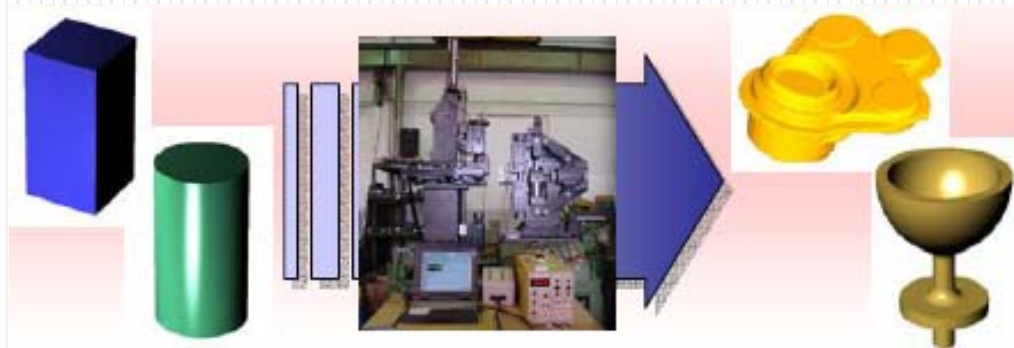


NAPREDNE METODE TEHNOLOGIJE PLASTIČNOG DEFORMISANJA

dr Mladomir Milutinović, vanredni profesor
dr Marko Vilotić, docent



Deformabilnost materijala

- **Deformabilnost** - Ključni pojam u području obrade deformisanjem preko koga se uspostavlja veza između ponašanja materijala unutar obradnog sistema, parametara procesa i spoljašnjih uslova u toku procesa obrade plastičnim deformisanjem.
- U literaturi postoji niz definicija deformabilnosti materijala i ovaj pojam se često dovodio u vezu s pojmom **plastičnosti materijala**.
- **Deformabilnost materijala je osobina materijala da se u određenim uslovima obrade trajno deformiše bez pojave razaranja, lokalizacije deformacije ili bilo kog drugog oštećenja (mikro)strukture.**
- **Plastičnost materijala**, takođe predstavlja sposobnost materijala da se trajno deformiše, ali u kontrolisanim, **stalno istim uslovima obrade**, odnosno u uslovima koji ne uzimaju u obzir specifičnosti određenog realnog procesa deformisanja.
- **Za određivanje pokazatelja plastičnosti najčešće se koriste standardna ispitivanja na zatezanje.** Na bazi ispitivanja na zatezanje mogu se odrediti osnovni parametri plastičnosti, čije numeričke vrednosti služe za preliminarnu procenu u kojoj meri je dati materijal pogodan za obradu plastičnim deformisanjem.

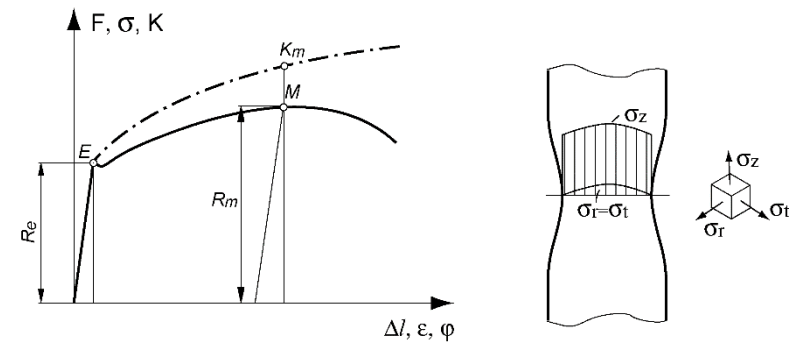
Parametri plastičnosti

Odnos granice razvlačenja i čvrstoće

$$a_{\sigma} = \frac{R_e}{R_m} \leq 1$$

Eksponent deformacionog ojačavanja ($n = \varphi_r$)

$$K = C \cdot \varphi_e^n$$

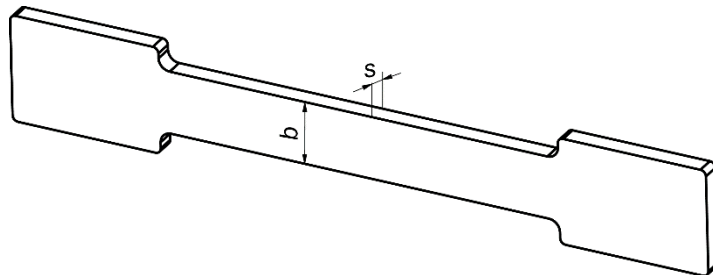


Kontrakcija preseka pri ispitivanju na zatezanje ψ

- $\psi > 60\%$ – materijal ima visoka plastična svojstva
- $\psi = 50\text{--}60\%$ – dobra plastična svojstva
- $\psi < 50\%$ – niska plastičnost materijala

Koeficijent normalne anizotropije ili r faktor

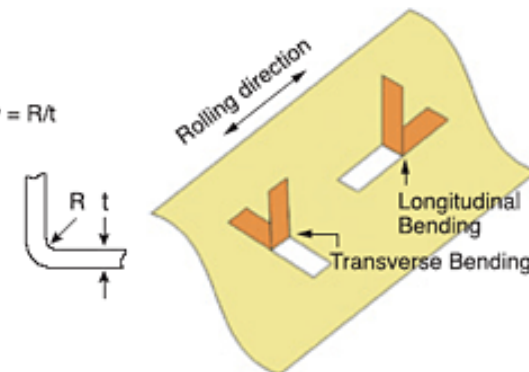
$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \geq 1$$



Relative Formability = R/t

R: Inside radius

t: Thickness



Deformabilnost materijala

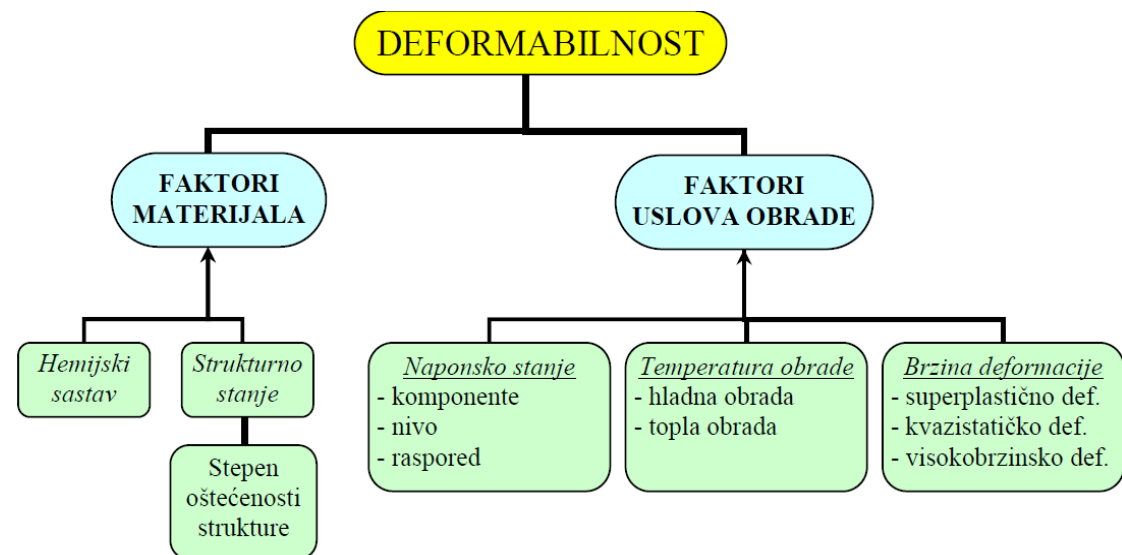
Deformabilnost materijala je osobina materijala da se u određenim uslovima obrade trajno deformiše bez pojave razaranja, lokalizacije deformacije ili bilo kog drugog oštećenja (mikro)strukture

Deformabilnost materijala zavisi od:

- vrste materijala definisanog hemijskim sastavom (H),
- strukture materijala (S),
- temperature obrade (T),
- brzine deformacije ($\dot{\epsilon}$),
- naponskog stanja (T_s)

Funkcija deformabilnosti

$$D = f \left(H, S, T, \dot{\epsilon}, T_s, \dots \right)$$



Ne postoji jedinstveni test pomoću koga se može odrediti deformabilnost materijala!!!!

Deformabilnost materijala – faktori materijala

Faktori materijala - sopstvena deformabilnost ili plastičnost materijala

Hemijski sastav materijala nominalno određuje vrstu materijala koja sama po sebi u velikoj meri određuje granicu obradivosti.

Čelični materijali – s obzirom na deformabilnost dele se na:

- **Ugljenične čelike** – koji mogu biti niskougljenični i čelici s povećanim sadržajem ugljenika. Bolja plastična svojstva imaju niskougljenični čelici.
- **Legirane čelike** – koji se s obzirom na deformabilnost mogu podeliti u dve grupe:
 - a) čelici legirani sa **Si, Ni, Co, Cu, Al i Mn** koji stvaraju čvrst rastvor u feritnoj osnovi, povećavaju granicu tečenja, jačinu materijala i deformacioni otpor (ojačavanje materijala) **ali bitnije ne umanjuju deformabilnost materijala.**
 - b) čelici legirani elementima koji stvaraju karbide: **Mn→Cr→W→Mo→V→Ti i C**
Dvofazni (nehomogeni) materijal (meka feritna osnova i tvrdi karbidi).
Ovi elementi ne utiču bitno na granicu tečenja, jačinu materijala i deformacioni otpor, međutim nepovljno utiču na deformabilnost materijala.
Obradivost (hladna obrada) zavisi od oblika i rasporeda karbida. Loptasti oblik karbida i što ravnomerniji raspore – povećanje deformabilnosti
- **Bor** – legirajući čelici namenjeni za hladnu obradu treba da sadrže bor jer on poboljšava plastična svojstva. Dezoksidacija i denitrizacija.

Deformabilnost materijala – faktori materijala

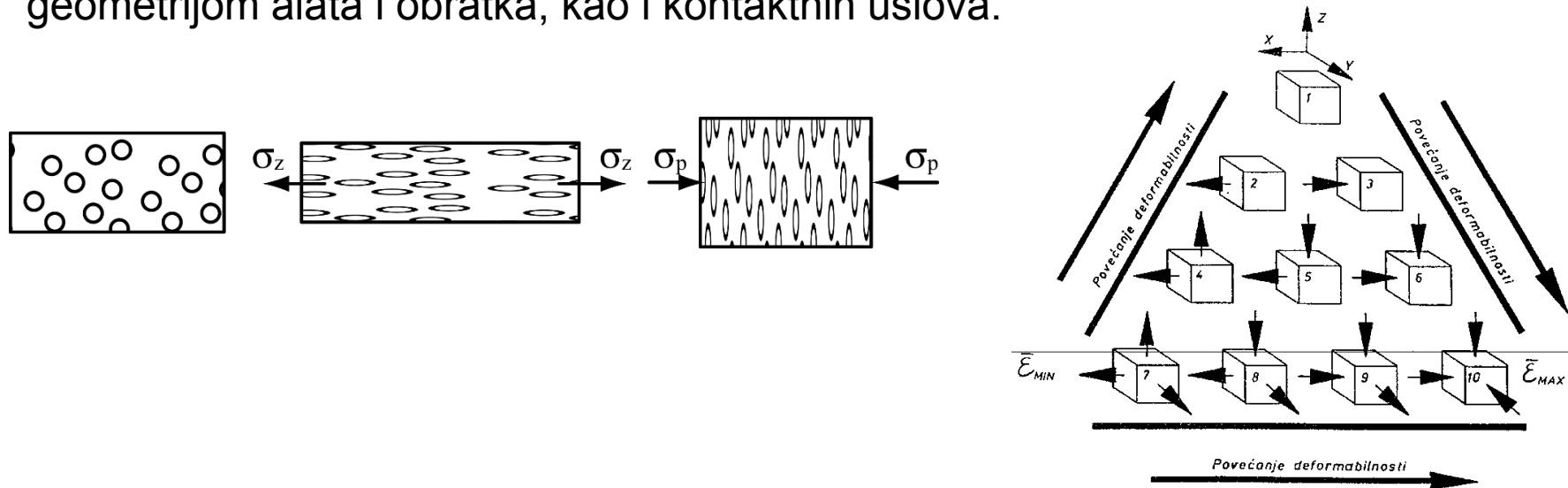
- ✓ **Strukturno stanje materijala** zavisi od hemijskog sastava i termičkog tretmana materijala i značajno utiče na plastičnost.
- ✓ Termičkom obradom se za isti hemijski sastav materijala dobijaju različita strukturna stanja, što uslovljava i različito ponašanje istog materijala u obradnom sistemu.
- ✓ Kod ugljeničnih čelika bitan je oblik perlita u strukturi ferita. Loptasti oblik – sferodizacija i dinamička sferodizacija (termička obrada + plastično deformisanje).
- ✓ Generalno, najpovoljniji oblik strukture za plastično deformisanje je meko žarena struktura s ravnomernom krupnoćom zrna i čvrstih čestica loptastog oblika.
- ✓ Primenom termičke obrade moguće je, u određenoj meri, prilagoditi/podesiti mikrostrukturu materijala u smislu povećanja deformabilnosti. U praksi je čest slučaj da se prilikom višefazne obrade deformisanjem između dve faze deformisanja radni komad podvrgne termičkoj obradi (žarenju) kako bi se efekat deformacionog ojačanja neutralisao.

Deformabilnost materijala – faktori uslova obrade

Temperatura obrade takođe je jedan od važnih faktora deformabilnosti, čijim povećanjem raste mogućnost deformisanja odnosno deformabilnost.

Brzina deformacije utiče na mehanizme plastične deformacije, pa samim tim i na deformabilnost materijala. Kod konvencionalnih – kvazistatičnih procesa obrade ovaj faktor bitnije ne utiče na deformabilnost. Teško obradivi materijali se u pojedinim slučajevima mogu uspešno obrađivati visokobrzinskom obradom

Naponsko stanje jedan je od najznačajnijih faktora koji utiču na veličinu deformacije pre pojave razaranja materijala. Ovaj faktor je važan i zato što se na njega može uticati promenom elemenata obradnog sistema, pre svega geometrijom alata i obratka, kao i kontaktnih uslova.



Granica obradivosti

Granična deformabilnost pri zapreminskom deformisanju izražava maksimalnu mogućnost oblikovanja materijala u zadatim uslovima obrade i definisana je **funkcijom deformabilnosti** .

Kvantitativna mera deformabilnosti je ukupno ostvarena efektivna deformacija do trenutka pojave oštećenja strukture (razaranje ili lokalizacija deformacije), a naziva se **granična deformacija** φ_{eg} .

Ako se u jednačini: $D_M = \varphi_{eg} = f(H, S, T, \dot{\varphi}, T_\sigma, \dots)$

faktori materijala (H), strukture (S), temperature (T) i brzine deformacije (φ) zadrže na konstantnom nivou, tada se funkcija deformabilnosti svodi na relaciju:

$$D_M = \varphi_{eg} = f(T_\sigma)$$

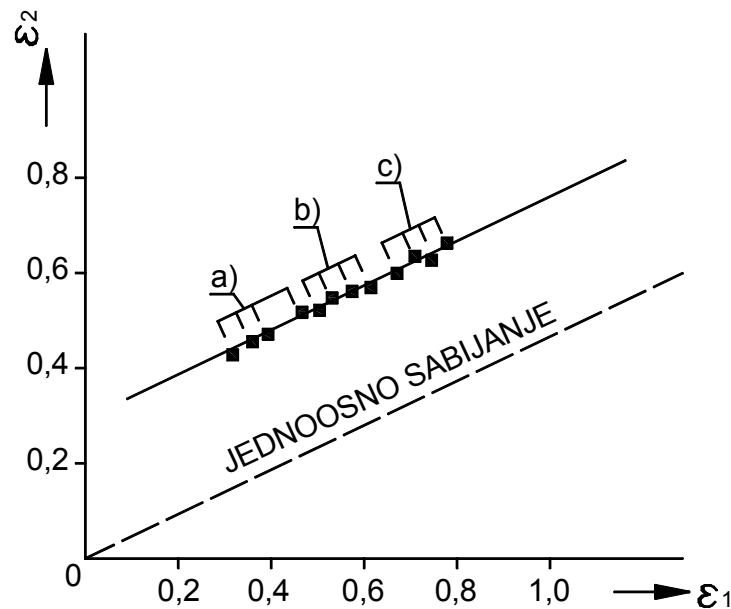
Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju – metode određivanje

- Deformabilnost materijala se grafički predstavlja preko **dijagrama granične deformabilnosti – DGD**.
- Postoje dvije metodologije koje se koriste za definisanje dijagrama granične deformabilnosti u oblasti zapreminskog deformisanja.
- Prva metodologija se bazira na **deformacionom kriterijumu** prema kojem do razaranja materijala dolazi kada glavne deformacije (φ_1 i φ_2) dostignu kritičnu vrednost.
- Druga metodologija se zasniva na **naponskom kriterijumu** prema kojem do razaranja materijala dolazi kada efektivna deformacija dostigne kritičnu vrednost pri određenim naponskim uslovima. Uticaj naponskog stanja se predstavlja preko **pokazatelja naponskog stanja (β)**. Na ovaj način dobijen dijagram granične deformabilnosti grafički predstavlja funkcionalnu zavisnost granične efektivne deformacije i pokazatelja naponskog stanja

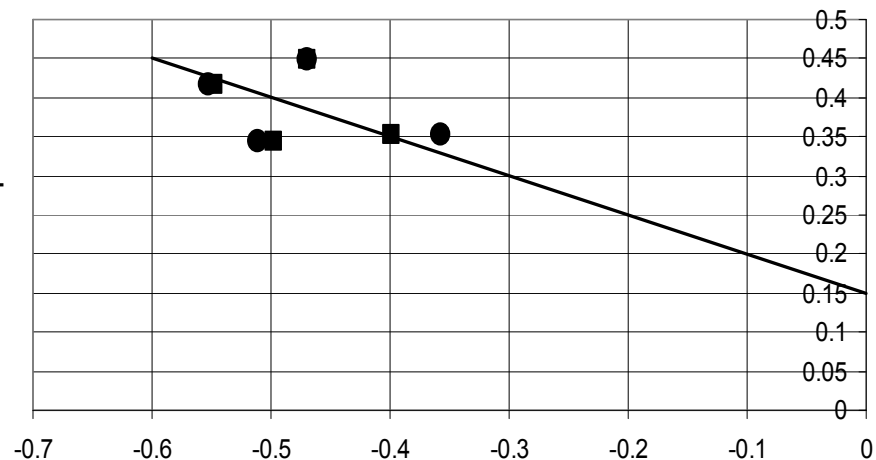
$$D_M = \varphi_{eg} = f(T_\sigma) = f(\beta)$$

Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju – deformacioni kriterijum

- Zasniva se na određivanju zavisnosti graničnih vrednosti dveju glavnih deformacija (φ_1 i φ_2), tj. deformacija u trenutku pojave pukotine.
- Ovakav pristup određivanja dijagrama granične deformacije prvenstveno se *koristi u područja oblikovanja lima*, a u poslednje vreme primenjuje se i u području zapreminskog deformisanja.



