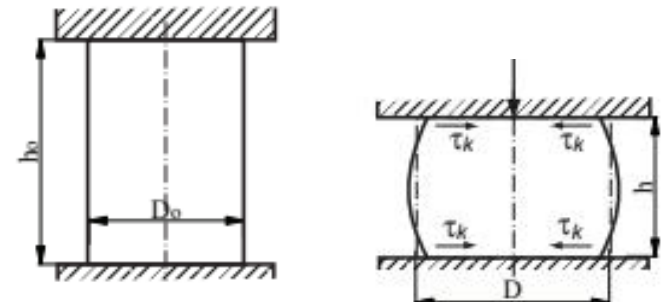


TPD 2020 - Kontaktno trenje

Kontaktno trenje predstavlja otpor relativnom kretanju dva tela u kontaktu između kojih deluje normalni napon.

U postupcima tehnologije plastičnog deformisanja uvek postoji relativno kretanje između materijala alata i materijala obratka zbog čega je trenje sastavni deo svakog procesa deformisanja (osim kod jednoosnog zatezanja).

Kontaktno trenje utiče na povećanje potrebne deformacione sile i deformacionog rada, na habanje alata, kao i na neravnomernost deformacije. Izuzetak je proces valjanja, gde je prisustvo trenja uslov za odvijanje procesa.



Osnovna razlika između trenja u metodama TPD i trenja u kinematskim mašinskim parovima je u tome što se u procesima deformisanja pojavljuju znatno viši kontakni naponi (kod mašinskih parova kod koji se javljaju elastične deformacije pritisak je oko 50 MPa, u metodama TPD taj pritisak može da raste i do 2500 MPa).

Razlika je i u tome što se u metodama TPD menja (najčešće povećava) veličina kontaktnih površina tokom procesa deformisanja.

Na veličinu kontaktnog trenja u TPD utiču:

- **Vrsta procesa**

Svaka metoda TPD ima različita naponska stanja, kao i veličinu i oblik kontaktne površine. Ovi parametri veoma utiču na veličinu trenja. To je jedan od razloga zašto je povoljnije za svaku metodu definisati poseban test za određivanje koeficijenta trenja.

- **Vrsta materijala alata i obratka**

- **Temperatura obrade**

Povećanjem temperature raste trenje do određene veličine, da bi nakon toga počelo da opada. Kod čelika maksimalno trenje se pojavljuje na temperature između 450°C i 550 °C.

- **Brzina deformacije**

Povećanjem brzine deformacije smanjuje se kontaktno trenje.

- **Sredstvo za podmazivanje**

Vrsta sredstva za podmazivanje značajno može da utiče na smanjenje veličine trenja.

- **Stanje kontaktnih površina alat-obradak**

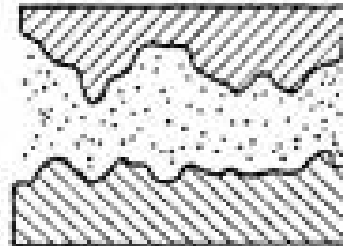
Što je površina alata kvalitetnija, trenje je manje. Česta završna obrada kod alata za plastično deformisanje je poliranje.

Vrste trenja

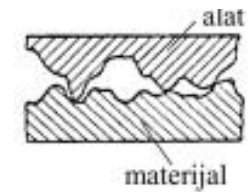
S obzirom na stanje kontaktnih površina u toku deformisanja postoje četiri vrste trenja:

1. Hidrodinamičko trenje
2. Suvo trenje
3. Granično trenje
4. Mešovito trenje

Hidrodinamičko trenje nastaje kada su dve kontaktne površine potpuno razdvojene mazivnim slojem. Ovakav način podmazivanja je teško postići u metodama TPD zbog velikih pritisaka koji se javljaju između alata i obratka. U nekim specijalnim obrada ipak može da se postigne (npr. hidrodinamičko vučenje žice).



Suvo trenje nastaje kada između dodirnih površina alata i obratka nema sredstva za podmazivanje, tj. kada postoji direktan metalni kontakt.



