....	39
Tablica 10. Vrijednosti za materijal Poliamid – PA.....	44
Tablica 11. Vrijednosti za materijal Polietilen – PE.....	45
Tablica 12. Vrijednosti za materijal Polioksimetilen POM – C.....	45

## POPIS KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
PA	-	Poliamid
PE	-	Polietilen
POM	-	Polioksimetilan

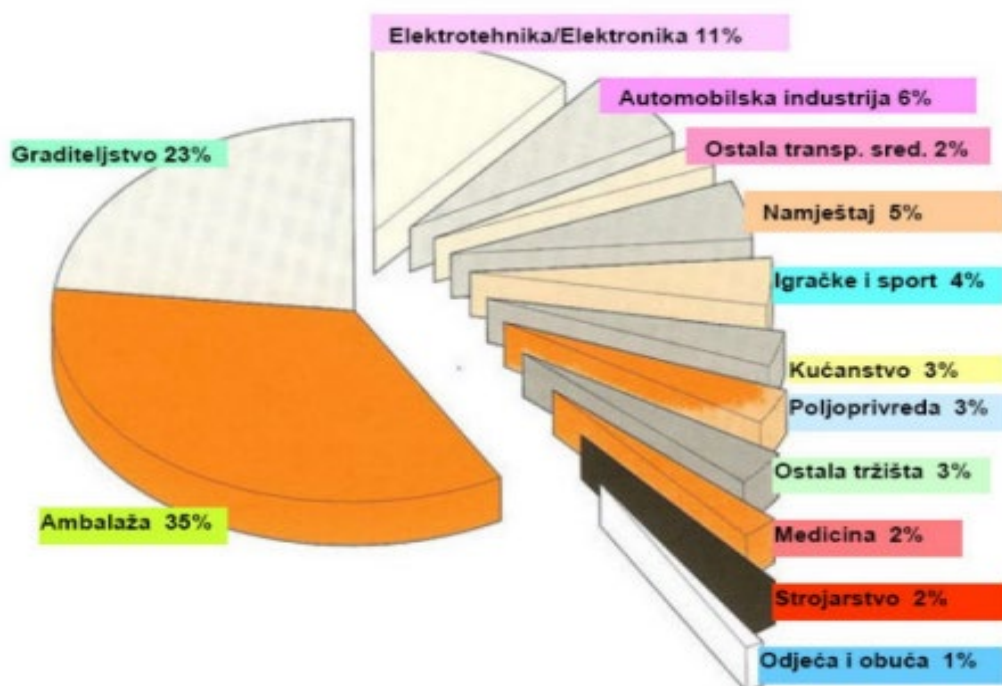
## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T_g$	°C	Temperatura staklišta
$T_f$	°C	Temperatura tecišta
$T_m$	°C	Temperatura tališta
$V_c$	m/min, m/s	Brzina rezanja
$V_f$	mm/min	Posmična brzina
$f_z$	mm	Posmak po zubu
$t$	mm	Razmak zuba alata
$\alpha$	°	Stražnji kut
$\gamma$	°	Prednji kut
$A$	mm <sup>2</sup>	Površina uzorka
$b$	mm	Širina uzorka
$h$	mm	Visina uzorka
$R_{et}$	MPa	Granica stlačivanja materijala
$F$	N	Sila stezanja
$M$	Nm	Moment stezanja

## 1.UVOD

Polimerni su materijali već dugi niz godina gotovo neizostavni u praktičnim dijelovima primjene materijala. To su kemijski spojevi koji se sastoje od makromolekula, a dobivaju se od monomera sintetski ili preradom prirodnih tvari. U izradi proizvoda uključena je i kemijski reakcija polimerizacije sirovine tj. monomera.

Polimerne materijale čovjek upotrebljava još od svojih najranijih početaka te ih je koristio za izradu alata, oruđa i oružja kako bi si olakšao svakodnevne aktivnosti. To su bili prirodni polimeri, to jest biopolimeri, kao što su drvo, prirodni kaučuk, smole te neka životinjska i biljna vlakna. Polimeri su neizostavan dio našeg života, počevši od plastičnih posuda koje koristimo za skladištenje hrane, ambalaže do sintetičkih vlakana u našoj odjeći. U industriji se polimeri intenzivno koriste zbog niskih cijena, malog obujma i mogućnosti oblikovanja u različite oblike. Također imaju ključnu ulogu u izradi automobila gdje se lagani i izdržljivi polimeri koriste za komponente nekih dijelova. Jedno od najvećih područja primjene polimera je u elektrotehnici i elektronici. [2]



Slika 1 Područja primjene polimernih materijala[3]

## 1.1 Povijesni razvoj

Henri Braconnot je 1811. godine objavio jedan od važnijih radova u povijesti polimera, u kojem opisuje derivat celuloznih spojeva. S tim radom uspio je kasnije poboljšati trajnost gume koja je nastala od prirodnog kaučuka. Taj izum obilježio je prvi popularizirani polu-sintetski polimer.

Razvijanje polimera započelo je u 19. stoljeću. Godine 1839. Charles Goodyear otkrio je proces vulkanizacije koji je uključivao obradu prirodne gume sumporom kako bi se poboljšala njezina elastičnost i trajnost. Otkriće je pomoglo razvitku industrije gume. Wallace Carothers i njegov tim u DuPontu su 1935. godine stvorili najlon, prvo sintetičko vlakno. Najlon je napravio revoluciju u tekstilnoj industriji zbog svoje snage, izdržljivosti i kvalitete. [4]

U drugoj polovici 20. stoljeća otkrivene su nove metode sinteze polimera u kojem su dobivali nove strukture i svojstva polimera. To je dovelo do razvoja polimera visokih performansi, poput poliestera, polikarbonata i poliuretana koji su našli primjenu u zrakoplovnoj, automobilskoj i strojarскоj industriji. Razvoj polimernih materijala kroz povijest je bio znatno ograničen nepoznavanjem njihovog makromolekularnog sastava te je tek od 1920. godine započelo sistematsko proučavanje polimera, koje se nastavlja i danas. Sredinom 20. stoljeća uporaba nafte kao primarne sirovine u odnosu na dotadašnji ugljen, te alkanska frakcija iz koje su se počeli dobivati polivinilklorid, polietilen i polipropilen, dovode do procvata industrije sintetičkih polimernih materijala.

U razdoblju od 1952. do 2004. godine proizvodnja polimera se sa milion tona godišnje porasla na preko 260 miliona tona, što predstavlja rast kakav nije doživio niti jedan drugi materijal u povijesti. Danas je industrija polimera veća od industrija bakra, aluminija i čelika zajedno. [2]

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1 Osnove polimera

Riječ polimer je složenica riječi *poly* i *meros* („mnogo dijelova“), grčkog podrijetla. Polimeri su makromolekule sastavljene od nekoliko stotina do više tisuća jedinica koje se nazivaju monomeri. Monomeri su kemijski spojevi male molekularne mase i jednostavne građe, ulaze u proces polimerizacije u kojem se povezuju kovalentnom vezom između zajedničkog elektronskog para i tako stvaraju polimere. [1]

Svojstva polimera ovisi o njihovom kemijskom sastavu, molekularnoj masi i rasporedu lanca. Pokazuju široki raspon karakteristika uključujući mehaničku čvrstoću, toplinsku vodljivost, fleksibilnost, prozirnost i kemijsku otpornost. [4]

Prema podrijetlu postoje:

- Prirodni polimeri (celuloza, nukleinske kiseline, kaučuk, škrob, polisaharidi i sl.),
- Sintetski polimeri koji se dobivaju kemijskim procesima polimerizacije.

Čisti polimeri rijetko su primjenjivi u tehničke svrhe, pa se o polimernom materijalu govori kao o materijalu dobivenom nakon što se čistom polimeru dodao neki dodatak. Mogu se koristiti i posebni postupci prerade kao što je termomehaničko oblikovanje. Osim prirodnih polimera koji mogu biti modificirani i nemodificirani, prema njihovom postanku, razlikujemo još i sintetske tj. umjetne. Po kemijskom sastavu oni mogu biti organski i anorganski. [4]



Slika 2 Prirodni polimer (polisaharid) [5]

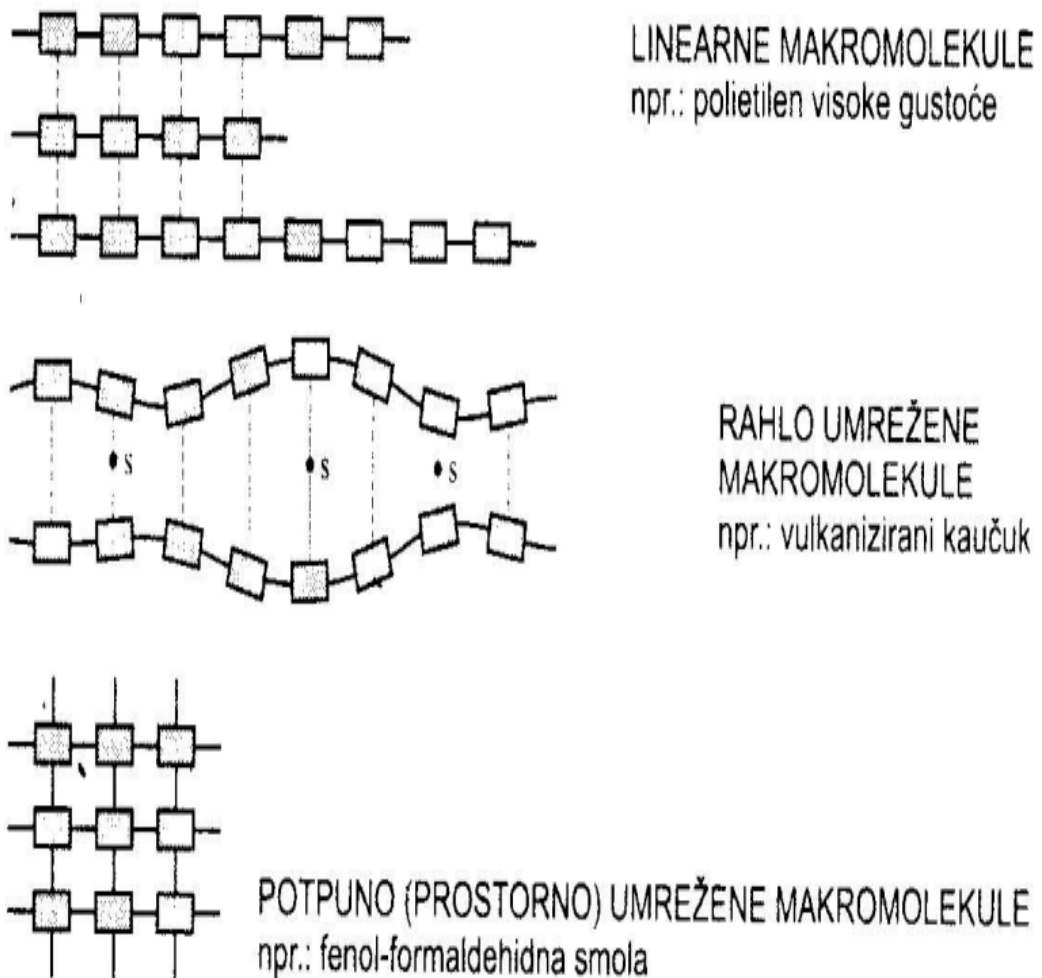


## 2.2 Struktura polimera

Polimeri se sastoje od linearnih, granatih ili umreženih makromolekula, koje su međusobno spojene kovalentnim vezama. Podjela koja je najčešća u praksi je podjela prema svojstvima ponašanja pri povišenim temperaturama. [1]

Polimeri se dijeli u tri grupe: plastomeri, elastomeri i duromeri.

U posljednje vrijeme uobičajeno se još spominje i grupa elastoplastomeri, koji se mogu prerađivati kao i plastomeri, a imaju izraženo svojstvo elastičnosti, kao elastomeri.



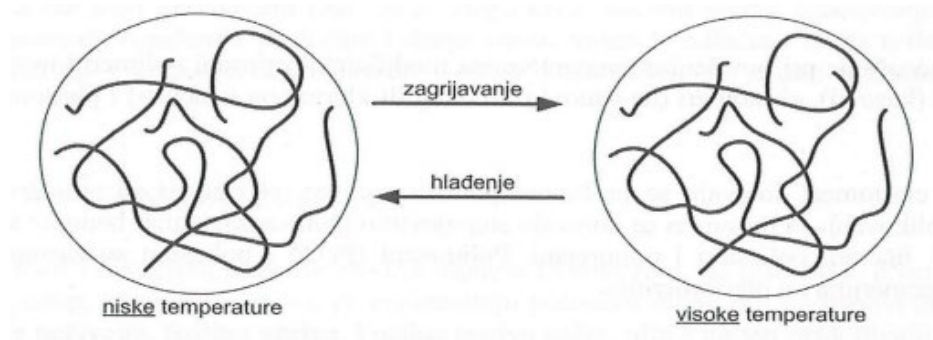
Slika 3 Osnovni oblici makromolekulnih struktura polimernih materijala(plastomeri, elastomeri, duromeri) [1]

### 2.2.1 Plastomeri

Plastomeri najzastupljenija polimerna grupa jer čine više od 90% ukupne proizvodnje. Izgrađeni su od linearnih ili granatih makromolekula velikih relativnih molekularnih masa koje su povezane isključivo sekundarnim vezama, a mogu biti potpuno amorfni ili kristalasti. [6]

Plastomeri pri zagrijavanju omekšavaju jer porastom temperature raste nepravilno gibanje atoma oko njihovih ravnotežnih položaja pa dolazi do prekida veza među atomima. Dovođenjem plastomera na temperaturu mekšanja oni postaju plastični i na njih se primjenjuju obrade prskanjem u kalup, ekstrudiranjem i zavarivanjem. Tijekom hlađenja, sekundarne veze ponovno se uspostavljaju i materijal se vraća u početno stanje. [6]

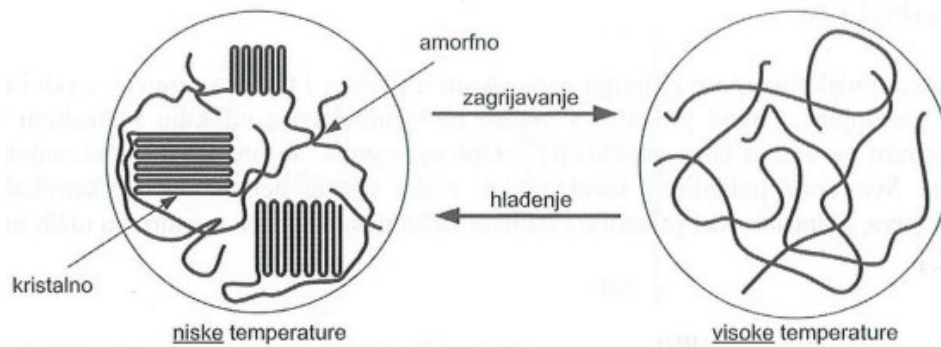
U amorfne plastomere pripada gotovo polovica upotrebljivih plastomera, njihovi polimerni lanci uvijek imaju slučajni raspored. Pri niskim temperaturama amorfni plastomeri su u čvrstom stanju i nema zapaženijeg gibanja molekula dok pri povišenju temperature prelaze u kapljevitost uz stalno gibanje molekula. Amorfni plastomeri bez boje i ojačanja su prozirni, krhki i slabije kemijske postojanosti. [6]



Slika 4 Makromolekulna struktura amornih plastomera[6]

Značenje naziva kristalasti plastomeri je u tome da osim kristalne faze sadrže i amorfnu. Pri povišenim temperaturama iznad tališta kristalita, kristalasti plastomeri prelaze u tekuće stanje, a raspored molekula sličan je kao kod amornog plastomera, dok pri hlađenju makromolekulni lanci ili njihovi dijelovi kristaliziraju. Kod kristalastih materijala stupanj kristalnosti izravno utječe na preradbena i uporabna svojstva. Viši

stupanj kristalnosti povisuje gustoću, tvrdoću, krutost i postojanost prema otopinama. [6]



Slika 5 Makromolekulna struktura kristalastih plastomera[6]

### 2.2.2 Elastomeri

Elastomeri se često nazivaju gume jer imaju građu molekula koja je djelomično (rahlo) umrežena, odnosno makromolekule se osim primarnim povezuju i sekundarnim, odnosno (fizikalnim) vezama. Omekšavanje je omogućeno time što dovođenjem topline, sekundarne veze popuštaju pa se segmentima makromolekula povećava pokretljivost te time dovodi do mekšanja elastomera. No, zbog prisutnosti primarnih veza, elastomeri se više ne mogu rastaliti. [6]

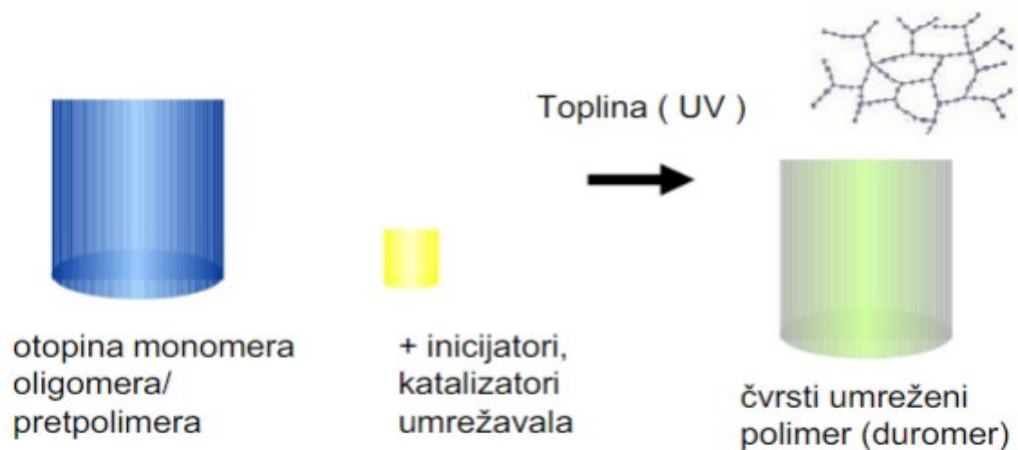
Elastomeri su materijali koji se pri sobnoj temperaturi mogu višestruko produžiti, to jest imaju sposobnost vrlo visokih elastičnih deformacija, pa će se nakon prestanka naprežanja vratiti u svoj prvobitan oblik.

Proizvode se kroz proces koji se naziva vulkanizacija. Vulkanizacija uključuje umrežavanje polimernih lanaca pomoću različitih aditiva (npr. sumpor). Najpoznatiji primjeri elastomera su prirodni kaučuk, butadienski kaučuk, poliuretanski kaučuk i silikonski kaučuk. [6]

### 2.2.3 Duromeri

Duromeri su polimerni materijali koji se umrežavaju i tvore trodimenzionalnu mrežnu strukturu koja im daje njihovu krutu i nefleksibilnu prirodu. Pri zagrijavanju vrlo malo omekšaju ili uopće ne omekšaju, nego se umrežavaju te se ne otapaju u

otapalima i ne mogu se plastično oblikovati. Proces dobivanja duromera se sastoji od dvije faze: prva faza je nastajanje oligomerne reaktivne viskozne mase ili krutine koja je lako taljiva. U ovoj fazi su duromeri pogodni za prerađivanje. Druga faza je proces umrežavanja i polimerizacije, uz pomoć raznih katalizatora i umrežavala.[6]



Slika 6 Umrežavanje duromera pomoću dodataka i topline[7]

Zahvaljujući umreženoj strukturi, duromeri imaju veliku čvrstoću, tvrdoću te kemijsku postojanost, a mehanička svojstva im postaju neovisna o promjenama temperature. Zbog toga se najčešće primjenjuju kao izolatori u građevinarstvu, automobilske industriji i brodogradnji. Duromeri su napravljeni na temelju fenol-formaldehidnih, urea-formaldehidnih i melamin-formaldehidnih smola. [6]

### 2.3 Fizička stanja polimera

Deformacija polimernog materijala ne ovisi samo o naprežanju već i o temperaturi te vremenu u kojem se deformacija događa. Ovisnost deformacije uzrokovane silom o temperaturi najbolje izražava termomehanička krivulja.