DGD pri sabijanju ravnim pločama
a) hrapav alat, b) poliran alat, c) podmazan alat



DGD pri sabijanju cilindričnih uzoraka koničnim pločama

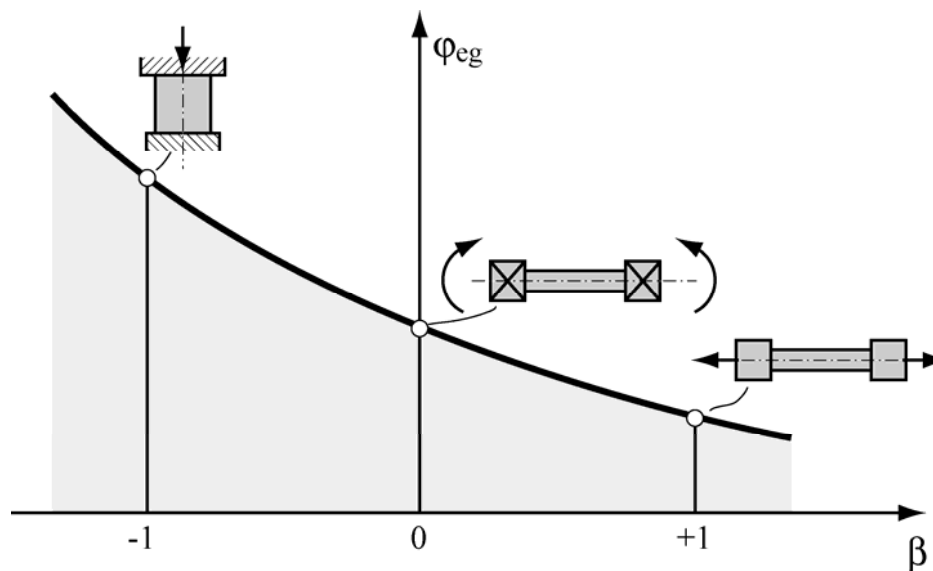
Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju – naponski kriterijum. Opšti princip.

- ❑ Efektivna deformacija pri kojoj nastaje početak neželjenog deformisanja (lokalizacija deformacije, pukotina-lom itd.) je granična deformacija (φ_{eg}) i ona je pokazatelj deformabilnosti materijala.
- ❑ Uticaj naponskog stanja na vrednost granične deformacije uzima se preko **pokazatelja naponskog stanja β** , koji se u nekim literaturnim izvorima naziva naponski indeks deformabilnosti

$$\beta = \frac{J_1}{\sigma_e} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_e} = \frac{3\sigma_{sr}}{\sigma_e} = \text{const.}$$

Dijagram granične deformabilnosti, dobijen na ovaj način, predstavlja grafičku interpretaciju funkcionalne zavisnosti granične efektivne deformacije od pokazatelja naponskog stanja.

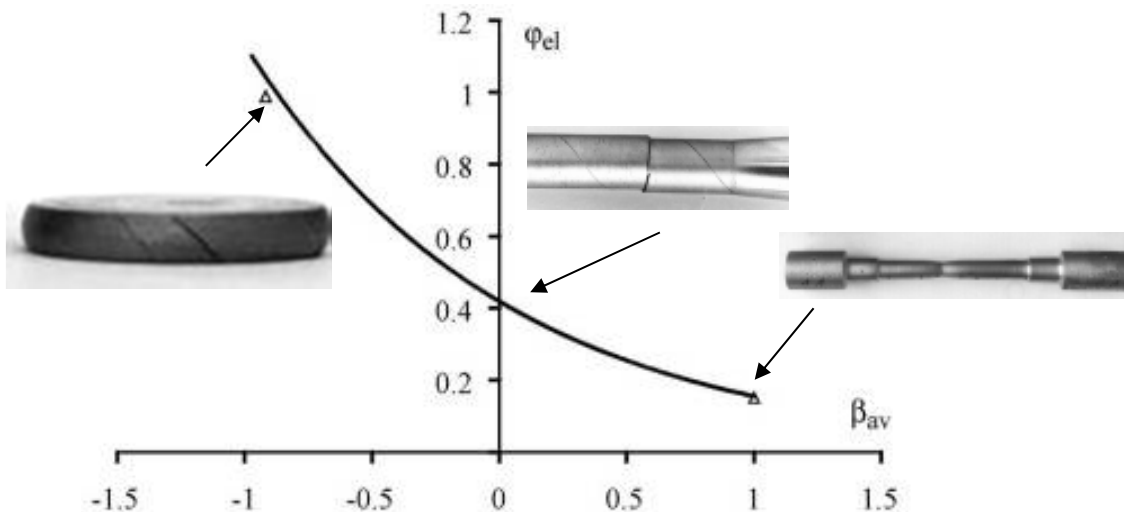
$$\varphi_{eg} = f(T_\sigma) = f(\beta)$$



Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju – naponski kriterijum

Dijagram granične deformabilnosti određuje se **eksperimentalno**, primenom jednostavnih metoda deformacije:

- jednoosno zatezanje $\beta = +1$
- jednoosno sabijanje $\beta = -1$
- torzija $\beta = 0$



Dijagram granične deformabilnosti Č1431

VAŽNO

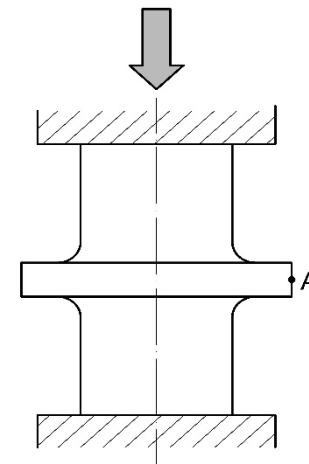
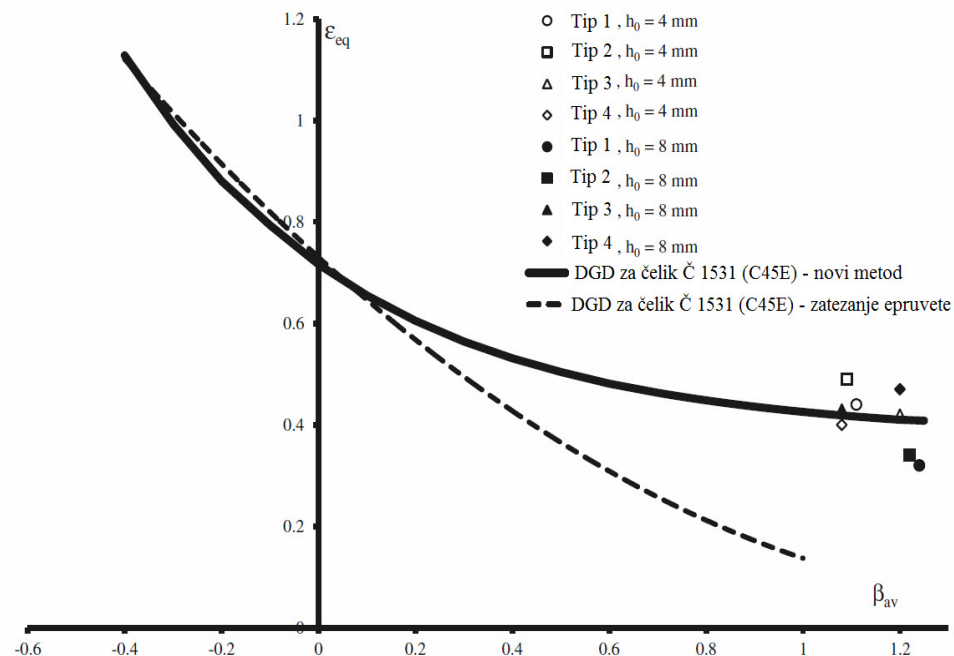
Samo kod **monotonih procesa** deformisanja je ispunjen uslov **$\beta = \text{const}$** , tj. pokazatelj naponskog stanja se ne menja tokom procesa deformisanja.

Pri određivanju pokazatelja naponskog stanja uzima se samo maksimalni i minimalni napon ostvaren u toku procesa.

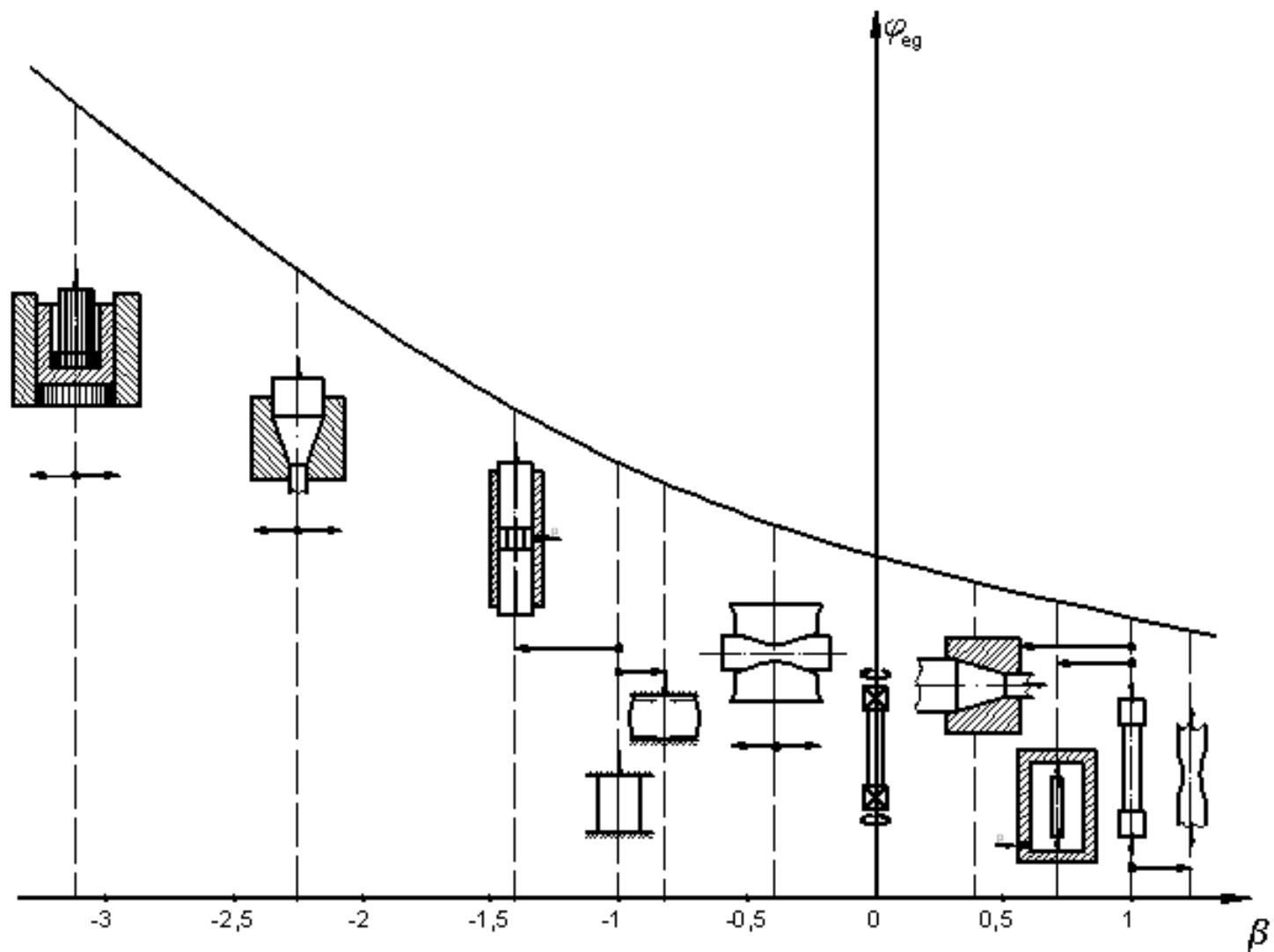
Dijagram granične deformabilnosti pri zapreminskom deformisanju – naponski kriterijum

Dijagram granične deformabilnosti određuje se **eksperimentalno**, primenom jednostavnih metoda deformacije:

- jednoosno zatezanje $\beta = +1$???
- *sabijanje cilindra sa prstenom* $\beta = +1$
- *jednoosno sabijanje* $\beta = -1$
- *torzija* $\beta = 0$

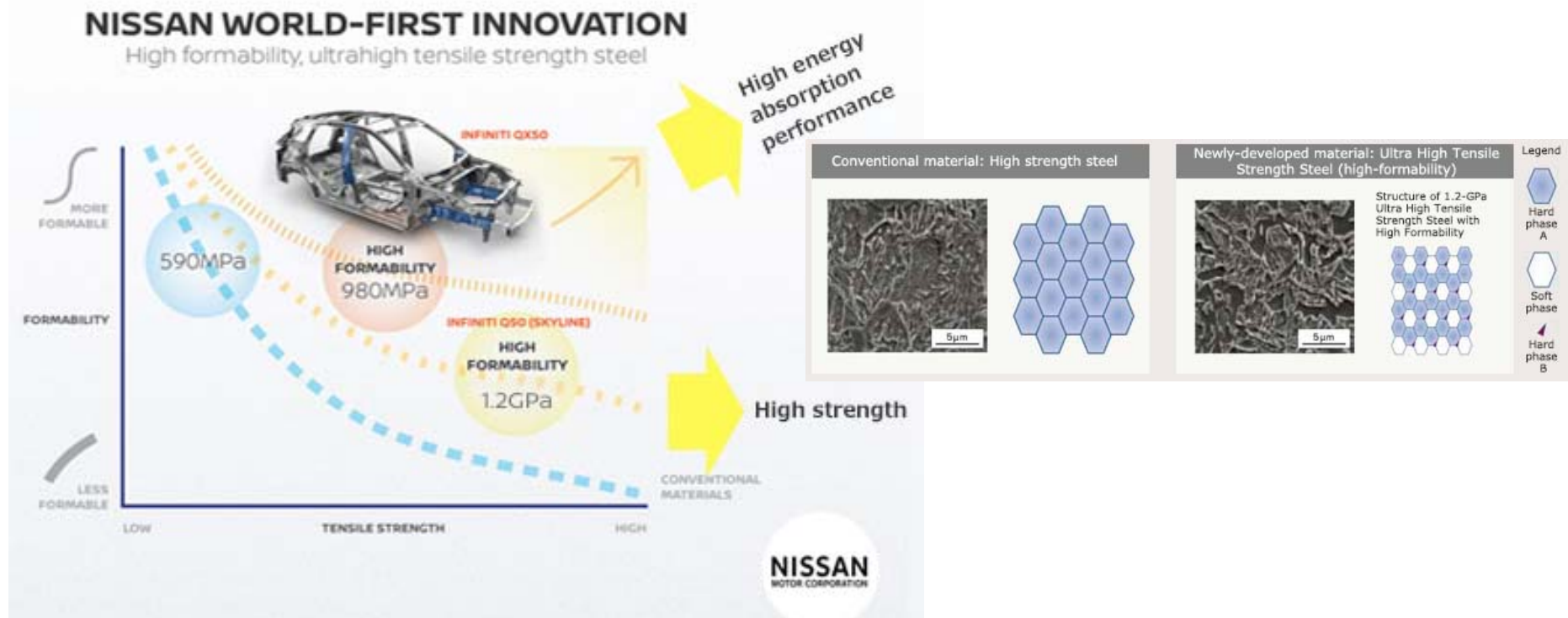


Položaj pojedinih metoda u dijagramu granične deformabilnosti



Primena dijagrama granične deformabilnosti

- Dijagram granične deformabilnosti se koristi za projektovanje procesa hladnog zapreminskog deformisanja, sa ciljem optimizacije uslova obrade.
- Smanjenje broja faza kako bise smanjili troškovi proizvodnje.
- Oblikovanje teško-deformabilnih materijala.
- Ovaj kriterijum je ugrađen u neke softverske pakete kao što je QFORM



Testovi za određivanje dijagrama granične deformabilnosti

Moguća upotreba različitih procesa hladnog zapreminskog deformisanja uz uslov:

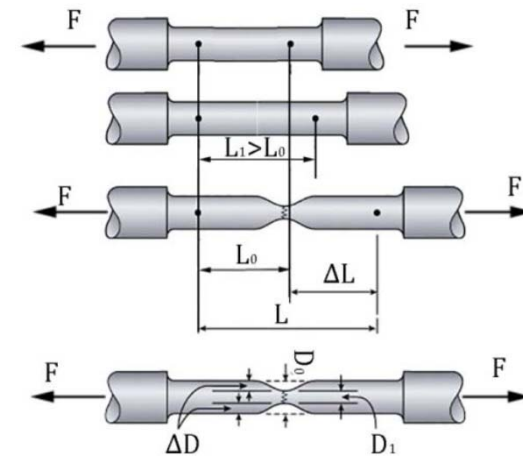
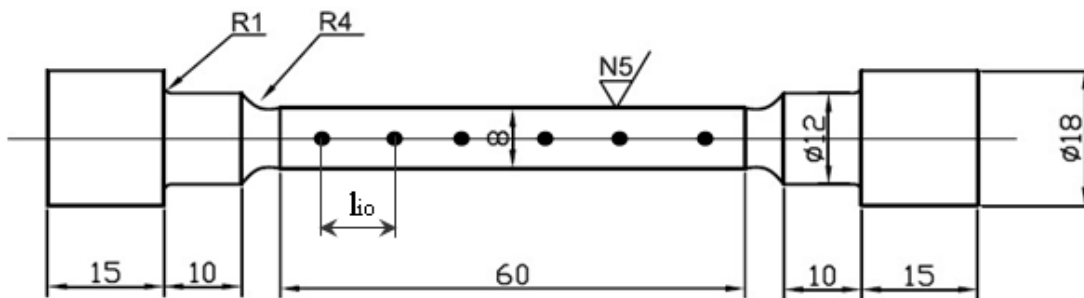
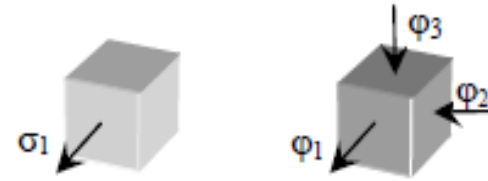
- da se u procesu pojavljuju pukotine i
 - da postoji mogućnost preciznog određivanja komponenti napona i deformacija
-
- *Ispitivanje zatezanjem*
 - *Ispitivanje na uvijanje*
 - *Slobodno sabijanje valjka*
 - *Slobodno sabijanje valjka sa prstenom*
 - Dvoosno zatezanje - tankozida cev pod pritiskom
 - Sabijanje valjka profilisanim alatima
 - Sabijanje prizmatičnih priprema itd.

