

# UTJECAJ MATERIJALA I TEHNOLOGIJE OBRADE NA HRAPAVOST POVRŠINE

---

**Salopek, Sandi**

**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:128:917141>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-22**



**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

SANDI SALOPEK

**UTJECAJ MATERIJALA I TEHNOLOGIJE NA  
HRAPAVOST POVRŠINE**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024 godina.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO

SANDI SALOPEK

**UTJECAJ MATERIJALA I TEHNOLOGIJE NA  
HRAPAVOST POVRŠINE**

DIPLOMSKI RAD

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

KARLOVAC, 2024 godina.



## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime	SANDI SALOPEK		
OIB / JMBG	87402483714	1408992340005	
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail	---		
Matični broj studenta	0123420002		
JMBAG	0035187247		
Studij (staviti znak <b>X</b> ispred odgovarajućeg studija)	preddiplomski		<b>Xstručni diplomski</b>
Naziv studija	STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO		
Godina upisa	2020.		
Datum podnošenja molbe	01.09.2023.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: UTJECAJ MATERIJALA I TEHNOLOGIJE OBRADE NA HRPAVOST POVRŠINE

Naslov teme na engleskom: INFLUENCE OF MATERIAL AND TECHNOLOGIES ON THE SURFACE ROUGHNESS

**Opis zadatka:** Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu opisati materijale i tehnologije koji se koriste u eksperimentalnom dijelu rada. U eksperimentalnom dijelu usporediti utjecaj vrste materijala na hrapavost površine, koristeći konvencionalne i aditivne tehnologije. Koristiti metalni i polimerni materijal, te različite režime obrade, radi usporedbe i analize dobivenih rezultata. Također napraviti i kratku analizu rezultata sa ekonomskog stanovišta. Na kraju napisati odgovarajući zaključak.

Rad urediti prema Uputama za pisanje završnog rada na Strojarskom odjelu, kako je objavljeno na VUKA internetskim stranicama.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

# SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	i
POPIS SLIKA .....	iii
POPIS TABLICA .....	v
POPIS OZNAKA.....	vi
SAŽETAK.....	vii
SUMMARY: INFLUENCE OF MATERIAL AND TECHNOLOGIES ON THE SURFACE ROUGHNESS .....	viii
1. UVOD.....	1
2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA.....	2
2.2. Podjela postupka obrade.....	3
2.3. Obrada odvajanja čestica postupkom glodanja.....	5
2.3.1. Podjela postupka glodanja.....	6
2.3.2. Parametri obrade.....	8
2.3.3. Alati za glodanje .....	9
2.4. Glodači obradni centar .....	12
2.5. Prednosti i nedostaci obrade odvajanjem .....	14
3. ADITIVNA PROIZVODNJA .....	16
3.1. Princip izrade predmeta u aditivnoj proizvodnji.....	17
3.2. Podjela aditivnih tehnologija.....	18
3.3. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje .....	19
4. HRAPAVOST POVRŠINE .....	20
4.1. Parametri hrapavosti .....	24
4.2. Mjerenje hrapavosti površine.....	25
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	29
5.1. CAD/CAM model uzorka.....	29
5.2. Polyamid PA 12 smooth.....	32
5.3. Aluminijska legura EN-AW 5083 .....	33

5.4. Uređaji korišteni za izradu uzoraka.....	34
5.4.1 Haas VF2SSyt EU 3-osni glodaći obradni centar .....	34
5.4.2 Sinterit Lisa Pro .....	36
5.4.3 Sinterit sandblaster pjeskarilica.....	37
5.4.4 Mitutoyo Surftest SJ-210 .....	37
5.5. Mjerenje hrapavosti uzoraka .....	38
5.6. Analiza rezultata .....	44
5.6.1 Ekonomska analiza.....	45
6. ZAKLJUČAK.....	48
Literatura .....	49

## POPIS SLIKA

Slika 1. Stroj za izradu tokarenja i bušenja [4].....	2
Slika 2. Prvi praktični industrijski tokarski stroj [4] .....	3
Slika 3. Obrada odvajanjem čestica kao sustav [5] .....	4
Slika 4. Podjela strojnih postupaka obrade [5].....	5
Slika 5. Istosmjerno glodanje [7] .....	6
Slika 6. Protusmjerno glodanje [7].....	6
Slika 7. Unutarnje kružno pravocrtno glodanje [7].....	7
Slika 8. Vanjsko kružno pravocrtno glodanje [7] .....	7
Slika 9. Parametri zahvata kod glodanja [7].....	9
Slika 10. Jednodjelno glodalo [8].....	10
Slika 11. Glodalo s izmjenjivim oštricama [9].....	10
Slika 12. Alati za glodanje [10] .....	12
Slika 13. Vertikalni glodači obradni centar [11].....	13
Slika 14. Horizontalni glodači obradni centar [11] .....	13
Slika 15. 5D obradni centar [11] .....	14
Slika 16. Područja primjene aditivne proizvodnje [14].....	17
Slika 17. Princip izrade u aditivnoj proizvodnji [15] .....	17
Slika 18. Podjela aditivne proizvodnje [16].....	18
Slika 19. Odabrani profil površine te odstupanja na površini [17].....	21
Slika 20. Profil hrapavosti [17] .....	23
Slika 21. Razlučivanje P,W i R karakteristika profila [17].....	24
Slika 22. Ukupna i prosječna maksimalna visina profila [19].....	25
Slika 23. Mjerenje 2D parametra hrapavosti [21] .....	26
Slika 24. Elektroničko-mehanički mjerni uređaj s ticalom [22].....	27
Slika 25. Postupak mjerenja hrapavosti [24].....	28
Slika 26. Prikaz 3D CAD modela testnog uzorka u CAM okruženju .....	30
Slika 27. Prikaz simulacije glodanja testnog uzorka .....	30
Slika 28. Materijal Pa12 .....	31
Slika 29. Uzorak u sliceru za aditivnu tehnologiju Sinterit Pro .....	32
Slika 30. Informacije o potrebnom materijalu za ispis i vremenu trajanja ispisa.....	32
Slika 31. Posuda s materijalom PA12 tvrtke sinterit .....	33
Slika 32. 3-osnog glodaćeg obradnog centara.....	35
Slika 33. Kataloški prikaz glodala korištenog za obradu aluminijskih legura .....	35
Slika 34. Preporučeni režimi obrade za odabrano glodalo .....	36
Slika 35. 3D pisac Sinterit Lisapro.....	36

Slika 36. Pjeskarilica za naknadnu obradu uzoraka dobivenih SLS aditivnom tehnologijom Sinterit sandblaster.....	37
Slika 37. Uređaj za mjerenje hrapavosti Mitutoyo Surftest SJ-210 .....	37
Slika 38. Prikaz mjernog uređaja s oznakama smjera osi mjerenja.....	38
Slika 39. Uzorci dobiveni SLS postupkom i uzorci izrađeni strojnom obradom aluminijske legure.....	39
Slika 40. Odnos posimčne brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X (plavo) i Y (narančasto) za dubinu rezanja 10 mm i širinu zahvata 2 mm.....	42
Slika 41. Odnos posimčne brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X (plavo) i Y (narančasto) za dubinu rezanja 10 mm i širinu zahvata 4 mm.....	43
Slika 42. Odnos posimčne brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X , Y za dubinu rezanja 10 mm i širine zahvata 2 mm i 4 mm .....	43
Slika 43. Hrapavosti uzoraka dobivenih aditivnom tehnologijom .....	44
Slika 44. Usporedba vremena aditivne tehnologije i O.O.Č. za različiti broj komada.....	46
Slika 45. Cijena materijala ovisno o broju komada.....	47



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Preporučene granične vrijednosti filtra ( $\lambda_c$ ) .....	22
Tablica 2. Stupnjevi i razredi površinske hrapavosti .....	25
Tablica 3. Informacije o materijalu PA12 .....	33
Tablica 4. Kemijski sastav aluminijske legure EN-AW 5083 .....	34
Tablica 5. Mehanička svojstva aluminijske legure EN-AW 5083 .....	34
Tablica 6. Specifikacija glodaćeg obradnog centra Haas VF2SSyt EU .....	34
Tablica 7. Vrijednosti hrapavosti aluminijske legure AW EN-5083 obrađene strojnom obradom .....	40
Tablica 8. Vrijednosti hrapavosti uzoraka dobivenih aditivnom tehnologijom SLS postupkom od materijala PA12 .....	41
Tablica 9. Srednje aritmetičko odstupanje profila $R_a$ uzoraka .....	41
Tablica 10. Prikaz vremena izrade uzoraka od materijala PA12 i potreba za dodavanjem novog svježeg materijala u printer .....	45
Tablica 11. Vrijeme izrade za jedan komad strojnom obradom aluminijske legure prema posmičnim brzinama i brzinama rezanja .....	45
Tablica 12. Vremena izrade za 1,8,16,48 komada uzoraka obradom odvanjem čestica	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tablica 13. Vremena izrade za 1,8,16,48 komada uzoraka obradom odvanjem čestica	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$V_c$	m/min	Obodna brzina
$V_f$	m/min	Posmična brzina
$f_z$	mm	Posmak po zubu
$f$	mm/okr	Posmak po okretaju
$d$	mm	Promjer glodala
$z$	-	Broj zuba glodala
$n$	okr/min	Broj okretaja u minuti
$a_p$	mm	Dubina zahvata
$a_e$	mm	Širina zahvata
$\lambda_c$	mm	Profilni filter
$\lambda_f$	mm	Profilni filter
$l_t$	mm	Duljina prijelaza
$l_n$	mm	Duljina vrednovanja
$l_r$	mm	Referentna duljina
$l_w$	mm	Duljina valovitosti profila
$l_p$	mm	Duljina uzorkovanja primarnog profila
$R_t$	mm	Ukupna visina hrapavosti profila
$R_z$	mm	Prosječna maksimalna visina profila
$Z_i$	mm	Najniža točka profila
$R_a$	mm	Srednje aritmetičko odstupanje

## **SAŽETAK**

Ovaj diplomski rad stastavljen je od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog. Unutar teorijskog dijela, opisane su tehnologije obrade odvajanjem čestica i aditivna tehnologija. Nakon opisa tehnologija, opisana je hrapavost površina prema kojoj se mjere izrađeni uzorci opisani prethodnim tehnologijama.

Eksperimentalni dio, proveden kao drugi dio rada, započinje konstruiranjem uzoraka koji će biti izrađeni aditivnom tehnologijom i obradom odvajanja čestica. Uzorci izrađeni obradom odvajanjem čestica su od aluminijske legure, dok se aditivnom tehnologijom izrađuju polimerni uzorci. Analizom rezultata uspoređuju se vremena izrade uzoraka, njihova hrapavost i ukupni trošak izrade uzorka. Ovim radom se prikazuje isplativost odabira određene tehnologije u ovisnosti o postavljenim konstrukcijskim zahtjevima za izradu proizvoda.

Ključne riječi: polimeri, aluminijske legure, obrada odvajanjem čestica, aditivna tehnologija, površinska hrapavost

## **SUMMARY: INFLUENCE OF MATERIAL AND TECHNOLOGIES ON THE SURFACE ROUGHNESS**

This master thesis is made up of two parts, the theoretical and the experimental. Within the theoretical part, processing technologies of machining and additive manufacturing are described in it. After description of the technologies, the roughness of the surfaces is described, according to which the samples made using the previous technologies are measured.

The experimental part carried out as the second part of the work begins with the construction of samples that will be made using additive technology and machining. Samples made by machining are made of aluminum alloy, while polymer samples are made by additive manufacturing. The analysis of the results compares the time of making the samples, their roughness and the total cost of making the sample. This paper shows the profitability of choosing a certain technology depending on the set design requirements for the production of the product.

Keywords: polymers, aluminum alloys, machining, additive manufacturing, surface roughness

## 1.UVOD

U proizvodnji i oblikovanju komponenti i proizvoda, razlikuju se dva različita pristupa obrade materijala, konvencionalne tehnologije i nekonvencionalne tehnologije. Konvencionalne tehnologije obrade materijala uključuju tradicionalne metode koje su se razvijale tijekom godina i obično uključuju uklanjanje materijala kako bi se oblikovala željena komponenta, a najčešće su tokarenje, glodanje, bušenje, brušenje, savijanje. Ove tehnike koriste strojeve i alate za uklanjanje materijala s ciljem postizanja željenog oblika. Prednost ovih tehnologija je njihova visoka preciznost postizanja geometrijskih i dimenzijskih tolerancija, čija je posljedica znatan otpad odvojenih čestica materijala, što je jedan od ključnih nedostataka ove tehnologije [1].

S druge strane, aditivne tehnologije poznate i kao 3D print ili aditivna proizvodnja, predstavljaju potpuno drugačiji pristup. Umjesto uklanjanja materijala, ova tehnika dodaje materijal sloj po sloj kako bi se stvorio konačni proizvod. Najčešće korišteni materijali u aditivnoj proizvodnji su polimeri, metali, keramike i kompozitni materijali. Prednost ove tehnologije je u omogućavanju kompleksnije geometrije i personaliziranih proizvoda, smanjenju otpada materijala i mogućnosti brze izmjene dizajna proizvoda [2].

Odabir materijala i tehnologije obrade utječu na hrapavost površine u odnosu na idealne površine kao referentne vrijednosti za mjerenje. Svojstva materijala poput njegove tvrdoće, duktilnosti i homogenosti utječu na njegovu hrapavost. Tvrdi materijali obično stvaraju glade površine jer se bolje odupiru deformaciji i trošenju, dok meki materijali često rezultiraju grubim površinama. Duktilni materijali se lakše oblikuju, što rezultira glađim površinama, za razliku od krhkih materijala sklonih lomu. Naposljetku, homogeni materijali obično proizvode dosljednije i glade površine u usporedbi s heterogenim materijalima. [3]

Različitim tehnologijama obrade materijala dobivaju se određeni rasponi hrapavosti. Hrapavost površine je mjera nepravilnosti, neravnina i odstupanja od idealno glatke površine. Obradom odvajanjem čestica na hrapavost utječe mnogo faktora poput: načina stezanja, režima i parametara obrade, vibracija, istrošenosti alata itd. Nakon postizanja pravilnog stezanja obradka, najveći utjecaj na hrapavost imaju parametri obrade, od kojih su glavni posmična brzina i brzina vrtnje. Za razliku od aditivne tehnologije, gdje postoji taloženje materijala sloj po sloj, kod obrade odvajanjem čestica obrađuju se homogeni materijali, pa ispitivanu hrapavost definira smjer kretanja alata. Aditivnom tehnologijom proizvodi se izrađuju sloj po sloj, pa zbog samog načina funkcioniranja tehnologije stvara se anizotropnost materijala, na koju se može utjecati orijentacijom proizvoda prilikom izrade.

U ovom radu ispitivati će se, te usporediti hrapavosti površine uzoraka od polimernih materijala dobivenih aditivnom tehnologijom i aluminijskih dobivenih odvajanjem čestica. Glavni cilj ispitivanja je usporediti ekonomsku isplativost izrade pojedinih uzoraka jednom od dviju tehnologija, vodeći računa o mehaničkim svojstvima materijala.

## 2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA

Prvi alati koje je čovjek izradio potječu još iz kamenog doba, gdje je upotrebljavao kamenje za obradu materijala manje tvrdoće. Rezultat toga bio je razvitak klina koji se prvenstveno koristio kao oružje za lov, nakon čega su se njime počeli služiti kao alatom za izradu drvenih dijelova. Nakon obrade drvenih dijelova slijedila je obrada metala poput bakra, koji je služio za nakit. Tranzicijom s obrade drvenih predmeta na metalne dolazi do prelaska iz kamenog u bakreno doba. Predmeti koji su se obrađivali počinju imati sve kompleksniju geometriju.

Tehnološka evolucija alatnih strojeva ostala je konstantna od prapovijesti. Stoljećima se čovjekov rad bazirao na ručnoj obradi, gdje se koristio alat kao pomoć pri ručnom oblikovanju proizvoda, sve dok se nisu pojavili prvi osnovni strojevi s kojima se rad čovjeka znatno olakšao. Iako u antici nisu postojali strojevi kao što ih danas poznajemo, postojale su prve skice uređaja za operacije tokarenja i bušenja. U oba slučaja, bilo je potrebno stvoriti rotaciju obratka za tokarenje i rotaciju alata za bušenje provrta. [4]



Slika 1. Stroj za izradu tokarenja i bušenja [4]

U razdoblju prve industrijske revolucije, pojavila se potreba za povećanom preciznošću na strojevima koji su bili namijenjeni proizvodnji drugih strojeva. Kao posljedica te potrebe, razvijen je prvi praktični industrijski tokarski stroj za rezanje vijaka, prikazan na slici 2. Ovaj stroj značajno je doprinio standardizaciji navoja vijaka.