Ovisno o temperaturi postoje tri različita stanja: staklasto stanje, gumasto stanje i kapljevito stanje. Prijelaz iz jednog u drugo stanje nije tako oštar kao kod metalnih materijala, postoje prijelazne temperature područja koje se prema dogovoru predočuju. Prijelaz iz staklastog u gumasto stanje prikazuje se temperaturom

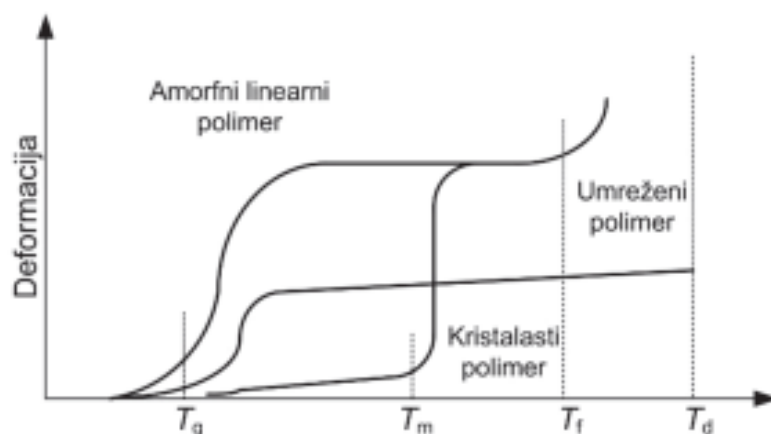
staklišta, kod amorfnih plastomera prijelaz iz gumastog u kapljevito stanje prikazan je temperaturom tećišta.

Kristalni plastomeri kada prelaze u kapljevito stanje predočuje ih temperatura tališta, a umreženi polimeri ne mogu teći pa na temperaturi razgradnje dolazi do njihove razgradnje. Kristalno stanje polimera daje uređenu strukturu bez pokretljivosti molekula i njihovih segmenata, u tom stanju polimeri pokazuju dobra mehanička svojstva i kemijsku otpornost. [4]

Polimer se u staklastom stanju nalazi kad se brzo ohladi iz rastaljenog stanja ili otopine. Staklasti polimeri imaju visoku temperaturu staklastog prijelaza ( $T_g$ ), odnosno temperatura na kojoj prelaze iz krutog, krhkog stanja u gumasto stanje. Ispod temperature  $T_g$  karakterizira ih visoki stupanj tvrdoće, lomljivosti i prozirnosti. Primjeri staklastih polimera su polistiren i polimetil – metakrilat.

Gumasto stanje se odnosi na polučvrsto ili visokoelastično stanje polimernog materijala. U ovom stanju molekule prelaze iz statističke u izduženu konformaciju uslijed vanjskog djelovanja te, nakon prestanka vanjskog djelovanja, povratak u statističku konformaciju. Na temperaturama iznad temperature staklastog prijelaza ( $T_g$ ), ali ispod tališta ( $T_m$ ), polimeri postaju mekani i savitljivi. [4]

Tekuće stanje se događa kada polimer dosegne točku taljenja ( $T_m$ ) i prijeđe iz krutog u tekuće stanje. U tom stanju dolazi do gibljivosti segmenata i cijelih molekula. Visokofluidno stanje pojavljuje se kod termoplastičnih polimera, kao što su polietilen i polipropilen kada se zagrijavaju iznad svojih tališta. [4]



Slika 7 Termomehanička krivulja:  $T_g$  – staklišta,  $T_f$  – tećište,  $T_m$  – talište,  $T_d$  – razgradište[1]

## 2.4 Svojstva polimernih materijala

Svojstva polimernih materijala se mogu definirati kao promjene stanja, reakcije ili neke druge pojave koje su u materijalu izazvane djelovanjem raznih, unutrašnjih i vanjskih čimbenika. Karakteristike označavaju sva bitna svojstva koja su određena normiranim ili dogovorenim metodama ispitivanja. [8]

Kod polimernih materijala razlikujemo nekoliko kategorija svojstava:

- unutarnja svojstva koja su vezana za materijal, tj. tvar,
- proizvodna ili procesna svojstva vezana uz njegovu mogućnost dorade, obrade, proizvodnje, skladištenja i recikliranja,
- svojstva koja se vežu uz objekt, tj. njegov oblik i veličinu

Polimeri veće molekularne težine imaju tendenciju povećanja čvrstoće i krutosti. Neki polimeri su vrlo otporni na kemikalije, kiseline i otapala, s tim svojstvima imaju veliku primjenu u korozivnim okruženjima. Također pokazuju različita toplinska svojstva koja određuju njihovo ponašanje u različitim temperaturnim uvjetima. Mogu biti izolatori ili vodiči električne energije ovisno o njihovoj molekularnoj strukturi i dodacima. [8]

Tablica 1. Pregled nekih svojstava polimernih materijala[6]

<b>Funkcijska (uporabna) svojstva</b>	<b>Naziv svojstva (primjeri)</b>
<b>MEHANIČKA</b>	Čvrstoća, istezljivost, modul elastičnosti
<b>TRIBOLOŠKA</b>	Faktor trenja, otpornost na trošenje
<b>TOPLINSKA</b>	Toplinska provodnost, toplinska rastezljivost, temperatura omekšavanja (plastomeri: metoda po Vicatu), postojanost oblika pri povišenoj temperaturi (duromeri: metoda po Martensu)
<b>ELEKTRIČNA</b>	Električna vodljivost, električni otpor, čvrstoća proboja, dielektrična svojstva
<b>POSTOJANOST</b>	Kemijska postojanost
<b>OSTALA SVOJSTVA</b>	Gustoća, propusnost svjetla, indeks loma, udio dodataka (npr. anorganski svojstava)

#### *2.4.1 Tribološka svojstva polimera*

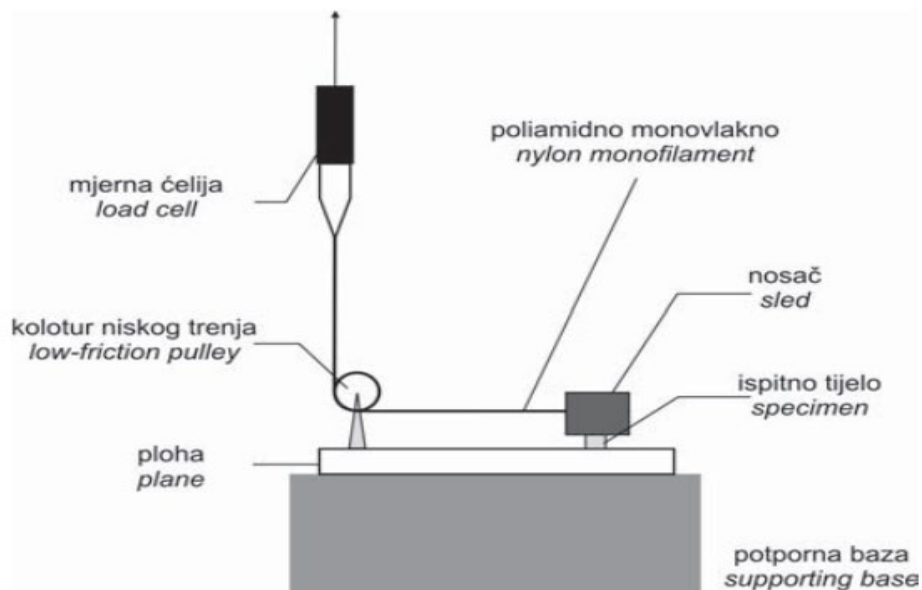
Tribologija je znanost koja proučava pojave na površinama dvaju tijela u dodiru. Tribološka svojstva koja možemo navesti su trenje, trošenje, hrapavost itd. Trenje označava silu koja se opire kretanju između površina, trošenje je gubitak materijala ili neka deformacija tijela, kada se površine tijela relativno klizu. [9]

Tribološko trenje polimera sadržava dvije ključne komponente, a to su deformacija i adhezija. Deformacija je komponenta tribološkog polimernog trenja, a javlja se kao jedan od izvora sile trenja uz adheziju. Kao takve deformacije javljaju se na mjestima dodira dvije površine koje klize. Upravo na tim mjestima dodira dolazi do elastične, visokoelastične ili plastične deformacije, što naravno ovisi o svojstvima materijala. Čimbenici koji imaju utjecaj na tribološka svojstva polimernih materijala su struktura i položaj makromolekula na površini, vrsta polimera, sastav polimernih mješavina, molekularna struktura kao i raspodjela molekularnih masa. Adhezija je komponenta trenja koja je kontrolirana stvaranjem i prekidanjem veza između dodirnih površina. Kod većine polimera to je tipično prisustvo Van der Waalove i vodikove veze. Djelovanjem tangencijalnih sila između površina, dovodi do rezultata koji vodi do prekida međupovršinskih veza. [9]

Trenje se definira faktorom trenja. Sam faktor je bezdimenzijska vrijednost omjera tarne sile između dvaju tijela i pritisne sile. Kod glatkih polimernih materijala faktor trenja može biti manji od 0,05 a kod slučaja visoke zahvaćenosti tarnog para i veći od 2,5.

Razlikujemo dvije vrste trenja, statičko i dinamičko. Statičko trenje se pojavljuje u slučaju kada se tijela u međusobnom dodiru ne gibaju jedno prema drugom. Kinetičko, odnosno dinamičko trenje pojavljuje se kada se dva objekta jedan prema drugom kreću i taru. [9]

Kod svih ispitivanja važno je da sva ispitna tijela imaju istu toplinsku povijest i da su odgovarajuće kondicionirani, da se spriječi djelovanje vlage i drugih čimbenika okoline. Prema normi, eksperiment kojim se određuje faktor trenja, izvodi se uređajem za mjerenje sile kod kojega je ispitno tijelo pričvršćeno na donjoj strani pokretnog nosača te kliže preko površine definirane plohe i stvara otpor zbog trenja. Tribološka svojstva trenja, uz sastav polimerne mješavine, utječe i toplinska povijest uzorka, odnosno različita temperatura očvršćivanja koja uzrokuje promjenu površine a time i tribološkog svojstva. [9]



Slika 8 Prikaz ispitivanja trenja[9]

Tribološko trošenje polimernih materijala razlikuje četiri vrste: abrazijsko, adhezijsko, trošenje zbog kemijske promjene i trošenje zbog zamora materijala. Abrazijsko trošenje je za polimere posebno zanimljivo, njegova osnova je brazdanje i rezanje površina tvrdih čestica ili nepravilnih izbočina na površini. Vrlo važna komponenta trenja je osnovni mehanizam trošenja, a to je upravo adhezija. Proces trošenja adhezije uključuju stvaranje adhezijskih veza koje karakteriziraju njihov rast, a isto tako i prekid kada se prenosi materijal s jedne površine na drugu. Trošenje se također može definirati kao neželjeni gubitak materijala s površina koje nastaje zbog mehaničkih interakcija. [9]



## 2.5 Primjena polimernih materijala

Polimeri imaju specifična svojstva i primjenjuju se gotovo u svim područjima ljudske djelatnosti i njihova upotreba kontinuirano raste. Danas svaki moderan proizvod sadrži barem malo plastike.

Tablica 2. Prikaz nekih područja primjene polimernih materijala[1]

Naziv dijela	Osnovni zahtjevi	Primjenjivi polimerni materijali
ZUPČANICI, LANČANICI, KLIZNI LEŽAJI	niski faktor trenja, otpornost na trošenje	poliamidi, poli(oksimetilen), polietilen visoke gustoće, visokomolekulni polietilen
KLIZNI LEŽAJI KLIZNE STAZE	prigušivanje vibracija, dobra obradljivost	visokomolekulni polietilen, polimerni kompoziti na osnovi fenol-formaldehidne smole
CIJEVI, ELEMENTI CJEVOVODA	niska gustoća (mala težina), kemijska postojanost	polietileni, poli(propilen), poli(vinilklorid)
OBLOGE TARENICA, KOČNICA I TARNIH SPOJKI	otpornost na trošenje, znatan i jednoličan faktor trenja, prigušivanje vibracija	polimerni kompoziti

Općenito, odabir materijala temelji se na zadanim zahtjevima i poznavanju svojstava materijala. Velik broj polimernih materijala zbog svojih svojstava omogućuje tehničku primjenu u raznim područjima. Polimerni materijali imaju svoje prednosti i nedostatke.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci polimernih materijala[4]

Prednosti	Nedostaci
Mala gustoća	Laka zapaljivost
Dobro gušenje vibracija	Podložnost starenju
Dobra kemijska postojanost	Utjecaj prerade na svojstva
Dobra otpornost na trošenje	Ovisnost svojstava o vanjskim utjecajima
Mali faktor trenja	Mali modul elastičnosti
Lako oblikovanje	Neisplativa izrada manjeg broja proizvoda

### 3. OBRADA POLIMERNIH MATERIJALA ODVAJANJEM ČESTICA

Odlika polimernih materijala je da se uglavnom mogu izravno oblikovati u gotovi dio, bez dodatnih obrada. Ali ipak postoje situacije kada se polimerni materijal podvrgava obradi odvajanjem čestica. Oprema i komponente za obradu polimernih materijala su vrlo slične onima koje se koriste pri obradi drveta i mekih metala.

Odvajanje čestica se događa na mjestu gdje se susreću obradak i alat na reznome mjestu. Obradak i alat se označuju kao tribološki par. Za ostvarivanje procesa odvajanja potrebno je relativno gibanje između alata i obratka, odnosno glavno gibanje koje daje brzinu rezanja i pomoćno, koje se najčešće dijeli na posmično i dostavno. Najveći dio energije troši se na oblikovanje odvojene čestice i svladavanje trenja. Pritom nastala toplina odvodi se iz tribološkog para s pomoću odvojene čestice, rashladnog medija, medija za ispiranje, maziva te zračenjem i konvekcijom, a dio topline ostaje u alatu i obratku. Pod pojmom odvajanje čestica podrazumijevaju se postupci tokarenja, glodanja, bušenja, blanjanja, razvrtavanja, pravolinijskog i kružnog rezanja, brušenja, poliranja, graviranja te ostali postupci karakteristični za obradu metala i drva pri kojima se smanjuju početne izmjere obradka. [4]

Postupci odvajanja čestica rijetko se koriste za izradu polimernih materijala. Puno više se koriste pri izradi probih obradaka (prototipova) te manjih serija proizvoda. Znatno češće se tvorevina izrađena jednom od kontinuiranih ili cikličkih postupaka praoblikovanja i preoblikovanja podvrgava daljnjoj obradi i to često obradi odvajanjem čestica radi uklanjanja srha ili postizanja željene geometrije. Problem koji se prvi pojavljuje pri obradi odvajanjem čestica je povećanje temperature zbog trenja. Prekomjerna toplina koja se stvara tijekom rezanja, odnosno samim zagrijavanjem alata, može uzrokovati taljenje i stvaranje loše kvalitete površine. [4]

Za obradu odvajanjem čestica polimernih materijala najčešće se koriste plastomeri i duromeri. Dio plastomera je elastičan i stoga su dovoljno dobro žilavi da budu obradljivi kod velikih brzina rezanja. Plastomeri se vrlo često koriste za strojnu obradu postupcima tokarenja i glodanja. Izrađeni su od termoplastičnih smola i raznih aditiva. Duromeri su za razliku od elastomera i plastomera, stabilniji s obzirom na deformaciju, pa su zbog toga povoljniji za strojnu obradu. [1]

Za uspješnu obradu polimera odvajanjem čestica potrebno je odabrati zadovoljavajući konstrukcijski materijal i metode obrade koje odgovaraju za taj materijal. Kod planiranja obrade polimernih materijala potrebno je uzeti u obzir neke faktor: [1]

- Tip polimernog materijala koji će se obrađivati- fizička svojstva materijala, čvrstoću, kemijsku otpornost, cijenu materijala. Potrebno je još uzeti u obzir kako materijal podnosi naprezanja tijekom strojne obrade,
- Termalna svojstva polimerni materijali imaju nižu temperaturu taljenja od metala, pa je ključno koristiti sredstvo za hlađenje (SHIP) i podmazivanje tijekom procesa obrade polimera,
- Stezanje kod procesa obrade polimerni materijali imaju manju krutost od metala, zato dolazi do vibracija koje mogu uzrokovati puknuća i oštećenja na površini materijala,
- Alati za obradu moraju biti izuzetno oštri. Standardne rezne pločice sa oštrim reznim kutevima su prihvatljive za kratkotrajnu obradu, a za dugotrajnu obradu preporuča se pločica od volframovog karbida ili dijamantna.

### **3.1 Svojstva alata za obradu polimernih materijala odvajanjem čestica**

Prilikom obrade bi se trebalo izbjegavati visoko zagrijavanje alata, koje nepovoljno utječe na svojstva obrađivanog materijala. Potrebno je pravilno odabrati rezni brid, dovoljno velik slobodni kut alata, osigurati jednoliko odvođenje čestice, dobro hlađenje alata i mali posmak oštrice alata. Kod svake obrade bitno je koristiti odgovarajući materijal i geometriju alata za rezanje s vrstom polimernog materijala. [1]

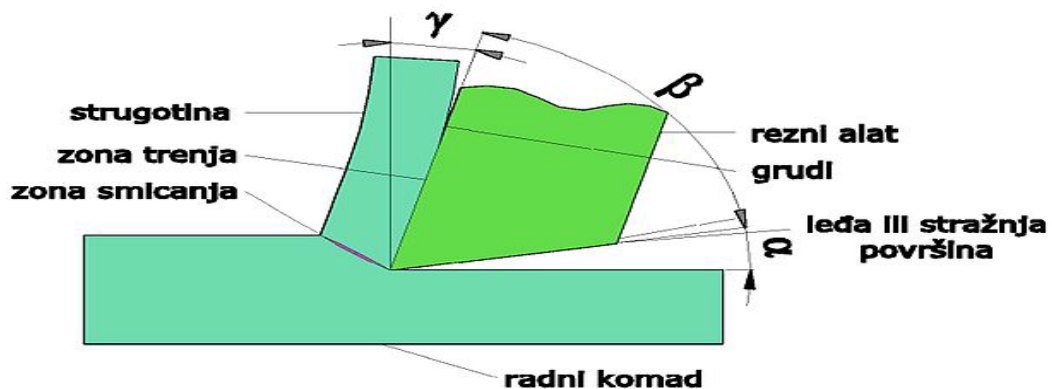
Mjerenje na alatima se mora raditi vrlo oprezno, zbog širenja materijala prilikom zagrijavanja alata tj. samog obratka. Osnovni oblik alata kod obrade polimernih materijala s reznom oštricom je klin.

Razlikujemo alate s: -jednom oštricom(noževi),

-više oštrica(glodala, svrdla),

-mnogo oštrica(brusne ploče).

Alate za obradu polimera karakterizira veliki prednji kut alata, što snižava potrebni rad rezanja. Zbog niskog vlačnog modula moramo koristiti vrlo oštre rezne alate. [1]



Slika 9 Rezni alat s jednom oštricom(nožem) [10]

Razvijena toplina prilikom obrade se zbog niske toplinske provodnosti polimera odvodi uglavnom u rezni alat (99,2-99,8%), a ostatak se zadržava u površinskom sloju samog obratka. To dovodi do porasta temperature na površini obratka i do smanjenja obradljivosti. Količina razvijene topline može se sniziti i poliranjem prednje plohe oštrice reznog alata. Prilikom obrade plastomera radna temperature iznosi do 60°C, a kod obrade duromera oko 150°C. [1]

Kako bi se zaustavilo prekomjerno zagrijavanje alata u području obrade treba se pridržavati sljedećih uputa: [1]

- Koristiti vrlo oštre alate i održavati ih oštrima,
- Osigurati da alat bude u stanju rezanja a ne struganja,
- Osigurati dovoljno velik slobodni kut između stražnje površine i obradive površine alata,
- Imati pod kontrolom brzinu rezanja i posmak odabrane za obradu,
- Koristiti male posmake oštrice alata,
- Koristiti rashladne tekućine u slučaju relativno dužih obrada,
- Osigurati jednoliko odvođenje čestica.

