



## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

### Rekapitulacija

- Nastajanje i deformacija odvojene čestice.
- Koeficijenti deformacije:  $\theta_a$ ,  $\theta_b$  i  $\theta_l$ .
- Trokut brzina (hodogram brzina).
- 
- Srh
- 
- Relativno smicanje:
  - $\gamma_c = f(\Delta sh, \Delta x)$ ,
  - $\gamma_c = f(v_{sh}, v_{shN})$  i
  - $\gamma_c = f(\theta)$ .

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

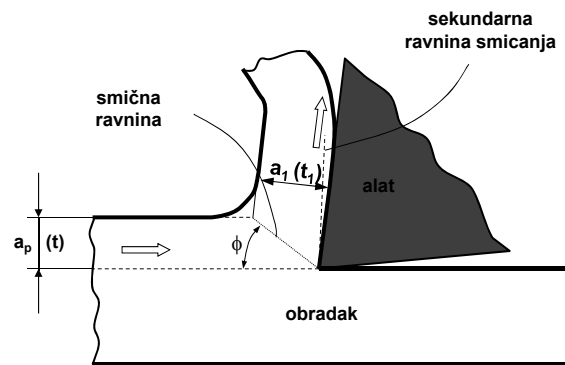
### Rekapitulacija

- **Nastajanje i deformacija odvojene čestice.**
  - Zone formiranja odvojene čestice
  - "Card model" - model elementarnih lamela i jedne smične ravnine
  - Ortogonalno rezanje - pretpostavke
- **Koeficijenti deformacije:  $\theta_a$ ,  $\theta_b$  i  $\theta_l$ .**
- **Trokut brzina (hodogram brzina).**
  - Usporedba brzina u zoni rezanja
- **Relativno smicanje i kut smične ravnine**

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM  
Teorija rezanja

Zone formiranja odvojene čestice

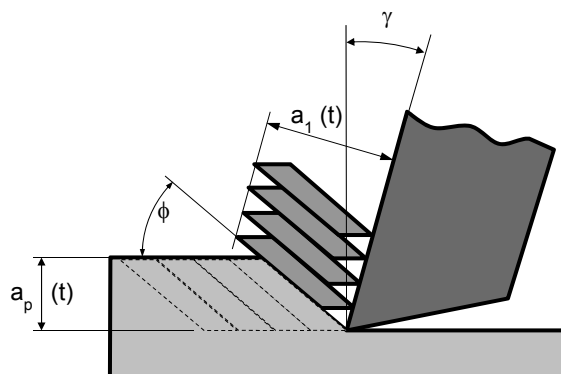


FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM  
Teorija rezanja

“Card model”

“Card model” - model elementarnih lamela i jedne smične ravnine



$a_p$  - dubina obrade  
(dubina rezanja,  
debljina obrade)

$a_1$  - debljina odvojene  
čestice

Često se umjesto oznaka

$a_p$  i  $a_1$ ,

u literaturi koriste oznake

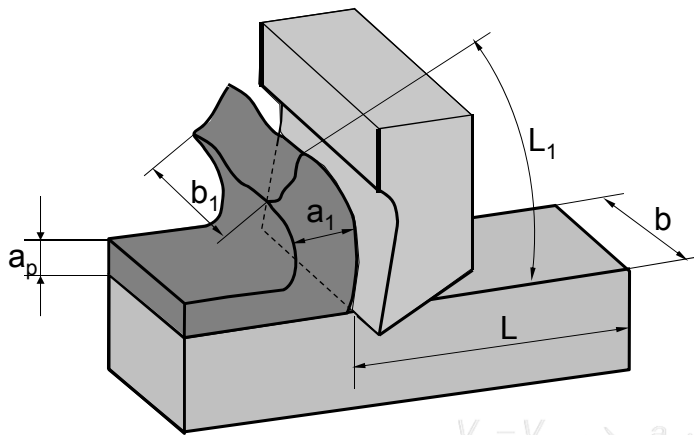
$t$  i  $t_1$

$t$  – debljina (thickness)

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
Teorija rezanja

**Koeficijenti deformacije**



$$\theta_a = \frac{a_1}{a_p}$$

$$\theta_b = \frac{b_1}{b} \approx 1$$

$$\theta_L = \frac{L}{L_1}$$

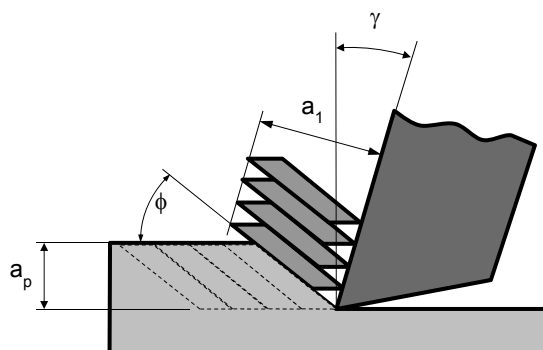
$$V_u = V_f \rightarrow a_p \cdot L \cdot b = a_1 \cdot L_1 \cdot b_1$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
Teorija rezanja

**Relativno smicanje**

**Relativno smicanje – mogućnosti definiranja**



U "card" modelu svaki element ima debljinu  $\Delta x$ , a po susjednom elementu se, tijekom formiranja čestice, "smakne" za pomak  $\Delta sh$ .

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Relativno smicanje – mogućnosti definiranja i krajnji izrazi

$$\text{a) } \gamma_c = f(\Delta sh, \Delta x) \quad \gamma_c = \frac{\Delta sh}{\Delta x} = ctg\phi + tg(\phi - \gamma)$$

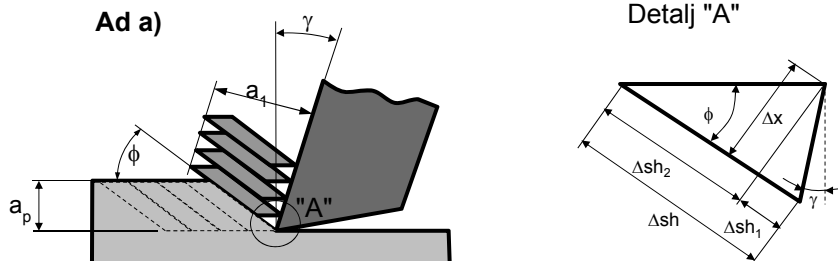
$$\text{b) } \gamma_c = f(v_{sh}, v_{shN}) \quad \gamma_c = \frac{v_{sh}}{v_{shN}} = \frac{\cos\gamma}{\cos(\phi - \gamma) \sin\phi}$$

$$\text{c) } \gamma_c = f(\theta) \quad \gamma_c = \frac{\theta^2 - 2\theta \sin\gamma + 1}{\theta \cos\gamma}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Relativno smicanje $\gamma_c = f(\Delta sh, \Delta x)$



$$\gamma_c = \frac{\Delta sh}{\Delta x} = \frac{\Delta sh_1 + \Delta sh_2}{\Delta x} = \frac{\Delta x tg(\phi - \gamma) + \Delta x ctg\phi}{\Delta x} = tg(\phi - \gamma) + ctg\phi$$