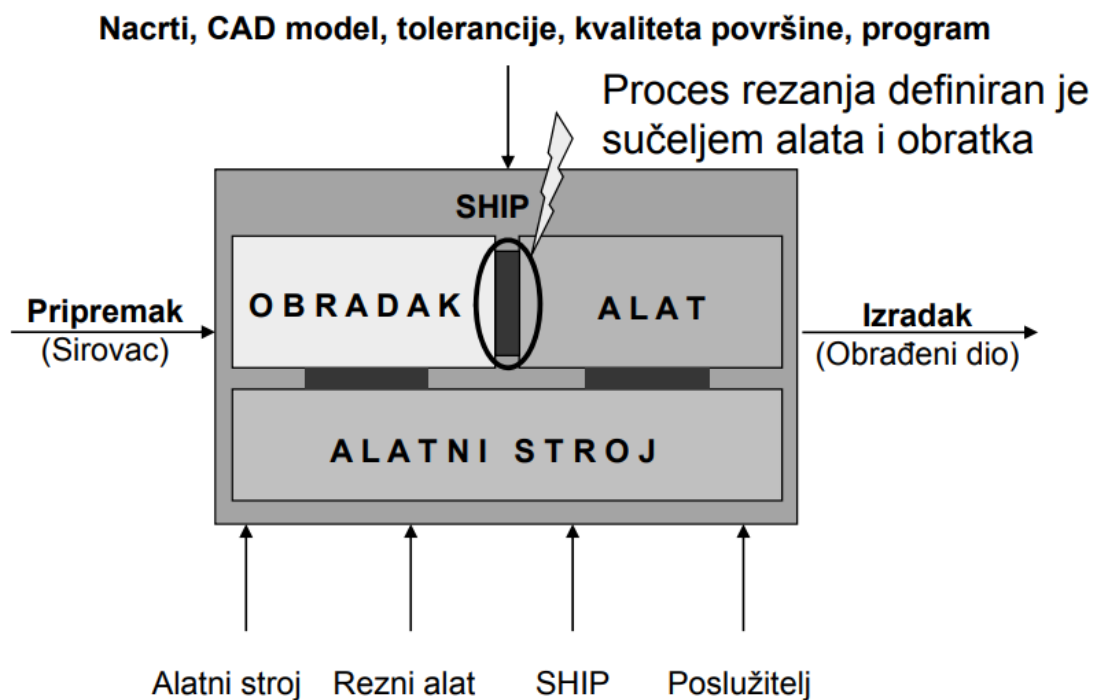


Slika 2. Prvi praktični industrijski tokarski stroj [4]

Otkrićem električne energije i razvojem elektromotora stvoreni su prvi oblici strojeva koji su slični onima koje danas koristimo. Ovakvim napretkom tehnologije došlo je do potpuno nove razine obrade, uključujući nove metode upravljanja, povećanu preciznost i pouzdanost u procesu obrade. Uz motorizaciju, strojevi su postali sve više prisutni u različitim industrijama, poput: tekstila, proizvodnje hrane, medicine, automobilske industrije. Ova evolucija omogućila je automatizaciju i povećanje učinkovitosti u proizvodnji, značajno mijenjajući način na koji ljudi rade i žive.

## 2.2. Podjela postupka obrade

Obrada odvajanjem čestica jedna je od najvažnijih proizvodnih tehnologija u industriji. Obrada se odnosi na odstranjivanje određene količine materijala sa sirovca u obliku odvojenih čestica. Svrha obrade je dobiti željeni geometrijski oblik predmeta odnosno izradaka. Slika 3. prikazuje obradu odvajanjem čestica kao sustav.

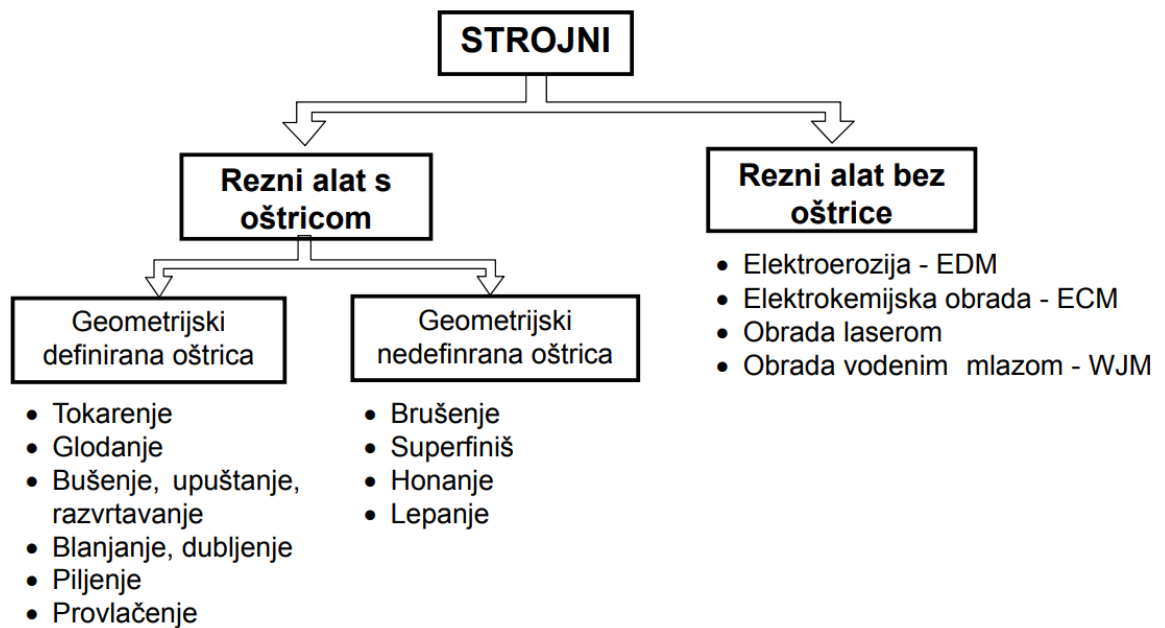


Slika 3. Obrada odvajanjem čestica kao sustav [5]

Početni komad materijala prije procesa obrade naziva se sirovac, koji može biti poluproizvod u obliku šipke, ploče ili odljevka. Kada se taj isti komad materijala postavi na alatni stroj, tada se on naziva obradak, a nakon završenog postupka procesa obrade, naziva se izradak. U skladu s nacrtom, tolerancijama, kvalitetom površine i odabranim materijalom, određuju se određeni parametri obrade, vrsta obrade i potrebni alati.

Postupci obrade podijeljeni su na ručne i strojne postupke. Ručni postupci uključuju turpijanje, bušenje, piljenje i glodanje. S druge strane, strojni postupci dalje se dijele na rezne alate s oštricom i bez oštrice. Obrada gdje rezni alat ima oštricu dodatno se klasificira na obradu s geometrijski definiranom oštricom i obradu s nedefiniranom oštricom. Ovi raznovrsni pristupi omogućuju prilagodbu procesa obrade svojstvima materijala i željenim karakteristikama izradaka prikazano na slici 4.





Slika 4. Podjela strojnih postupaka obrade [5]

### 2.3 Obrada odvajanja čestica postupkom glodanja

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) određenih površina proizvoljnih oblika s alatom koji ima definirani oblik oštrice. Ovaj proces obrade se uglavnom izvodi na određenim alatnim strojevima, koji se nazivaju glodalice i obradni centri, gdje je glavno gibanje kružno i obavlja ga alat. Posmično gibanje je najčešće povezano s obratkom. Ovisno o izvedbi stroja, posmično gibanje može obavljati i alat.

Alat koji se koristi za glodanje naziva se glodalo. Glodala imaju određenu geometriju reznog dijela s više reznih oštrica. Rezne oštrice ulaze u zahvat s predmetom, izvode periodički proces odvajanja čestica u ciklusu opterećenje-rasterećenje. Zbog takvog načina zahvata glodala s obradkom, dolazi do stvaranja diskontinuirane čestice, što je povoljna karakteristika za proces obrade odvajanjem čestica. U zahvatu s predmetom je uvijek nekoliko oštrica istovremeno. [6]

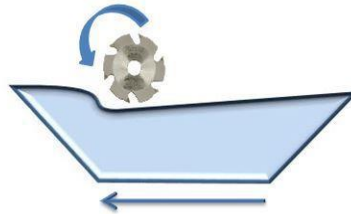
Glavne karakteristike glodanja uključuju:

- Alat glodalo s više reznih oštrica, pri čemu je samo dio tih oštrica u kontaktu s materijalom. U pravilu, manje vibracije javljaju se ako je veći broj zuba u zahvatu, što čini sam proces glodanja stabilnijim.
- Oštrica alata izvodi periodički proces odvajanja čestica u ciklusu opterećenje-rasterećenje.

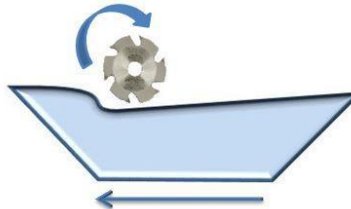
- Opterećenje na oštrici zuba mijenja se tijekom ciklusa odvajanja čestice, a ova promjena je vidljiva u promjenjivoj veličini poprečnog presjeka odvojene čestice. Opterećenje na svakom zubu mijenja se brzo od početka do završetka rada, odnosno izlaza iz materijala.

### 2.3.1 Podjela postupaka glodanja

Glodanje se može podijeliti na temelju više različitih kriterija. Prema kvaliteti obrađene površine, proces se dijeli na grubo, fino i završno glodanje. Ovisno o kinematici glodanja, razlikuju se protusmjerno i istosmjerno glodanje. U protusmjernom glodanju, smjer rotacije alata i pomaka materijala su suprotni slika 6. , dok je kod istosmjernog glodanja pomak materijala i rotacija alata u istom smjeru slika 5.



Slika 5. Istosmjerno glodanje [7]



Slika 6. Protusmjerno glodanje [7]

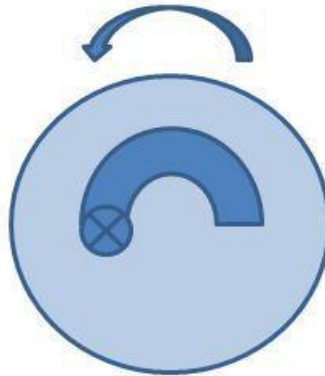
Prema obliku obrađivane površine, razlikuje se okretno, profilno, ravno, oblikovno i odvalno glodanje. Prema položaju oštrica glodala, ono može biti obodno te čeono (simetrično i nesimetrično). [7]

#### 2.3.1.1. Obodno glodanje

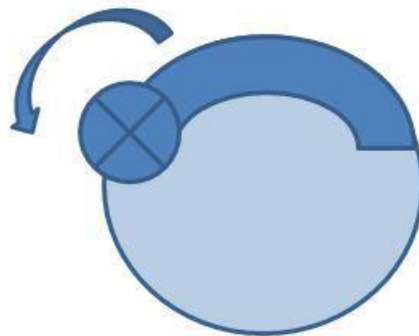
a) Ravno protusmjerno - ovo je postupak u kojem glodalo rotira u smjeru suprotnom od smjera brzine posmaka izratka. Rotacija alata u ovom slučaju je suprotnog smjera u odnosu na smjer posmaka izratka. Strugotina se stvara od manjeg prema većem presjeku.

b) Ravno istosmjerno - ovo je postupak u kojem obodna brzina glodala i posmična brzina izratka imaju isti smjer kretanja. U ovom slučaju, strugotina se stvara od većeg prema manjem presjeku.

c) Kružno - ovaj postupak uključuje skidanje čestica obodom rotacijskog alata, dok se obrađivani materijal kreće u kružnom smjeru (može biti unutarnje ili vanjsko, ovisno o položaju obradivog materijala i obliku alata).



Slika 7. Unutarnje kružno pravocrtno glodanje [7]



Slika 8. Vanjsko kružno pravocrtno glodanje [7]

### 2.3.1.2. Čeono glodanje

Čeono glodanje može biti simetrično ili nesimetrično, te se može izvoditi s glodalima čija je širina glodanja jednaka, veća ili manja od promjera glodanja.

Ovaj postupak uključuje uklanjanje materijala izratka pomoću oboda glodala koje najčešće izvodi glavno kružno gibanje, dok se posmak odvija linearno. Čeono glodanje se može izvoditi na horizontalnim i vertikalnim glodalicama.

### 2.3.2. Parametri obrade

Da bi se postigli optimalni uvjeti gibanja alata i obratka, potrebno je ispravno odabrati dubinu i širinu zahvata, brzinu rezanja i posmak.

Brzina rezanja predstavlja relativnu brzinu između kretanja glodala obodnom brzinom ( $V_c$ ) i obratka posmičnom brzinom ( $V_f$ ). Obodna brzina glodala određuje glavno gibanje, te se odabire ovisno o materijalu obratka, odabranom alatu, kvaliteti obrade (toleranciji, hrapavosti), sustavu hlađenja i podmazivanja, vrsti obrade i mogućnostima postizanja vrtnje stroja i njegovoj snazi.

Pravilno namještena brzina rezanja ključna je za postizanje učinkovitosti sa strane vremena obrade koja za posljedicu ima smanjenje troškova procesa. Njezino prilagođavanje specifičnostima materijala i uvjetima obrade je ključno za postizanje optimalnih režima alata i obrađenog materijala [7].

Formula za izračun obodne brzine rezanja:

$$V_c = d \cdot \pi \cdot n \quad (1)$$

Posmak se kod glodanja definira pomoću tri veličine:

1. **Posmak po zubu ( $f_z$ ):** To je veličina relativnog puta glodala ili obratka u pravcu obrade dok se glodalo okreće za jedan kutni korak, odnosno za jedan zub glodala.
2. **Posmak za jedan okretaj glodala ( $f$ ):** Ova veličina predstavlja relativni put obratka ili glodala u pravcu obrade dok se glodalo okrene za jedan cijeli okretaj.

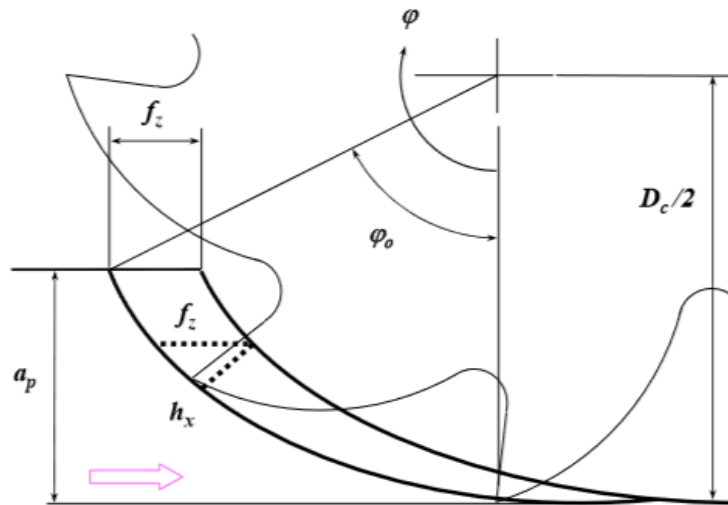
$$f = f_z \cdot z \quad (2)$$

3. **Posmičba brzina u minuti** (posmična brzina vs je relativan put glodala ili obratka u pravcu obrade za vrijeme od jedne sekunde).

$$V_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad (3)$$

Dubina rezanja, označena kao  $a_p$  [mm], definira se kao debljina sloja odvojenog od materijala. Osnovna svrha ove mjere je odvojiti što veću moguću količinu čestica, istovremeno održavajući zadanu točnost i kvalitetu površine koja se obrađuje. Ovaj cilj obično se postiže

korištenjem višestrukih prolaza, pri čemu se za konačnu obradu često odabire manja dubina rezanja kako bi se postigla željena preciznosti kvaliteta površine.



Slika 9. Parametri zahvata kod glodanja [7]

### 2.3.3. Alati za glodanje

Alat za glodanje, poznatiji kao glodalo, okarakteriziran je geometrijom reznog dijela s više glavnih reznih oštrica smještenih na zubima glodala. Ove oštrice mogu biti pozicionirane na obodnoj i/ili na čeonj strani glodala. Zubi glodala periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega, što čini dinamičko opterećenje jednim od ključnih obilježja glodala. U svakom trenutku, samo nekoliko zuba glodala je u zahvatu s obratkom. Slika 9 prikazuje ključne parametre kod glodala u zahvatu sa materijalom.