## **3.2 Hlađenje alata kod obrade odvajanjem čestica polimera**

Hlađenje alata kod obrade polimera je od izuzetne važnosti za kvalitetu same obrade. Osnovno sredstvo za odvođenje topline iz zone obrade je komprimirani zrak, jer se njime ne onečišćuje obradak te je poboljšano odvođenje strugotine. Kod obrada koje zahtijevaju bolje hlađenje koristi se voda ili tekućine na bazi vode. Ulja i mješavine koje se koriste pri obradi metala trebalo bi izbjeći jer postoji mogućnost smanjenja kvalitete površine i potrebe njenog naknadnog čišćenja. Kod nekih vrsta polimera ne smijemo koristiti vodu kao sredstvo za hlađenje jer apsorpcijom vlage može doći do pojave bubrenja kod nekih materijala kao što su npr. polietilen, polipropilen. Kod materijala koji su prilikom obrade lako zapaljivi savjetuje se korištenje vode kao sredstva za hlađenje. [11]

## **3.3 Načini obrade odvajanjem čestica**

U ovom poglavlju biti će opisani sljedeći načini obrade odvajanjem čestica:

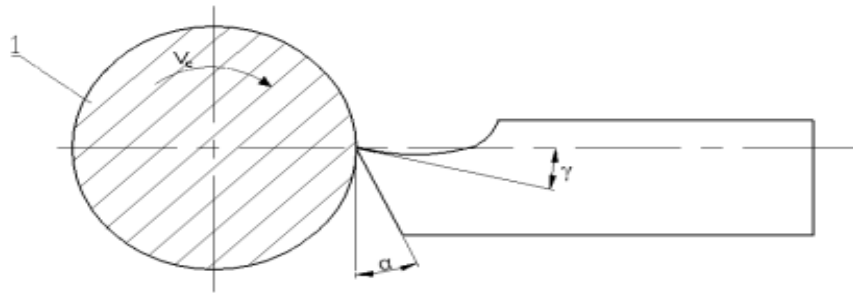
- Tokarenje,
- Bušenje,
- Razvrtavanje,
- Piljenje,
- Glodanje.

### **3.3.1 Tokarenje**

Tokarenje je postupak obradbe odvajanjem čestica, kojim se ponajprije oblikuju rotacijski simetrični i okrugli dijelovi. Provodi se na alatnim strojevima tokarilicama, pri čemu je glavno gibanje kontinuirana rotacija obratka oko stalne osi, a pomoćno gibanje (posmak) ravnocrtna translacija alata. Postupak tokarenja polimernih materijala je sličan kao kod obrade metala, razlika je samo u veličini kutova alata i brzini obrade. Razlog preciznog tokarenja polimera je sprečavanje progiba. Upotrebljavaju se mali posmaci kako bi se spriječilo prekomjerno zagrijavanja, te brzine rezanja do 180 m/min. Višak materijala prilikom rezanja

smanjit će kvalitetu obrade materijala. Korištenjem usisnih crijeva trebalo bi ukloniti odvojene čestice iz zone rezanja. [11]

Prilikom obrade duromera ne očekujemo glatku završnu obradu. Procedura za obradu duromera slična je kao kod obrade mesinga, samo što je trošenje alata puno izraženije. Maziva se rijetko koriste, ali zračne mlaznice u zoni obrade mogu pomoći pri provodnosti topline.



Slika 10 Prikaz geometrije alata za tokarenje polimera[1]

1 – polimerni obradak,  $-V_c$  brzina rezanja (obradka),  $\alpha$  – stražnji kut kut,  $\gamma$  - prednji kut

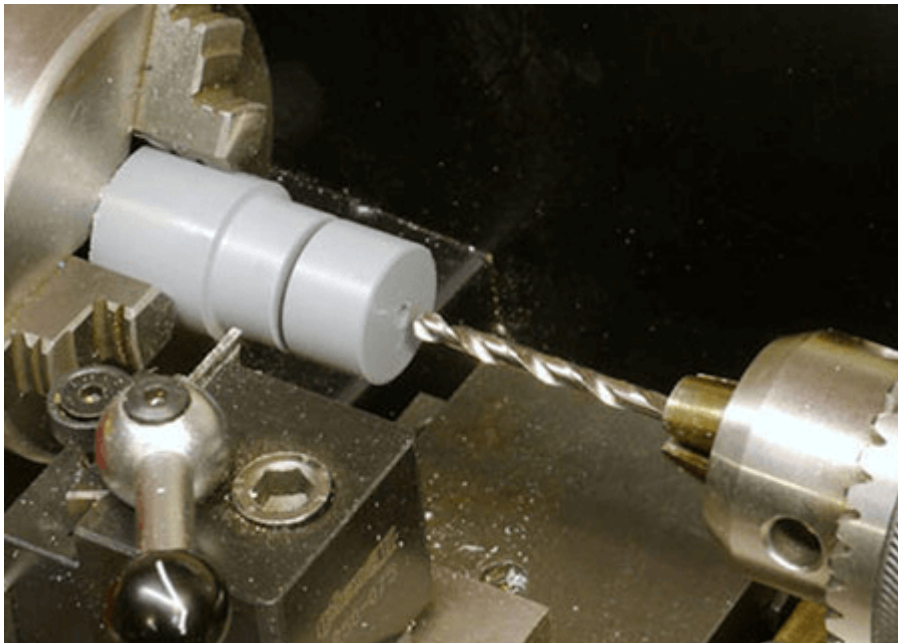
Sile rezanja ovise o prednjem kutu, debljini materijala rezanja, brzini rezanja i temperaturi. Na nižim brzinama sile rezanja su proporcionalne debljini rezanja. Sile rezanja se smanjuju kada vrijednost prednjeg kuta alata prelazi iz negativne u pozitivnu vrijednost. Transformacija sile rezanja s pozitivnim prednjim kutom utječe na izgled odvojene čestice od kontinuirane do diskontinuirane. Čestice koje su dobivene pozitivnim prednjim kutom alata spadaju u diskontinuirane lomljive čestice. [1]



Slika 11 Prikaz tokarenja polimernog materijala[12]

### 3.3.2 Bušenje

Bušenje polimernih materijala je proces u kojem se razvija najviše topline od svim procesa obrade odvajanjem čestica. Odvođenje topline je ključno za smanjenje naprezanja u obrađivanom komadu. Za bušenje polimera svrdla moraju biti održavana vrlo oštroma jer u suprotnom će se unositi visoki nivo naprezanja u obradak koji se obrađuje. Prije početka bušenja preporučuje se operacija predbušenja. Za bušenje manjih provrta koriste se HSS svrdla. Potrebno je osigurati pouzdano stezanje, kako ne bi dolazilo do pucanja polimernih materijala. Posmičnu brzinu kod bušenja treba sniziti prilikom izlaska svrdla iz obrađivanog materijala. [1]



Slika 12 Prikaz bušenja polimernog materijala[13]

Urezivanje navoja je proces izrade spiralnih utora u postojećoj rupi. Ureznica ulazi okomito u okruglu rupu određenim brojem okretaja te određenim posmakom, koji mora odgovarati koraku navoja. Širina obrade samog navoja treba biti minimalno povećana, a visina obrade navoja treba se malo smanjiti zbog elastičnog povrata materijala. To posebno vrijedi za neke mekše plastomere. Navoji moraju biti kvalitetno polirani i preporučuje se korištenje kromiranja. Za urezivanje navoja koriste se specijalne ureznice s dvije oštrice. Kod narezivanja navoja upotrebljava se karbidna rezna pločica s četiri do pet završnih prolaza. [11]

### 3.3.3 Razvrtavanje

Nakon operacije bušenja, razvrtavanje se može postići posebnim alatima, ali moramo paziti da budu jako oštri. Preporučuje se zavojiti kanali razvrtala i hlađenje vodom.

Tablica 4. Režimi rada prilikom razvrtavanja[11]

Polimer	Čvrstoća	Stanje	Brzina rezanja (m/min)	Posmak (mm/okretaj)
Akrili, acetali, polistiren, polikarbonat	60-120 $R_m$	Lijevani, prešani ili ekstrudirani	20-40	A
ABS, polipropilen, polietilen, celulozni acetat	50-120 $R_r$	Lijevani, prešani ili ekstrudirani	30-50	A
Najloni	78-120 $R_r$	Prešani ili ekstrudirani	20-50	A
Epoksidi, malamini, fenoli	100-128 $R_m$	Lijevani ili prešani	20-40	A
Silikoni	15-65 $R_m$	Lijevani ili prešani	14-26	A
Poliimid	40-50 $R_e$	Prešani ili ekstrudirani	20-40	A
Poliuretan	55-75 $R_m$	Lijevani	30-50	B
Polibutadien, tiofen	40-100 $R_r$	Lijevani	20-40	A

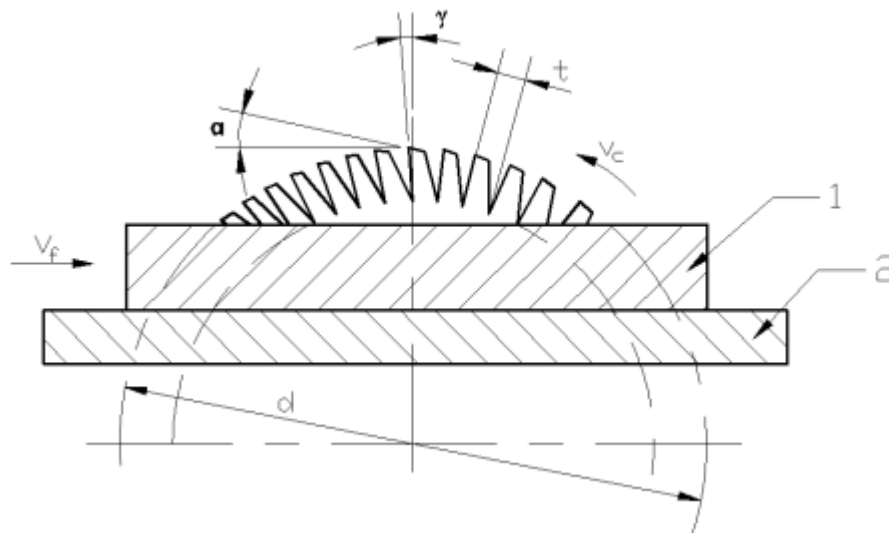
### 3.3.4. Piljenje

Za piljenje polimernih materijala koriste se kružne i tračne pile. Preporuča se obavezno hlađenje zbog toga što prilikom obrade dolazi do velikog zagrijavanja materijala. Razlika u odnosu na rezanje metalnih materijala je što se polimer zbog razvijene topline može topiti. Brzine rezanja i posmaci ovise u vrsti polimernog materijala. Pile moraju biti jako oštre, to se posebno odnosi kod obrade duromera. [1]

Tračne pile koristimo u raznim područjima piljenja polimera različitih dimenzija, a rez je izuzetno ravan i pravilan, dok stolne pile koristimo za veće debljine reza.



Preporučaju se pile izrađene od karbida, a odvojene čestice treba ukloniti usisnim crijevima u zoni rezanja.



Slika 13 Prikaz alata za rezanje polimernih materijala[11]

1 – polimerni materijal, 2 – radni stol,  $V_c$ – brzina kretanja alata,  $V_f$ – brzina kretanja obratka,  $\alpha$  – stražnji kut,  $\gamma$  – prednji kut,  $t$  – razmak zuba alata,  $d$  – promjer kružne pile

Najveći problem piljenja polimera je strugotina, koje se može uhvatiti oko kotača i listova tračne pile, rastopiti i uzrokovati da oštrica pile odluta i ne reže pravilno. Ako se radi puno rezanja, preporučuju se povremene pauze od rezanja i često čišćenje same strugotine.

### 3.3.5 Glodanje

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se obavlja alatima s više jednakih oštrica, odnosno glodala. Izvodi se pretežno na alatnim strojevima uglavnom su to glodalice te obradnim centrima, glavno gibanje je kružno kontinuirano te je pridruženo alatu. Posmično je gibanje kontinuirano te je najčešće pridruženo obratku. Glodanje je najrasprostranjeniji način obrade jer se tim postupkom mogu na razne načine točno obraditi i ravne i oble površine, navoji, te zubni i vijčani profili. Glodanjem se postiže visoka proizvodnost strojne obrade, te široka iskoristivost u serijskoj i masovnoj proizvodnji. [14]

Postupci obrade odvajanjem čestica glodanjem mogu se podijeliti prema nekoliko različitih kriterija kao što su: [14]

1. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine:

- Grubo glodanje,
- Završno glodanje,
- Fino glodanje.

2. Prema kinematici postupka:

- Istosmjerno,
- Protusmjerno.

3. Prema položaju reznih oštrica na glodalu:

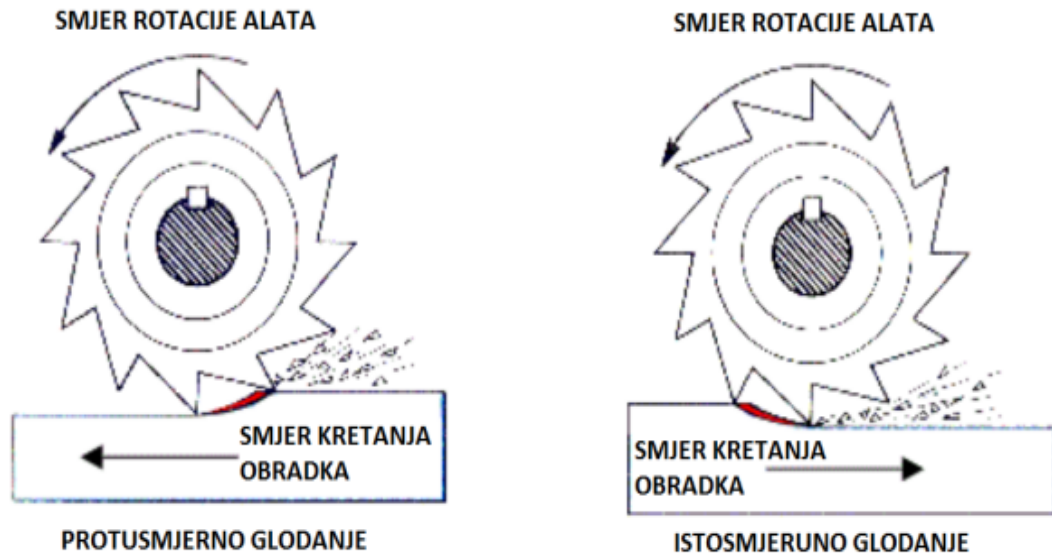
- Obodno,
- Čeono.

4. Prema obliku obrađene površine

- Linearno,
- Kružno,
- Profilno (utori i profili),
- Oblikovano (kopirno i 3D),
- Dinamično.

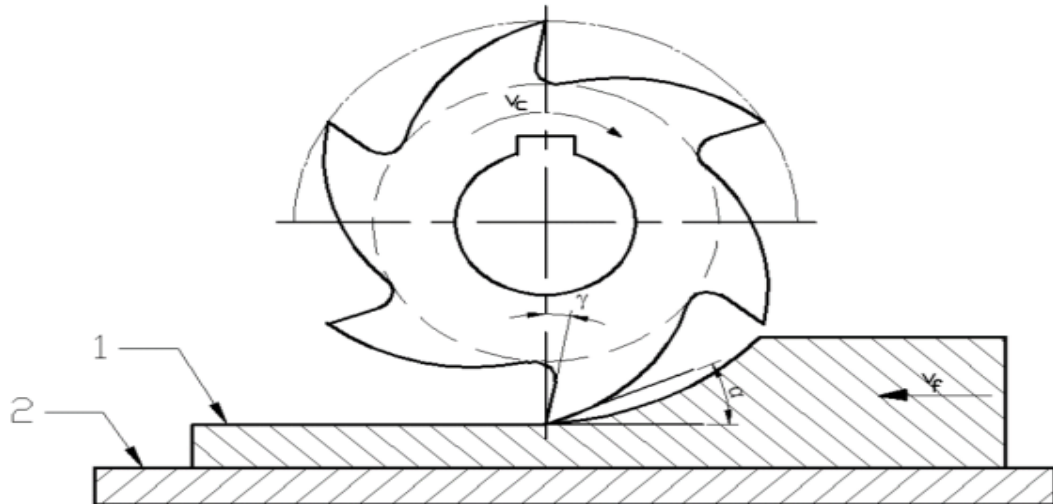
Tijekom cijelog procesa glodanja, sila rezanja jedan je od glavnih faktora, pa je učinkovita i precizna vrijednost sile rezanja ključna za odabir parametara strojne obrade, kao što su brzina posmaka i broj okretaja vretena. Kod protusmjernog glodanja radni komad kreće se suprotno rotacije alata, što rezultira malom debljinom strugotine na početku zahvata koja se zatim povećava do izlaska zuba glodala iz zahvata. Sile rezanja kod istosmjernog glodanja nastoje povući radni komad prema

glodalu koje je pritegnuto u prihvata. Kod istosmjernog glodanja obično se postiže bolja površinska obrada zbog manjeg sloja rezanja na kraju. [14]



Slika 14 Načini obrade kod procesa glodanja[14]

Glodanje polimernih materijala se odvija slično kao kod obrade metala. Kvaliteta izrađene površine se dobiva smanjenjem posmaka neovisno o dubini rezanja. Prilikom obrade polimera više se primjenjuje istosmjerno glodanje da bi se spriječilo spaljivanje materijala. Obradak mora biti pravilno stegnut da se osigura rezanje, a ne savijanje obradka. Velika brzina vrtnje vretena i posmaci su mogući uz pravilno stezanje. Kod stezanja je potrebno paziti da ne dođe do deformacije materijala uslijed sila stezanja. Savjetuje se korištenje mekih pakni, jer kod prevelikih stezanja će doći do deformacije materijala. Standardna prstasta glodala koriste za grubu obradu materijala. Za završnu obradu se koriste glodala sa 2 ili 4 rezne oštrice ovisno o materijalu i svojstvima odvojene čestice. Za utore preporuča se korištenje glodala s radijusom kada je god to moguće da se smanje oštri rubovi koji su koncentrotori naprezanja. [1]



Slika 15 Prikaz alata za glodanje polimernog materijala[1]

1 – polimerni obradak, 2 – radni stol,  $V_f$  – brzina posmaka,  $V_c$  – brzina rezanja (glodala),  $\alpha$  – stražnji kut,  $\gamma$  – prednji kut

Tablica 5. Parametri glodanja polimernih materijala[11]

Polimer	Čvrstoća	Stanje	Dubina reza (mm)	Alat od brzoreznog čelika		Alat od tvrdog metala	
				Brzina rezanja (m/min)	Posmak po zubu (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Posmak po zubu (mm)
Akrili, acetali, polistiren, polikarbonat	60-120 $R_m$	Lijevani, prešani ili ekstrudirani	1	120	0,13	200	0,13
			4	105	0,20	185	0,18
			8	90	0,25	170	0,23
ABS, polipropilen, polietilen, celulozni acetat	50-120 $R_r$	Lijevani, prešani ili ekstrudirani	1	135	0,13	230	0,10
			4	120	0,20	215	0,18
			8	105	0,25	200	0,23
Najloni	78-120 $R_r$	Prešani ili ekstrudirani	1	150	0,15	260	0,15
			4	135	0,25	230	0,20
			8	120	0,36	215	0,25
Epoksidi, malamini, fenoli	100-128 $R_m$	Lijevani ili prešani	1	150	0,15	260	0,10
			4	135	0,20	230	0,15
			8	105	0,25	215	0,20
Silikoni	15-65 $R_m$	Lijevani ili prešani	1	60	0,13	145	0,10
			4	53	0,20	130	0,15
			8	38	0,25	115	0,20
Poliimid	40-50 $R_e$	Prešani ili ekstrudirani	1	150	0,13	260	0,13
			4	135	0,20	230	0,20
			8	105	0,25	200	0,25
Poliuretan	55-75 $R_m$	Lijevani	1	90	0,13	160	0,10
			4	76	0,20	145	0,15
			8	60	0,25	130	0,20
Polibutadien, tiofen	40-100 $R_r$	Lijevani	1	76	0,13	145	0,10
			4	60	0,20	130	0,15
			8	46	0,25	115	0,20

### 3.4. Parametri obrade kod tehnologije glodanja

Parametri obrade kod glodanja su brzina rezanja, dubina rezanja te posmak. Određuju se ovisno o karakteristikama alata i materijala obratka, kvaliteti obrađivane površine te ovisno o snazi i broju okretaja radnog stroja. Kod fine obrade koriste se veće brzine, a manje dubine rezanja i posmaci, dok je kod grube obrade obrnuta situacija. [15]

Brzina rezanja ( $V_c$ ) je obodna brzina kojom oštrica odvaja čestice prilikom obrade. To je putanja alata kojom glavna oštrica prijeđe po obrađivanoj površini u jedinici vremena. Vrijednost brzine rezanja kod glodanja uzimamo prema vrsti materijala koji obrađujemo, načinu obrade i vrsti materijala od kojeg je napravljeno glodalo. Odabirom velike brzine rezanja uzrokuje veliko trošenje alata, lom alata i pregrijavanje obratka kojemu se nakon hlađenja mogu promijeniti dimenzije. [15]

Formula za izračun brzine rezanja kod glodanja glasi:

$$V_c = \frac{D \cdot n \cdot \pi}{1000} \quad (m/min) \quad (1)$$

gdje je:  $D$  - promjer alata

$n$  - broj okretaja alata

Dubina rezanja  $A_p$  [mm] definirana je kao veličina čestica odvojenih od materijala prilikom obrade. Najbolja obrada je ona sa što manjim brojem prolaza. Osnovna zadaća je odvojiti što veću količinu čestica, ali uz prihvatljivu geometrijsku točnost i kvalitetu obrađene površine.

