

# Teorijska visina neravnina na obrađenoj površini kod postupaka obrade odvajanjem

---

**Sedmak, Daniel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2011**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:868253>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Daniel Sedmak**

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Stephan Škorić, dipl. ing.

Student:

Daniel Sedmak

Zagreb, 2011.

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Stephanu Škoriću na pruženoj stručnoj pomoći, savjetima tijekom izrade ovog završnog rada i preporučenoj literaturi.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na velikoj potpori i razumijevanju tijekom dosadašnjeg dijela studija.

Daniel Sedmak

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
1. UVOD .....	1
2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA KAO SUSTAV.....	4
2.1. Osnovna geometrija alata.....	5
2.2. Materijali alata za obradu odvajanjem čestica.....	7
3. TOKARENJE.....	9
3.1. Podjela postupaka tokarenja.....	10
3.2. Gibanja kod tokarenja.....	14
3.3. Alati za tokarenje.....	15
3.4. Parametri obrade.....	17
4. GLODANJE.....	20
4.1. Podjela postupaka glodanja .....	21
4.2. Parametri obrade.....	24
4.3. Alati za glodanje .....	26
5. OKRETNO GLODANJE.....	29
5.1. Podjela postupaka okretnog glodanja .....	29
5.2. Rezni alati za okretno glodanje .....	33
5.3. Parametri obrade.....	35
6. TEORIJSKA VISINA NERAVNINA .....	38
6.1. Uvodne napomene o površini .....	38
6.2. Teorijska hrapavost.....	38
6.2.1. Teorijska hrapavost kod tokarenja .....	38
6.2.2. Teorijska visina neravnina kod glodanja.....	42
6.2.3. Teorijska visina neravnina kod okretnog glodanja .....	47
7. ZAKLJUČAK .....	51
LITERATURA.....	52

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [3] .....	2
Slika 2.	Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [3] .....	3
Slika 3.	Obrada odvajanjem čestica prikazana kao sustav[3] .....	4
Slika 4.	Referentni sustav ravnina [3] .....	5
Slika 5.	Kutovi alata za postupke obrade odvajanjem [3].....	6
Slika 6.	Materijali za rezne alate [3] .....	8
Slika 7.	CNC tokarilica [5].....	9
Slika 8.	Uzdužno vanjsko tokarenje [3] .....	11
Slika 9.	Uzdužno unutarnje tokarenje [4] .....	11
Slika 10.	Poprečno (plansko) tokarenje [3].....	12
Slika 11.	Tokarenje unutarnjeg i vanjskog navoja [7] .....	12
Slika 12.	Tokarenje vanjskog konusa [3].....	13
Slika 13.	Kopirno tokarenje [3].....	13
Slika 14.	Prikaz gibanja kod tokarenja [3] .....	14
Slika 15.	Prikaz tokarskog noža [3] .....	15
Slika 16.	Tokarski nož izrađen iz jednog komada [3].....	16
Slika 17.	Tokarski nož izrađen iz više dijelova [3].....	16
Slika 18.	Vrste i oblici pločica za tokarenje [9] .....	17
Slika 19.	Parametri obrade kod tokarenja [3].....	19
Slika 20.	Vertikalni glodači centar [5] .....	20
Slika 21.	Simetrično glodanje [7].....	22
Slika 22.	Nesimetrično glodanje [7].....	22
Slika 23.	Obodno ravno glodanje-istosmjerno [6] .....	23
Slika 24.	Obodno ravno glodanje-protusmjerno [6] .....	23
Slika 25.	Glodanje utora različitim glodalima [7].....	24
Slika 26.	Brzine rezanja kod istosmjernog i protusmjernog glodanja [3].....	25
Slika 27.	Parametri zahvta kod glodanja [3] .....	26
Slika 28.	Glodala s umetnutim reznim oštricama [7].....	27
Slika 29.	Glodala izrađena iz jednom komada [8] .....	28
Slika 30.	Koaksijalno vanjsko i unutarnje glodanje [6] .....	29
Slika 31.	Ortogonalno okretno glodanje [6].....	30
Slika 32.	Pozicije ortogonalnog okretnog glodanja [1].....	32
Slika 33.	Mogućnost postizanja aksijalnog pomaka u ovisnosti o ekscentricitetu [1].....	33
Slika 34.	Glodalo iz standardnog programa [6] .....	34
Slika 35.	Glodalo iz specijalnog programa [1].....	34
Slika 36.	Prikaz rada 'wiper' rezne pločice [10][6] .....	35
Slika 37.	Shematski prikaz brzina kod ortogonalnog okretnog glodanja [6].....	36
Slika 38.	Odnosi zahvata glodala i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog okruglog glodanja [1].....	37

Slika 39.	Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom bez radijusa vrha alata.....	39
Slika 40.	Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom sa radijusom vrha alata.....	40
Slika 41.	Teoretska i stvarna veličina neravnina nakon postupka tokarenja [12].....	42
Slika 42.	Geometrija obrađene površine nakon obrade glodalom bez radijusa oštrice .....	43
Slika 43.	Geometrija obrađene površine glodalom sa reznom pločicom.....	44
Slika 44.	Razlike teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade glodalom sa radijusom vrha (posmak po glodalu) [12] .....	45
Slika 45.	Odnosi teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade glodalom sa radijusom vrha (posmak po zubu) [12] .....	46
Slika 46.	Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala sa radijusom i nagibom vrha ....	47
Slika 47.	Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala postupkom ortogonalnog okretnog glodanja .....	48
Slika 48.	Odnosi teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade ortogonalnim okretnim glodanjem [12] .....	50

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
ap	[mm]	dubina obrade
D	[mm]	promjer obratka
D <sub>g</sub>	[mm]	promjer glodala
E	[mm]	ekscentricitet
f	[mm]	posmak
f <sub>ax</sub>	[mm]	aksijalni posmak po okretaju glodala kod OOG
f <sub>w</sub>	[mm]	posmak po 'wiper' pločici
f <sub>z</sub>	[mm]	posmak po zubu
f <sub>zo</sub>	[mm]	posmak po zubu glodala u smjeru obodne posm. brzine
l <sub>s</sub>	[mm]	duljina oštrice alata
n	[1/min]	broj okretaja obratka
n <sub>g</sub>	[1/min]	frekvencija vrtnje glodala
Pf		ravnina kretanja alata
Po		ortogonalna ravnina
Pr		osnovna ravnina
Ps		ravnina rezanja
R <sub>g</sub>	[mm]	radijus glodala
R <sub>o</sub>	[mm]	radijus obratka
R <sub>t</sub>	[μm]	teorijska hrapavost
R <sub>z</sub>	[μm]	stvarna visina neravnina
r <sub>e</sub>	[mm]	radijus vrha alata
v <sub>c</sub>	[m/min]	brzina rezanja
v <sub>e</sub>	[m/min]	ukupna brzina rezanja
v <sub>f</sub>	[m/min]	posmična brzina
v <sub>fax</sub>	[m/min]	aksijalna posmična brzina rezanja
v <sub>fo</sub>	[m/min]	obodna posmična brzina
Z <sub>g</sub>		broj zubi glodala
α <sub>0</sub>	[°]	stražnji kut alata
β <sub>0</sub>	[°]	kut klina
γ <sub>0</sub>	[°]	prednji kut alata
ε <sub>r</sub>	[°]	kut vrha alata
λ <sub>s</sub>	[°]	kut nagiba oštrice
ψ	[°]	kut rotacije obratka
κ <sub>r</sub>	[°]	napadni kut



## SAŽETAK

Nijedan proces obrade odvajanjem čestica ne ostavlja idealnu i glatku površinu. Na svakoj, makar i na brižljivo čišćenoj površini, zadržavaju se ostaci odvojenih čestica materijala, ulja i drugih nečistoća koje je moguće ukloniti samo u vakuumu. Taj sloj treba smatrati sastavnim dijelom obrađene površine. Hrapavost se smatra jednim od bitnih pokazatelja kvalitete površine i premet je istraživanja u ovom radu.

Razmatrani su postupci tokarenja, glodanja i okretnog glodanja kao najčešći. Hrapavost obrađene površine definira se teorijskim i eksperimentalnim istraživanjem te se na taj način ispituje točnost teorijske pretpostavke o hrapavosti površina ovisno o parametrima obrade. Također, daje se odgovor na pitanje kakva se kvaliteta obrađene površine u određenim okolnostima može očekivati te se dobiva približna fizikalna slika o utjecaju parametara, posebno posmaka, na hrapavost obrađene površine.

Stvarna hrapavost površine koja je generirana procesom obrade odvajanjem čestica i ona mjerena mjernim instrumentima će odstupati od teoretske hrapavosti zbog različitih nepovoljnih utjecaja i samog procesa rezanja. Svi navedeni izvodi i formule te prikazani crteži temelje se na geometrijskim pretpostavkama i služe kako bi se moglo predvidjeti visina neravnina, ali i kako bi se moglo usporediti sa stvarno izmjerenom visinom neravnina te na taj način istražiti utjecaj materijala obratka, parametara obrade, ponašanje alata i nekih drugih parametara.

## 1. UVOD

Od davnih vremena čovjek je na različite na različite načine pokušavao podići standard života na višu stepenicu te na taj način svoj život, ali i život drugih generacija učiniti što jednostavnijim i ugodnijim za život.

U samim počecima promjene su bile spore no danas se one događaju jako brzo i gotovo neprestano. Sa povećanjem ukupnog znanja ljudi i prodorom znanosti te pojavom novih materijala rasli su i zahtjevi za što raznovrsnijim i kvalitetnijim proizvodima. Takvi uvjeti bili su previše za klasičnu industrijsku proizvodnju te se moralo nešto poduzeti. U svakom slučaju bilo je potrebno povećati proizvodnju te ujedno troškove svesti na minimum, ali da sukladno s tim kvaliteta proizvoda raste. Da bi takva poslovna i proizvodna filozofija bila ostvarena bilo je neophodno[1]:

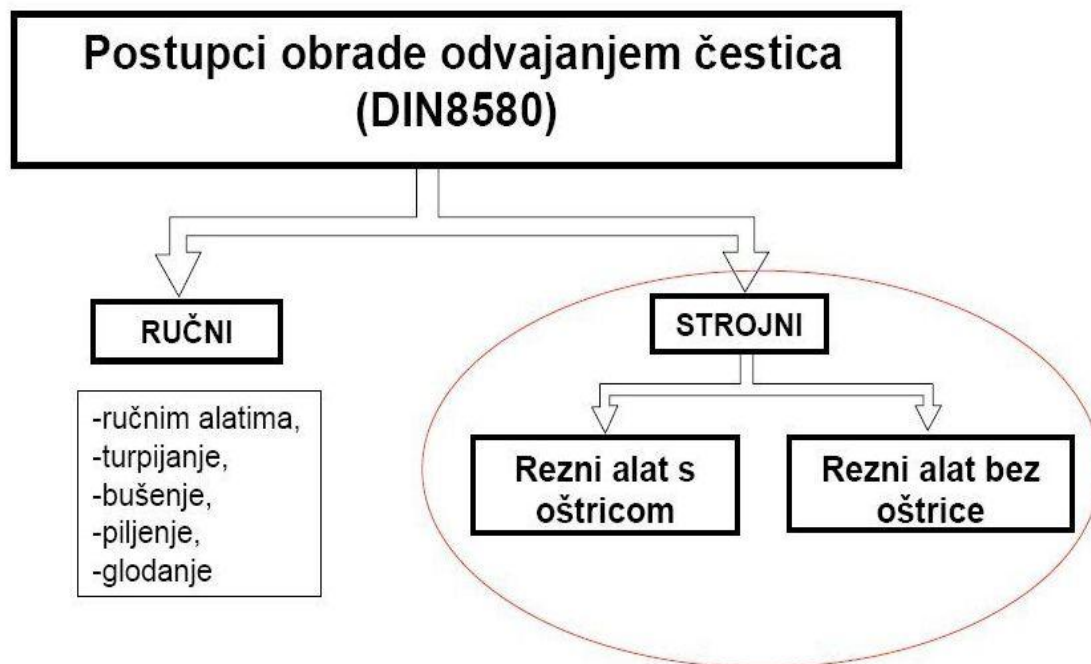
- Uvođenje novih obradnih postupaka, novih materijala obradaka i alata u proizvodni proces, koje rezultira istodobno golemim povećanjem proizvodnosti rada, poboljšanjem kvalitete proizvoda i snižavanjem troškova proizvodnje,
- Nultu kontrolu kvalitete te
- Princip određivanje cijena prema kojem je cijena konstantna, a dobit se ostvaruje snižavanjem troškova proizvodnje

U skladu s tim cilj svakog postupka obrade je realizirati izlaz kvalitetnije, brže i ekonomičnije.

Tehnologija obrade odvajanjem čestica je tehnologija u kojoj se pripremu skida sloj po sloj materijala s ciljem dobivanja obradak određenih dimenzija i kvalitete površine.

Obrada materijala odvajanjem čestica ima danas vrlo veliko značenje, kako po broju samih postupaka i alatnih strojeva, tako i po njihovoj raznovrsnosti u primjeni, jer se s tim postupcima, iako nekad nisu najekonomičniji, mogu postići najveće točnosti i najbolja kvaliteta obrađene površine. Ujedno se i osnovna podjela alatnih strojeva u užem smislu vrši prema postupcima obrade odvajanjem čestica, bez obzira na stupanj automatizacije istih.[2]

Pregled postupaka kojima se vrši obrada odvajanjem čestica prikazan je na slikama 1. i 2. Najjednostavnija i najgrublja podjela obrade odvajanjem čestica je podjela na ručne i strojne postupke.



**Slika 1. Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [3]**

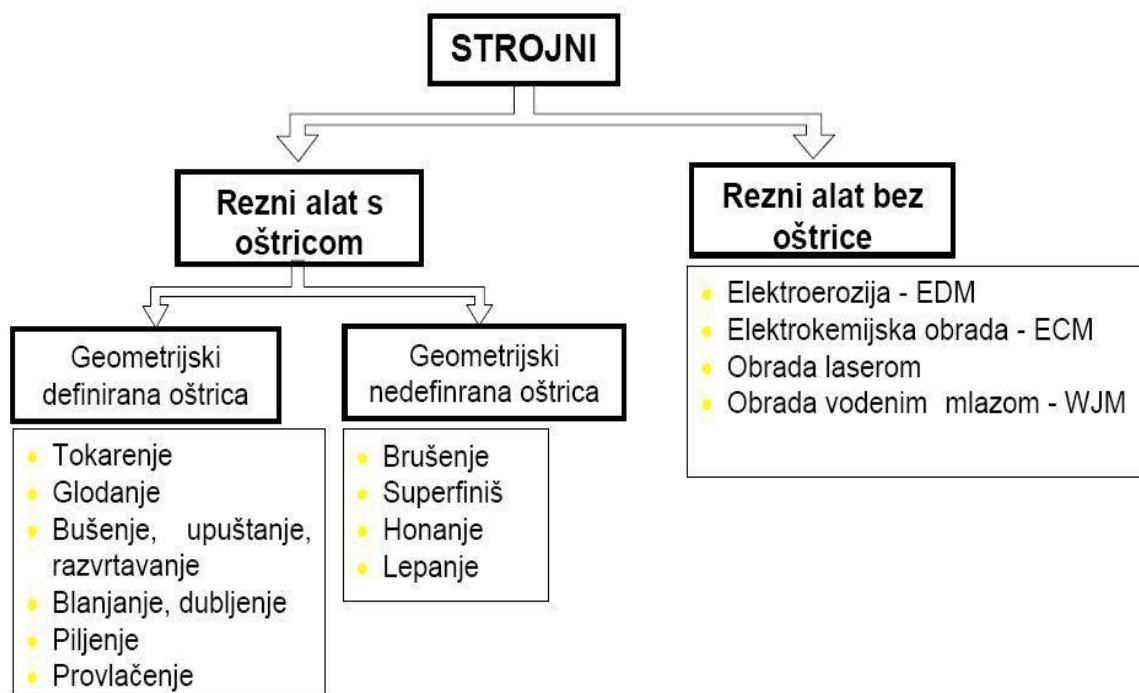
Strojne postupke možemo dalje podijeliti na one sa i bez rezne oštrice.

U postupke bez rezne oštrice ubraja se EDM, ECM, WJM te obrada laserom dok se postupci sa reznom oštricom mogu još detaljnije podijeliti na one sa definiranom i nedefiniranom reznom oštricom.

Postupci sa definiranom reznom oštricom su: tokarenje, glodanje, blanjanje, piljenje, bušenje, provlačenje i dr.