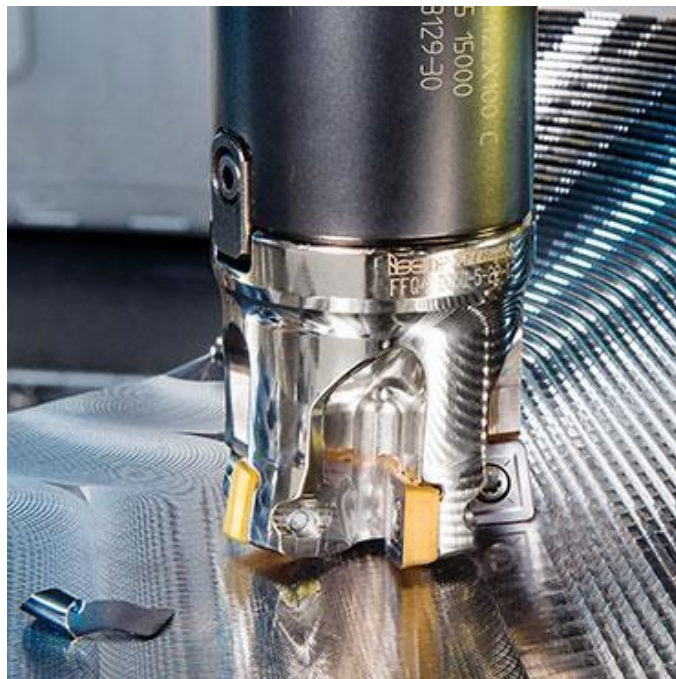
Svaki alat u postupku obrade odvajanjem čestica ima cilj ispuniti dva zadatka:

- U jedinici vremena, odvojiti što veći volumen određenog sloja materijala s obratka.
- Osigurati geometriju oblika i potrebne dimenzije uz minimalne troškove i određenu kvalitetu površine.

Alati za glodanje, odnosno glodala, mogu biti izrađeni iz istog materijala Slika 10 ili mogu sadržavati umetnutu reznu oštricu Slika 11 kako bi se poboljšala otpornost na trošenje i trajnost alata.



Slika 10. Jednodjelno glodalo [8]



Slika 11. Glodalo s izmjenjivim oštricama [9]

Alat za bušenje provrta koji se naziva svrdlo, opisan je geometrijom reznog dijela s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom, koja je nužna, iako otežava obradu. Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se koristi za stvaranje provrta manjih promjera ili proširivanje istih na veće promjere. Ovaj postupak obično se izvodi na alatnim strojevima, uglavnom na bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje kontinuirano pravocrtno. Posmično gibanje izvodi se istovremeno s glavnim gibanjem kako bi se održao kontinuitet obrade. Na bušilicama, sva gibanja obavlja sam alat. Postoje različiti oblici svrdala, a razlikuju se prema [8]:

a) Načinu izrade:

- Svrkla sa glodanim zubima
- Svrkla s brušenim i tokarenim zubima
- Svrkla ili glave s umetnutim zubima.




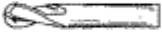




b) Obliku zubi:

- Svrkla s ravnim zubima
- Svrkla sa zubima u križ
- Svrkla sa zubima u spirali.

c) Obliku tijela:

- Svrkla valjkastog oblika
- Svrkla valjkastog oblika za ozubljenje
- Svrkla valjkastog oblika za navoje
- Profilna svrdla
- Modulna svrdla
- Vretenasta svrdla
- Konusna svrdla.

Rezni dio svrdla izrađen je od materijala znatno veće tvrdoće u usporedbi s obrađivanim materijalom, pri čemu se često koriste tvrdi metali, keramika, brzorezni čelici i bor nitrid. Cijelo svrdlo izrađuje se od brzoreznih čelika. Slika 12 prikazuje alate za glodanje.

SKICA ALATA	OPIS ALATA	Ref.-Broj
	<b>Grubo glodalo za poravnavanje, HSS</b> ø 40 x 20 mm, unutarnji promjer ø 16 mm	764 410
	<b>Vretenasto – utorno glodalo, HSS</b> prema DIN 327, oblik B ø3 mm - ø6 mm – promjer drške ø6 mm ø8 mm – promjer drške ø8 mm ø10 mm - ø10 mm ø12 mm - ø12 mm	764 301 764 306 764 308 773 100
	<b>Vretenasto glodalo za grubu obradu, HSS</b> prema DIN 844, shape A ø8 mm - ø16 mm	764 200
	<b>Profilno vretenasto glodalo, HSS</b> ø6 mm ø12 mm	771 030 771 040
	<b>Kutno glodalo, HSS</b> Prema DIN 1833, oblik A 60°, ø16 mm, drška - ø12 mm	764 400
	<b>Kutno glodalo, HSS</b> Prema DIN 1833, oblik B 45°, ø16x4 mm, drška - ø12 mm	771 050
	<b>Bušačka motka</b> Za provrte ø16-40 mm Drška - ø15 mm	F1Z 050
	<b>NC-start svrdlo, HSS</b> drškaø10 mm, kut vrha svrdla 120°	771 010

Slika 12. Alati za glodanje [10]

## 2.4. Glodači obradni centar

Glodači obradni centar predstavlja alatni stroj koji se sastoji od računalno numerički upravljane glodalice opremljene spremištem alata i automatskom izmjenom alata. Osim glavnog gibanja alata, prvotno je uvedeno 3D upravljanje, što uključuje simultano posmično gibanje osima X, Y i Z. Glodači obradni centri izuzetno su učinkoviti za obradu složenih izradaka u srednjeserijskoj i maloserijskoj proizvodnji. Položaj reznog alata u glavnom vretenu određuje podjelu glodačkih obradnih centara na horizontalne i vertikalne obradne centre. Na slici 13.



prikazan je vertikalni glodaći obradni centar, dok se na slici 14. nalazi horizontalni glodaći obradni centar.



Slika 13. Vertikalni glodaći obradni centar [11]



Slika 14. Horizontalni glodaći obradni centar [11]

Razvoj glodaćeg obradnog centra odvijao se postupno, započevši s 3D upravljanjem. Nakon toga, razvijeni su centri s 4D upravljanjem, a zatim s 5D upravljanjem. 4D upravljanje uključuje dodavanje rotacijske posmične osi uz tri osnovne osi, što omogućuje zakretanje glavnog vretena ili obratka pomoću okretnog stola. U današnje vrijeme, većina glodačkih obradnih centara opremljena je 5D upravljanjem (5 osi), što uključuje dodatne dvije rotacijske numerički upravljane osi uz tri osnovne osi.

Prednosti 5D obrade su mnogobrojne, a jedna od glavnih je izbjegavanje obrade na mjestu gdje je brzina rezanja nula, što se događa u području središnje osi glodala, gdje je promjer glodala jednak nuli. To se postiže nagibom obratka ili alata, što rezultira učinkovitijim procesom. Osim toga, nagib olakšava pristup alata obratku, čime se produžuje životni vijek alata. Takav pristup omogućuje i kraće vrijeme obrade te korištenje većih režima, povećavajući iskoristivost obradnog centra. Na slici 15. je prikazan 5D obradni centar.



Slika 15. 5D obradni centar [11]

## 2.5 Prednosti i nedostaci obrade odvajanjem

Kao i svaka tehnologija, obrada odvajanjem čestica ima niz prednosti i nedostataka. Prednosti obrade odvajanjem čestica su: [7]

1. **Točnost i postizanje visokih tolerancija:** Omogućuje postizanje visoke točnosti i uskih tolerancija.
2. **Dobra kvaliteta obrađene površine:** Često rezultira visokokvalitetnim obrađenim površinama, najčešće bez potrebe za naknadnim završnim obradama.
3. **Formiranje oštih rubova i ravne površine:** Idealna je za oblikovanje oštih vanjskih rubova, ravne površine te unutarnjih i vanjskih profila.

4. **Primjena na različitim materijalima:** Može se primijeniti na gotovo svim poznatim materijalima.

5. **Obrada otvrdnutih materijala:** Najbolja je metoda za oblikovanje otvrdnutih (kaljenih) i krtih materijala.

6. **Obrada složenih oblika:** Omogućuje obradu najsloženijih oblika površina u različitim dimenzijama.

7. **Mali utjecaj na materijal obratka:** Uzrokuje vrlo male promjene u materijalu obratka, često samo u tankom sloju (HAZ - zona toplinski utjecaja).

Nedostatci kod obrade odvajanjem čestica su:

1. **Više postupaka obrade:** Ponekad je potrebno primijeniti više postupaka obrade i alatnih strojeva za formiranje jednog obratka, odnosno proizvoda.

2. **Složeno programiranje:** Neki dijelovi zahtijevaju primjenu CNC strojeva i složenog CAM programiranja.

3. **Potreban velik prostor:** Alatni strojevi i rukovanje alatima i obratcima zahtijevaju velik prostor, u odnosu na svoj radni prostor.

4. **Utjecaj mikroklima:** Mikroklima je pod jakim utjecajem obradnih procesa, uključujući toplinu, buku i druge štetne elemente, koji nepovoljno utječu na obradu i njen krajnji rezultat.

5. **Generiranje odvojenih čestica:** Ovaj proces generira odvojene čestice kao posljedicu obrade.

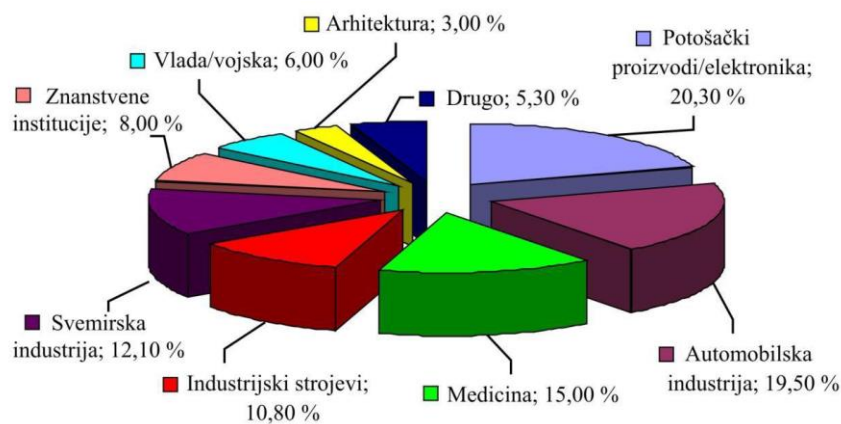
### 3. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (AM) je tehnologija koja se razvila 1987. godine, kada je predstavljena stereolitografija (SL/SLA) u tvrtci 3D Systems (SAD). Proces aditivne proizvodnje započinje izradom 3D CAD modela, koji se zatim sprema u stl. formatu. Kod konvencionalnih tehnologija za programiranje CNC strojeva koriste se CAM programi gdje se definiraju kretnje alata koje se zatim pretvaraju najčešće u G kod, prepoznatljiv upravljačkoj jedinici stroja. Takvi programi, ukoliko su proizvodi kompleksne geometrije, kod CNC strojeva zahtijevaju ponekad kompleksno i zahtjevno programiranje. Za razliku od toga, kod aditivne tehnologije softwear-i naziva *engl. Slicer*, mogu se poistovijetiti s CAM softwear-ima kod programiranja CNC strojeva, međutim u *slicer-ima* nije potrebno kompleksno programiranje, nego se može reći da je ono poluautomatizirano. Datoteka u stl. formatu izrađena od mreže povezanih trokuta u sliceru se dijeli po visini Z na mnoštvo dijelova definiranih prema parametrima visine ispisa predmeta. Nakon podijele u sliceru, slijedi pretvaranje u G kod, prema kome jedinica pisača izvršava kretnje, nanošenjem materijala sloj po sloj. [12]

Prema tome, ključna razlika između aditivnih i tradicionalnih postupaka proizvodnje, koje se oslanjaju na odvajanje materijala, je u tome što aditivni postupci dodaju materijal sloj po sloj. Ova tehnologija često je korištena za izradu prototipa u različitim industrijama poput arhitekture, automobilske industrije, medicinskih aplikacija, informacijske tehnologije, povratnog inženjeringa, dentalne tehnologije i drugih sektora proizvodnje.

Aditivna proizvodnja ima tri osnovne primjene: [13]

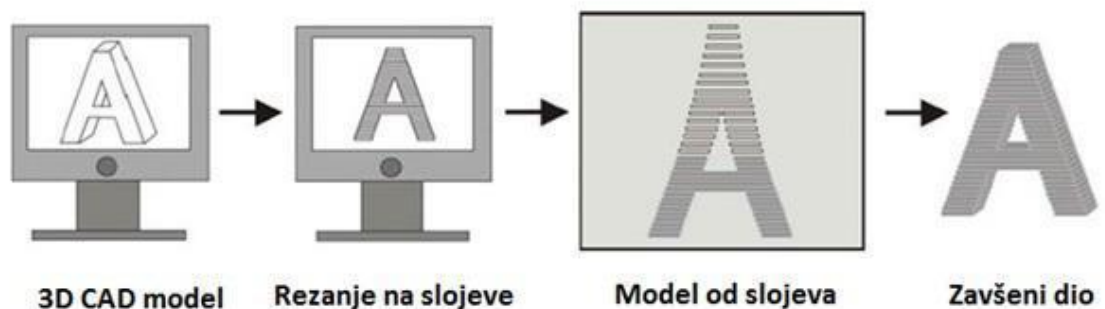
1. Postupci brze proizvodnje prototipova (Rapid Prototyping-RP); koriste se za brzu izradu prototipova proizvoda.
2. Postupci brze proizvodnje alata i kalupa (Rapid Tooling-RT); koriste se za brzu izradu alata i kalupa potrebnih u proizvodnji.
3. Postupci brze (izravne) proizvodnje (Rapid Manufacturing-RM); koriste se za brzu izradu finalnih proizvoda direktno iz aditivnog procesa.



Slika 16. Područja primjene aditivne proizvodnje [14]

### 3.1 Princip izrade predmeta u aditivnoj proizvodnji

Princip izrade predmeta u aditivnoj proizvodnji temeljen je na izgradnji predmeta sloj po sloj. Model predmeta koji je konstruiran računalom u 3D CAD softwear-ima presjeca se horizontalno na jednako debele dvodimenzionalne slojeve, koji se potom spajaju jedan na drugog. Na taj način spajanjem mnoštva dvodimenzionalnih dijelova dobiva se trodimenzionalni predmet, s karakterističnim stepenastim izgledom površine, uzrokovanim principom slaganja sloj po sloj. Prikaz na slici 17. ilustrira princip izrade aditivnom proizvodnjom i izgled krajnjeg proizvoda koji je rezultat presjecanja modela na tanke slojeve tvoreći stepenastu površinu.



Slika 17. Princip izrade u aditivnoj proizvodnji [15]

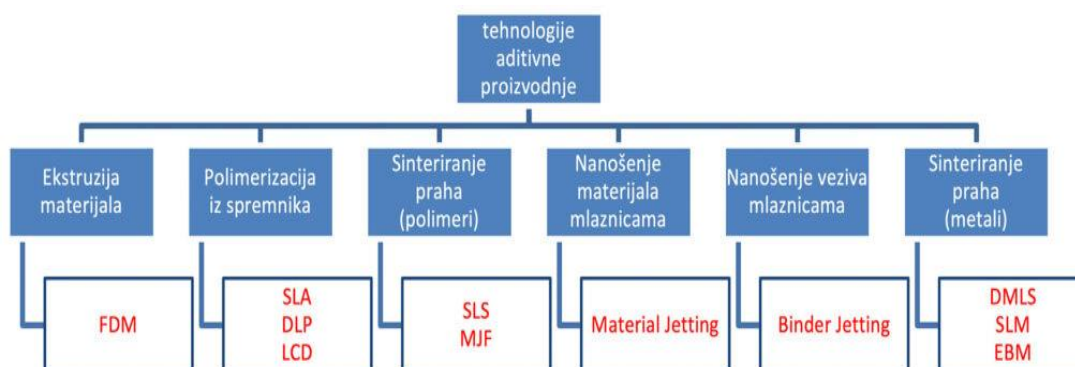
Načelo aditivne proizvodnje predmeta uvijek je isto, bez obzira na postupak koji se koristi, te se može podijeliti u sljedeće faze izrade:

1. Izrada CAD modela.

2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku.
3. Prijenos STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju.
4. Namještanje parametara stroja.
5. Izrada prototipa.
6. Uklanjanje prototipa iz pisača.
7. Naknadna obrada, ako je potrebna.
8. Primjena.

### 3.2 Podjela aditivnih tehnologija

Aditivne tehnologije (AM) klasificiraju se prema vrsti materijala korištenih u proizvodnji proizvoda. Prvenstveno se razmatra stanje u kojem je materijal, ono može biti tekuće (fotoosjetljive polimerne smole, epoksidne smole i sl.), kruto stanje (polimeri, papir itd.) ili praškasto (keramika, metali, polimeri). Nastavno na to, određuje se način spajanja materijala, bilo taljenjem, polimerizacijom, laminiranjem ili povezivanjem pomoću veziva, što je naravno u direktnoj svezi sa stanjem materijala prije ispisa.