Granično trenje nastaje kada između alata i materijala postoji samo tanak sloj (film) maziva koji može, usled velikih lokalnih pritisaka, da se prekine, što može da dovede do hladnog zavarivanja.



Mešovito trenje je najčešći slučaj u praksi plastičnog deformisanja. To je trenje sa elementima i graničnog i hidrodinamičkog trenja.



Sredstva za podmazivanje

U TPD se koriste različita sredstva podmazivanja, u zavisnosti od vrste obrade, uslova obrade, materijala obratka i alata itd.

Osnovne vrste maziva koja se koriste u metodama TPD su:

- Ulja (mineralna i organska)
- Emulzije (npr. ulje rastvoreno u vodi)
- Čvrsta sredstva za podmazivanje (grafit, molibden, olovni cink-sulfid, sapuni i polimeri)

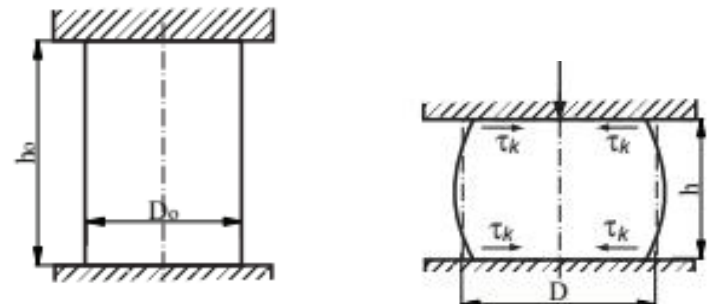
Sredstva za podmazivanje bi trebala da ispunjavaju i ekološke uslove

- Da se lako odstranjuju sa površine dela posle deformisanja
- Da su neškodljiva po zdravlje ljudi i okolinu.

Koeficijent trenja, faktor trenja

Kontaktno trenje nastaje kao posledica relativnog pomeranja materijala obratka u odnosu na površinu alata. Kao posledica tog kretanja stvaraju se tangencijalni naponi u slojevima materijala koji su blizu kontaktne površine.

Da bi se analiziralo naponsko stanje u toku procesa deformisanja bitno je izraziti veličinu tangencijalnog napona preko kontaktnog trenja, odnosno izraziti uticaj kontaktnog trenja na naponsko stanje.



Postoji više načina određivanja uticaja kontaktnog trenja na naponsko stanje, odnosno izražavanja tangencijalnog napona koji nastaje usled trenja.

Tangencijalni napon se najčešće određuje preko:

a) koeficijenta trenja μ

a) konstantnog faktora smicanja m

Koeficijent trenja μ

Tangencijalni napon može se izračunati preko koeficijenta trenja u funkciji normalnog napona na kontaktnoj površini.

U ovom slučaju tangencijalni napon se određuje prema sledećem izrazu

$$\tau_k = \mu \cdot \sigma_n$$

gde su:

τ_k - tangencijalni napon na kontaktnoj površini usled kontaktnog trenja,

σ_n - odgovarajući normalni napon

Koeficijent trenja μ se određuje kao odnos tangencijalnog i normalnog napona. Maksimalna vrednost koeficijenta kontaktnog trenja u procesima plastičnog deformisanja može se odrediti preko maksimalne vrednosti tangencijalnog napona određenog preko uslova plastičnog tečenja.

$$\mu_{max} = \frac{\tau_{max}}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\sigma_e} \cdot \beta = \frac{\sigma_e}{2\sigma_e} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,575$$

gde su

β - koeficijent iz uslova plastičnog tečenja

σ_e - efektivni napon koji je jednak naponu tečenja

Konstantni faktor smicanja m

Kada se tangencijalni napon određuje preko konstantnog faktora smicanja m pretpostavlja se da je tangencijalni napon na kontaktnoj površini konstantan i da iznosi određeni deo maksimalnog tangencijalnog napona.

