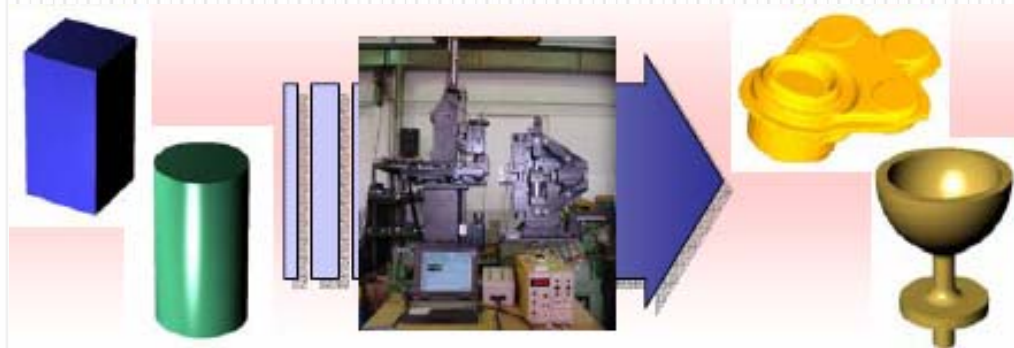


# *NAPREDNE METODE TEHNOLOGIJE PLASTIČNOG DEFORMISANJA*

dr Mladomir Milutinović, vanredni profesor  
dr Marko Vilotić, docent



# Inkrementalno (parcijalno) deformisanje

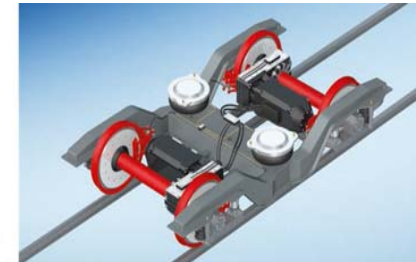
- **Inkrementalno deformisanje** - jedan od najstarijih vidova obrade metala
- Inkrementalno deformisanje predstavlja vid obrade pri kojem se finalni deo dobija/oblikuje **sukcesivnim parcijalnim delovanjem alata na obradak**.
- Industrijska revolucija – masovna proizvodnja, razvoj mašina → inkrementalno deformisanje gubi na značaju i opstaje u okviru zanatstva
- Početak XXI veka – ubrzani razvoj novih postupaka inkrementalnog deformisanja i primena u industriji



prošlost



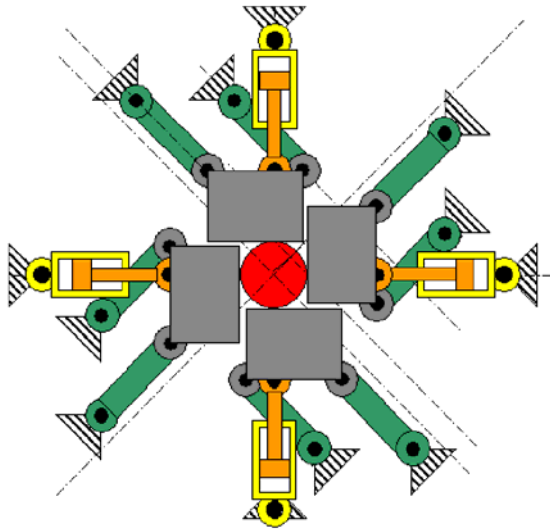
sadašnjost



# Inkrementalno deformisanje

Podela procesa inkrementalnog deformisanja:

1. Zapreminsko inkrementalno deformisanje
2. Inkrementalno deformisanje lima



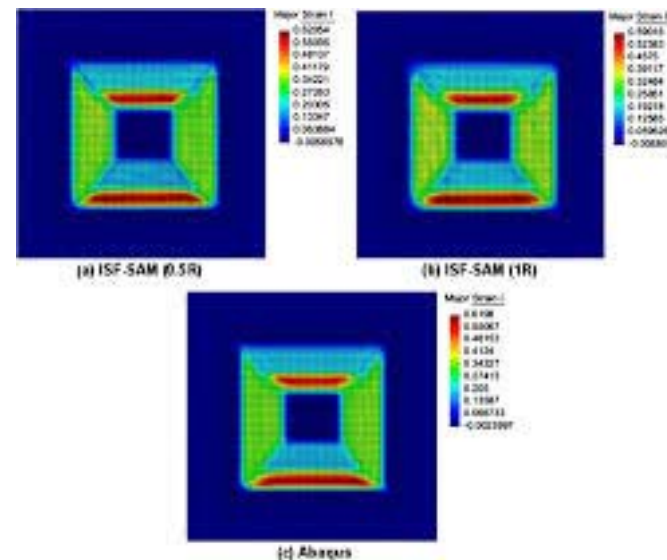
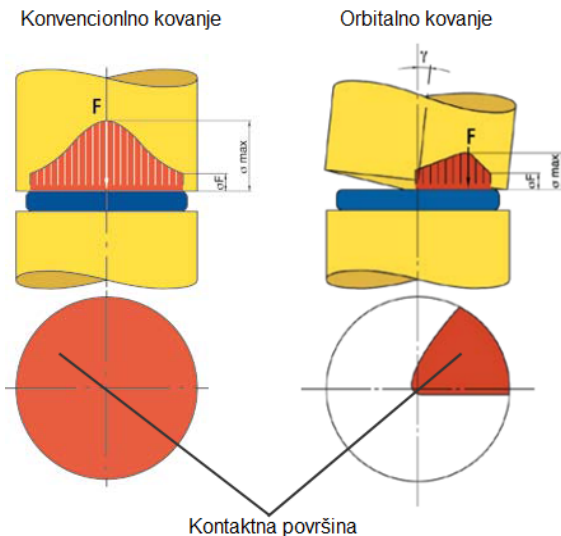
Kriterijumi (da bi neki process bio inkrementalno):

1. Proces oblikovanja izvodi se kroz ciklično opterećenje i rasterećenje radnog predmeta pri čemu se materijal višestruko deformiše;
2. Postupak se realizuje samo sa jednim setom alata;
3. Finalni oblik dobija se u okviru samo jedne faze/operacije.

# Inkrementalno deformisanje

Karakteristike procesa inkrementalnog deformisanja:

- tečenje materijala je ograničeno na vrlo usku oblast trenutnog kontakta alata i obratka, koja je višestruko manja nego kod konvencionalne obrade (obrada sa kompletnim zahvatom alata).
- aktivna zona plastičnog deformisanja okružena je regionima u kojima se materijal nalazi u elastičnom stanju, a njeno kretanje (premeštanje) po zapremini obratka može se odvijati kontinualno ili diskontinualno.
- proces deformisanja kod većine postupaka inkrementalnog oblikovanja nije stacionaran pri čemu je gradijent promene naponsko-deformacionog stanja po zapremini obratka veoma izražen.

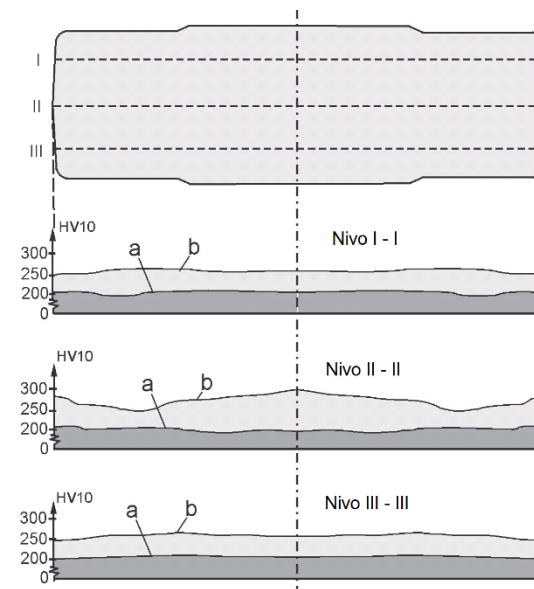
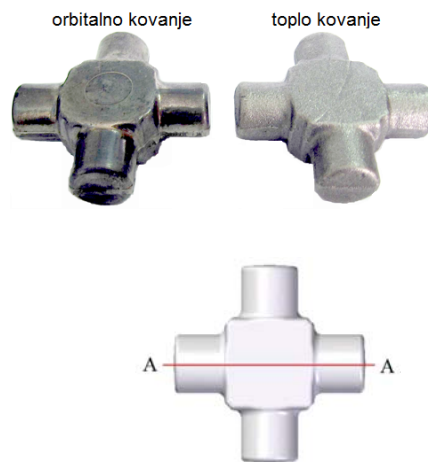
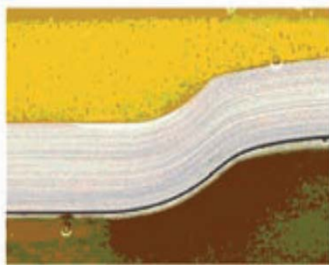
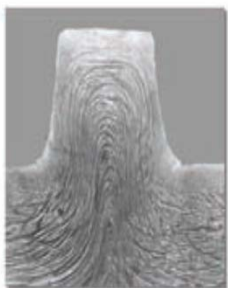
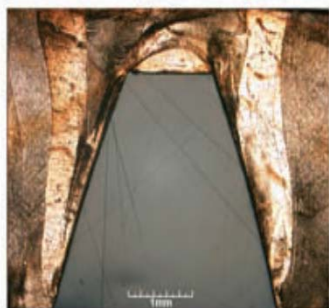
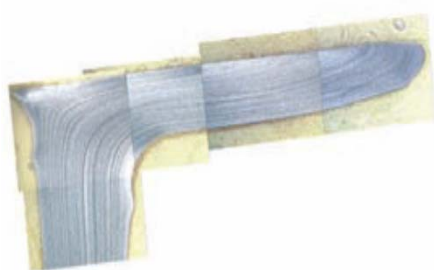




# Inkrementalno deformisanje

	Ekonomske prednosti i nedostaci	Tehnološke prednosti i nedostaci
Prednosti (+)	<ul style="list-style-type: none"> <li>visoka fleksibilnost procesa (geometrija procesa se dobija direktno iz CAD modela, univerzalni alati, brza i jednostavna promena oblika i dimenzija dela)</li> <li>modelovanje procesa pomoću CAD softvera</li> <li>manja potrošnja sredstva za podmazivanje</li> <li>mala investiciona ulaganja (univerzalni i jeftini alati, korišćenje postojeće opreme)</li> <li> smanjenje ukupnih troškova proizvodnje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>veličina obratka je ograničena samo radnim prostorom mašine na kojoj se realizuje proces obrade</li> <li>veća deformabilnost materijala</li> <li>mogućnost oblikovanja teško deformabilnih materijala</li> <li>manja deformaciona sila</li> <li>manje trenje, opterećenje i habanje alata</li> <li>mašine manjih gabarita i male energetske potrošnje</li> <li>mogu se obrađivati (dorađivati) prethodno deformisani delovi</li> <li>nivo buke je redukovan</li> <li>veće deformaciono ojačavanje proizvedenih delova</li> <li>NSF I NNSF tačnost (kod određenih postupaka zapreminskog oblikovanja)</li> <li>poboljšanje mehaničkih karakteristika</li> </ul>
Nedostaci (-)	<ul style="list-style-type: none"> <li>mala proizvodnost (posledica male lokalizovane zone deformisanja koja uslovljava duže kretanje alata, odnosno duže vreme obrade)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativno nizak kvalitet obrađenih površina i manja tačnost dimenzija (kod određenih postupaka obrade lima)</li> <li>za oblikovanje delova sa pravim uglom (90°) mora se primeniti obrada sa više zahvata</li> <li>smanjenje debljine lima</li> <li>visoka lokalna opterećenja alata</li> <li>kompleksna kontrola procesa</li> </ul>

# Inkrementalno deformisanje

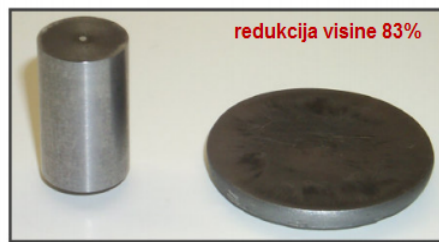


*Distribucija tvrdoće kod kardanskog krsta dobijenog toplim (a) i orbitalnim kovanjem (b)*

*Mikrostruktura delova dobijenih različitim postupcima zapreminskog inkrementalnog deformisanja*



slobodno sabijanje



orbitalno kovanje

*Granične deformacije valjka pri klasičnom (slobodnom) sabijanju i inkrementalnom deformisanju (orbitalno kovanje)*



*Ozubljeni elementi klase tačnosti IT5*

# Inkrementalno deformisanje

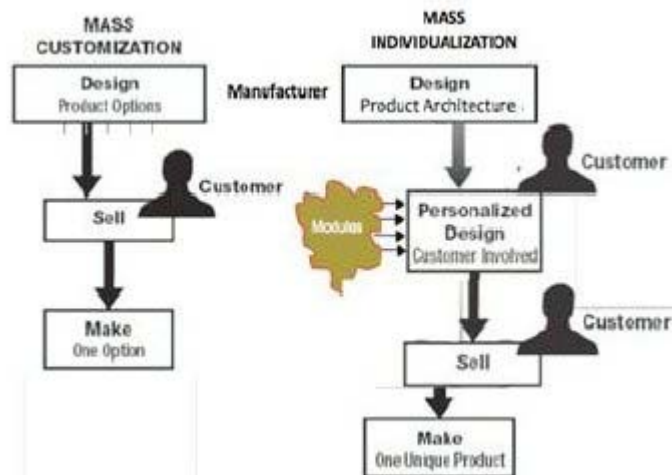
*Faktori razvoja inovativnih postupaka inkrementalnog deformisanja:*

Tržišni faktori:

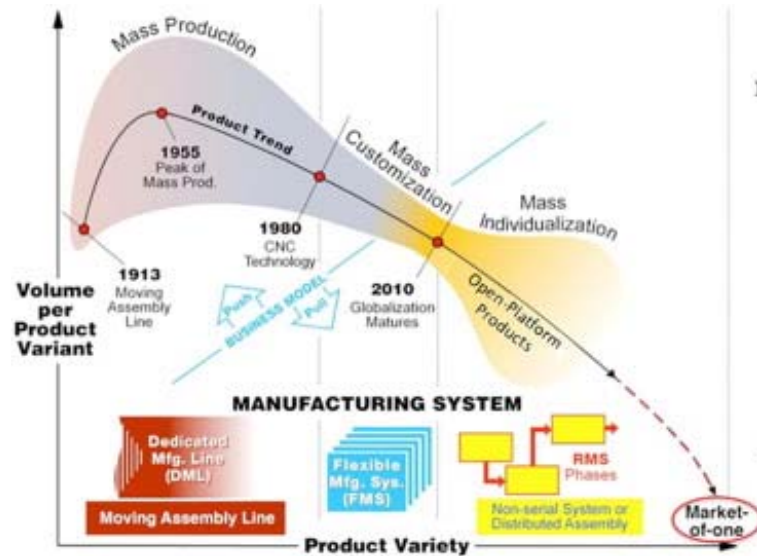
- Individualizacija proizvoda
- Povećanje kompleksnosti (geometrije) proizvoda
- Zahtevi ka fleksibilnoj proizvodnji (pojedinačna i maloserijska proizvodnja)
- Skraćenje vremena pojave na tržištu (time to market)
- Snižavanje troškova proizvodnje (ekonomski faktori)
- Smanjenje potrošnje energije po jedinici proizvoda
- Ekološki faktori

Tehnički faktori:

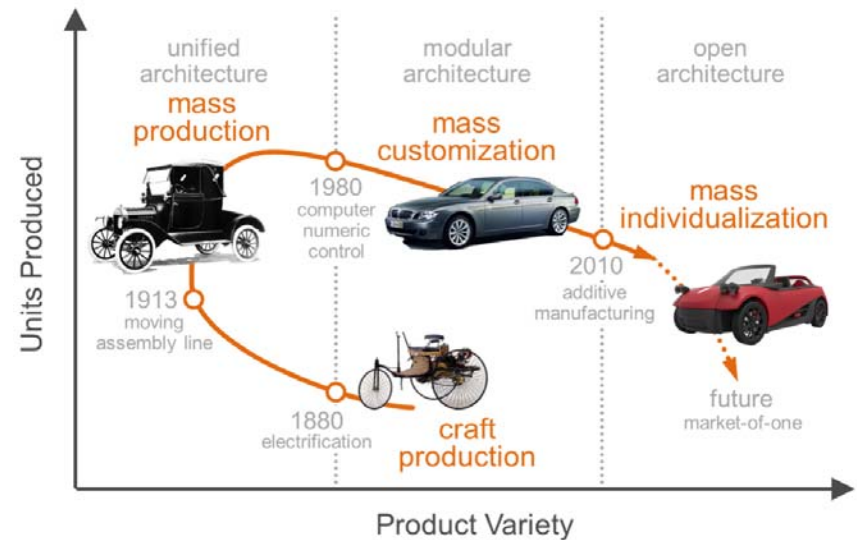
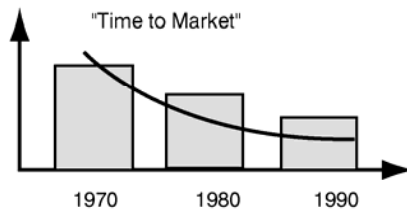
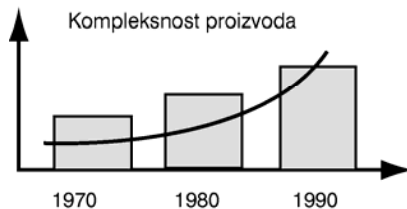
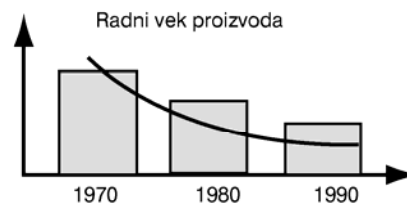
- Razvoj kompjuterske tehnike
- Razvoj CNC mašina i sistema za monitoring/kontrolu procesa proizvodnje
- Razvoj sofisticiranih numeričkih modela (CEA - computer added engineering)



# Nove paradigme u proizvodnji

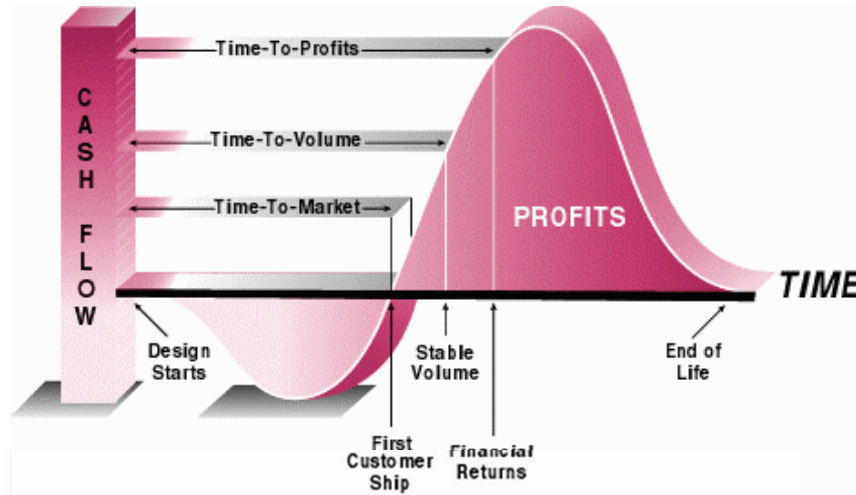


Manufacturing Paradigm	Mass Production	Mass Customization	Mass Individualization
Principal Goal	Low Cost	Product Variety	Low-Cost, Unique Product
Product Type	Common Product	Product Family	Unique Product
System Architecture	Serial Dedicated Line	FMS	Modified RMS Architecture
Technological Enablers	Moving Assembly Line	CNC	Additive Manufacturing Industry 4.0