Slika 18. Podjela aditivne proizvodnje [16]

Postupci koji koriste materijal u tekućem stanju, prelaze iz početnog stanja kapljevine u kruto stanje putem procesa polimerizacije. Najpoznatiji od tih postupaka je stereolitografija (SLA), a spadaju još sljedeći postupci: polyjet i tonografski postupak (Solid Ground Curing – SGC). S obzirom na materijale u čvrstom stanju, ovi postupci obuhvaćaju širok spektar oblika, gdje je najčešći ulazni materijal krutog stanja u obliku žice. Najpoznatiji i najčešći postupak u aditivnoj tehnologiji korišten u industriji i za vlastite potrebe je taložno očvršćavanje (Fused Deposition Modeling – FDM). Iako prah može biti u čvrstom stanju, posebno je istaknut u vlastitu kategoriju kako bi se naglasila zrnata forma praha. Postupci koji se svrstavaju u ovu skupinu uključuju selektivno lasersko srašćivanje (Selective Laser Sintering – SLS) i 3D tiskanje (3D printing – 3DP). Princip rada ovog postupka je vrlo sličan polimerizaciji, međutim glavna razlika je u stanju

početnog materijala gdje se koristi praškasti materijal u odnosu na tekuće smole korištene kod postupaka polimerizacije. Postupakom selektivnog laserskog srašćivanja (SLS) zagrijava se praškasti materijal pomoću laserskih zraka. Sustav 3D pisača koji radi na principu selektivnog laserskog srašćivanja sastoji se od laserskog izvora, sustava zrcala za pozicioniranje laserske zrake, radne komore i dodatne komore za višak materijala. Izvor energije odnosno laser generira zraku koja je usmjerena pomoću zrcala namjenjenih za pozicioniranje laserskog snopa. Nakon što laserski snop osvjetli praškasti materijal na točno određenoj poziciji, zagrijavanjem materijala on prelazi iz praškastog u kruto stanje. Unutar ovog procesa temperatura kojom se zagrije praškasti materijal mora biti točno unutar zadanih granica kako bi proces uspio, ne smije biti ispod niti iznad propisanih granica. Kretanje sustava zrcala definirane su unutar slicera, gdje se predmet dijeli na mnoštvo isječaka po visini, koji predstavljaju slojeve kod ispisa. Nakon što se odradi jedan sloj ovisno o izvedbi pisača koja može biti top-down ili bottom-up slijedi pomak komore za visinu koliko će biti sloj tiskanja. Zatim slijedi pomak valjka koji površinu praškastog materijala poravnava po visini, kako bi novi sloj nakon polimerizacije bio svuda jednak po visini. Višak odstranjenog materijala prebacuje se u dodatnu komoru gdje se nalazi materijal. Posljednji korak procesa je polimerizacija novog materijala na prethodno nastali sloj. Ponavljajući ovaj proces, kod aditivne tehnologije predmeti se izrađuju sloj po sloj.

### **3.3 Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje**

Automatizirani sustavi brze proizvodnje prototipa omogućuju direktnu izradu funkcionalnih dijelova u malim serijama. Kvaliteta površine i preciznost dimenzija dijelova proizvedenih na ovaj način obično su manji u usporedbi s dijelovima proizvedenim klasičnim obradnim postupcima. Proizvodnja konstrukcijskih dijelova spremnih za eksploataciju najčešće se mjeri u satima, što je jedan od glavnih nedostataka ove tehnologije. Razina dimenzijske kompleksnosti proizvoda ne utječe značajno na njegovu izradu u suprotnosti prema konvencionalnim tehnologijama, gdje se pripremna vremena, korištenje reznih i steznih alata, te sama priprema stroja mijenja u odnosu na promjenu i dimenzijsku kompleksnost dijela. Zbog toga je aditivna tehnologija pogodna za izradu prototipa. Vrijeme i troškovi razvoja proizvoda značajno su smanjeni, što ubrzava dolazak proizvoda na tržište. Omogućuje se izrada složenijih oblika kako bi se zadovoljili estetski i funkcionalni zahtjevi. Dizajn proizvoda može se prilagoditi potrebama potrošača bez ograničenja koja nameće tradicionalna proizvodnja. Zbog manje dijelova, eliminira se potreba za vremenom utrošenim na montažu i izradu sklopova, kao i potreba za vijcima ili drugim spojnim elementima. Također, omogućuje precizno definiranje potrebnih alata za proizvodnju proizvoda i ispitivanje funkcijskih prototipova prije izrade alata za serijsku proizvodnju.

Nedostatci brze izrade prototipa temelje se na ograničenom izboru materijala za izradu, smanjenoj kvaliteti površine i visokom ulaganjima pri kupnji strojeva. Zbog samog načina izrade ovom tehnologijom, čije je još uvijek jedno od glavnih mana vrijeme izrade u odnosu na konvencionalne tehnologije, ova tehnologija nije pogodna za serijsku proizvodnju. Inovacijom materijala te postupaka izrade aditivnom tehnologijom, uz kvalitetno projektiranje procesa i organizaciju proizvodnje, taj problem se pokušava nadići kako bi se aditivna tehnologija koristila kao proizvodnja za male serije.

#### **4. HRPAVOST POVRŠINE**

Unatoč različitim tehnologijama proizvodnje, tehničke površine često sadrže nepravilnosti koje odstupaju od idealnog geometrijskog oblika. Ova odstupanja mogu biti različitih razina, uključujući makro odstupanja koja postaju vidljiva s velikim valnim duljinama, te znatno manje mikro nepravilnosti koje proizlaze iz interakcije alata pod određenim orijentacijama.

Važno je naglasiti da nijedna metoda obrade, bez obzira na preciznost, ne može stvoriti potpuno ravnu površinu kada je riječ o obradi na konvencionalnim materijalima. Čak i one najglade površine dobivene razdvajanjem kristala, sadrže nepravilnosti na atomskoj razini. Stvarne površine se klasificiraju prema dvama tipovima odstupanja geometrije: makro odstupanja, koja postaju primjetna kod većih valnih duljina, i mikro nepravilnosti, koje su znatno manje i proizlaze iz djelovanja alata pod određenim orijentacijama.

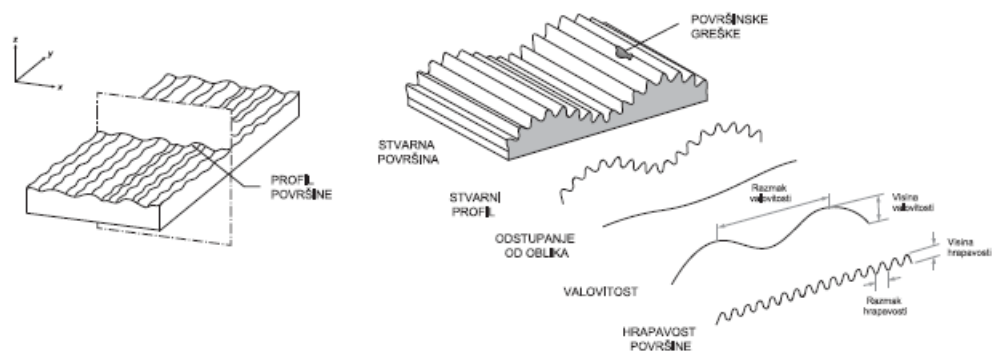
Površinska hrapavost, definirana prema normi ISO 4287, obuhvaća sve mikrogeometrijske nepravilnosti na površini predmeta koje su mnogo puta manje od same površine predmeta. Ove nepravilnosti nastaju tijekom postupka obrade ili pod utjecajem drugih čimbenika. Općenito, manja vrijednost hrapavosti obično rezultira većom dinamičkom čvrstoćom strojnog dijela, povećanom otpornošću na koroziju, poboljšanim prijenosom topline i drugim pozitivnim karakteristikama. Nizak stupanj hrapavosti zahtjeva dulji i skuplji postupak obrade, što u konačnici utječe na ukupni trošak proizvodnje.

U moderno doba, razvojem tehnologije, postalo je moguće prikazati karakteristike površina korištenjem 2D i 3D parametara. Površine obradaka obično sadrže varijacije u hrapavosti i teksturi, ovisno o načinu izrade i strukturi materijala. Svaka površina obradka je definirana topografijom i profilom površine. Topografski prikaz određene površine pruža realističniji i precizniji trodimenzionalni prikaz u odnosu na tradicionalni dvodimenzionalni pristup mjerenjima. Mogu se odrediti površinske nepravilnosti poput uzdužnih žljebova, udubine, usmjerenost, anizotropija i nehomogenost.



Iako analiza 3D topografije površine u načelu pruža pouzdaniji i relevantniji prikaz, često nema prednosti u odnosu na upotrebu 2D sustava ispitivanja, zbog visokih troškova opreme i potrebe za sljedivošću dobivenih rezultata mjerenja. Dvodimenzionalno mjerenje hrapavosti površine temeljeno je na izradi 2D profila koji omogućava proračun potrebnih parametara hrapavosti. U daljnjem tekstu slijede definicije općih pojmova i mjerenja hrapavosti tehničkih površina, sukladno normi HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010.

Profil površine jest presjek između stvarne površine i ravnine. Takva ravnina je najčešće odgovarajućeg smjera i paralelna u odnosu na stvarnu površinu.



Slika 19. Odabrani profil površine te odstupanja na površini [17]

Stvarna površina je trodimenzionalna tvorevina čija je funkcija ograničavanje tijela i odvajanje od okoline. Može nastati različitim postupcima obrade. Prema teorijskom modelu, obuhvaća niz odstupanja koja se kategoriziraju u različite skupine, poput površinskih grešaka, odstupanja od oblika, valovitosti i površinske hrapavosti [17].

Površinske greške su djelomična odstupanja površine od predviđenog geometrijskog oblika, koje nastaju tijekom, odnosno nakon obrade proizvoda pod utjecajem nepredviđenih faktora. Važno je napomenuti da odstupanja koja proizlaze iz normalnog i redovnog proizvodnog procesa ne spadaju u kategoriju površinskih grešaka; one su neželjene i nenamjerne značajke površine, poput ogrebotina i udubljenja [17].

Odstupanje od oblika obuhvaća devijaciju od zadane geometrije i nastaje uslijed pogrešnog vođenja, krivog pozicioniranja, savijanja ili trošenja stroja, alata ili izratka tijekom proizvodnog procesa. Ova kategorija odnosi se na opći oblik površine, zanemarujući varijacije uzrokovane hrapavosti i valovitosti [17].

Valovitost označava dio teksture površine na kojem se hrapavost preklapa. Očituje se dugim valovima na površini, paralelnim s geometrijom. Ovo može proizaći iz vibracija, nepravilnog praćenja alata ili izratka, odstupanja u radu stroja i unutarnjih naprezanja materijala.

Površinska hrapavost, ili jednostavno hrapavost, definira se kao nepravilnosti koje su inherentne proizvodnom procesu, a ne samom stroju, kao što su alati za rezanje ili abrazivna zrna. To isključuje površinske greške, odstupanja od oblika i valovitost, a izražava se kratkim valovima. Mjeri se odstupanjem u smjeru vektora normalnog na stvarnu površinu od njezinog idealnog oblika. Velika odstupanja rezultiraju grubom i hrapavom površinom, dok manja stvaraju glatku površinu.

Tekstura površine obično se sastoji od komponenata sitnih nepravilnosti koje nastaju tijekom procesa oblikovanja, a to su uglavnom površinska hrapavost i valovitost.

Topografija površine definira se orijentacijom površine i hrapavošću, pri čemu se karakterizira nizom vrhova i udolina. Nakon odabira profila površine, željene karakteristike određuju se primjenom profilnih filtera  $\lambda_c$  i  $\lambda_f$ , koji odvajaju profil hrapavosti od valovitosti.

Filtriranje omogućuje odvajanje dugih valnih duljina od kratkih komponenata, tj. isključivanje valnih duljina iznad ili ispod određene frekvencije. To uključuje hrapavost (koja propušta kratke valne duljine - visoke frekvencije), valovitost (koja propušta duge valne duljine - niske frekvencije) i ostale komponente unutar određene širine.

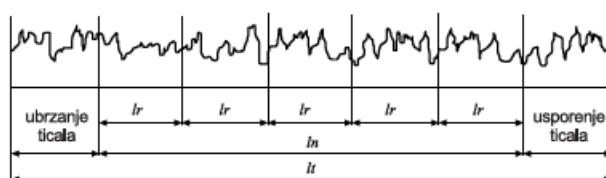
Granične vrijednosti profilnih filtera  $\lambda_c$  i  $\lambda_f$  određuju valne duljine na kojima filter postaje učinkovit, a za analizu površinskih parametara obično se uzimaju u obzir valne duljine između gornje i donje granične vrijednosti. [18]

Tablica 1. Preporučene granične vrijednosti filtra ( $\lambda_c$ )

Referentna duljina $l_r (\lambda_c)$ [mm]	Duljina vrednovanja $l_n = 5 \times l_r$ [mm]	Periodički profil $RS_m$ [ $\mu m$ ]	Neperiodički profil	
			$Rz$ [ $\mu m$ ]	$Ra$ [ $\mu m$ ]
0,08	0,4	>0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02
0,25	1,25	>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	>0,02 do 0,1
0,8	4	>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2
2,5	12,5	>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10
8	40	>1,3 do 4	>50	>10

Profil hrapavosti prikazuje nepravilnosti s kratkim valnim duljinama, odnosno visokim frekvencijama, i oblikuje se eliminacijom komponenti s dugim valnim duljinama iz osnovnog profila pomoću profilnog filtra ( $\lambda_c$ ). Suprotno tome, profil valovitosti prikazuje nepravilnosti s dugim valnim duljinama, odnosno niskim frekvencijama i formira se eliminacijom komponenti s kratkim valnim duljinama iz osnovnog profila pomoću profilnih filtera.

a) Karakteristične duljine profila hrapavosti



b) Srednja linija profila



Slika 20. Profil hrapavosti [17]

Duljine koje su ključne pri ispitivanju obuhvaćaju: duljinu prijelaza ili ispitivanja ( $l_t$ ), duljinu procjene ili vrednovanja ( $l_n$ ) te duljinu uzorkovanja ili referentnu duljinu ( $l_r$ ). Duljina prijelaza ili ispitivanja ( $l_t$ ) odnosi se na ukupnu duljinu kretanja ticala tijekom postupka ispitivanja nepravilnosti. Ova duljina obuhvaća duljinu procjene ili vrednovanja, uz dodatne duljine na početku i kraju koje se odbacuju u procesu filtriranja.

Duljina procjene ili vrednovanja ( $l_n$ ) predstavlja segment određene duljine izdvojen iz profila koji se ispituje i vrednuje. Ova duljina obuhvaća najmanje jednu ili više referentnih duljina.

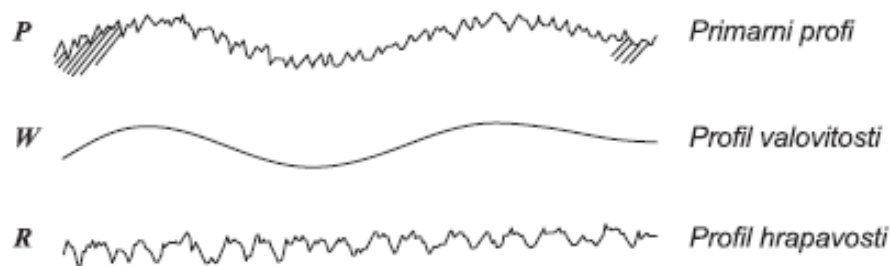
Duljina uzorkovanja ili referentna duljina ( $l_r$ ,  $l_w$ ,  $l_p$ ) je odvojeni dio zadane duljine koji identificira nepravilnosti i potrebne parametre. Duljine uzorkovanja profila hrapavosti ( $l_r$ ) i profila valovitosti ( $l_w$ ) usklađene su s njihovim graničnim vrijednostima ( $\lambda_c$  za profil hrapavosti i  $\lambda_f$  za profil valovitosti). Duljina uzorkovanja primarnog profila ( $l_p$ ) jednaka je duljini procjene ili vrednovanja ( $l_n$ ) [3].

Srednja linija profila ( $m$ ) određena je za svaki profil pojedinačno i predstavlja referentnu liniju za izračunavanje parametara. Metoda najmanjih kvadrata koristi se za definiranje primarnog profila, dok se profilni filteri  $\lambda_c$  i  $\lambda_f$  koriste za analizu hrapavosti i valovitosti.

#### 4.1. Parametri hrapavosti

Parametri koje treba izračunati i definirati ovise o vrsti profila i dijele se prema prvom slovu simbola na sljedeći način [17]:

- P: prefiks za parametre primarnog profila,
- W: prefiks za parametre profila valovitosti,
- R: prefiks za parametre profila hrapavosti.



Slika 21. Razlučivanje P,W i R karakteristika profila [17]

Amplitudni parametri su ključni za karakterizaciju profila površine u 2D mjernim sustavima, posebno za mjerenje vertikalnih odstupanja površine [17]. Ovi parametri pružaju informacije o visinskim karakteristikama površinskih odstupanja. Hrapavost površine obično se ocjenjuje u odnosu na srednju referentnu liniju ( $m$ ) unutar duljine prijelaza ili ispitivanja ( $l_t$ ), pri čemu su odstupanja od linije minimalna. Ova ocjena ovisi o kvaliteti obrade i metodi mjerenja .