Ispitivanje zatezanjem

- Granična deformacija jednaka je ravnomernoj deformaciji $\varphi_{eg} = \varphi_r = \varphi_{em} = n$
- Pokazatelj naponskog stanja

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0, \sigma_1 = \sigma_e$$

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1}{\sigma_e} = \frac{K}{K} = +1$$

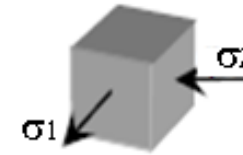


$$\varphi_i = \ln \frac{l_i}{l_{io}}$$

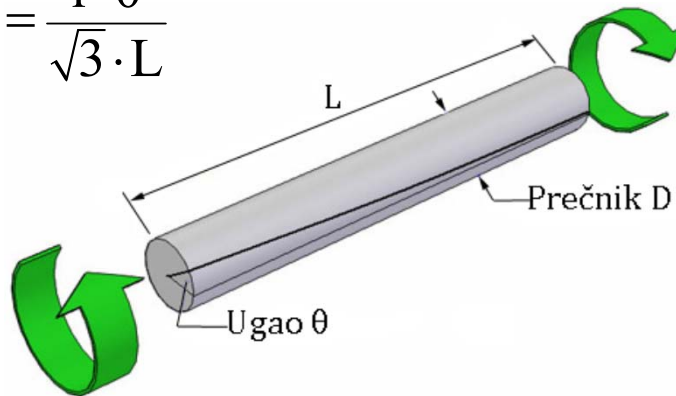
$$\varphi_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i = 0,146$$

Ispitivanje uvijanjem

- Naponsko stanje: $\sigma_1 = -\sigma_2$, $\sigma_3 = 0$, $\sigma_e = \sqrt{3}\sigma_1$
- Efektivna deformacija

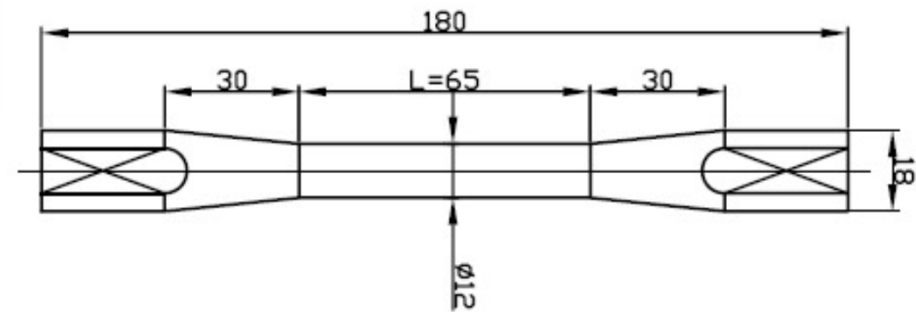


$$\varphi_e = \frac{r \cdot \theta}{\sqrt{3} \cdot L}$$



- Pokazatelj naponskog stanja

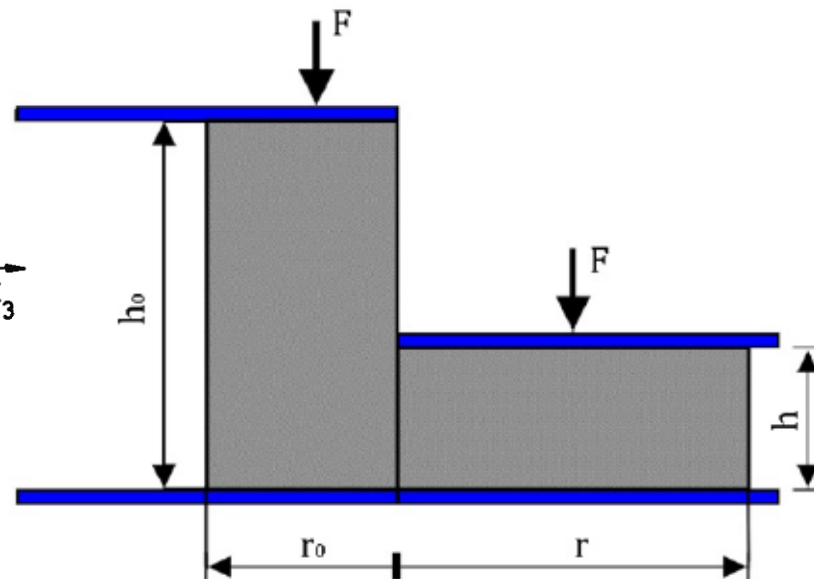
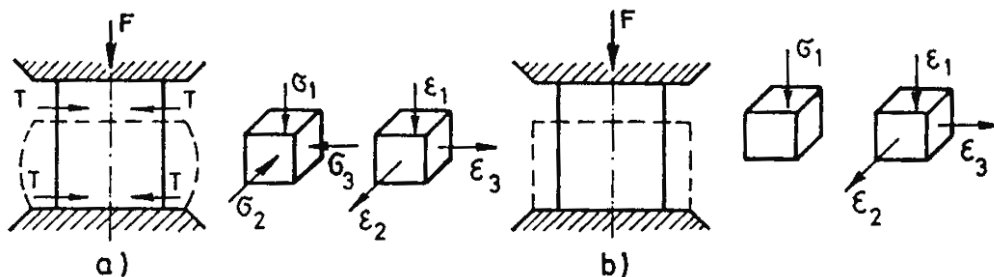
$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_e} = \frac{0}{K} = 0$$



$$\varphi_{eg} = \frac{r \cdot \theta}{\sqrt{3} \cdot L} = 0,73$$

Jednoosno sabijanje valjka ($\mu=0$)

$\mu=0 \rightarrow$ monoton proces



- Naponsko stanje:

$$\sigma_1 < 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0, \sigma_e = |\sigma_1|$$

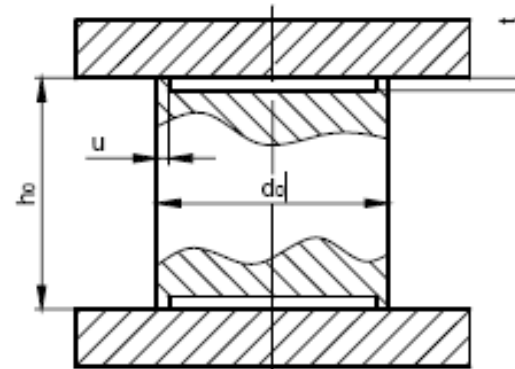
- Efektivna deformacija $\varphi_{eg} = \varphi_1 = \varphi_h$

$$\varphi_h = \varphi_1 = \ln \frac{h_0}{h}, \quad \varphi_2 = \varphi_3 = -\frac{\varphi_1}{2}$$

- Pokazatelj naponskog stanja

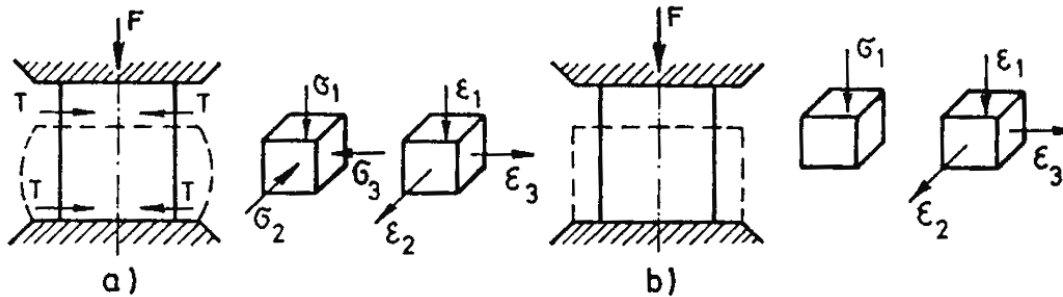
$$\beta = \frac{-\sigma_1 + 0 + 0}{\sigma_e} = \frac{-\sigma_1}{\sigma_1} = -1$$

Rastegajev

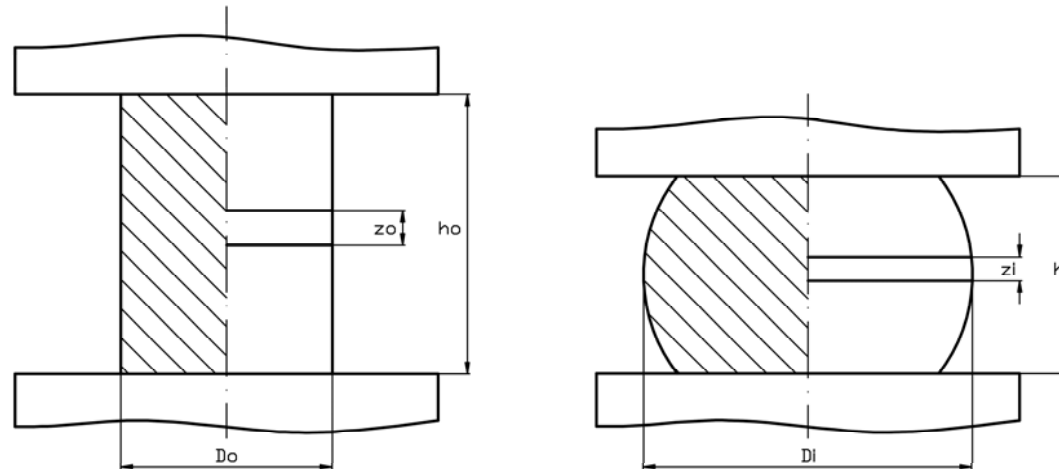


Jednoosno sabijanje valjka ($\mu \neq 0$)

$\mu \neq 0 \rightarrow$ nemonoton proces



- Značajan uticaj trenja
- Pukotine nastaju na spoljašnjoj površini
- Radijalni napon jednak nuli (na spoljnoj površini)!!!!



Jednoosno sabijanje valjka ($\mu \neq 0$)

1. Veza napon deformacija na slobodnoj površini uz pretpostavku prostog (proporcionalnog) deformisanja:

$$\frac{d\varphi_\theta}{\sigma_\theta - \sigma_{sr}} = \frac{d\varphi_z}{\sigma_z - \sigma_{sr}}; \quad \sigma_{sr} = \frac{1}{3}(\sigma_\theta - \sigma_z); \quad \sigma_r = 0$$

2. Jednačine plastičnog tečenja:

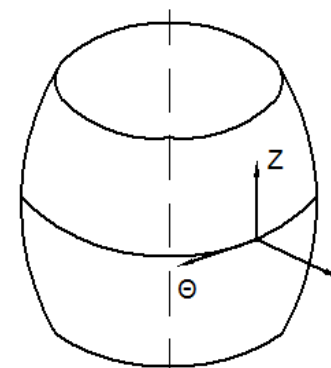
$$\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_z = \sigma_e^2 = K^2$$

3. Koeficijent proporcionalnosti deformacija:

$$\alpha = \frac{d\varphi_\theta}{d\varphi_z} \approx \frac{\varphi_\theta}{\varphi_z} \leq 0$$

- Naponi

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_z} = \frac{1+2\alpha}{1+\alpha} \quad \sigma_\theta = \sigma_z \cdot \left(\frac{1+2\cdot\alpha}{2+\alpha} \right) \quad \sigma_z = -K \left[1 + \frac{1+2\cdot\alpha}{2+\alpha} + \left(\frac{1+2\cdot\alpha}{2+\alpha} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$



Jednoosno sabijanje valjka ($\mu \neq 0$)

- Deformacije

$$d\varphi_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{d\varphi_\theta^2 + d\varphi_z^2 - d\varphi_\theta \cdot d\varphi_z} \quad \varphi_\theta = \ln\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \quad \varphi_z = \ln\left(\frac{z_i}{z_0}\right)$$

$$\varphi_e = \int d\varphi_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^{\varphi_z} \sqrt{1 + \alpha + \alpha^2} d\varphi_z \quad \alpha = \frac{d\varphi_\theta}{d\varphi_z}$$

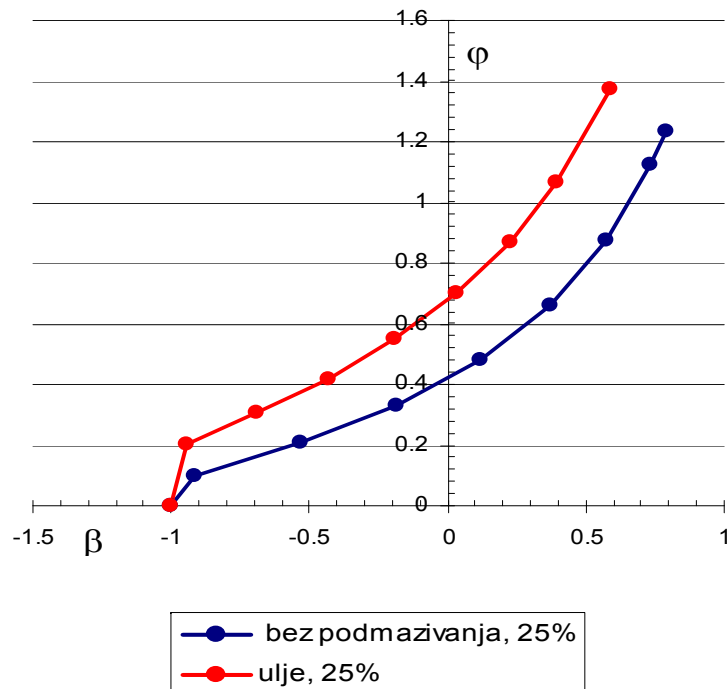
$$\varphi_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^{\varphi_z} \sqrt{1 + \alpha + \alpha^2} \varphi_z \quad \varphi_e \approx \varphi_z$$

- Pokazatelj naponskog stanja

$$\beta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{K} = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{K} = - \frac{1 + \frac{1+2\alpha}{2+\alpha}}{\sqrt{1 - \frac{1+2\alpha}{2+\alpha} + \left(\frac{1+2\alpha}{2+\alpha}\right)^2}}$$

Uticaj “ISTORIJE DEFORMISANJA” na deformabilnost materijala

- monotoni procesi: $\beta = const.$
- nemonotoni procesi: $\beta \neq const.$



Č 1531

- ❖ Realni procesi su nemonotoni!!!
- ❖ Stepen oštećenja strukture zavisi od vrste naponskog stanja i odnosa pojedinih komponenti
- ❖ Naponsko stanje u obratku se neprekidno menja $\beta \neq const.$
- ❖ **Istorija deformisanja** – zavisnost efektivne deformacije od naponskog indeksa deformabilnosti (pokazatelja naponskog stanja - β)

$$\varphi_e = f(\beta)$$

Važno:

Teorijsko rešenje gornje zavisnosti nije moguće izvesti, što znači da se funkcija $f(\beta)$ može odrediti samo eksperimentalnim putem.

Uticaj “ISTORIJE DEFORMISANJA” na deformabilnost materijala

$\beta(\varphi_e) = \text{const.}$ ($\alpha = \text{const.}$) - monotoni proces

$\beta(\varphi_e) \neq \text{const.}$ ($\alpha \neq \text{const.}$) - nemonotoni proces

- ❖ $\beta(\varphi_e)$ - istorija pokazatelja naponskog stanja predstavlja indikator promene naponskog stanja u funkciji efektivne deformacije na mestu pojave pukotina. Na ovaj način predstavljen pokazatelj naponskog stanja uzima u obzir i „istoriju“ procesa deformisanja, a ne samo stanje na kraju procesa deformisanja kada dolazi do razaranja materijala.
- ❖ Uvodi se pojam **srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja** (β_{sr}) na kritičnom mestu obratka.