# Nove paradigme u proizvodnji



## Reducing time to market to :

*save money*

1

Optimizing efficiency in production processes helps to cut down on cycle time. Refinement and removal of ineffective steps saves money spent on labor, equipment and utilities

*benefit from high margins*

2

Manufacturers and retailers benefit from high margins on niche markets due to their ability to apply premium prices

3

*increase sales volume*

By reducing time to market, product life cycle is longer. Overall profits are greater and ROI higher

*lead competition*

4

The faster companies get on the market, the more likely they are to set up a long term relationship with customer and be seen as a bearer





# Zapreminsko inkrementalno deformisanje

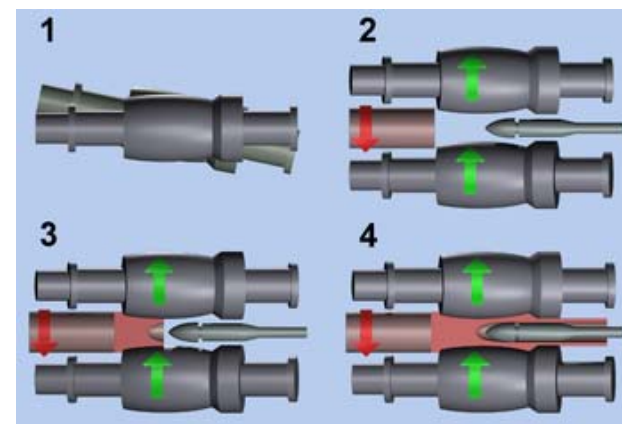
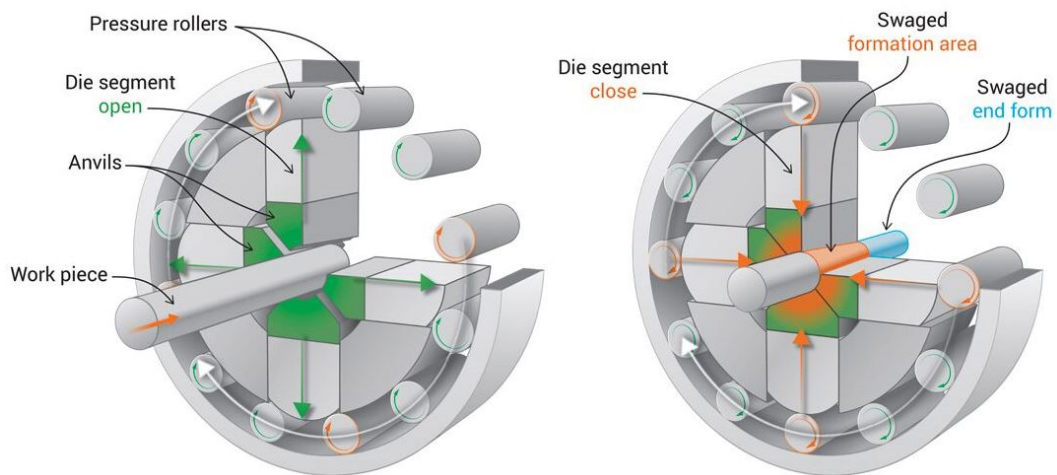
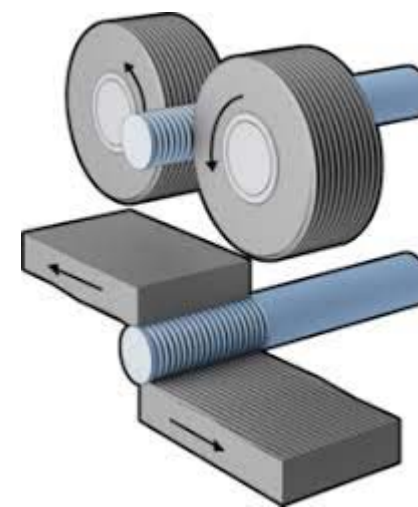
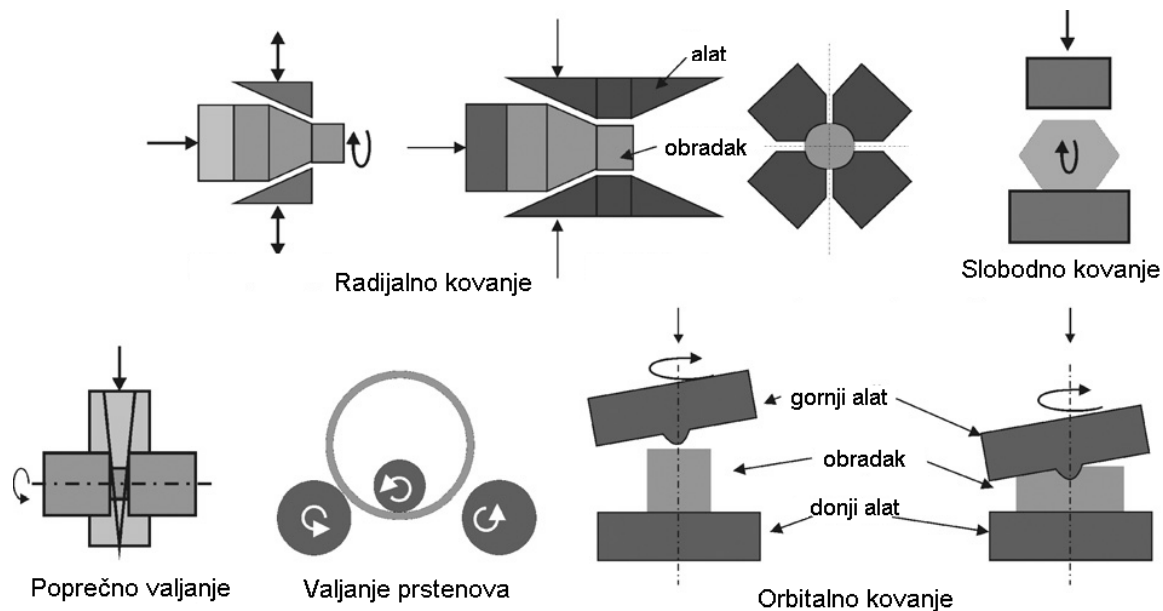
Glavni parametri procesa koji definišu i povezuju različite postupke zapreminskog inkrementalnog deformisanja su:

- ***naponsko stanje u obratku:*** jednoosni pritisak, dvoosni pritisak, jednoosni pritisak+jednoosno zatezanje, dvoosni pritisak+jednoosno zatezanje, troosni pritisak
- ***vremenski interval deformacije:*** kontinualni i diskretni/periodični procesi
- ***oblik priprema:*** prizmatični, izduženi (šipke i profili) i prstenasti
- ***kinematika alata i obratka:*** translatorno (zavisno/nezavisno kretanje alata-obratka), rotaciono (rotira samo alat, rotira samo obradak, rotiraju i alat i obradak) i kombinovano (alat rotacija+translacija, obradak rotira)

Najvažniji i danas najzastupljeniji postupci zapreminskog inkrementalnog deformisanja su:

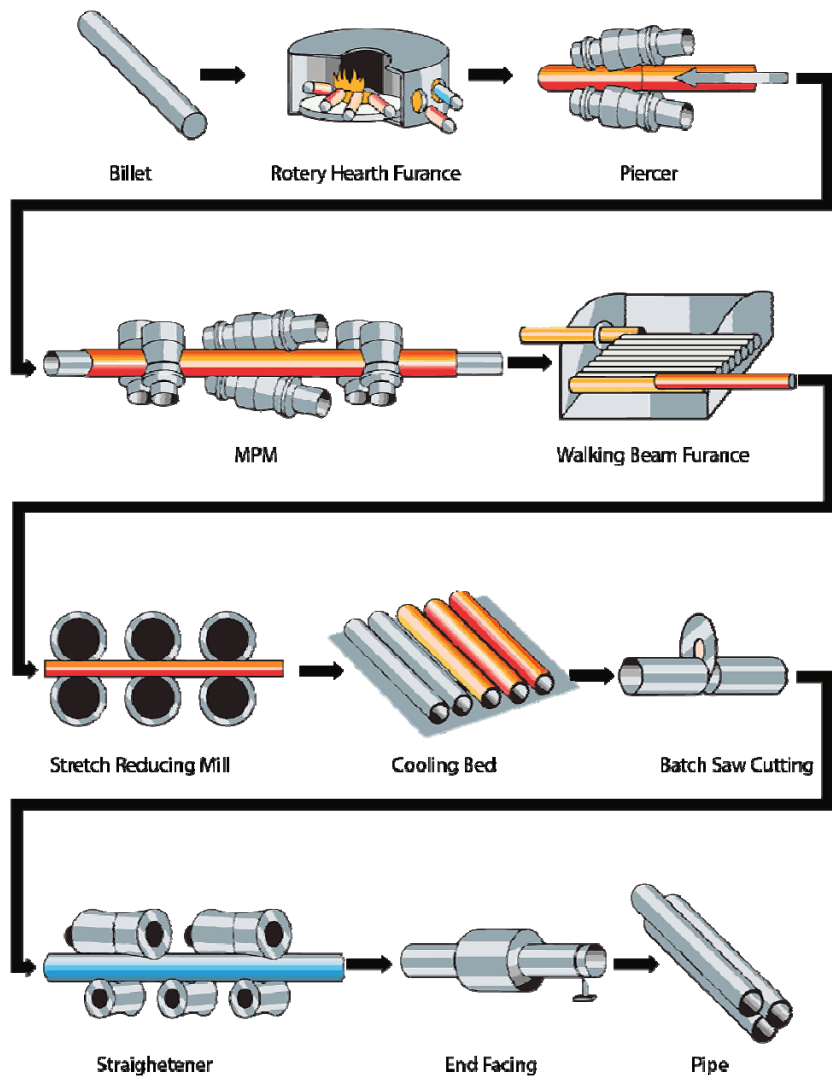
- slobodno kovanje (free upsetting)
- valjanje prstenastih elemenata (ring rolling)
- radijalno kovanje (swaging or radial forging)
- orbitalno kovanje (orbital forging)
- uzdužno i poprečno valjanje (longitudinal and cross wedge rolling)
- aksijalno-radijalno oblikovanje valjcima (radial – axial rolling)
- valjanje zupčanika (gear rolling) itd.

# Zapreminsko inkrementalno deformisanje

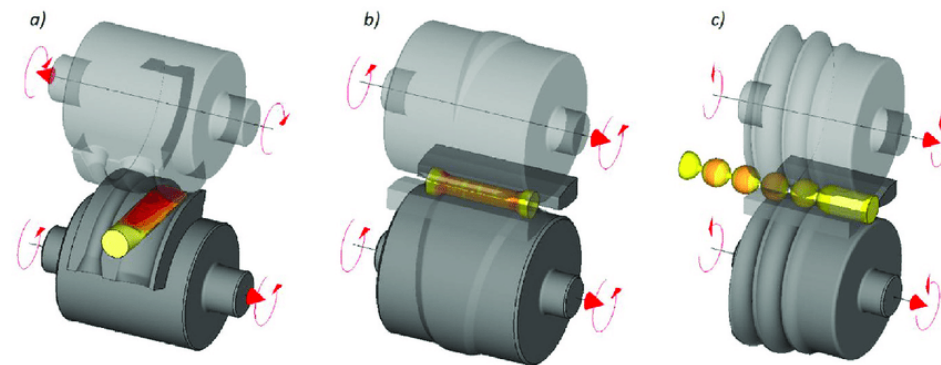


Rotary piercing  
(rotaciono probijanje)

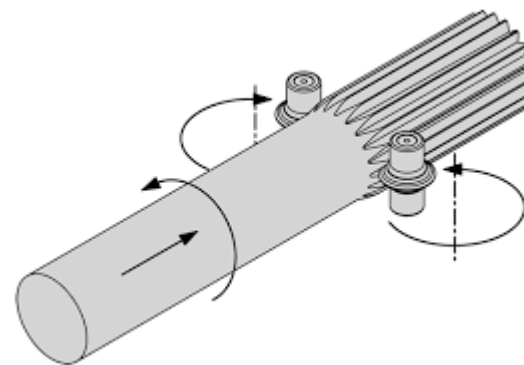
# Zapreminsko inkrementalno deformisanje



izrada bešavnih cevi



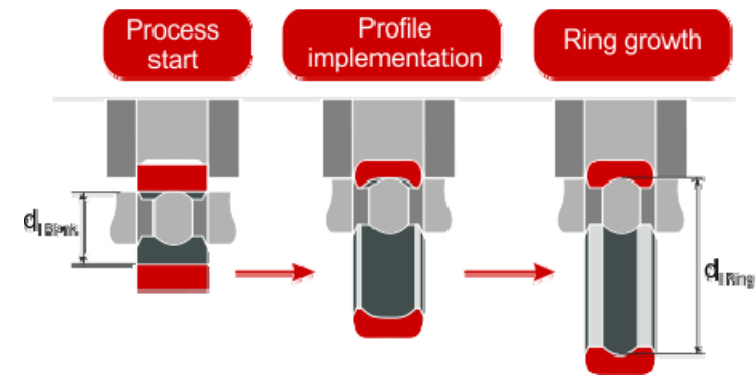
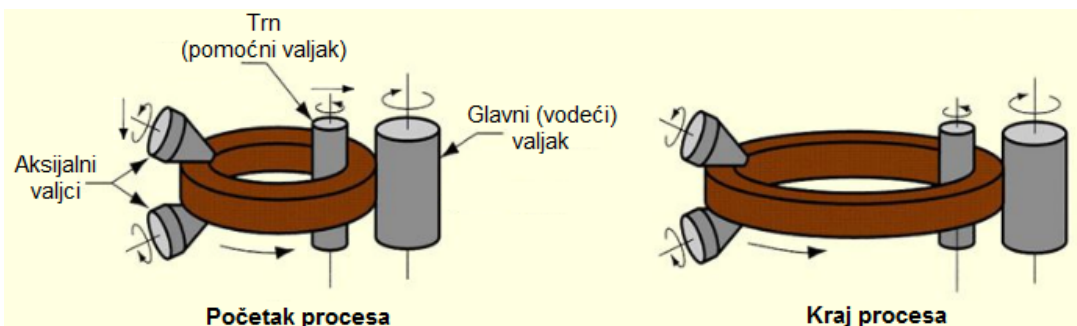
uzdužno i poprečno valjanje  
(longitudinal and cross wedge rolling)



valjanje ozubljenih elemenata  
(Grob postupak)

# Valjanje prstenastih elemenata

- Valjanje prstenastih elemenata spada u kontinualne procese inkrementalnog deformisanja, kod koga se pomoću sistema valjaka (ravnih ili profilisanih) oblikuje pripremak oblika šupljeg debelozidnog cilindra na način da se njegov prečnik povećava uz istovremeno smanjenje debljine (poprečnog preseka) zida



- Valjci mogu imati različite konfiguracije u prostoru i pojedinačno izvoditi različita kretanja (rotaciju, translaciju, ili oba kretanja istovremeno)
- Veoma fleksibilan postupak u pogledu mogućih geometrija finalnog dela
- Mehanizam deformisanja je veoma složen
- Dvoosni ili troosni pritisak – dobra obradivost materijala
- Čelik (od ugljeničnog do visokolegiranog), laki i obojeni metali, titanijumove legure, i drugi teže deformabilni materijali.
- Topla i hladna obrada
- Radialno i radialno-aksijalno valjanje (prstenova)*

# Valjanje prstenastih elemenata

Nastanak - vezuje se za sredinu 19 veka (1842) kada je britanski inženjer Bodmer konstruisao prvu mašinu za valjanje prstenova u cilju proizvodnje vagonskih točkova.

## **Karakteristike:**

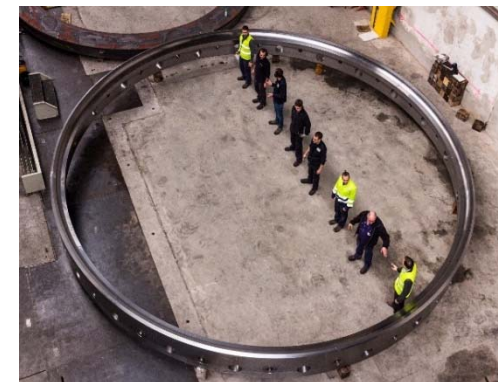
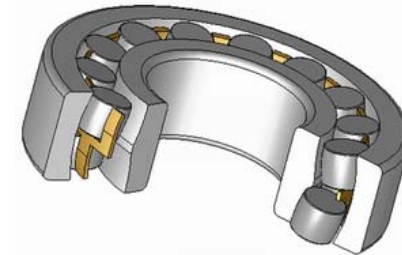
- ❑ dobre mehaničke karakteristike,
- ❑ visoka tačnost dimenzija i kvalitet površina,
- ❑ visok stepen iskorišćenja materijala i
- ❑ druge tehno-ekonomskim prednosti

## **Oblast primene:**

- prstenovi kotrljajnih ležaja
- prstenasti elementi kućišta (reaktori, rakete, silosi...)
- prirubnice i sl. elementi
- točkovi za šinska i druga vozila i dr.

## **Dimenzije:**

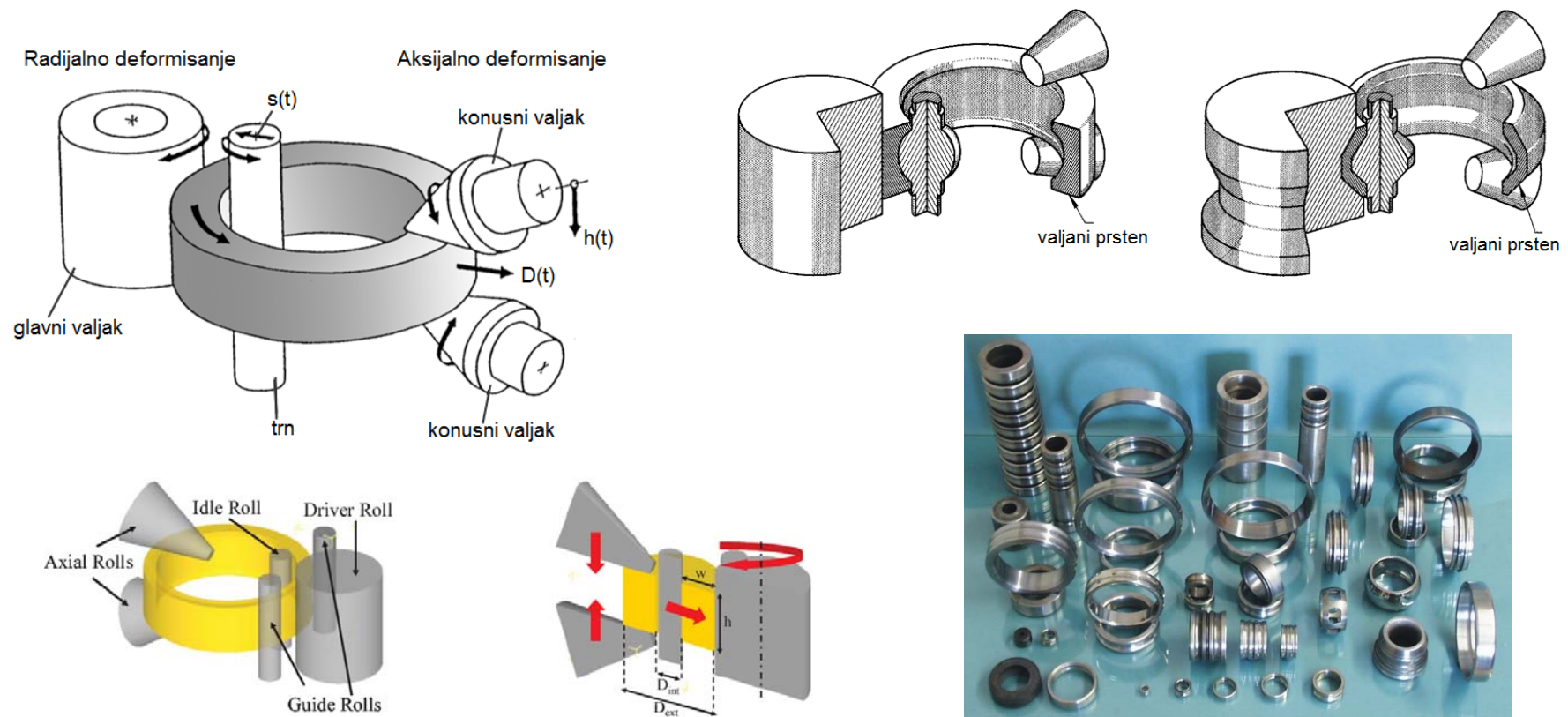
- aksijalna visina: od 20 do 1 500 mm,
- prečnik: od par desetina milimetara do nekoliko metara
- masa: veća od 10 tona.