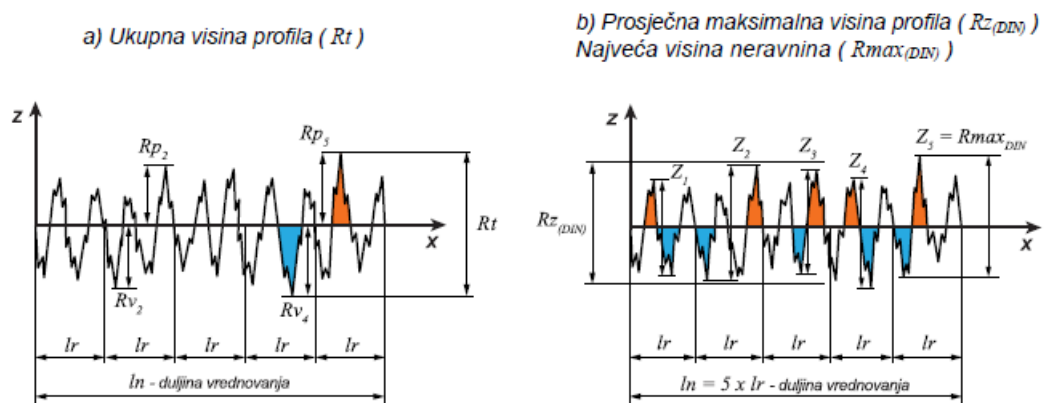
U praksi, za procjenu hrapavosti površine često se koristi srednje aritmetičko odstupanje profila ( $R_a$ ).  $R_a$  predstavlja srednju aritmetičku vrijednost apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje referentne linije ( $m$ ) unutar referentne duljine ( $l_r$ ). Ovaj parametar je lako definirati i mjeriti, pružajući opći uvid u odstupanja visine na površini. Ipak, nedostatak ovog parametra leži u tome što ne pruža informacije o prostornom obliku te nije osjetljiv na male promjene profila. To znači da površine s različitim teksturama mogu imati istu vrijednost parametra  $R_a$ . [19]

Jedan od značajnih parametara hrapavosti je i ukupna visina profila ( $R_t$ ), koja predstavlja zbroj maksimalne visine vrha i maksimalne dubine udoline profila unutar duljine procjene ili vrednovanja ( $l_n$ ). Mjerenje se provodi udaljenjem između najviše i najniže točke profila.  $R_t$  se

smatra strožim standardom od  $R_z$  jer se mjerenje odnosi na duljinu procjene ili vrednovanja, no osjetljiv je na prisutnost ogrebotina i sličnih grešaka zbog korištenja vršnih vrijednosti.

$$R_t = \max(R_{p_i}) + \max(R_{v_i}) \quad (4)$$

Osim toga, prema starijim lokalnim standardima, kao što je DIN 4768 iz 1990. godine, vrijednost prosječne maksimalne visine profila ( $R_z(\text{DIN})$ ) definira se kao srednja vrijednost pet suma najviše i najniže točke profila ( $Z_i$ ) na pet referentnih duljina ( $l_r$ ) unutar granica duljine vrednovanja ( $l_n$ ).



Slika 22. Ukupna i prosječna maksimalna visina profila [19]

Prema različitim konstrukcijskim zahtjevima odabiru se određeni stupnjevi hrapavosti dani u tablici 2.

Tablica 2. Stupnjevi i razredi površinske hrapavosti

Stupanj hrapavosti	-	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	-
Razred hrapavosti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400

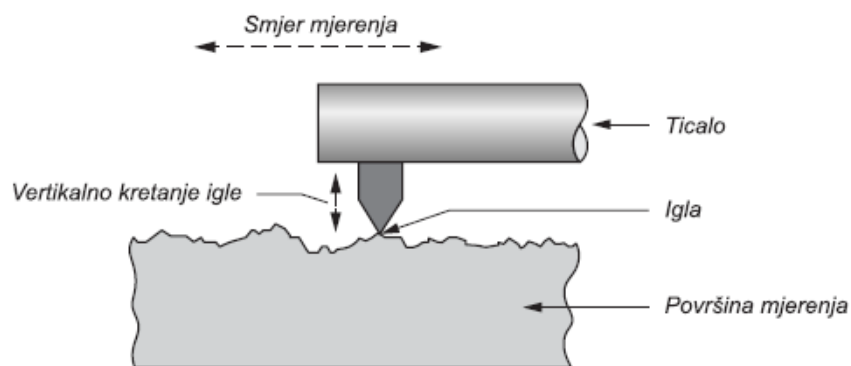
## 4.2. Mjerenje hrapavosti površine

Površinske hrapavosti se mogu ispitivati različitim metodama, ovisno o potrebi procjene na nano ili mikro razini. Primjerice, fizičari često zahtijevaju detaljne informacije o površinama, uključujući i molekularnu hrapavost, te koriste metode poput difrakcije elektrona niske energije, metode molekularnih snopova, mikroskopije polja-iona, atomske sile i slično. S druge strane, za

većinu inženjerskih i proizvodnih površina nisu potrebne toliko detaljne informacije, već se koriste mikroskopske metode koje mogu biti mehaničke ili optičke. Instrumenti koji se upotrebljavaju za mjerenje hrapavosti dijele se u dvije kategorije: kontaktni tip, kod kojeg u postupku mjerenja hrapavsti komponenta mjernog instrumenta dodiruje površinu koja se mjeri, i nekontaktni tip. Važno je napomenuti da instrumenti kontaktnog tipa mogu oštetiti površinu, pa se u takvim mjerenjima normalno opterećenje mora održavati niže od tvrdoće površine .

Koristeći se 2D ili 3D profilmetrom, prikupljaju se podaci o površinskom profilu, na kojima se kasnije temelje tehnike za analizu hrapavosti. Unatoč prednostima optičkih metoda, kao što su brzo i prikladno mjerenje te neoštećivanje izmjerene površine, konvencionalni profilni mjeriči kontaktnog tipa s ticalom i dalje se široko koriste u industriji, istraživanju i razvoju. Glavni razlozi tome su akumulirano iskustvo s tradicionalnim tehnikama mjerenja i analize, pouzdanost mjerenja s izravnim dodirivanjem stvarne površine te kompatibilnost s postojećim mjernim podacima. [20]

Unatoč mnogim prednostima 3D mjerenja, primjena 2D mjerenja hrapavosti još uvijek je široko rasprostranjena zbog visokih troškova opreme 3D sustava i poteškoća u osiguravanju sljedivosti rezultata mjerenja.

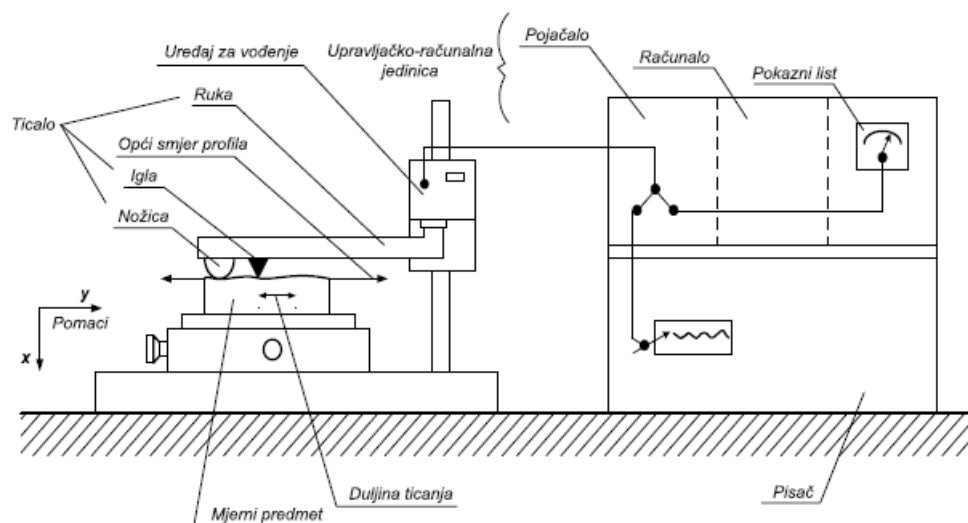


Slika 23. Mjerenje 2D parametra hrapavosti [21]

2D sustavom mjeri se profil u dvodimenzionalnom obliku, iz kojeg se izračunavaju 2D parametri hrapavosti. Elektroničko-mehanički uređaj s ticalom zatim stvara uzorak primarnog profila s uključenim komponentama hrapavosti, valovitosti i odstupanja od oblika (Slika 23.).

Vertikalnim pomakom igle ticala, čija je površinska brzina kretanja konstantna, dobiva se primarni profil. Pomoću električnog pretvarača vertikalni pomak igle pretvara se u signal koji se dalje obrađuje računalom. Kvantitativna informacija nastaje pomakom od jedne točke do druge,

uz stvaranje profila prema vertikalnom odstupanju igle. Međunarodnim standardom (ISO 3274:1996) propisan je postupak mjerenja, uključujući specifikacije uređaja i njegovih dijelova.



Slika 24. Elektroničko-mehanički mjerni uređaj s ticalom [22]

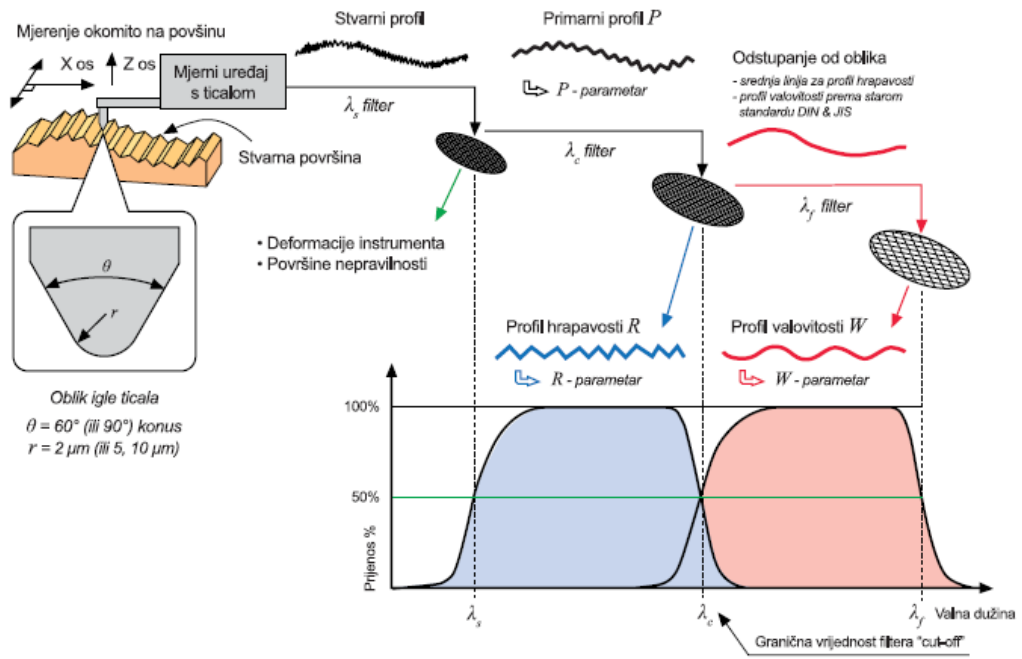
Ovim postupkom postižu se precizna mjerenja, kako u industrijskim tako i u laboratorijskim uvjetima, u vertikalnom rasponu od nekoliko milimetara s nanometarskom rezolucijom, uz opciju uzdužnog ispitivanja preko 100 mm.

Igla ticala obično je dijamantni stožac s kutom od  $60^\circ$  do  $90^\circ$  i radijusom zakrivljenosti vrha od 2, 5 ili 10  $\mu\text{m}$ . Ona je pričvršćena na šipku od nehrđajućeg čelika koja je postavljena na ruku ticala. Sustav vođenja i vrsta igle mogu značajno utjecati na točnost generiranja profila ispitivanja.

Nadalje, brzina vođenja i sila uslijed pritiska ticala na površinu mogu uzrokovati plastične deformacije površine, što može rezultirati neupotrebljivošću na mekim materijalima.

Izravnim vertikalnim kontaktom stvarne površine i pravilno odabranom iglom ticala generira se digitalizirani profil površine. Zatim slijedi faza filtriranja ( $\lambda_s$ ) sa ciljem uklanjanja mikro udubljenja koja su najčešće rezultat deformacije instrumenta ili površinskih nepravilnosti. Dobiveni profil naziva se primarni profil P. Potom se primjenjuju  $\lambda_c$  i  $\lambda_f$  filteri kako bi se odvojili i generirali profili valovitosti W i hrapavosti R.

Naposlijetku, nakon što se provede filtriranje, može se započeti računanje amplitudnih i ostalih parametara odstupanja površine. Slika 25. prikazuje postupak i shemu mjerenja.



Slika 25. Postupak mjerenja hrapavosti [24]

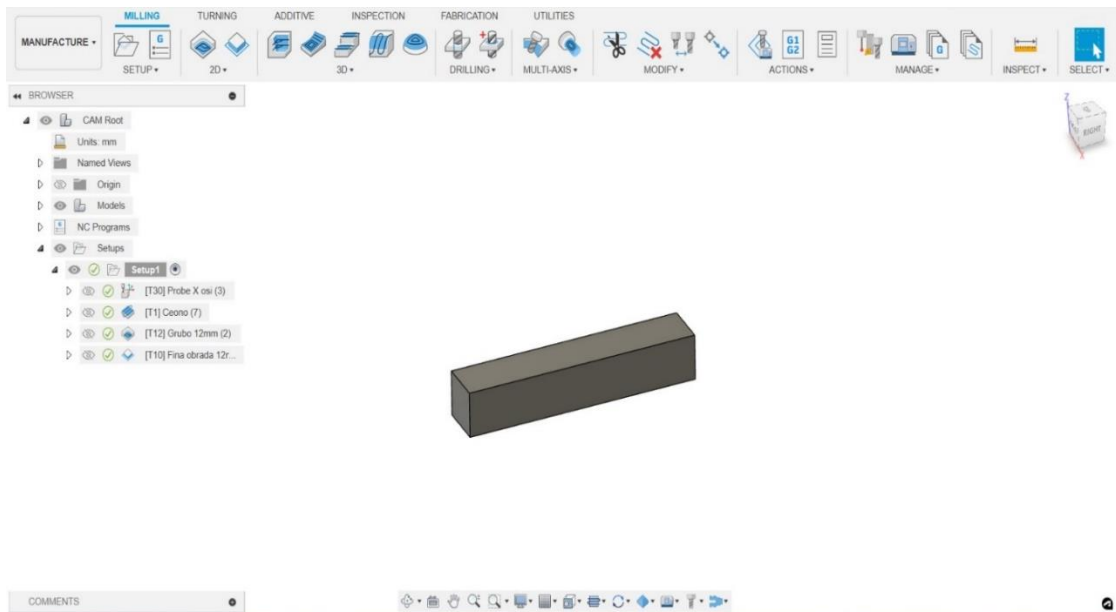


## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu zadatka provodila su se mjerenja hrapavosti površine Ra, na uzorcima od dva različita materijala. Korišteni materijali su PA12 (Poliamid) i aluminijska legura EN-AW 5083. Uzorci od poliamida dobiveni su aditivnom tehnologijom selektivnim laserskim srašćivanjem (SLS), gdje je dio uzoraka nakon izrade pjeskaren, a dio nije. Uzorci aluminijski obrađivani su CNC strojnom obradom postupkom glodanja sa različitim parametrima, gdje su se mijenjale brzine rezanja i posmična brzina. Mjerenja hrapavosti površine odvijala su se u prostorima Veleučilišta u Karlovcu na uređaju Mitutoyo SurfTest SJ-210.

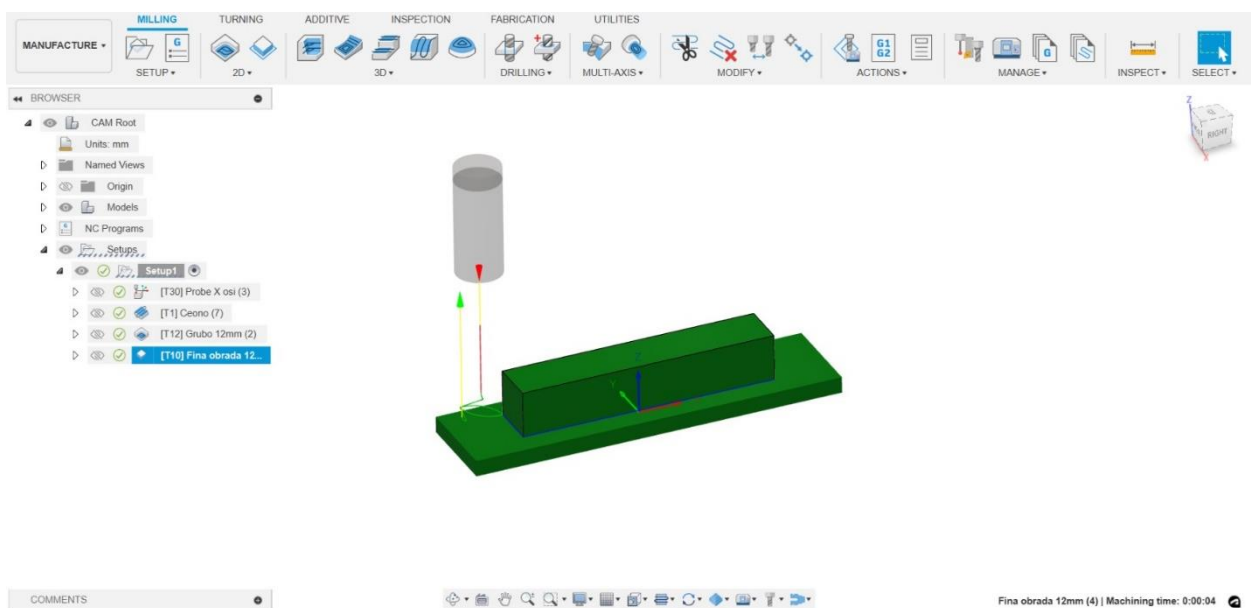
### 5.1 CAD/CAM model uzorka

Model uzorka koji će se obrađivati tehnologijom glodanja izrađen je u programu Fusion 360. Fusion 360 je program, odnosno Cax programski alat, koji sadrži i module za 3D konstruiranje i CAM programiranje. Izrada uzoraka započinje 3D konstruiranjem unutar modula za konstruiranje. Zatim slijedi prelazak u sučelje *manufacturing* modula koji je zapravo okruženje za CAM programiranje CNC alatnih strojeva, aditivnu proizvodnju i mjerenje proizvoda. Izrada unutar ovog modula započinje definiranjem sirovca, njegove mjere unutar CAM programa moraju odgovarati dimenzijama stvarnog sirovca koji se postavlja unutar alatnog stroja, u ovom slučaju CNC glodalicu. Nakon što su se definirale dimenzije sirovca, slijedi orijentacija koordinatnog sustava. Stezanje sirovca na stroju u određenom smjeru mora biti identično postavljeno unutar programskog paketa, odnosno koordinatne osi alatnog stroja, moraju se poklapati s koordinatnim osima postavljenim u programu.