Postupci sa nedefiniranom reznom oštricom su: brušenje, honanje, lepanje i superfiniš te oni ujedno spadaju u završne postupke obrade odvajanjem čestica.

Danas je u proizvodnom strojarstvu gotovo nezamislivo ne koristiti postupke obrade odvajanjem čestica jer svaki od tih postupaka ima velike prednosti, ali neke nedostatke u odnosu na ostale postupke obrade.



Slika 2. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [3]

#### Glavne prednosti postupaka obrade odvajanjem čestica:

- Postizanje točnosti, uskih tolerancija i dobre kvalitete obrađene površine
- Najbolji način za formiranje oštih rubova, ravnih površina, te unutarnjih i vanjskih profila
- Tehnologija je primjenjiva kod gotovo svih poznatih materijala
- Najbolji način za obradu kaljenih i tvrdih materijala
- Ekonomičnost i produktivnost kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje

#### Nedostaci postupaka obrade odvajanjem čestica:

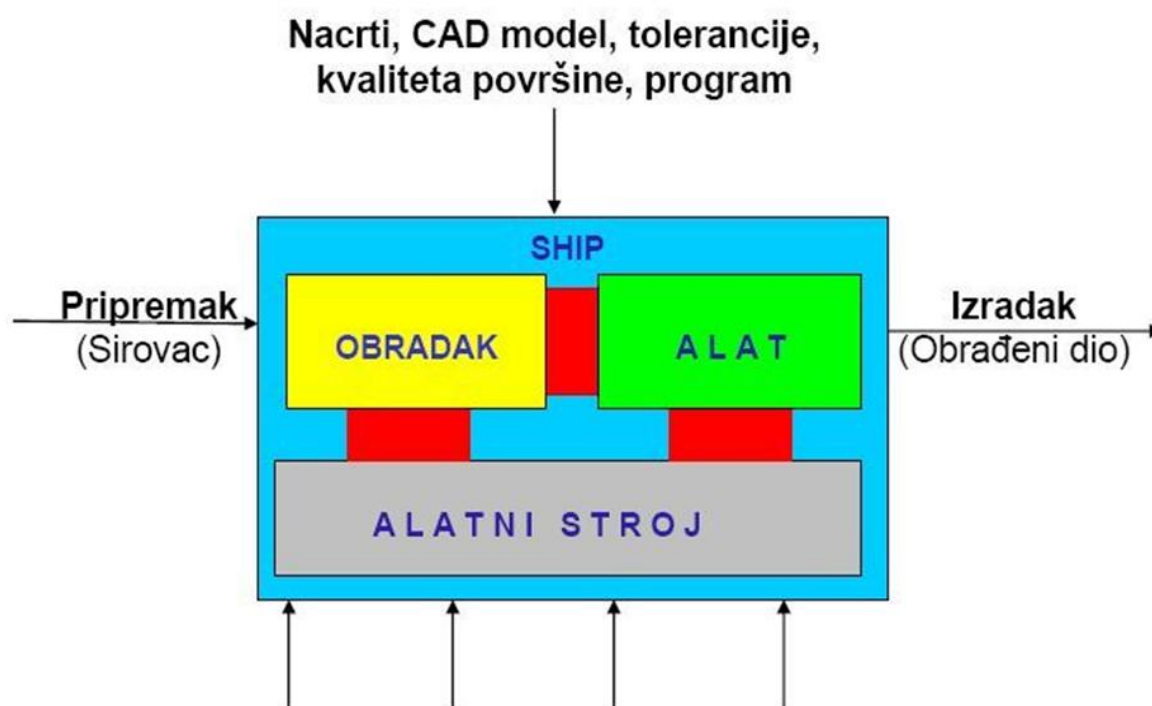
- Generiranje odvojene čestice
- Za obradu jednog komada ponekad je potrebno upotrijebiti više strojeva i više različitih postupaka obrade odvajanjem
- Alatni strojevi zahtijevaju veliki prostor
- Mikroklima je pod jakim utjecajem obradnih procesa
- Veliki udio pomoćnih i pripremnih vremena

## 2. OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA KAO SUSTAV

Obrada odvajanjem čestica je sustav koji se sastoji od tri neophodna elementa: obratka, alata i alatnog stroja.

Alatni stroj ima zadatak kvalitetnog prihvata alata te omogućiti točna gibanja kako bi se obradak izradio u odgovarajućoj kvaliteti. U tu svrhu prihvata alata i obratka je od ključne važnosti kvalitetu obratka i proizvodnost obrade.

Na sučelju alata i obratka odvija se proces rezanja, dovoljno kompliciran i nepoznat da je predmet neprestanog istraživanja. U ovom radu daje se kratak pregled problematike mikroneravnina na obratku kao proizvodu rezanja.



Slika 3. Obrada odvajanjem čestica prikazana kao sustav[3]

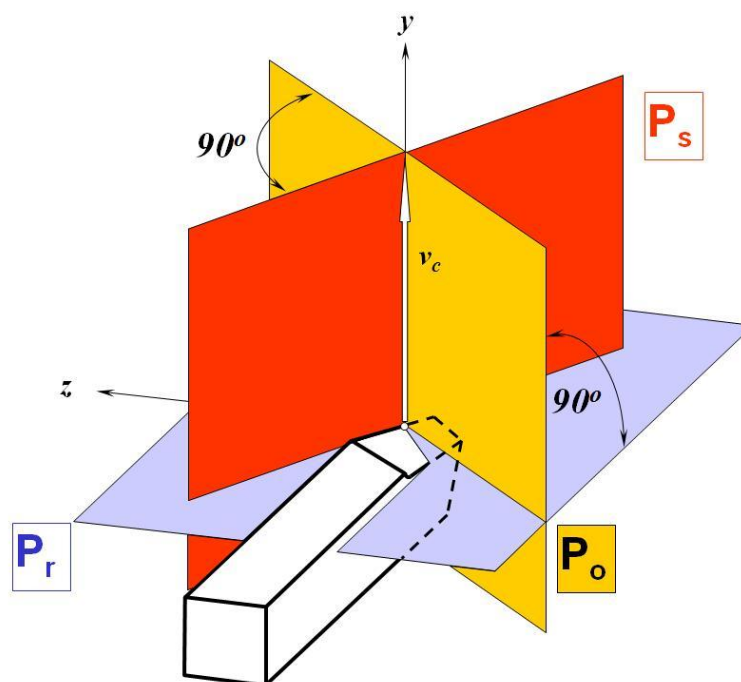
## 2.1. Osnovna geometrija alata

Alati, potrebni za obradu odvajanjem čestica, imaju u većini slučajeva zajednički geometrijski oblik, što znači da im se osnovni elementi (površine, kutovi, oštrica) pojavljuju kod svih vrsta obrade odvajanjem čestica bez obzira koliko reznih dijelova ima alat. Osnovni oblik svih alata sa čvrstim oštricama je klin. [2]

Kutovi alata su neophodni za određivanje položaja rezne oštrice, prednje i stražnje površine reznoga dijela alata. Kutovi se uvijek odnose na određenu točku na reznoj oštrici. Kada su rezna oštrica, prednja i stražnja površina zakrivljene, za određivanje kuteva su mjerodavne tangente, odnosno tangencijalne ravnine kroz odabranu točku.

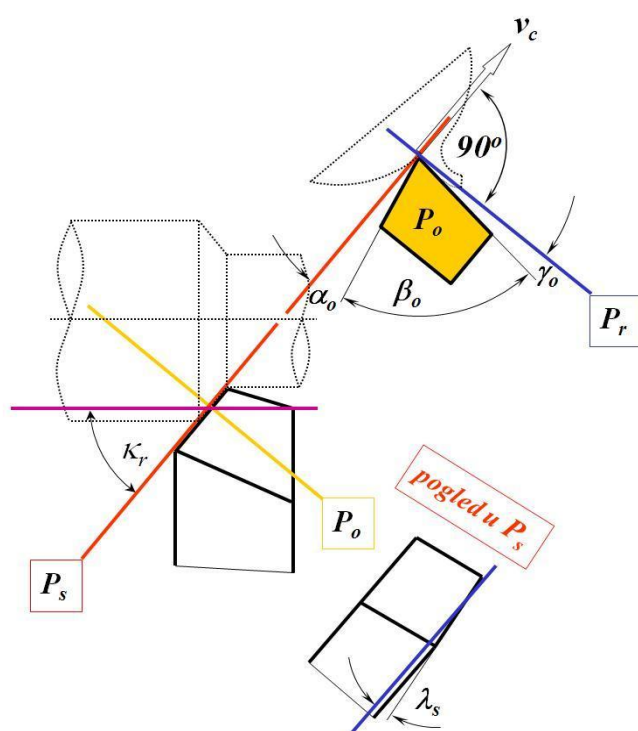
Svaki kut je označen slovom grčkog alfabeta i sufiksom koji odgovara ravnini u kojoj se kut mjeri. (Primjer  $\gamma_o$  – prednji kut u ravnini  $P_o$ ). Za radne (kinematske) kutove dodaje se još i sufiks “e”.

Kutovi se definiraju pomoću referentnog sustava ravnina koji je prikazan na slici 2. [3]



Slika 4. Referentni sustav ravnina [3]

- $P_r$  - osnovna ravnina: je okomita na pravac glavnog gibanja u promatranoj točki oštrice i istodobno je okomita ili paralelna na neku površinu ili os alata a koja je bitna za izradu, oštrenje ili kontrolu alata
- $P_f$  - ravnina kretanja: je okomita na  $P_r$  i paralelna pravcem posmičnog gibanja u promatranoj točki oštrice
- $P_s$  - ravnina rezanja: je okomita na  $P_r$  i paralelna sa tangentom na oštricu u promatranoj točki oštrice
- $P_o$  - ortogonalna ravnina: je okomita na  $P_r$  i  $P_s$  [3]



općenito:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

kut	mjeri se između	u ravnini
napadni kut $\kappa_r$	$P_s$ i $P_f$	$P_r$
kut vrha alata $\varepsilon_r$	$P_s$ i $P_s'$	$P_r$
kut nagiba oštrice $\lambda_s$	$P_r$ i $s$	$P_s$
prednji kut $\gamma_0$	$A_\gamma$ i $P_r$	$P_o$
kut klina $\beta_0$	$A_\gamma$ i $A_\alpha$	$P_o$
stražnji kut $\alpha_0$	$P_s$ i $A_\alpha$	$P_o$

Slika 5. Kutovi alata za postupke obrade odvajanjem [3]

- **Prednji kut  $\gamma_0$**  je kut između okomice na pravac relativnog kretanja i prednje površine alata ili kut između prednje površine alata i osnovne ravnine
- **Stražnji kut  $\alpha_0$**  je kut nagiba stražnje površine alata prema okomici na osnovnu ravninu. Mjeri se u ravnini koja prolazi pravcem relativnog kretanja i okomita je na površinu obrade.

- **Kut klina  $\beta_0$**  je kut između prednje i stražnje površine alata, a mjeri se u ravnini kao i kutovi  $\alpha_0$ ;  $\gamma_0$  s kojima zajedno čini zbroj od  $90^\circ$
- **Kut nagiba oštrice  $\lambda_s$**  je kut između oštrice alata i ravnine položene kroz vrh alata, a paralelne s osnovnom ravninom. Mjeri se u ravnini koja prolazi kroz glavnu oštricu alata, a okomita je na osnovnu ravninu.
- **Napadni kut  $\kappa_r$**  je kut između projekcije glavne oštrice alata u horizontalnoj ravnini i obrađivane površine.
- **Kut vrha alata  $\varepsilon_r$**  je kut između glavne i sporedne oštrice alata mjerjen na prednjoj površini. Taj kut je uvijek pozitivan.[2]

## 2.2. Materijali alata za obradu odvajanjem čestica

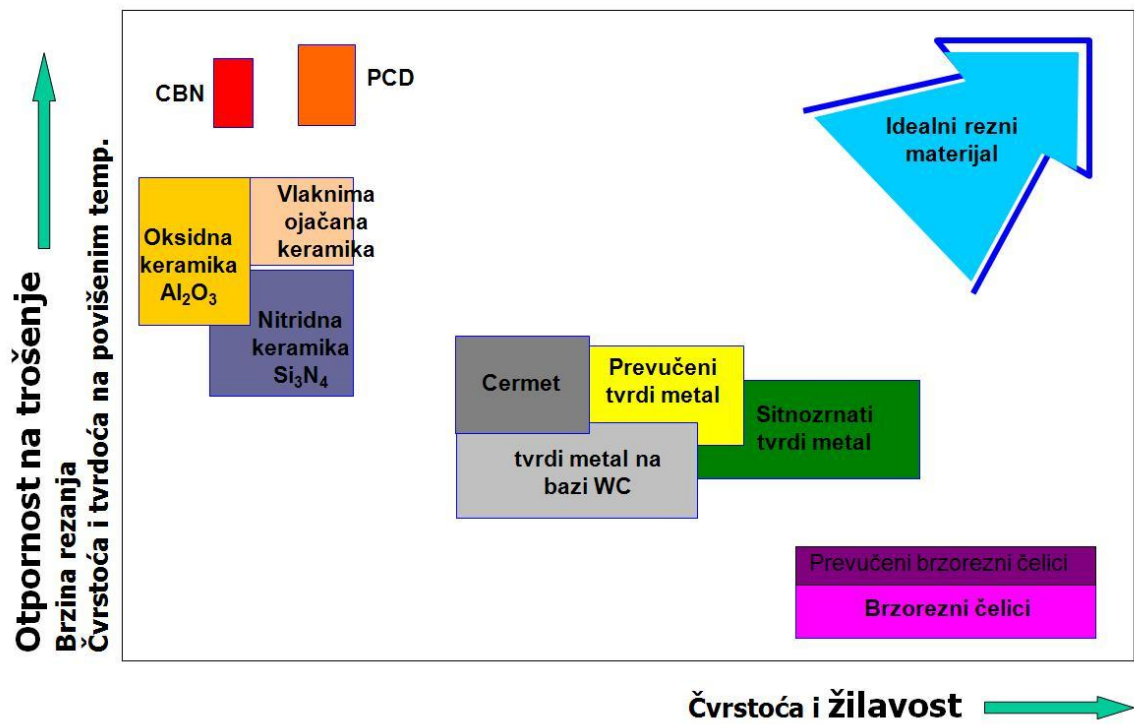
Kao i kod svakog postupka obrade nekog proizvoda tako se i kod postupaka obrade odvajanjem čestica postavljaju određeni zahtjevi na alata kojim se postupak provodi.

Spomenut ćemo tri karakteristike koje se nameću kao najvažnije kada govorimo o reznim sposobnostima alata, a to su:

- Otpornost prema trošenju
- Žilavost
- Otpornost pri povišenim temperaturama

Otpornost prema trošenju je proporcionalna tvrdoći materijala reznog alata no jako je teško napraviti alat koji će imati jako veliku tvrdoću, a s time i visoku žilavost. Zbog toga se sve više pokušavaju razviti novi materijali i postupci pomoću kojih bi takva svojstva bila što više približena. To je vidljivo i na slici 6. da se kao najtvrdi pokazuju keramika, CBN i PCD koji se puno rjeđe koriste nego tvrdi metali koji daju dobar odnos tvrdoće i žilavosti, ali i dobru otpornost prema visokim temperaturama čime su bitno utjecali na razvoj tehnologije obrade odvajanjem čestica





Slika 6. Materijali za rezne alate [3]

### 3. TOKARENJE

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površine, ali je isto tako i moguća obrada ravnih površina pa i nekih drugih oblika ako su slični rotacijskim tijelima.

Izvodi se na alatnim strojevima, tokarilicama, pri čemu je glavno (režno) gibanje (G) kružno, a izvodi ga obradak. Posmično gibanje (P) je pravolinijsko kontinuirano u ravnini koja je okomita na pravac brzine glavnog gibanja i pridruženo je alatu. Os okretanja glavnog gibanja zadržava svoj položaj prema obratku bez obzira na smjer posmičnog gibanja.[3]

Dostavno gibanje (D) vrši alata i služi za primicanje i odmicanje alata obratku.

Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom.[3]



Slika 7. CNC tokarilica [5]

### 3.1. Podjela postupaka tokarenja

Tokarenje se može podijeliti na osnovi više kriterija podjele[3]:

1. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine:

- Grubo
- Završno
- Fino

2. Prema kinematici postupka

- Uzdužno
- Poprečno

3. Prema položaju obrađene površine

- Unutarnje
- Vanjsko

4. Prema obliku obrađene površine

- Okretno
- Plansko (poprečno)
- Profilno
- Konusno
- Oblikovno (kopirno)
- Tokarenje navoja
- Neokruglo

Prikaz i kratak opis nekih od navedenih postupaka tokarenja dani su na slijedećim slikama.