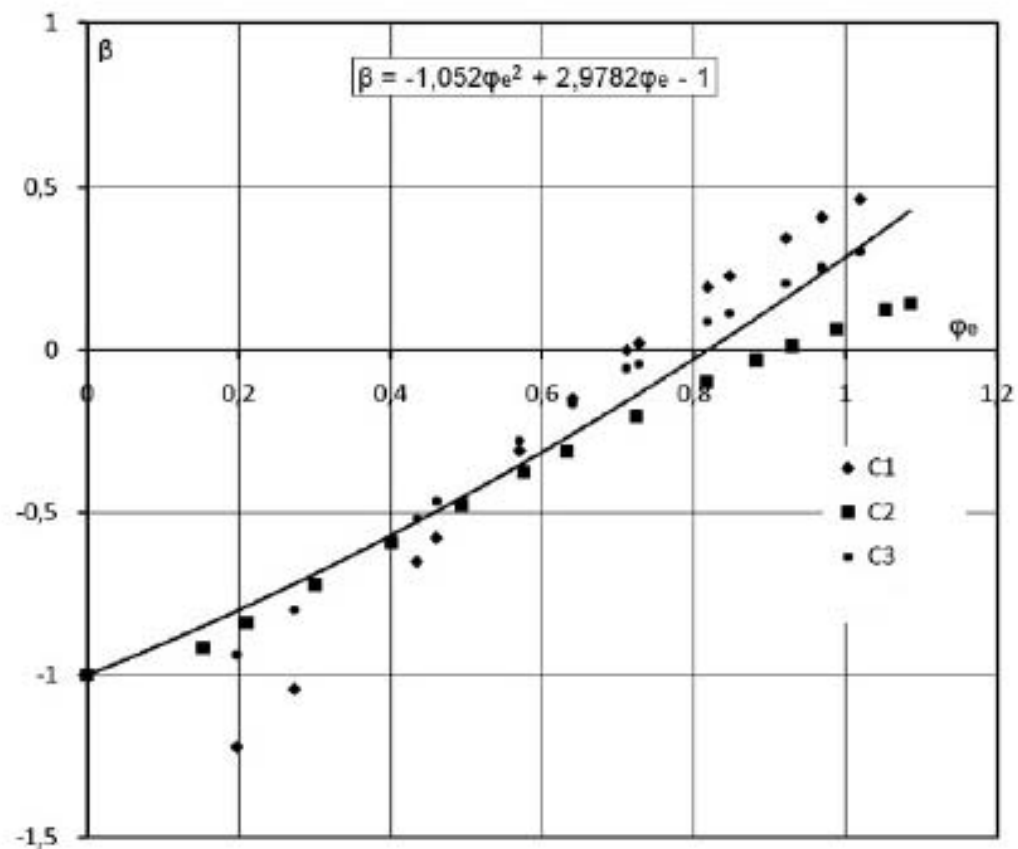
a) Metoda Kolmogorova

$$\beta_{sr} = \frac{1}{\varphi_e^g} \int_0^{\varphi_e^g} \beta(\varphi_e) d\varphi_e$$

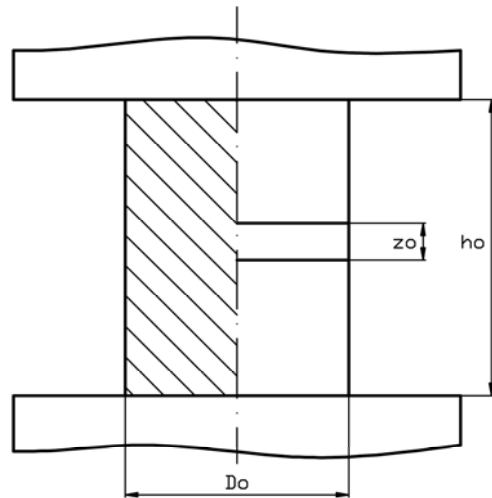
b) Metoda Vilotić-Alexandrov

$$\beta_{sr} = \frac{2}{\varphi_e^g} (\varphi_1^g + \varphi_2^g)$$

Uticaj “ISTORIJE DEFORMISANJA” na deformabilnost materijala



Test jednoosnog sabijanja



$D_0=18$ mm

$h_0=24$ mm

$Z_0=4$ mm

Č.1531

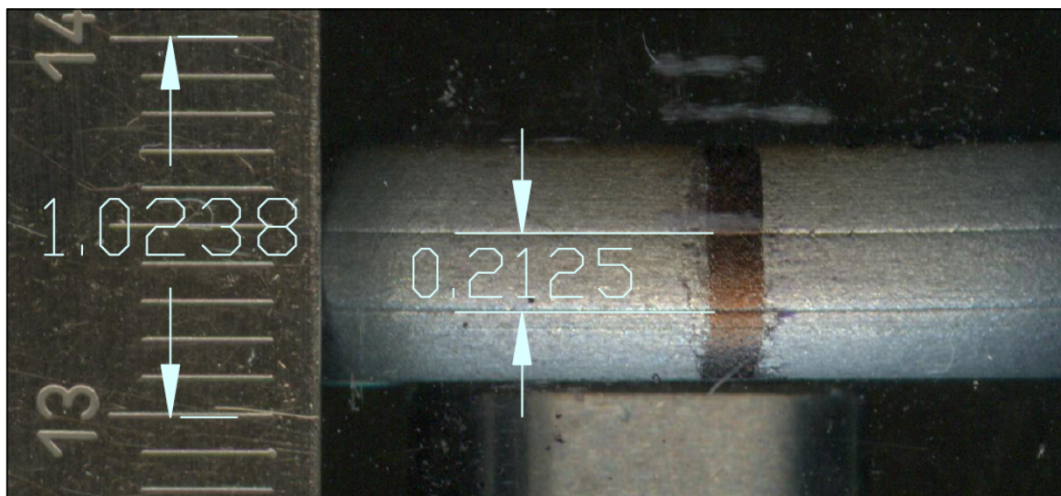


Hidraulična presa Sack&Kieselbach 6,3 MN

Test jednoosnog sabijanja



Skeniranje zone deformacije (merenje geometrije uzorka)



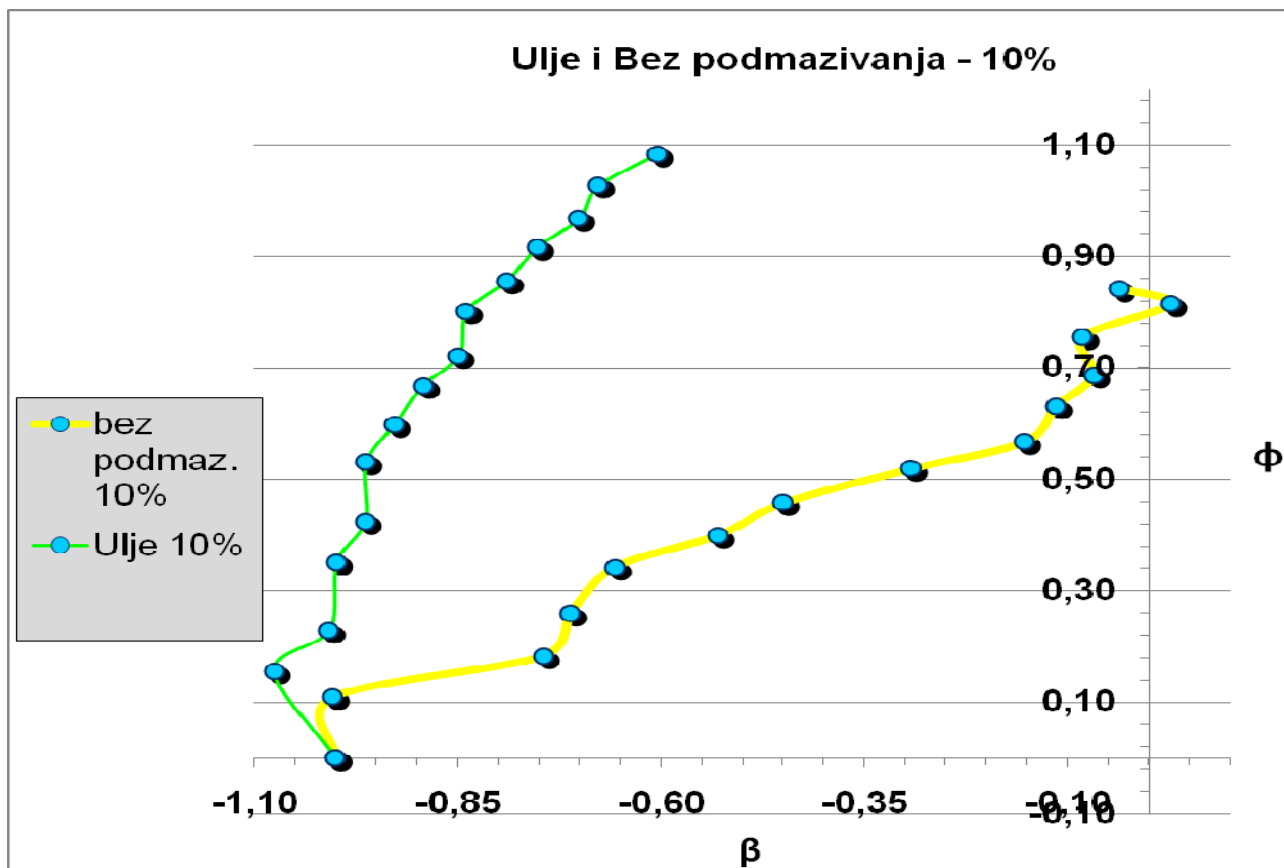
Test jednoosnog sabijanja

Rezultati:

Op br:	sila (kN)	visina (mm)	prečnik (mm)	rastojanje z (mm)	hod (mm)	$\varphi_{\theta} = \ln(d_i/d_o)$	$\varphi_z = \ln(z_i/z_o)$	α	φ_e	σ_z/K	σ_{θ}/K	β
0		24.10	18.00	3.77					0			-1
1	166.77	22.00	18.85	3.25	2.4	0.046141	-0.148420005	-0.310882323	0.151917669	-0.885939049	-0.198383733	-1.084322782
2	220.725	19.70	20.00	3.07	2.20	0.105361	-0.20539744	-0.512959245	0.205420435	-1.008674471	0.017580768	-0.991093703
3	269.775	17.50	21.30	2.78	2.00	0.168335	-0.304624074	-0.55260017	0.305185441	-1.03550499	0.075262878	-0.960242113
4	323.73	15.50	22.75	2.53	1.80	0.234193	-0.398855699	-0.587163198	0.400870792	-1.058905642	0.130655716	-0.928249926
5	382.59	13.80	24.15	2.32	1.50	0.293913	-0.485507816	-0.605371557	0.489088395	-1.071051963	0.161847284	-0.909204679
6	451.26	12.30	25.70	2.13	1.40	0.356119	-0.570953022	-0.623727733	0.576750563	-1.083043417	0.194732554	-0.888310863
7	534.645	10.90	27.30	2.02	1.20	0.416515	-0.62397749	-0.667515978	0.635543502	-1.109888855	0.279063934	-0.830824921
8	622.935	9.70	29.00	1.85	1.10	0.476924	-0.711889362	-0.669941282	0.725466159	-1.111275121	0.283974709	-0.827300412
9	735.75	8.60	30.80	1.70	1.00	0.537143	-0.79644675	-0.674424162	0.812440121	-1.11380283	0.293116575	-0.820686255
10	868.185	7.60	32.70	1.59	0.90	0.597003	-0.863340985	-0.691503508	0.884196951	-1.1229789	0.328704586	-0.794274314
11	1025.145	6.80	34.65	1.53	0.80	0.654926	-0.901807266	-0.726237182	0.932071079	-1.138896502	0.404566269	-0.734330233
12	1226.25	6.10	36.65	1.46	0.70	0.711042	-0.948638566	-0.749539072	0.98723441	-1.14694458	0.457763182	-0.689181398
13	1402.83	5.50	38.50	1.37	0.60	0.760286	-1.012264262	-0.751075102	1.05394727	-1.147387393	0.461325428	-0.686061965
14	1687.32	5.00	40.45	1.35	0.50	0.809695	-1.026970409	-0.78843059	1.082430192	-1.154262072	0.549575596	-0.604686475

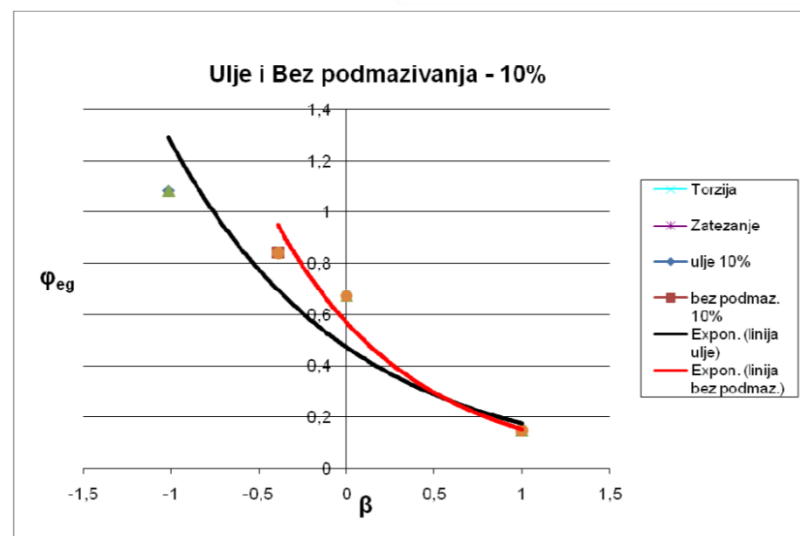
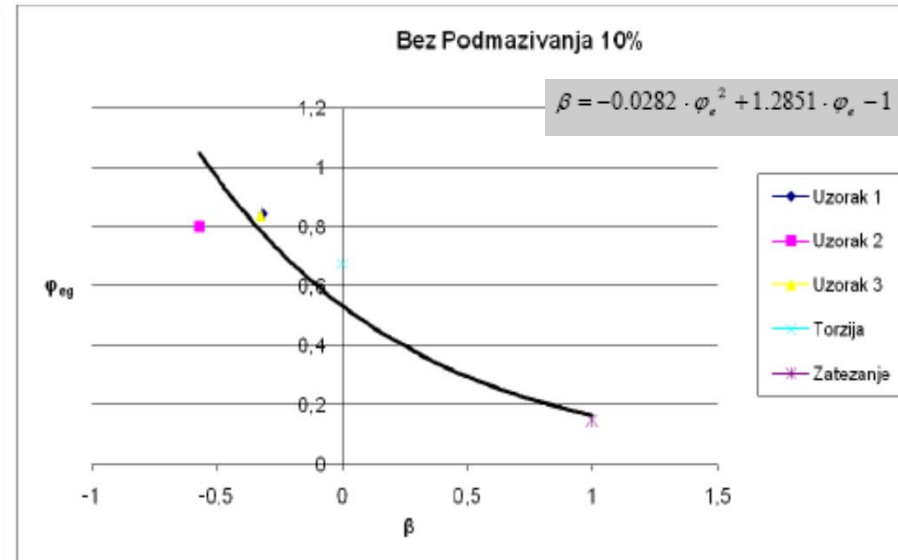
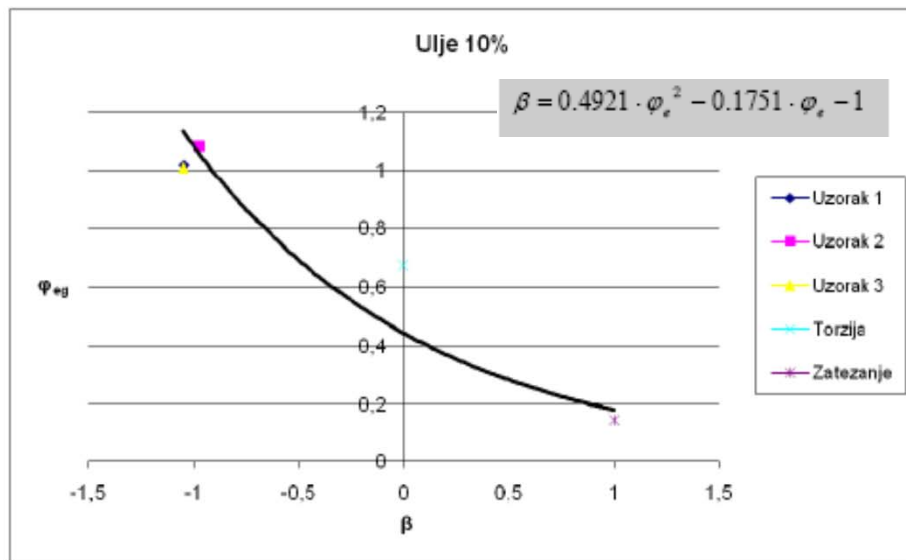
Test jednoosnog sabijanja

Istorija deformisanja za uzorke sa i bez podmazivanja

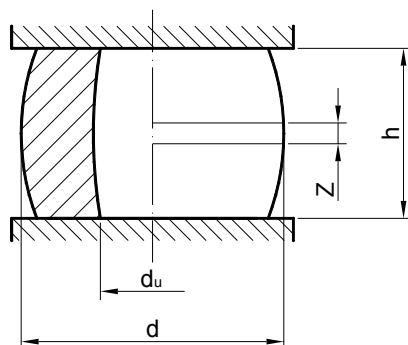
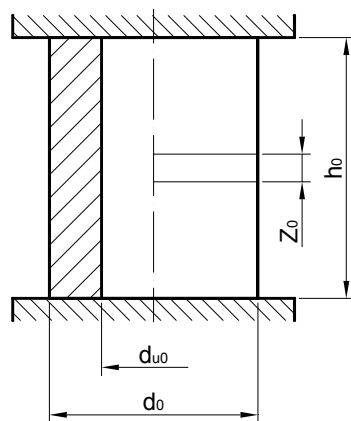


Test jednoznog sabijanja

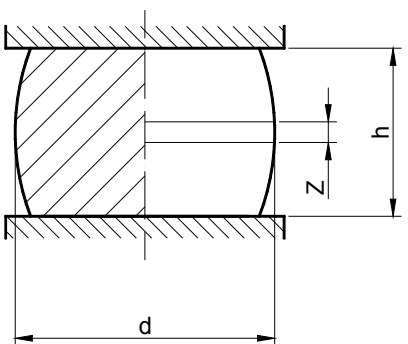
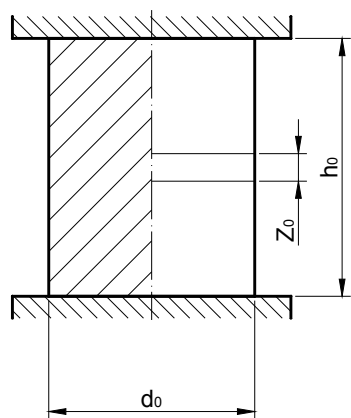
DGD za Č.1531



Sabijanje šupljeg (i punog) valjka ravnim pločama- - uporedna analiza-



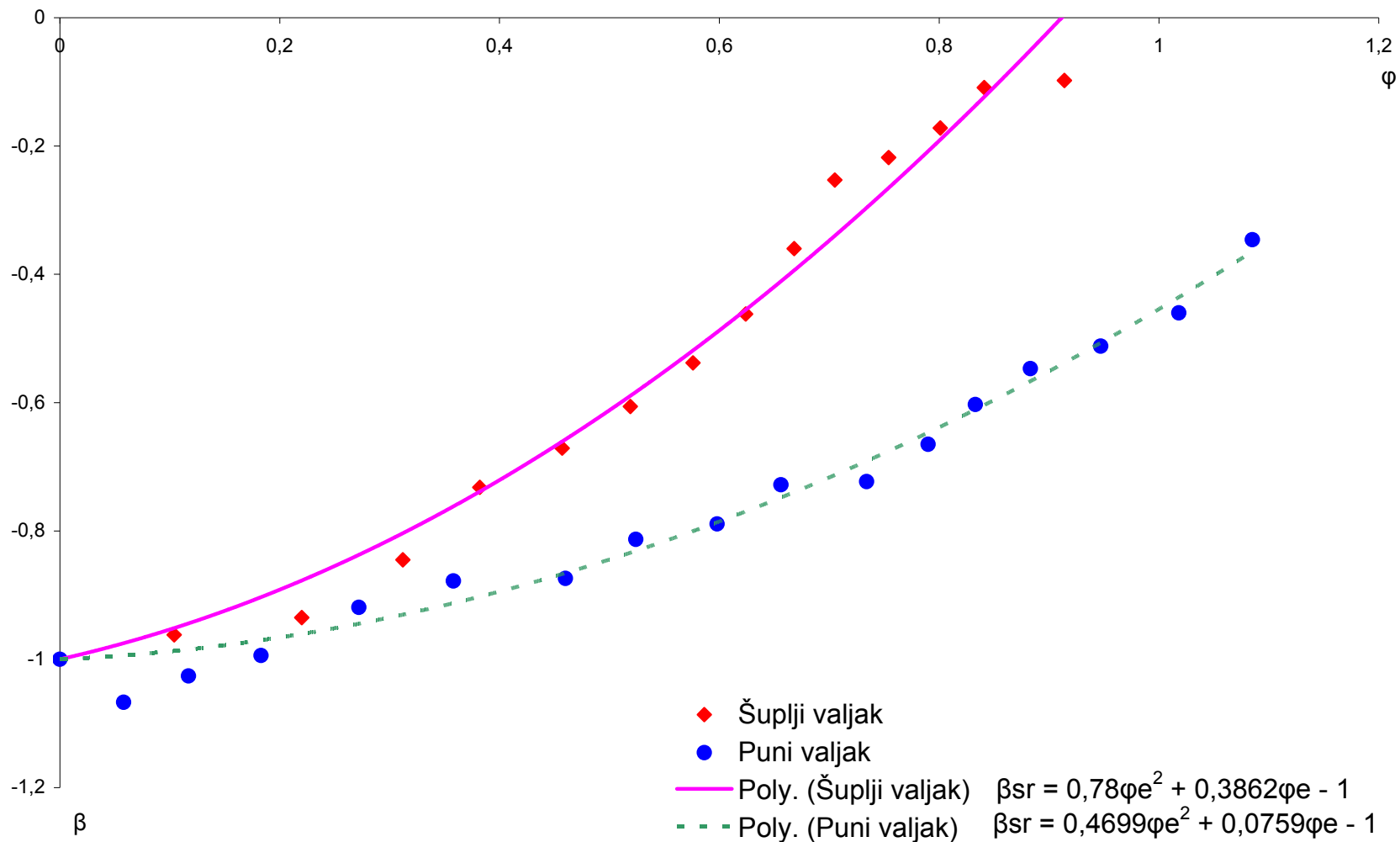
- Materijal uzoraka Č4146
- Sabijanje šupljih valjaka ravnim pločama:
 - dimenzije uzoraka $\phi 20/\phi 5 \times 25$ mm ($d_0/d_{u0} \times h_0$)