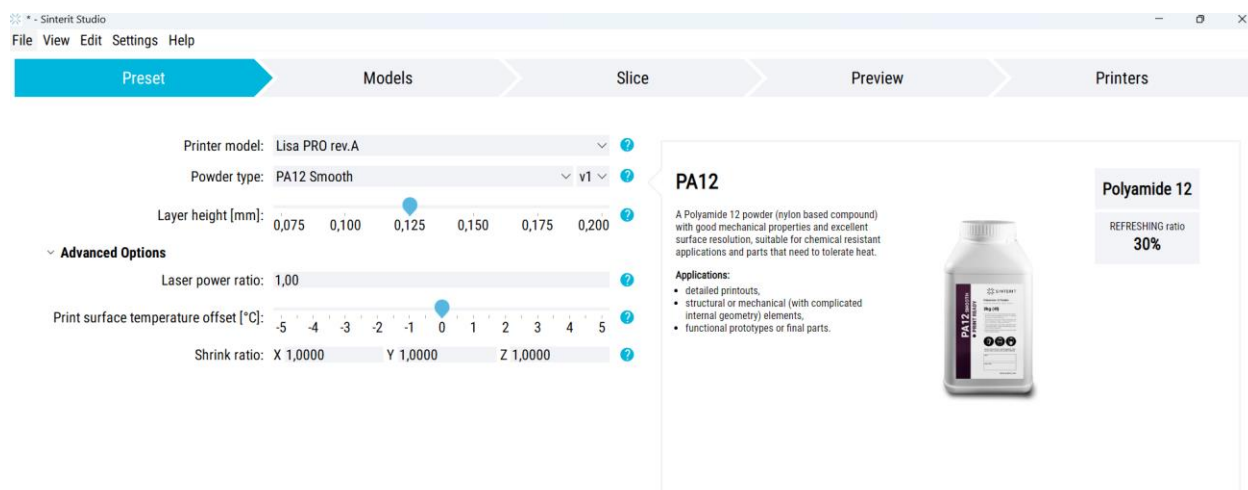
Slika 26. Prikaz 3D CAD modela testnog uzorka u CAM okruženju

Nakon postavljanja koordinatnog sustava i dimenzija sirovca, potrebno je odabrati odgovarajuće operacije za obradu odvajanjem čestica. Za svaku operaciju potrebno je definirati alate koji će je izvoditi, te njihove parametre obrade. Provjera prije izrade obradka na samom stroju izvršava se simulacijom, gdje se provjeravaju moguće koalicije alata i stroja, te stroja i stroja. Kada se utvrdi da je proces ispravno odrađen, slijedi odabir *post procesora* za određenu upravljačku jedinicu stroja, prema kojoj se generira G kod, koji se zatim prenosi na upravljačku jedinicu određenim medijima poput USB stika, Wi-Fi, računalnom mrežom itd.



Slika 27. Prikaz simulacije glodanja testnog uzorka

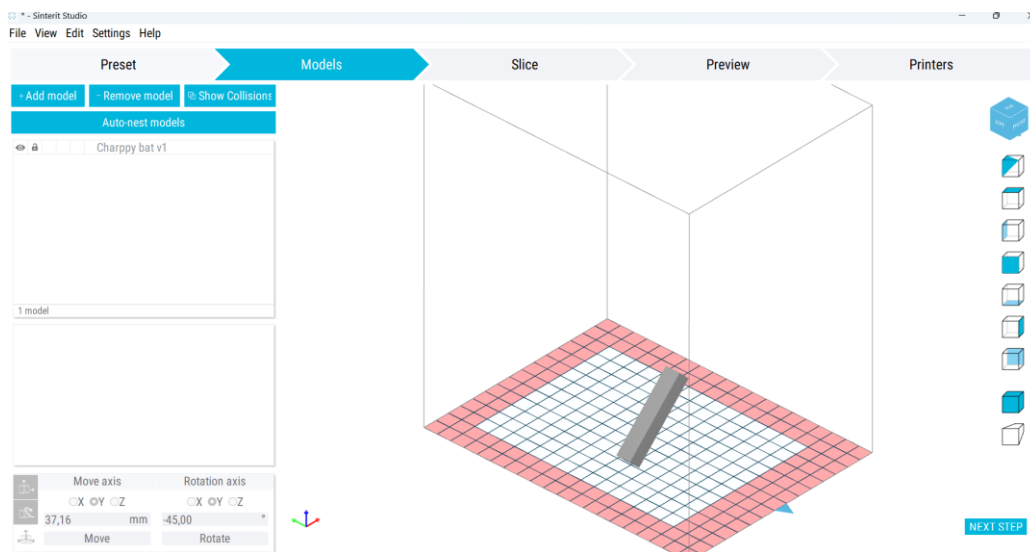
Izrada uzoraka aditivnom tehnologijom nakon spremanja 3D modela u stl. formatu otvara se u sliceru Sinterit Studio, namjenjenog za pripremu uzoraka na pisaču Lisa Pro. Prvi korak je ispravan odabir materijala od kojeg će se uzorci izrađivati. Programiranje je vrlo pojednostavljeno i prilagođeno korisniku, gdje se automatski prema odabranom materijalu u izborniku definiraju parametri obrade, odnosno temperatura s kojom će laserski snop taliti materijal. Zbog toga je vrlo važno ispravno odabrati materijal s kojime se radi, jer nemaju svi materijali jednaku potrebnu temperaturu taljenja materijala. U naprednim opcijama moguće je namjestiti snagu lasera i promjenu temperature. Osim temperature, vrlo bitna značajka koja najviše utječe na mehanička svojstva i površinsku hrapavost proizvoda izrađenog ovom tehnologijom je visina slojeva kojim se izrađuje. Ona je odabrana prema standardnoj vrijednosti od 0.125 mm. Materijal koji se koristi pri izradi je Polyamide 12 smooth, s preporukom dodavanja 30% novog svježeg materijala prikazanog na slici 28.



Slika 28. Materijal Pa12

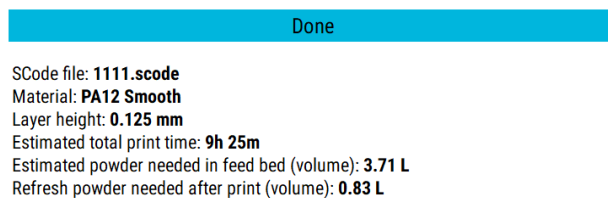
Sljedeći korak je orijentacija modela kod printanja, također vrlo bitan parametar zbog prethodno opisanog nastajanja proizvoda aditivnom tehnologijom. Osim na hrapavost koja će biti najveća ako se mjeri okomito na formiranje slojeva, također se utječe na mehanička svojstva, na način da će biti najlošija kada se sila primjeni u smjeru okomitom na formiranje slojeva, jer će najlakše doći do delaminacije slojeva. Ovakva orijentacija od 45 stupnjeva je pogodna i preporuka za samu izradu, jer kod ravnih tankih ploha izradom SLS tehnologijom, uslijed velikog zagrijavanja tankih dugačkih slojeva, dolazi do njihovih deformacija i iskrvljenja pa predmeti nemaju propisanu dimenzijsku točnost. Upravo zbog toga postavljaju se tako da najdulje površine nisu paralelne niti okomite na površinu printera, već pod određenim kutem. Taj kut veoma utječe na mehanička

svojstva proizvoda i dio je tehnološke strane koja se ne istražuje u ovom radu, nego se svi uzorci izrađuju pod kutem od 45 stupnjeva.



Slika 29. Uzorak u sliceru za aditivnu tehnologiju Sinterit Pro

Postizanje željene orijentacije kojom će se raditi ispis je preduvjet za raslojavanje modela odnosno njegovo rasjecanje na slojeve po visini Z. Nakon što je model orijentiran i komora ispunjena s uzorcima, slijedi raslojavanje modela u slojeve i generiranje koda koje definira kretnje pisaa. U ovom dijelu dobivaju se informacije o potrebnoj količini materijala i vremenu ispisa prikazano na slici 30 koje opisuju podatke za ispis jednog testnog uzorka.



Slika 30. Informacije o potrebnom materijalu za ispis i vremenu trajanja ispisa

## 5.2. Polyamid PA 12 smooth

Poliamidi su vrsta polimernih materijala koji se klasificiraju kao termoplasti. Često ih nazivamo "Najlon" što im je trgovački naziv i jedan su od najčešće upotrebljivanih tipova poliamida. Njihova struktura sastoji se od amidnih veza (CONH) koje povezuju ugljikovodikove lance. Ovi materijali su lagani, ali istovremeno posjeduju izuzetna mehanička svojstva otporna na trošenje. Također su otporni na djelovanje kemikalija, ulja i otapala. Za izradu uzorka korišten je poliamid PA12 tvrtke Sinterit. U tablici su navedena svojstva materijala.



Slika 31. Posuda s materijalom PA12 tvrtke sinterit

Prašasti materijal je potrebno pravilno skladištiti u brtvljenim posudama. Zbog svog stanja u kontaktu s vlagom iz okolnog zraka dolazi do formiranja sitnih neželjenih grudica, koji uzrokuju problem kod 3D ispisa.

Tablica 3. Informacije o materijalu PA12

Vlačna čvrstoća	32 MPa
Modul elastičnosti	1470 MPa
Tvrdoća po Shoreu	74
Udarni rad loma	16 kJ/m <sup>2</sup>
Talište	185 °C
Hrapavost površine	9680 μm
Boja	siva
Veličina čestica	18-90 μm
Gustoća ispisa	0.92 g/cm <sup>3</sup>
Absorpcija vode	8.7 %

### 5.3. Aluminijska legura EN-AW 5083

Aluminijska legura EN-AW 5083, prema DIN normi Al Mg4.5Mn0.7, je legura aluminija koja se koristi za proizvodnju laganih, izdržljivih i otpornih konstrukcija pogodnih za različite primjene. Sastoji se od aluminija, magnezija, mangana i cinka, koji mu daju svoja karakteristična svojstva. Aluminijska legura EN-AW 5083 posjeduje visoku čvrstoću i otpornost na koroziju, vrlo često je korišten za konstrukcijske dijelove u strojarstvu. Ova legura aluminija koristi se i u područjima kao što su zrakoplovna industrija, građevinarstvo i automobilska industrija. Primjenjuje se za izradu komponenata poput okvira, konstrukcija, spremnika i drugih dijelova. Visoka čvrstoća aluminijske legure EN-AW 5083EN-AW rezultat je dodatka magnezija i mangana, koji poboljšavaju tvrdoću i otpornost na udarce. Legura također pokazuje dobru obradivost, što znači da se lako može oblikovati i obrađivati.

Tablica 4. Kemijski sastav aluminijske legure EN-AW 5083

Kemijski element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Udio %	0.4	0.4	0.1	0.4-1.0	4.0-4.9	0.25	0.15	0.05-0.25

Tablica 5. Mehanička svojstva aluminijske legure EN-AW 5083

Mehanička i fizikalna svojstva Al 5083	
Gustoća	2650 kg/m <sup>3</sup>
Talište	570°C
Modul elastičnosti	72 GPa
Električni otpor	0,58 x 10 <sup>-6</sup> Ω·m
Toplinska provodljivost	121 W/m·K
Vlačna čvrstoća	min. 260 MPa
Tvrdoća po Brinellu	70 HB

#### 5.4. Uređaji korišteni za izradu uzoraka

U ovom radu testni uzorci od aluminijske legure EN-AW 5083 obrađivali su se strojnom obradom, dok su polimerni uzorci izrađeni aditivnom tehnologijom. Za usporedbu hrapavosti uzoraka koristio se uređaj za mjerenje hrapavosti.

##### 5.4.1 Haas VF2SSyt EU 3-osni glodači obradni centar

Zbog jednostavnosti geometrije uzorka, dovoljno je koristiti obradni centar s 3 osi. Korišteni CNC glodači obradni centar koji se koristio za pripremu uzoraka opisan je kroz specifikacije u tablici:

Tablica 6. Specifikacija glodaćeg obradnog centra Haas VF2SSyt EU

Proizvođač	Haas
Snaga	22.4 kW
Moment	122 Nm
Maksimalni broj okretaja vretena	12000 o/min
Osi (okretni stol)	3
Količina alata u spremniku	30 + 1
Upravljačka jedinica	Haas
Hodovi osi	762 mm x 508 mm x 508 mm



Slika 32. 3-osnog glodaćeg obradnog centara

Prilikom glodanja aluminijskih uzoraka korišteno je tvrdometalno glodalo promjera 10mm s presvlakom. Na slici se vidi izvadak iz kataloga gdje se mogu pronaći tvorničke podaci za izbor brzine rezanja  $V_c$ , te dubina  $a_p$  i dubina zahvata  $a_e$ .

**3ALE** 3 Flutes 45° Helix End Mills for Aluminum

- Endmills for Aluminum, AL alloy, non-ferrous and non-metallic materials.
- Applied fine WC grade for excellent surface finish.
- Various flute length design for covering wide range application.
- Tetrabond TAC coating provides excellent work surface finish by high hardness and low friction.
- Minimize built up edge by double edge and deep pocket design.

3 WC RTAC D 45° CUTTING DATA  
01234 Coating +0-0.01 Helix Angle Shield Edge 360P

D Size	D Tolerance
Ø 0.8 - 20	+0 - -0.01mm

mm

Slika 33. Kataloški prikaz glodala korištenog za obradu aluminijskih legura

## 3ALR / 3ALE

• RPM : rev./min • Feed : mm/min

피삭재 Material	알루미늄합금 Aluminum Alloys etc.									
외경 Outside Diameter	3ALR					3ALE				
	RPM	FEED				RPM	FEED			
		수직 Vertical	홈절삭 Slotting	속면절삭 Side Milling			수직 Vertical	홈절삭 Slotting	속면절삭 Side Milling	
ø 1	30,000	150	900	1,100	1,100	25,500	130	770	930	930
ø 2	30,000	225	1,800	2,150	2,150	25,500	190	1,530	1,800	1,800
ø 3	21,600	225	2,000	2,400	2,400	18,400	190	1,700	2,000	2,000
ø 4	16,200	300	2,000	2,400	2,400	14,000	255	1,700	2,000	2,000
ø 5	13,000	300	2,000	2,400	2,400	11,000	255	1,700	2,000	2,000
ø 6	10,800	300	2,000	2,400	2,400	9,200	255	1,700	2,000	2,000
ø 8	8,100	300	2,000	2,400	2,400	7,000	255	1,700	2,000	2,000
ø 10	6,480	250	2,000	2,400	2,400	5,500	210	1,700	2,000	2,000
ø 12	5,400	200	2,000	2,400	2,400	4,400	170	1,700	2,000	2,000
ø 16	-	-	-	-	-	3,200	130	1,530	1,900	1,900
ø 20	-	-	-	-	-	2,000	85	1,360	1,700	1,700
Milling Amount (mm)		Ap=0.75D	Ap=0.75D	Ap=0.75D/ Ae=0.3D			Ap=0.75D	Ap=0.75D	Ap=0.75D/ Ae=0.3D	
절입량 Depth of Cut										

Slika 34. Preporučeni režimi obrade za odabrano glodalo

### 5.4.2 Sinterit Lisa Pro

Sinterit Lisa Pro je profesionalni 3D pisac s tehnologijom selektivnog laserskog sinteriranja (SLS). To je unaprijeđena verzija originalnog modela Lisa tvrtke Sinterit. Jednostavan za korištenje i pouzdan kao i njegov prethodnik, Lisa Pro ima proširenu radnu površinu od 110 x 160 x 250 mm. Dolazi s integriranom kamerom za daljinsko praćenje i 3D softverom Sinterit Studio. Također je opremljen s 5W, 808nm IR laser diodom. Sinterit Lisa Pro je 3D pisac s tehnologijom selektivnog laserskog srašćivanja (SLS) koji može ispisivati slojeve debljine 75 mikrona. Na taj način, moguće je proizvesti dijelove s glatkim vanjskim površinama. Maksimalna temperatura ispisa je 200 °C.