#### Uzdužno tokarenje

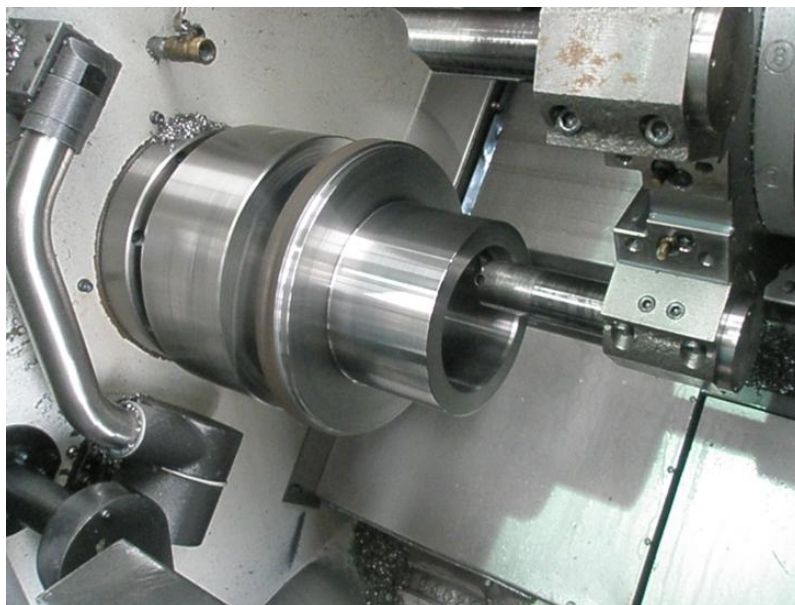
- posmično gibanje je paralelno s osi obratka i u smjeru osi rotacije
- može biti unutarnje i vanjsko

#### Poprečno (plansko) tokarenje

- posmično gibanje je radijalno i okomito na os obratka
- može biti unutarnje i vanjsko



**Slika 8. Uzdužno vanjsko tokarenje [3]**



**Slika 9. Uzdužno unutarnje tokarenje [4]**



**Slika 10. Poprečno (plansko) tokarenje [3]**

### **Tokarenje navoja**

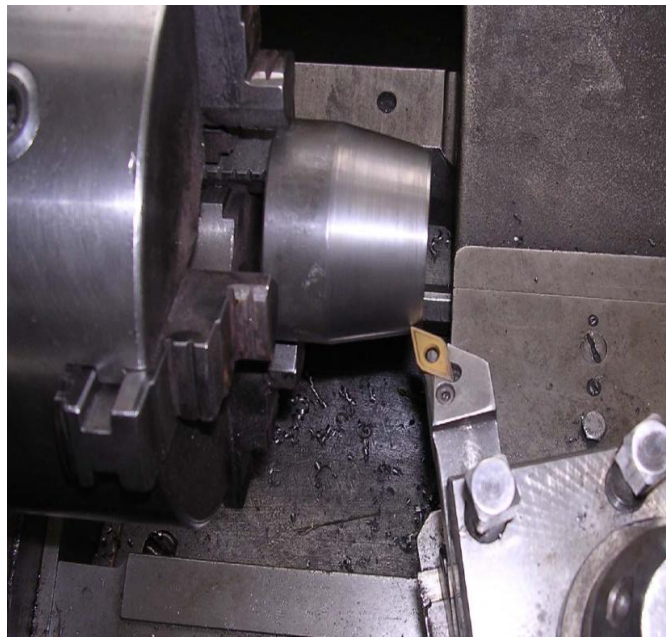
- posmično gibanje je u smjeru osi rotacije i definirano je korakom navoja
- moguće je tokarenje unutarnjih i vanjskih navoja



**Slika 11. Tokarenje unutarnjeg i vanjskog navoja [7]**

### **Konusno tokarenje**

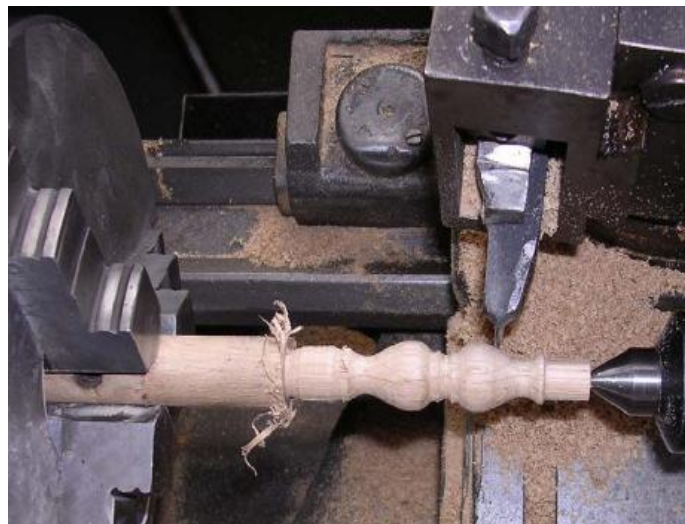
- posmično gibanje je pod nekim kutem u odnosu na os rotacije
- može biti unutarnje i vanjsko



**Slika 12. Tokarenje vanjskog konusa [3]**

### **Kopirno tokarenje**

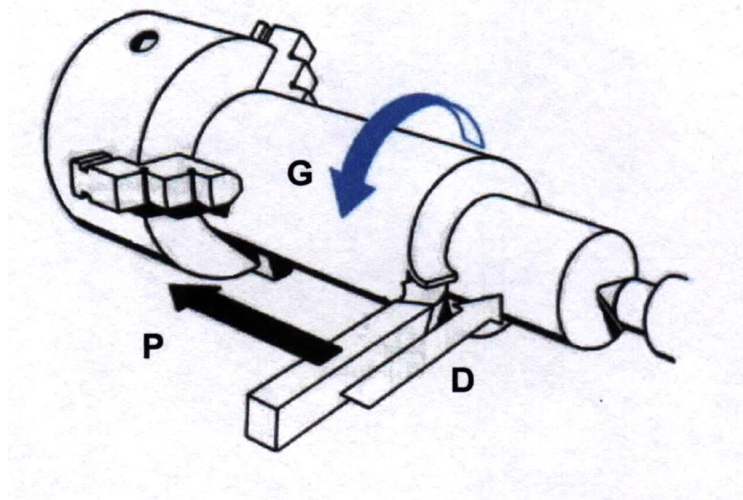
- posmično gibanje je u obliku krivulje u odnosu na os rotacije
- nož putuje po krivulji koje definira ticalo kopirnog uređaja putujući po šabloni (modelu)



**Slika 13. Kopirno tokarenje [3]**

### 3.2. Gibanja kod tokarenja

Puno operacija obrade odvajanjem čestica se međusobno razlikuju kako po alatu tako i po režimu obrade, no ipak možemo reći da se gibanja u tim svim postupcima mogu smatrati sličnima. Tako da prema kinematici rada i odnosa između alata i obratka uglavnom imamo 3 gibanja: glavno, posmično i dostavno.



Slika 14. Prikaz gibanja kod tokarenja [3]

**Glavno gibanje (G)** - izvodi se brzinom  $v_c$  i njome se vrši odvajanje čestica s materijala, pri čemu se troši najveći dio snage na alatnom stroju. Gibanje je kružno ili pravolinijsko, kontinuirano ili diskontinuirano, te ga izvodi obradak.

**Posmično gibanje (P)** - izvodi se brzinom  $v_f$  i služi za održavanja kontakta između alata i obratka, pri čemu se troši jako malo energije u procesu obrade. Ovo gibanje ujedno daje i kontinuitet obrade. Gibanje je kružno ili pravolinijsko, kontinuirano ili diskontinuirano, te ga izvodi alat.

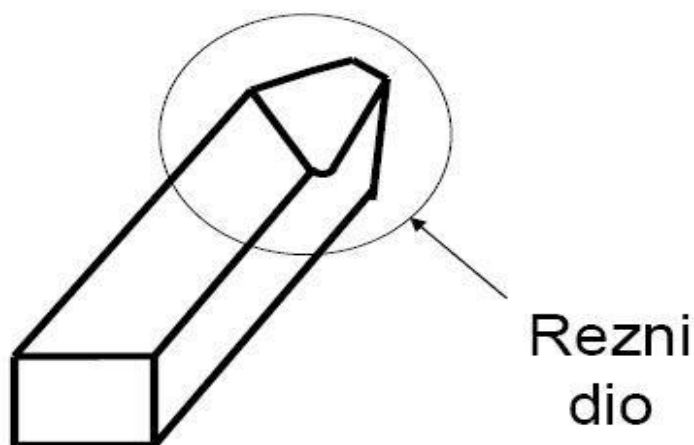
**Dostavno gibanje (D)** - primak i odmak alata. Dostavno gibanje je potrebno za dovođenje alata i obratka u zahvat, zauzimanje dubine rezanja, te povrat alata nakon obavljene obrade. [3]

### 3.3. Alati za tokarenje

Prema postupcima tokarenja potrebno je koristiti adekvatne tokarske noževe. To su alati sa definiranom geometrijom reznog dijela. Mogu biti lijevi ili desni. Tokarski nož se razvijao tijekom dugog razdoblja i stalno se usavršava. Danas se za izradu tokarskog noža koriste brzorezni čelik, tvrdi metal, cermet, keramika, CBN, dijamant.

Osnovni elementi alata za tokarenje, odnosno tokarskog noža su drška i rezni dio. Drška služi za prihvat alata na alatnom stroju i za prijenos sila (otpora) rezanja. Osnova alata je površina koja osigurava pravilan prihvat alata na stroj.

Rezni dio alata obavlja proces obrade tj. odvajanje čestica. [3]

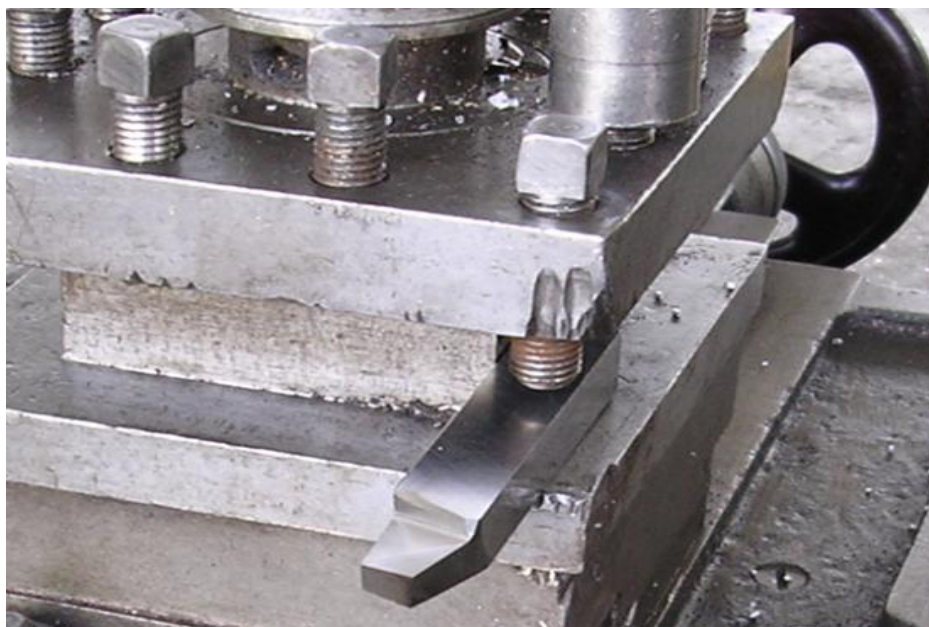


Slika 15. Prikaz tokarskog noža [3]

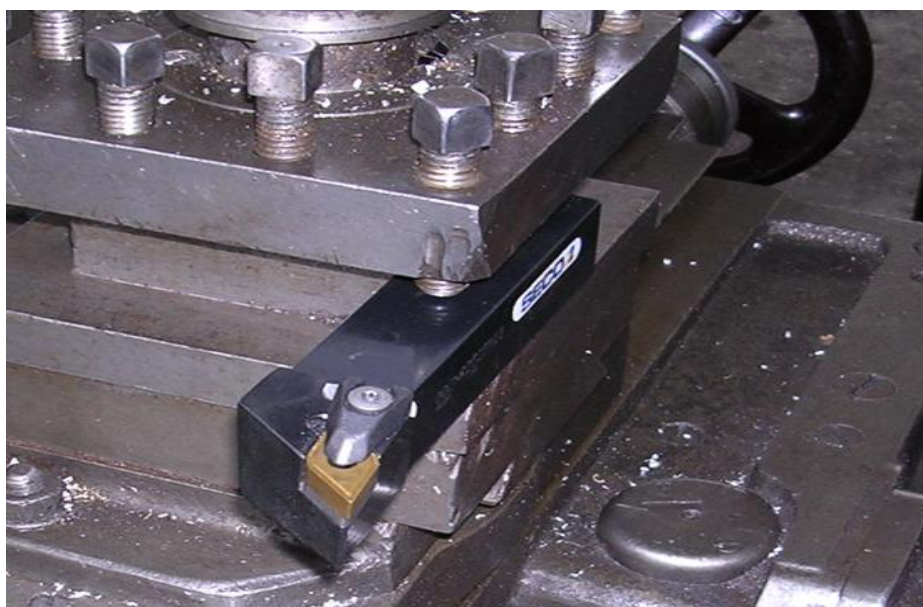
Alate za tokarenje moguće je izrađivati na dva načina:

1. Tokarski nož izrađen iz jednog komada te se kao takvi bruse na potreban oblik. Većinom se izrađuju iz brzoreznih čelika. Prikazan je na slici 16.
2. Tokarski nož izrađen iz dva dijela. Drška je izrađena od jeftinijeg i žilavijeg materijala dok je rezni dio pločica koja se pričvršćuje na dršku. Pločica je većinom izrađena od tvrdog metala, cermenta te keramike, a moguće ju je pričvrstiti na dva načina:
  - Lemljenjem pločice
  - Pričvršćivanjem pločice pomoću vijka





**Slika 16. Tokarski nož izrađen iz jednog komada [3]**



**Slika 17. Tokarski nož izrađen iz više dijelova [3]**



Slika 18. Vrste i oblici pločica za tokarenje [9]

### 3.4. Parametri obrade

Kod postupaka obrade materijala tokarenjem potrebno je definirati slijedeće parametre:

- Dubinu rezanja
- Posmak
- Brzinu rezanja

Jako je bitno da se ovi parametri, koji ujedno i proizlaze iz mogućnosti koje posjeduje naš tehnički sustav, odrede točno jer oni direktno utječu na ekonomičnost obrade koja je opet ograničena zbog međusobne zavisnosti parametara obrade.

Pri odabiru parametara bitno je definirati i vrste obrade na temelju tražene hrapavosti površine i dodataka za obradu tako da razlikujemo grubu obradu, srednju obradu i završnu (finu) obradu.

**Brzina rezanja  $v_c$  [m/min]** je najvažniji tehnološki parametar. To je brzina kojom se alata giba kroz neki materijal odnosno to je put koji alata prijeđe u odnosu na obradak u jedinici vremena. Glavnu brzinu rezanja ima obradak. Glavni kriteriji koji se uzimaju u obzir prilikom određivanja brzine rezanja su snaga stroja, trošenje alata, kvaliteta površine, produktivnost, ekonomičnost i vibracije.

Mjeri se u broju metara u minuti, a određuje se prema formuli:

$$v_c = D \times \pi \times n \quad (1)$$

gdje je:

$v_c$  - brzina rezanja [m/min]

$D$  – promjer obratka [m]

$n$  – broj okretaja obratka [1/min]

**Posmak  $f$  [mm]** je put koji će prijeći glavna oštrica reznog alata u smjeru posmičnog gibanja za jedan okretaj obratka. Okomit je na glavnu brzinu rezanja  $v_c$ . Najvećim dijelom ovisi o zahtijevanoj kvaliteti obrađivane površine odnosno o fazi obrade. Kod grube obrade na umu moramo imati snagu stroja, trošenje alata, oblik odvojene čestice kao i polumjer vrha alata dok kod fine obrade jedini element koji nam ograničava posmak jest teorijska hrapavost obrađivane površine,  $R_t$ .