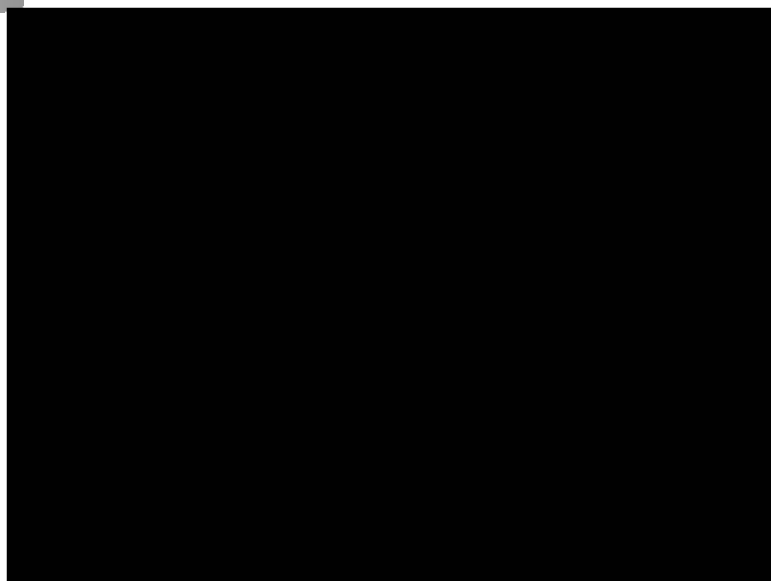
$$\frac{d\gamma_c}{d\phi} = 0 \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
Teorija rezanja      Formiranje čestice,  $\theta$



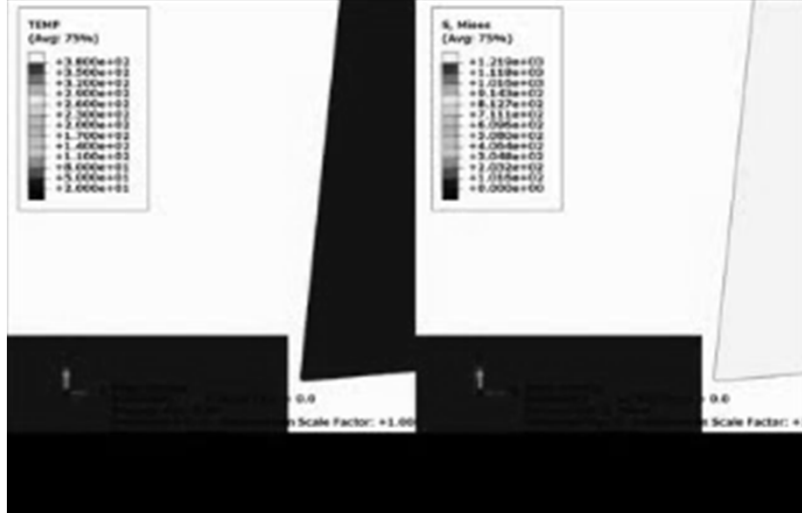
**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
Teorija rezanja      Čestica kod VBO (SME – prezentacija)



# POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

## Teorija rezanja

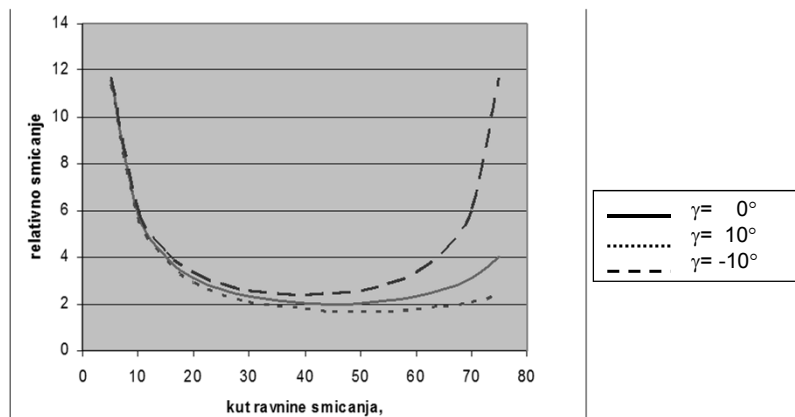
### Ortogonalno rezanje - ABAQUS



# POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

## Teorija rezanja

### Relativno smicanje



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

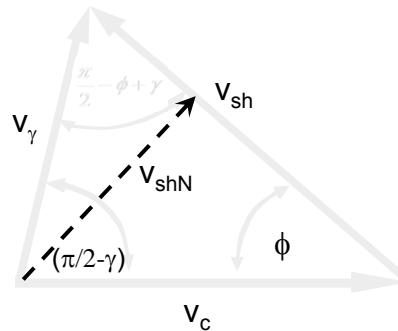
Relativno smicanje  $\gamma_c = f(v_{sh}, v_{shN})$

Ad b)

$$\gamma_c = \frac{v_{sh}}{v_{shN}} = \frac{v_c \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)}}{v_c \sin \phi}$$

$$\gamma_c = \frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma)}$$

$$\frac{d\gamma_c}{d\phi} = 0 \Rightarrow \phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}$$



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

Relativno smicanje  $\gamma_c = f(\theta)$

Ad c)

Uvrštavanjem  $\theta = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi} = \frac{\cos \gamma}{\text{tg} \phi} + \sin \gamma$  u  $\gamma_c = \frac{v_{sh}}{v_{shN}} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma) \sin \phi}$

dobije se:  $\gamma_c = \frac{\cos \gamma}{\theta \sin^2 \phi}$

Uvrštavanjem  $\sin \phi = \frac{\text{tg} \phi}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \phi}}$  i  $\text{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{\theta - \sin \gamma}$  dobije se

$$\gamma_c = \frac{\cos \gamma [(\theta - \sin \gamma)^2 + \cos^2 \gamma]}{\theta \cos^2 \gamma}, \text{ te konačno } \gamma_c = \frac{\theta^2 - 2\theta \sin \gamma + 1}{\theta \cos \gamma}$$

Uz  $\frac{d\gamma_c}{d\theta} = 0 \Rightarrow \theta = 1$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Relativno smicanje - komentari

Iz  $\gamma_c = \operatorname{ctg}\phi + \operatorname{tg}(\phi - \gamma)$  slijedi da veći kut  $\gamma$  znači manje relativno smicanje. Za kut prednje površine alata  $\gamma=0^\circ$ , najmanje relativno smicanje iznosi,  $\gamma_c=2$ .