Kod glodanja definiramo tri različite veličine za posmak a to su :

- posmična brzina ( $V_f$ )
- posmak po zubu glodala ( $f_z$ )
- posmak po jednom okretu glodala ( $f$ )

Posmak predstavlja dužinu za koju se glodalo pomakne u toku jednog okretaja. Hrapavost površine, sile na zubima te presjek odvojenih čestica povećavaju se porastom vrijednosti posmaka. [15]

Izraz za posmak kod glodanja glasi:

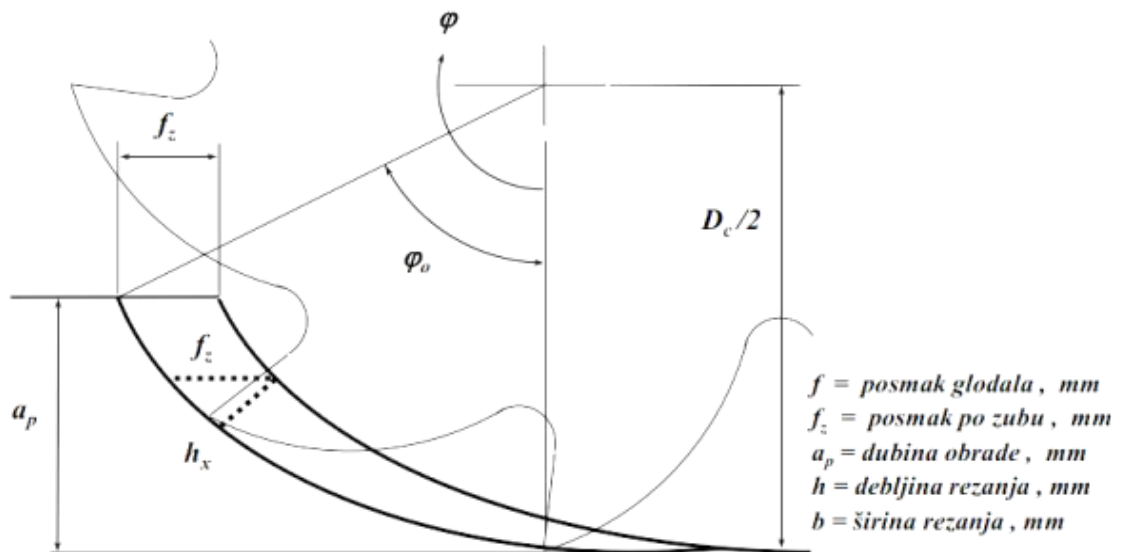
$$f = f_z * z \text{ (mm/okr)} \quad (2)$$

gdje je:  $f_z$ - posmak po zubu

$z$  - broj zuba

Treba spomenuti i ostale bitne veličine obrade :

- debljina rezanja ( $h$ ) – udaljenost između uzastopnog položaja određenih površina putem jednog okretaja ili jednog prolaza alata.
- širina rezanja ( $b$ ) – udaljenost između površine koja se obrađuje i površine koja je obrađena.



Slika 16 Prikaz parametara obrade glodanjem[15]

## 4. STEZNE NAPRAVE

Stezne naprave koriste se za prihvat i fiksiranje jednog ili više obradaka na stol za obradu, a koriste se tijekom operacija montaže, zavarivanja i obrade odvajanjem čestica. Pri stezanju, obradak se nalazi na zadanoj poziciji s obzirom na alat. Glavna zadaća stezne naprave je zadržavanje točnog položaja stegnutog predmeta pod utjecajem sila tijekom same obrade kako bi se osigurala dimenzijska točnost i kvaliteta. Naprava mora biti čvrsta da ne bi došlo do deformiranja uslijed djelovanja sile rezanja. Prilikom obrade mekših materijala, ukoliko je sila stezanja prevelika može doći do deformacija obratka, a kod niskih sila prilikom stezanja dolazi do vibracija. Odabir stezne naprave ovisi o mnogo čimbenika pa postoji puno naprava za različite alatne strojeve. [16]

Naprave služe kao pomagala koje se ne mogu samo kupiti, nego ih se posebno konstruira i izrađuje kako bi bile zadovoljavajuće prema zahtjevu obratka i stroja na kojem će se obrada vršiti. Naprave se izrađuju od konstrukcijskih čelika, čelika za poboljšanje ili alatnih čelika. Naprave mogu biti pogonjene mehaničkim, električnim, pneumatskim, hidrauličkim ili vakuumskim načinom. [16]

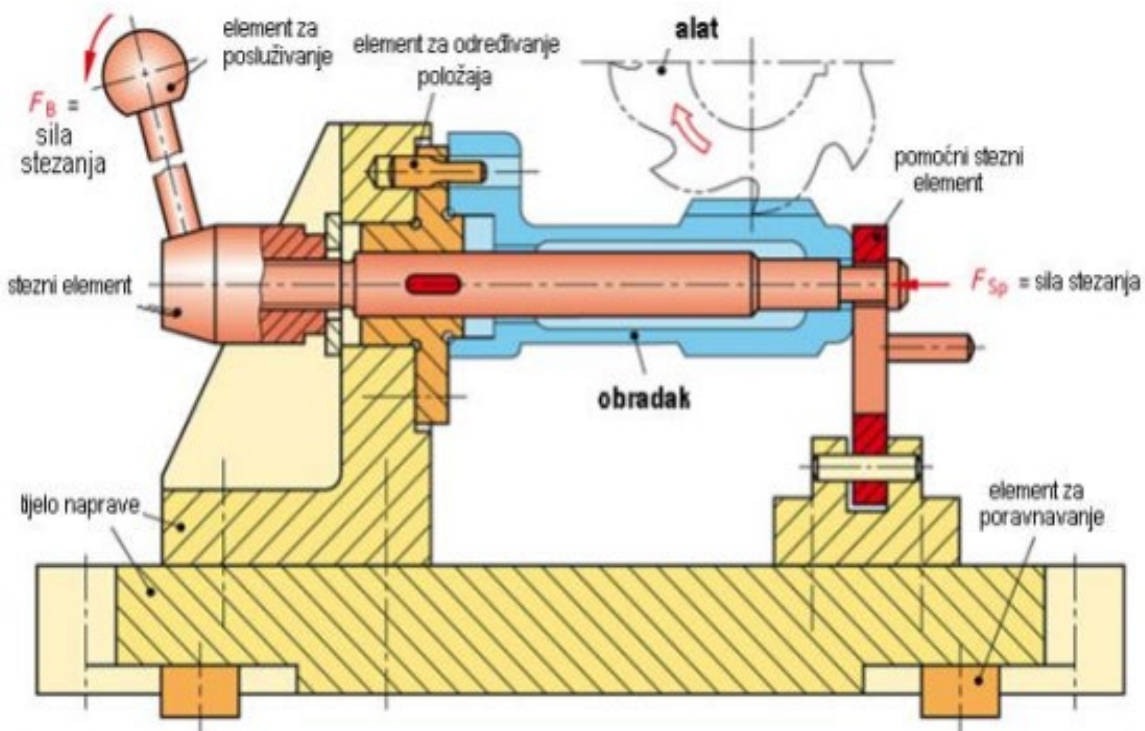
Zadaće koje stezne naprave moraju osigurati su:

- Brzo i sigurno stezanje obratka,
- Visoka točnost mjera i oblika,
- Smanjenje težeg fizičkog rada,
- Smanjenje nezgoda pri radu,
- Bolja iskorištenost strojeva,
- Automatizacija proizvodnje,
- Smanjenje neispravnih (škart) proizvoda.

## 4.1 Elementi stezne naprave

Ovisno o svojoj namjeni, sve naprave se sastoje od sljedećih konstrukcijskih elemenata: [17]

- elementi za određivanje položaja obratka (pozicioniranje, oslanjanje),
- elementi za stezanje,
- elementi za posluživanje,
- tijelo, kućište ili nosač naprave.



Slika 17 Elementi stezne naprave[17]

### 1) Elementi za određivanje položaja obratka

Elementi koji fiksiraju obradak i točno ga pozicioniraju, odnosno ograničavaju njegovo slobodno gibanje te na taj način obradak zadržava svoju poziciju. Za točan i siguran položaj obratka potrebna su barem 3 elementa za oslanjanje i 3 sile stezanja. Kod stezanja obratka važno je osigurati čistoću na elementima stezne naprave jer u suprotnom može doći do netočnog određivanja položaja. [17]



## 2) Elementi za stezanje

Elementi za stezanje sprečavaju pomicanje obratka za vrijeme obrade uslijed djelovanja sila rezanja, oni fiksiraju prethodno određen položaj obratka u napravi. Vrlo je važan način stezanja obratka zbog toga što točnost obrade ovisi o pravilnom stezanju. Obradak se ne smije pomicati od oslonca za vrijeme obrade, a sila stezanja treba biti što sličnije vrijednosti sili rezanja da bi se izbjegle deformacije i vibriranje obratka. [17]

## 3) Elementi za posluživanje

Služe za prijenos sile rukovatelja na dijelove stezne naprave. Glavni elementi za posluživanje su: stožasta i kuglasta ručica, vijak s pritegom, zvjezdasta, kuglasta, križna drška. Izbor elemenata zasniva se na tome da se omogući što lakša pokretljivost i rukovanje samom napravom.[17]

## 4) Tijelo, kućište ili nosač naprave

To je najvažniji element na koji su pričvršćeni ostali elementi stezne naprave. Mora biti pravilno učvršćeno tako da se smanje vibracije tijekom obrade i izbjegne pojava deformacije. Kod konstruiranja tijela stezne naprave važno je osigurati pravilno odvođenje strugotine i hlađenje pri obradi. Načini izrade ovisi o zahtjevima stezne naprave koji se mogu dobiti zavarivanjem, lijevanjem u jednom komadu ili spojem pomoću vijaka. [17]

## 4.2 Podjela stezних naprava

Prema postupku strojne obrade: [18]

- Za glodanje,
- Za bušenje,
- Za tokarenje,
- Za zavarivanje,
- Za lemljenje.

Prema području primjene

- jednonamjenska(za 1 određeni proizvod),

- višenamjenska(za različite proizvode) .

Prema broju stegnutih obradaka

- Za stezanje jednog obratka,
- Za stezanje više obradaka.

Prema složenosti

- Jednostavne-manja točnost, nepokretne, stezanje vijcima ili ekscentrom,
- Srednje složene-pomiču ili zakreću obradak, stežu više obradaka odjednom,
- Vrlo složene-diobene i okretne, pneumatski ili hidraulički pogon.

### **4.3 Naprave za tehnologiju glodanja**

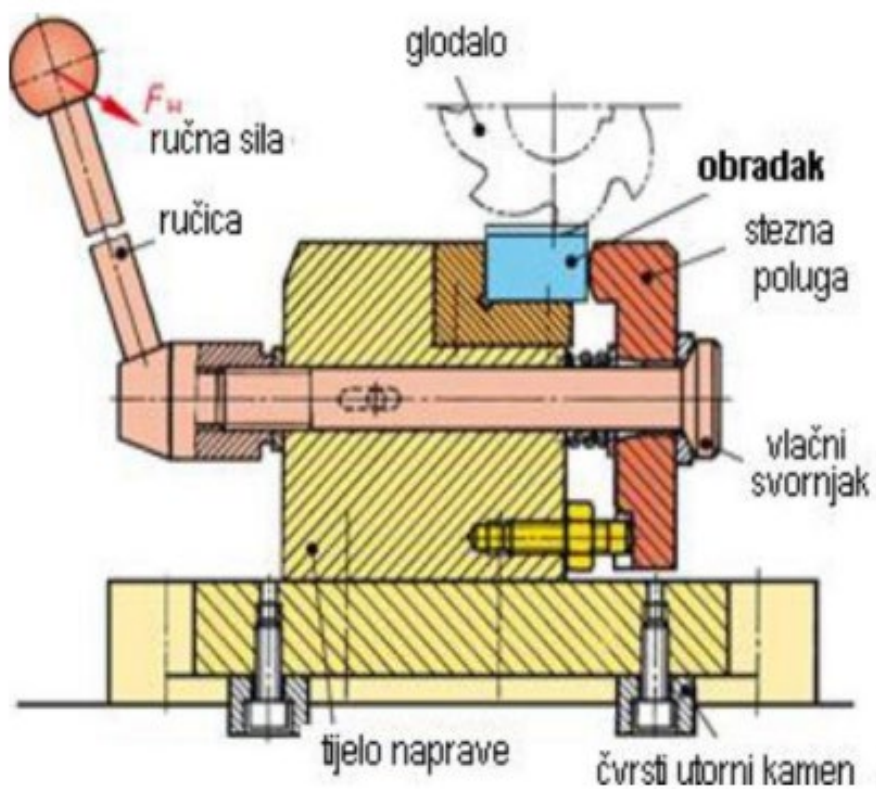
Naprave za glodanje su pretežno stezne naprave obratka, vođenje alata je preko radnog vretena glodalice. Stezanje i držanje obratka mora biti čvrsto i sigurno zbog velikih sila rezanja. Ako je moguće sila rezanja treba biti usmjerena prema čvrstom graničniku. [18]

U obzir treba uzeti sljedeća pravila kod stezanja: [18]

- Tijelo i stezni dijelovi trebaju biti što krući da se spriječi elastična deformacija,
- Sila stezanja treba biti dovoljno velika da se spriječi izbacivanje obratka iz naprave,
- Obradak treba položiti da se spriječi moguće savijanje,
- Naprava treba biti čvrsto i sigurno stegnuta za radni stol glodalice.

Namještanje glodala prema obratku najjednostavnije je pomoću prethodno napravljenog uzorka glodanja ili pomoću pripadajućeg kontrolnika. Za duge obradke prikladno je koristiti napravu pločastog oblika, kod koje se sile stezanja prenose

preko steznih poluga i kuka. Kod dužih naprava treba predvidjeti prolaznost glodala na ulazu u zahvat s obratkom i na izlazu iz njega.



Slika 18 Prikaz stezne naprave za glodanje[17]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provodilo se ispitivanje deformacija nastalih prilikom stezanja na tri različita materijala: PA (Poliamid), PE (Polietilen), POM-C (Polioksimetilen). Prva faza rada bila je napraviti stezni prihvata od polimernog materijala, stezni prihvata je napravljen u programu za CAD/CAM modeliranje: Fusion 360. Izrada steznog prihvata obavljena je na CNC-glodalici i stezanje priteznim silama odvijalo se u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu, završni korak je bio 3D skeniranje i usporedba sa početnim modelom.

Plan izrade obratka i mjerenja u eksperimentalnom dijelu:

- Odabir materijala,
- CAD/CAM stvaranje steznog prihvata,
- Odabir alata,
- Strojna izrada steznog prihvata uz postavljenje parametre obrade,
- Stezanje unutar prihvata sa različitim silama,
- Mjerenje deformacija pomoću 3D skeniranja.

### 5.1. Ispitivani materijali

#### 5.1.1. Poliamid

Poliamidi (PA) su kristalasti, uglavnom plastomerni materijali kojima ponavljane jedinice sadrže alifatske ili aromatske segmente povezane amidnim vezama. Poliamidi imaju visoko talište, dobru vlačnu čvrstoću, udarnu žilavost i otpornost prema otapalima, abraziji i umoru materijala. Postoje različite vrste poliamida a ovo su neke od najčešće korištenih vrsta: PA 6, PA 66, PA 12, PA 46.

PA 6 drugim imenom se naziva „Najlon“, te je on najčešće korišteni poliamid. Od njega se proizvode čvrsti i trajni proizvodi izvrsne savitljivosti i elastičnosti. Modificiranje poliamida se provodi kako bi se poboljšale određene karakteristike poput otpornosti na visoke temperature, otpornost na UV zračenje i mehanička svojstva. Tablica 6. prikazuje svojstva nekih vrsta poliamida.

Tablica 6. Karakteristike Poliamida[19]

<b>Materijal</b>	<b>PA 6</b>	<b>PA 66</b>	<b>PA 46</b>	<b>PA 12</b>
Temperatura staklišta, T <sub>g</sub> [°C]	45	47	72	37
Gustoća, ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.14	1.15	1.19	1.02
Modul elastičnosti, E [MPa]	3,300	3,500	3,300	1,800
Radna temepratura kod dugotrajne obrade, [°C]	100	100	130	110
Radna temepratura kod kratkotrajne obrade, [°C]	160	170	220	150
Udio upijanja vode, [%]	9.5	8.5	12	1.5

### 5.1.2. Polietilen

Polietilen je plastomerni materijal s najvećom proizvodnjom i primjenom, ima jednostavnu linearnu struktura u izduženim konformacijama koja omogućuje njegovu laku kristalizaciju, pa se polietilen morfološki sastoji od kristalnih i amorfnih područja, a o njihovu udjelu ovise i mehanička svojstva. Prema gustoći i određenim svojstvima, polietileni se mogu podijeliti na: PE visoke gustoće (HDPE) i PE niske gustoće (LDPE).

Polietilen je žilav, voskaste strukture, nepotpune prozirnosti i velikoga modula elastičnosti. Otporan je na vodu i većinu kemikalija, a na sobnoj temperaturi nije topljiv u otapalima. Povećanjem gustoće polietilena povećava se i modul elastičnosti te čvrstoća i kemijska postojanost. A time dobivamo smanjenje vrijednosti udarne žilavosti i propusnosti na plinove. Primjena polietilena je najviše zastupljena u izradi folija koje služe kao ambalažni materijal za prehrambene, farmaceutske, tekstilne i druge proizvode. Polietilen služi za izradu različitih kutija i spremnika za kućanstvo, velikih industrijskih spremnika, vodovodnih i dr. cijevi.

Tablica 7. Karakteristike Polietilena[19]

<b>Materijal</b>	<b>PE</b>
Temperatura staklišta, Tg [°C]	- 95
Gustoća, ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	0.96
Modul elastičnosti, E [MPa]	1,000
Radna temperatura kod kratkotrajne obrade, [°C]	90
Radna temperatura kod dugotrajne obrade, [°C]	90

### 5.1.3. Polioksimetilen

Polioksimetilen je polukristalne i poluamorfne građe pripada u skupinu plastomera visoke mehaničke čvrstoće i sposobnosti za oblikovanje. Polioksimetilen se dijeli u dvije skupine materijala: POM – H (Homopolimer) i POM – C (Kopolimer). POM–H ima bolja fizička i mehanička svojstva od POM–C materijala. Prikladniji je za primjene gdje su potrebna svojstva kao što su dobra otpornost na habanje i nizak koeficijent trenja. POM – C se može bolje obrađivati od POM – H, te je zbog toga najčešće korišteni POM materijal. Polioksimetilen se može strojno obrađivati, ultrazvučno zavarivati i lijepiti, a mehanička su mu svojstva postojana za vrijednosti temperature od –40 do 85 °C. Vrlo je cijenjen konstrukcijski materijal za izradbu dijelova strojeva i uređaja koji se primjenjuju u elektroindustriji, elektronici, strojarstvu, automobilskoj industriji.