Vrijednost posmaka može se odrediti i prema izrazu za teorijsku hrapavost koji glasi:

$$R_t \cong \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2)$$

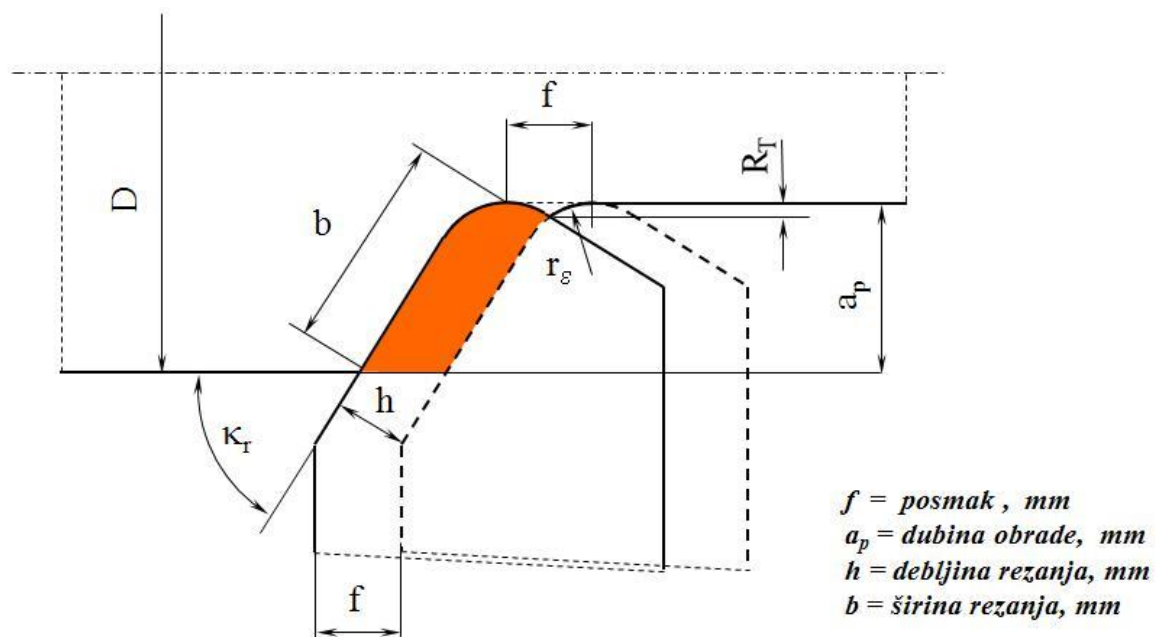
gdje je:

$f$  – posmak [mm]

$r_\epsilon$  – radijus vrha alata [mm]

**Dubina obrade  $a_p$  [mm]** je veličina odvojenog sloja materijala, često određena razmakom između neobrađene i obrađivane površine, mjerena okomito na obrađenu površinu (slika 19) [2]. Drugim riječima, to je onaj sloj materijala koji moramo odvojiti od priprema da bi dobili zahtijevanu dimenziju sa odgovarajućim dodacima za obradu. Napretkom tehnologije i reznih materijala danas je omogućena i obrada u jednom prolazu no ako to nije moguće tada se određuje najveća moguća dubina obrade imajući na umu vrstu obrade (gruba ili fina), snagu stroja i geometriju alata.

Svi navedeni parametri zahvata prikazani su na slici 19.



Slika 19. Parametri obrade kod tokarenja [3]

## 4. GLODANJE

Nakon tokarenja glodanje je najvažniji i najzastupljeniji postupak obrade odvajanjem čestica. To je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) kojim je moguće obraditi gotovo sve vrste i oblike površina (ravne plohe, prizmatične žlebove, zupčanike, navoje,...)

Izvodi se na alatnim strojevima, glodalicama, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i pridruženo je alatu. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera i pridruženo je (najčešće) obratku. Os okretanja glavnog gibanja zadržava svoj položaj prema alatu bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja. [6]

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala. Rezne oštrice periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da im je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja. Istodobno je u zahvatu s obratkom samo nekoliko reznih oštrica[6]



Slika 20. Vertikalni glodaći centar [5]

#### 4.1. Podjela postupaka glodanja

Postupci obrade odvajanjem čestica glodanjem mogu se podijeliti prema nekoliko različitih kriterija kao što su podjele [6]:

##### 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

- Ravno
- Okretno (okruglo, neokruglo)
- Profilno (glodanje utora i profila)
- Odvalno (zupčanici)
- Oblikovno (kopirno)

Prikaz nekih od najčešćih postupaka glodanja:

#### Čeono glodanje

- **Simetrično** – postoje 2 slučaja simetričnog glodanja, a to su:
  1. ako je promjer alata manji od obrađivanog komada alat ulazi u zahvat cijelim promjerom te je prolaz jednak promjeru alata
  2. ako je promjera alata veći od obrađivanog komada glodanje je simetrično jedino ako se os obratka poklapa sa osi glodala te je prolaz jednak dimenzijama obrađivanog komada



Slika 21. Simetrično glodanje [7]

- **Nesimetrično** – os alata se ne poklapa s osi obrađivanog komada, a veličina prolaza ovisi o položaju glodala



Slika 22. Nesimetrično glodanje [7]

## Obodno glodanje

### *Istosmjerno*

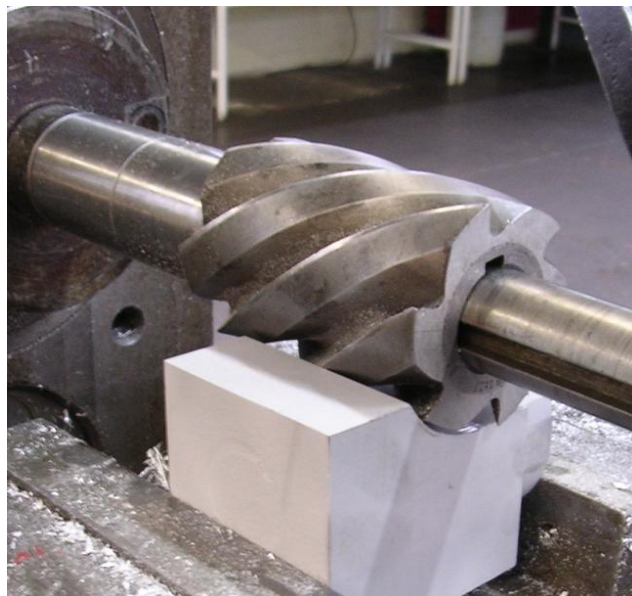
Rotacija alata (glavno gibanje) je u istom smjeru kao smjer posmaka u točki dodira. Odvojena čestica se stvara od većeg prema najmanjem presjeku.



Slika 23. Obodno ravno glodanje-istosmjerno [6]

### *Protusmjerno*

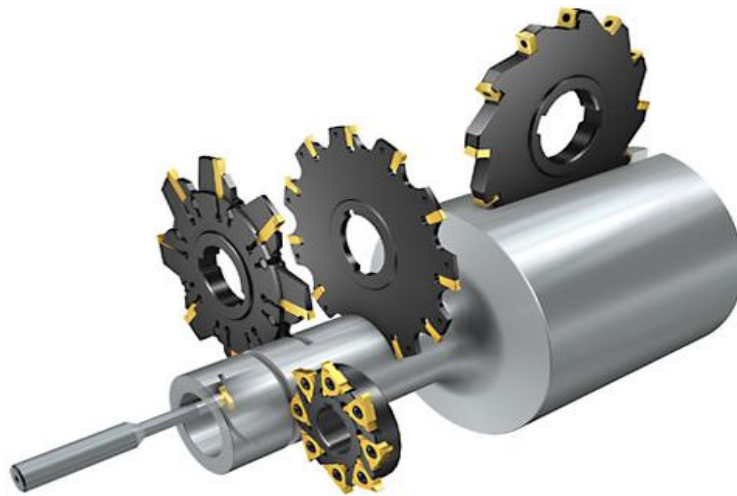
Rotacija alata (glavno gibanje) je u obrnutom smjeru od smjera posmaka. Strugotina se stvara od malog prema većem presjeku.



Slika 24. Obodno ravno glodanje-protusmjerno [6]



## Glodanje utora



Slika 25. Glodanje utora različitim glodalima [7]

### 4.2. Parametri obrade

Prije bilo koje operacije obrade odvajanjem čestica, pa tako i glodanja, potrebno je znati kakva je vrsta obrade, koji alat koristiti, kolika je brzina rezanja, dubina i posmak te da li je potrebno koristiti hlađenje i podmazivanje.

Svi ti režimi rada definirani su na slijedeći način:

**Brzina rezanja  $v_c$  [m/min]** ovisi o materijalu obratka i materijalu alata tako da svaki proizvođač daje brzine rezanja za određeni alat. Kada govorimo o gruboj obradi koristimo manju brzinu rezanja, a veći posmak dok je kod fine obrade obrnuto.

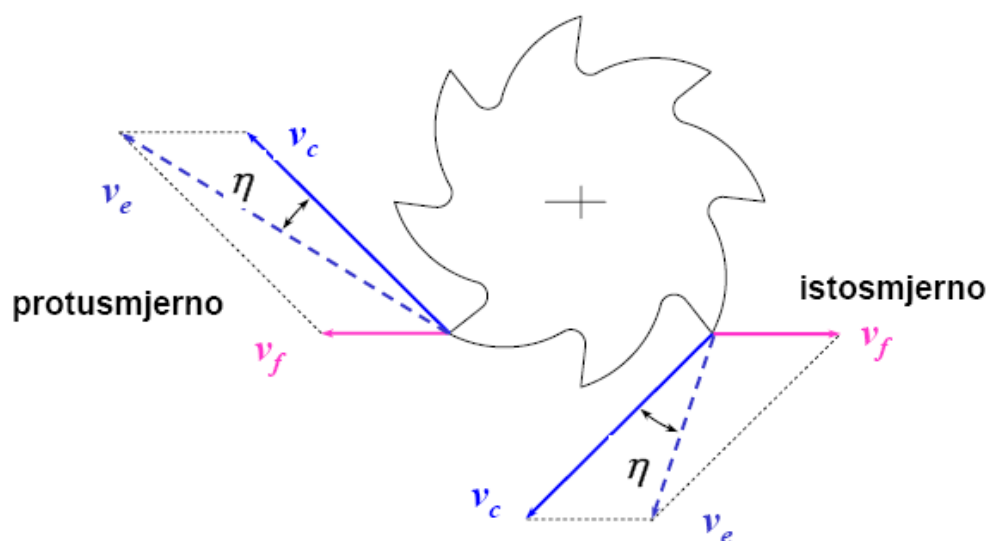
Brzina rezanja kod glodanja računa se prema izrazu:

$$v_c = D_g \times \pi \times n_g \quad (3)$$

gdje je:

$D_g$  – promjer glodala [m]

$n_g$  – frekvencija vrtnje [1/min]



Slika 26. Brzine rezanja kod istosmjernog i protusmjernog glodanja [3]

**Posmak** je parametar kod glodanja koji se može izraziti prema [2] na slijedeća 3 načina:

- **Posmak po zubu  $f_z$  [mm]** definiran je kao veličina relativnog puta glodala ili obratka u pravcu obrade pri okretanju glodala za jedan kutni korak tj. za jedan zub
- **Posmak po okretaju  $f$  [mm]** definiran je kao put glodala ili obratka u pravcu obrade dok se glodalo okrene za jedan okretaj:

$$f = z_g \times f_z \quad (4)$$

gdje je:

$z_g$  – broj zubi glodala

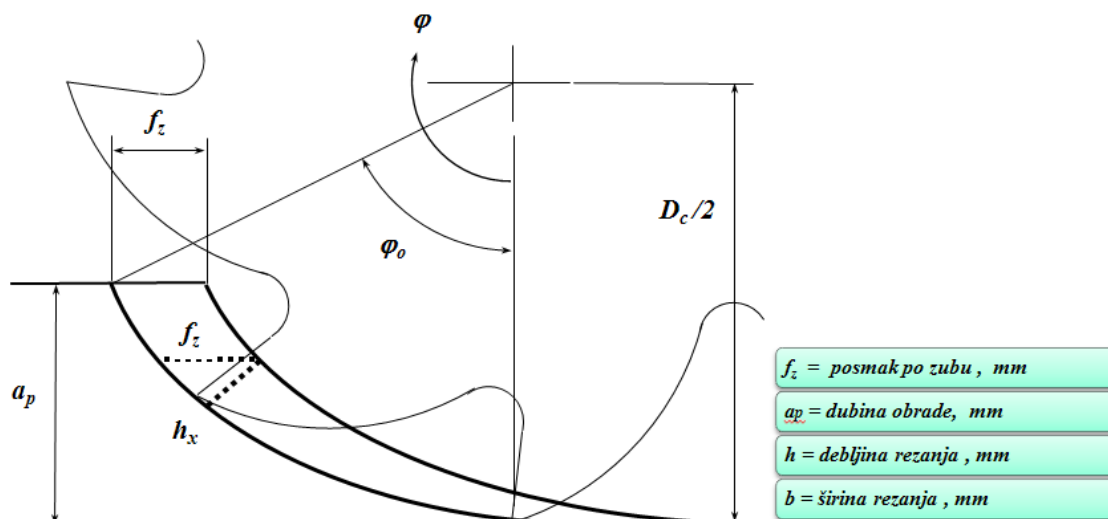
$f_z$  – posmak po zubu [mm]

- **Posmična brzina [m/min]** je put koji glodalo prijeđe u jedinici vremena

$$v_f = z_g \times f_z \times n \quad (5)$$

**Dubina obrade  $a_p$  [mm]** je veličina odvojenog sloja materijala, određena razmakom između neobrađene i obrađivane površine, mjerene okomito na obrađenu površinu [2].

Svi parametri prikazani su na slici 27.



Slika 27. Parametri zahvta kod glodanja [3]

#### 4.3. Alati za glodanje

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala i mogu biti smještene ili na obodnoj (rjeđe) ili na obodnoj i čeonj plohi glodala.[3]

Kao i tokarski nož, glodala se mogu izrađivati cijela iz jednog komada ili mogu imati umetnute rezne oštrice.

Budući da glodalo služi za raznoliku upotrebu obrade materijala odvajanjem čestica i kako se obrađuju različite vrste površina tako je i oblik glodala raznolik. Postoji više kriterija podjele glodala, a ovdje su poredani neki od njih:

- Prema načinu izrade
  - glodala s glodanim zubima
  - glodala s natražno tokarenim i brušenim zubima
  - glodala ili glave s umetnutim zubima

- Prema obliku zubi
  - glodala sa ravnim zubima
  - glodala sa spiralnim zubima
  - glodala sa križnim zubima
- Prema obliku tijela
  - valjkasta glodala
  - valjkasto glodalo za ozubljenje
  - valjkasto glodalo za navoje
  - pločasta (plosnata) glodala
  - pilasta glodala
  - profilna glodala
  - modulna (prstasta) glodala
  - vretenasta glodala
  - konusna glodala

Rezni dio glodala izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od obrađivanog materijala, a najčešće se koriste brzorezni čelici, tvrdi metali, cermet, keramika te kubni nitrid bora. Od brzoreznog čelika izrađuje se cijelo glodalo.



Slika 28. Glodala s umetnutim reznim oštricama [7]



Slika 29. Glodala izrađena iz jednom komada [8]

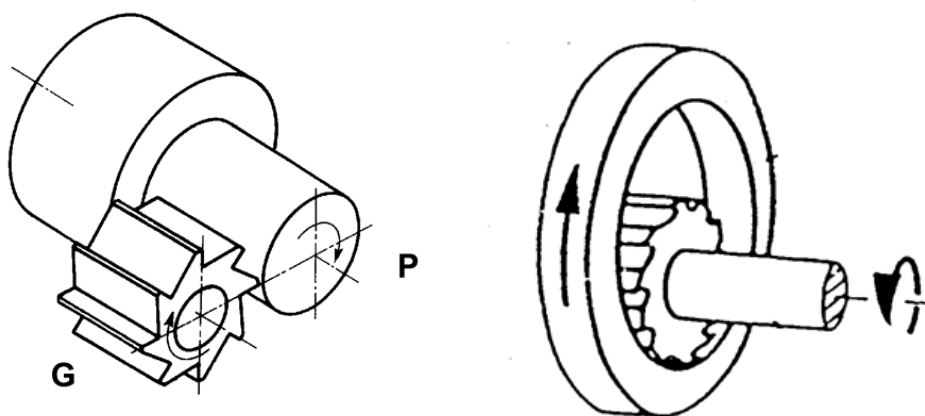
## 5. OKRETNO GLODANJE

### 5.1. Podjela postupaka okretnog glodanja

Stalnom težnjom ka što ekonomičnijim i produktivnijim proizvodnim tehnikama rezanja došlo se do zaključka da bi se kombinacijom različitih postupaka, na jednom te istom stroju, moglo još malo približiti zadanom cilju. U tu svrhu nastaje i okretno glodanje koje je proizašlo kao kombinacije tokarenja i glodanja. Općeprihvatljiva definicija okretnog glodanja glasila bi ovako [1]: okretno glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg se kombiniranjem postupaka tokarenja i glodanja dobivaju općenito cilindrične (okrugle i neokrugle) obradne površine.