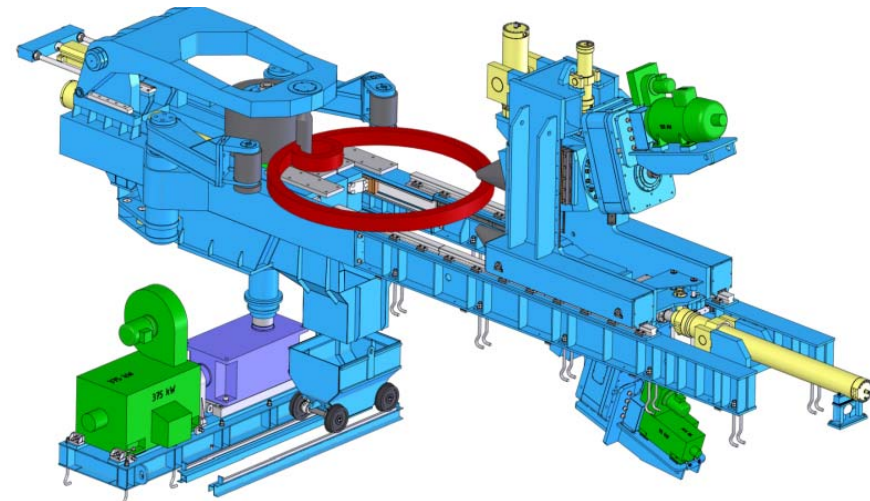
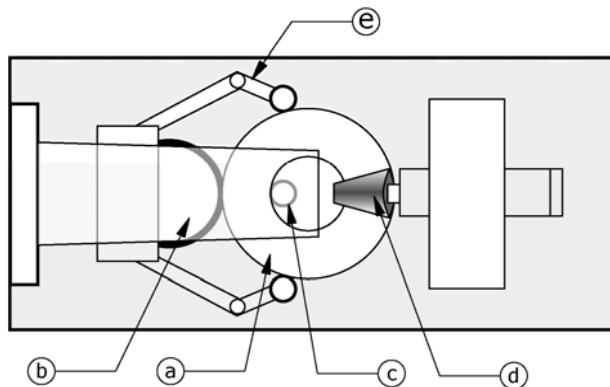
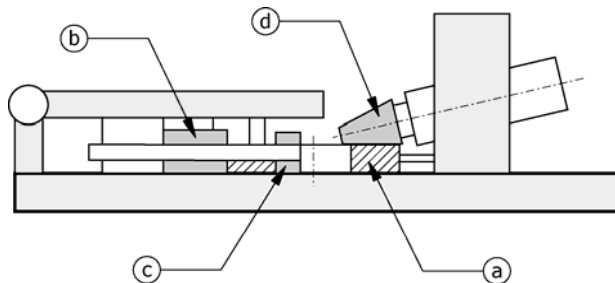
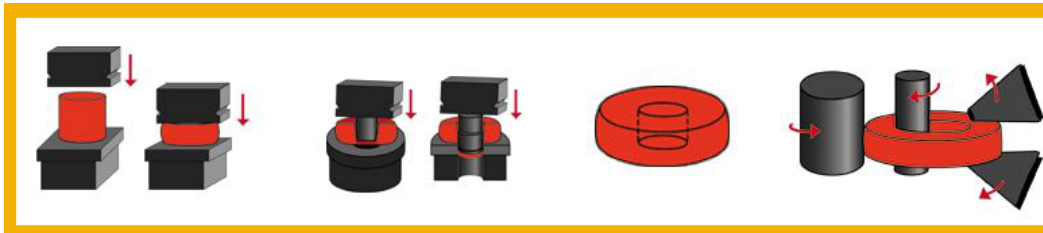
# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova

- Široka lepeza prstenova i prstenastih elemenata počev od najjednostavnijeg (pravougaonog) poprečnog preseka (npr. prsten za ležajeve), pa sve do veoma složenih poprečnih preseka kao što je profil točka vagona.
- Postupak je primenjiv kako za izradu prstenova oblika diska (debelozidi prsten kod koga je debljina zida  $s$  višestruko veća od njegove visine  $h$ ), tako i za prstenove oblika čaure (tankozidi prsten gde je  $h \gg s$ )

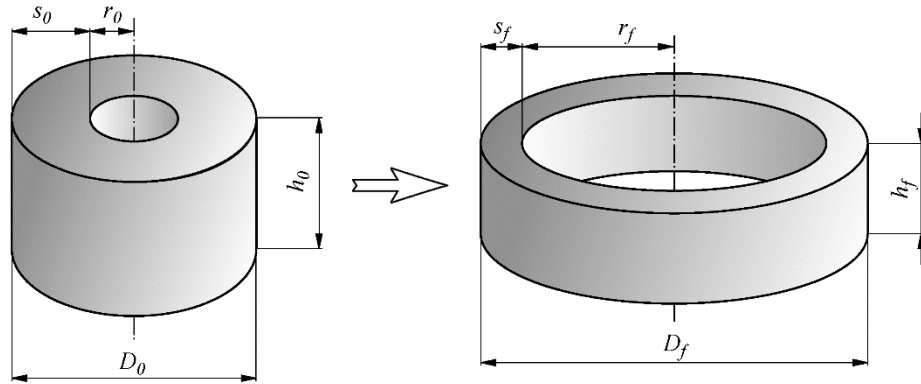


# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova

- Radijalno-aksijalno valjanje najčešće se izvodi na horizontalnim mašinama dok se u slučaju manjih delova koriste i mašine vertikalne izvedbe.
- Pripremak – polufabrikat oblika šipke ili cevi



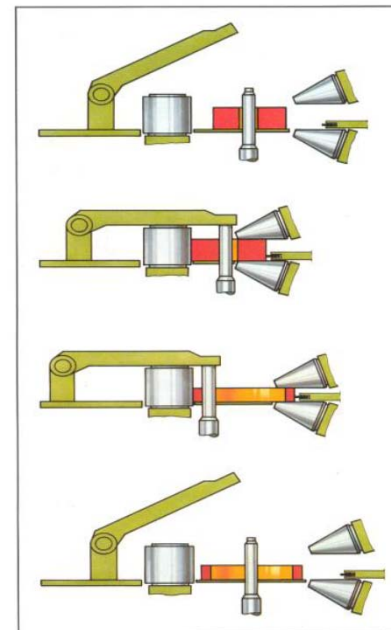
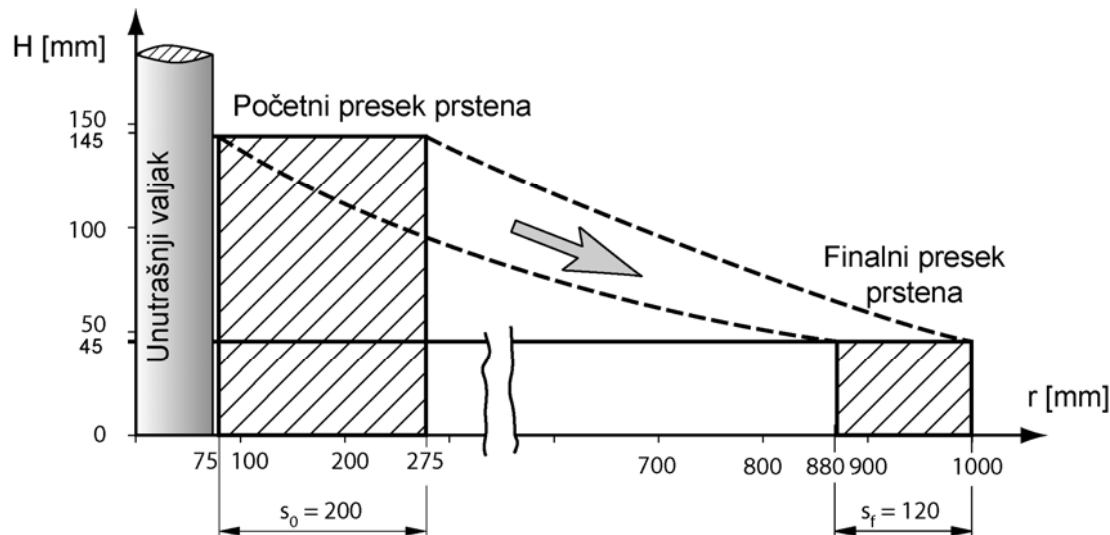
# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (dimenzije pripreмка)



$$\pi s_0 h_0 (s_0 + 2r_0) = \pi s_f h_f (s_f + 2r_f)$$

Odnos deformacija:

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_h} \approx 0,6 \quad \frac{s_0 - s_f}{s_0} = 0,6 \frac{h_0 - h_f}{h_0}$$



# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (uslov valjanja)

Da bi proces valjanja mogao da se odvija treba da bude ispunjen uslov valjanja

$$\mu > \operatorname{tg} \alpha$$

$\mu$  - koeficijent trenja  
 $\alpha$  - ugao zahvata alata

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{R_a - \Delta h_1}{R_a} \right)$$

$$\alpha_2 = \arccos \left( \frac{r_a - \Delta h_2}{r_a} \right)$$

$\Delta h_1$  - smanjenje debljine materijala na strani velikog valjka  
 $\Delta h_2$  - smanjenje debljine materijala na strani velikog valjka

$$\Delta h_1 = \frac{r_a}{R_a + r_a} \Delta h$$

$$\Delta h_2 = \Delta h - \Delta h_1$$

**Broj obrtaja radnog predmeta**

$$n_p = \frac{R_a n_v}{r_s}$$

$r_s$  - spoljni poluprečnik prstena ( $r_o \leq r_s \leq r_f$ )  
 $n_v$  - broj obrtaja pogonskog valjka

**Vreme obrade**

$$t = \frac{k}{n_v}$$

$$k = \frac{\Delta s}{\Delta h}$$

$\Delta s$  - ukupna redukcija debljine zida prstena  
 $\Delta h$  - aksijalni pomak po jednom obrtaju pogonskog valjka

# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (kinematika procesa)

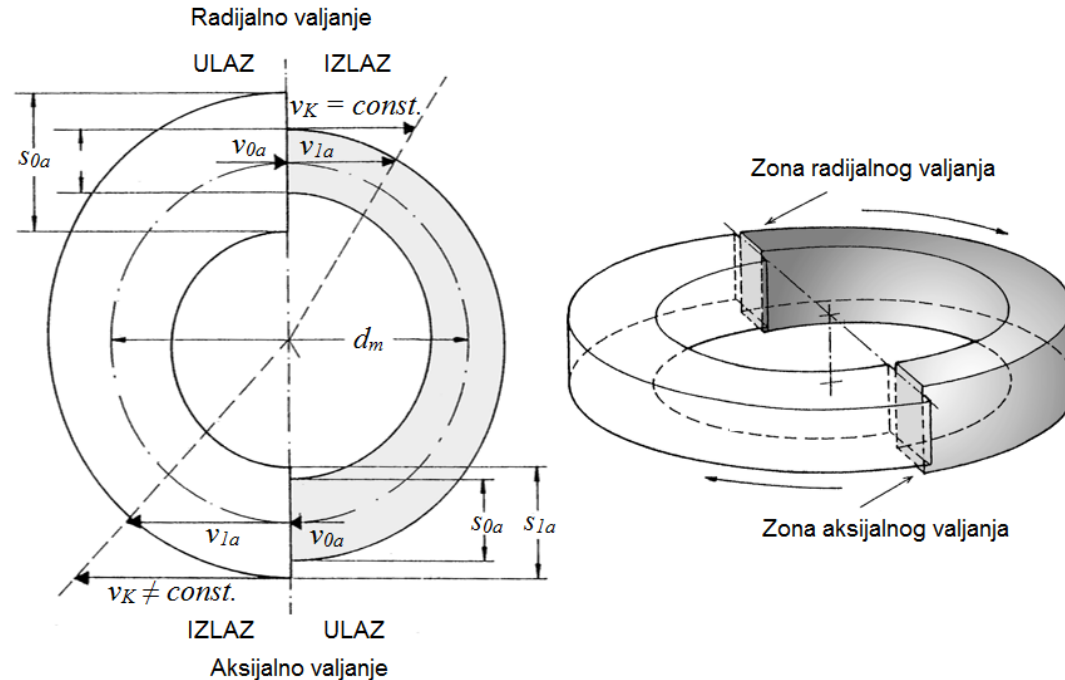
*Radijalna brzina (izlaz iz radijalne zone):*

$$v_{1r}(t) = \frac{v_K \cdot d_m(t)}{d_m(t) + s_{1r}(t)}$$

$v_K$  – obimna brzina

*Aksijalna brzina*

$$v_{1a}(t) = \frac{v_K(t) \cdot d_m(t)}{d_m(t) + s_{1a}(t)}$$



*Uslov kontinuiteta*

- srednji prečnik prstena raste samo ako postoji redukcija poprečnog preseka u zoni deformisanja, što govori, uzimajući u obzir uslov konstantnosti zapremine, da moraju postojati različite brzine na ulazu i izlazu iz zone deformisanja

$$v_1 \cdot A_1 = v_0 \cdot A_0$$

radijalna zona →  $v_{0r}(t) = v_{1r}(t) \frac{A_{1r}(t)}{A_{0r}(t)}$

aksijalna zona →  $v_{0a}(t) = v_{1a}(t) \frac{A_{1a}(t)}{A_{0a}(t)}$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{0r}(t) \leq v_{1r}(t) \\ v_{0a}(t) \leq v_{1a}(t) \end{array} \right.$$



# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (kinematika procesa)

*Komponenta brzine rasta prstena iz zone radijalne deformacije*

$$\pi \cdot \dot{d}_{m_r}(t) = \Delta v_r(t) = v_{1r}(t) - v_{0r}(t)$$

*Komponenta brzine rasta prstena iz zone aksijalne deformacije*

$$\pi \cdot \dot{d}_{m_a}(t) = \Delta v_a(t) = v_{1a}(t) - v_{0a}(t)$$

*Ukupna brzina rasta prstena (srednjeg obima)*

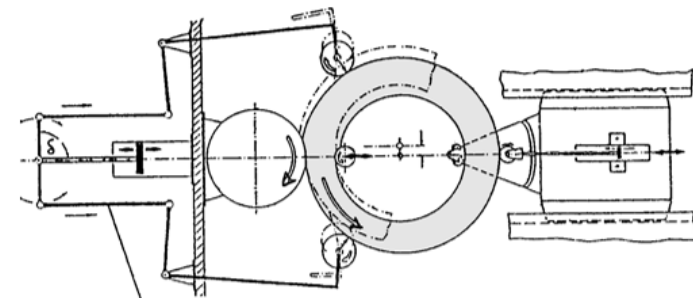
$$\pi \cdot \dot{d}_m(t) = v_{1r}(t) \cdot \varepsilon_{Qr}(t) + v_{1a}(t) \cdot \varepsilon_{Qa}(t)$$

$$\varepsilon_{Qa}(t), \varepsilon_{Qr}(t) \quad \text{relativne debljine zida prstena}$$

*Uslov simetričnog deformisanja prstena*

$$\pi \cdot \dot{d}_m(t)_{levo} = \pi \cdot \dot{d}_m(t)_{desno}$$

$$v_{1r}(t) + v_{0r}(t) = v_{1a}(t) + v_{0a}(t)$$



Centriranje prstena

$$v_{1a}(t) = v_{1r}(t) \frac{2 - \varepsilon_{Qr}(t)}{2 - \varepsilon_{Qa}(t)}$$

$$\dot{d}_m(t) = \frac{v_H}{\pi} \cdot \frac{d_m(t)}{d_m(t) + s_{1r}(t)} \cdot \left( \varepsilon_{Qr}(t) + \frac{2 - \varepsilon_{Qr}(t)}{2 - \varepsilon_{Qa}(t)} \varepsilon_{Qa}(t) \right)$$

# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (zone deformisanja)

## Radijalna zona deformacije

Dužina zone deformacije na glavnom (H) i pomoćnom valjku (D)

$$l_H = \sqrt{\Delta s_H \cdot D \cdot \frac{d_H}{D + d_H}} \quad l_D = \sqrt{\Delta s_D \cdot D \cdot \frac{d_D}{D + d_D}}$$

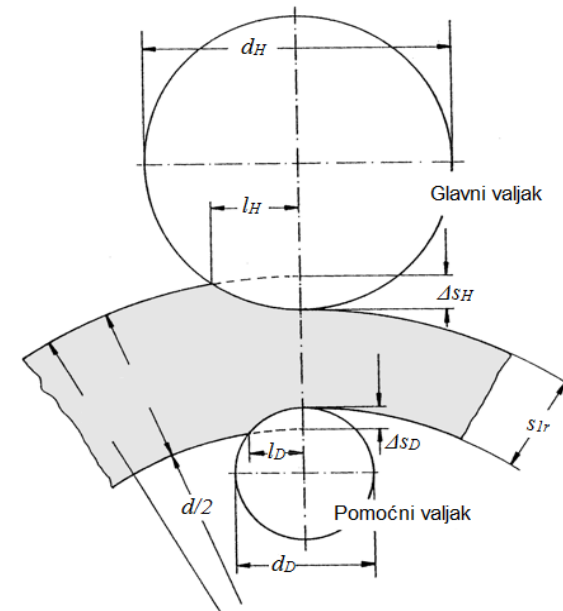
$$d_H \geq 1,5d_D$$

Pojedinačne redukcije poprečnog preseka na glavnom i pomoćnom valjku

$$\Delta s_D = \frac{\Delta s}{1 + X} \quad \Delta s_H = \frac{\Delta s}{1 + 1/X}$$

$$X = \frac{\Delta s_H}{\Delta s_D} = 3,36 \left( \frac{d'_D}{d'_H} \right)^{1,46} \cdot \left( \frac{d_m}{D} \right)^{5,23}$$

$$\frac{\Delta s_H}{\Delta s_D} = \frac{d'_D}{d'_H} \quad \text{ostatak procesa}$$



početak procesa

# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (zone deformisanja)