Za slučajeve kada se relativno smicanje izražava preko omjera geometrijskih veličina smicanja ( $\Delta sh$  i  $\Delta x$ ) ili odgovarajućih brzina ( $v_{sh}$  i  $v_{shN}$ ), najmanje relativno smicanje se dobije kada je ravnina smicanja postavljena kao simetrala između prednje površine alata i pravca relativnog gibanja, tj.  $\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}$ .

U slučaju kada se relativno smicanje izražava preko koeficijenta deformacije ( $\theta$ ), najmanje relativno smicanje se dobije kada je  $\theta = 1$ , a to je opet samo onda kada je ravnina smicanja postavljena kao simetrala između prednje površine alata i pravca relativnog gibanja, odnosno kada je  $a_1=a_p$ .

Kod kuta prednje površine alata  $\gamma=0^\circ$ , najmanje relativno smicanje iznosi,  $\gamma_c=2$ .

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Predavanja 2008/2009

### Brzina deformacije u smičnoj zoni, $v_{def}$

$$v_{def} = \frac{\gamma_c}{t_{def}}$$

Uvrštavanjem izraza za relativno smicanje  $\gamma_c = \frac{\Delta sh}{\Delta x}$

$$v_{def} = \frac{\frac{\Delta sh}{\Delta x}}{t_{def}} = \frac{\Delta sh}{t_{def} \cdot \Delta x} = v_{sh} \cdot \frac{1}{\Delta x}$$

$v_{def}$  - "upućuje na lokalizaciju" deformacije

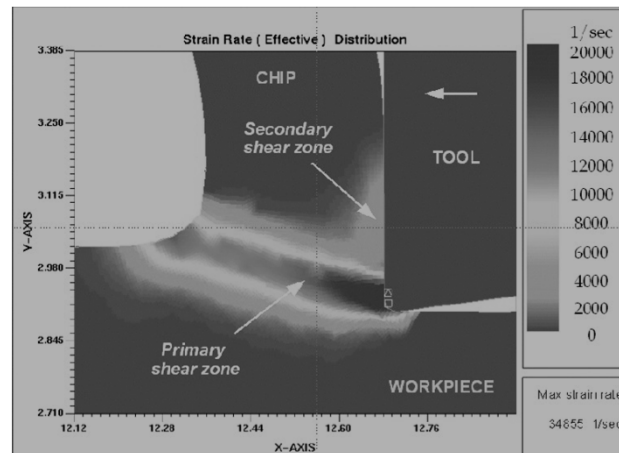
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Predavanja 2008/2009

#### Brzina deformacije u smičnoj zoni, $v_{def}$



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

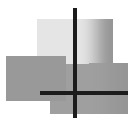
## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

#### Formiranje čestice – drugi pristupi

Prikazani izrazi vezani za formiranje i deformaciju odvojene čestice zasnivaju se na modelu koji formiranje čestice objašnjava smicanjem u jednoj smičnoj ravnini. Obzirom da se rezultati eksperimenata nisu baš podudarali s modelskim vijednostima, te da postoji više teorijskih (fizikalnih) nejasnoća, razvijen je i niz drugačijih pristupa. Pristup s jednom smičnom ravninom je svakako najčešći i najjednostavniji.

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

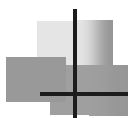
---

#### **Formiranje čestice – pristupi**

##### **Mogući pristupi (metode):**

- **Analitički**
- **Numerički (modeliranje)**
- **Eksperimentalni**

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

---

#### **Formiranje čestice – pristupi**

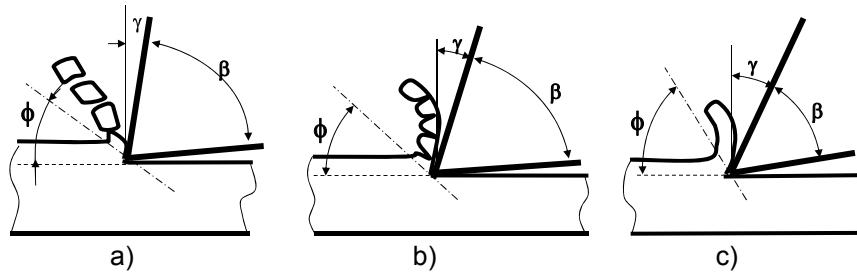
##### **Simulacija obrade na razini atoma:**

1. Obrada na nano razini neželjeznih materijala (Al, Cu) i materijala poznate orijentacije kristalne rešetke i poluvodičkih materijala kao što je silicij
2. Djelovanje parametara procesa (kao što su kut prednje površine, polumjer vrha alata, dubina obrade) na sile rezanja, omjere među silama i specifičnu energiju
3. “Kosa” obrada.