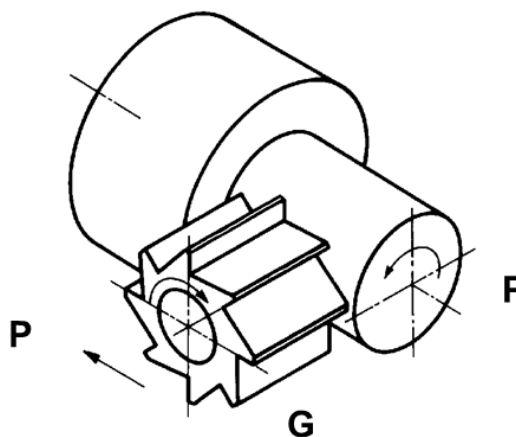
Razlikujemo 2 vrste okretnog glodanja:

- **Kaoksijalno okretno glodanje** – glodanje kod kojeg su osi alata i obratka međusobno paralelne. Pri tome još razlikujemo obradu vanjskih i unutarnjih površina glodalom koje ima rezne oštrice postavljene po vanjskom odnosno unutarnjem obodu glodala [1].



Slika 30. Kaoksijalno vanjsko i unutarnje glodanje [6]

- **Ortogonalno okretno glodanje** – glodanje kod kojeg su osi alata i obratka međusobno okomite.



Slika 31. Ortogonalno okretno glodanje [6]

Proces okretnog glodanja omogućuje efikasniju proizvodnju za proizvoda za čiju bi proizvodnju inače trebalo više operacije s različitim postavkama i na različitim strojevima. Time je smanjeno pripremno-završno vrijeme, koje je i inače velika mana tehnologije obrade odvajanjem, što doprinosi skraćivanju izrade proizvoda i točnosti. [6]

Također, kvaliteta obrađene površine kod okretnog glodanja je bolja nego kod tokarenja, a prednost je i da nema potrebe korištenjem dodatnog alata ili još jedne operacije jer se kvaliteta postiže u jednom prolazu korištenjem WIPER reznih pločica [1].

Ortogonalno okretno glodanje moguće je još podijeliti na 2 potkategorije:

- Centrično
- Ekscentrično

Prema međusobnom položaju osi alata i obratka, odnosno prema veličini razmaka među osima (ekscentritetu "E") razlikujemo 4 osnovne pozicije postupka kako je to i prikazano na slici 4.3. [1]

- Pozicija A  $\rightarrow E=0$ ,
- Pozicija B  $\rightarrow 0 < E < (R_g - l_s)$ ,
- Pozicija C  $\rightarrow E = R_g - l_s$ ,
- Pozicija D  $\rightarrow E = R_g$ .

Međusobni položaj alata i obratka, odnosno veličina ekscentra, definira i različitu kinematiku i dinamiku postupka. Prvenstveno se to odnosi na vrijednost maksimalnog aksijalnog posmaka " $f_{ax}$ " koji se može postići i pri kojem još ne nastaju teorijske neravnine na obrađenoj površini u aksijalnom smjeru obratka. Mogućnost postizanja aksijalnog pomaka u ovisnosti o poziciji postupka, odnosno ekscentricitetu, pokazano je na slici 32.

Prema slici 32. može se zaključiti da će maksimalna vrijednost aksijalnog posmaka koja se može postići kod centričnog glodanja biti onolika koliko je i duljina čeone oštrice. Međutim, kada je osni ima vrijednost  $R_g > E > 0$  posmak možete biti veći i nekoliko puta. [1]

Dakle, imamo 2 granična slučaja a to su:

- **pozicija A** - pozicija centričnog okretnog glodanja ( $\mathbf{E}=\mathbf{0}$ ) i u tom slučaju maksimalni posmak koji se može postići jednak je duljini oštrice glodala:

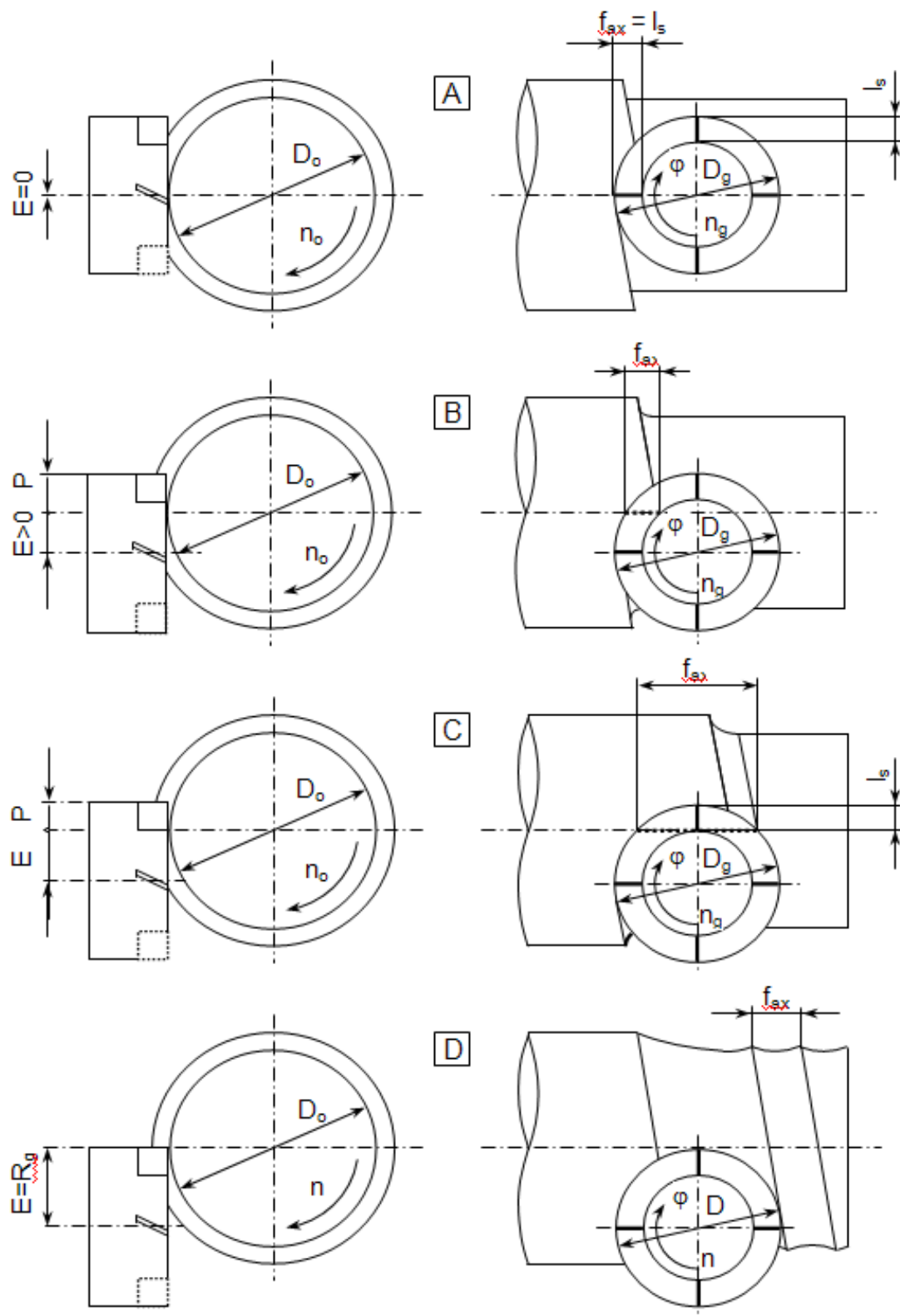
$$f_{ax,max} = l_s \quad (6)$$

- **pozicija C** – pozicija ekscentričnog okretno glodanja ( $\mathbf{E}=\mathbf{R}_g-\mathbf{l}_s$ ) te je u tom slučaju maksimalni aksijalni posmak koji se može postići [1]:

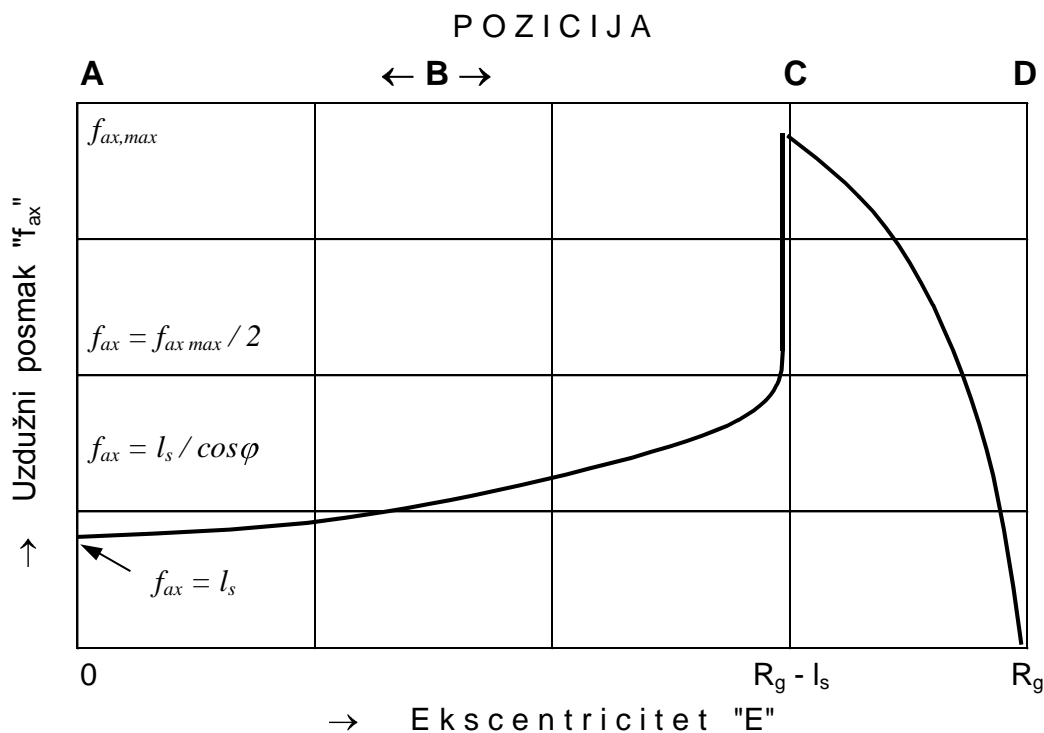
$$f_{ax,max} = 2\sqrt{R_g^2 - (R_g - l_s)^2} \quad (7)$$

Vrijedi spomenuti još i poziciju kada je  $\mathbf{E}=\mathbf{R}_g$ , koji predstavlja granični slučaj, kada pri bilo kojem aksijalnom posmaku nastaju teorijske neravnine na obrađenoj površini u aksijalnom smjeru obratka, a samim time je postupak neprikladan za uporabu [1].





Slika 32. Pozicije ortogonalnog okretnog glodanja [1]



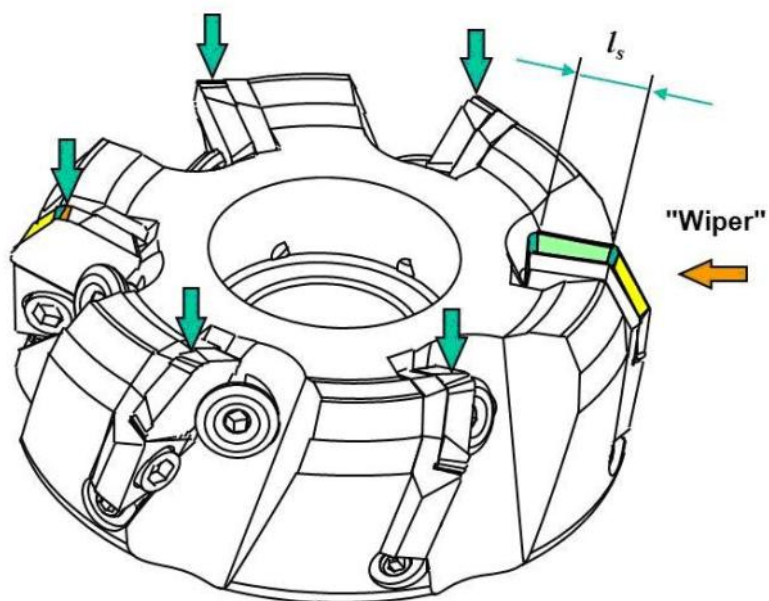
Slika 33. Mogućnost postizanja aksijalnog pomaka u ovisnosti o ekscentricitetu [1]

## 5.2. Rezni alati za okretno glodanje

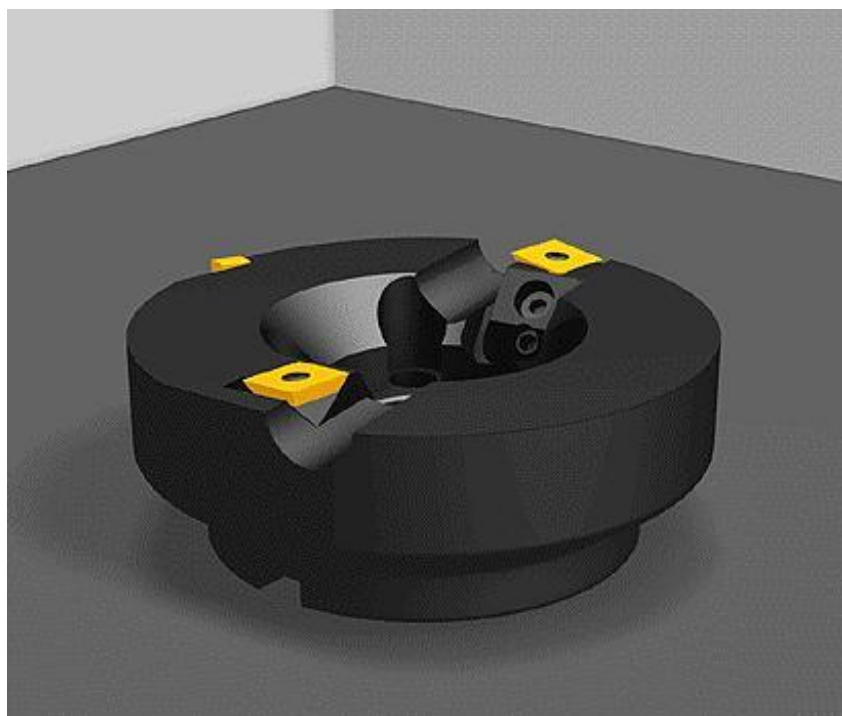
Uvidjevši brojne prednosti okretnog glodanja tvrtke su se okrenule ka razvoju kako strojeva tako i reznih alata za okretno glodanje. Među najistaknutijima možemo spomenuti firmu SECO TOOLS koja je izbacila na tržište program najvećeg izbora alata te prema njemu možemo glodala za okretno glodanje podijeliti u 2 skupine [1]:

- glodala iz standardnog programa – koriste se većinom za grubu i srednju obradu, a manjim dijelom za završnu (slika 34.)
- glodala iz specijalnog programa - isključivo za završnu i finu obradu okruglim glodanjem (slika 35.)