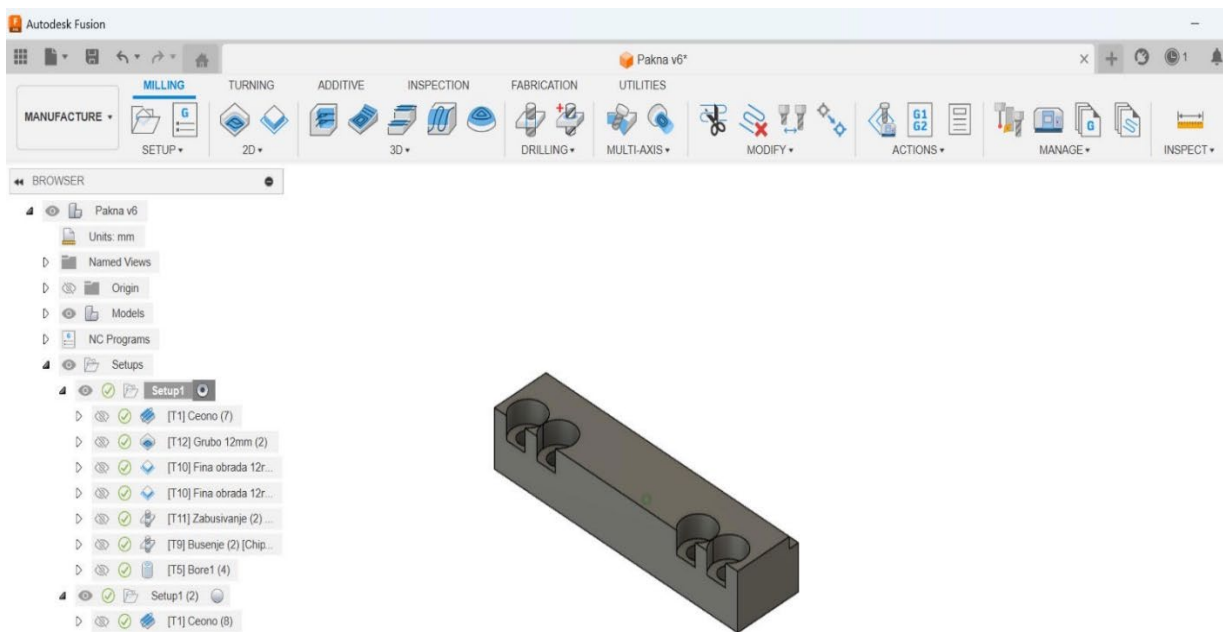
Tablica 8. Karakteristike Polioksimetilena[19]

<b>Materijal</b>	<b>POM – H</b>	<b>POM – C</b>
Temperatura staklišta, Tg [°C]	-60	-60
Gustoća, ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.43	1.41
Modul elastičnosti, E [MPa]	3,600	2,800
Radna temperatura kod dugotrajne obrade, [°C]	110	100
Radna temperatura kod kratkotrajne obrade, [°C]	150	140

## 5.2. CAD/CAM stvaranje steznog prihvata

Stezni priхват za ispitivanje se konstruirao i izradio pomoću programa Fusion 360. Program Fusion 360 razvijen je od strane tvrtke Autodesk, program omogućuje različite mogućnosti za 3D modeliranje, simulaciju i dokumentaciju. Može upravljati proizvodnim procesima kao što su obrada, glodanje, tokarenje i aditivna proizvodnja. Modele u programu Fusion 360 moguće je izraditi radom po nacrtu ili pak uvesti iz nekih drugih sličnih programa pa zatim na njima raditi neki oblik obrade.

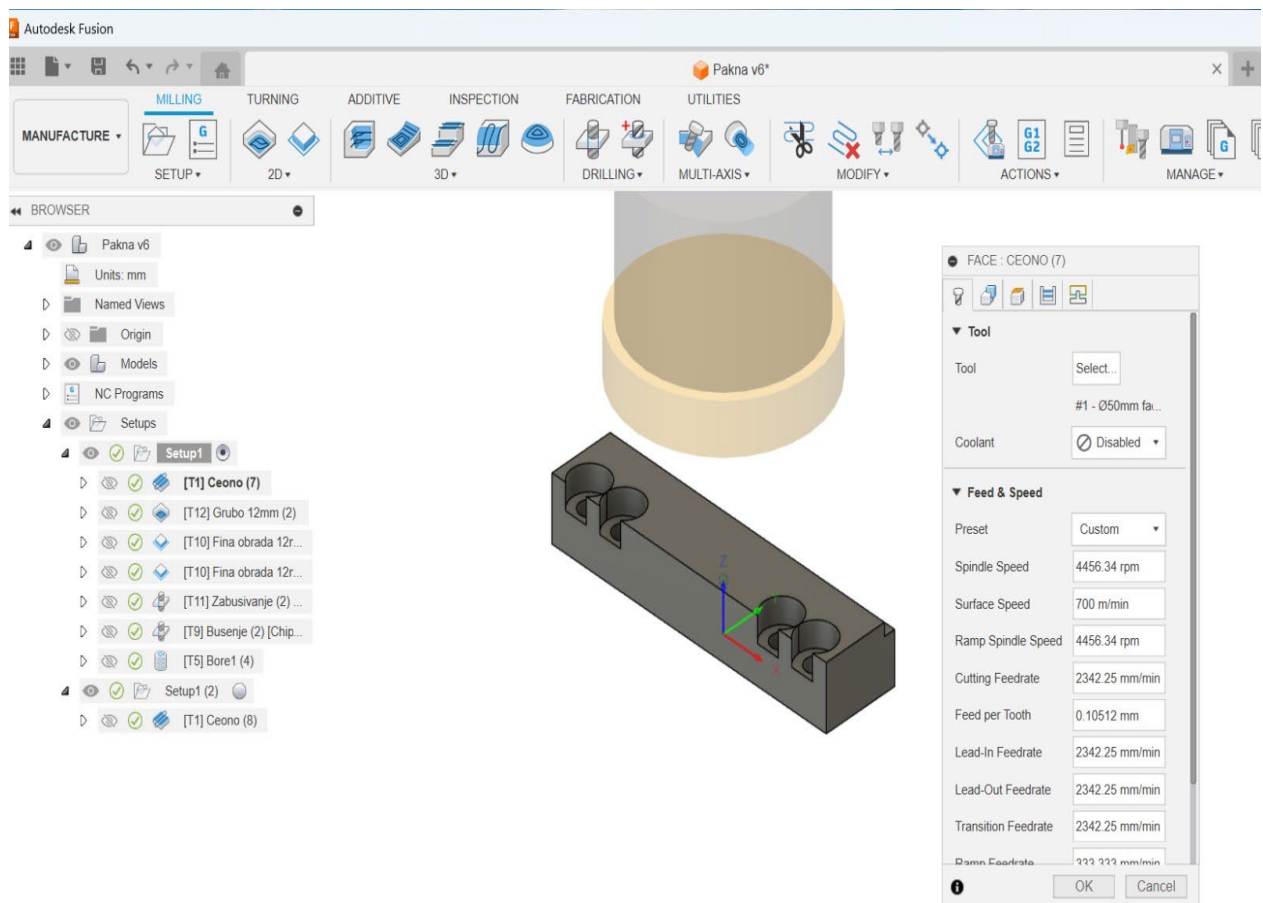
Početni korak je izrada steznog prihvata kao modela, korištena je ista geometrija za sve uzorke samo su tri različite vrste materijala. Slika 19. daje prikaz modela koji će kasnije biti izrađen strojnom obradom.



Slika 19 Prikaz modela u programu Fusion 360

Nakon što je model završen, sljedeći korak je izrada tehnologije za dobivanje uzorka. To podrazumijeva odabir alata, putanju alata, brzinu rezanja i dubine rezanja.

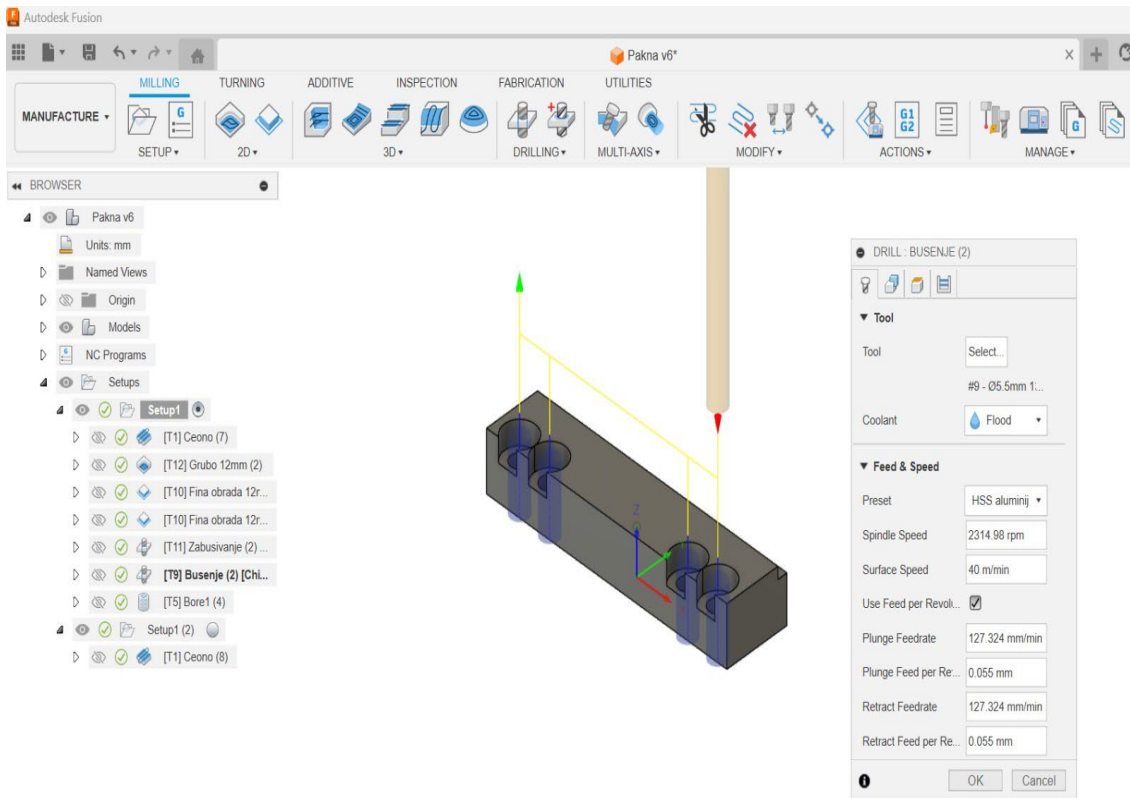
Pomoću CAM programa vrlo jednostavno je napravljen digitalni CAM model, kojim se može generirati numeričke kodove pomoću kojih se upravlja CNC strojevima. Sljedeća faza rada je generiranje samog koda, koji je najčešće u obliku G-koda kao standardni oblik koda za upravljanje CNC strojevima.



Slika 20 Prikaz modela u prvoj fazi obrade(čeonog glodanje)

U programu Fusion 360 odrađene su sve operacije izrade steznog prihvata te njihovi parametri u ovom slučaju parametri kod glodanja i bušenja materijala. Sama izrada sastoji se od čeonog glodanja, grube obrade, fine obrade, zabušivanja, bušenja i narezivanje navoja u provrte.





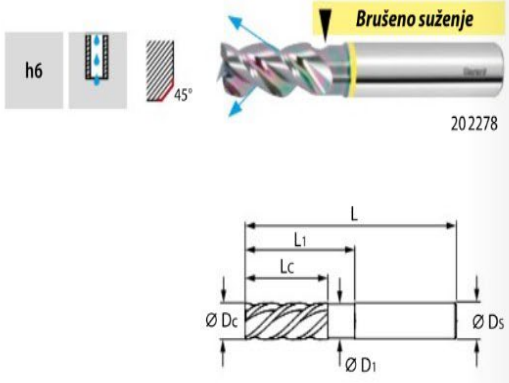
Slika 21 Prikaz modela u fazi bušenja provrta

Nakon završenih svih faza obrade u digitalnom obliku generiran je G-kod, koji je pomoću medija za prijenos podataka prebačen na CNC glodalicu koja se nalazi na Veleučilištu u Karlovcu. Slike 20. i 21. daju prikaz pojedinih faza obrada u CAM programu Fusion 360.

### 5.3. Odabir alata

Odabir alata za izvođenje strojne obrade na CNC glodalici u svrhu izrade steznog prihvata za eksperimentalni dio rada je od velike važnosti. Odgovarajućim alatima se postiže kvalitetna obrada površine, povećava se produktivnost i smanjuju troškovi proizvodnje.

Za izradu uzoraka korišteni su alati iz kataloga Hoffmann grupe, slike u nastavku prikazuju alate za sve operacije koje su izrađene na uzorcima za eksperimentalni dio rada.



**Brušeno suženje**

h6

45°

202278

ISO-kod: 202270-202278

Primjena/ v <sub>c</sub> [m/min]	Alu	Alu	Alu	PMMA	PE-HD	PA 66	PEEK	PF 31	AFK	PVDF	POM	PA 66	PEEK	PTFE	PEEK	Honey- comb Sandwich	Cu	CuZn					
	Alu	Alu	Alu	PMMA	PE-HD	PA 66	PEEK	PF 31	AFK	PVDF	POM	PA 66	PEEK	PTFE	PEEK	Honey- comb Sandwich	Cu	CuZn					
	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N				
202270-202278	480	440	400	200	160	200	150	130		180	160	150	130	160	300	160	200						

Slika 22 Prikaz VHM vretenasto glodalo[20]

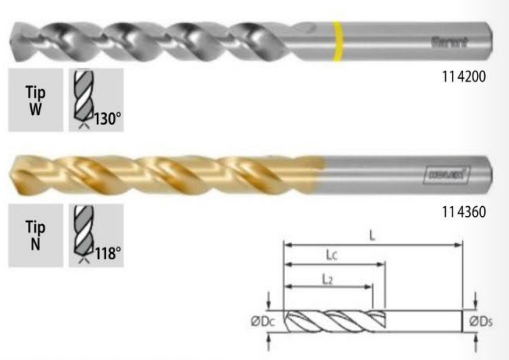
#### Spiralno svrdlo s cilindričnom drškom

Standardna debljina jezgre bez širenja jezgre.  
Precizno brušen vrh.

11 4200 – Brušena, široka užljebljenja s velikim kutom spirale.  
Svijetlo brušena površina.

11 4360 – **Profilno brušeno:**  
Velika koncentričnost i točnost dimenzija, svrdlo za serijsku proizvodnju.

**Preporuka: Maksimalna dubina bušenja:**  
 $L_2 = L_c - 1,5 \times D_c$



≥ 2 mm

Tip W

130°

114200

≥ 2,4 mm

Tip N

118°

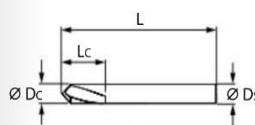

114360

Primjena/ v <sub>c</sub> [m/min]	Alu	Alu	Alu																			
	Alu	Alu	Alu																			
	N	N	N	P	P	P	P	P	H	H	H	H	H	M	M	S	K	N				
11 4200	70	45	40																			
11 4360	56	50	50	37	31	12	10							15	10	6	31	80				

Slika 23 Spiralno svrdlo s cilindričnom drškom za bušenje[20]

11 2010/2060 – **Visokoučinkovit NC zabušivač.**  
 Materijal alata izrađen postupkom metalurgije praha **ispunjava visoke zahtjeve** po pitanju vijeka trajanja i preciznosti centriranja. Izrazito velika otpornost na trošenje kod INOX čelika.

**Napomena:** Koristite broj okretaja za stvarni  $\varnothing$  rupe (a ne za općeniti vanjski  $\varnothing$  rupe).

Primjena/ $v_c$ [m/min]	Alu umjetni mat. c2222	Alu lijev > 10% Si	Alu lijev < 500 N	Alu lijev < 750 N	Alu lijev < 900 N	Alu lijev < 1100 N	Alu lijev < 1400 N	Alu lijev < 55 HRC	Alu lijev < 60 HRC	Alu lijev < 65 HRC	Alu lijev < 67 HRC	INOX < 900 N	INOX > 900 N	Ti > 850 N	GG(G)	CuZn	Uni	●	●	●	●	●
11 2000	70	45	40	30	25	10	8					12	8			80	●	●	●			
11 2010	80	50	45	33	28	12	10					14	10			88	●	●	●			
11 2020/2100	87	56	50	50	37	31	12	10				15	10	6	31	100	●	●	●			
11 2060	96	62	55	55	42	35	14	12				18	13	8	35	112	●	●	●			

Slika 24 Prikaz NC zabušivača[20]

#### 5.4. Strojna izrada steznog prihvata

Strojna izrada steznog prihvata se odvijala u prostorijama laboratorija Veleučilišta u Karlovcu, gdje je pomoću CNC glodalice izrađen stezni priхват od tri različite vrste polimernih materijala. Slika 25. prikazuje vanjski dio CNC glodalice.



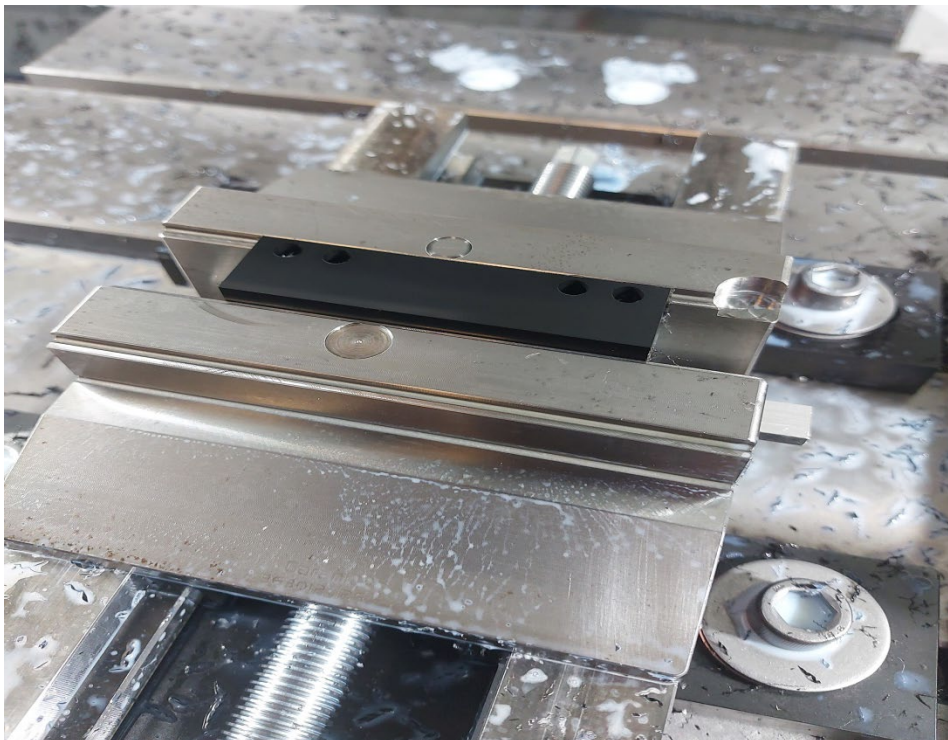
Slika 25 CNC glodalica DMU 50eco

Parametri CNC glodalice koja se koristila za izradu uzorka u eksperimentalnom dijelu radu, prikazani su u sljedećoj tablici:

Tablica 9. Parametri za CNC glodalicu DMU 50eco[21]

<b>Glavno vreteno</b>	<b><math>n_{max}</math>, [okr./min]</b>	<b>Moment, <math>M</math> [Nm]</b>	<b>Snaga, <math>P</math> [Kw]</b>
	8000	83	13
<b>Osi (3+2)</b>	Digitalno upravljani zakretni stol		
<b>Automatska izmjena alata</b>	Spremnik sa 16 alata		
<b>Upravljačka jedinica</b>	Siemens 810D powerline i ShopMil		
<b>Monitor</b>	15"		
<b>Veličina obratka za izradu</b>	500 x 450 x 400		
<b>Proizvođač</b>	DMG Mori		

Parametri obrade kao što su brzina rezanja i posmak su odabrani iz kataloga materijala koji se obrađuju u ovom eksperimentalnom radu, nakon odabira parametara napravljeno je pravilo stezanje i započela je strojna obrada.