- Sabijanje punih valjaka ravnim pločama:
 - dimenzije uzoraka $\phi 20 \times 25$ mm ($d_0 \times h_0$)

Sabijanje šupljeg (i punog) valjka ravnim pločama- - uporedna analiza-

Istorija deformisanja

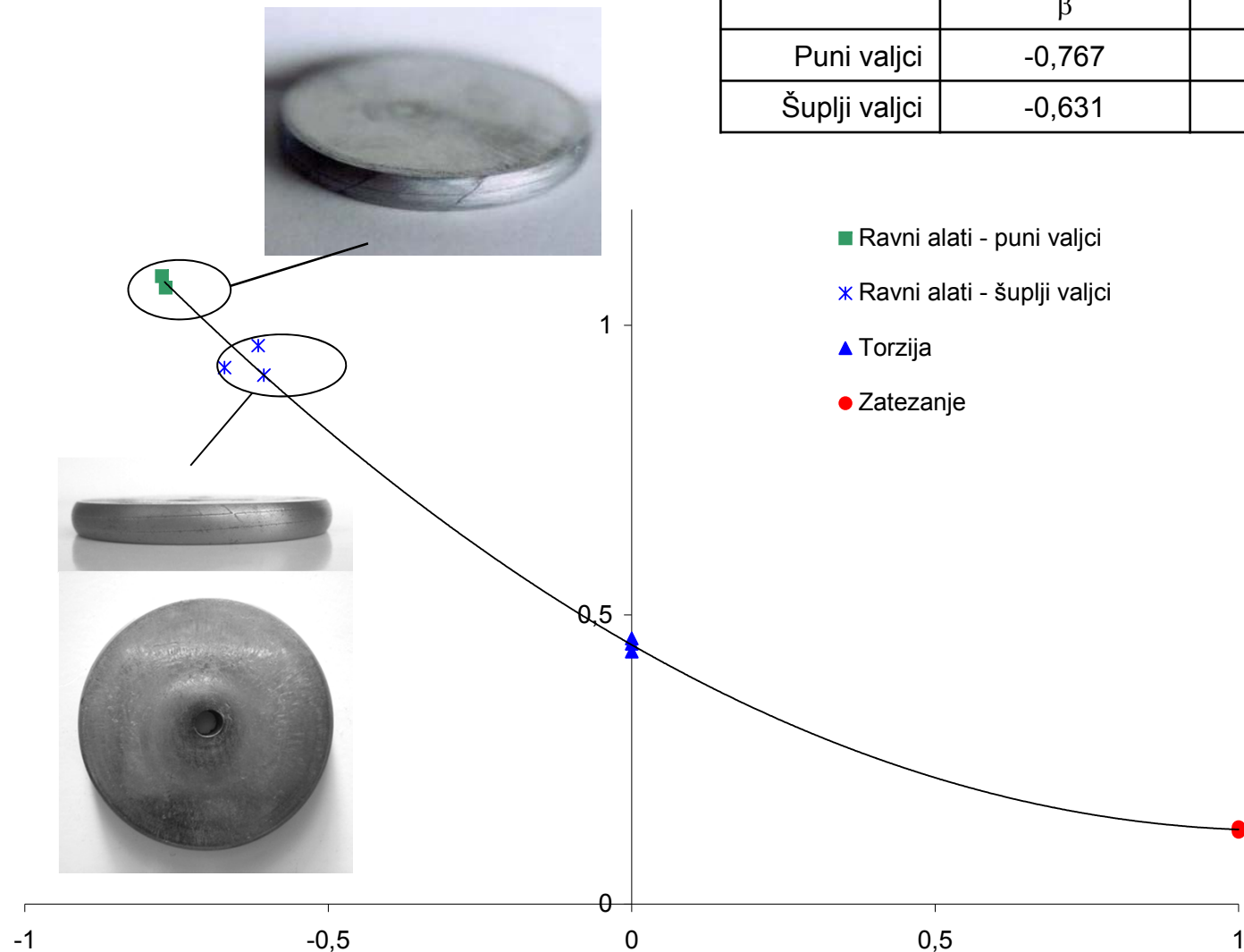


Sabijanje šupljeg (i punog) valjka ravnim pločama- - uporedna analiza-

Dijagram granične deformacije

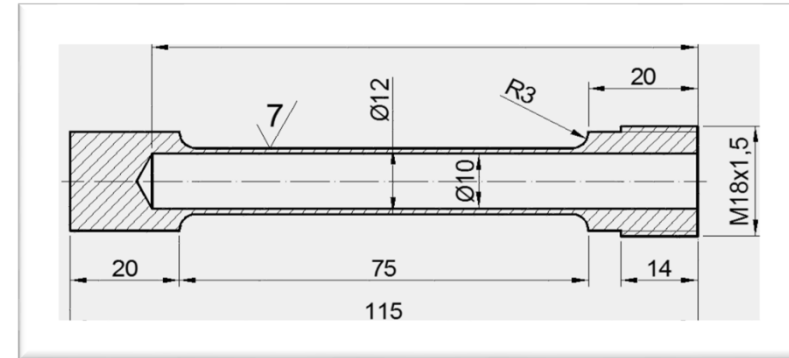
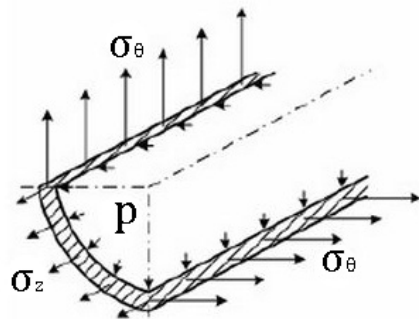
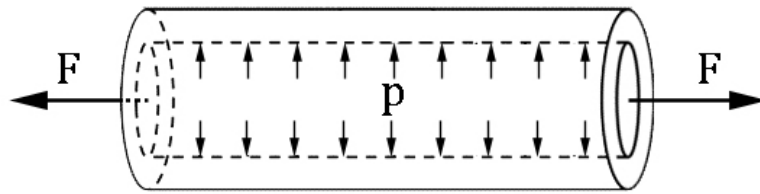
Granična def. pri sabijanju ravnim pločama

	β	φ_{el}
Puni valjci	-0,767	1,075
Šuplji valjci	-0,631	0,935



Dodatni modeli za određivanje DGD

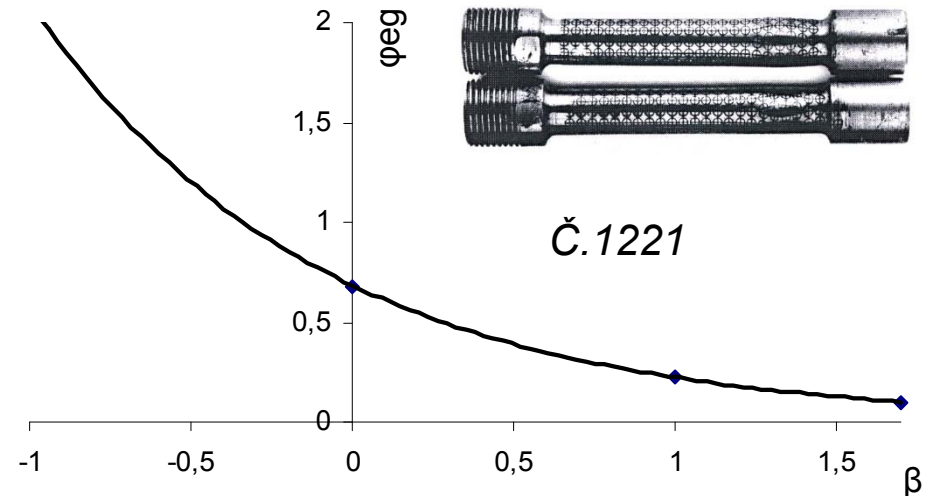
Dvoosno zatezanje – tankozida cev pod pritiskom



$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot r}{s}; \quad \sigma_z = \frac{p \cdot r}{2 \cdot s} = \frac{\sigma_\theta}{2}; \quad \sigma_r = 0$$

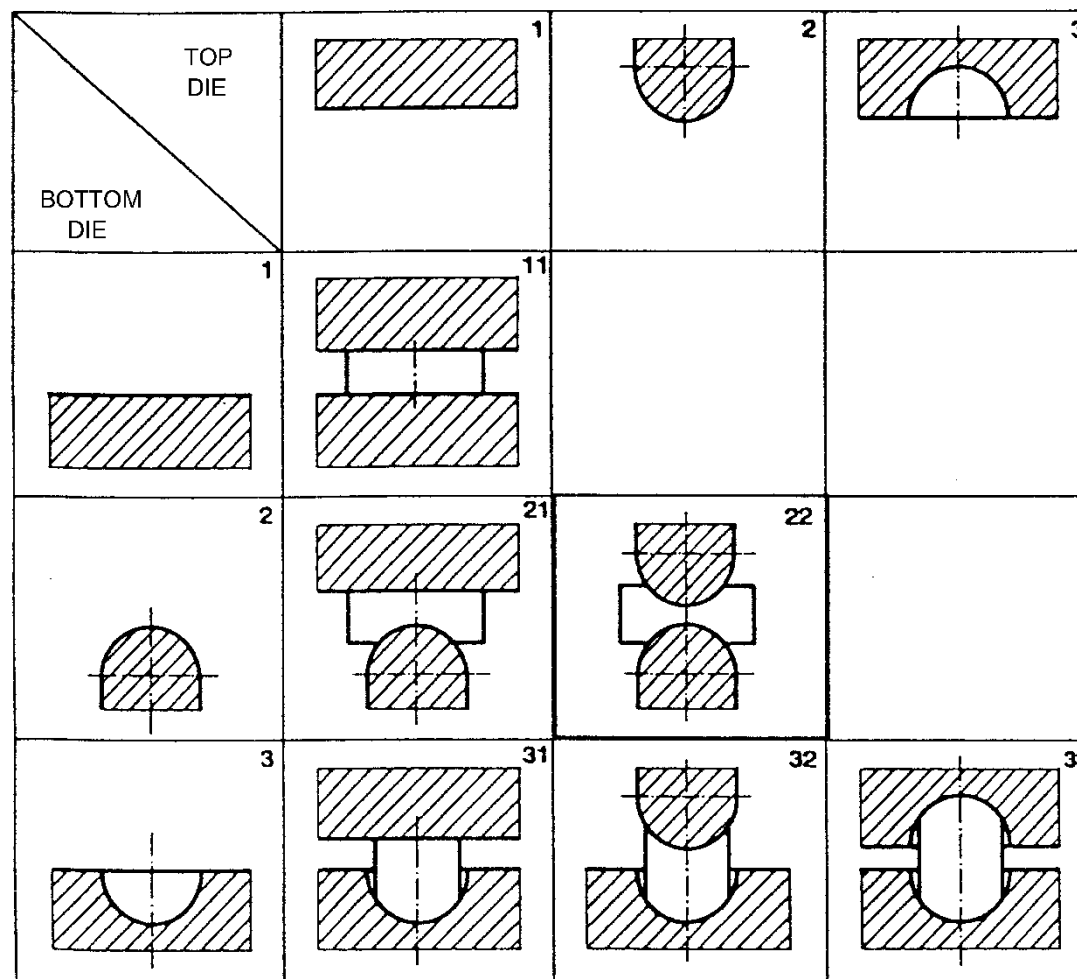
$$\sigma_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_\theta \quad \varphi_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \varphi_\theta = \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{d}{d_o}$$

$$\beta = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{\sigma_e} = +\sqrt{3}$$



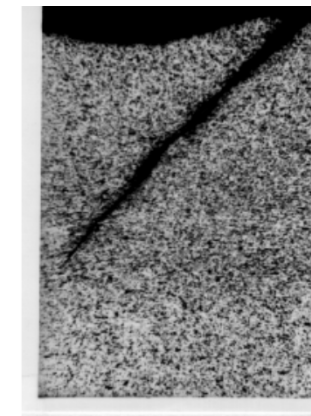
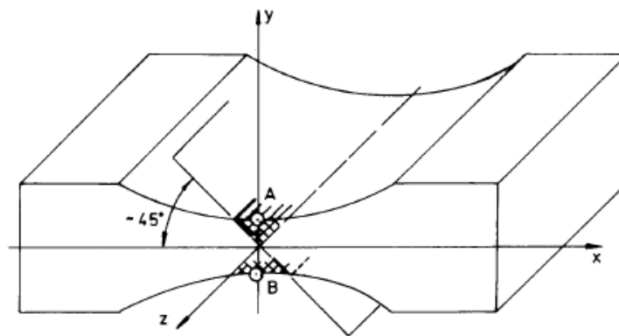
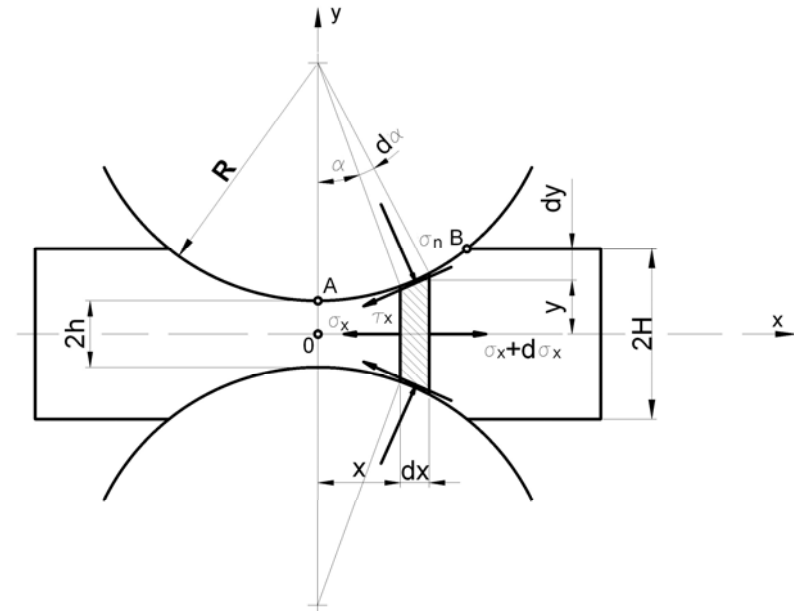
Dodatni modeli za određivanje DGD

Sabijanje profilisanim alatima



Dodatni modeli za određivanje DGD

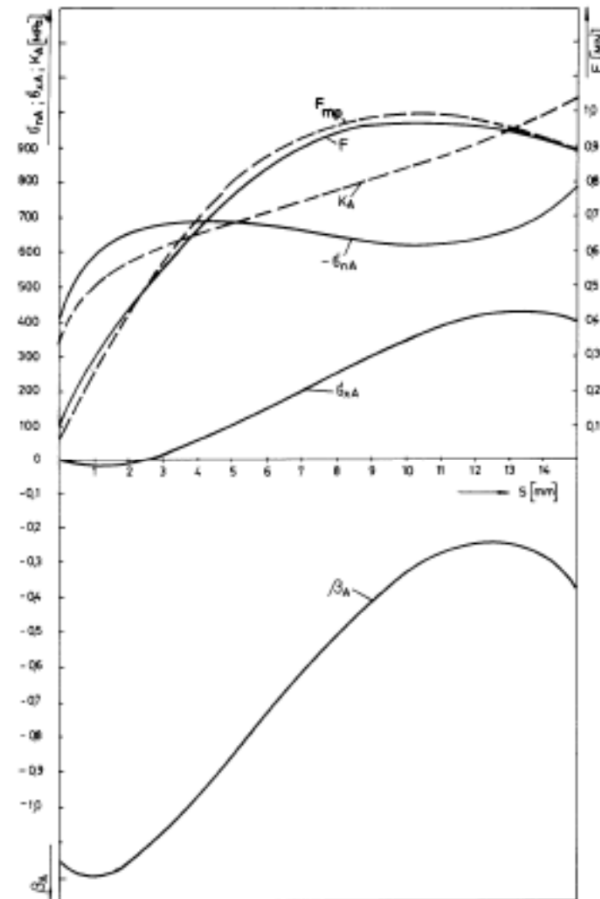
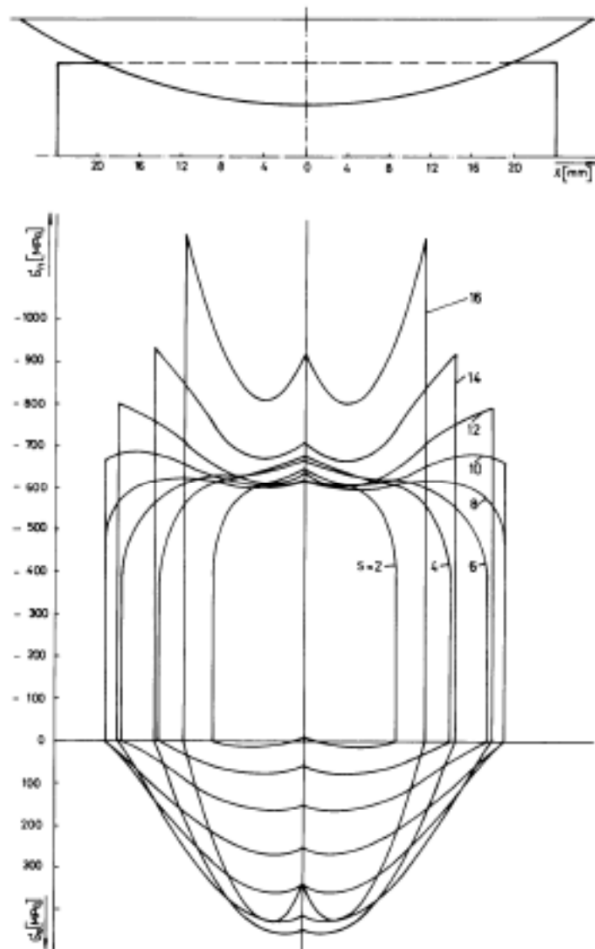
Sabijanje prizmatičnog priprema cilindričnim alatima