## Aksijalna zona deformacije

Dužina zone deformacije

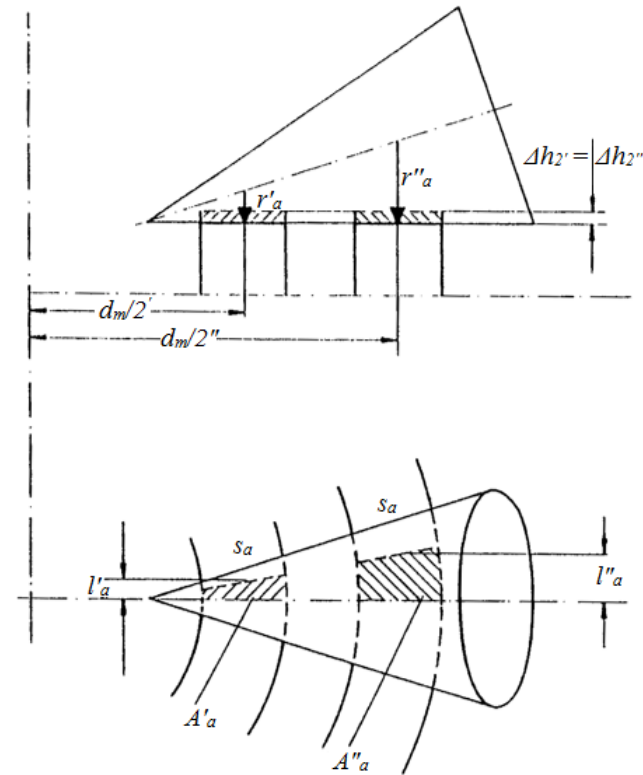
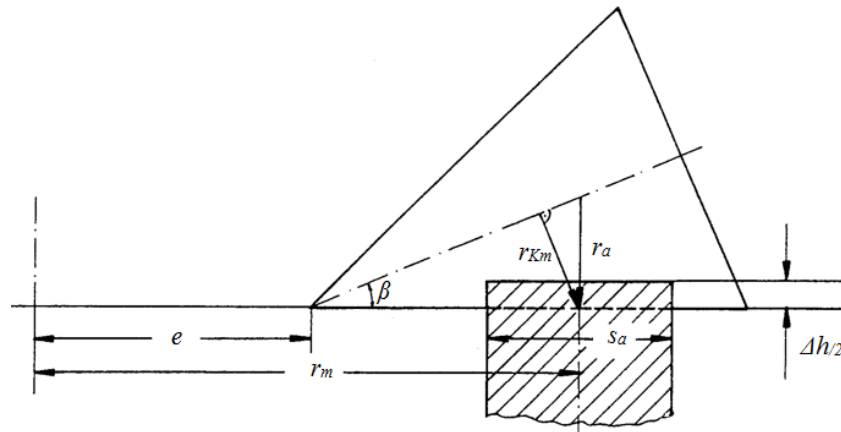
$$l_a = \sqrt{\Delta h \cdot r_a}$$

$$r_a = \operatorname{tg} \beta \cdot (r_m - e)$$

$\beta$  – poluugao konusa valjka

$r_m$  – srednji radijus prstena

$e$  – rastojanje vrha konusa od ose valjanog prstena



# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (sila valjanja)

*Srednji napon valjanja*

$$k_{fm} = k_{fm}(\text{Materijal}, v, \varphi, \dot{\varphi})$$

*Radijalna sila valjanja*

$$F_r = k_{wr} \cdot A_r = k_{wr} \cdot l_r \cdot h_{mr} = \frac{k_{fmr}}{\eta_{Fr}} \cdot l_r \cdot h_{mr}$$

$$k_w = \frac{k_{fm}}{\eta_F}$$

$$\eta_{Fr} = 0,13 + 0,64 \cdot c_r + 1,06 \cdot \varepsilon_s$$

$$c_r = \frac{l_r}{s_{mr}}$$

$l_r$  – srednja dužina zone deformacije  
 $s_{mr}$  – srednja redukcija debljine zida prstena

*Aksijalna sila valjanja*

$$F_a = k_{wa} \cdot A_a = k_{wa} \cdot l_a \cdot s_{ma} = \frac{k_{fma}}{\eta_{Fa}} \cdot l_a \cdot s_{ma}$$

$$\eta_{Fa} = 0,13 + 0,47 \cdot C_a + 1,06 \cdot \varepsilon_h$$

$$c_a = \frac{l_a}{h_{ma}}$$

$l_a$  – srednja dužina zone deformacije  
 $h_{ma}$  – srednja redukcija visine prstena

# Radijalno-aksijalno valjanje prstenova (moment i snaga motora)

## Efektivna snaga deformacije

$$P_{ef} = k_w \cdot V \cdot |\dot{\varphi}| \quad P_{ef} = k_w \cdot v_1 \cdot \varphi$$

$V$  – zapremina zone deformisanja

$\Delta t$  – vreme prolaza prstena kroz zonu deformacije

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

## Snaga motora

$$P_{Motora} = \frac{P_{ef}}{\eta_M}$$

## Deformacioni moment za zonu radijalne i aksijalne deformacije

$$M_{ef} = \frac{P_{ef}}{\omega} = P_{ef} \frac{r}{v_u} = M \quad M = F \cdot a \cdot n_x$$

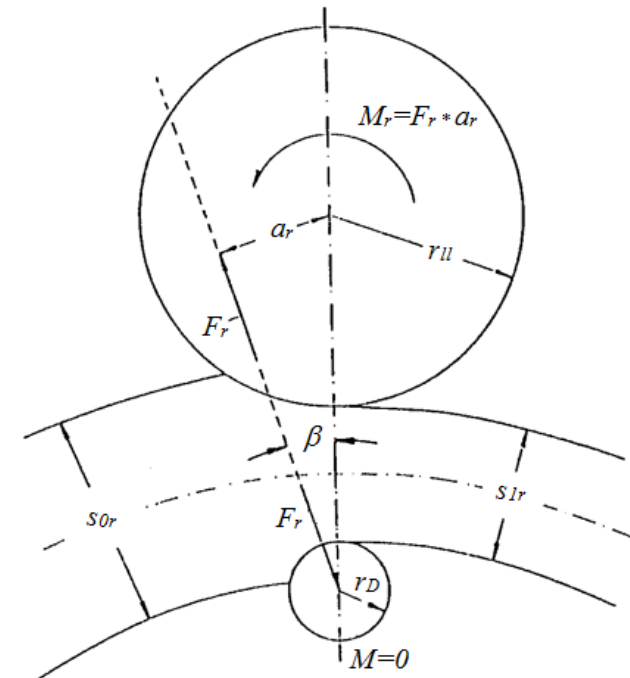
$r$  – srednji radijus valjanja

$v_u$  – obimna brzina glavnog valjka

$n_x$  – broj valjaka

$$M_r = F_r \cdot a_r \cdot n_x = F_r \cdot l_r \cdot m_r \cdot n_x$$

$$m_r = 2,5 + 3,6 \cdot c_r \quad 0,15 \leq c_r \leq 0,55$$



$$M_a = F_a \cdot a_a \cdot n_x = F_a \cdot l_a \cdot m_a \cdot n_x$$

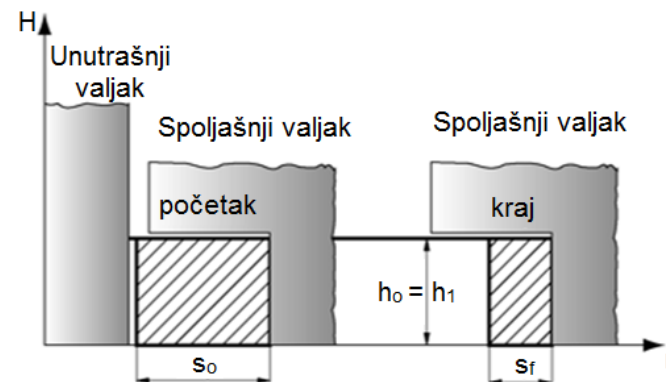
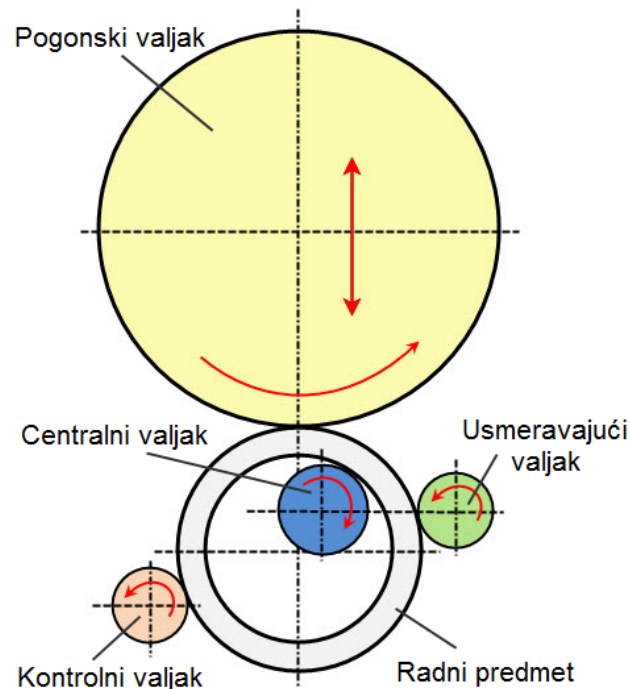
$$m_a = 0,48 + 0,3 \cdot c_a$$

$$0,15 \leq c_a \leq 0,55$$



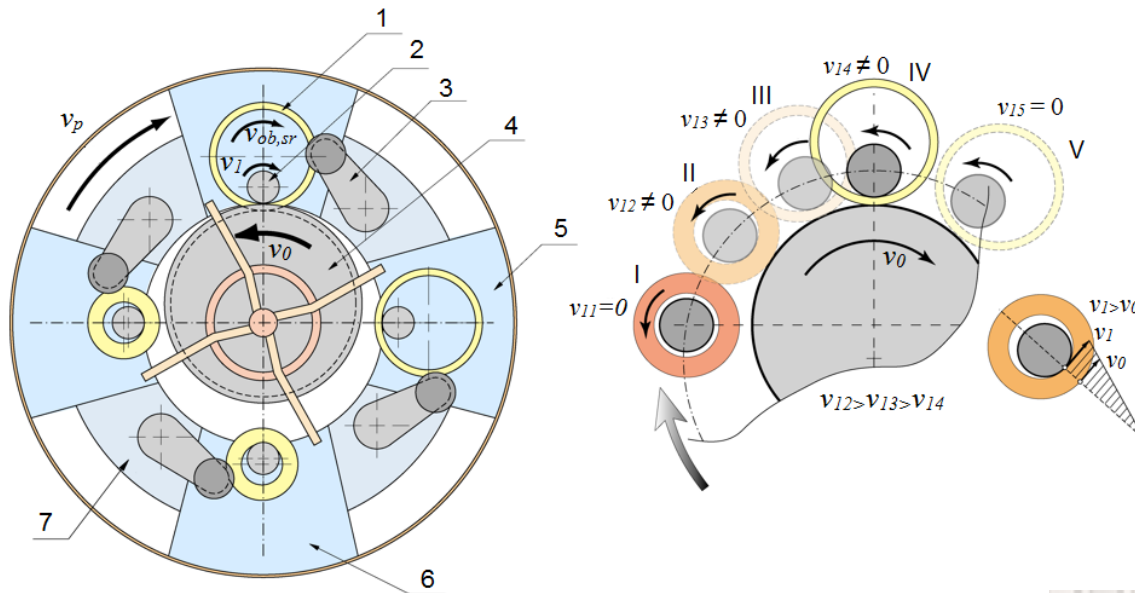
# Radijalno valjanje prstenova

- Specijalni slučaj radijalno-aksijalnog valjanja ( $h = \text{cost}$ )
- Mašine jednostavnije konstrukcije i niže cene eksploatacije
- Veće dimenzije prstenova u odnosu na radijalno-aksijalno valjanje
- Niža tačnost dimenzija - dodatna operacija kalibrisanja



# Radialno valjanje prstenova

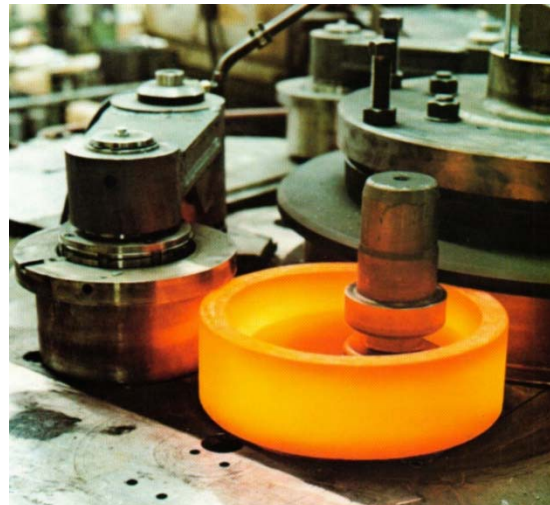
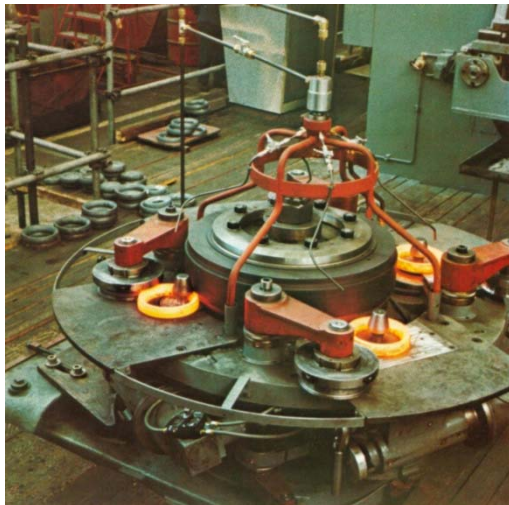
Polu-automatske horizontalne mašine za valjane prstenova manjih deimenzija



$v_p$  - prenosna brzina (platforma)

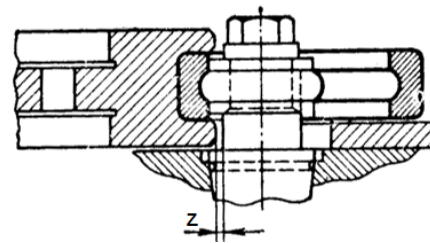
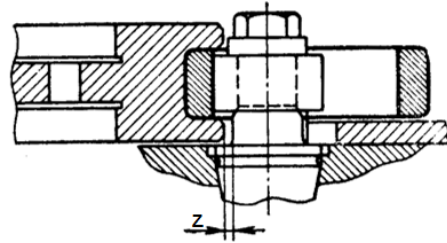
$v_1$  - relativna brzina obrtanja unutrašnjeg valjka

$$v_{ob,sr} = \frac{v_1 + v_0}{2}$$

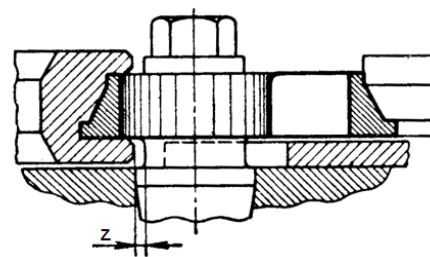
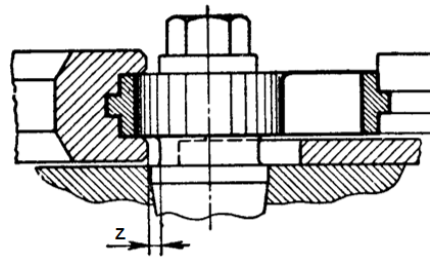
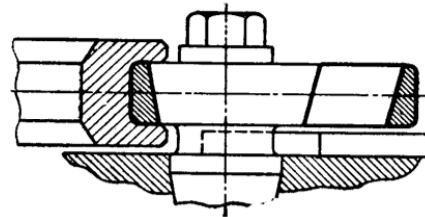
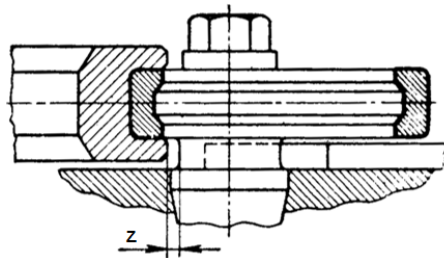


# Radialno valjanje prstenova

Osnovni oblici valjaka



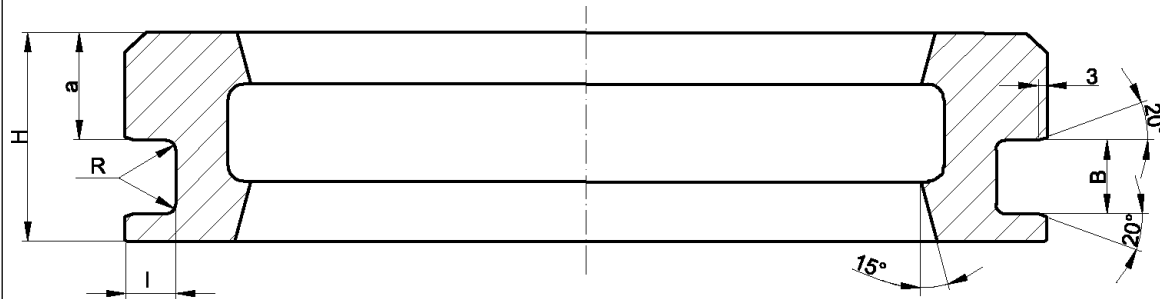
Č 1680, Č4751, Č4753



# Radialno valjanje prstenova

## Geometrija valjaka

### Glavni valjak



Dubina žljeba:  $l = s_{pv} + (2 \div 3)$  [mm]

Širina žljeba:  $B = H_{kv} * (1 + \lambda)$

Radijus zaobljenja u dnu žljeba:  $R = R_{kv}$

$s_{pv} = (D_{pv} - d_{pv})/2$  – debljina zida prstena pre valjanja,

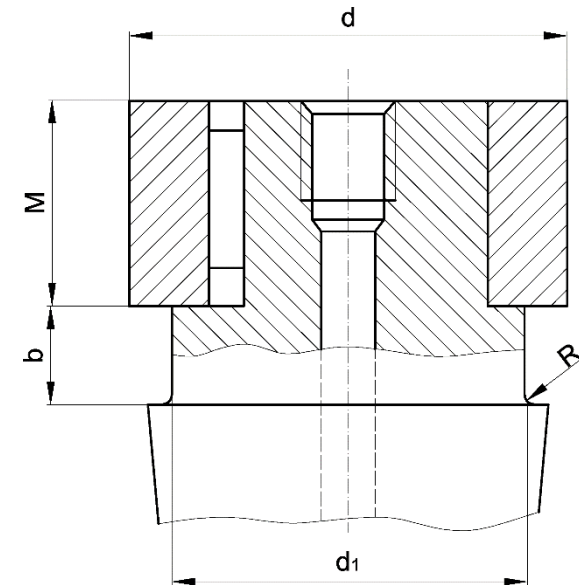
$D_{pv}$ ,  $d_{pv}$  – spoljašnji i unutrašnji prsten pre valjanja,