$$\tau_k = m \cdot \tau_{max}$$

Vrednost tangencijalnog napona na kontaktnoj površini nalazi se u granicama

$$0 < \tau_k < \tau_{max}$$

a konstantni factor smicanja

$$0 < m < 1$$

Veza između koeficijenta trenja μ i konstantnog faktora smicanja m može se odrediti preko uslova plastičnog tečenja

$$\tau_k = m \cdot \tau_{max} = m \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = m \cdot \frac{\sigma_e}{2} \cdot \beta = \mu \cdot \sigma_e$$

odakle je

$$\frac{m}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = \mu$$

odnosno

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

Orijentacione vrednosti koeficijenta trenja za pojedine vrste trenja:

- Topla obrada $\mu = 0,4 - 0,5$
- Hladna obrada bez podmazivanja $\mu = 0,2 - 0,3$
- Hladna obrada sa podmazivanjem $\mu = 0,08 - 0,15$

Određivanje koeficijenta trenja sabijanjem prstena

Ova metoda spada u najčešće primenjivane metode za određivanje koeficijenta trenja.

Zasniva se na osetljivosti deformacije unutrašnjeg prečnika prstena d na uslove trenja na kontaktnim površinama.

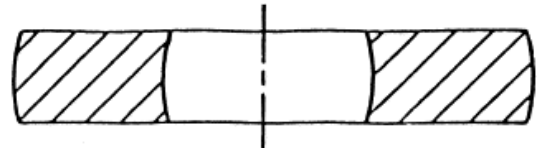
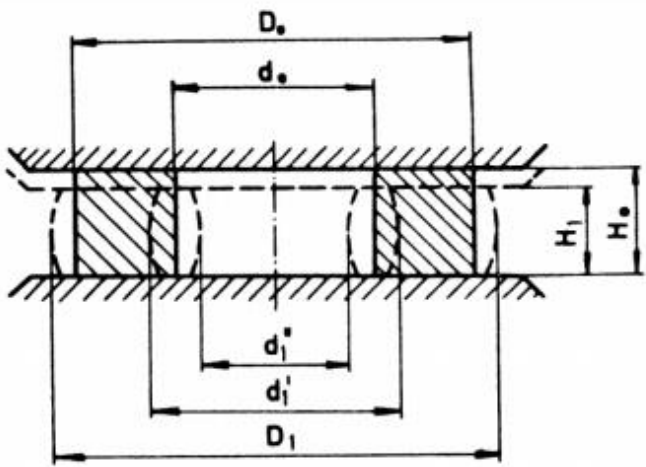
Prsten se sabija sa početne visine H_0 na visinu H_1 pod dejstvom deformacione sile.

Ovaj postupak je standardizovan. Odnos početnih dimenzija prstena treba da bude $D_0:d_0:H_0 = 6:3:2$ (npr. 18mm:9mm:6mm).

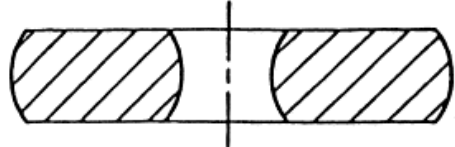
U eksperimentu prsten se sabija postepeno, pri čemu se posle svakog priraštaja hoda prese prekida proces i meri trenutna vrednost visine prstena H i unutrašnjeg prečnika d .

Na taj način mogu da se odrede parovi jediničnih deformacija visine i unutrašnjeg prečnika (ϵ_H, ϵ_d) za svaki ostvareni priraštaj hoda na osnovu kojih množe da se konstruiše kriva $\epsilon_d = f(\epsilon_H)$.