Slika 26 Prikaz steznog prihвата tijekom strojne obrade

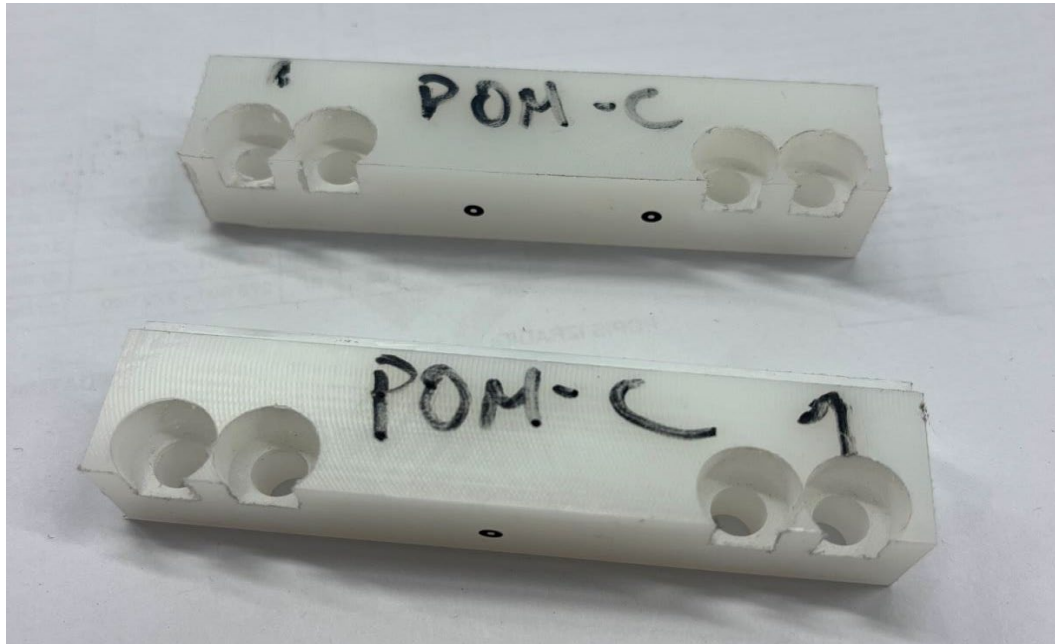
Nakon određivanja svih parametra obrade i pravilnog stezanja u stroju, dobiveni su gotovi stezni prihvat. Na sljedećim slikama prikazani su izrađeni stezni prihvat od tri različite vrste polimernih materijala.



Slika 27 Stezni prihvat od PA-Poliamid



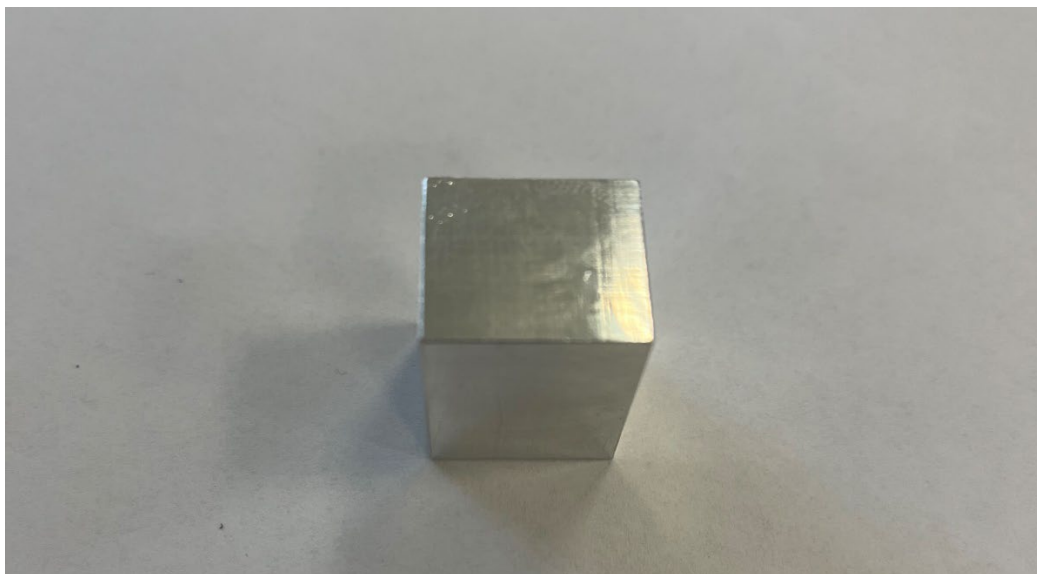
Slika 28 Stezni prihvat od PE-Polietilen



Slika 29 Stezni prihvati od POM- C –Polioksimetilen

### 5.5. Stezanje unutar prihvata sa različitim silama

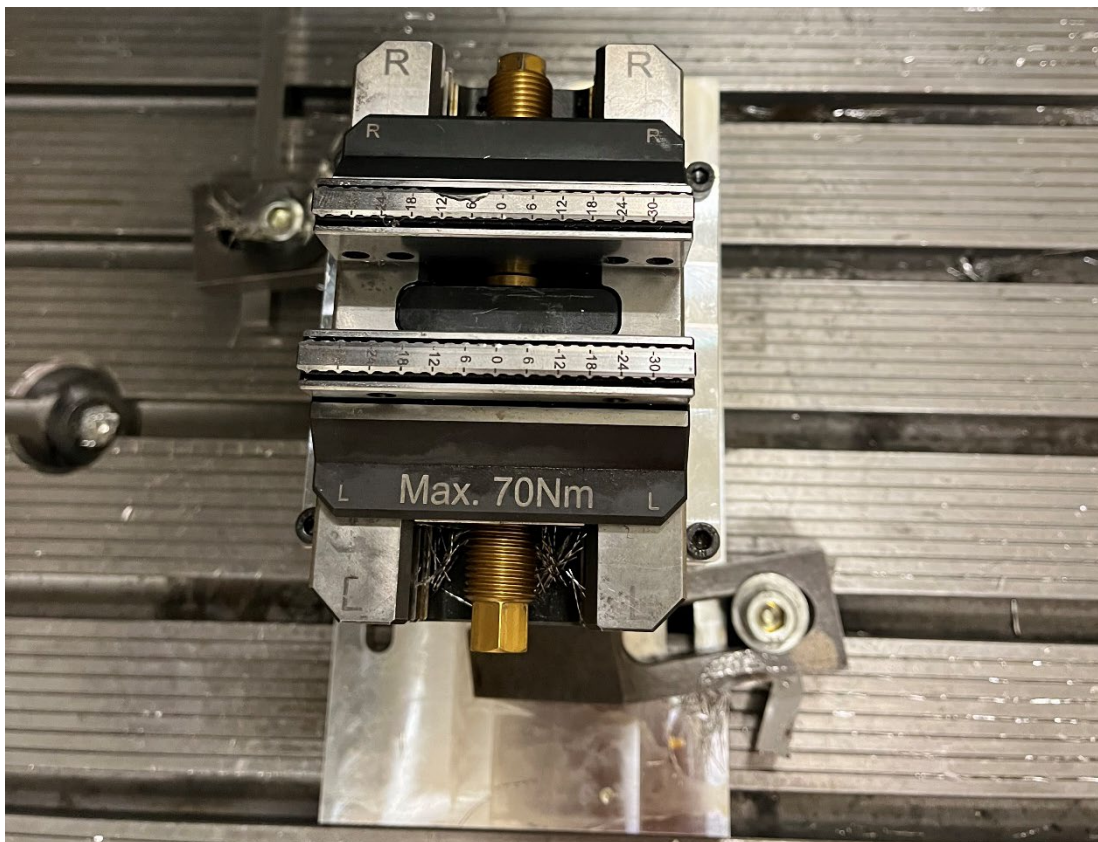
Nakon izrade steznog prihvata pomoću strojne obrade, slijedila je faza testiranja uzoraka tako da su stezni prihvati od polimernih materijala bili pričvršćeni vijcima za tzv. pakne stezne naprave. Pomoću stezne naprave obavljeno je stezanje različitim priteznim silama. Uzorak koji je korišten za pritezanje izrađen je od aluminijskog materijala.



Slika 30 Prikaz probnog uzorka izrađenog od aluminija

S obzirom na zadatak ovog rada cilj je pokazati kakve će se deformacije dogoditi u materijalu kada se steže različitim silama, sve naravno ovisi o granicama stlačivanja samog materijala. Na temelju tih informacija o testnim polimernim materijalima izračunate su približne vrijednosti sila kojima će se kasnije stezati prihvati.

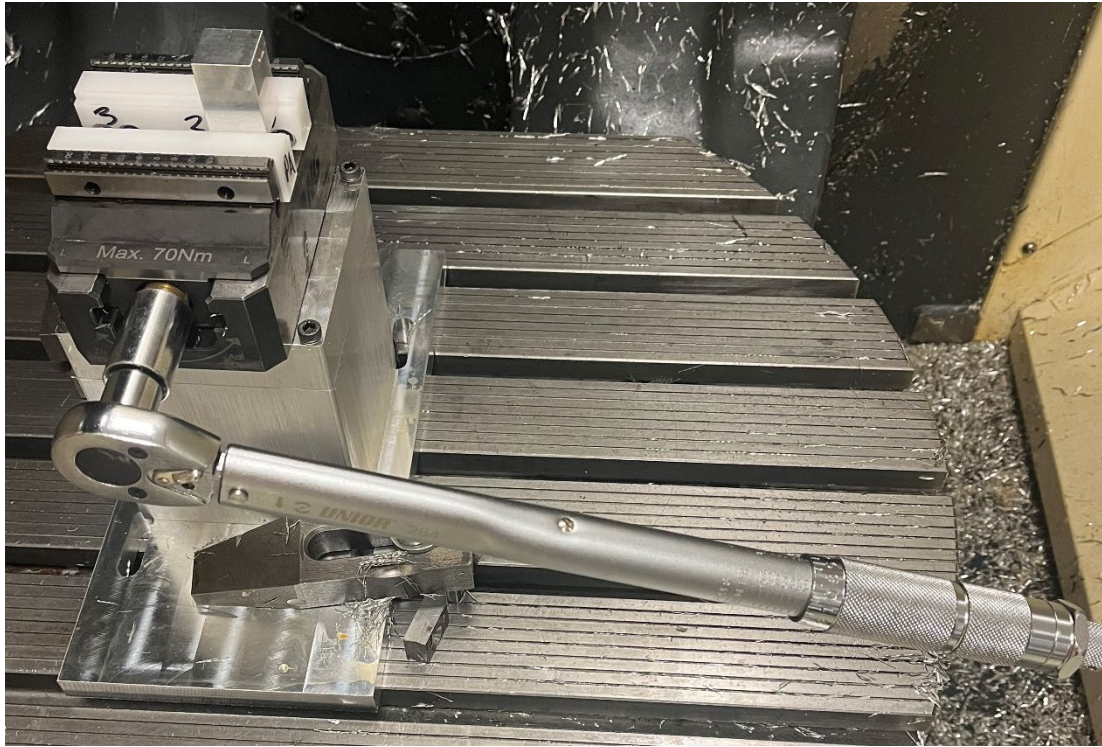
Za početak testiranja odabrana je stezna naprava koja ima mogućnost pritezanja u vrijednosti momenta od maksimalno 70 Nm. Navedena naprava prikazana je na slici 31.



Slika 31 Prikaz stezne naprave

Nakon odabira stezne naprave, odabran je moment ključ za pritezanje koji ima moment stezanja do 72 Nm. Zatim utvrđeno je prema specifikacijama stezne naprave da ima mogućnost stezanja sa silom od 14000 N, ideja je bila stvoriti omjer parametara stezne naprave i pomoću toga se mogla odrediti točna sila stezanja. Izračunat je omjer tako da je podijeljena sila stezanja od 14000 N sa momentom stezanja od 72 Nm, dobivena je vrijednost od 194,44 na temelju toga je napravljena cijela skala za određenu vrijednost momenta koja je vrijednost stezne sile.

Postupak pripreme same stezne naprave za pritezanje unutar prihvata, protekao je tako da se stezni prihvat od polimernog materijala pričvršćen pomoću vijaka za pakne stezne naprave(škripca). Nakon pripreme pakni za stezanje, slijedio je proces izračunavanja parametra za pritezanja sva tri različita polimerna materijala navedeni proces izračuna parametara objašnjen je u nastavku rada.



Slika 32 Prikaz stezanja prihvata unutar stezne naprave

Određivanjem prijenosnog omjera za stezanje, započeto je sa daljnjim korakom izmjereni su stezni prihvat pa je na temelju mjerenja širine ( $b$ ) i visine ( $h$ ) mjesta gdje će se stezati izračunata površina. U samom eksperimentu nastojalo se provjeriti ponašanje steznih prihvata na maloj gornjoj površini i na cijeloj površini po visini samog prihvata. Iz toga razloga dobivene su dvije vrijednosti visina uzorka od 3 mm i 17 mm, sukladno tome dobivene su i dvije površine.

$$A = b \times h \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

$$A_1 = 20 \times 3 = 60 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4)$$

$$A_2 = 20 \times 17 = 340 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5)$$



Nakon izračuna površina iz kataloga nabavljenih materijala za izradu uzoraka preuzete su vrijednosti okvirnih granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) samog materijala. Iako ta vrijednost granice stlačivanja nije u potpunosti definirana od strane proizvođača pa je uzeta neka okvirna vrijednost, upravo s tim ciljem se pristupilo radu i ispitivanju ponašanja određenog materijala kako bi bile dobivene točnije vrijednosti. Saznavši sve informacije o materijalu prihvata započet je vrlo jednostavan izračun stezne sile.

Izračun stezne sile napravljen je na način da je referentna vrijednost granice stlačivanja ( $R_{et}$ ) pomnožena sa prethodno izračunatom površinom ( $A$ ). Granica stlačivanja je dobivena od strane dobavljača materijala, u samom izračunu stezne sile korištene su vrijednosti ispod i iznad referentne vrijednosti granice stlačivanja s ciljem da se dobiju takve sile kojima će kasnije biti pritezani prihvat. S višim granicama stlačivanja od referentne vrijednosti granice stlačivanja dobivene su sile koju su uzrokovale deformacije u samom materijalu steznog prihvata.

$$R_{et} = \frac{F}{A} \rightarrow F = R_{et} \times A \quad [N] \quad (6)$$

Tablica 10. Vrijednosti za materijal Poliamid - PA

Materijal uzorka	Točka stezanja	Sila ( $F$ ) [N]	Površina ( $A$ ) [mm <sup>2</sup> ]	Granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) [MPa]	Širina uzorka ( $b$ ) [mm]	Visina uzorka ( $h$ ) [mm]
Poliamid PA	1.	1800	60	30	20	3
	2.	2400	60	40	20	3
	3.	3000	60	50	20	3
	4.	13600	340	40	20	17

Iz navedene tablice 10. prikazane su stezne sile po točkama stezanja, prve tri točke stezanja su za malu gornju površinu dok točka 4. prikazuje vrijednosti za cijelu visinu ispitivanog steznog prihvata. Kao optimalnu vrijednost granice stlačivanja za ovaj materijal uzeto je 40 MPa pa je na temelju toga izrađeno testiranje koje će biti prikazano u nastavku radu kroz mjerenja deformacija preko 3D skenera.

Tablica 11. Vrijednosti za materijal Polietilen - PE

Materijal uzorka	Točka stezanja	Sila ( $F$ ) [N]	Površina ( $A$ ) [mm <sup>2</sup> ]	Granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) [MPa]	Širina uzorka ( $b$ ) [mm]	Visina uzorka ( $h$ ) [mm]
Polietilen PE	1.	1200	60	20	20	3
	2.	1800	60	30	20	3
	3.	2700	60	45	20	3
	4.	11900	340	35	20	17

Tablica 12. Vrijednosti za materijal Polioksimetilen POM - C

Materijal uzorka	Točka stezanja	Sila ( $F$ ) [N]	Površina ( $A$ ) [mm <sup>2</sup> ]	Granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) [MPa]	Širina uzorka ( $b$ ) [mm]	Visina uzorka ( $h$ ) [mm]
Polietilen PE	1.	1800	60	30	20	3
	2.	2700	60	45	20	3
	3.	3600	60	60	20	3
	4.	13600	340	40	20	17

U izračunatim tablicama prikazani su okvirni proračuni pomoću kojih je izvršeno stezanje prihvata s uzorkom, promjene u nekim materijalima su relativno vidljive bile nakon samog stezanja ali na jednom od testnih steznih prihvata se nije ništa vidjelo pa je odrađeno 3D skeniranje steznih prihvata kako bi se vidjeli promjene u materijalima samog prihvata.



Slika 33. Prikaz deformacije kod stezanja Polietilena - PE

Na slici 33. prikazana je deformacija na stenom prihvatu od Polietilena- PE koja odmah prikazuje da se radi o izrazito mekanom materijalu što prikazuje i tablica sa izračunatim steznim silama.

## 5.6. Mjerenje deformacija pomoću 3D skeniranja

### 5.6.1. Općenito o 3D skeneru

Uređaji za 3D skeniranje rade na temelju dvaju osnovnih principa. Prvi princip je gdje leća kamere snima svjetlost reflektiranu od objekta (beskontaktni skeneri), a drugi princip temelji se na tome da se informacije o objektu dobivaju od sonde koja prelazi po površini samog predmeta. Zatim se prikupljeni podaci o predmetu pretvaraju u digitalni model u posebnom softveru. Raspon predmeta koje 3D skener može skenirati je velik, od vrlo sitnih predmeta pa sve do robusnih predmeta (npr. automobili).

Skeneri se mogu podijeliti u dvije glavne skupine:

- a) Kontaktni skeneri,
- b) Beskontaktni skeneri.

Uređaj za 3D skeniranje je brzo, precizno i ekonomično rješenje. Najveću primjenu skeneri imaju kod:

- kontrole kvalitete,
- povratnog inženjerstva,
- brze izrade prototipova,
- CNC obrade,
- digitalnog modeliranja,
- 3D printanja te,
- 3D vizualizacije i arhiviranje.

Tehnologija 3D skeniranja prelazi ograničenja klasičnog mjeriteljstva i nudi veći potencijal za skupljanje i obradu podataka.

Prednosti tehnologije 3D skeniranja:

- Smanjuje vrijeme izrade tehničke dokumentacije,
- Mjeri te provjerava ukupne i točne dimenzije modela,
- Olakšava vizualizaciju i planiranje,
- Ubrzava izradu prototipa,
- Minimizira vrijeme manipuliranja viškom materijala,
- Smanjuje vrijeme provedeno na gradilištu,
- Omogućava realizaciju plana unutar budžeta,
- Rano detektira potencijalne kolizije/greške.

Proces skeniranja omogućava potpunu digitalnu prezentaciju skeniranog objekta koji može biti korišten za izradu dokumentacije ili 3D modela. Model se može koristiti za obnovu i restauraciju fizičkih objekata, reverzibilni inženjering, kontrolu kvalitete. Podaci prikupljeni 3D skenerom, mogu biti importirani u standardne programe korištene u brodogradnji, strojarstvu, arhitekturi, građevini, industriji općenito. Korištenje ovog moćnog alata prepoznato je čak i izvan originalno zamišljenih industrijskih potreba.

### *5.6.2. Upotreba tehnologije plavog svjetla u procesu skeniranja*

Razlog korištenja plavog svjetla u postupku projiciranja kodiranog uzorka na površinu mjernog objekta je taj što plava svjetlost ima najkraću valnu duljinu te je malo zastupljena u okolišu. To je velika prednost jer je 3D skener mnogo manje osjetljiv na okolišne uvjete te može bez ikakvih problema vršiti postupak digitalizacije na dnevnom svjetlu.