$H_{kv}$  – visina prstena na kraju valjanja ( $H_{kv} = H_{pv}$ ),

$\lambda \approx 0,013$  – koeficijent temperaturne promene dimenzija,

$R_{kv} = 2 \div 3$  [mm] – radijus zaobljenja spoljašnjih ivica prstena na kraju valjanja

### Pomoćni valjak



Prečnik valjka:  $d = d_{pv} - (3 \div 5)$  [mm]

Širina valjka:  $M = B - (0.5 \div 1.2)$  [mm]

Prečnik suženog dela na osovini:  $d_1 = d - 2*(l + z - s_{kv})$

$d_{pv}$  – minimalni unutrašnji prečnik prstena pre valjanja,

$B$  – širina žljeba velikog valjka,

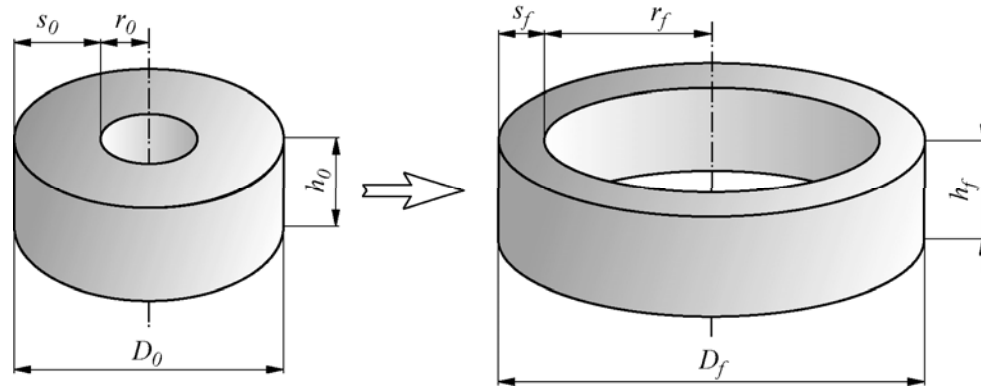
$l$  – dubina žljeba velikog valjka,

$s_{kv}$  – minimalna debljina zida prstena na kraju valjanja,

$z = 1.5 \div 6$  [mm] – zazor između valjaka

# Radijalno valjanje prstenova

## Parametri procesa



### Dimenzije priprema

$$s_0 (s_0 + 2r_0) = s_f (s_f + 2r_f)$$

$$k = \frac{s_0}{s_f} = 1,2 \div 1,6$$

### Sila i obrtni moment

#### Varijanta 1

$$F = A_k \cdot p_{sr}$$

$$p_{sr} = k_n \cdot k_s \cdot k_m \cdot \sigma_v$$

$$A = h \cdot l_d$$

$k_n = 1,15$  – koeficijent koji predstavlja uticaj spoljašnjeg trenja

$k_s = 1,2$  – koeficijent koji predstavlja uticaj brzine

$k_m = 1,1$  – koeficijent koji predstavlja uticaj ojačavanja materijala

$\sigma_v$  – specifični deformacioni otpor na temperaturi obrade

#### Varijanta 2

$$F = 2\tau \cdot h \cdot l_d \left( 1 + \frac{s}{4l_d} + \frac{3}{8}m \frac{l_d}{s} + \frac{3}{8}m \frac{l_d}{h} \right)$$

$$M = 2\tau \cdot h \cdot R_1 \cdot \Delta s \left( 1 + \frac{s}{4l_d} + \frac{3}{8}m \frac{l_d}{s} + \frac{3}{8}m \frac{l_d}{h} \right)$$

$\tau$  - smicajna čvrstoća materijala

$m$  - faktor trenja

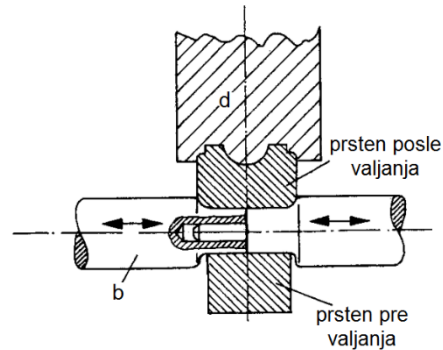
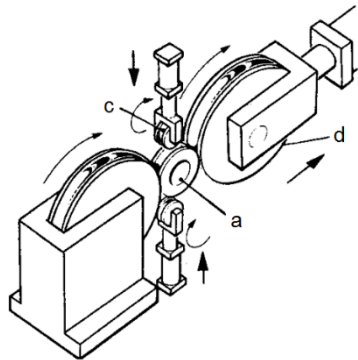
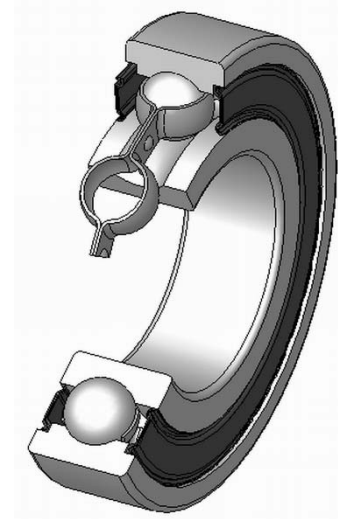
$s$  - trenutna debljina zida prstena

$\Delta s$  - radijalni pomak po jednom obrtaju

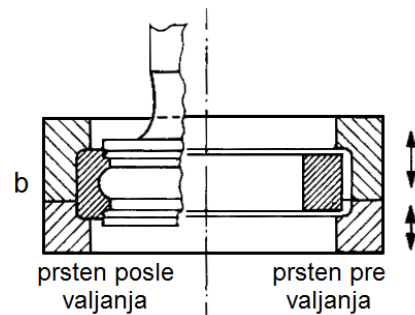
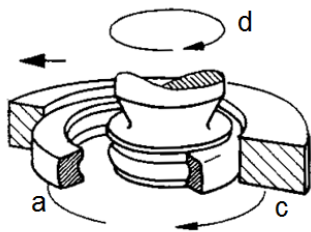


# Hladno valjanje prstenova

- Ideja dolazi iz industrije ležajeva
- 40% cene ležaja – material
- Prstenovi prečnika do 250mm
- Intenzivno podmazivanje u procesu
- Radni vek valjaka do 750 000 izrađenih prstnova



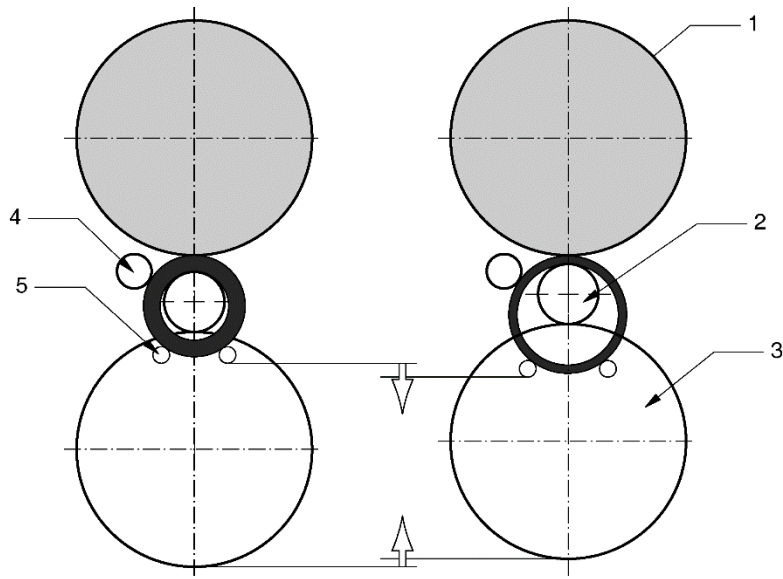
*valjanje unutrašnjeg prstena*



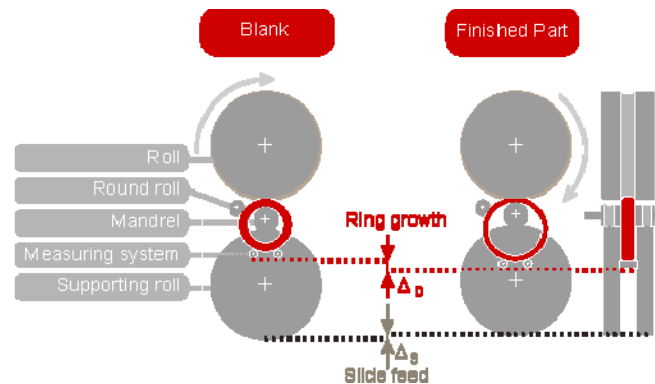
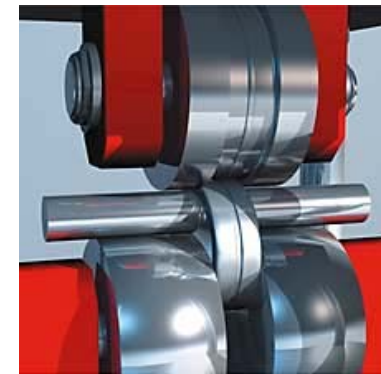
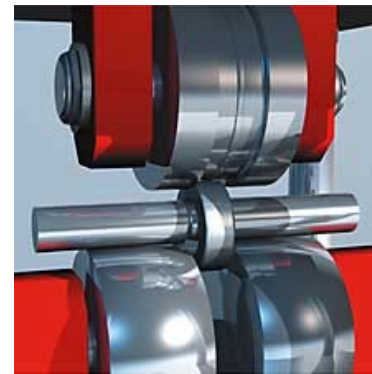
*valjanje spoljašnjeg prstena*

# Hladno valjanje prstenova (po tehnologiji PROFIROLL)

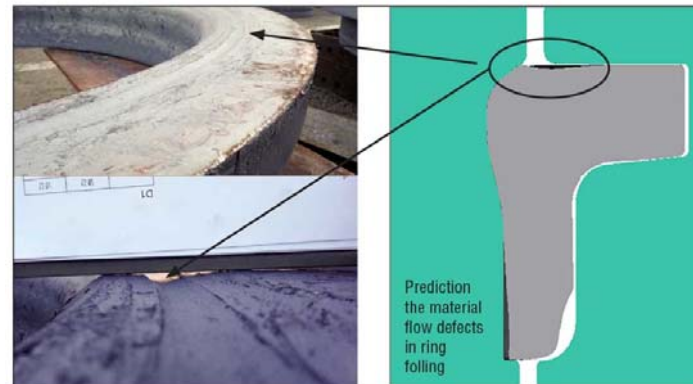
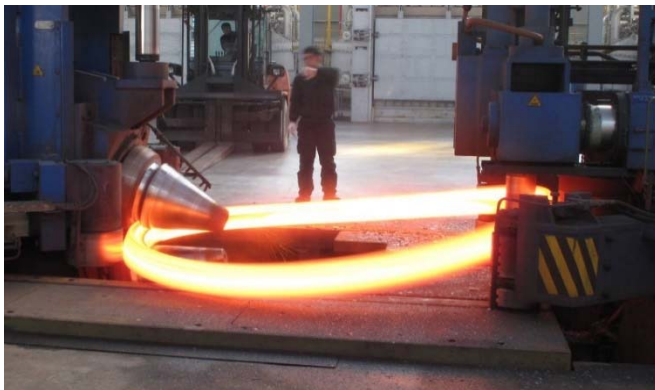
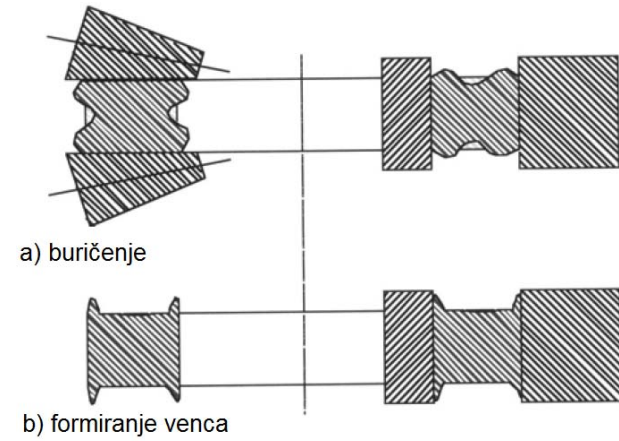
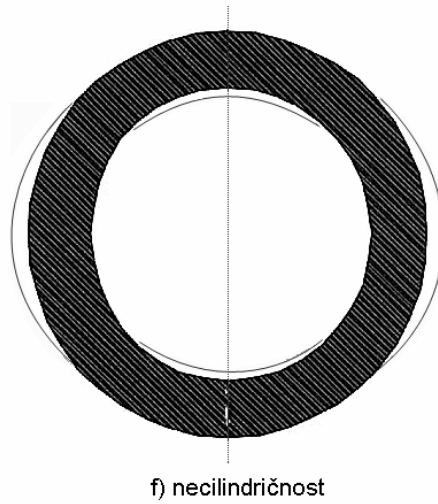
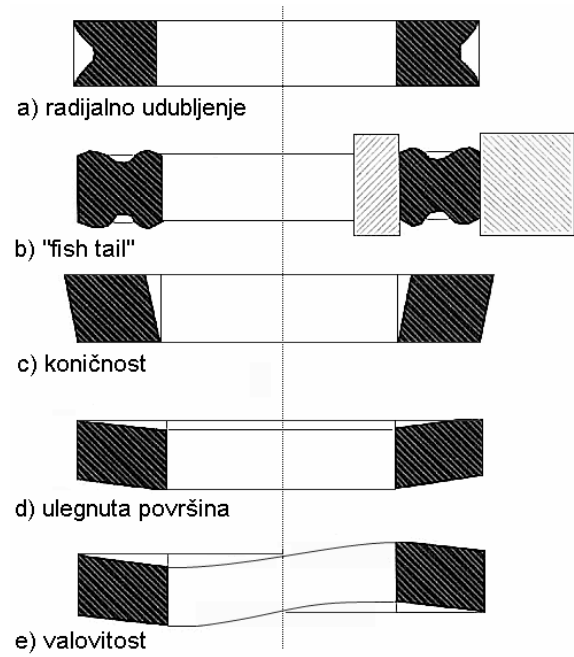
- Visoka tačnost dimenzija prstena (odstupanja: cilindričnosti  $<0,04\text{mm}$ , prečnika  $<0,08\text{mm}$ )
- Visoka produktivnost (prsten  $80\text{mm} \times \phi 240 \text{ mm}$  -  $10\text{kg} \rightarrow 20 \text{ sec}$ )
- Materijal teče aksijalno, radijalno i tangencijalno



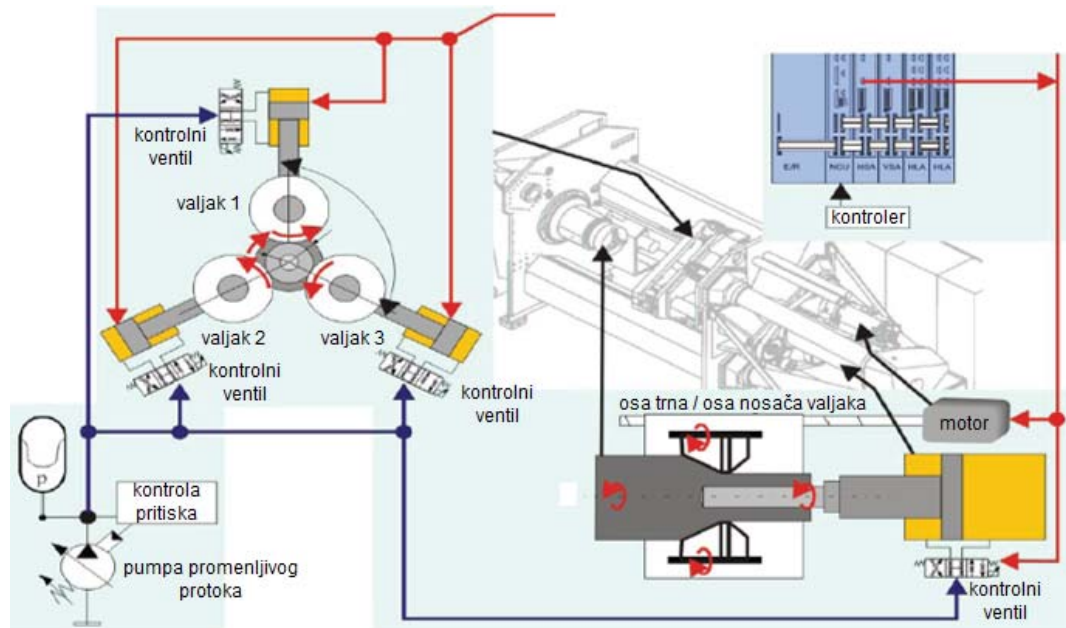
1) glavni valjak, 2) trn, 3) pomoćni valjak,  
4) usmeravajući valjak, 5) kontrolni valjak



# Greške pri valjanju prstenova



# Kontrola u procesu valjanja prstenova



*Upravljačka jedinica mašine za aksijalno-radijalno oblikovanje valjcima*

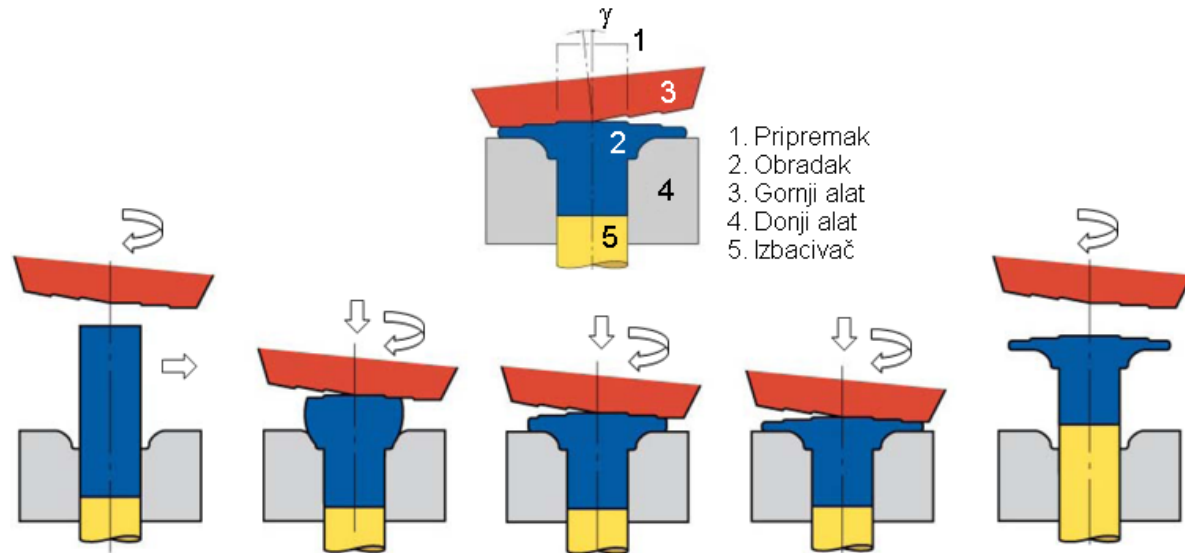
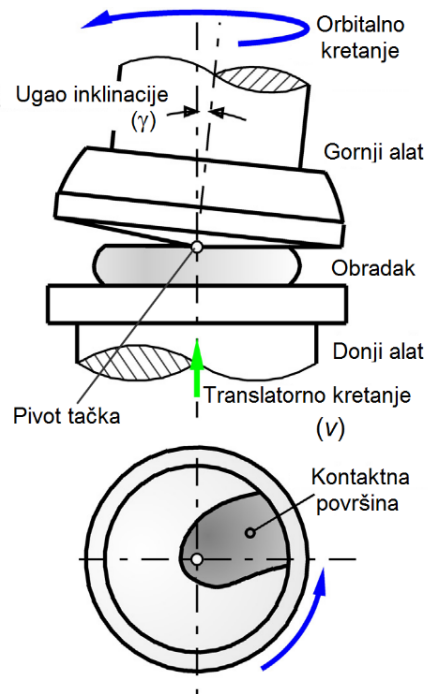