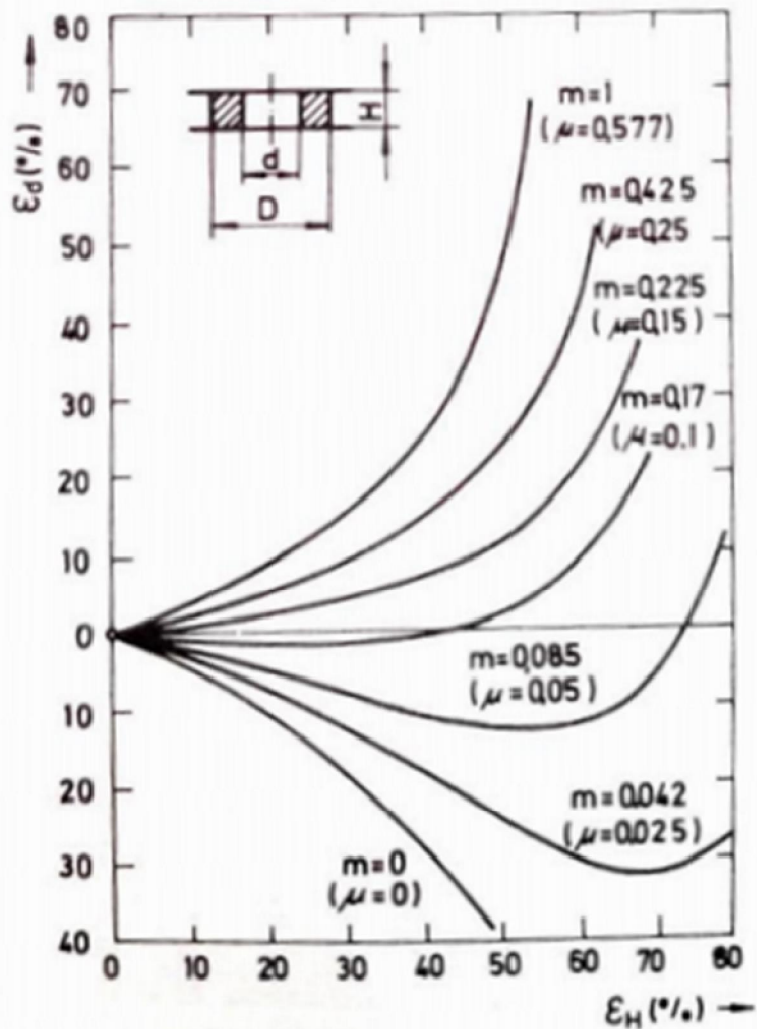
Kada se tako određena kriva uporedi sa etalon dijagramom moguće je približno odrediti vrednost koeficijenta trenja



Low friction (good lubrication)



High friction (poor lubrication)



Etalon dijagram za određivanje koeficijenta trenja kod slobodnog sabijanja šupljeg valjka - prstena

U zavisnosti od veličine kontaktnog trenja prsten se može deformisati na tri načina:

1 - dvosmernim tečenjem metala. U tom slučaju, prečnik zamišljene cilindrične površine d_n na kojoj nema relativnog pomeranja čestica materijala u odnosu na površinu alata, se nalazi između spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika prstena

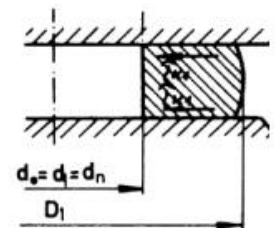
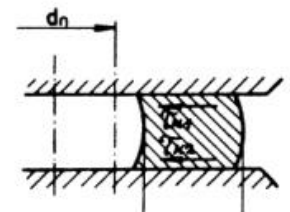
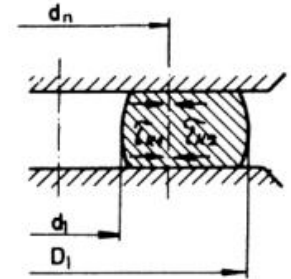
$$d_1 < d_n < D_1$$

2 - jednosmernim tečenjem metala sa povećanjem i unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika pri čemu važi