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblici odvojene čestice

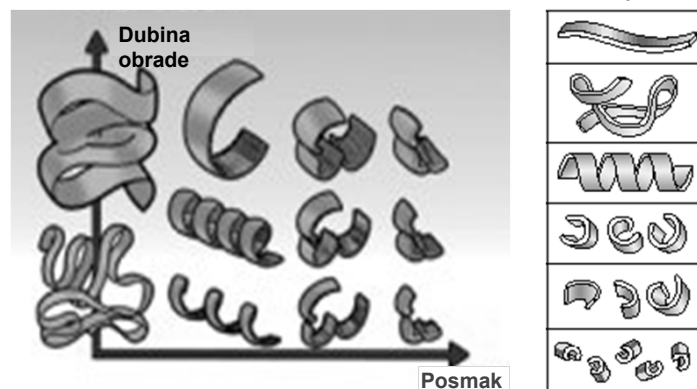


- a) - lomljena (elementarna) odvojena čestica
- b) - nasječena (lamelarna) odvojena čestica (više lamela zajedno)
- c) - tekuća (kontinuirana) odvojena čestica

FSB, Proizvodno strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblik odvojene čestice – ovisnost o $a_p$ i $f$

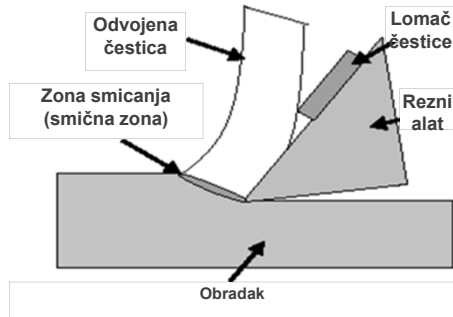


Utjecaj vitkosti odvojene čestice - omjer dubine i posmaka,  $a_p / f$ , na oblik odvojene čestice

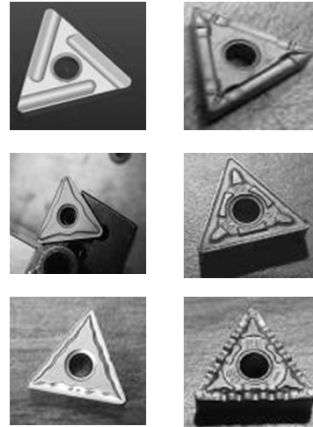
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Oblici odvojene čestice – vanjski i integrirani lomači**



vanjski lomači

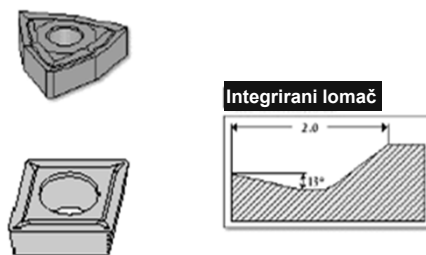


integrirani lomači

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Oblik odvojene čestice – integrirani lomač**



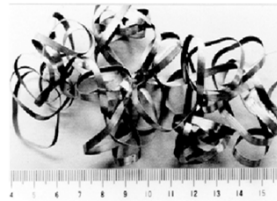
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblik odvojene čestice – foto prikaz



a) Lomljena i segmentirana  
(nekontinuirana)

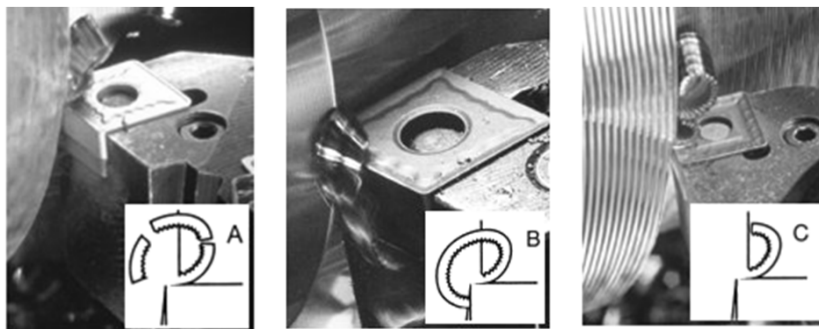


b) Kontinuirana

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

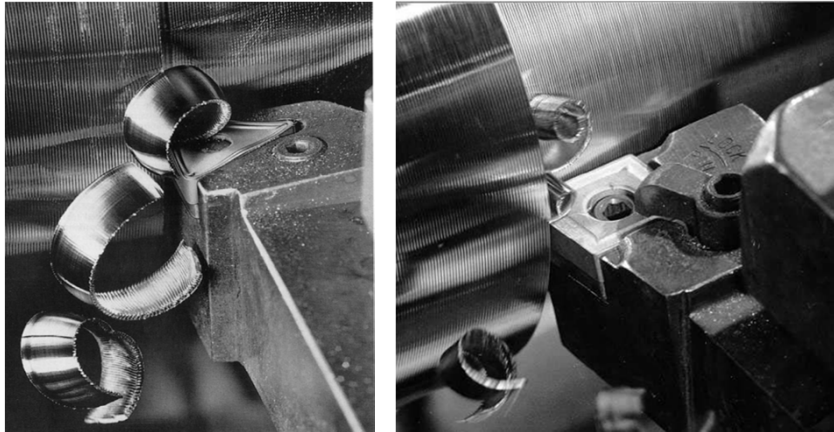
### Metode lomljenja odvojene čestice



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Metode lomljenja odvojene čestice



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblici odvojene čestice – način loma i izgled o.č.

Od tri načina loma odvojene čestice (samo-lom, lom na prednjoj površini alata, lom na obratku) preferira se samo-lom ("self-breaking").

Koji su nedostaci drugih načina loma odvojene čestice ?

Vizualna procjena odvojene čestice

Izgled odvojene čestice je izvrstan izvor podataka o procesu obrade, stanju alata i obrađenoj površini. Pri procjeni se u obzir uzimaju oblik, duljina i boja odvojene čestice.

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

---

#### Odvojene čestice kod glodanja



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

---

#### Oblici odvojene čestice – utjecajni parametri

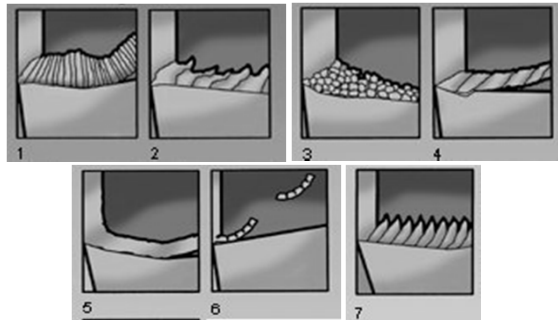
Sam proces formiranja o.č. odvija se u smičnoj zoni (ravnini) koja predstavlja razdjelnicu između deformiranog i nedeformiranog dijela obratka. Elementi koji značajno utječu na taj dio procesa formiranja o.č. su:

- materijal obratka,
- parametri obrade, a posebno dubina i posmak, te njihov omjer (važan je i utjecaj brzine rezanja, ali veći utjecaj na odabir brzine rezanja imaju drugi kriteriji)
- geometrija alata (postavni kut, polumjer vrha alata, kut prednje površine, kut nadvišenja, "reljef" prednje površine)
- geometrija obratka
- SHIP

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblici odvojene čestice – SANDVIK



#### SANDVIK

1. Kontinuirana, duga odvojena čestica karakteristična za većinu čelika
2. Lamelarna čestica nastaje kod većine nehrđajućih čelika
3. Kratka čestica nastaje kod obrade većine vrsta lijevanog željeza
4. Promjenjiva, teško lomljiva čestica, karakteristična za super-legure
5. "Mekana", lako lomljiva, kontinuirana čestica (Al i slični materijali)
6. Čestica koja nastaje kod visokih tem. i tlak. (karakteristika otvrdnutih mat.)
7. Segmentirana odvojena čestica nastaje pri obradi titana

1. Čelik

2. Brzorezni čelik

3. Čelici lijev

4. Super legure

5. Aluminij

6. Vatrootporni materijali

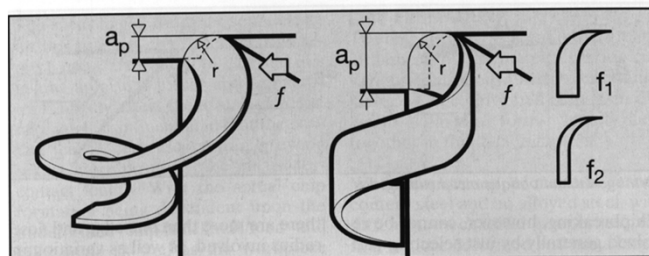
7. Titan

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Oblik odvojene čestice

- Utjecaj omjera polumjera vrha alata i dubine obrade,  $r_g/a_p$ , na uvijanje i lom o.č.



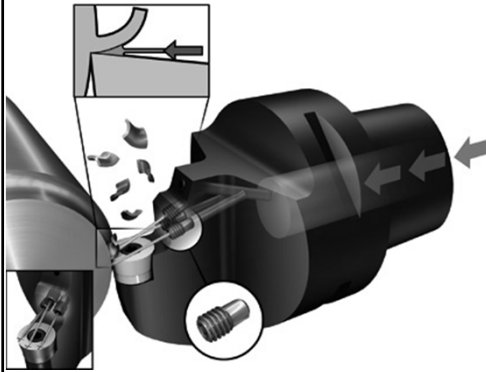
- Utjecaj omjera dubine obrade i posmaka, vitkost čestice:  
 $g = a_p/f$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Utjecaj na oblik odvojene čestice



Tokarenje uz visoki tlak SHIP-a omogućuje bolje formiranje čestice. Učinkovit je kod svih materijala kod kojih se javljaju „problemi” kod formiranja čestice.

Karakteristike visokotlačnog hlađenja (HPC-High Pressure Cooling):

- $p \leq 100$  bar;
- omogućene potrebne M funkcije;
- količina SHIP-a 20 l/min (za „prosječne” operacije tokarenja);
- kod primjene bušenja svrdlima većeg promjera 40-80 l/min

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

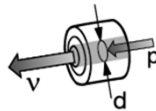
### Utjecaj na oblik odvojene čestice



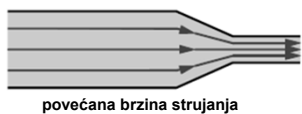
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Utjecaj na oblik odvojene čestice



$v$  – protok u m<sup>3</sup>/s  
 $c_0$  – koeficijent protoka mlaznice  
 80% za 20 – 300 bar  
 70% za 300 – 1000 bar  
 $d$  - promjer mlaznice, m  
 $p$  - tlak, Pa (1 bar= 0,1 Mpa)  
 $\rho$ - gustoća (1000 kg/m<sup>3</sup>)  
 $n$  - broj mlaznica



$$v = c_0 n \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$$

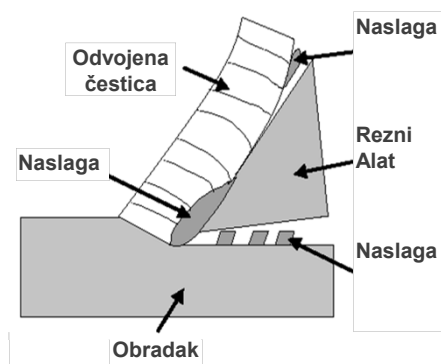
promjer mlaznice 1 mm (najčešći raspon 0,6 – 1,4 mm)  
 tlak 80 bara (za većinu materijala)  
 protok  $\geq 20$  l/min  
 (za svaku mlaznicu promjera 1 mm, potrebno je min 5 l/min)

za svrdla promjera $\leq 12$ mm	$\geq 16$ l/min
za svrdla promjera 12 – 40 mm	$\geq 30$ l/min
za svrdla i glodala s izmjenjivim pločicama promjera $\geq 40$ mm i	$\geq 50$ l/min

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

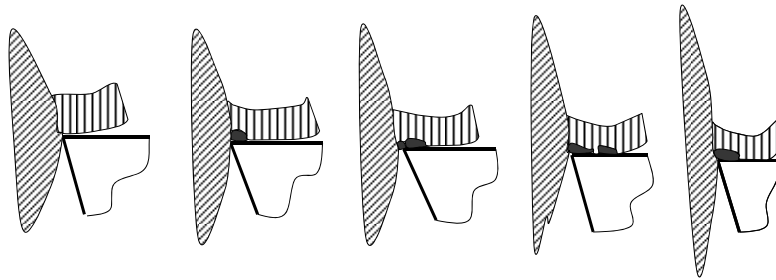
### Naslaga (naljepak) na prednjoj površini alata - BUE



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Naslaga – BUE – faze nastajanja**

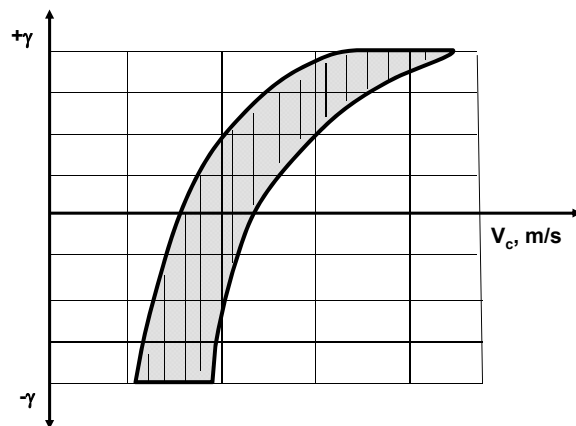


Formiranje i kidanje naljepka

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Naslaga – BUE – područje formiranja**