*Monitoring i kontrola procesa radijalno-aksijalnog valjanja prstenova*



# Orbitalno kovanje

- Orbitalno ili rotaciono kovanje – kontinualni proces deformisanja
- Gornji alat nagnut u odnosu na donji
- Različita kretanja gornjeg i donjeg alata
- Složeno kretanje gornjeg alata – gornji alat orbitira (precesija) oko donjeg alata (relativno kretanje)

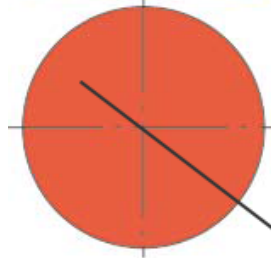
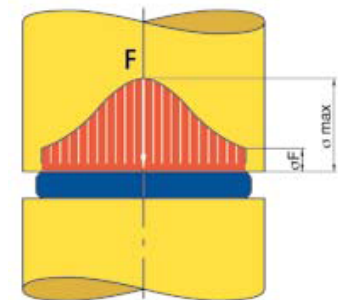




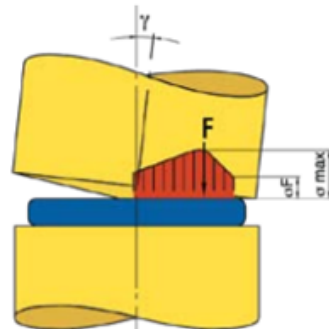
# Orbitalno kovanje

- Višestruko manja deformaciona sila (do 10 puta) u odnosu na klasično kovanje
- Manja kontaktna površina alat-obrađak nego kod klasičnog oblikovanja
- Mašine manjih gabarita
- Hladna obrada (polutopla)

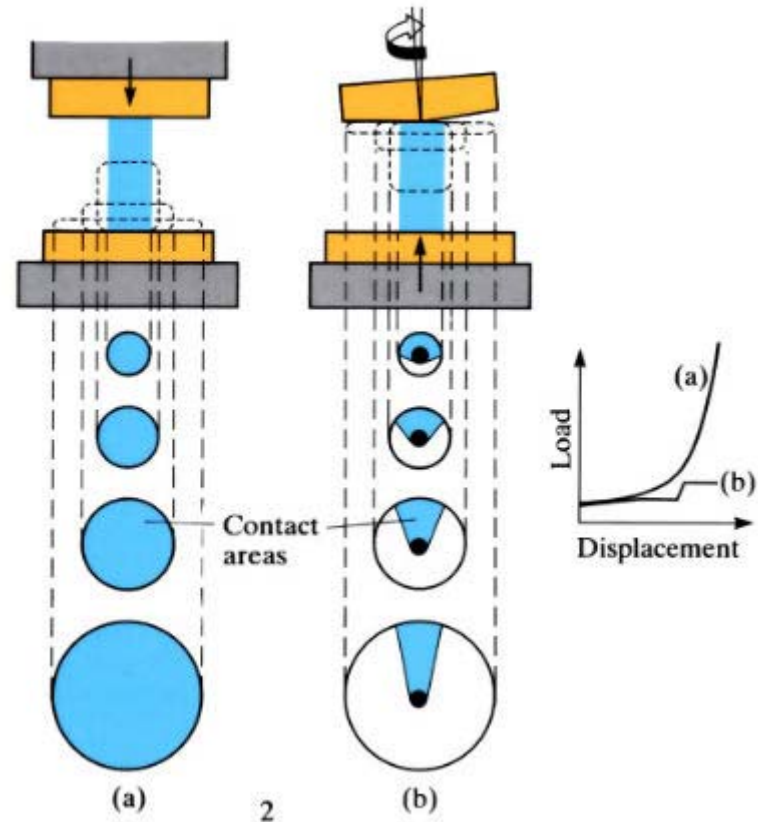
Konvencionlno kovanje



Orbitalno kovanje

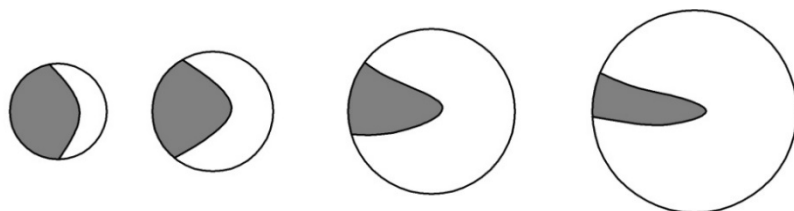
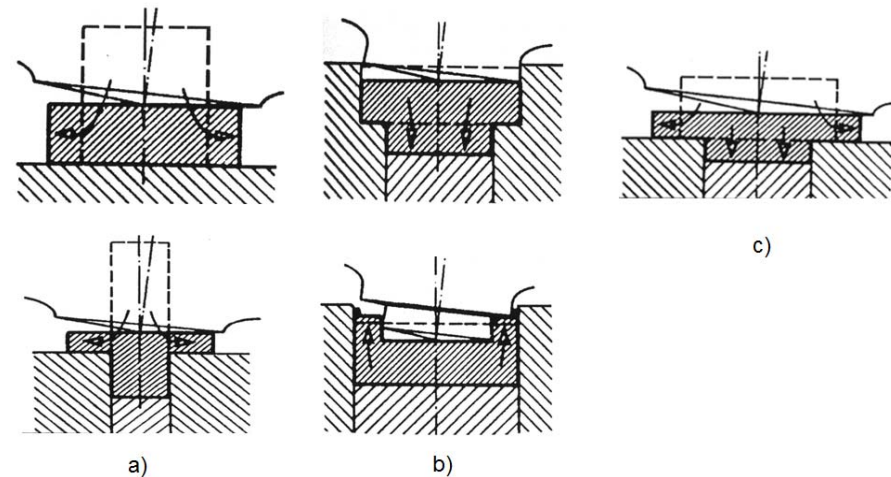
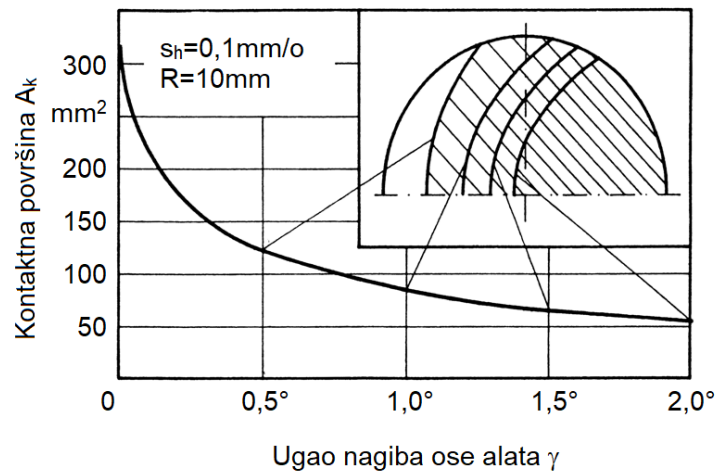


Kontaktna površina



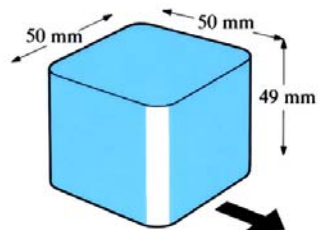
# Orbitalno kovanje

- Ugao nagiba gornjeg alata ( $\gamma$ ) – do  $2^\circ$
- Veći ugao nagiba  $\rightarrow$  manja kontaktna površina  $\rightarrow$  manja sila
- Veći ugao nagiba  $\rightarrow$  veća bočna opterećenja  $\rightarrow$  veće deformacije rama mašine  $\rightarrow$  manja tačnost
- Oblik kontaktne površine se menja i smanjuje tokom procesa
- Oblikovanje u otvorenom (a), zatvorenom (b) i polu-otvorenom/kombinovanom (c) alatu

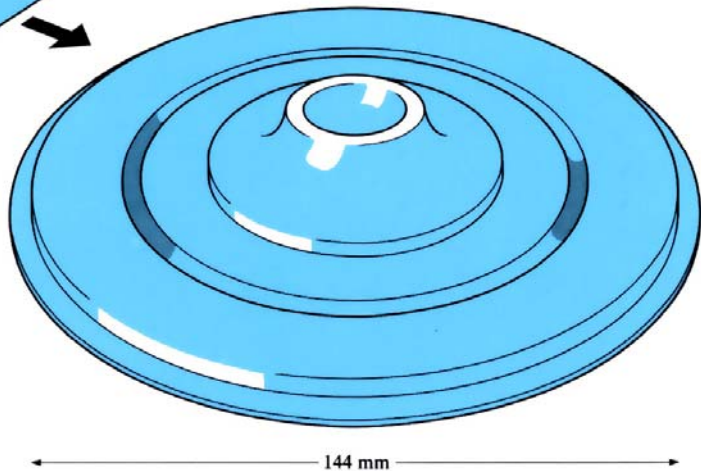


# Orbitalno kovanje (primena)

- Delovi različite geometrije i stepena složenosti, u širokom dijapazonu dimenzija (preko 300mm)
- Najviše se koristi za izradu aksijalno-simetričnih delova koji imaju veliki odnos prečnika i debljina (prirubnice, glavčine, zupčanici, prstenasti delovi, diskovi i dr.)
- Naročito pogodna za kovanje zupčastih elemenata ili glavčina



Auto gear change hub  
Material: 0.5% carbon steel  
Weight: 0.95 kg



Vratilo kvačila,  $\phi 50$ mm 700gr



Ozubljeni disk,  $\phi 85$ mm 380gr



Prirubnica sa navrtkom,  
 $\phi 130$ mm 900gr



Bragasti disk za pumpu,  
 $\phi 55$ mm 160gr



Ozubljena letva promenljivog koraka,  
 $\phi 28$ mm x 750mm 3150gr



Nazubljena ručuca,  
l=158mm 200gr



Prsten spojnice za ozubljenjem,  
 $\phi 90$ mm 480gr



Konični zupčanik,  
 $\phi 80$ mm 420gr

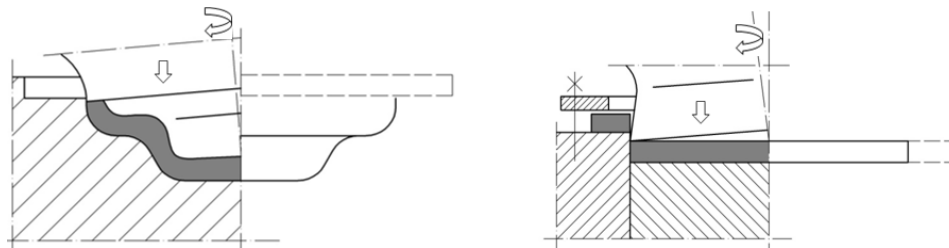


Prirubnica sa stazom,  
 $\phi 68$ mm 1440gr

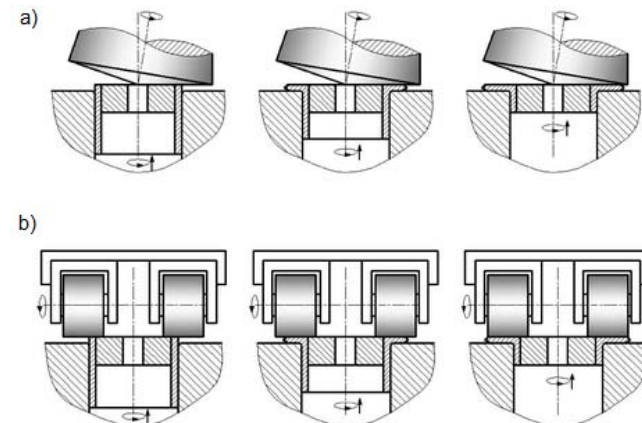
# Orbitalno kovanje (primena)

Oko 1/3 dobijenih na pesama i čekićima može se supstituisati primenom orbitalnog kovanja.

- Istiskivanje – posebno kod obrade teško obradivih materijala
- Oblikovanje zupčanika – mogu se dobiti zupčanici klase tačnosti IT 6-8.
- Sabijanje – postižu se veći stepeni deformacije nego kod klasičnog postupka
- Duboko izvlačenje – pri izradi delova kompleksne geometrije iz debelih limova od teško obradivih materijala
- Razdvajanje – za razdvajanje debelih limova
- Valjanje prstenastih elemenata
- Neki postupci mašinske obrade
- Spajanje



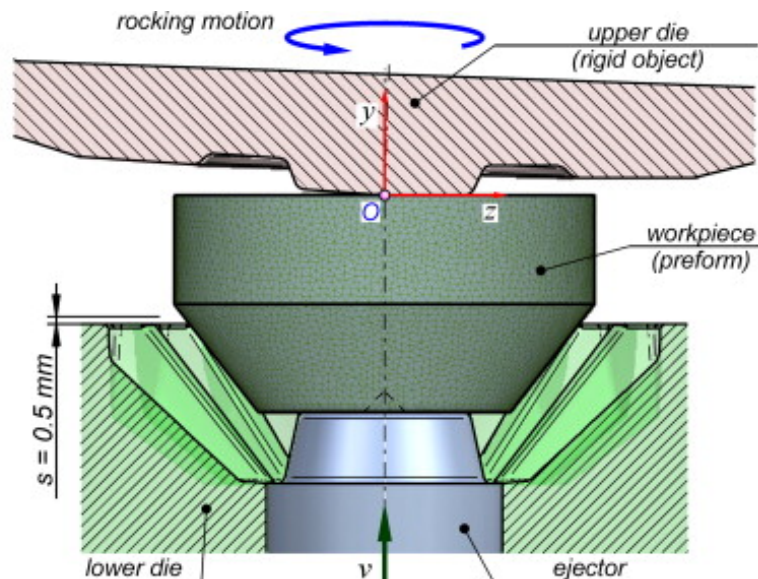
<https://www.youtube.com/watch?v=9k9W-4pskQ8>





## Orbitalno kovanje (primena)

- Mogu se obrađivati svi metalni materijali (ugljenični i legirani čelici, nerđajući čelici, aluminijum, mesing, i druge legure) koji poseduju odgovarajuću duktilnost i kvalitet vezan za hladnu obradu.
- Moguća je obrada metalnog praha i različitih nemetala. Pri sabijanju metalnog praha dobijaju se veće gustine obratka nego kod konvencionalnog sabijanja.
- Pri obradi u hladnom stanju tvrdoća polaznog materijala treba da je ispod 30HRC (meko žarenje)
- Polu-topla obrada (čelik - zagrevanje na 650 do 800°C)

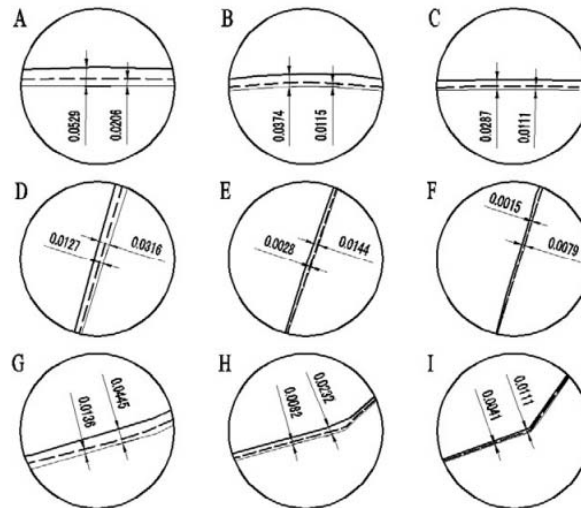
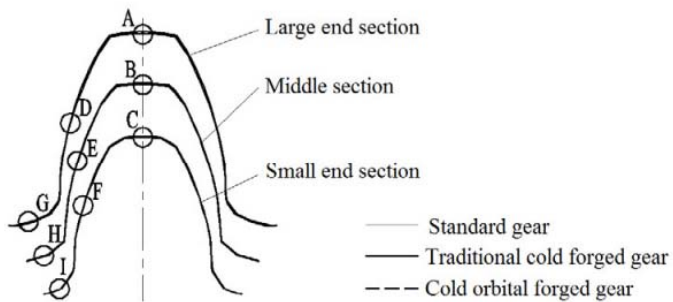
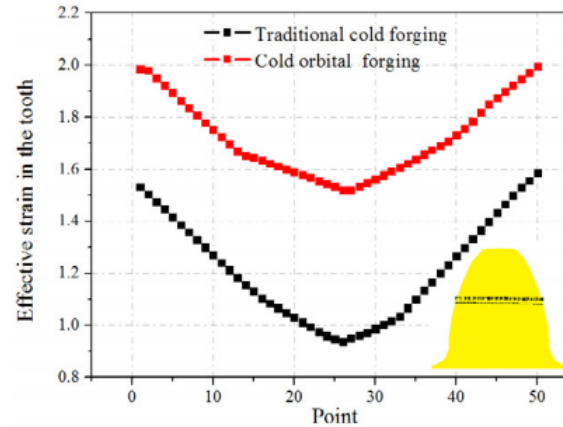
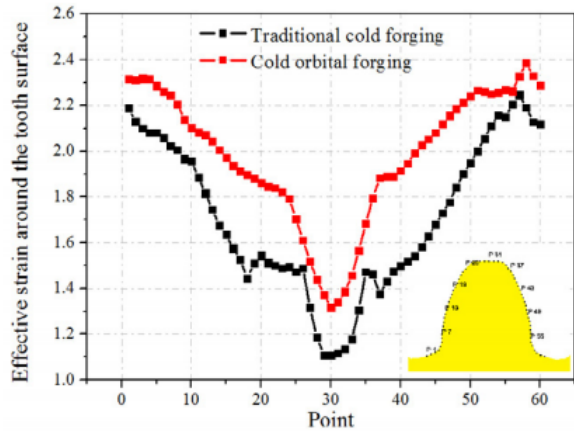