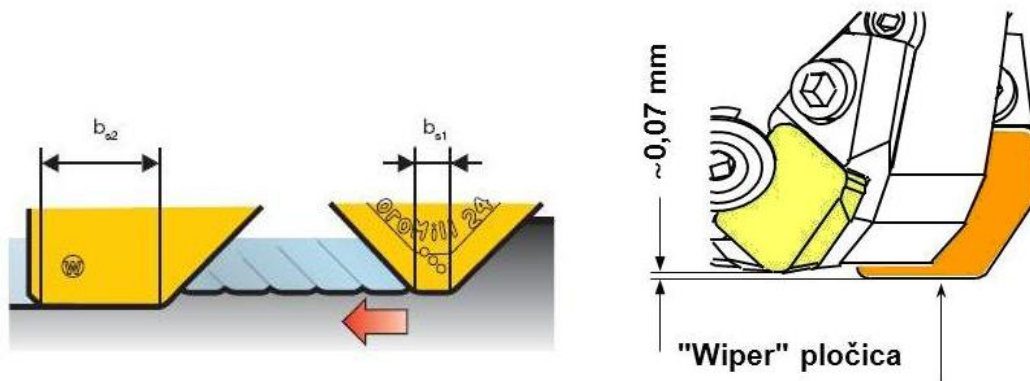
Osnovna značajka glodala za ortogonalno okretno glodanje je da mora imati barem jednu reznu pločicu ( tzv. 'wiper' pločica) koja ima čeonu reznu oštricu relativno paralelnu s osi obratka ( $\kappa_r = 0^\circ$  - slika 4.7.) [1]



Slika 34. Glodalo iz standardnog programa [6]



Slika 35. Glodalo iz specijalnog programa [1]



Slika 36. Prikaz rada 'wiper' rezne pločice [10][6]

Sve vrste materijala reznih pločica koje se upotrebljavaju kod klasičnog i visokobrzinskog glodanja preporučuju se i za okretno glodanje. Preporuka je također da se za grubu obradu (velike snage) koriste pločice od prevučenog tvrdog metala. Rezna keramika se pak preporučuje pri obradi malim presjecima odvojenih čestica i pri uporabi visokih brzina [1].

### 5.3. Parametri obrade

Kinematski proces ortogonalnog okretnog glodanja vrlo je složen ako se gleda dijagram brzina koji se mijenja tijekom zahvata oštrice glodala i obratka, a samim time mijenjaju se i kinematski kutovi obradnog klina.

#### *Brzina rezanja*

Valja spomenuti da se ukupna (efektivna) brzina  $v_e$  sastoji od ukupno tri brzine rezanja:

- glavna brzina rezanja  $v_c$
- obodna posmična brzina rezanja  $v_{fo}$
- aksijalna posmična brzina rezanja  $v_{fax}$

Ukupna (efektivna) brzina rezanja će tada biti jednaka vektorskom zbroju tih brzina i iznositi će:

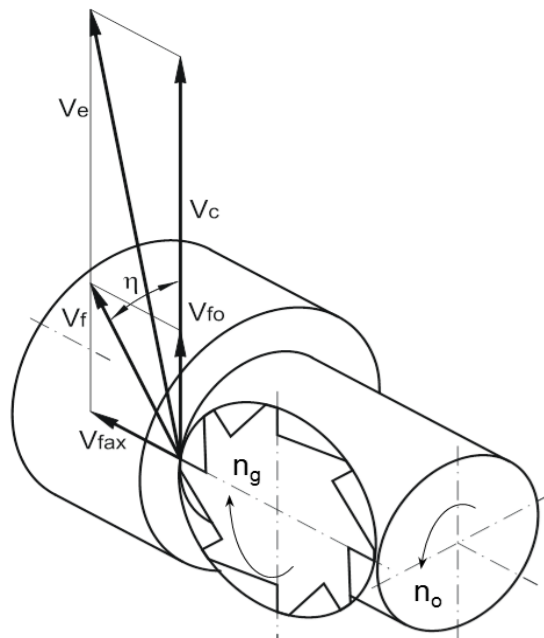
$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_{fo} + \vec{v}_{fax} = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad (8)$$

Za pojedine brzine vrijede slijedeće relacije:

$$v_c = D_g \times \pi \times n_g \quad (9)$$

$$v_{fo} = f_{zo} \times \pi \times n_g = D_o \times \pi \times n_o \quad (10)$$

$$v_{fax} = f_{ax} \times n_o \quad (11)$$



Slika 37. Shematski prikaz brzina kod ortogonalnog okretnog glodanja [6]

### Posmak

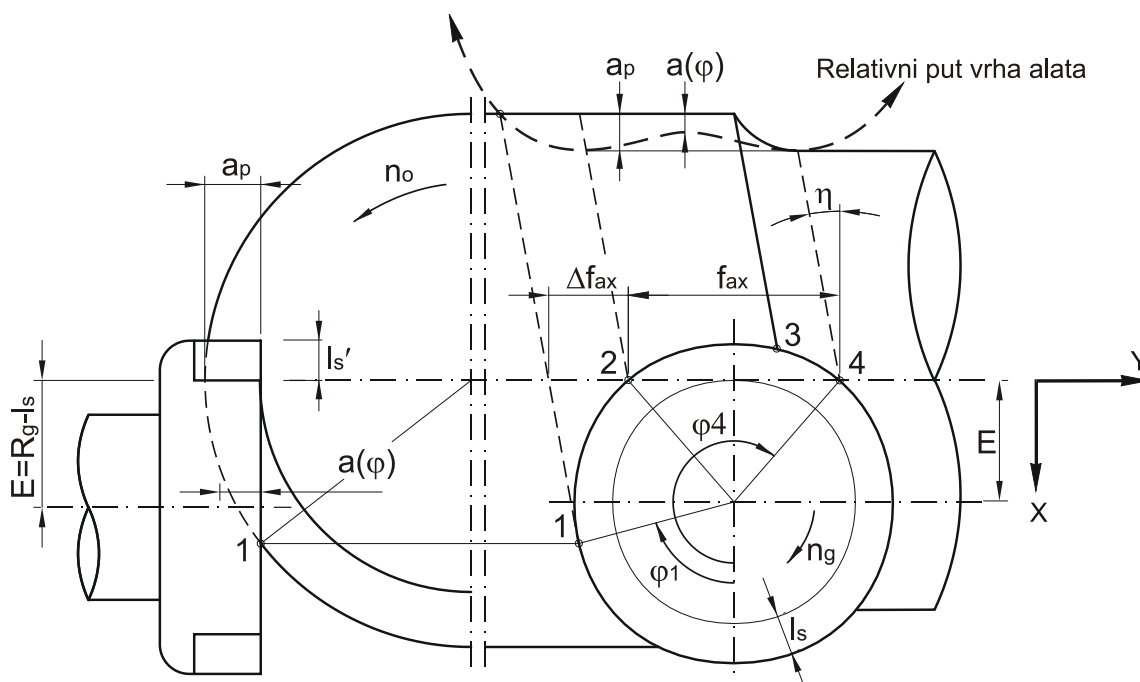
Iz ovih je izraza dalje moguće dobiti osnovne kinematske karakteristike procesa kao što su *posmak po zubu glodala*  $f_{zo}$  i *ukupni posmak po zubu*  $f_z$  [1]:

$$f_{zo} = \frac{v_{fo}}{n_g z_g} = \frac{D_o \pi n_o}{z_g n_g} \quad (12)$$

$$f_z = \frac{v_f}{n_g z_g} \quad (13)$$

### Dubina obrade

Obodna rezna oštrica prva ulazi u zahvat (točka 1. na slici 38.) i to na neobrađenoj površini te je zbog toga dubina obrade na početku zahvata mnogo je manja od zadane dubine obrade. U daljnjem radu se dubina obrade povećava, kao i debljina odvojene čestice, pa se i rad obodne oštrice povećava. Tek kada dođe na zadani promjer obrade (točka 2. na slici 38.) rezna oštrica nalazi se na zadanoj dubini obrade, a u rad se uključuje i čeona oštrica [1].



Slika 38. Odnosi zahvata glodala i obratka kod ekscentričnog ortogonalnog okruglog glodanja [1]

## 6. TEORIJSKA VISINA NERAVNINA

### 6.1. Uvodne napomene o površini

Nijedan proces obrade odvajanjem čestica ne ostavlja idealnu i glatku površinu. Njena kvaliteta određuje se hrapavošću i fizičko-mehaničkim osobinama jer prilikom obrade na materijalu se mogu dogoditi značajne promjene. Postupci obrade odvajanjem čestica vrlo su cijenjeni upravo zbog visoke kvalitete površine koja se njima može postići.

Na svakoj, makar i na jako brižljivo čišćenoj površini, zadržavaju se ostaci odvojenih čestica materijala, ulja i drugih nečistoća. Taj sloj treba smatrati sastavnim dijelom obrađene površine budući da se može skinuti samo u vakuumu.[2]

### 6.2. Teorijska hrapavost

Stvarna hrapavost površine koja je generirana procesom obrade odvajanjem čestica i ona mjerena mjernim instrumentima će odstupati od teoretske hrapavosti.

Različiti nepovoljni utjecaji (vibracije, trošenje alata, elastične deformacije alata i obratka, stvaranje naljepka te posljedice rezanja) doprinose tom odstupanju od idealne, teoretske površine.

Sve navedene formule temeljene su na geometrijskim pretpostavkama i služe kako bi se moglo predvidjeti visina neravnina, ali i kako bi se moglo usporediti sa stvarno izmjerenom visinom neravnina te na taj način istražiti utjecaj materijala obratka, parametara obrade, ponašanje alata i nekih drugih utjecaja na veličinu hrapavosti površine. [11]

#### 6.2.1. Teorijska hrapavost kod tokarenja

Kod procesa tokarenja moguće su 2 varijante izgleda površine koje je nastala nakon obrade tokarskim nožem:

- **bez radijusa vrha oštrice ( $r_\epsilon=0$ )** gdje će teorijska visina neravnina ovisi o kutevima samog alata ( $\kappa_r$  i  $\kappa_r'$ ) što će u daljnjem tekst biti dokazano.

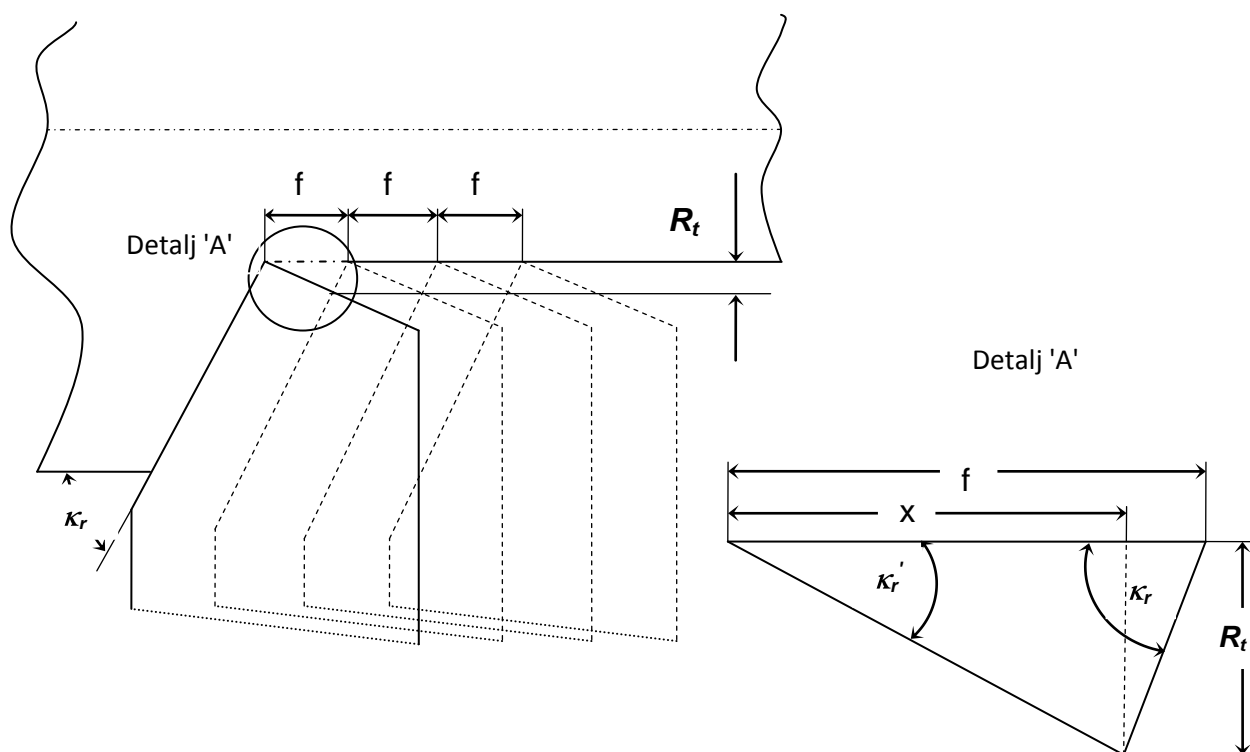
Prikazom detalja 'A' na slici 39. posmak će biti definira kao

$$f = x + (f - x) \quad (14)$$

dok su kutovi  $\kappa_r$ ;  $\kappa_r'$  definirani izrazima:

$$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{R_t}{f - x} \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \kappa_r' = \frac{R_t}{x} \quad (16)$$



Slika 39. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom bez radijusa vrha alata

Daljnjom transformacijom izraza (15) i (16) dobiva se

$$(f - x) = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} \quad (17)$$

$$x = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (18)$$

Uvrštavanjem izraza (17) i (18) u (14) te njegovim sređivanjem dobiva se konačan izraz za izračun teorijske visine neravnina prilikom tokarenja upotrebom alata bez radijusa vrha:

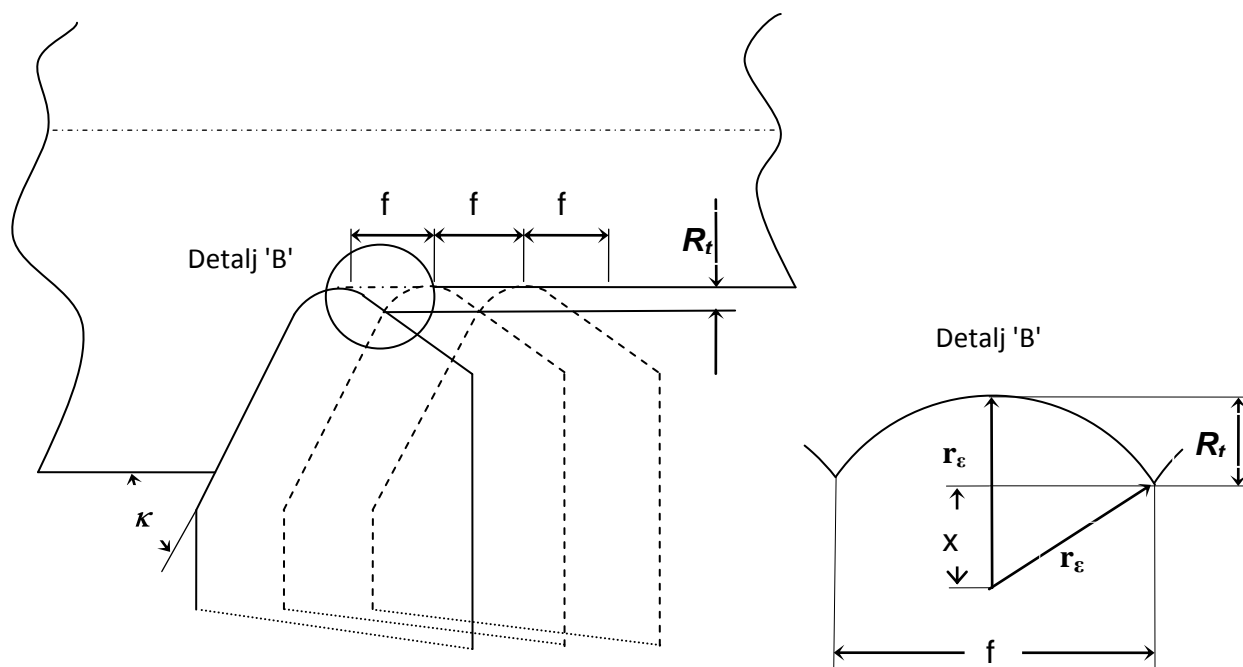
$$f = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} + \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (19)$$



$$R_t = f \frac{\operatorname{tg} \kappa_r \operatorname{tg} \kappa_r'}{\operatorname{tg} \kappa_r + \operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (20)$$

• **alatom sa radijusom vrha alata ( $r_\varepsilon > 0$ )**

Slikom 40. Prikazan je postupka tokarenja sa radijusom oštrice vrha alata. Detaljnijim prikazom vidljiv je oblik površine koji nastaje nakon prolaza tokarskog noža. Poznavajući geometriju alata moguće je dati dovoljno približne izraze za izračunavanje teorijske visine neravnina.