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

#### Filmovi:

**formiranje čestice**

**formiranje naljepka (BUE)**

(mapa: formiranje čestice)

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

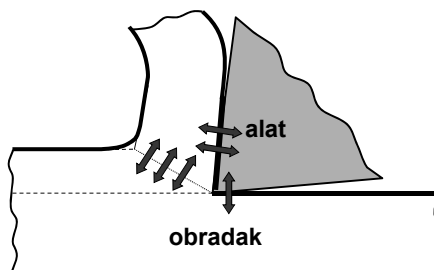
## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

#### Toplinske pojave kod procesa obrade odvajanjem

Uz pretpostavku da nema gubitaka

$$Q = F \cdot v \cdot t$$



Glavni izvori topline:

- $Q_d$ , deformacija i
- $Q_{tr}$ , trenje na prednjoj i  
trenje na stražnjoj površini alata

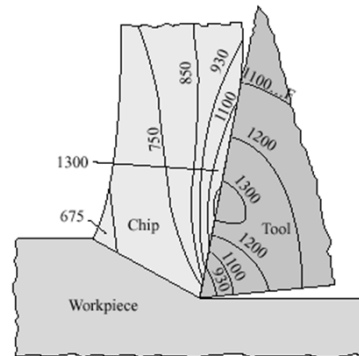
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Toplinske pojave kod procesa obrade odvajanjem

Razmatranja:

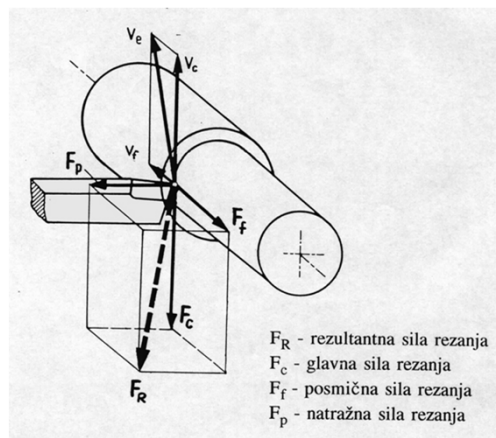
- SHIP
- utjecaj brzine (vrsta SHIP-a, temperatura, tlak SHIP-a, ...)
- distribucija temperatura
- Ekologija - Dry machining



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – koso rezanje



$$\vec{F}_R = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p$$

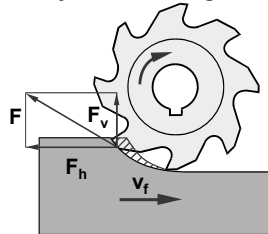
$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

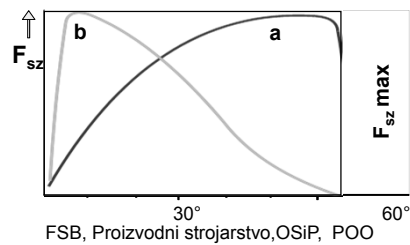
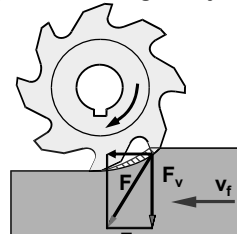
## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – glodanje

Protusmjerno obodno glodanje



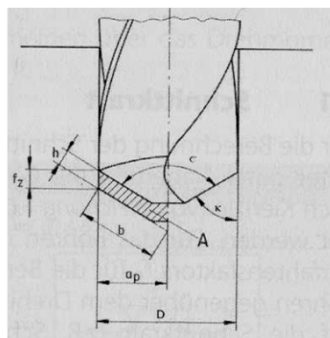
Istosmjerno obodno glodanje



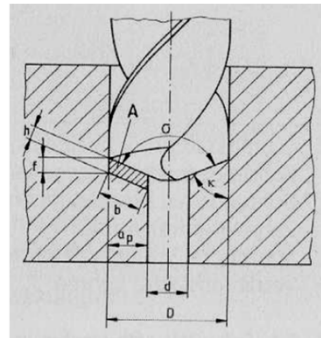
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja –bušenje



$$a_p = \frac{D}{2}; \quad f_z = \frac{f}{2}; \quad A = \frac{D \cdot f_z}{2} = \frac{D \cdot f}{4}$$

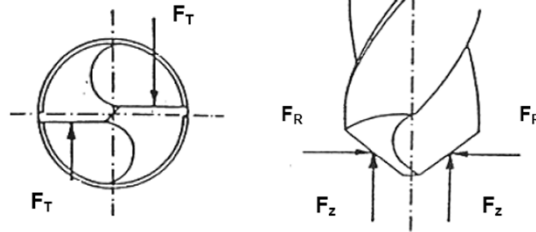


$$a_p = \frac{D-d}{2}; \quad f_z = \frac{f}{2}; \quad A = \frac{(D-d) \cdot f_z}{2}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Sile rezanja –bušenje**

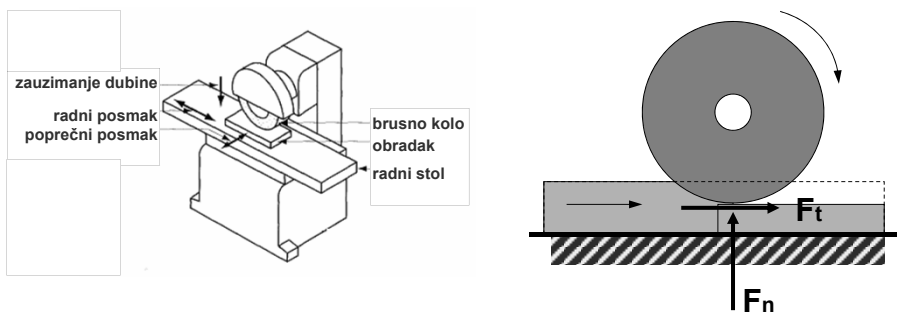


$$a_p = \frac{D}{2}; f_z = \frac{f}{2}; A = \frac{D \cdot f_z}{2} = \frac{D \cdot f}{4} \quad a_p = \frac{D-d}{2}; f_z = \frac{f}{2}; A = \frac{(D-d) \cdot f_z}{2}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

**POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM**  
**Teorija rezanja**

**Sile rezanja –brušenje**



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

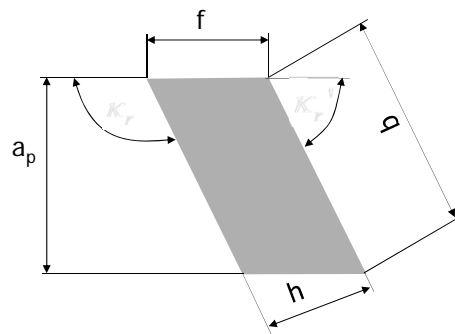
$$k_c = \frac{F_c}{A} \neq konst.$$

Nema jedinstvene specifične sile ovisne o materijalu obratka, već se ona, pored ostaloga, mijenja i s parametrima obrade.

$$A = a_p \cdot f = b \cdot h$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r}; \quad h = f \cdot \sin \kappa_r$$

- b – širina nedeformiranog sloja;  
(nedeformirane čestice)
- h – debljina nedeformiranog sloja;  
(nedeformirane čestice)

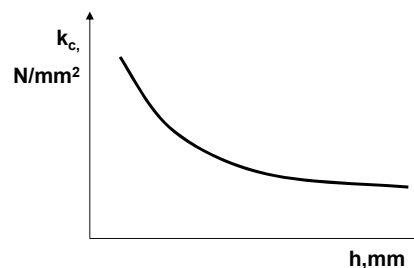


FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

$$k_c = \frac{F_c}{A} \neq konst.$$

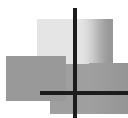


$$k_c = \frac{k_{c1x1}}{h^m}$$

- $k_{c1x1}$  - specifična glavna sila (dobije se pri  $b=h=1$  mm)
- $k_{f1x1}$  - specifična posmična sila (dobije se pri  $b=h=1$  mm)
- $k_{p1x1}$  - specifična pasivna sila (dobije se pri  $b=h=1$  mm)

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO





## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

$$k_c = \frac{F_c}{\Lambda} \neq konst.$$

Nema jedinstvene specifične sile ovisne o materijalu obratka, već se ona, pored ostaloga, mijenja i s paramterima obrade

Najčešće se primjenjuje Kienzle-ov model izračuna sila rezanja:

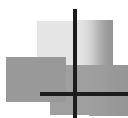
$$F_c = k_{c1x1} \cdot b \cdot h^{1-z} \quad k_{c1x1} - \text{specifična glavna sila (dobije se pri } b=h=1 \text{ mm)}$$

$$F_f = k_{f1x1} \cdot b \cdot h^{1-x} \quad k_{f1x1} - \text{specifična posmična sila (dobije se pri } b=h=1 \text{ mm)}$$

$$F_p = k_{p1x1} \cdot b \cdot h^{1-y} \quad k_{p1x1} - \text{specifična pasivna sila (dobije se pri } b=h=1 \text{ mm)}$$

$\left. \begin{array}{l} 1-z \\ 1-y \\ 1-x \end{array} \right\}$  - eksponenti ovisni o materijalu obratka

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



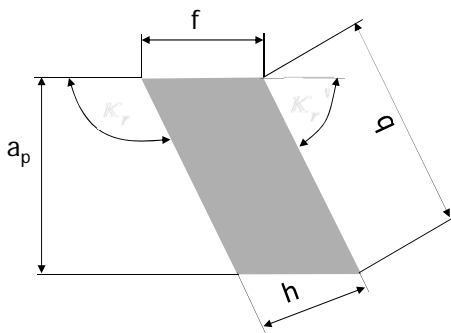
## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

$$F_x = k_{x1x1} \cdot b \cdot h^{1-z} \quad k_{x1x1} - \text{specifična (glavna, posmična ili natražna) sila (pri } b=h=1 \text{ mm)}$$

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r}; \quad h = f \cdot \sin \kappa_r$$

Utjecaj kuta namještanja,  $\kappa_r$ , na sile rezanja (omjer i iznos) pri istom presjeku obrade.



FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

Pored specifične sile, presjeka i debljine odvojene čestice, na sile rezanja utječu i drugi faktori što se kvantificira koeficijentima (faktorima utjecaja), a među njima su najvažniji:

$$F_c = A_0 k_{c1} k_v k_y k_w k_t$$

$$F_c = A_0 k_c, \text{ gdje } k_c = k_{c1} k_y k_v k_w k_t$$

$k_v$ - faktor utjecaja brzine rezanja

$k_y$ - faktor utjecaja kuta prednje površine

$k_w$ - faktor utjecaja trošenja

$k_t$ - faktor utjecaja materijala reznog alata

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja – Kienzle-ov model

#### Određivanje utjecajnog faktora brzine rezanja, $k_v$ :

Za  $v_c > 80$  m/min, utjecaj brzine je vrlo mali pa se najčešće zanemaruje ( $k_v = 1$ ).

Ako se pak mora računati, tada se za raspon  $80 < v_c < 250$ , koristi sljedeći izraz:

$$k_v = 1,03 - \frac{3 \cdot v_c}{10^4} \quad 1,02 > k_v > 0,955 \quad (\text{za } 80 < v_c < 250 \text{ m/min})$$

$$\text{Pri } v_c = 100 \text{ m/min} \quad k_v = 1$$

Ako je raspon brzina  $30 < v_c < 50$ ,  $k_v = 1,15$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

#### Sile rezanja – Kienzle-ov model

Primjer određivanja utjecajnog faktora za kut prednje površine alata,  $k_\gamma$ :

$$k_\gamma = \frac{C - 1.5\gamma}{100}$$

*C je konstanta koja ovisi o materijalu obratka, na primjer:*

za čelike:  $C = 109$

Za ljevove:  $C = 103$

Ako  $\gamma \uparrow \Rightarrow k_\gamma \downarrow$   
(veći kut prednje površine  $\rightarrow$  manja sila rezanja)

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM

### Teorija rezanja

#### Sile rezanja – Kienzle-ov model

Određivanje utjecajnog faktora trošenja alata,  $k_w$ :