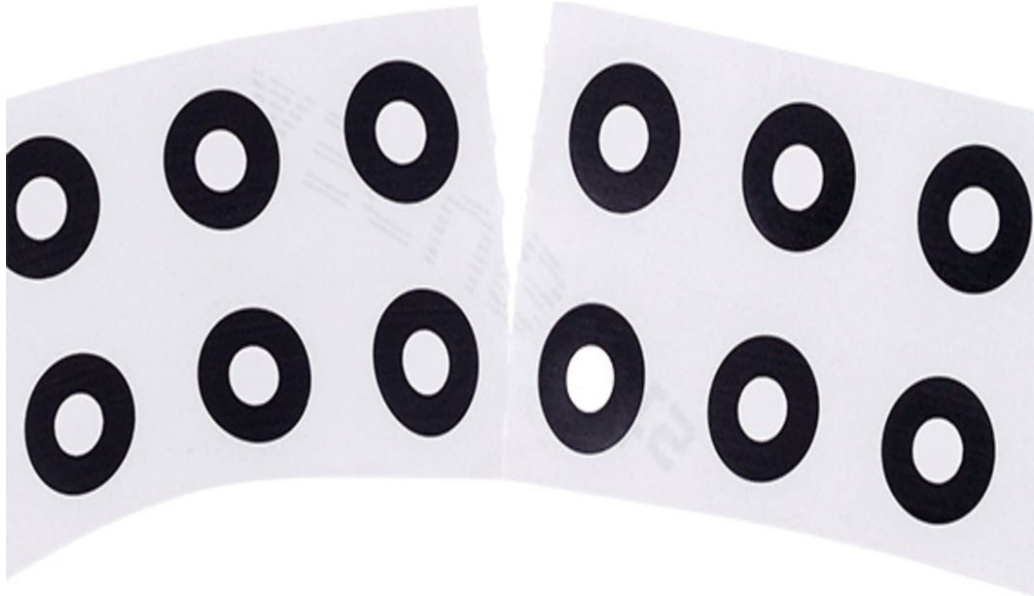
Tehnologija plavog svjetla ( ATOS ) je vrsta industrijskih 3D skenera visoke rezolucije koje primjenjujemo za trodimenzionalnu digitalizaciju širokog niza predmeta, kao što su dijelovi od lima, alati i matrice, turbinske lopatice, prototipovi, injekcijski prešani ili izliveni dijelovi te mnogi drugi predmeti izrađeni od različitih materijala. Tehnologija plavog svjetla male je valne duljine te jamči preciznost neovisnu o okolišnom osvjetljenju. Rezultat skeniranja je kompletna geometrija digitalizirana u formi gustog skupa točaka u STL mreži koja precizno opisuje geometriju površine skeniranog objekta. Detaljan oblik objekata ostaje pohranjen u računalu.

### *5.6.3. Proces pripreme ispitnih uzoraka za skeniranje*

Prije početka skeniranja, potrebno je na odgovarajući način pripremiti površinu ispitnog uzorka. Svijetle i ne reflektirajuće površine daju najbolje rezultate u procesu 3D skeniranja, dok reflektirajuće površine, tamne, crvene i prozirne površine nisu pogodne za proces skeniranja. Za kvalitetno skeniranje najvažnije je postići što veći kontrast između projiciranih uzoraka paralelnih linija. Ukoliko površine nisu pogodne za 3D skeniranje na njih je potrebno nanijeti sprej za matiranje.

Na površinu ispitnog uzorka potrebno je postaviti referentne točke. Tijekom skeniranja ATOS 5X prepoznaje referentne točke koje se nalaze u mjernom volumenu te pomoću njih određuje položaj i orijentaciju ispitnog uzorka u odnosu na skener. Kako bi se lakše pričvrstile na površinu, referentne točke mogu biti samoljepljive ili magnetne. Skener prepoznaje referentne točke na temelju velikog kontrasta između crne i bijele boje. Softver detektira sivi prijelaz između bijelog i crnog kruga te po tom prijelazu konstruira elipsu, a središte elipse označava kao

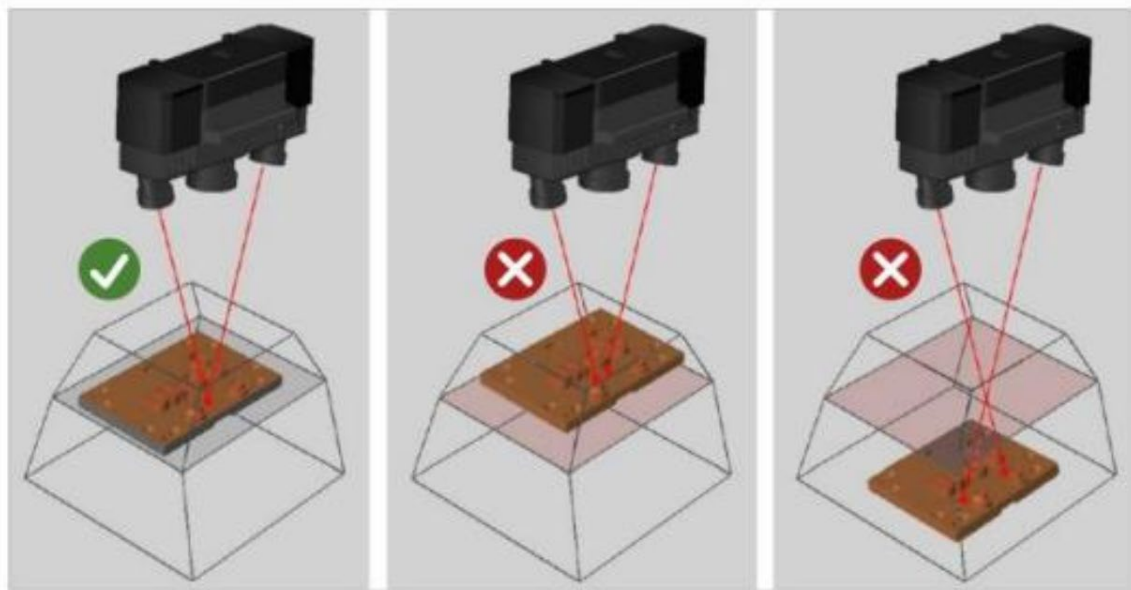
referentnu točku. Kako bi skener mogao odrediti svoj položaj i orijentaciju u odnosu na ispitni uzorak, potrebno je da uoči najmanje tri referentne točke.



Slika 34 Samoljepljive referentne točke

Tijekom procesa skeniranja, svaka nova referentna točka koju skener prepozna u mjernom volumenu automatski je numerirana. Ukoliko skener ne prepozna dovoljan broj referentnih točki unutar mjernog volumena, proces skeniranja je i dalje moguć pomoću algoritma best-fit, a preduvjet za ovu metodu je dovoljna potrebna razlika u geometriji dijelova ispitnog uzorka.

Proces digitalizacije ispitnih uzoraka je potrebno pravilno odraditi jer skeniranje neće biti odrađeno prema željenim zadaćama, uzorke je potrebno pozicionirati unutar mjernog volumena. Sve površine i referentne točke koje se nalaze izvan mjernog volumena ne mogu biti obuhvaćene u skenu. Na 3D skeneru se između kamera i projektora nalaze laseri koji projiciraju laserske zrake na površinu ispitnog uzorka. Ispitni uzorci se nalaze unutar mjernog volumena kada se laserske zrake spajaju u jednoj točki na njegovoj površini. Ukoliko su krajevi laserskih zraka na površini ispitnog uzorka razmaknuti, skener je potrebno udaljiti ili približiti samoj površini.



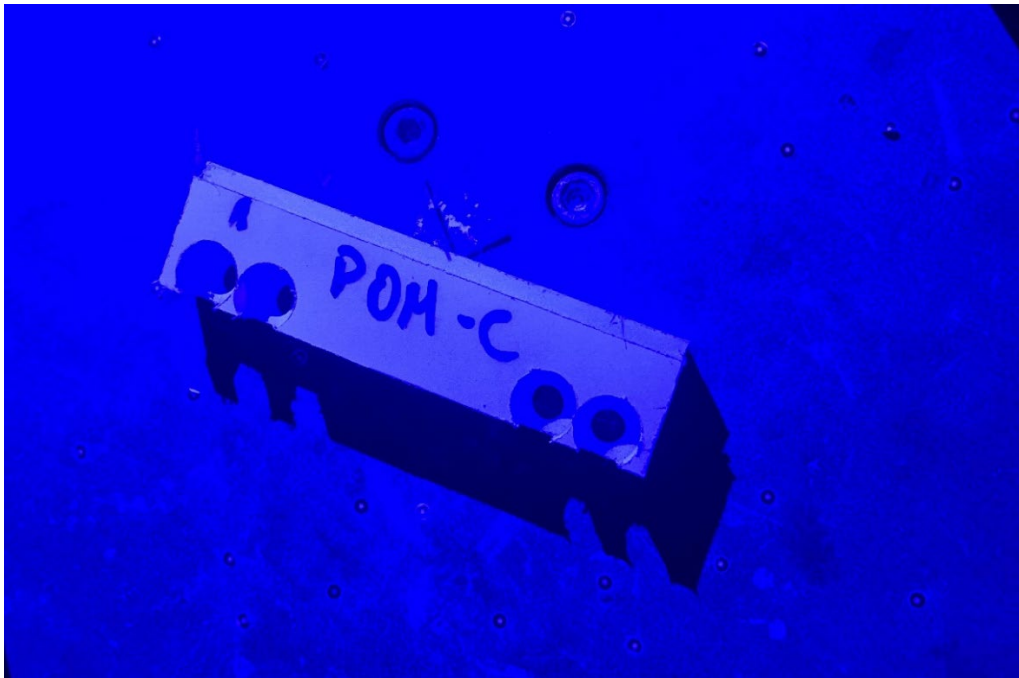
Slika 35 Pravilno pozicioniranje mjernog uzorka u radnom volumenu

Cilj svakog skeniranja je da se obuhvate što veće i preciznije površine kako bi prikazao što bolje digitalni 3D model, zbog toga veliku ulogu u skeniranju imaju same referentne točke.

#### 5.6.4. 3D skeniranje ispitnih uzoraka

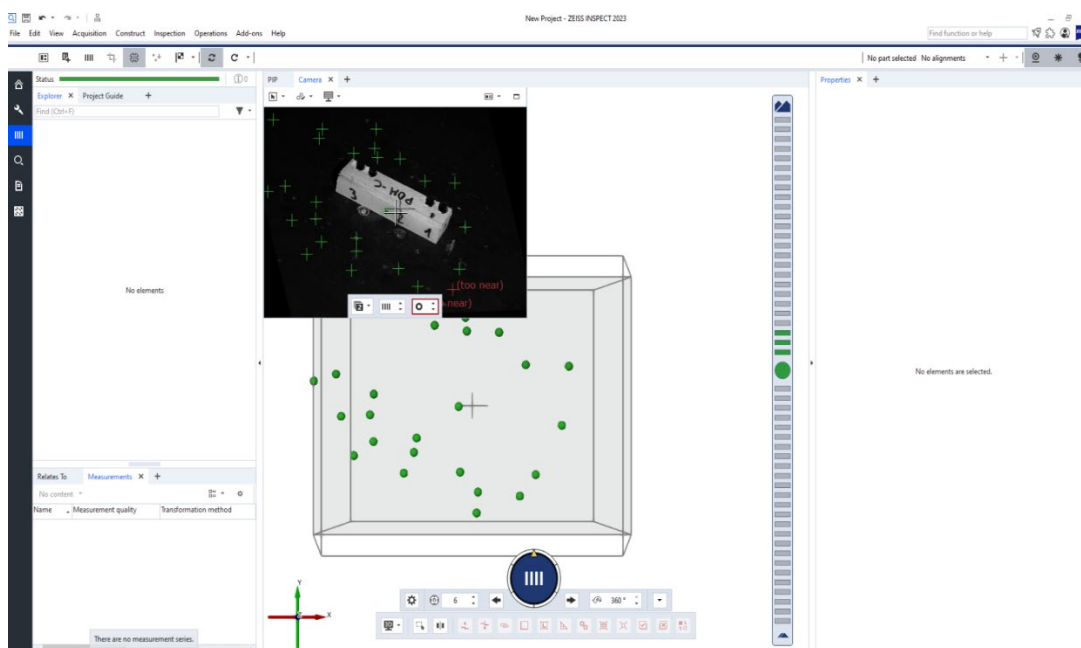
Sljedeći korak u eksperimentalnom dijelu rada bio je mjerenje deformacija nastalih stezanjem unutar stezne naprave na prihvatu izrađenog od polimernih materijala.

Proces skeniranja je započeo tako da su stezni prihvat prvo pregledani i provjereni da nemaju neke nesavršenosti po površini nastale još u procesu strojne obrade. Nakon te provjere, na temelju toga da su stezni prihvat izrađeni od tamnih i ne reflektirajućih materijala, u našem slučaju postoje crne i bijele propusne boje materijala. Potrebno je bilo nanijeti sprej za matiranje kako bi površina bila pravilno pripremljena. Nakon toga potrebno je bilo zalijepiti referentne točke po samom uzorku kako bi skeniranje bilo odrađeno pravilno.



Slika 36 Prikaz pripremljenog uzorka za skeniranje

Nakon pripreme steznih prihvata započeto je skeniranje, prvo je pokrenut digitalni softver na računalu u skeniranju je korišten softver GOM Inspekt koji se povezuje sa samim 3D skenerom. Ispitivani dio koji se skenira nalazi se na rotirajućoj podlozi gdje ga kamere skenera snimaju i na temelju toga stvaraju svojevrsni digitalni 3D model. Stezni prihvat je bilo potrebno okretati na barem tri njegove površine da bi skener što bolje snimio sami prihvat.



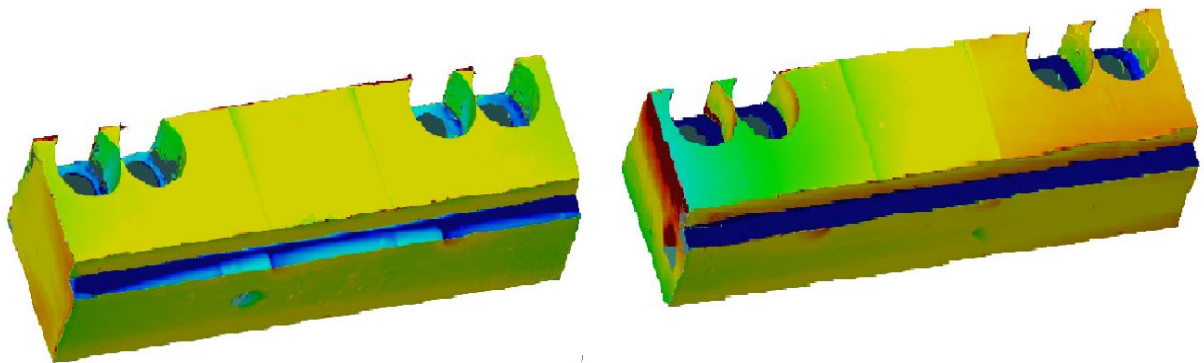
Slika 37 Virtualni prikaz skeniranog uzorka u softveru GOM Inspekt



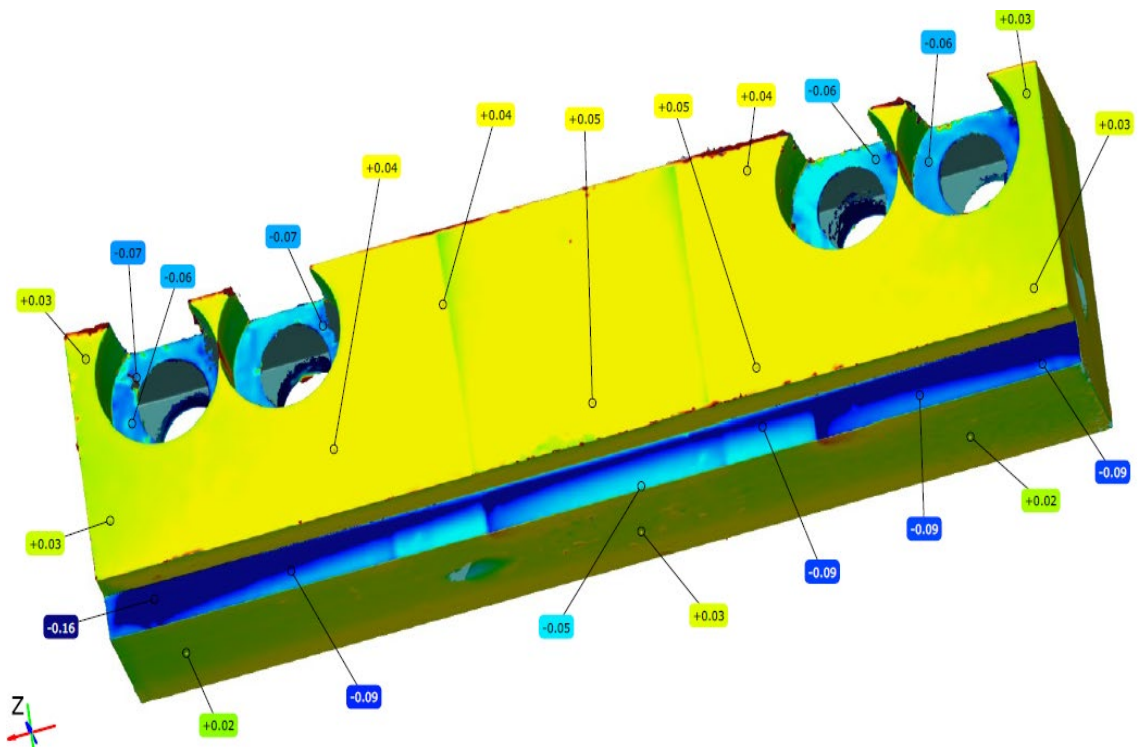
## 6. ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH SKENIRANJEM

Stvaranjem digitalnog 3D modela, mogle su se vidjeti deformacije nastale na steznom prihvatu od stezanja ovisno o materijalu izrade prihvata. Na određenim materijalima vidljive su izrazite deformacije koje će biti prikazane u nastavku rada.

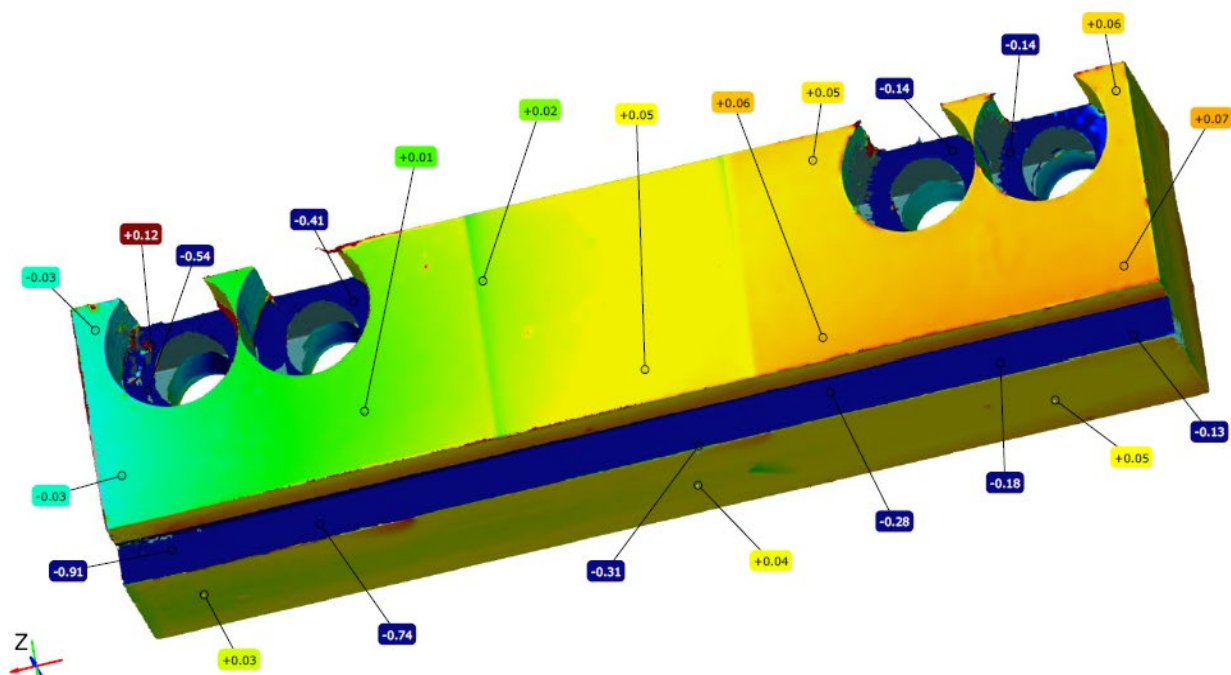
Započeto je s prikazivanjem mjerenja deformacija na uzorcima od materijala Poliamid.