$$d_n < d_1$$

3 - jednosmernim tečenjem metala bez promene unutrašnjeg prečnika pri čemu važi

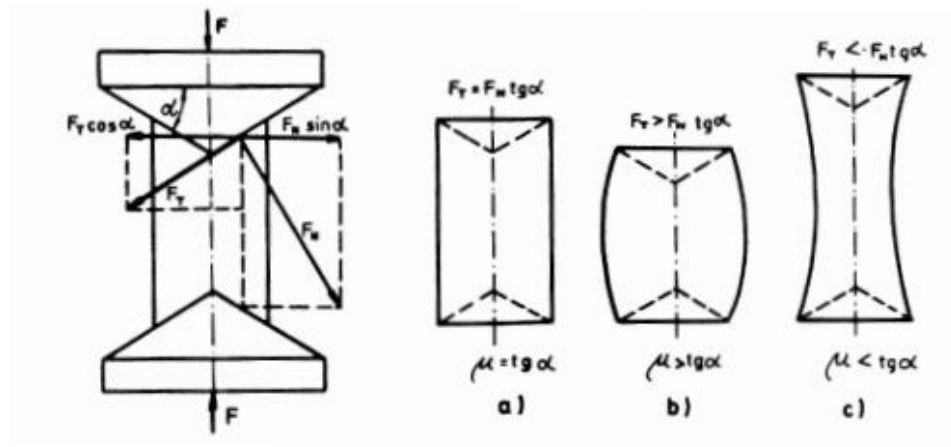
$$d_n = d_1 = d_0$$



Određivanje koeficijenta trenja sabijanjem valjaka pomoću konusnih alata

Kod ovog testa koriste se cilindrični uzorci u koje se sa gornje i donje strane utiskuju konusni alati pod dejstvom sile F . Usled delovanja deformacione sile F na kontaktnoj površini javljaju se normalna sila F_N i tangencijalna sila F_T .

U zavisnosti od horizontalnih komponentata ovih sila nastupiće odgovarajuće deformisanje cilindra.



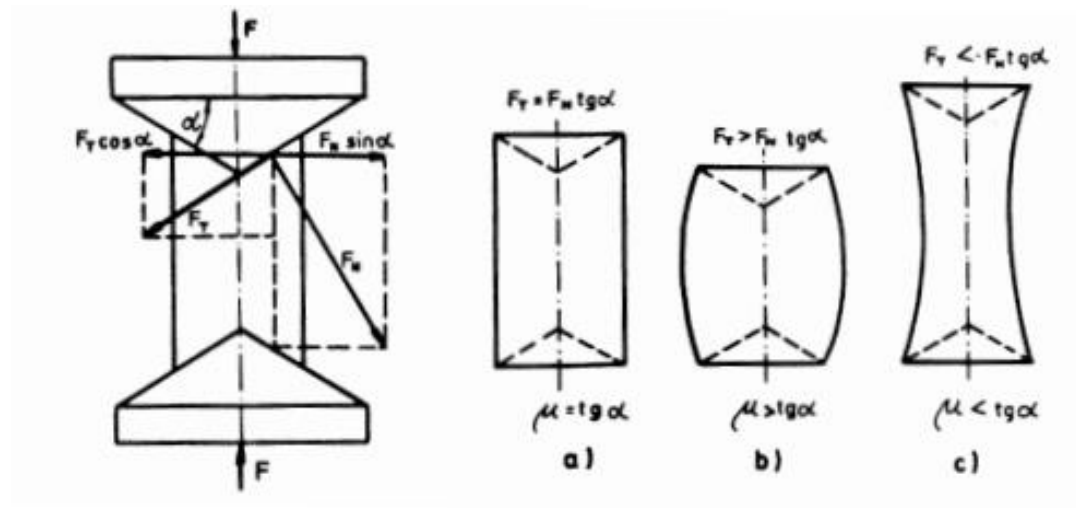
Ako su komponente sila u horizontalnoj ravni jednake
odnosno

$$F_T \cos \alpha = F_N \sin \alpha$$

tada se koeficijent trenja može odrediti kao

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

i u tom slučaju posle deformacije ostaje cilindrični oblik (slika pod a).