**Slika 40. Izgled obrađene površine nakon prolaza alatom sa radijusom vrha alata**

Prema detalju 'B' na slici 40. vrijede izrazi:

$$x^2 = r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (21)$$

$$x = r_\varepsilon - R_t \quad (22)$$

Uvrštavanjem (22) u (21) dobivamo izraz

$$r_\varepsilon - R_t = r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (23)$$

gdje se daljnjim kvadriranjem dobiva :

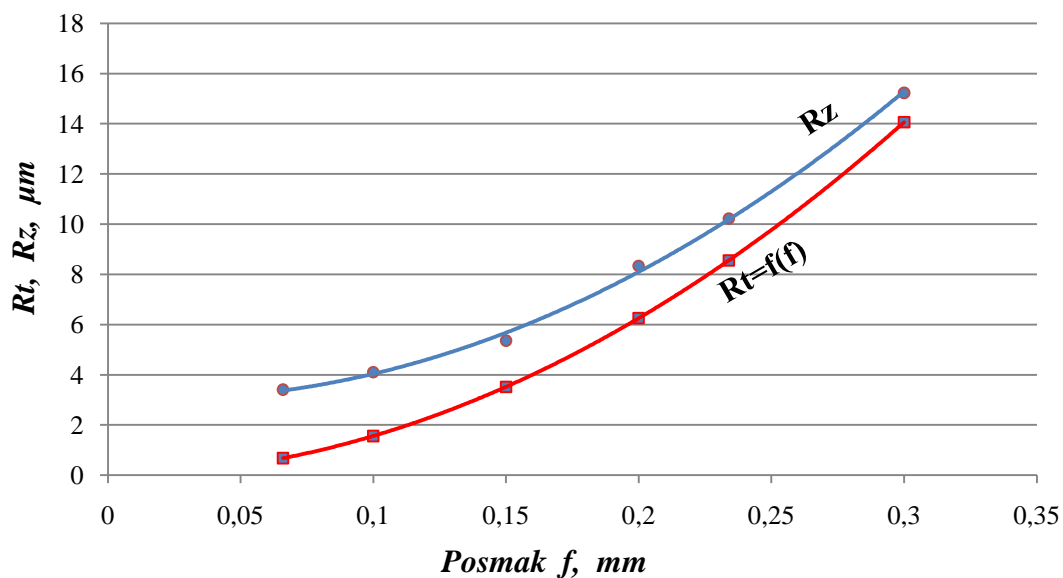
$$r_\varepsilon^2 - 2R_t r_\varepsilon + R_t^2 = r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (24)$$

U ovom slučaju izraz se može dosta pojednostavniti ako se uzima pretpostavka da je  $R_t^2 \approx 0$  i to zbog toga jer se teorijska visina neravnina mjeri u mikrometrima, a ako se takav izraz još i kvadrira realno je za pretpostaviti da će ta vrijednost biti dovoljno mala da se može zanemariti. Uz takvu pretpostavku dobiva se konačan izraz za približan izračun teorijske visine neravnina:

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (25)$$

Što govori da će teorijska visina neravnina (hrapavost) ovisiti o kvadratu posmaka kao jednom od parametra obrade te o radijusu vrha alata koji se koristi. Budući da su dane neke pretpostavke kako bi konačna formula bila što jednostavnija, a opet dovoljno točna da daje približnu predodžbu o veličini hrapavosti koju ćemo postići, jasno je da postoje razlike u teorijskoj hrapavost i onoj stvarnoj koja je izmjerena nakon proces obrade tokarenjem.

To je prikazano slikom 41. gdje je vidljivo da su odstupanja između teorijske i stvarne hrapavosti veća u režimima obrade s manjim posmakom dok su ta odstupanja sve manja kako s posmak povećava. Jasno je da vrijednost posmaka nije moguće povećati u beskonačnost kako bi izjednačili teorijsku i stvarnu hrapavost jer treba misliti i na mogućnosti samog stroja, vijek trajanja alata, a na kraju i na ekonomičnost obrade.



Slika 41. Teoretska i stvarna veličina neravnina nakon postupka tokarenja [12]

Čelik za cementaciju 16MnCr5 (Č4320)  
 Pločica iz cermenta DNMG 160408, Seco Tools  
 CNC tokarski stroj Trens SLB-500

### 6.2.2. Teorijska visina neravnina kod glodanja

Ovisno o vrsti glodala odnosno reznog alata kojeg koristimo kod čeonog glodanja moguće je dobiti 3 oblika koji izražavaju teorijsku visinu neravnina. Kod prva dva slučaja koja su prikazana u daljnjem tekstu postoji analogija sa postupcima tokarenja.

Oblici površine koji se postižu korištenjem različitih vrsta reznih alata mogu nastati kada koristimo:

#### A. glodalo bez radijusa vrha reznog alata

Prikazom detalja 'C' na slici 42. posmak će biti definira kao

$$f = x + (f - x) \quad (26)$$

dok su kutovi  $\kappa_r$ ;  $\kappa_r'$  definirani izrazima:

$$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{R_t}{f - x} \quad (27)$$

$$\operatorname{tg} \kappa_r' = \frac{R_t}{x} \quad (28)$$

Daljnjom transformacijom izraza (27) i (28) dobiva se

$$(f - x) = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} \quad (29)$$

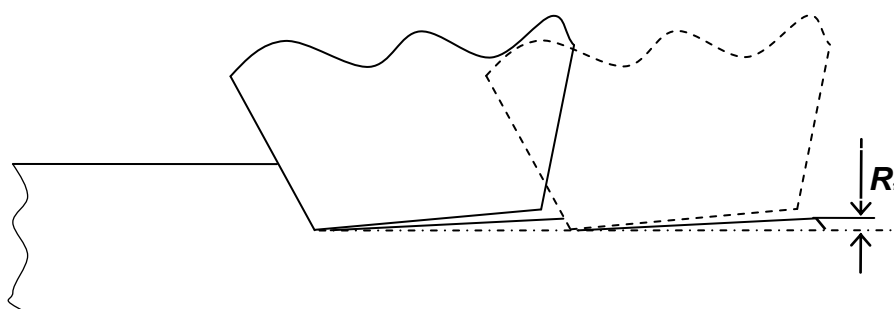
$$x = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (30)$$

Uvrštavanjem izraza (29) i (30) u (26) te njegovim sređivanjem dobiva se konačan izraz za izračun teorijske visine neravnina prilikom tokarenja upotrebom alata bez radijusa vrha:

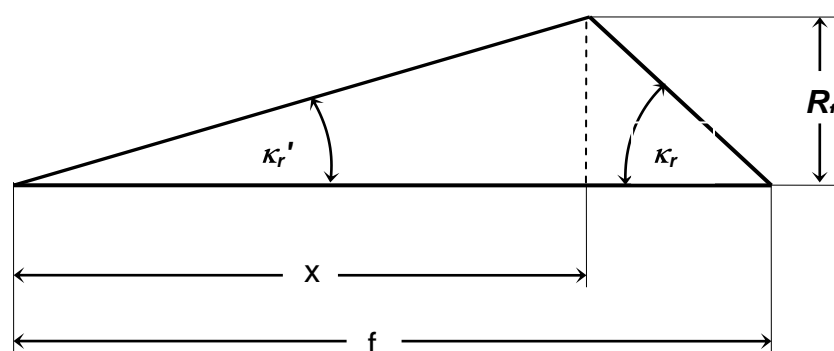
$$f = \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r} + \frac{R_t}{\operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (31)$$

$$R_t = f \frac{\operatorname{tg} \kappa_r' \operatorname{tg} \kappa_r}{\operatorname{tg} \kappa_r + \operatorname{tg} \kappa_r'} \quad (32)$$

U ovom je slučaju geometrija obrađene površine analogna onoj kod tokarenja bez radijusa vrha noža pa je tako i konačan izraz za izračun teorijske hrapavosti jednak kao i (20).



Detalj 'A'



Slika 42. Geometrija obrađene površine nakon obrade glodalom bez radijusa oštrice

**B. glodala sa reznim pločicama gdje mogu nastati dvije različite geometrije obrađene površine ovisno o vrsti pločica koje koristimo:**

- geometrija definirana radijusom vrha pločice

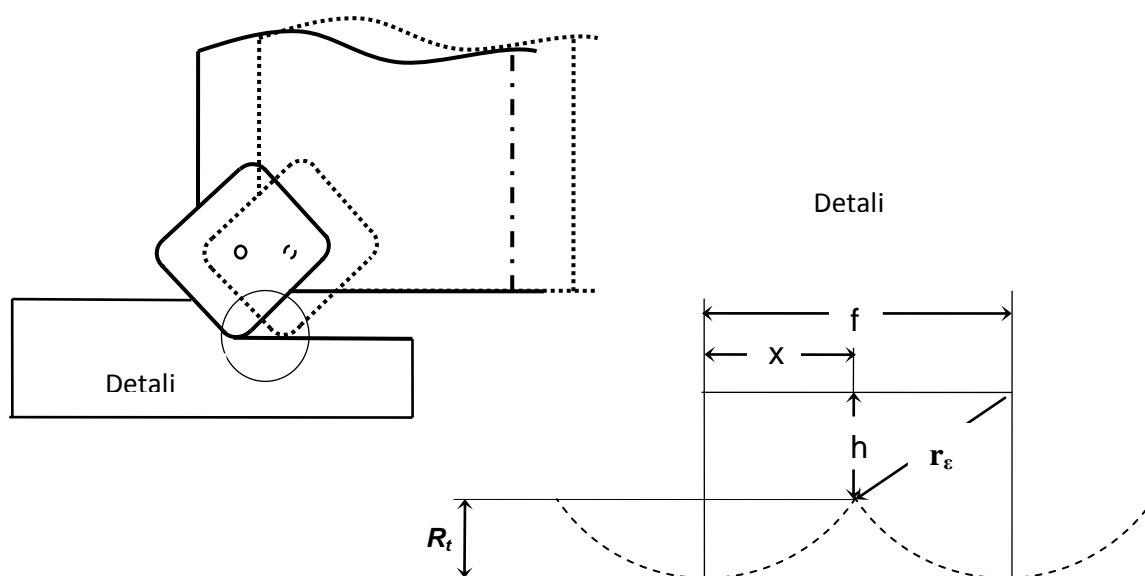
Prema slici 43. vrijedi sljedeće:

$$R_t + h = r_\varepsilon \quad (33)$$

$$r_\varepsilon^2 = \left(\frac{f}{2}\right)^2 + h^2 \quad (34)$$

Uvrštavanjem izraza (33) u (34) dobiva se jednažba:

$$r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{4} + r_\varepsilon^2 - 2r_\varepsilon R_t + R_t^2 = 0 \quad (35)$$



**Slika 43. Geometrija obrađene površine glodalom sa reznim pločicom sa radijusom vrha pločice**

Također je bitno uvođenje pretpostavke  $R_t^2 \approx 0$ , kako je to bilo napravljeno i kod postupka tokarenja te se dobiva :

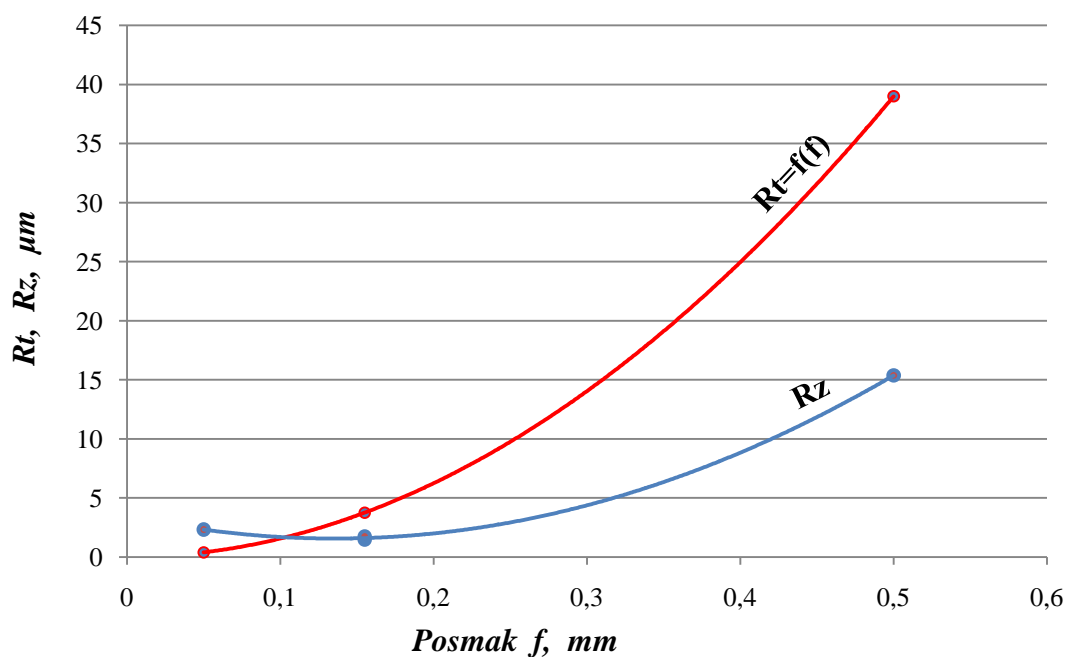
$$2r_\varepsilon R_t = \frac{f^2}{4} \quad (36)$$

Iz čega proizlazi konačan izraz za izračun teorijske visine neravnina za čeono glodanje kada koristimo pločicu s radijusom vrha pločice:

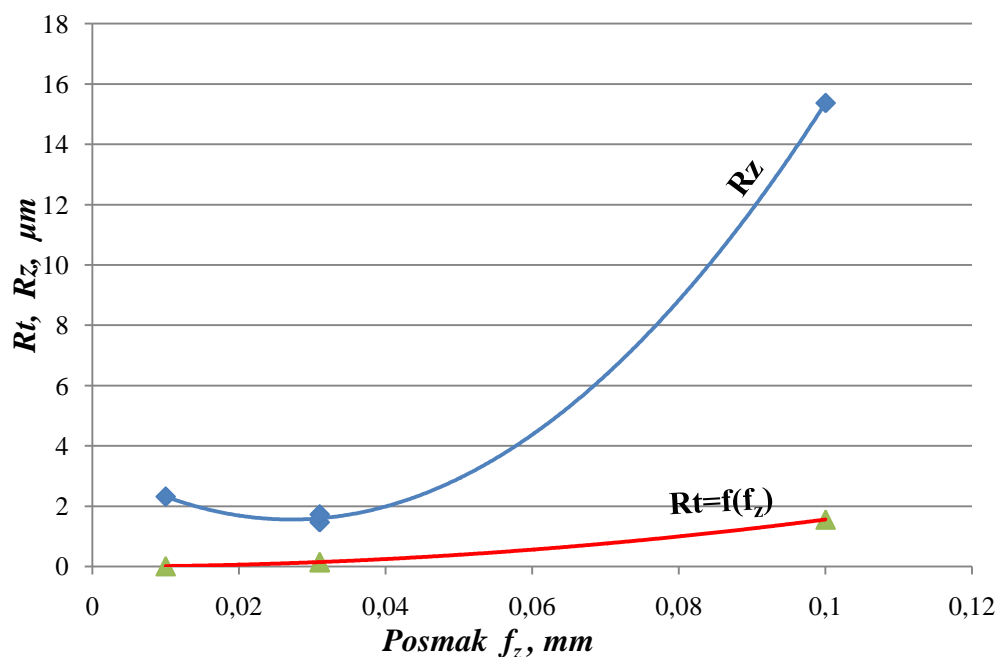
$$R_t = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (37)$$

Na temelju ovako izvedene formule proveden je pokus u kojem je pokazana ovisnost teorijske i stvarna hrapavosti. Koristeći izraz (37) računski je dobivena vrijednost teorijske hrapavosti, za određeni posmak i brzinu, prije same obrade, a nakon obrade izmjerena je i stvarna hrapavost obrađene površine.

U prvom grafu (Slika 44.) prikazan je odnos teorijske hrapavosti, računate za posmak po glodalu ( $f$ ), i stvarno izmjerene hrapavosti. U drugom grafu (Slika 45.) prikazan je odnos teorijske hrapavosti, računate za posmak po zubu ( $f_z$ ), i stvarno izmjerene hrapavosti. Vidljivo je da je stvarna hrapavost veća od teorijski računate za  $f_z$ , a manja od teorijski računate za  $f$ .