Slika 38 Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Poliamida - PA



Slika 39 Mjerenja deformacija priхват broj 1 Poliamid-PA

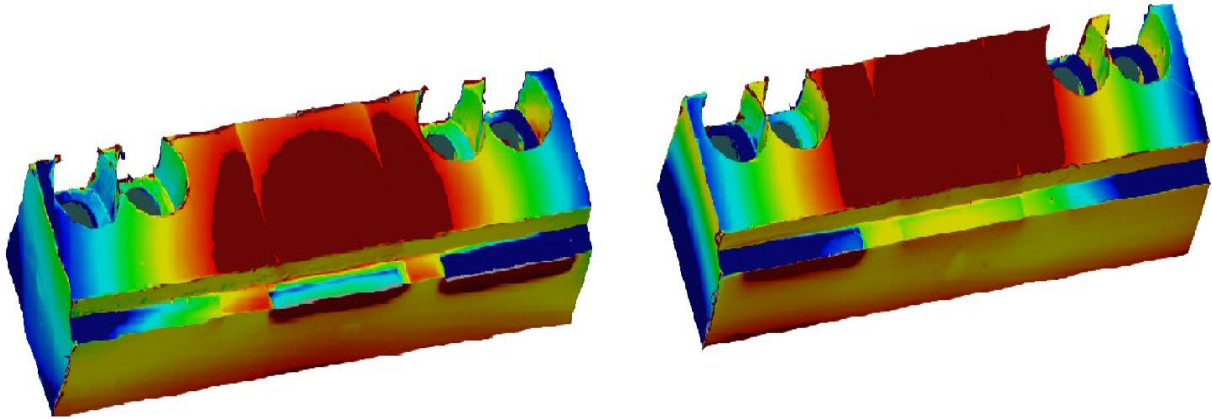


Slika 40 Mjerenja deformacija prihvat broj 2 Poliamid – PA

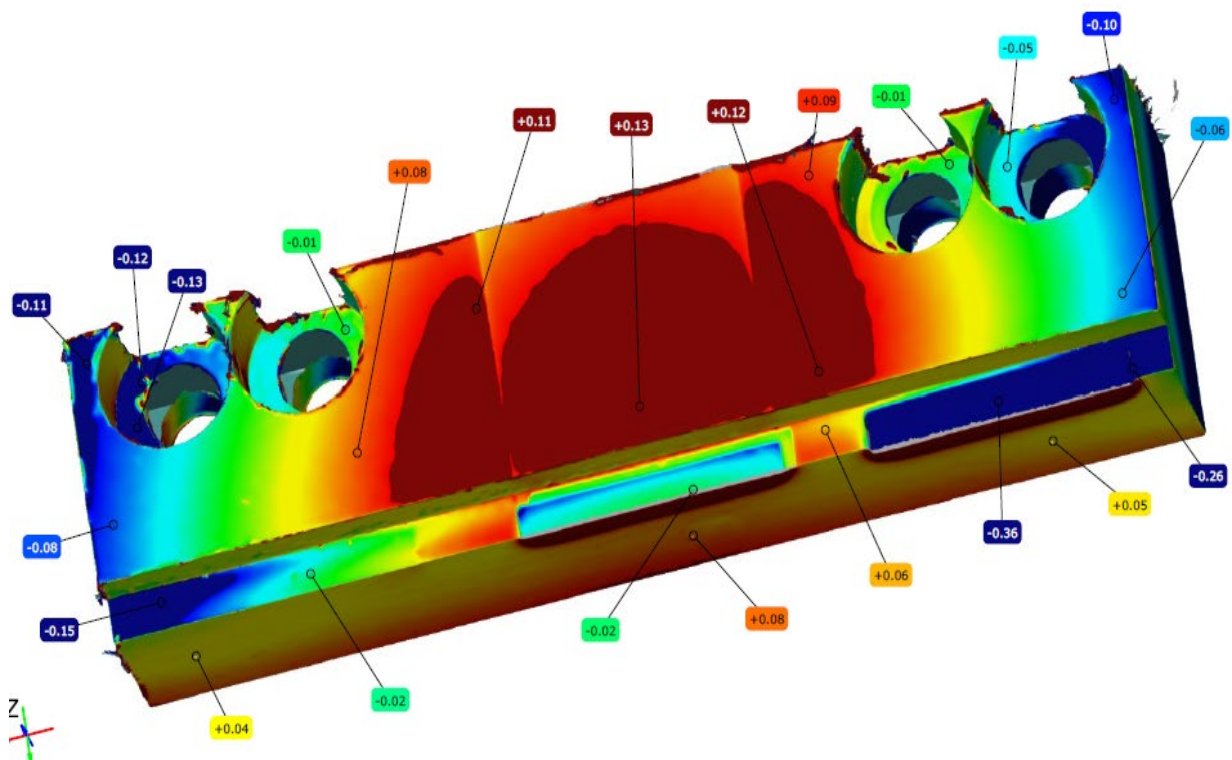
Nakon završenog skeniranja oba stezna prihvata izrađena od materijala Poliamid – PA, utvrđeno je da postoje minimalne deformacije na rubovima stezanja prihvata. Mjere deformacija nastalih od stezanja prikazane su plavom bojom na rubovima, sama odstupanja nisu toliko velika jer skener je pokazao i određene nesavršenosti unutar same strojne obrade.

Poliamid - PA se skeniranjem pokazao kao materijal koji podnosi opterećenja sukladno samom proračunu u tablicama gdje je obavljeno stezanje prema okvirnim parametrima granice stlačivanja. Na skeniranim steznim prihvataima su prikazane i minimalne deformacije po cijelom presjeku stezanja koje je ispitivano zbog veće površine stezanja te su također dobiveni očekivani rezultati.

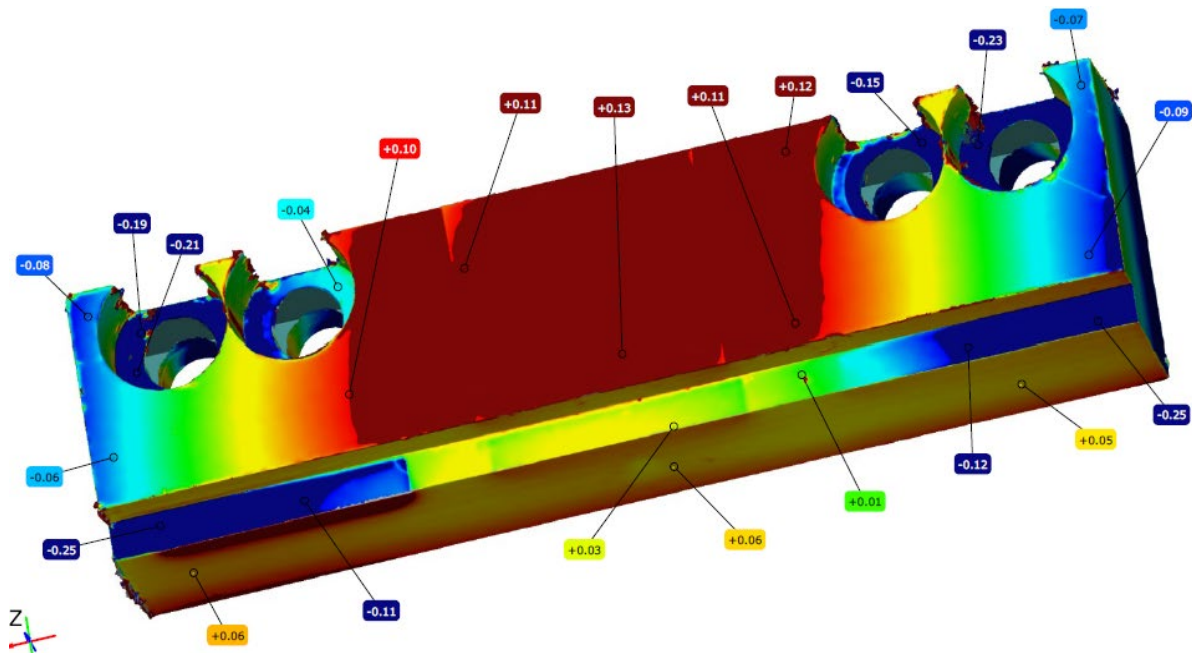
Analiza rezultata provedena je daljnjim redoslijednom tako da će u nastavku biti obrađeni rezultati skeniranja na materijalu Polietilen – PE.



Slika 41 Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Polietilena – PE



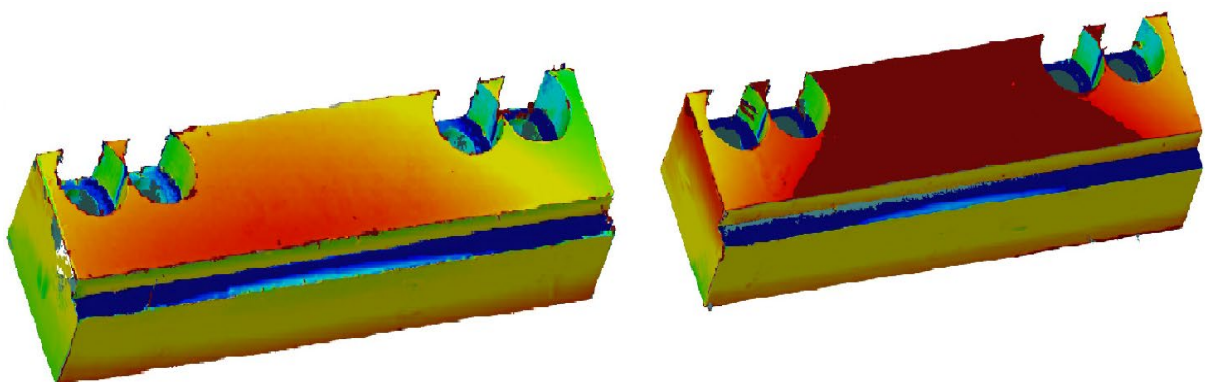
Slika 42 Mjerenje deformacija prihvat broj 1 Polietilen - PE



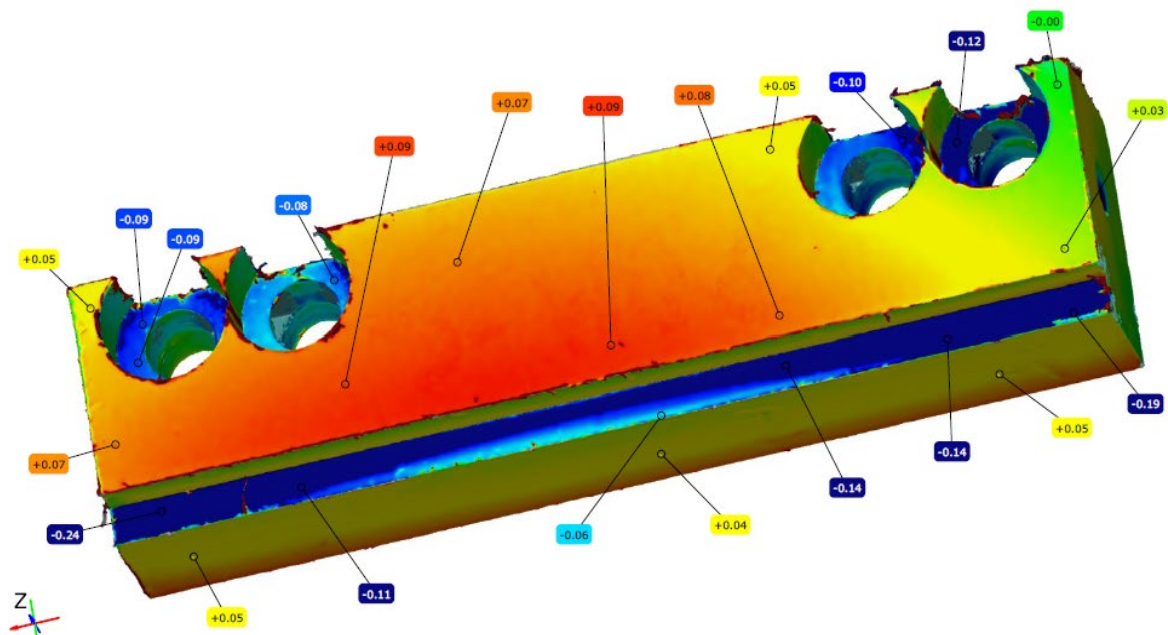
Slika 43 Mjerenje deformacija prihvata broj 2 Polietilen – PE

Skeniranjem steznih prihvata izrađenih od materijala Polietilen – PE dobivene su vrijednosti deformacija nastalih uslijed prethodno izvedenog stezanja.

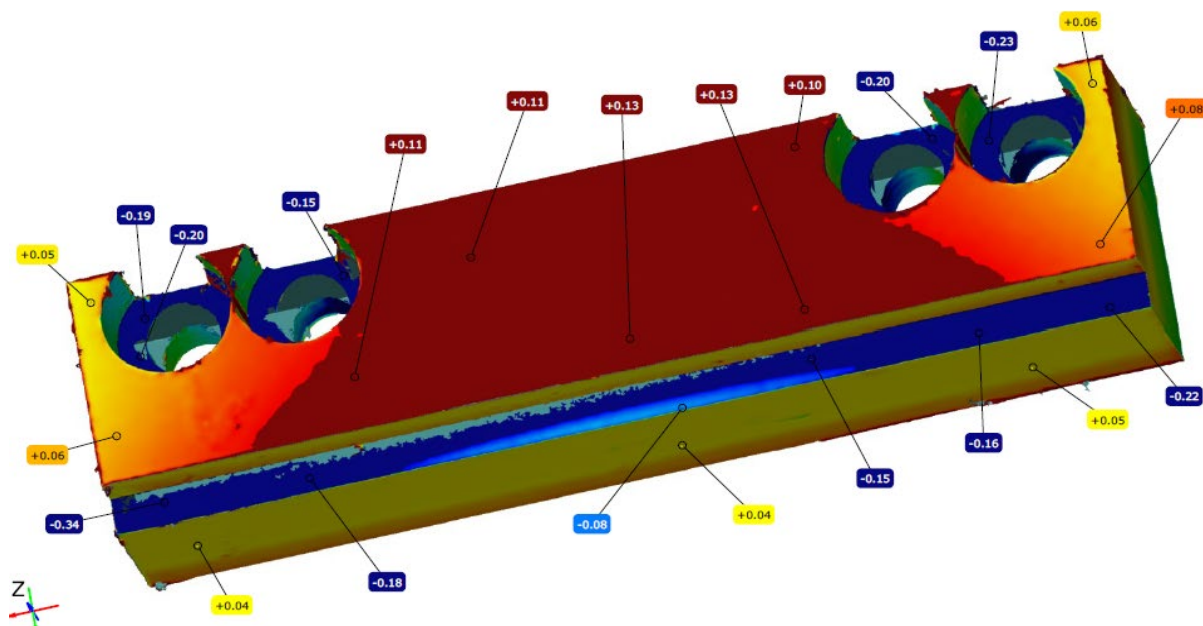
Polietilen – PE kao materijal je dosta mekan te su u skladu s tim dobiveni rezultati, kod izračuna vrijednosti steznih sila dobivene su vrlo male vrijednosti što je i bilo u skladu sa okvirnim granicama stlačivanja koje opisuju taj materijal. Prihvati od ovog materijala imaju najveće deformacije nastale stezanjem što je i očekivano bilo jer su bile vizualno vidljive velike promjene u materijala a ovdje su prikazane i brojčano. Završno mjerenje deformacija 3D skeniranjem je izvedeno na trećem polimernom materijalu a to je Poliokimetilen POM-C.



Slika 44 Prikaz skeniranih prihvata izrađenih od Polioksimetilena - POM C



Slika 45 Mjerenje deformacija prihvata broj 1 Polioksimetilen POM-C



Slika 46 Mjerenje deformacija prihvata broj 2 Polioksimetilen POM-C

Na posljednjem materijalu prihvaća izvršeno je mjerenje deformacija, kojim je utvrđeno da je materijal Polioksimetilen najbolje podnio opterećenja nastala od stezanja različitim silama. Na slikama su vidljive minimalne promjene u materijalu a neke od njih su uzorkovane nesavršenošću strojne obrade. Ovim ispitivanjem su opravdani rezultati iz tablica i očekivanja koja su dobivena vizualnom kontrolom uzoraka.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu su istraženi polimerni materijali i njihova tribološka svojstva. Postupcima obrade odvajanjem čestica prikazana je relativno nova tehnika obrade polimernih materijala kojom su izrađeni stezni prihvati od polimernih materijala za ispitivanja.

Cilj izrade ovog rada bio je prikazati ponašanje u ovom slučaju tri različita polimerna materijala, koji su podvrgnuti cijelom tehnološkom postupku od same nabave materijala preko njihove strojne obrade i na kraju finalnog testiranja 3D skeniranjem. Na dobivenim steznim prihvati nakon glodanja i bušenja obavljeno je stezanje aluminijskim uzorkom izračunatim okvirnim priteznim silama. Na temelju podataka dobivenih od strane proizvođača materijala provedeno je ispitivanje kako bi se moglo usporediti sa okvirnim granicama stlačivanja za određeni materijal. Ispitivanjem je postignuto da su pretpostavljene vrijednosti sila i granica stlačivanja materijala bile točne. Samo 3D skeniranje se pokazalo kao vrlo korisno i inovativno sredstvo koje pomaže u provjeri materijala, skeniranjem se drastično ubrzavaju i neki procesi same proizvodnje. Radom je utvrđeno da su stezni prihvati izrađeni od Polioksimetilena najbolje izdržali opterećenja nastala uslijed stezanja.

Konačni rezultati koji su dobiveni ispitivanjem prihvatljivi su za područje strojarstva i ostalih grana slične proizvodnje polimera. U ovom radu su dokazane tvrdnje o polimernim materijalima i njihovoj primjeni. Rad je izrađen s ciljem da olakša budućim inženjerima uvid u određene vrijednosti polimernih materijala kod određivanja triboloških svojstava i daljnjeg razvoja obrade polimernih materijala odvajanjem čestica.

## LITERATURA

- [1] Kostadin T. : Prerada polimera (interna skripta Veleučilišta u Karlovcu)
- [2] M.Šercer, B.Križan, R.Basan, Konstruiranje polimernih proizvoda, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2009.
- [3] I.Kladarić, Materijali 1: Podjela polimera, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, dostupno na: <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Podjela%20polimeria.pdf>
- [4] Čatić I. : Proizvodnja polimernih tvorevina, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 2006.
- [5]<https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/703858/kemija-8/m04/j09/index.html>
- [6] A.Rogić, I.Čatić, D.Godec : Polimeri i polimerne tvorevine, Zagreb, 2008.
- [7]Horvat, D.: Polimerni izolacijski materijali, Osijek, 2019. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2222/datastream/PDF/view>
- [8] T. Filetin.: Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2000
- [9] <https://hrcak.srce.hr/file/68697>
- [10] <https://dokumen.tips/documents/obrada-materijala-sa-skidanjem-strugotine.html>
- [11] Barić I. : Obrada polimernih materijala odvajanjem čestica, Zagreb, 2012. [https://repositorij.fsb.hr/1982/1/20\\_09\\_2012\\_Zavrсни\\_rad.pdf](https://repositorij.fsb.hr/1982/1/20_09_2012_Zavrсни_rad.pdf)
- [12] <https://kk-solutions.com/en/verfahren/cnc-drehen/>
- [13] <https://www.dajinprecision.com/cnc-turning-plastic-parts>
- [14] Slatki D. : Analiza trošenja alata kod obrade glodanjem, Varaždin, 2017.
- [15] GLODANJE: <https://www.scribd.com/doc/64821380/GLODANJE>
- [16]Cepanec A.: Specijalne stezne naprave u glodanju, Varaždin, 2021. <https://zir.nsk.hr/en/islandora/object/unin%3A4100/datastream/PDF/view>
- [17]<http://ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/78/11.%20Naprave.pdf>
- [18] Karać K.: Konstrukcija stezne naprave za završnu obradu lopatice, Karlovac, 2021. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A2133/datastream/PDF/view>

[19] Ensinger Engineering & High Performance Plastic Manual, dostupno na: <https://www.curbellplastics.com/wp-content/uploads/2022/11/Engineering-PlasticsManual-Ensinger.pdf>

[20] Hoffmann Group, dostupno na: [https://ecatalog.hoffmanngroup.com/index.html?country=eng\\_GB\\_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page\\_422](https://ecatalog.hoffmanngroup.com/index.html?country=eng_GB_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page_422), pristupljeno 25.05.2024.

[21] Pavić A.: Tehnologija: Obrada odvajanjem čestica, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.