Slika 35. 3D pisac Sinterit Lisapro



### 5.4.3 Sinterit sandblaster pjeskarilica

Nakon završetka printa, tri uzorka su dodatno podvrgnuta pjeskarenju na uređaju proizvođača Sinterit sandblaster. Uređaj za pjeskarenje maksimalnog tlaka je 8.6 bara i radne površine veličine 495mm x 390mm x 410mm. I sa spremnikom za abrazivne čestice od 4.5kg. Abrazivne čestice su od stakla veličine 200 µm.



Slika 36. Pjeskarilica za naknadnu obradu uzoraka dobivenih SLS aditivnom tehnologijom Sinterit sandblaster

### 5.4.4 Mitutoyo Surftest SJ-210

Uređaj korišten za mjerenje hrapavosti je proizvođača Mitutoyo, a model je Surftest SJ-210. Uređaj je prijenosan, te posjeduje jednostavno sučelje za krajnjeg korisnika.



Slika 37. Uređaj za mjerenje hrapavosti Mitutoyo Surftest SJ-210

## 5.5. Mjerenje hrapavosti uzoraka

Mjerenje hrapavosti je odrađeno na ukupno 14 uzoraka, od kojih je četiri uzorka od materijala PA12 smooth, od kojih su dva pjeskarena te 10 uzorka od aluminijske legure EN-AW 5083, od kojih je svaki obrađen različitim parametrima obrade. Dobiveni rezultati se uspoređuju, te se određuje koji parametri obrade su ekonomski najisplativiji s obzirom na traženi zahtjev hrapavosti površine. Prije samog početka mjerenja, uređaj Mitutoyo Surftest SJ-210 umjeren je na odgovarajućem uzorku za umjeravanje. U obzir je uzeto mjerenje srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$ . Hrapavost uzoraka materijala PA12 mjereni su po čeonj površini u smjeru duljine, a zatim u smjeru širine uzorka, odnosno u smjeru x i smjeru y. Hrapavost uzoraka aluminija mjerena je po bočnoj strani gdje je alat obodno bio u doticaju sa uzorkom. Mjerena je hrapavost u smjeru gibanja alata, odnosno smjeru x i u smjeru okomito na smjer gibanja alata odnosno smjeru y.



Slika 38. Prikaz mjernog uređaja s oznakama smjera osi mjerenja



Slika 39. Uzorci dobiveni SLS postupkom i uzorci izrađeni strojnom obradom aluminija

Strojnom obradom uzoraka od aluminijske legure brzina rezanja je bila konstantna, kao i broj okretaja glavnog vretena jer se obrada radila s jednim glodalom promjera 10 mm, na mjerenim površinama. Mijenjala se posmična brzina  $V_f$  i širina zahvata  $a_e$ . Na svakom uzorku zbog boljeg utvrđivanja točnosti rađena su po tri mjerenja.

Tablica 7. Vrijednosti hrapavosti aluminijske legure AW EN-5083 obrađene strojnom obradom

Uzorak br.	Broj okretaja glavnog vretena [ $min^{-1}$ ]	Posmična brzina [mm/min]	Dubina rezanja [mm]	Širina zahvata [mm]	Hrapavost smjer X [ $\mu m$ ]	Hrapavost smjer Y [ $\mu m$ ]
1	11000	1500	10	2	0.175	0.197
					0.219	0.184
					0.108	0.162
2	11000	2500	10	2	0.229	0.400
					0.252	0.611
					0.257	0.366
3	11000	3500	10	2	0.603	0.107
					0.615	0.105
					0.637	0.359
4	11000	4500	10	2	0.920	0.151
					0.866	0.355
					0.930	0.445
5	11000	1500	10	4	0.220	0.073
					0.234	0.097
					0.259	0.069
6	11000	2500	10	4	0.341	0.091
					0.372	0.152
					0.397	0.144
7	11000	3500	10	4	0.493	0.113
					0.601	0.085
					0.718	0.096
8	11000	4500	10	4	0.597	0.137
					0.743	0.127
					0.608	0.101
9	11000	7000	10	4	0.741	0.244
					0.902	0.172
					0.738	0.142
10	11000	7000	10	2	0.847	0.195
					0.850	0.133
					0.967	0.177

Mjerenja uzoraka dobivenih aditivnom tehnologijom također su mjerene po tri puta u smjeru X i Y prikazanih na slici 29.

Tablica 8. Vrijednosti hrapavosti uzoraka dobivenih aditivnom tehnologijom SLS postupkom od materijala PA12

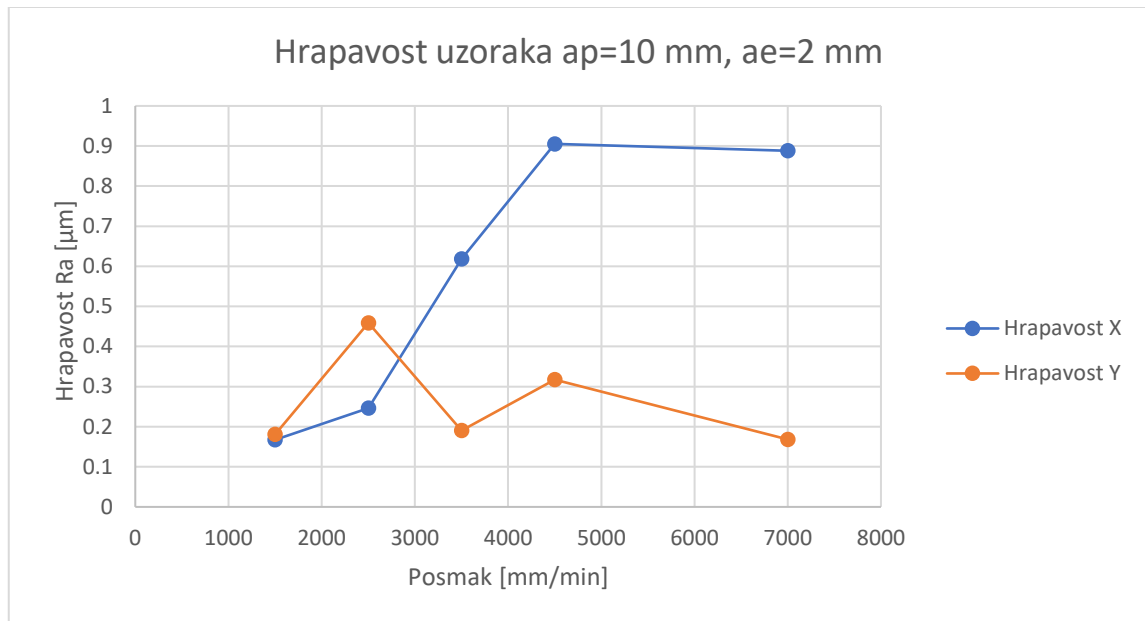
Uzorak br.	Hrapavost smjer X [ $\mu\text{m}$ ]	Hrapavost smjer Y [ $\mu\text{m}$ ]
8_3DP	8.697	4.285
	9.009	3.557
	9.232	3.535
17_3DP	8.962	9.488
	7.612	9.175
	9.012	9.333
7_3DP	8.898	4.245
	8.595	4.417
	8.474	4.119
19_3DP	8.469	8.729
	9.680	10.202
	10.622	9.413

Krajnji rezultati svih uzoraka prikazani su srednjim aritmetičkim odstupanjem profila, provedenih na tri uzorka zbog sigurnije točnosti rezultata prikazanih u tablici 10, koja objedinjuje obje tehnologije. Srednje aritmetičko odstupanje dobiva se zbrajanjem hrapavosti istog uzorka iste orijentacije te dijeljenjem s brojem mjerenja. Točnije, računata je aritmetička sredina dobivenih rezultata.

Tablica 9. Srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  uzoraka

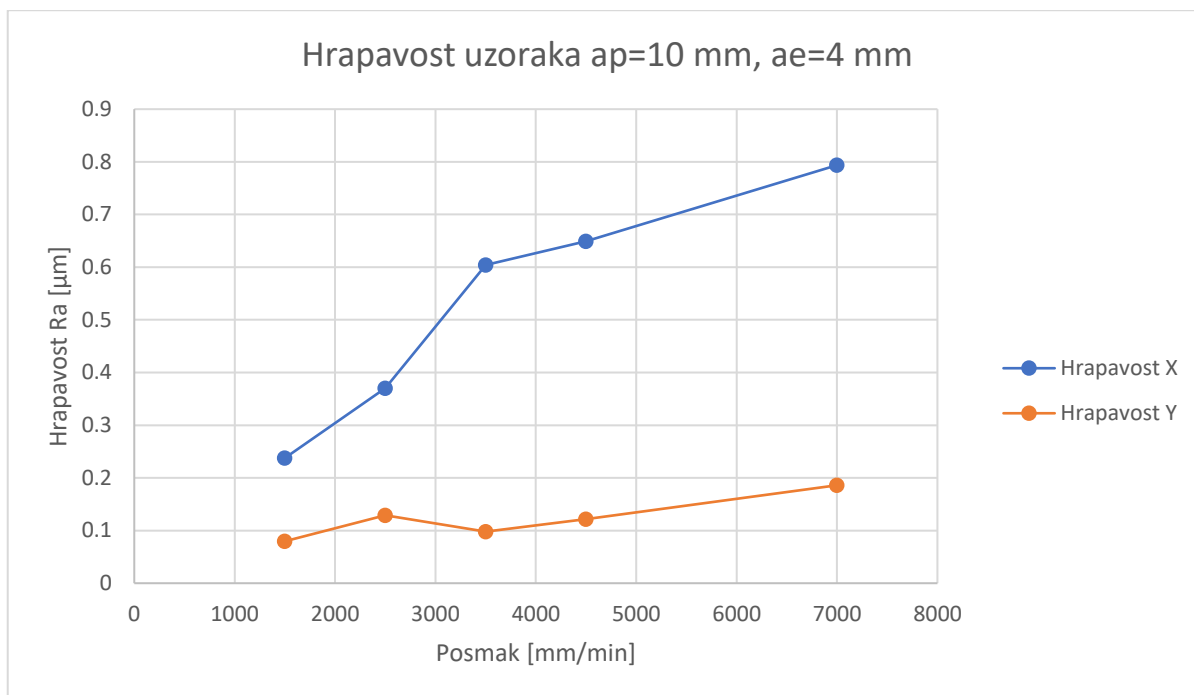
Uzorak br.	Srednje aritmetičko odstupanje profila $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] smjer mjerenja X	Srednje aritmetičko odstupanje profila $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] smjer mjerenja Y
Aluminijska legura AW EN-5083 obrađena strojnom obradom		
1	0.167333	0.181145
2	0.246101	0.459341
3	0.618333	0.190333
4	0.905333	0.317432
5	0.237667	0.079667
6	0.373254	0.129512
7	0.604134	0.098325
8	0.649333	0.121667
9	0.793667	0.186436
10	0.888662	0.168333
Materijal PA12 dobiven SLS aditivnom tehnologijom		
8_3DP	8.979333	3.792333
17_3DP	8.528667	9.332333
7_3DP	8.655667	4.260333
19_3DP	9.590333	9.448122

Vizualizacija podataka prikazuje se dijagramom, gdje se za različite vrijednosti posmične brzine prikazuje hrapavost.



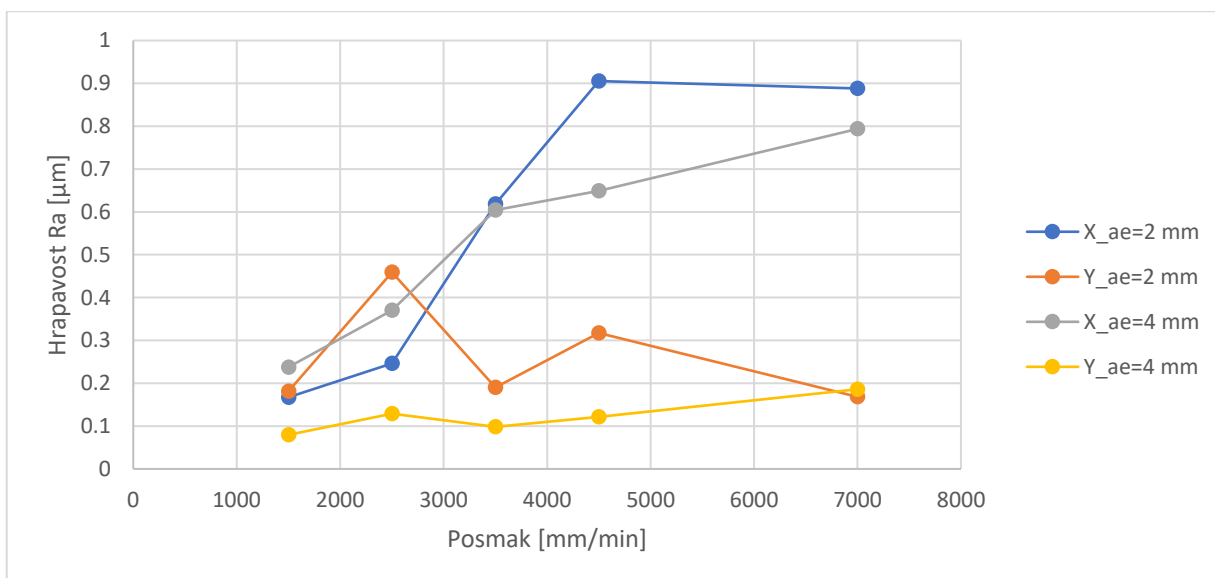
Slika 40. Odnos posmične brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X (plavo) i Y (narančasto) za dubinu rezanja 10 mm i širinu zahvata 2 mm

Za dubinu zahvata  $a_p=10$  mm i širinu zahvata  $a_e=2$  mm u smjeru mjerenja hrapavosti X, koji je okomit na krivulju kretanja alata, značajan je porast hrapavosti s povećanjem posmične brzine do točke od 4500 mm/min, nakon čega slijedi blagi pad. Iz toga se može zaključiti, u koliko zahtjevi za hrapavosti mogu biti veći od česte vrijednosti  $R_a=0.8$  da posmična brzina može biti iznad 4500 mm/min, ovisno o tome kolikom posmičnom brzinom može raditi alat.



Slika 41. Odnos posimčne brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X (plavo) i Y (narančasto) za dubinu rezanja 10 mm i širinu zahvata 4 mm

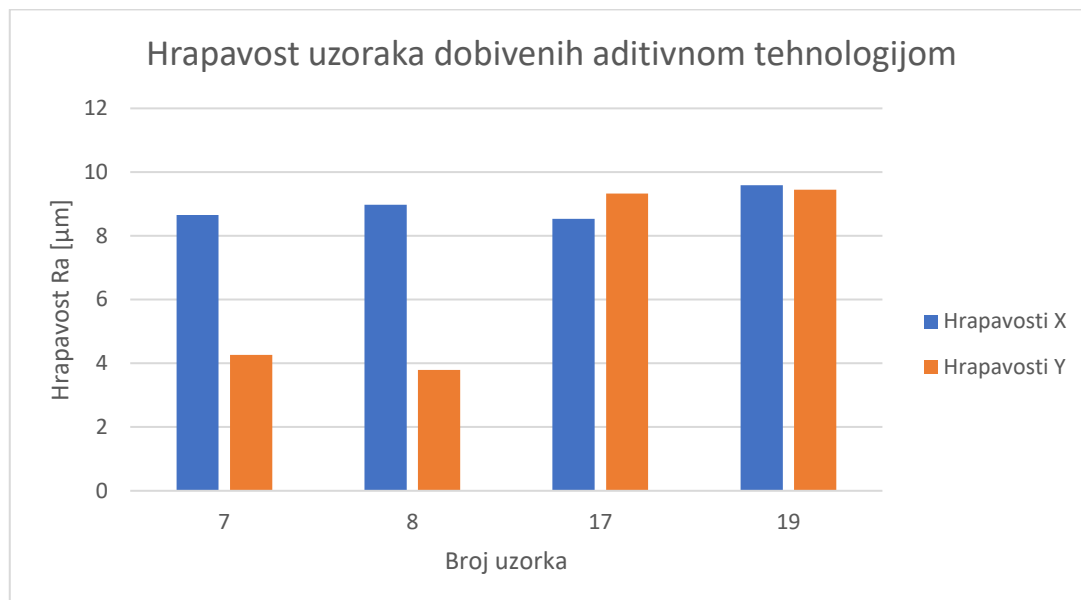
Kao i kod širine zahvata  $a_e = 2$  mm, za širinu zahvata  $a_e = 4$  mm vrijednosti mjerenja u smjeru Y su znatno niže u odnosu na smjer X. U ovom slučaju povećanjem posmične brzine kao vrijednosti hrapavosti proporcionalno rastu, kao što je i očekivano.