**Slika 44.** Razlike teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade glodalom sa radijusom vrha (posmak po glodalu) [12]



Slika 45. Odnosi teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade glodalom sa radijusom vrha (posmak po zubu) [12]

pločica:  $r_\epsilon=0,8$  mm

glodalo  $D_g= 40$  mm

Stroj: CNC Micron VCE 750

Materijal: čelik za cementaciju (Č4320)

- geometrija definirana radijusom vrha pločice

Osnovna pretpostavka koja nam neće bitno narušiti točnost krajnjeg rezultata jest:

$$x = \frac{R_t}{\text{tg } \kappa_r'} \quad (38)$$

Dalje vrijedi:

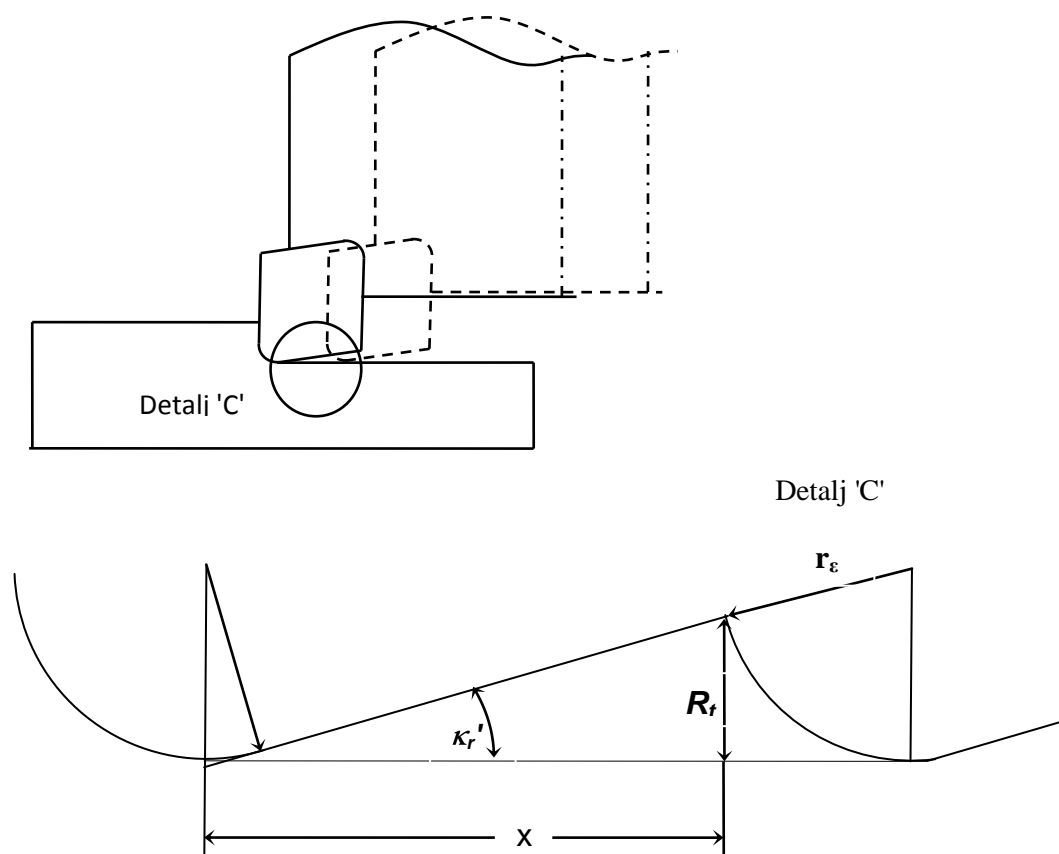
$$\overline{r_\epsilon - R_t}^2 + \overline{f - x}^2 = r_\epsilon^2 \quad (39)$$

$$r_\epsilon^2 - 2R_t r_\epsilon + R_t^2 + f^2 - 2fx + x^2 = r_\epsilon^2 \quad (40)$$

Uvrštavanjem (38) u (40) dobivamo ponovno izraz pojednostavljen na način da je  $R_t^2 \approx 0$ , a zbog razloga isto kao u prethodnim slučajevima.

Daljnjim sređivanjem izraza dobiva se konačan izraz za približan izračun teorijske visine neravnina za ovaj način čeonog glodanja:

$$R_t = \frac{f^2 \operatorname{tg} \kappa_r'}{2r_\varepsilon \operatorname{tg} \kappa_r' + 2f} \quad (41)$$



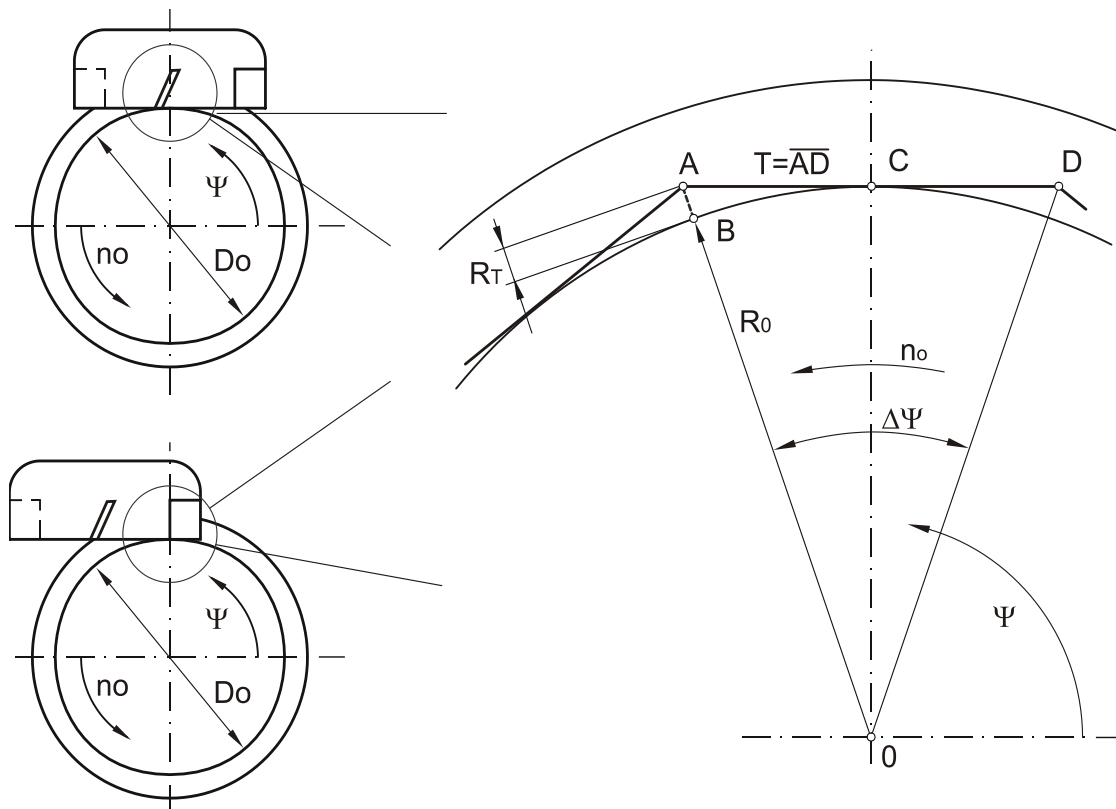
Slika 46. Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala sa radijusom i nagibom vrha

### 6.2.3. Teorijska visina neravnina kod okretnog glodanja

Postupci ortogonalnog okruglog glodanja ne ostvaruju idealno kružni, odnosno cilindrični poprečni presjek obratka. Kako je to prikazano na slici 47., poprečni presjek obratka ima poligonski oblik, a vrhovi poligona čine odstupanje od kružnosti, odnosno geometrije obrađene površine. Uobičajeno je da se takva odstupanja, definirana kinematikom procesa i parametrima zahvata odvajanog sloja, a za praksu interesantne parametre režima obrade, nazivaju teorijska visina neravnina ili teorijska hrapavost " $R_T$ ".



Slika 47. pokazuje da centrično i ekscentrično ortogonalno okruglo glodanje ostvaruju, u identičnim okolnostima, identičan poprečni presjek obratka, pa su i odstupanja od kružnosti, odnosno teorijska visina neravnina, identična [1].



**Slika 47. Izgled obrađene površine nakon prolaza glodala postupkom ortogonalnog okretnog glodanja**

Iz trokuta ACO na slici može se napisati:

$$R_o^2 + \left(\frac{T}{2}\right)^2 = R_o^2 + R_T^2 \quad (42)$$

$$T = R_o \operatorname{tg}(\Delta\psi) \quad (43)$$

Središnji kut poligona je u praktičnoj uporabi vrlo mali, reda veličine maksimalno jednog stupnja, pa se može pisati:

$$\operatorname{tg}(\Delta\psi) = \Delta\widehat{\psi} = \frac{2\pi n}{n_g z_g} \quad (44)$$

Uvrštavanjem ovog izraza u (42) dobije se teorijska visina neravnina:

$$R_T = \frac{R_o}{2} \left( \frac{\pi n}{n_g z_g} \right)^2 \quad (45)$$

Daljnjom transformacijom izraza (45) može se pisati:

$$R_T = \frac{1}{8R_o} \left( \frac{D_o \pi n}{n_g z_g} \right)^2 \quad (46)$$

Uvrštavanjem izraza za obodnu posmičnu brzinu obratka ( $v_{fo}$ ) i posmak po zubu glodala ( $f_{zo}$ ):

$$v_{fo} = D_o \pi n = f_{zo} z_g n_g \quad (47)$$

$$f_{zo} = \frac{v_{fo}}{n_g z_g} = \frac{D_o \pi n}{n_g z_g}, \text{ dobije se:} \quad (48)$$

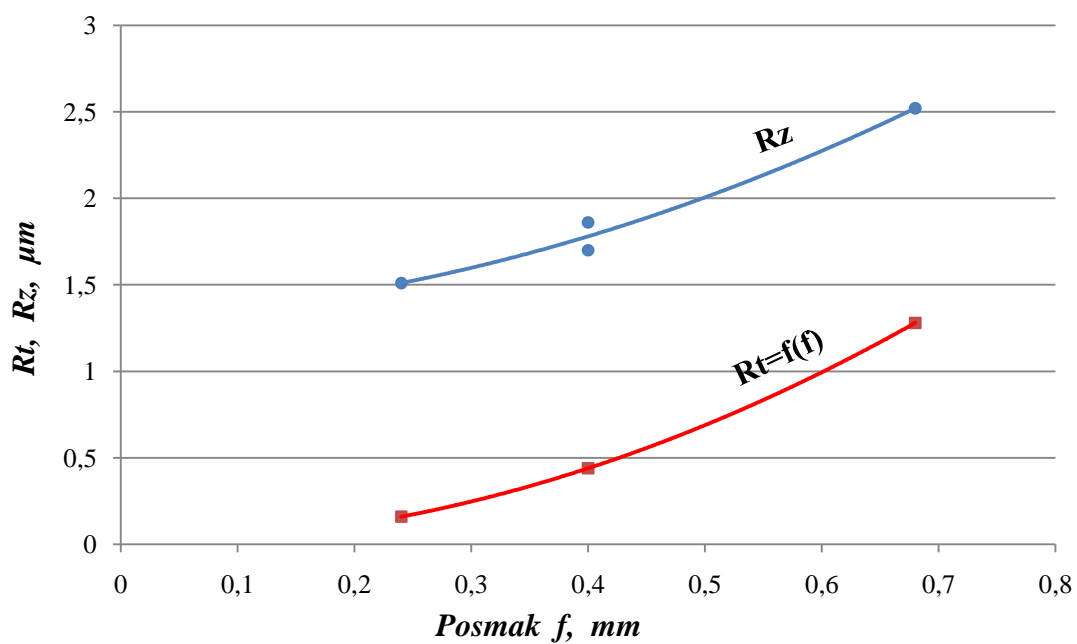
$$R_T = \frac{f_{zo}^2}{8R_o} \quad (34)$$

U slučaju korištenja 'wiper' pločice u formulu se uvrštava posmak za pločicu 'wiper'  $f_w$  umjesto posmaka po zubu glodala  $f_{zo}$  pa izraz glasi:

$$R_T = \frac{f_w^2}{8R_o} \quad (35)$$

Dobiveni izraz za teorijsku hrapavosti površine nakon obrade ortogonalnim okretnim glodanjem pokazuje da će hrapavost ovisiti o kvadratu posmaka po zubu glodala i o promjeru odnosno polumjeru komada koji obrađujemo. S druge strane, ako koristimo 'wiper' pločicu, jasno je da će hrapavost u tom slučaju ovisiti o posmaku za 'wiper' pločicu i promjeru obratka.

Slikom 48. prikazan je odnos teorijske i stvarne hrapavosti koji je dobiven pokusom prema [1]. Također, slika 48. pokazuje da je stvarna hrapavost i u ovom slučaju veća od one teorijske. Taj odnos je puno više izražen kod manjih posmaka, a nešto manje s povećanjem posmaka i brzine rezanja.



Slika 48. Odnosi teorijske i stvarne hrapavosti kod obrade ortogonalnim okretnim glodanjem [12]

Čelik za cementaciju 16MnCr5 (Č4320)  
Pločica - standardna ABER2606ZFFR –M15 –T20M , Seco Tools  
- Wiper: ABER2606ZFFR –M15 –T20M  
CNC tokarski stroj Micron VCE 750

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu sažeto su prikazani postupci obrade odvajanjem čestica tokarenjem, glodanjem i okretnim glodanjem te glavna tema ovog rada, teorijska visina neravnina kod navedenih postupaka. Ukratko je objašnjen svaki postupak zasebno kako bi tema ovog rada bila što jasnija.

Usporedbom ova tri postupka obrada odvajanjem čestica jasno je da teorijska visina neravnina odstupa od one stvarne, kod sva tri postupka, kako kod korištenja alata sa radijusom rezne oštrice tako i bez radijusa rezne oštrice. Pokusima je pokazano da su odnosi između teorijske i stvarno izmjerene visine neravnina, kod glodanja sa radijusom rezne oštrice, veći kod manjih posmaka, a manji kod većih posmaka dok je kod postupaka tokarenja i okretnog glodanja situacija obrnuta. Povećavanjem posmaka prilikom okretnog glodanja i tokarenja, do neke određene veličine, ti odnosi su jako mali odnosno u nekom trenutku bi se i poklopili te bi tada teorijska i stvarna visina neravnina bila ista. No to ipak nije moguće jer imamo ograničenja kao što je snaga stroja, trošenje alata, ekonomičnost proizvodnje i mnogi drugi čimbenici.

Ovdje prikazani teoretski modeli odnosno izrazi mogu biti korišteni u svrhu predviđanja hrapavosti površine i usporedbe sa stvarno izmjerenom hrapavošću kako bi se mogla provesti daljnja istraživanja o ostalim utjecajima koji narušavaju kvalitetu obrađene površine.

Moguće je naći nekoliko primjena ovih teorijskih modela. Između ostalog neki od tih primjera mogu biti:

- Predviđanje i procjena hrapavosti u CAD/CAM modeliranju procesa obrade
- Izrada tablica i predložaka prema kojima bi se moglo približno odrediti kvaliteta površina za određeni proces obrade i sa određenim režimima obrade bez da se prije toga moraju provoditi stvarni pokus

**LITERATURA**

- [1] Škorić S.: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, Zagreb 2002.
- [2] Šavar Š.: Obrada odvajanjem čestica, 1. dio, Zagreb 1987.
- [3] [www.fsb.hr/kas/](http://www.fsb.hr/kas/) - obrada odvajanjem čestica
- [4] [www.advancedeng.co.uk](http://www.advancedeng.co.uk)
- [5] [www.okuma.de](http://www.okuma.de)
- [6] [www.fsb.hr/kas/](http://www.fsb.hr/kas/) - procesi obrade odvajanjem
- [7] [www.sandvikcoroment.com/hr](http://www.sandvikcoroment.com/hr)
- [8] [www.raynortoolsregrinding.co.uk/Tools-we-refurbish.htm](http://www.raynortoolsregrinding.co.uk/Tools-we-refurbish.htm)
- [9] [www.carbideinsert.net/wp-content/uploads/2010/06/carbide-turning-inserts3.jpg](http://www.carbideinsert.net/wp-content/uploads/2010/06/carbide-turning-inserts3.jpg)
- [10] [www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/metalworking\\_products\\_061/tech\\_d\\_6.pdf](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/metalworking_products_061/tech_d_6.pdf)
- [11] [wumrc.engin.umich.edu/shiha/jpapers/03\\_MST\\_surface\\_roughness.pdf](http://wumrc.engin.umich.edu/shiha/jpapers/03_MST_surface_roughness.pdf)
- [12] Vrandečić M.: Diplomski rad, Zagreb, 2000.