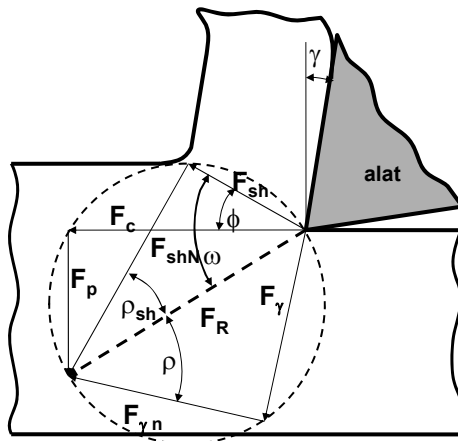
*Utjecaj trošenja alata na sile rezanja opisuje se koeficijentom  $k_w$  koji se uglavnom kreće u rasponu 1,3-1,5.*

*(Iznos koeficijenta  $k_w$  ovisi o vrsti trošenja, sili rezanja, materijalu alata, geometriji alata, fazi i vrsti obrade i td.)*

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Sile rezanja - Merchant



$$I) \vec{F}_R = \vec{F}_c + \vec{F}_p$$

$F_c$  - glavna sila rezanja

$F_p$  - pasivna (natražna) sila

$$II) \vec{F}_R = \vec{F}_\gamma + \vec{F}_{\gamma N}$$

$F_\gamma$  - tangencijalna sila na p.p.a.

$F_{\gamma N}$  - normalna sila na p.p.a.

$$III) \vec{F}_R = \vec{F}_{sh} + \vec{F}_{shN}$$

$F_{sh}$  - tang. sila u ravni smicanja

$F_{shN}$  - norm. sila u ravni smicanja

p.p.a. - prednja površina alata

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADJE ODVAJANJEM Teorija rezanja

### Koeficijenti trenja

$$\mu = \operatorname{tg} \rho = \frac{F_\gamma}{F_{\gamma N}}$$

- koeficijent trenja na prednjoj površini alata

$$\mu_{sh} = \operatorname{tg} \rho_{sh} = \frac{F_{sh}}{F_{shN}}$$

- koeficijent trenja u ravni smicanja

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

### Koeficijenti trenja

$\mu$  - koeficijent trenja na prednjoj površini alata

$$\mu = \operatorname{tg} \rho = \frac{F_Y}{F_{YN}}$$

$$F_Y = F_C \sin \gamma + F_P \cos \gamma \quad F_{YN} = F_C \cos \gamma - F_P \sin \gamma$$

$$\mu = \frac{F_Y}{F_{YN}} = \frac{F_C \sin \gamma + F_P \cos \gamma}{F_C \cos \gamma - F_P \sin \gamma}$$

$$\mu = \frac{F_C \operatorname{tg} \gamma + F_P}{F_C - F_P \operatorname{tg} \gamma}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

### Koeficijenti trenja

$\mu_{sh}$  - koeficijent trenja u ravnini smicanja

$$\mu_{sh} = \operatorname{tg} \rho_{sh} = \frac{F_{sh}}{F_{shN}}$$

$$F_{sh} = F_C \cos \phi - F_P \sin \phi \quad F_{shN} = F_C \sin \phi + F_P \cos \phi$$

$$\mu_{sh} = \frac{F_{sh}}{F_{shN}} = \frac{F_C \cos \phi - F_P \sin \phi}{F_C \sin \phi + F_P \cos \phi}$$

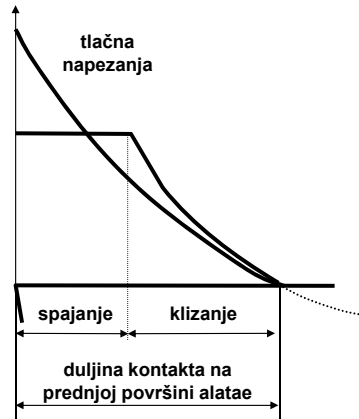
$$\mu_{sh} = \frac{F_C - F_P \operatorname{tg} \phi}{F_C \operatorname{tg} \phi + F_P}$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

Predavanja 2008/2009

### Naprezanja na prednjoj površini alata



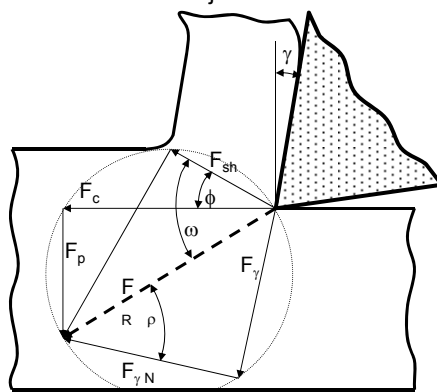
FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO

## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

Teorija rezanja

### Kut smične ravnine - Merchant

Određivanje kuta smične ravnine pomoću sila rezanja



#### HIPOTEZA

U uvjetima kada nema vanjskih ograničenja (to je jedna od pretpostavki ortogonalnog rezanja), smična ravnina će se postaviti tako da potrebna smična sila bude najmanja (minimum utrošenog rada).

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

### Kut smične ravnine - Merchant

$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}} \quad - \text{tangencijalna naprezanja u smičnoj ravnini}$$

$$F_{sh} = F_R \cdot \cos \omega \quad - \text{sila smicanja izražena pomoću rezultantne sile i kuta među njima}$$

$$\omega = \phi + (\rho - \gamma)$$

$$A_{sh} = \frac{a_p \cdot b}{\sin \phi} = \frac{A}{\sin \phi} \quad - \text{površina presjeka u ravnini smicanja}$$

$$\tau_{sh} = \frac{F_R \cdot \cos[\phi + (\rho - \gamma)]}{\frac{A}{\sin \phi}} = \frac{F_R}{A} \cdot \cos[\phi + (\rho - \gamma)] \cdot \sin \phi$$

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO



## POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM Teorija rezanja

---

### Kut smične ravnine - Merchant

$$\frac{d\tau_{sh}}{d\phi} = \frac{F_R}{A} \cdot \{-\sin[\phi + (\rho - \gamma)] \cdot \sin \phi + \cos[\phi + (\rho - \gamma)] \cdot \cos \phi\}$$

$$\frac{d\tau_{sh}}{d\phi} = 0 \Rightarrow \frac{F_R}{A} \cdot \cos[2\phi + (\rho - \gamma)] = 0$$

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho}{2}$$

**KOMENTAR !!!**

FSB, Proizvodni strojarstvo, OSiP, POO