# Orbitalno kovanje (karakteristike)

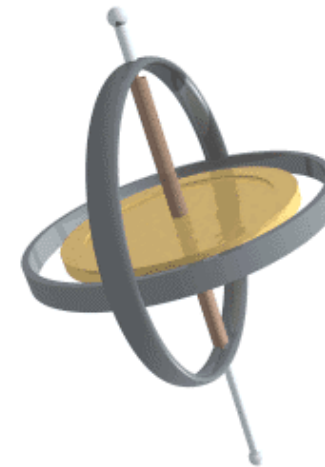
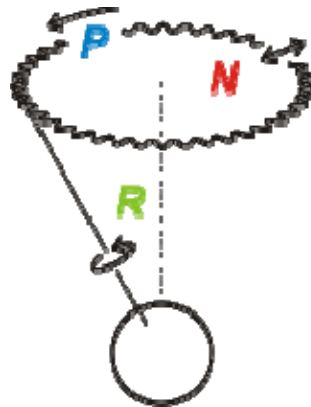
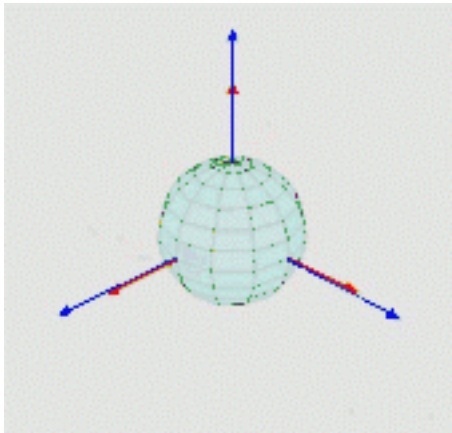
Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ U procesu orbitalnog kovanja <b>sile su višestruko manje</b> u odnosu na klasično kovanje što omogućava supstituciju klasičnog kovanja orbitalnim i korišćenje mašina i alata manjih dimenzija.</li><li>➤ Zbog prisustva trenja kotrljanja <b>habanje je svedeno na minimum</b> što omogućava dobijanje komada visoke tačnosti i dobrog kvaliteta površina. Niže trenje doprinosi smanjenju deformacione sile i homogenom deformisanju.</li><li>➤ Mogućnost brze izmene alata i podešavanja mašine svrstava je u grupu <b>visoko fleksibilnih tehnologija</b>.</li><li>➤ <b>Cena alata je niža</b> nego kod konvencionalnog kovanja.</li><li>➤ Zbog odsustva udarnih sila <b>orbitalno kovanje je ekološki prihvatljivije</b> od klasičnog kovanja. Buka, vibracije i isparenja u velikoj meri su eliminisani što je vrlo bitno sa stanovišta zaštite na radu.</li><li>➤ Oblikovanje se najvećim delom izvodi <b>pod dejstvom pritisnih napona</b>, a u zoni deformisanja ostvaruje se i visok stepen hidrostatičkog naponskog stanja čime se <b>povećava deformabilnost materijala</b>.</li><li>➤ <b>Visoka tačnost – NSF delovi</b>.</li><li>➤ Relativno <b>dobra proizvodnost</b>. Vreme obrade srednje složenih delova iznosi 10-15s. Pored toga, finalni deo je bez venca što dodatno doprinosi skraćanju ciklusa, kao i uštedi materijala.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Glavni problem orbitalnog kovanja je nedostatak iskustvenih podataka vezanih za tehnologiju, jer ona spada u grupu “mlađih” tehnologija.</li><li>○ Zbog prisustva velikih bočnih sila i složenih kretanja alata mašine su složene konstrukcije.</li><li>○ Modeliranje i simulacija procesa orbitalnog kovanja su dugotrajni i zahtevaju računare visokih performansi.</li></ul>

# Orbitalno kovanje (karakteristike)



## Orbitalno kovanje (kinematika alata)

- Različita kretanja gornjeg i donjeg alata
- Za opisivanje kinematike alata koriste se **Euler-ovi uglovi** (presecija, nutacija i sopstvena rotacija) I odgovarajuće ugaone brzine definisani za slučaj obrtanja tela oko nepokretne tačke.
- **Prvo kretanje** - rotacija (obrtanje) alata oko svojih osa. Ovo kretanje definiše se preko ugla  $\psi$  (ugao zaokretanja oko sopstvene ose), a brzina promene ovoga ugla je  $\omega_\psi$  (brzina sopstvene rotacije).
- **Drugo kretanje** - osa jednog alata može vršiti precesiju (zaokretanje) oko ose drugog alata. Radi se o tzv. orbitalnom kretanju, odakle potiče i sam naziv postupka. Ugao precesije se označava sa  $\varphi$ , a brzina precesije  $\omega_\varphi$ .
- **Treće kretanje** - oba alata se mogu translatorno kretati u pravcu vertikalne ose (z- osa) brzinom  $v_z$ . Ova brzina ujedno definiše veličinu pomaka, tj. dubinu prodiranja alata u materijal.
- **Kinematikai radnog predmeta** - identična je kinematici donjeg alata.



Precesija (orbitalno kretanje)

# Orbitalno kovanje (klasifikacija)

**Tip 1** – Ose oba alata su fiksirane. Donji alat vrši obrtno kretanje. Gornji alat se okreće sinhrono u odnosu na obrtno kretanje donjeg alata oko svoje nagnute ose, ali nema precesije (orbitalnog kretanja) oko vertikalne ose. Translatorno kretanje se ostvaruje preko gornjeg alata (donji alat miruje). Ako se osim translacije i rotacije posmatra i relativno kretanje između gornjeg i donjeg alata, onda su moguće dve podvarijante ovog procesa. U slučaju da gornji alat nije pogonjen nego se slobodno kreće oko svoje ose zajedno sa radnim predmetom to je tip 1A. Ako je gornji alat pogonjen radi se o tipu – 1B. Zbog izostanka precesije ovaj postupak se još naziva i rotaciono kovanje ili orbitalno valjanje.

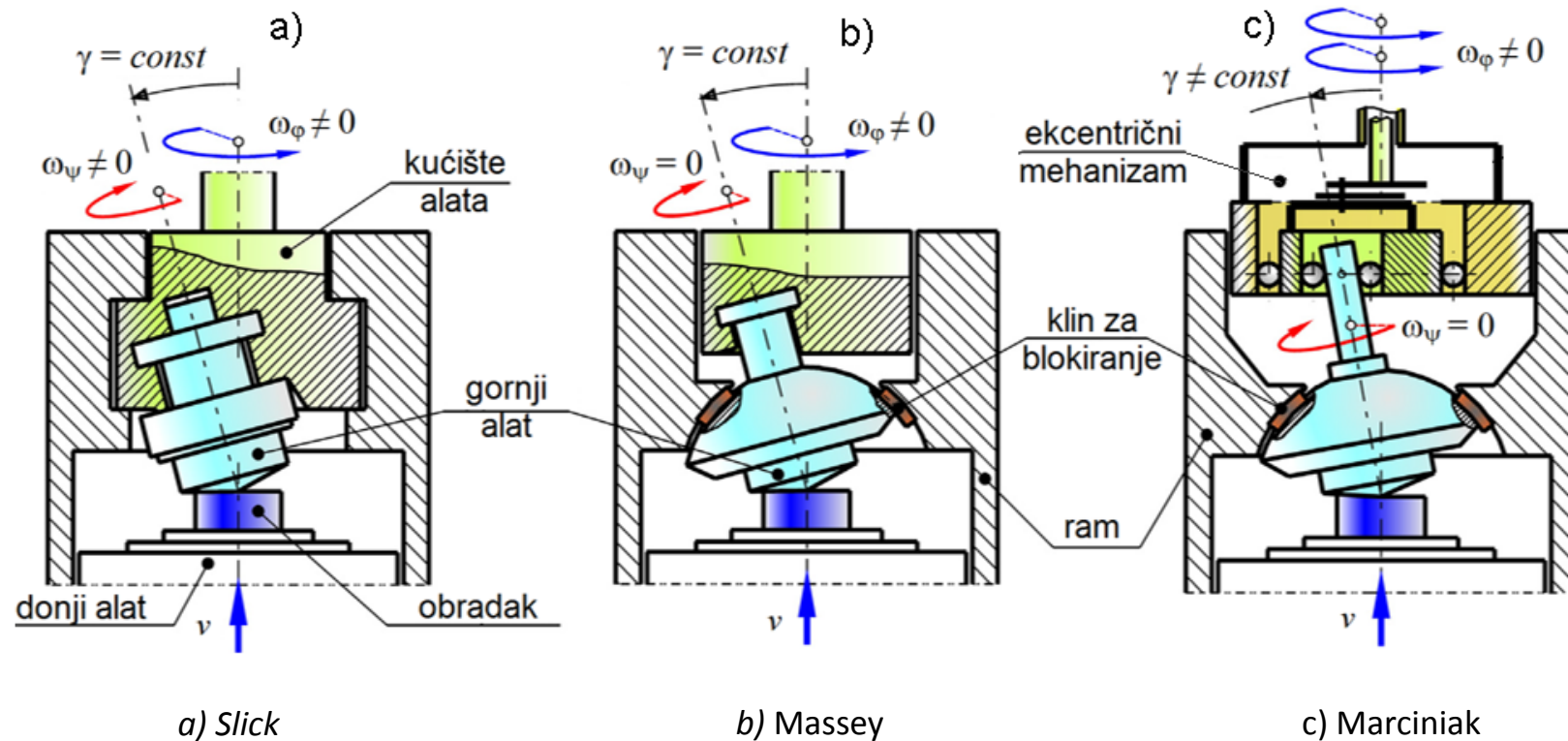
**Tip 2** – Donji alat je fiksiran (nepokretan), ne obrće se niti se kreće u vertikalnom pravcu. Gornji alat izvodi ukupno 3 nezavisna kretanja: slobodno se obrće oko svoje ose, orbitira oko vertikalne ose i translatorno kreće duž vertikalnog pravca.

**Tip 3** – To je najčešći tip (vrsta) orbitalnog kovanja. Donji alat vrši translatorno kretanje uz pomoć hidrauličnog pogona. Gornji alat se okreće (orbitira) oko vertikalne ose

Tip 1	Tip 2	Tip 3
<p><i>Gornji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sinhrono obrtanje <math>\psi</math></li> <li>- translacija <math>v</math> (pogon)</li> </ul> <p><i>Donji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rotacija (pogon) <math>\psi</math></li> <li>- nema translacije</li> </ul> <p><i>Radni komad</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- obrtanje zajedno sa donjim alatom</li> </ul>	<p><i>Gornji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- slobodno obrtanje <math>\psi</math></li> <li>- orbitalno kretanje <math>\psi</math> (pogon)</li> <li>- translacija <math>v</math> (pogon)</li> </ul> <p><i>Donji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- stacionaran</li> </ul> <p><i>Radni komad</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- stacionaran</li> </ul>	<p><i>Gornji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- orbitalno kretanje <math>\phi</math> (pogon)</li> <li>- nema rotacije</li> </ul> <p><i>Donji alat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- translacija <math>v</math> (pogon)</li> </ul> <p><i>Radni komad</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- translacija sa donjim alatom</li> </ul>

# Orbitalno kovanje (mašine)

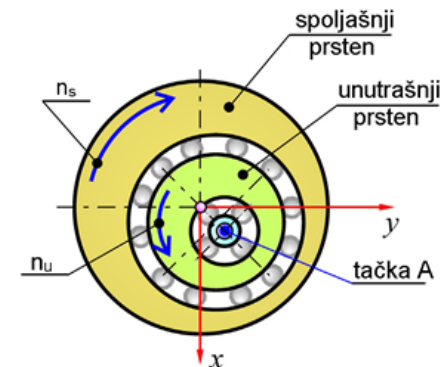
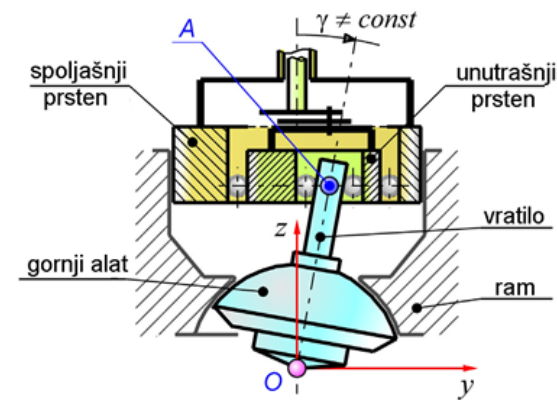
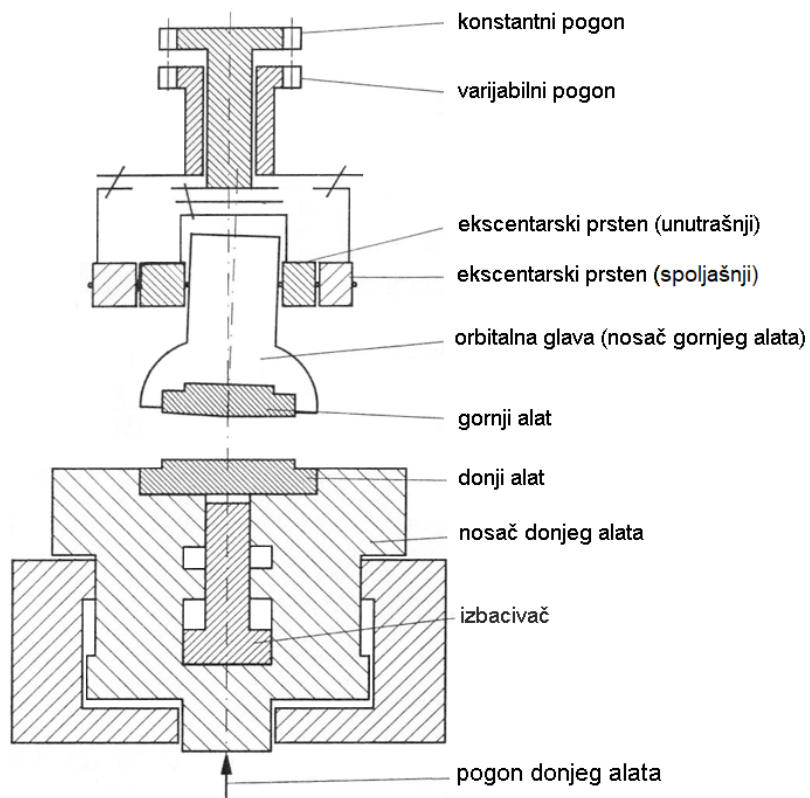
- Prva moderna mašina za orbitalno kovanje pojavila se u SAD-u 1918. godine (Edwin Slick).
- Massey - 1929. god patentirao mašinu kod koje gornji alat ne izvodi rotaciju već samo precesiju.
- Marciniak - 1970 godine razvio ekscentrični mehanizam koji pogoni gornji alat i omogućava promenu njegovog nagiba (ugla inklinacije) u odnosu na donji alat. Savremena koncepcija.





# Orbitalno kovanje (Marciniak-ova presa)

- Najveći broj mašina/presa za orbitalno kovanje koja se danas koristi u industriji bazirane su na Marciniak-ovom principu
- Ekscentarski mehanizam
- Nosač za koji se fiksira gornji alat je montiran u dva nezavisno pogonjena ekscentarska prstena. Unutrašnji prsten ima promenjivi pogon, a spoljašnji konstantan pogon.
- Ugao nagiba ose alata u odnosu na osu mašine iznosi maksimalno  $2^\circ$ .



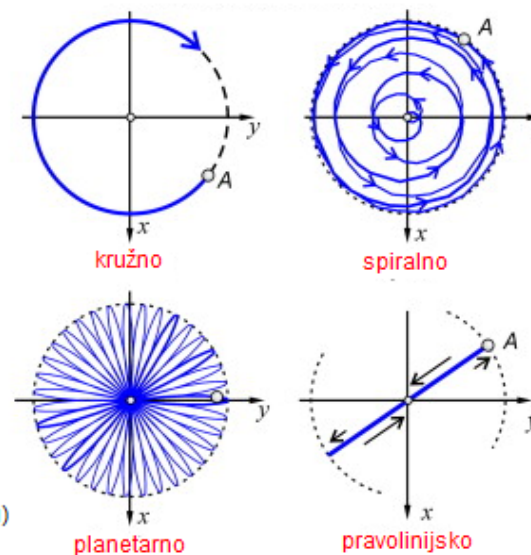
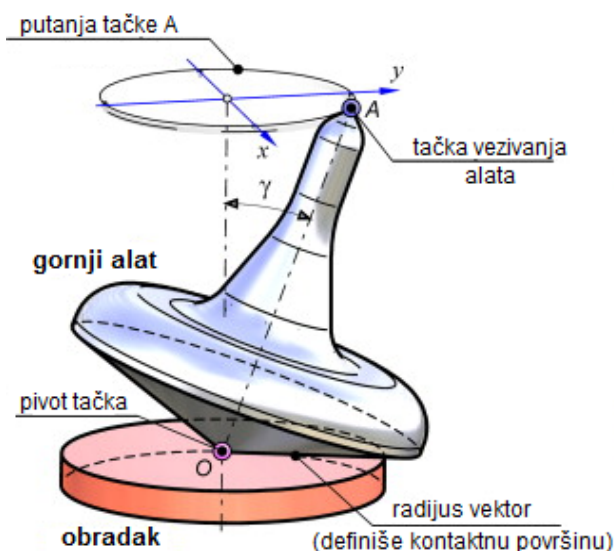
# Orbitalno kovanje (trajektorije gornjeg alata)

**Kružno kretanje** – najviše se koristi u praksi. Ovo kretanje nastaje kada oba prstena imaju isti broj obrtaja i isti smer obrtanja ( $n_s = n_u$ ). Pri tome, kontaktna površina se pomera tangencijalno u odnosu na centar obratka. Primenjuje se kod tankih i velikih delova tipa prirubnica, kod kojih je potrebno postići visok stepen deformacije po celoj kontaktnoj površini obratka. Pri kretanju po kružnoj putanji, ugao oscilovanja (ugao inklinacije  $\gamma$ ) bitno utiče na veličinu deformacione sile.

**Spiralno kretanje** – javlja se kada su različiti brojevi obrtaja ekscentarskih prstenova ( $n_s > n_u$ ), a smerovi okretanja isti. Koristi se za oblikovanje centralne zone kod delova složene geometrije kada je potrebno ostvariti visok stepen deformacije.