Dodatni modeli za određivanje DGD

Sabijanje prizmatičnog priprema cilindričnim alatima

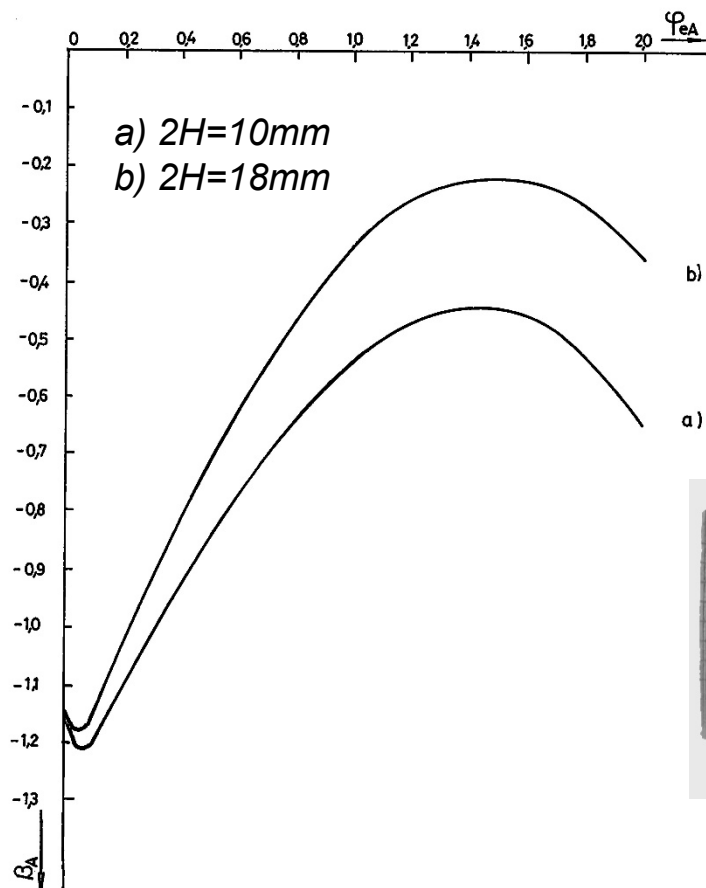
Naponi i parametri procesa



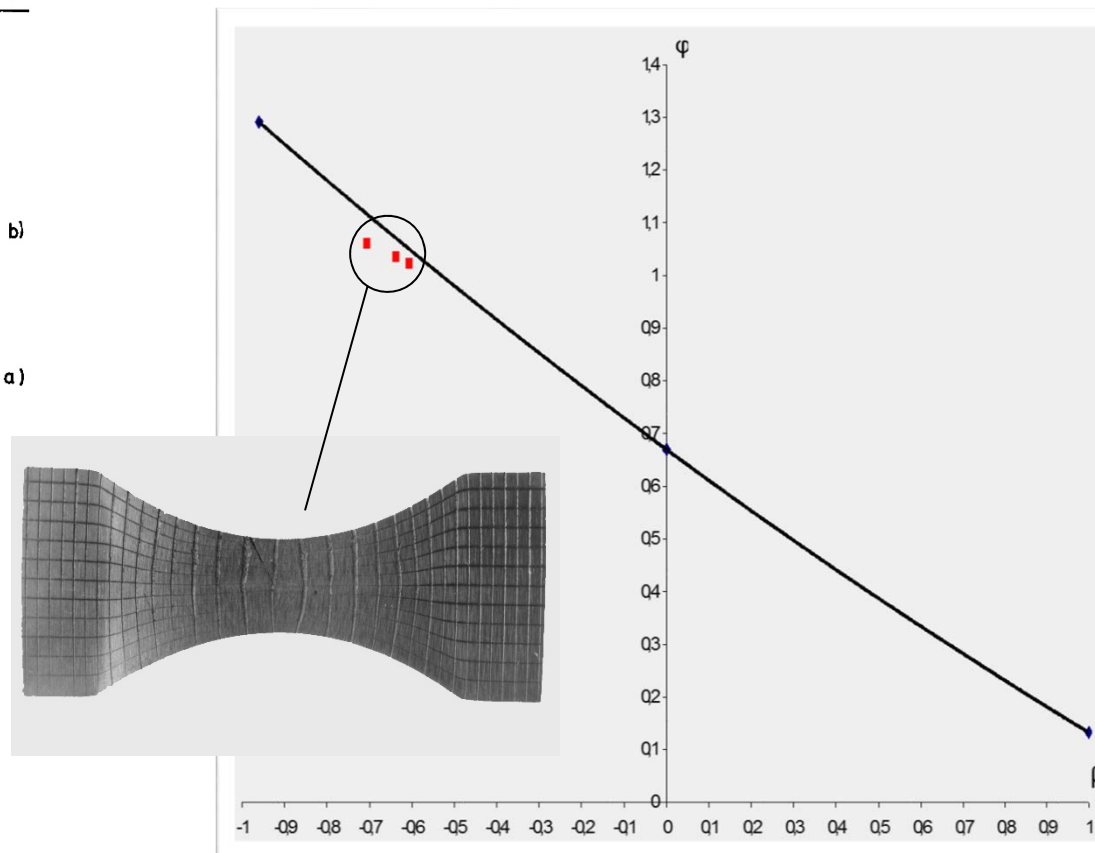
Dodatni modeli za određivanje DGD

Sabijanje prizmatičnog priprema cilindričnim alatima

Istorija deformisanja Č.1431



DGD Č.1431



Dodatni modeli za određivanje DGD

DGD za mesing



RT



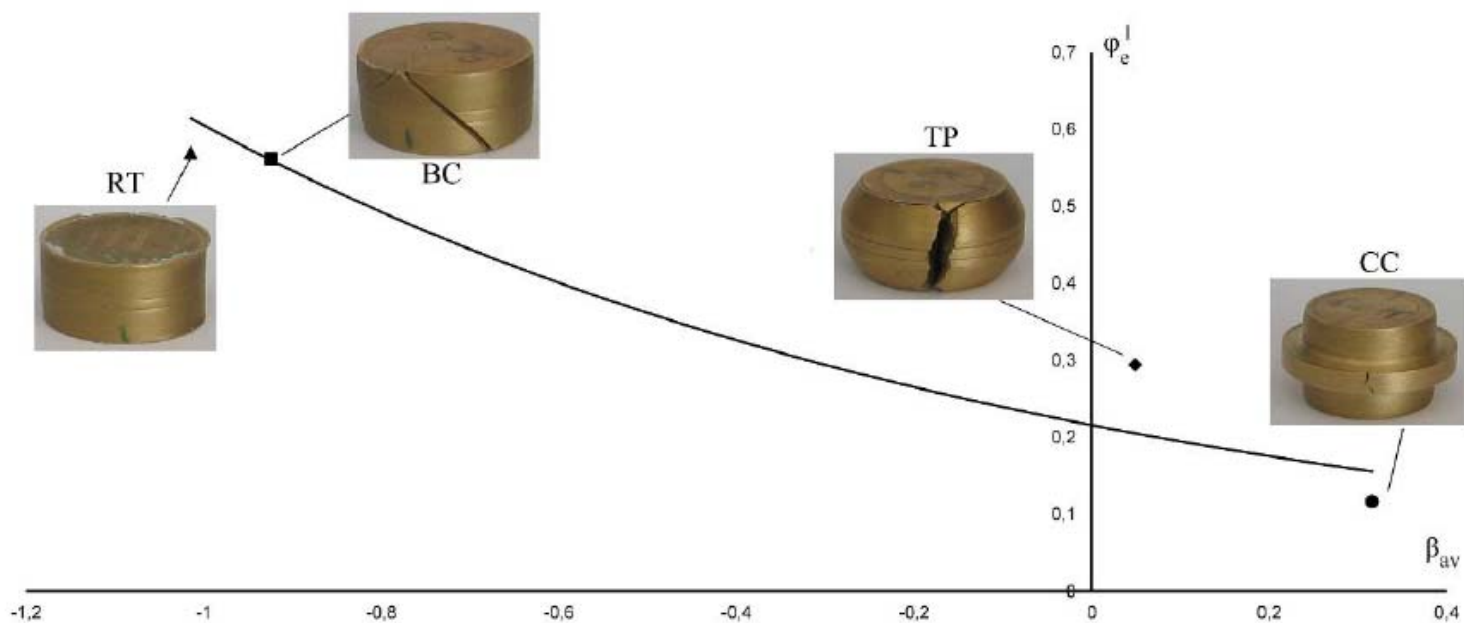
BC



TP

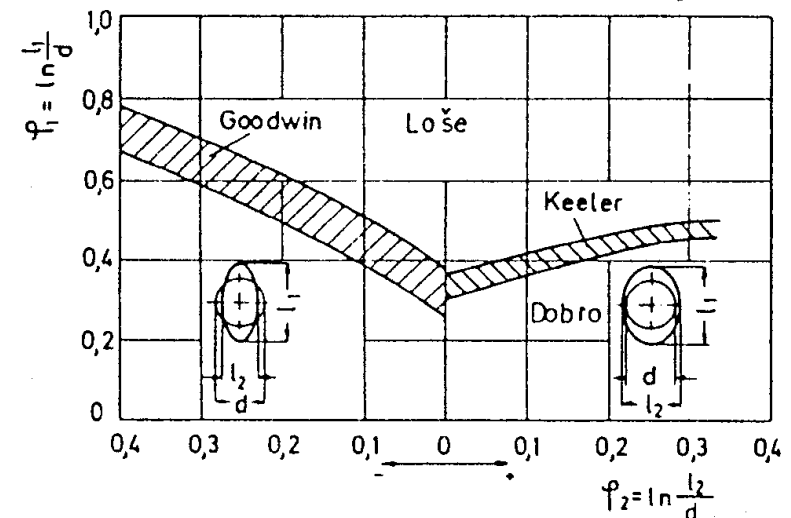
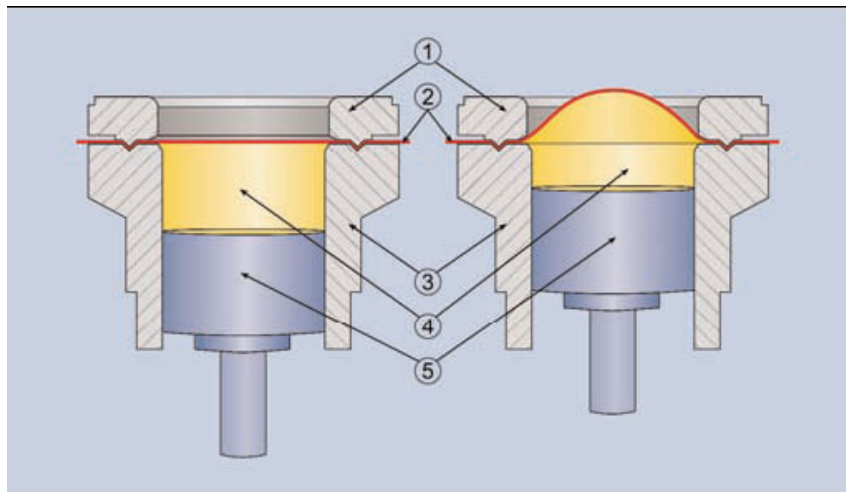


CC

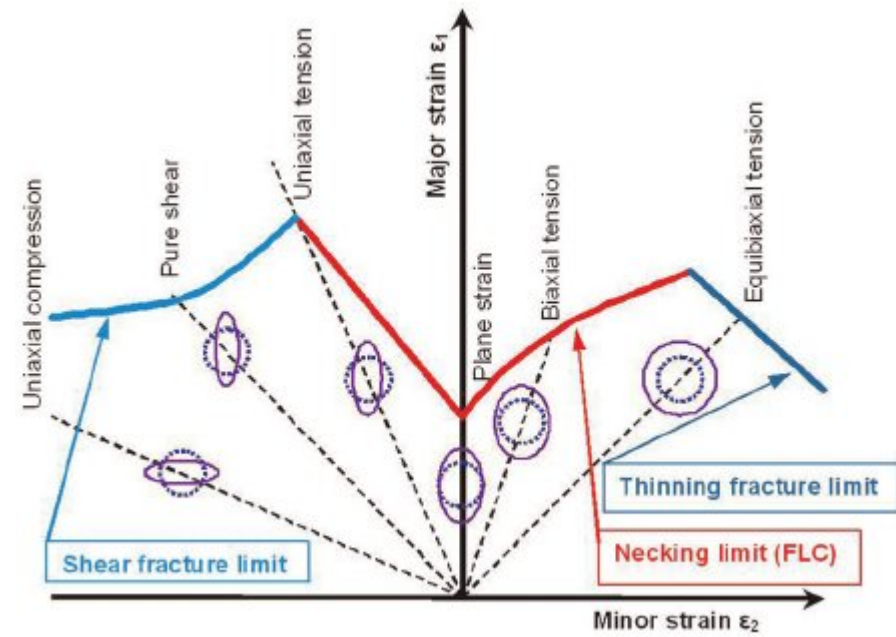
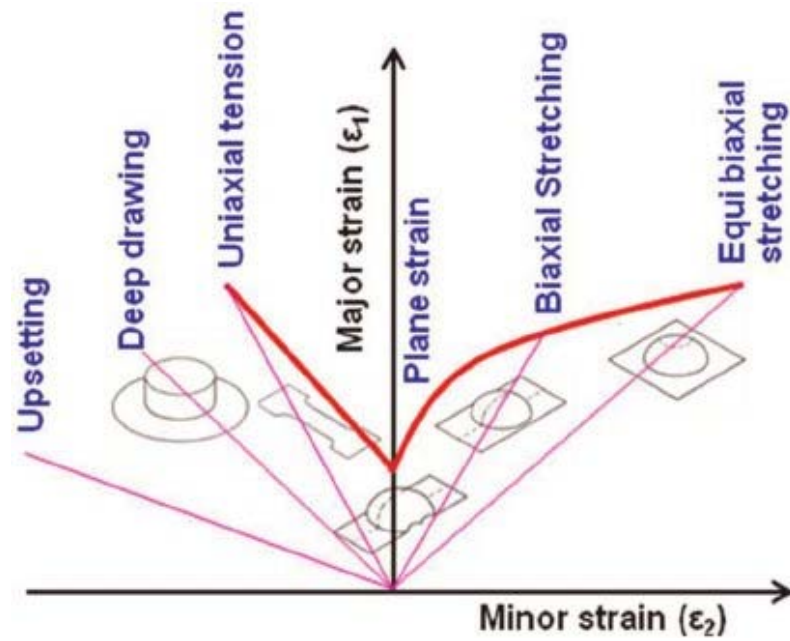


Deformabilnost u obradi lima

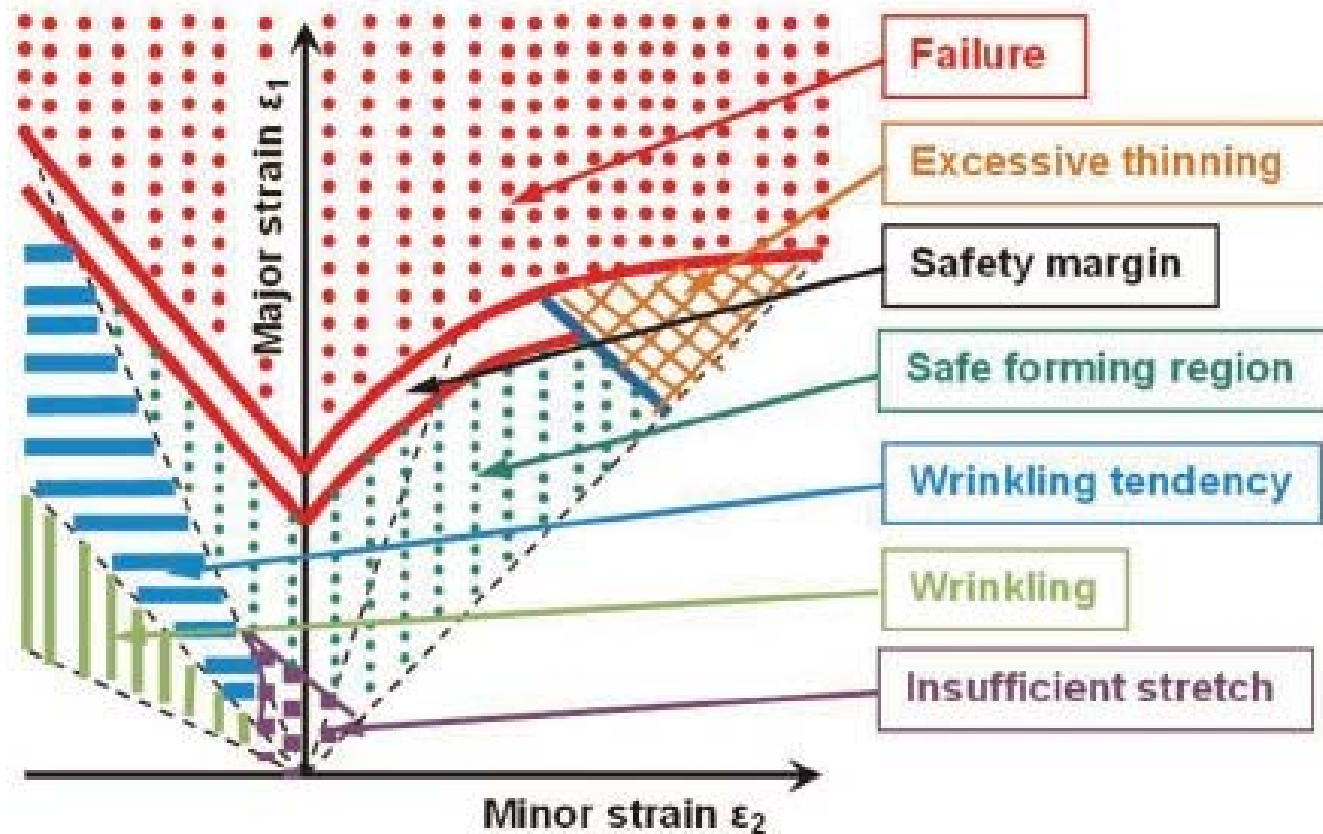
- Problem deformabilnosti materijala najpre je uočen i najviše izučavan u oblasti deformisanja lima, i to pre svega pri dubokom izvlačenju.
 - a) mehanička ispitivanja – parametri plastičnosti (r , n , ψ ...)
 - b) simulativne metode ispitivanja
 - c) dijagram granične deformabilnosti
- Simulativne metode ispitivanja su slične postupcima oblikovanja lima.
- **Keeler-Goodwin-ov dijagram (DGD)** - zavisnost glavnih deformacija $\varphi_1 = f(\varphi_2)$ u trenutku pojave razaranja.