Slika 42. Odnos posimčne brzine i hrapavosti za smjer mjerenja uzoraka X, Y za dubinu rezanja 10 mm i širine zahvata 2 mm i 4 mm



Usporedbom svih rezultata hrapavosti aluminijskih uzoraka jasno je vidljivo da su hrapavosti u smjeru X znatno veće. Očekivano je da će hrapavosti biti veće kod većeg zahvata zbog povećanja sila rezanja, što se i odvija da vrijednosti posmične brzine od 3500 mm/min, međutim nakon povećanja brzine, hrapavost je veća s manjom širinom zahvata od 2 mm.



Slika 43. Hrapavosti uzoraka dobivenih aditivnom tehnologijom

Uzorci izrađeni aditivnom tehnologijom imaju znatno veće hrapavosti. Najniža vrijednost hrapavosti iznosi  $R_a = 3.792$ , što je 4.19 puta veće od najviše izmjerene vrijednosti hrapavosti za aluminijski uzorak  $R_a = 0.905$ . Mjerenim vrijednostima se može zaključiti da vrijednosti aluminijskih legura i polimernih materijala dobivenih SLS tehnologijom imaju znatno različite vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila.

## 5.6. Analiza rezultata

Za izradu proizvoda SLS postupkom aditivne tehnologije specifično je to što ispunjenje radne komore pisača znatno utječe na vrijeme i cijenu proizvoda. Za razliku od FDM pisača, koji se mogu ispuniti s proizvodima samo po plohi kreveta pisača, kod SLS pisača je moguće ispuniti komoru i po visini, tako da se postavi više proizvoda po visini koliko dopušta volumen radne komore. Upravo zbog toga je ova tehnologija pogodna za proizvodnje manjih serija proizvoda. Količina materijala zbog praškastog stanja mjeri se u litrama, prema tome u tablici 11. prikazan je potreban udio novog materijala. Kod ovog postupka nije potrebno koristiti potpuno novi materijal za svaki ispis, već se miješa novi materijal sa starim. Za ovaj korišteni materijal PA12 smooth preporučeni iznos novog materijala je 30% u odnosu na korišteni. Započinje se s jednim uzorkom i povećava se broj promatrajući vrijeme i materijal po komadu.



Tablica 10. Prikaz vremena izrade uzoraka od materijala PA12 i potreba za dodavanjem novog svježeg materijala u printer

Broj komada	Ukupno vrijeme izrade [min]	Vrijeme za 1 komad [min]	Ukupno novog materijala [l]	Novog materijala za 1 komad [l]
1	565	565	0.83	0.83
8	877	109	0.81	0.10
16	1359	84	0.80	0.05
48	3579	74	1.72	0.03

### 5.6.1 Ekonomska analiza

Put koji alat mora preći tijekom strojne obrade jednostavnom kalkulacijom opsega geometrije uzorka duljine  $a=55$  mm i širine  $b=10$  mm iznosi 130 mm (5).

$$O = 2a + 2b \text{ [mm]} \quad (5)$$

Prema tome potrebno vrijeme za izradu računa se kao umnožak posmične brzine s prevaljenim putem glodala prikazano tablicom 12.

$$t = \frac{l}{v_f} \text{ [min]} \quad (6)$$

Prilikom obrade uzoraka strojnom obradom potrebno je nadodati pripremno završno vrijeme, na vrijeme same obrade. Zbog pojedine problematike i razmatranja jednakih okvira procesa, odnosno same izrade bez pripremnih vremena i vremena naknadne obrade, uzima se u obzir samo izmjena obradka i stezanje novog sirovca u stroj koje je dobiveno mjerenjem i iznosi 1.5 min.

Tablica 11. Vrijeme izrade za jedan komad strojnom obradom aluminijske legure prema posmičnim brzinama i brzinama rezanja

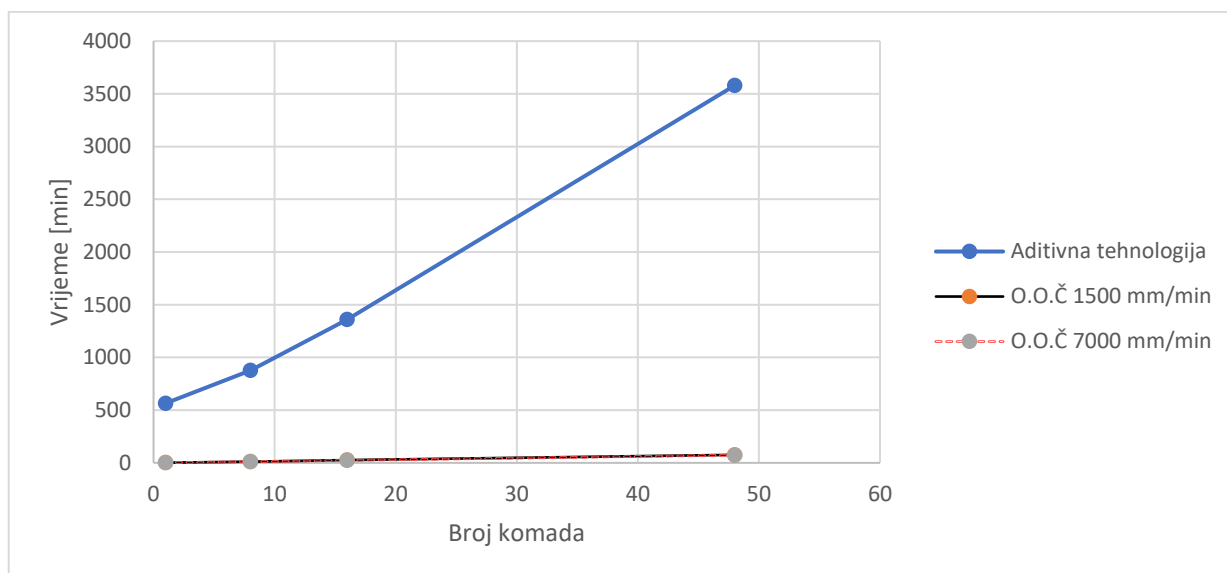
Uzorak br.	Posmična brzina [mm/min]	Strojno vrijeme izrade [min]	Ukupno vrijeme izrade [min]
1	1500	0.086667	1.586667
2	2500	0.052233	1.552331
3	3500	0.037143	1.537143
4	4500	0.028889	1.528889
5	1500	0.086667	1.586667
6	2500	0.052233	1.552331
7	3500	0.037143	1.537143
8	4500	0.028889	1.528889
9	7000	0.018571	1.518571
10	7000	0.018571	1.518571

Nakon vremena dobivenih samo za jedan uzorak potrebno je usporediti vremena za maloserijsku proizvodnju više uzoraka koji su prikazani u tablici 12.

Tablica 12. Vremena izrade za 1,8,16,48 komada uzoraka obradom odvanjem čestica

Uzorak br.	1 komad	8 komada	16 komada	48 komada
1	1.586667	12.69333	25.386667	76.16
2	1.552	12.416	24.832	74.496
3	1.537143	12.29714	24.594286	73.78285714
4	1.528889	12.23111	24.462222	73.38666667
5	1.586667	12.69333	25.386667	76.16
6	1.552	12.416	24.832	74.496
7	1.537143	12.29714	24.594286	73.78285714
8	1.528889	12.23111	24.462222	73.38666667
9	1.518571	12.14857	24.297143	72.89142857
10	1.518571	12.14857	24.297143	72.89142857

Uspoređuje se vrijeme O.O.Č za vrijednosti od 1500 mm/min i 7000 mm/min s aditivnom tehnologijom. Vrijednosti odstupanja s posmičnom brzinom za ovakav uzorak neznatne su u odnosu na usporedbu s vremenom izrade aditivne tehnologije. Iako se cijena sirovca smanjuje za aditivnu tehnologiju ispunjavanjem komore printera, vrijeme izrade raste sa većim ispunjenjem komore.



Slika 44. Usporedba vremena aditivne tehnologije i O.O.Č. za različiti broj komada

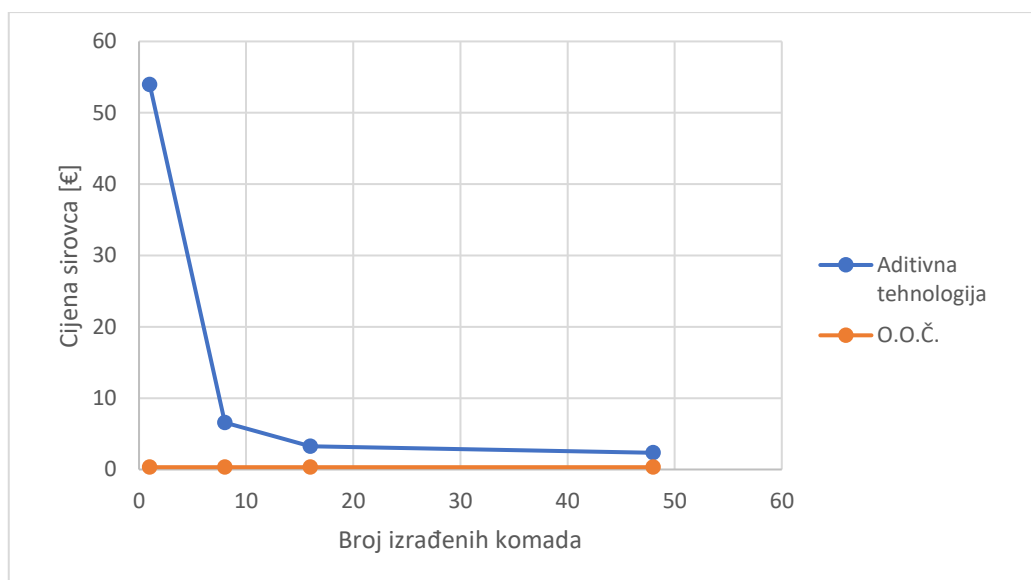
Sirovac za izradu ovog testnog uzorka odabire se s 2.5 mm dodatka po bočnim stranicama i 5 mm dodatka po visina, pa njegove dimenzije iznose 15 mm x 15 mm x 60 mm. Njegova masa iznosi 0.04 kg, prema istraženju cijeni aluminijске legure od 8 €/kg, cijena sirovca iznosi 0.32 €. Materijal za aditivnu tehnologiju u softwear-u prikazuje se kao potrebna količina dodatnog

svježeg materijala koji iznosi 30% od ukupnog. Zbog pojednostavljenja kompleksnosti računa materijala, koje je vrlo složeno kod SLS tehnologije, kao trošak pretpostavlja se samo cijena za količinu novog dodanog materijala. Cijena materijala iznosi 260€ pakiranje od 4l, što znači da je cijena litre materijala PA12 smooth 65€. Prema tome u tablici 13. opisane su cijene materijala za aditivnu tehnologiju.

Tablica 13. Vremena izrade za 1,8,16,48 komada uzoraka obradom odvanjem čestica

Broj komada	Količina novog materijala po komadu	Cijena materijala
1	0.83	53.95
8	0.10125	6.58125
16	0.05	3.25
48	0.036	2.34

Sirovci potrebni za izradu tehnologijom strojne obrade imaju konstantnu cijenu, odnosno cijena je definirana prema masi sirovca i ona je neovisna u broju komada, dok kod SLS aditivne tehnologije zbog principa rada i potrošnje materijala unutar komore cijena za izradu jednog uzorka se s mjenja, tako da se smanjuje povećavajući broj komada u komori pisača prikazano tablicom 13.



Slika 45. Cijena materijala ovisno o broju komada

Iako se pojedinačna i prototipna proizvodnja pripisuje aditivnoj tehnologiji, ona nije pogodna za SLS tehnologiju. Cijena ovakvog uzorka manjih dimenzija, isplativija je za izradu O.O.Č, gledano sa cijenom sirovca i vremenom izrade.

## 6. ZAKLJUČAK

Kod aditivne tehnologije, iako su vremena izrade uzorka znatno veća, nije potreban radnik koji će posluživati stroj kao kod strojne obrade, niti ga je potrebno nadzirati, što je jedna od većih prednosti za smanjenje troškova. Ovakav izrađeni uzorak je vrlo jednostavne geometrije, stoga je potrebno uzeti u obzir da je kod kompleksnije geometrije, izradom strojnom obradom, potrebno imati više stezanja i više različitih alata, što su dodatni troškovi. Ukoliko je geometrija vrlo kompleksna, potrebno je ponekad koristiti i više strojeva. Dokazuje se da prototipiranje, iako je povezano s aditivnom tehnologijom, nije najbolji izbor za SLS aditivnu tehnologiju zbog cijene materijala. Ukoliko je proizvod ili uzorak za prototipiranje malih dimenzija, zauzima mali prostor radne komore pisača, dolazi do puno otpadnog materijala, koji je skup za ovu tehnologiju. Vrlo bitna su također vremena izrade, s organizacijske strane. Ako je potrebna brza izrada proizvoda, SLS aditivna tehnologija nije najbolje rješenje. Zbog samog postupka i potpore s praškastim materijalom kojim je komora ispunjena dok se proizvod radi, najisplativije je raditi proizvode znatno veće kompleksnosti kako bih troškovi korištenja ove tehnologije bili opravdani.

U ovom se radu obradila vrlo jednostavna geometrija, gdje je u svakom pogledu troškova, vremena izrade, mehaničkih svojstava i površinske hrapavosti, bolje koristiti strojnu obradu. Međutim, uzimajući dodatne parametre troškova i složene geometrije, kako se povećava serija, odnosno ispunjuje radna komora, pisača aditivna tehnologija može biti ekonomski bolji odabir.

## Literatura

- [1] Pavić A. : *Tehnologija Obrada odvajanjem čestica*, Veleučilište u Karlovcu, 2013.
- [2] Godec D., Šercer M.: *Aditivna proizvodnja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- [3] Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman H.H. , *Roughness parameters*, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)
- [4] Dostupno na: <https://www.interempresas.net/MetalWorking/Articles/Actualitat> , pristupljeno 02.04.2024.
- [5] OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM I OBRADA ODVAJANJEM, FSB predavanje
- [6][https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/povrsinska\\_obradba\\_metala\\_odvajanjem\\_cestica.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/povrsinska_obradba_metala_odvajanjem_cestica.pdf) pristupljeno 07.04.2024.
- [7] Slade I., *Obrada Materijala II* (skripta), I. tehnička škola TESLA, Zagreb 2012.
- [8] Sredanović B., *Alati i pribori 1*, prezentacija s vježbi, Banja Luka 2014.
- [9] Dostupno na: <https://www.iscar.hr/Products.aspx/CountryId/21/ProductId/12113>, pristupljeno 08.04.2024.
- [10] Blažević Z, *Programiranje CNC tokarilice i glodalice* (skripta), Virovitica 2004.
- [11] Dostupno na: <https://www.haascnc.com> , pristupljeno 08.04.2024.
- [12] Wong K.V., Hernandez A., *A review of additive manufacturing*, DOI:10.5402/2012/208760
- [13] Junk S., Tränkle M., *Design for additive manufacturing technologies: new applications of 3D-printing for rapid prototyping and rapid tooling*, DS 68-5: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 5: Design for X / Design to X, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08.2011
- [14] Pilipović A., *Aditivna proizvodnja*, Polimeri 33(2012)3-4, 134 - 135
- [15] Dostupno na:  
[http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Additive\\_Manufacturing\\_process](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Additive_Manufacturing_process) , pristupljeno 08.04.2024.
- [16] Dostupno na: <https://izit.hr/blog/smjernice-za-odabir-aditivne-tehnologije-za-izradu-polimernih-dijelova> , pristupljeno 08.04.2024.

[17] Runje, B.: *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja (Skripta)* , Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[18] Hrapavost tehničkih površina (Skripta), Studij Dizajna, Osnove strojarskih konstrukcija, FSB, dostupno na [https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost\\_tehnickih\\_povrsina.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf), pristupljeno 11.04.2024.

[19] Inspection Engineering - Explanation of Surface characteristics-Standards, dostupno na: <https://inspectionengineering.com/wp-content/uploads/2018/03/SurfaceFinishExplain.pdf>, pristupljeno 11.04.2024.

[20] Lee, D.-H., Cho, N. G.: *Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer*, Measurement Science & Technology - MEAS SCI TECHNOL, 23, 10, 105601, 2012. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105601>

[21] Mechanical Base.com - Measurement of surface roughness, dostupno na: <https://mechanicalbase.com/measurement-of-surface-roughness-in-manufacturing/>, pristupljeno 14.04.2024.

[22] Ispitivanje hrapavost tehničkih površina - Predavanja, FSB, dostupno na: <https://www.fsb.unizg.hr/quality> , pristupljeno 15.04.2024.

[23] Inspection Engineering - Explanation of Surface characteristics-Standards, dostupno na: <https://inspectionengineering.com/wp-content/uploads/2018/03/SurfaceFinishExplain.pdf>, pristupljeno 18.04.2024.