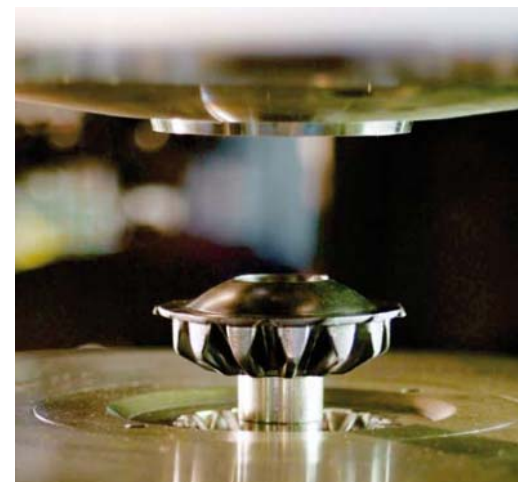
**Planerarno kretanje** – ekscentarski prstenovi imaju različite relativne brzine i različite smerove okretanja ( $|-n_s| < n_u$ ). Najčešće se primenjuje kod obradaka sa izbočinama, rebrima i sl., kao što su konusni zupčanici

**Pravolinijsko kretanje** – nastaje u slučaju kada su brojevi obrtaja isti, ali se ekscentarski prstenovi okreću u suprotnim smerovima ( $n_s = -n_u$ ). Primenjuje se za izradu dugačkih, uzanih radnih komada i delova koji imaju gravure upravne na pravac kretanja alata



# Orbitalno kovanje

(Hidruilična presa Schmidt T-200 )



	T-200
Nominalna sila prese	2000kN
Hod protiskivača	200mm
Orbitalni ugao	0-2°
Brzina orbitalne glave	0-340o/min
Broj hodova (max.)	15/min
Brzina pritiskivača (max)	125mm/s
Brzina pritiskivača (proces, max)	26mm/s
Brzina pritiskivača (povratni.hod, max)	150mm
Sila izbacivača	400kN
Hod izbacivača	60mm
Dimenzije radnog prostora (BxH)	290x202mm
Prečnik radnog komada (max.)	150mm
Instalisana snaga	67kW



# Orbitalno kovanje (analiza procesa)

Dužina kontaktnog luka  $L$

$$L = R \cdot \theta$$

$$R = R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} = R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_0 - vt}}$$

$$\theta = \arccos \left( 1 - \frac{s}{R \tan \gamma} \right)$$

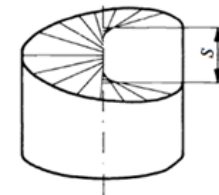
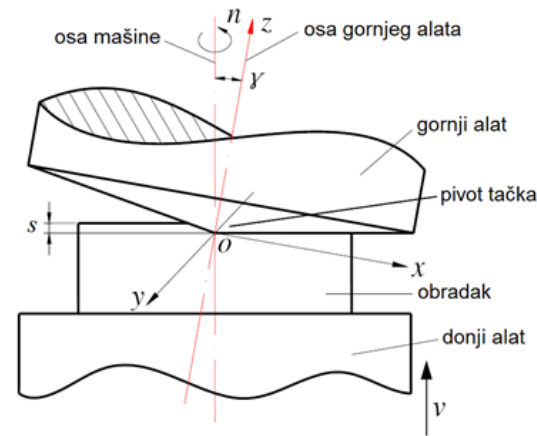
Veličina zone deformisanja (faktor  $M$ )

$$M = \frac{L}{H} = \frac{R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_0 - vt}} \arccos \left( 1 - \frac{s \sqrt{H_0 - vt}}{R_0 \sqrt{H_0} \tan \gamma} \right)}{H_0 - vt}$$

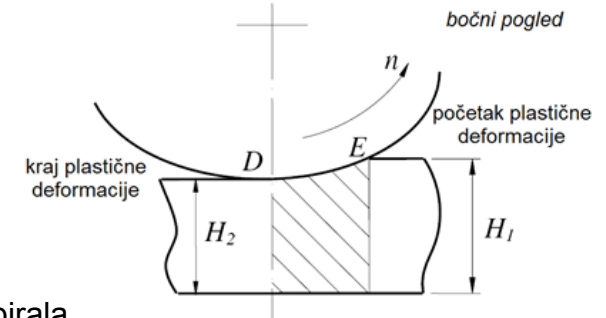
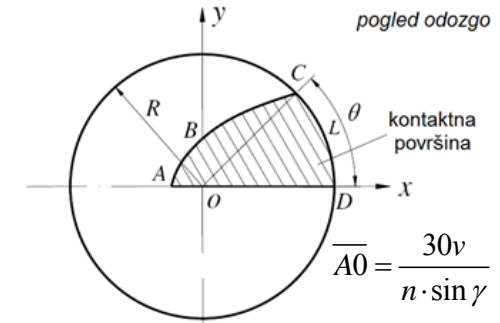
$$M_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{H}{L} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_0 - vt}} \arccos \left( 1 - \frac{s \sqrt{H_0 - vt}}{R_0 \sqrt{H_0} \tan \gamma} \right)}{H_0 - vt} dt$$

Ukupno vreme obrade ( $T$ )

$$T = t_1 + t_2 = \frac{60(H_0 - h)}{n \cdot s} + \frac{2 \cdot 60 \cdot v}{s} = \frac{60}{s} \left( \frac{H_0 - h}{n} + 2v \right)$$



Kontakt – Arhimedova spirala



Vreme kretanja donjeg alata ( $t_1$ )

$$t_1 = \frac{H_0 - h}{v} = \frac{60(H_0 - h)}{n \cdot s}$$

Zaustavno vreme gornjeg alata ( $t_2$ ) – 2 obrtaja

$$t_2 = \frac{2 \cdot 60}{n} = \frac{2 \cdot 60 \cdot v}{s}$$

# Orbitalno kovanje (deformaciona sila)

Srednji kontaktni pritisak između gornjeg alata i radnog predmeta ( $p$ )

$$p_{sr} = f_{\sigma} \cdot \beta \cdot \sigma_m$$

$$f_{\sigma} = 1 + 0,414 \cdot e^{-3,5Q} + 2 \frac{\mu R_0}{H_0} (0,24 \cdot Q + 0,141)$$

$$Q = \frac{s}{2R_0 \tan \gamma}$$

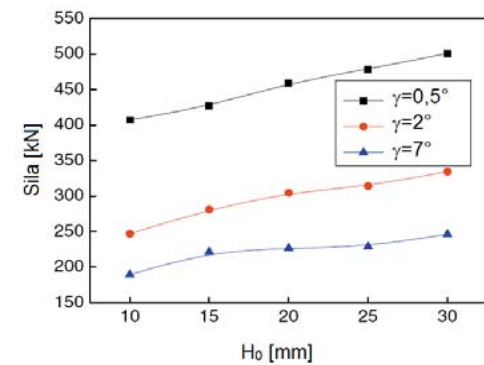
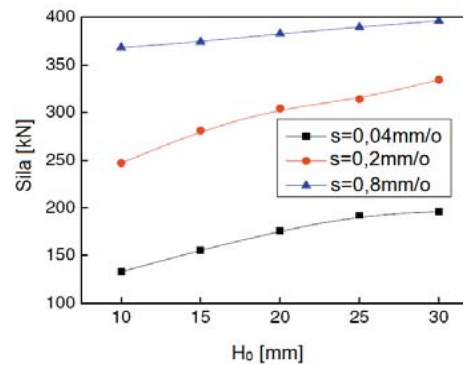
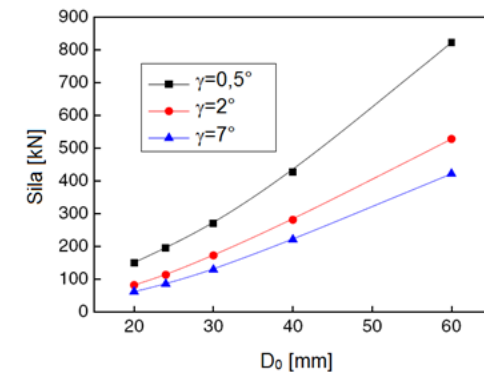
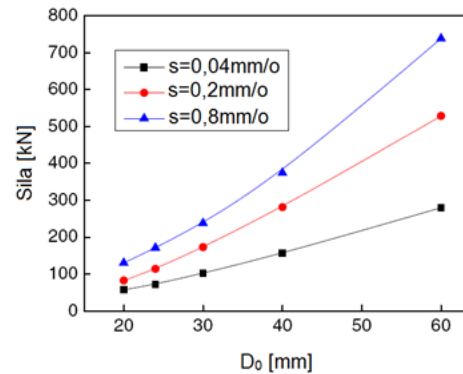
$\beta = 1,15$  – Lode-ov parametar  
 $\mu$  - koeficijent trenja,  
 $\sigma_m$  - zatezna čvrstoća materijala

Deformaciona sila ( $F$ )

$$F = p_{sr} \cdot A_k$$

$$A_k = R^2 \left[ \frac{\theta}{2} - Q(1-Q) \sqrt{\frac{1}{Q} - 1} \right] + \frac{4}{3} R^2 Q^2 \sqrt{\left( \frac{1}{Q} - 1 \right)^3}$$

$$\overline{A0} = 0 \rightarrow A_k = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{s \cdot R}{\gamma}} R$$



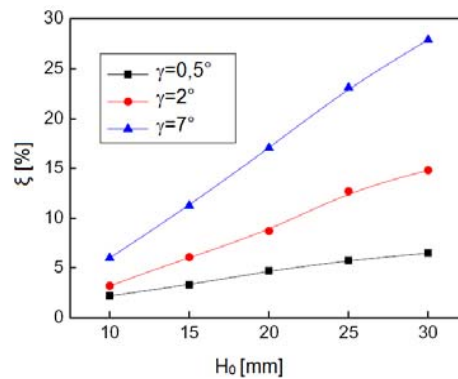
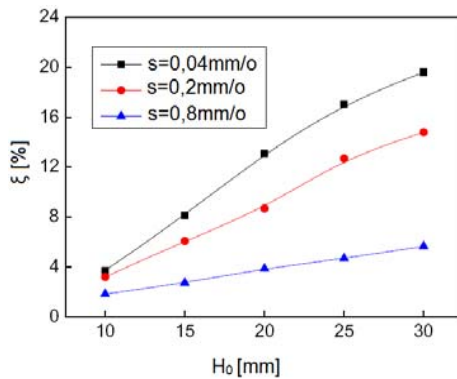
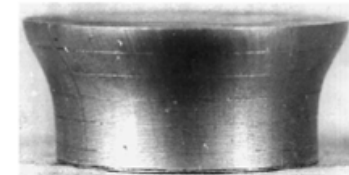
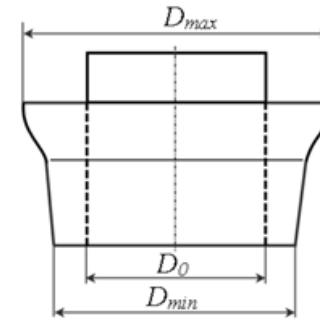
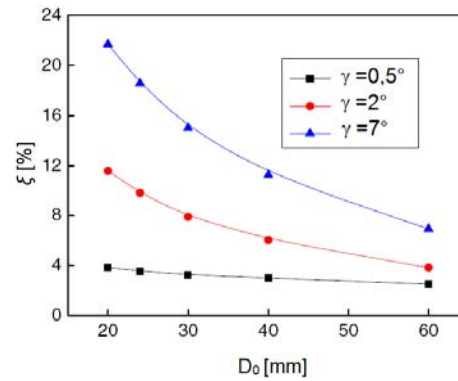
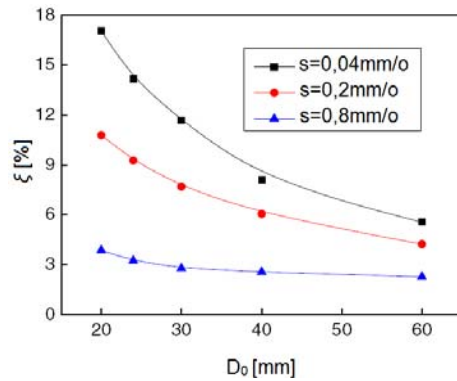


# Orbitalno kovanje (mashroom efekat)

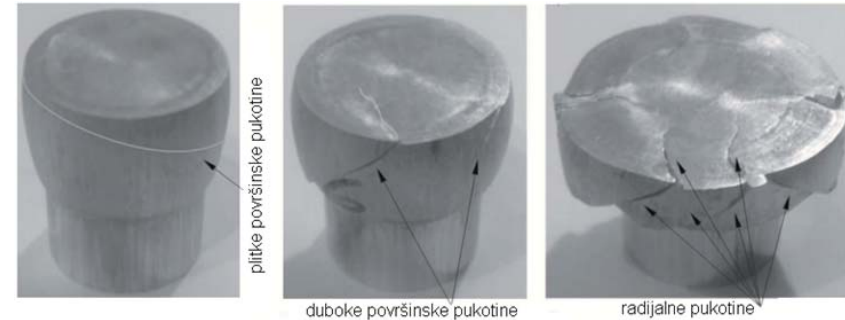
**Mushroom“ efekat** - širenje gornjeg dela obratka tokom procesa deformisanja

- ❖ geometrija priprema ( $D_0$ ,  $H_0$ ),
- ❖ parametri procesa ( $s$ ,  $\gamma$ )
- ❖ trenje u procesu

$$\xi = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_0}$$

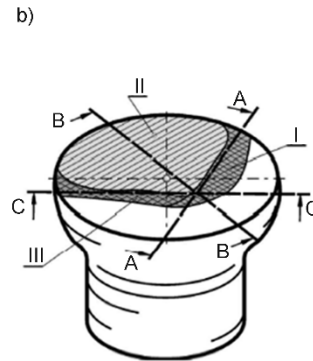
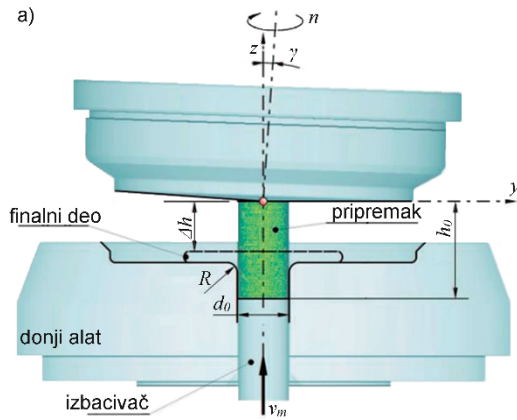


## Defekti pri orbitalnom kovanju

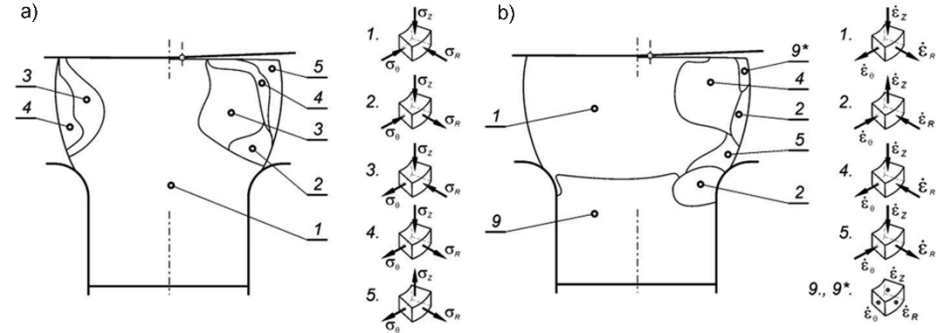


# Orbitalno kovanje (naponsko-deformaciono stanje)

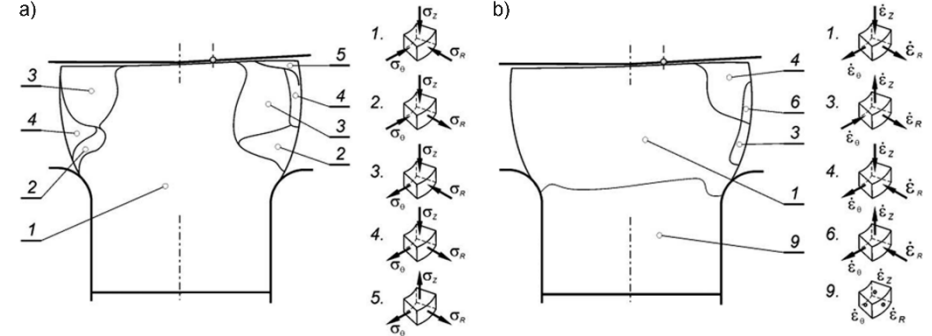
Naponsko i deformaciono stanje – veoma nehomogeno



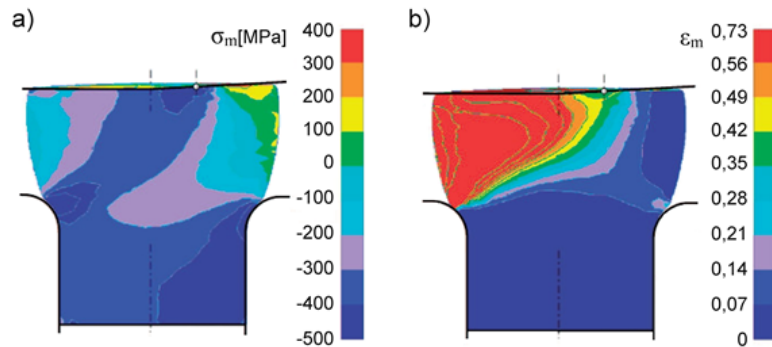
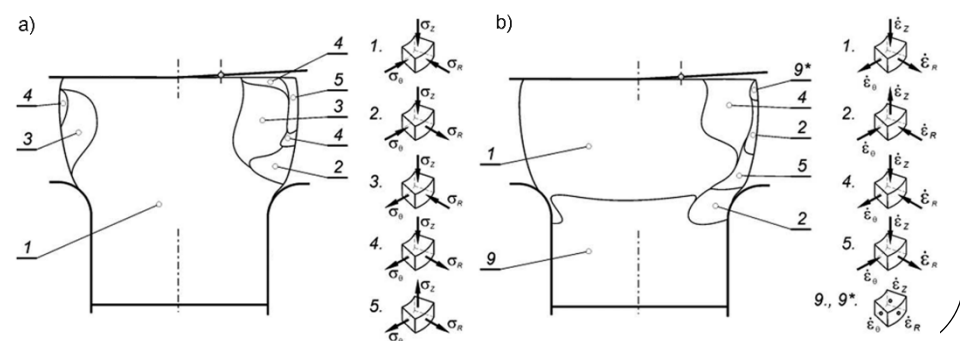
Naponsko (a) i deformaciono stanje (b) u preseku A-A



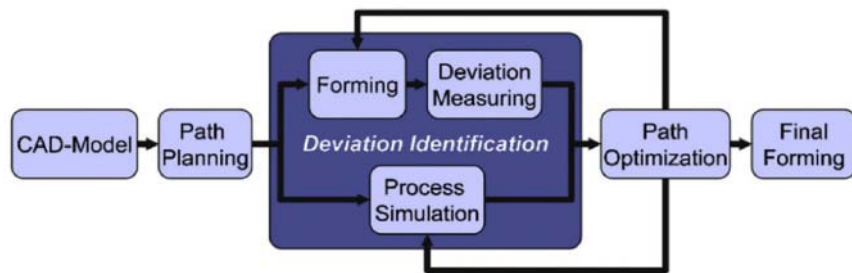
Naponsko (a) i deformaciono stanje (b) u preseku B-B



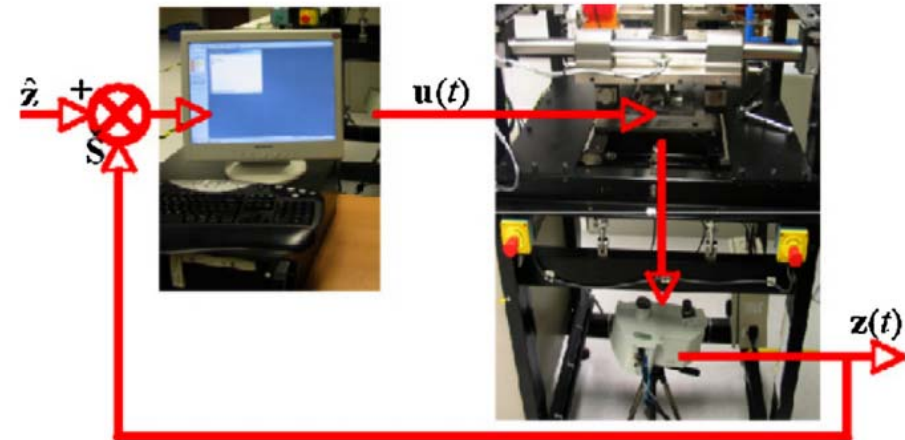
Naponsko (a) i deformaciono stanje (b) u preseku C-C



# Kontrola u procesu inkrementalnog deformisanja



Opšta šema kontrole u procesu inkrementalnog deformisanja



Upravljanje zatvorenom petljom u inkrementalnom oblikovanju lima