Dijagrama granične deformabilnosti za lim

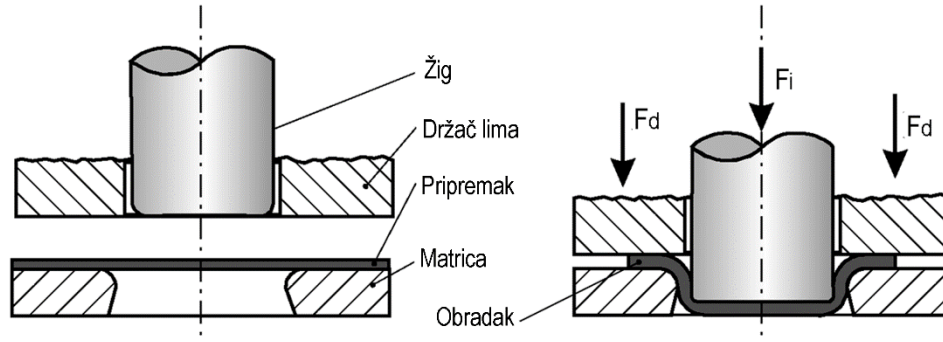


Dijagram granične deformabilnosti za lim

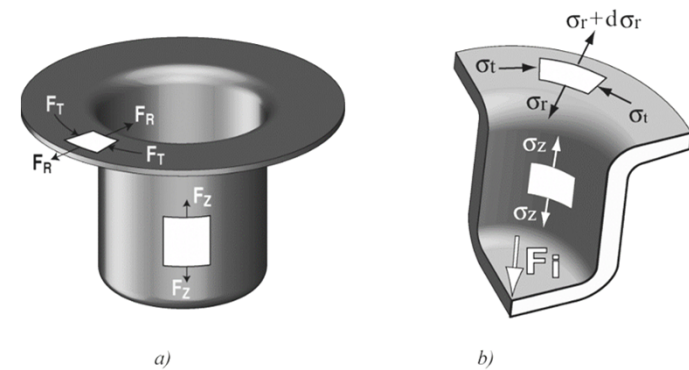
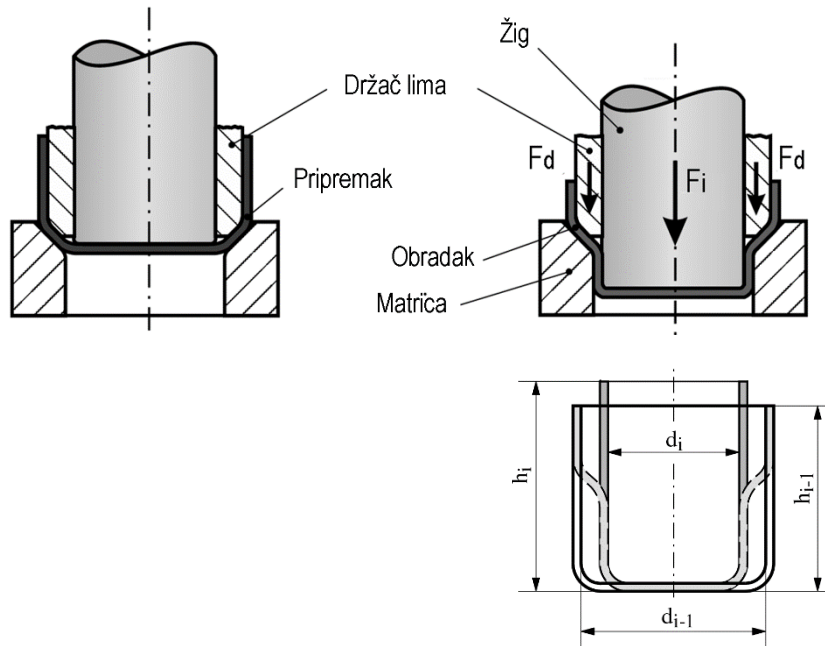


Deformabilnost u obradi lima - Duboko izvlačenje-

Prva operacija dubokog izvlačenja

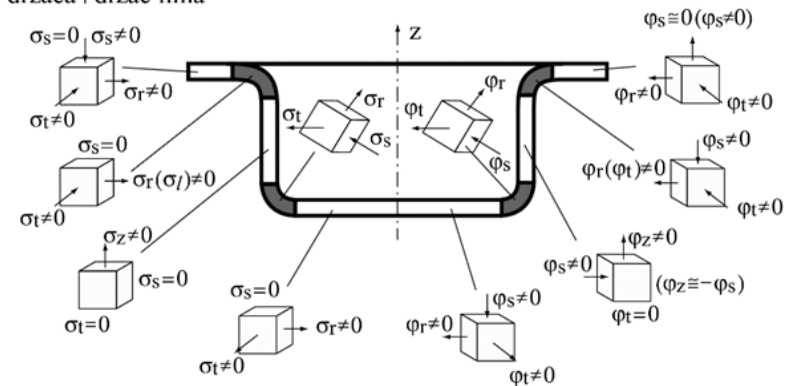


Sledeća operacija dubokog izvlačenja



bez držača | ako postoji držać lima

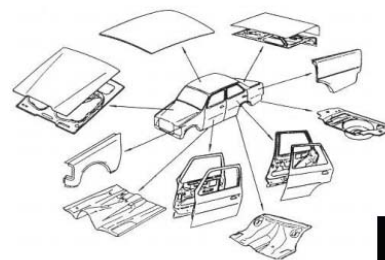
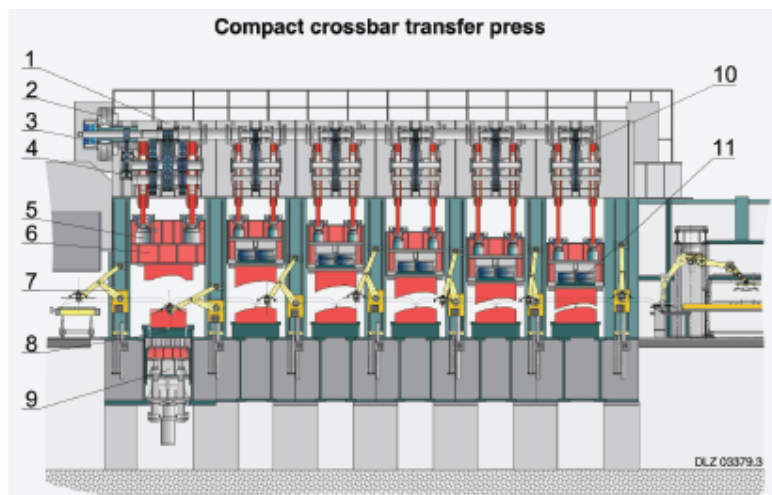
pri dovoljno čvrstom držanju



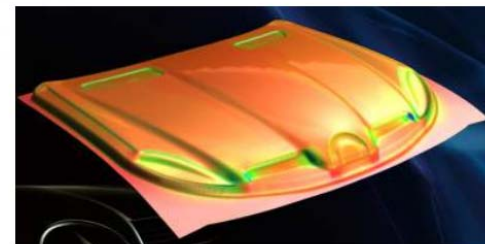
$$\sigma_i = \left(1,1 \cdot K_{sr} \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu F_d}{\pi D_m \cdot s} \right) e^{\frac{\mu\pi}{2}} + K_1 \frac{s}{2r_m + s} < R_m$$

Deformabilnost u obradi lima

- Duboko izvlačenje-



- 3 to 5 dies each
- Prototype dies ~ \$50,000
- Production dies ~ \$0.75-1



Uticajni faktori na deformabilnost lima

Obradivost/deformabilnost materijala (lima) zavisi od sledećih faktora:

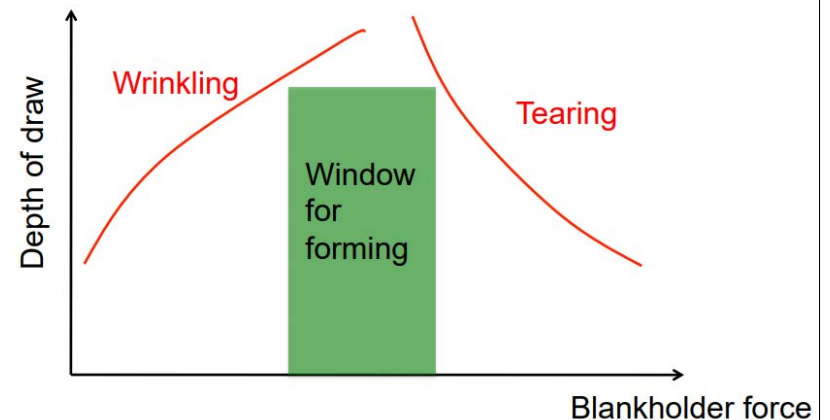
- Vrste materijala (hemijski sastav)
- Postupka (metode) oblikovanja/vida dermisanja
- Mehaničkih svojstava materijala
- Konstrukcije/geometrije alata
- Trenja – podmazivanja
- Brzine deformacije
- Temperature

a) Faktori materijala (parametri plastičnosti)

- *granica razvlačenja*
- *odnos granice razvlačenja i čvrstoće materijala*
- *modul elastičnosti*
- *eksponent deformacionog ojačavanja n-faktor*
- *izduženje ε_e , ε_{max}*
- *koeficijent normalne anizotropije r- faktor*

b) Faktori uslova obrade

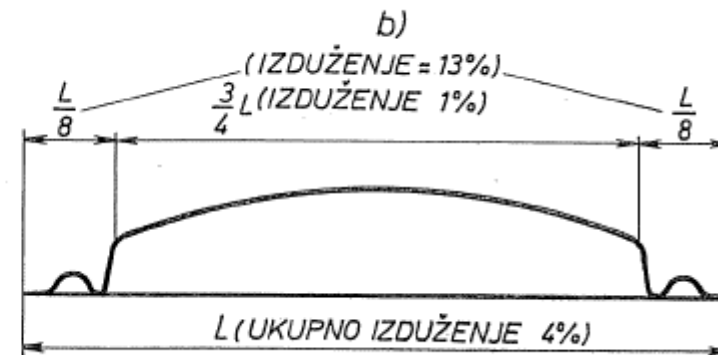
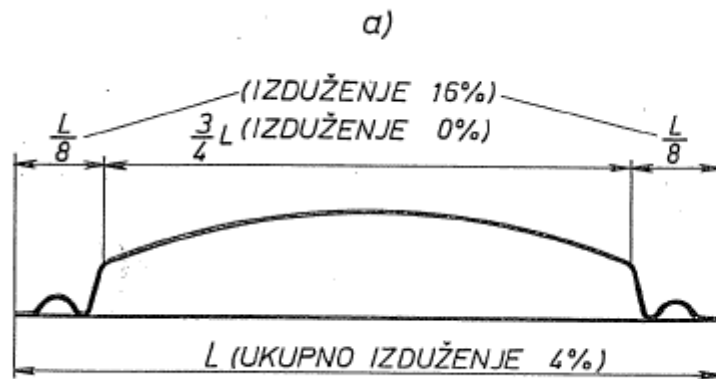
- *geometrija alata, zazori, radijusi žiga i matrice*
- *sila držača lima*
- *podmazivanje*
- *brzina alata*
- *temperature*
- *istorija deformisanja*



Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

1. Odnos granice razvlačenja i čvrstoće materijala ($a_{\sigma} = \sigma_v / \sigma_m$)

- Za duboko izvlačenje pogodno je da materijal ima što nižu granicu razvlačenja jer je u tom slučaju ima veću sklonost ka deformacionom ojačavanju, smanjuje se deformacioni otpor i deformacija je ravnomernija (nema opasnost od lokalizacije deformacije je manja).
- Niže σ_v – niži deformacioni otpor
- Zatezna čvrstoća nije presudna za obradivost lima dubokim izvlačenjem
- Niže a_{σ} – bolja obradivost lima



Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

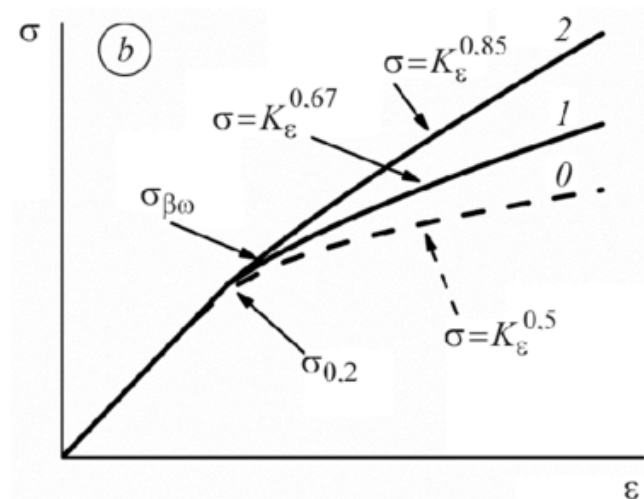
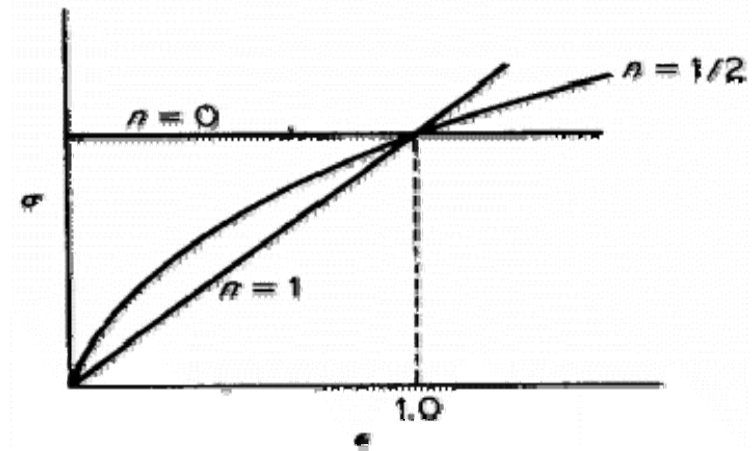
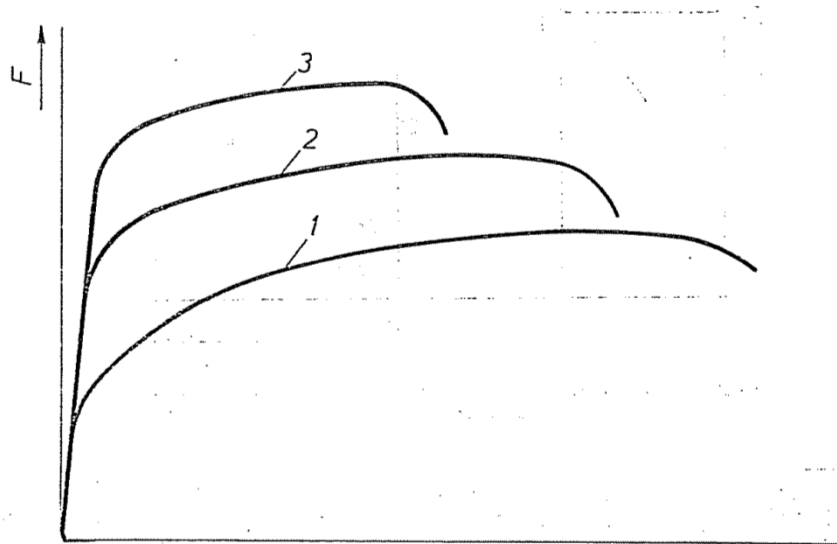
2. n- faktor

- Veća vrednost n- faktora znači da je materijal sklon ka deformacionom ojačavanju i ravnomernijem deformisanju.

$$K = C \varphi^n$$

$$K = K_0 + C \cdot \varphi^n$$

$$K = K_0 + (B + \varphi)^n$$

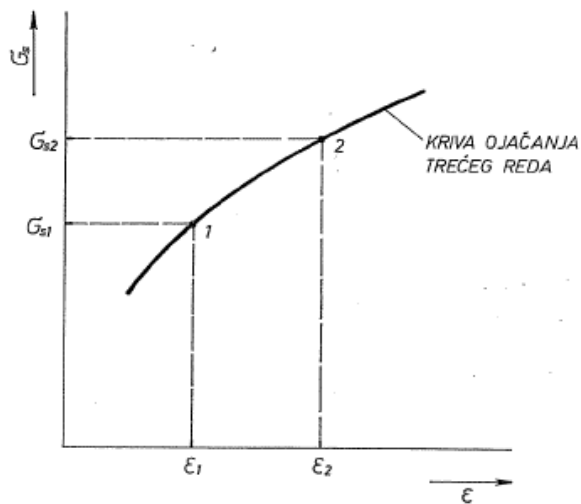


Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

2. n- faktor

- Veća vrednost n- faktora znači da je materijal sklon ka deformacionom ojačavanju i ravnomernijem deformisanju.