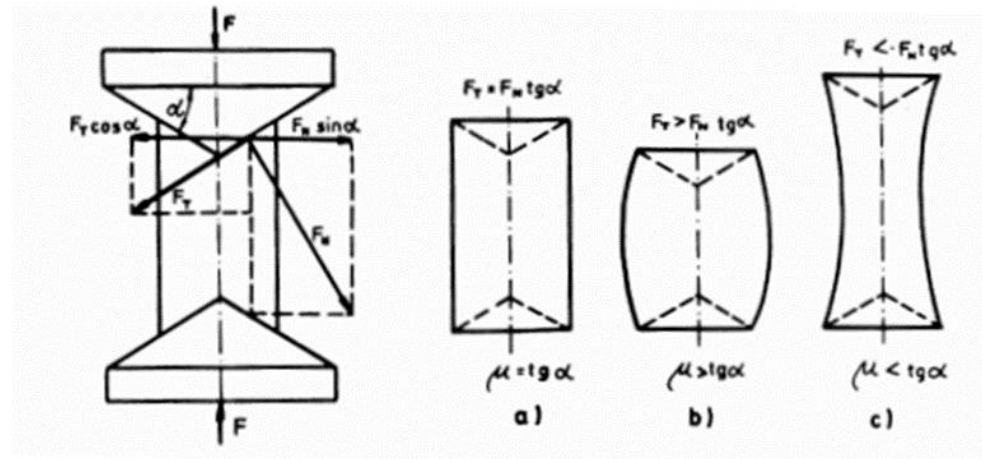


U slučaju da je horizontalna komponenta sile trenja veća od horizontalne komponente normalne sile, valjak se deformiše u bačvasti oblik prema slici pod b) u kom slučaju važe relacije

$$F_T \cos \alpha > F_N \sin \alpha$$

$$F_T > F_N \operatorname{tg} \alpha$$

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

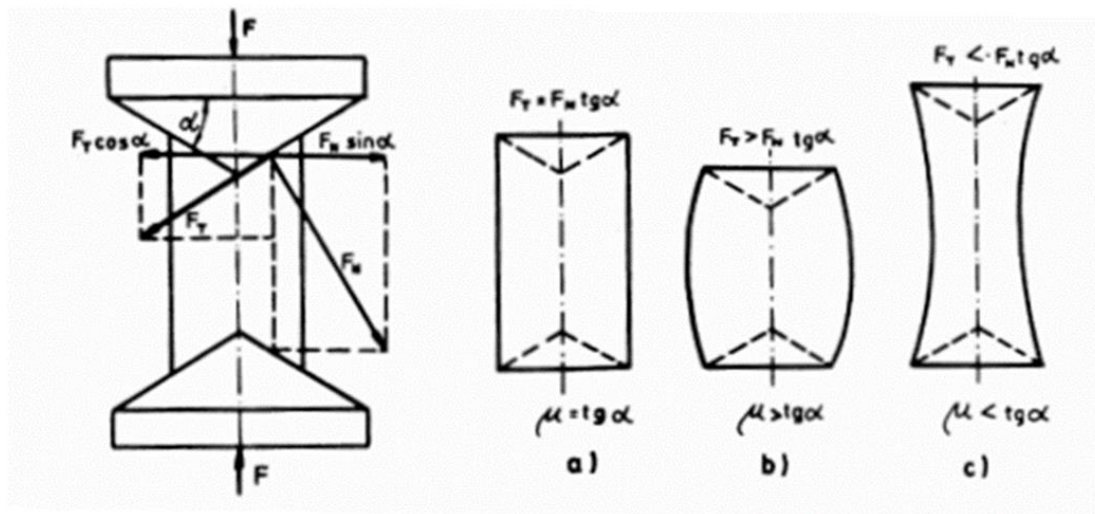


Treći slučaj nastaje ako je horizontalna komponenta sile trenja manja od horizontalne komponente normalne sile (slika pod c).

$$F_T \cos \alpha < F_N \sin \alpha$$

$$F_T < F_N \operatorname{tg} \alpha$$

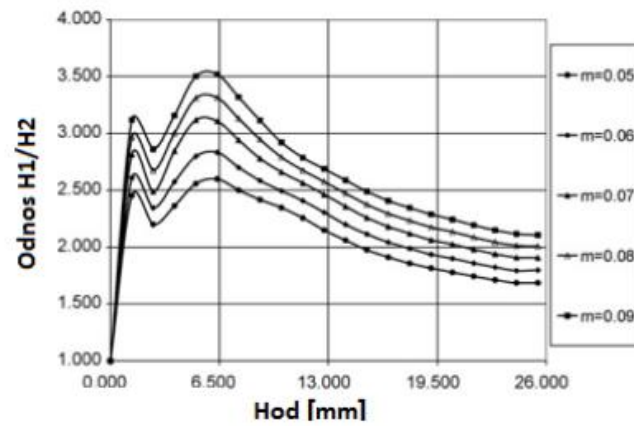
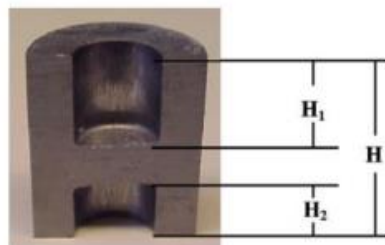
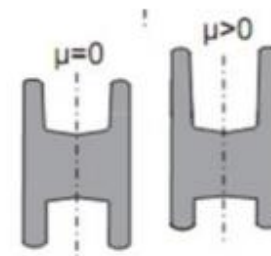
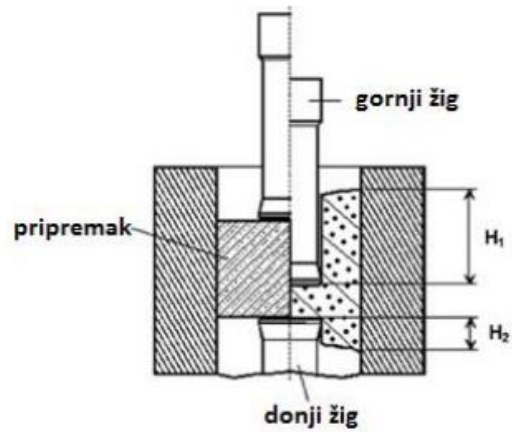
$$\mu < \operatorname{tg} \alpha$$



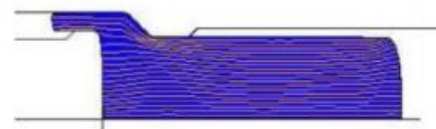
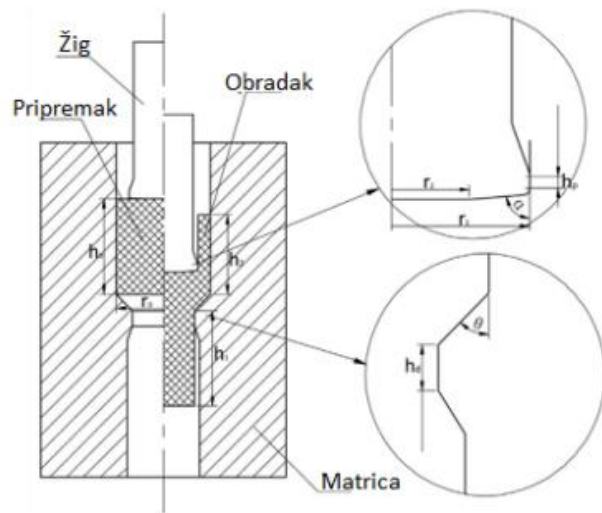
Na ovaj način se na osnovu oblika deformisanog uzorka može proceniti vrednost koeficijenta trenja μ .

I pored toga što test sabijanja prstena spada u najčešće primenjivane načine za određivanje koeficijenta trenja, razvijeni su i drugi testovi kod kojih postoji uticaj i nekih drugih faktora na proces deformisanja, kao što je povećanje površine obratka, odnosno povećanje kontaktne površine što je karakteristično za metode poput hladnog istiskivanja.

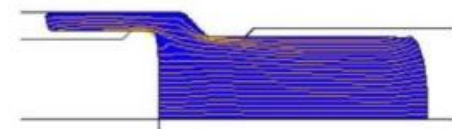
Test dvostrukog suprotnosmernog istiskivanja (double cup extrusion experiment)



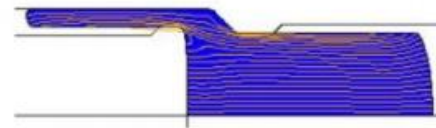
Test kombinovanog istosmernog i suprotnosmernog istiskivanja



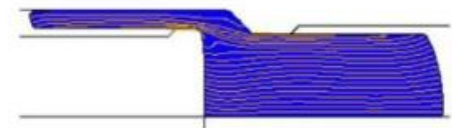
(a) $m = 0.0$



(b) $m = 0.3$



(c) $m = 0.5$



(d) $m = 0.8$