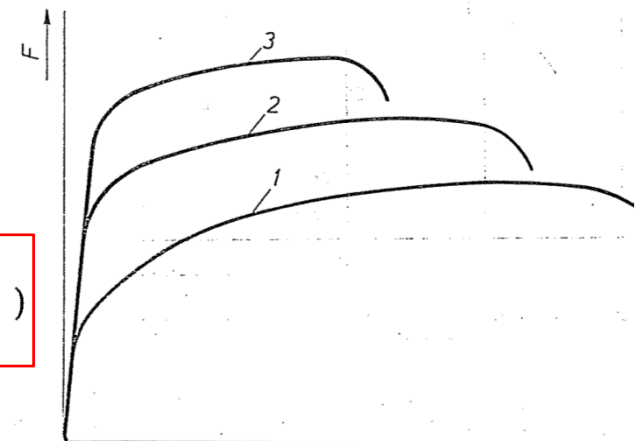
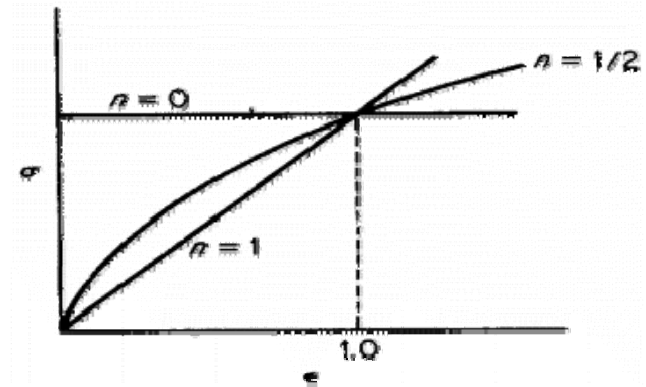
$$K = C \varphi^n, \quad K = K_0 + C \cdot \varphi^n, \quad K = K_0 + (B + \varphi)^n$$



$$\sigma_{s1} = B \epsilon_1^n \quad ; \quad \sigma_{s2} = B \epsilon_2^n$$

$$n = \frac{\log \frac{\sigma_{s2}}{\sigma_{s1}}}{\log \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{\log \frac{\sigma_{12}(1+\delta_2)}{\sigma_{11}(1+\delta_1)}}{\log \frac{\ln(1+\delta_2)}{\ln(1+\delta_1)}} = \frac{\log \frac{F_2 l_2}{F_1 l_1}}{\log \frac{l_2}{l_1}}$$

$$\bar{n} = \frac{1}{4} (n_{0^\circ} + 2n_{45^\circ} + n_{90^\circ})$$



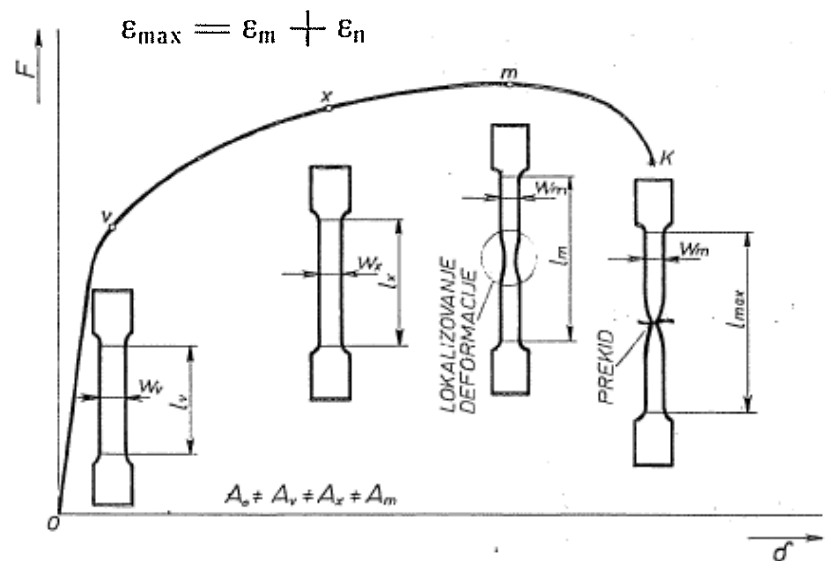
Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

3. Modul elastičnosti

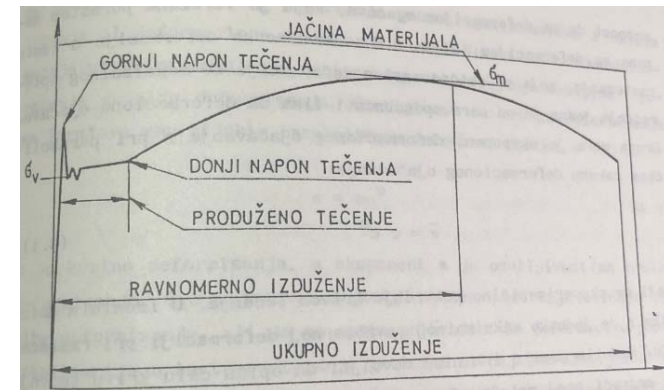
- Što veći modul elastičnosti – manje elastično vraćanje
- Čelik - 210 GPa, Al -70 GPa, Ti – 105, 4 GPa

4. Izduženje

- Ravnomerno izduženje ϵ_m
- Neravnomerno izduženje ϵ_n
- Ukupno izduženje (maksimalno) ϵ_{max}



TAČKA V ODGOVARA GRANCI RAZVLAČENJA (TEČENJA)
-II- m -II- POSTIZANJE MAKSIMALNE SILE (ZATEZNOJ ČVRSTOĆI)
-II- κ -II- RAZARANJU EPRUVETE



Ukupno izduženje je nesigurna karakteristika za ocenu deformabilnosti jer u velikoj mjeri zavisi od neravnomernog deformisanja i uslova ispitivanja

Ravnomerno deformisanje – pouzdaniji parametar koji zavisi od plastičnosti materijala. Proces dubok izvlačenja se može sa sigurnošću izvoditi samo u uslovima stabilnog deformisanja – bitno je tačno odrediti ϵ_m

Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

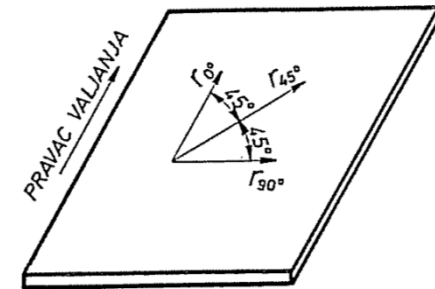
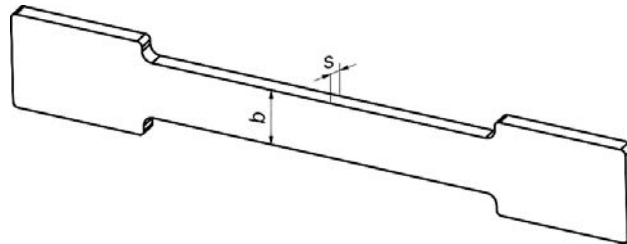
5. Anizotropija

- Neravnomernost karakteristika lima u različitim pravcima
 - a. Polarna anizotropija – anizotropija u ravni
 - b. Normalna anizotropija – razlike osobine lima u ravni i u pravcu debljine

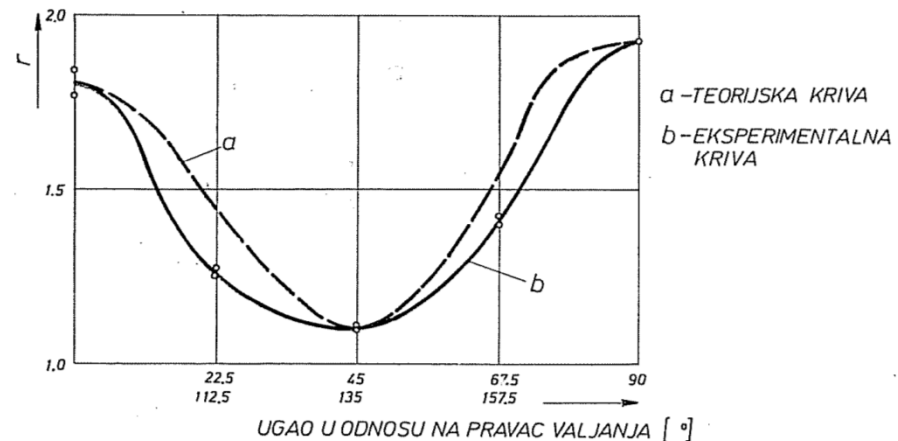
Normalna anizotropija – r faktor

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}} \approx 1$$

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_0 + r_{45} + r_{90})$$



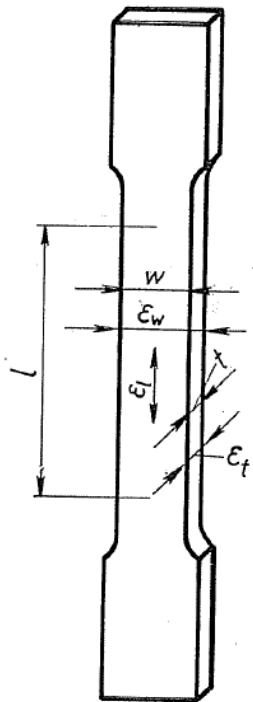
r=1 – materijal izotropan
r>1 – materijal poseduje dobro otpornost ka stanjenju (manja mogućnost lokazivane deformacije) što pozitivno utiče na obradivost dubokim izvlačenjem



Ocena obradivosti lima na osnovu mehaničkih karakteristika materijala

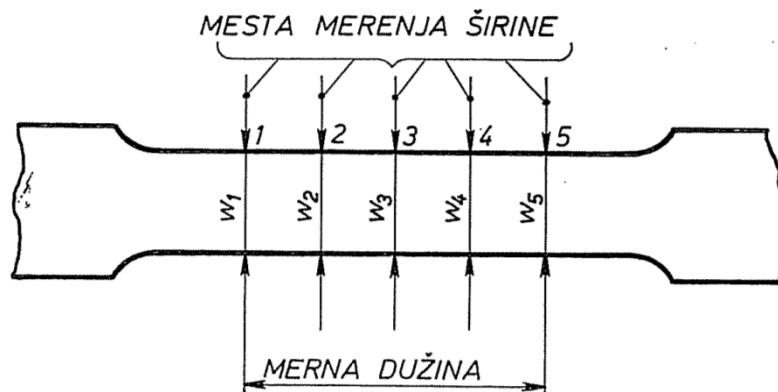
5. Anizotropija

- Eksperimentalno određivanje r-faktora

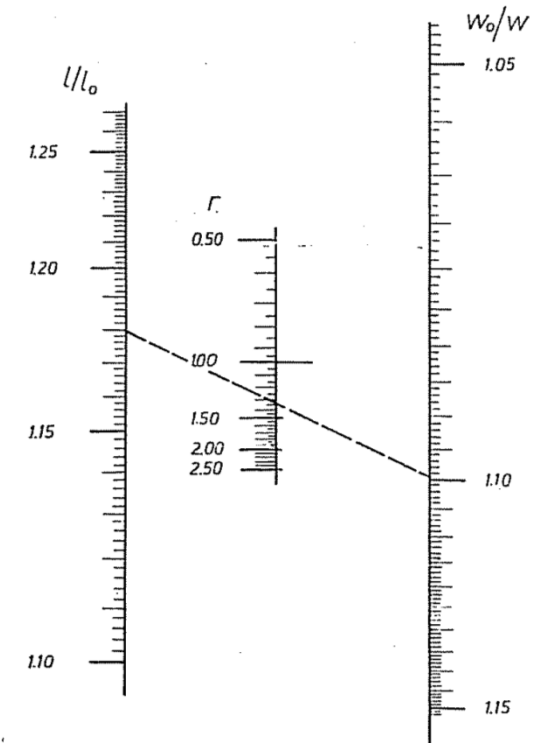


$$r = \frac{\log w - \log w_0}{\log l_0 w_0 - \log l w} = \frac{\log w - C_1}{C_2 - \log l w}$$

- Izduženje epruvete za 20%
- Merenje širine epruvete na više mesta



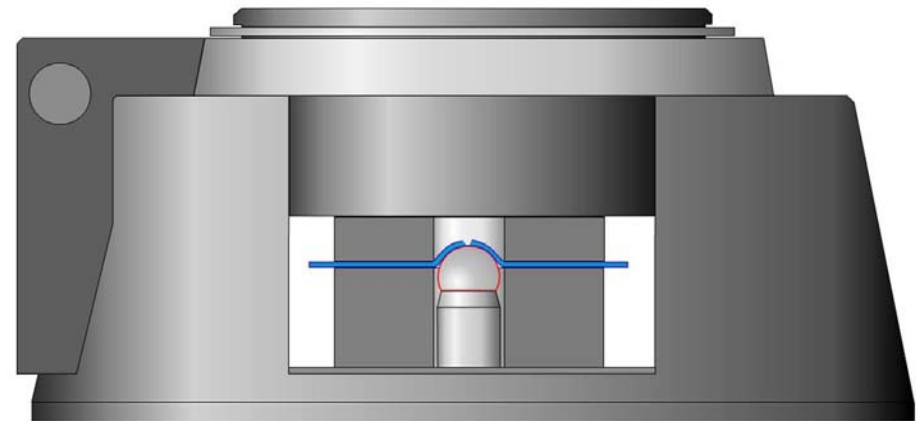
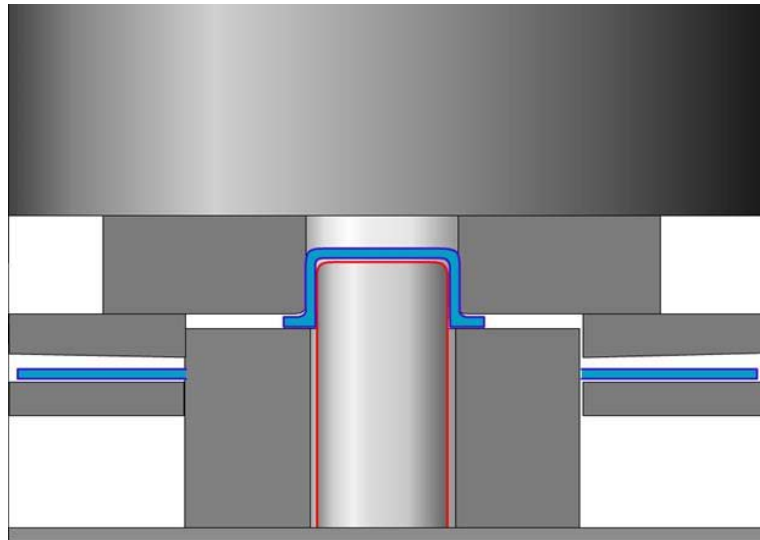
$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5}{5}$$



Simulativne metode ispitivanja lima

Izvide se u cilju definisanja/određivanja odgovarajućih karakteristika lima u uslovima koji treba da što vernije imitiraju uslove obrade, odnosno deformacioni procesi u materijalu su slični onima u realnim uslovima.

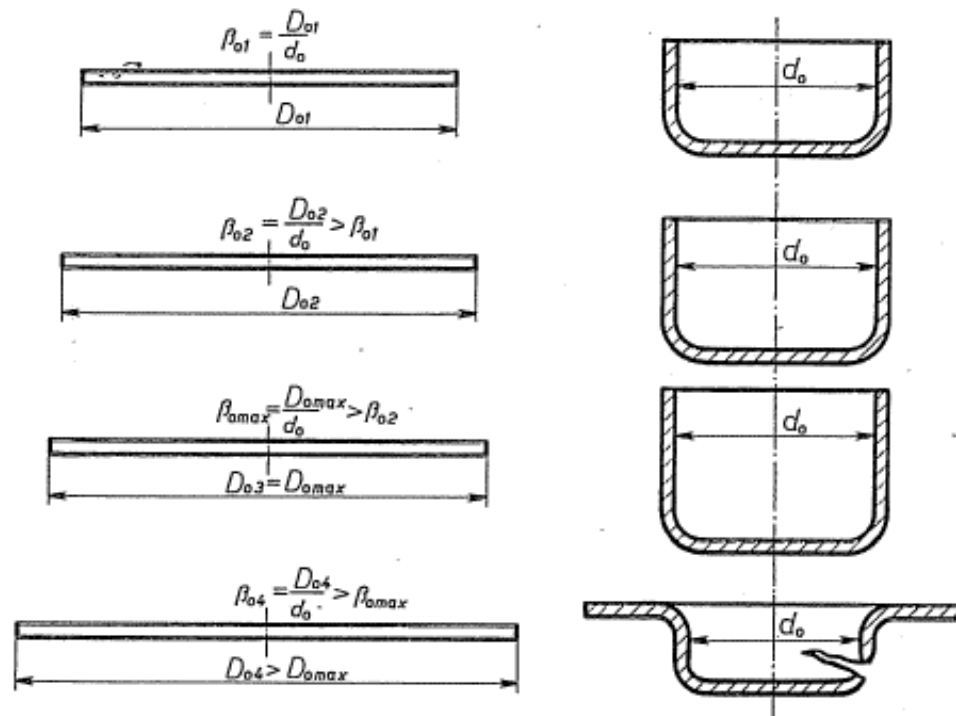
- 1) Metode/postupci ispitivanja zasnovane na čistom dubokom izvlačenju,
- 2) Metode zasnovane na razvlačenju,
- 3) Kombinovani i specijalni postupci



Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju

- Princip ispitivanja – najčešće se zasniva na određivanju graničnog maksimalnog prečnika pripreмка ($D_{0 \max}$) koji se u datim uslovima može uspešno izvući standardnim izvlakačem/žigom prečnika d_0 .
- Granični stepen izvlačenja ($\beta_{0 \max}$)

$$\beta_{0 \max} = \frac{D_{0 \max}}{d_0} = 1,65 \div 2,20$$



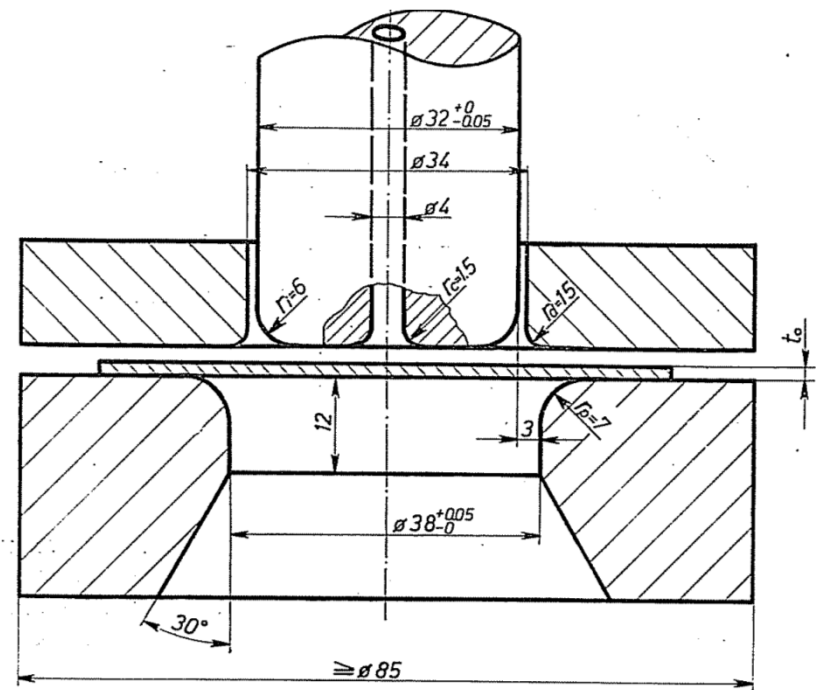
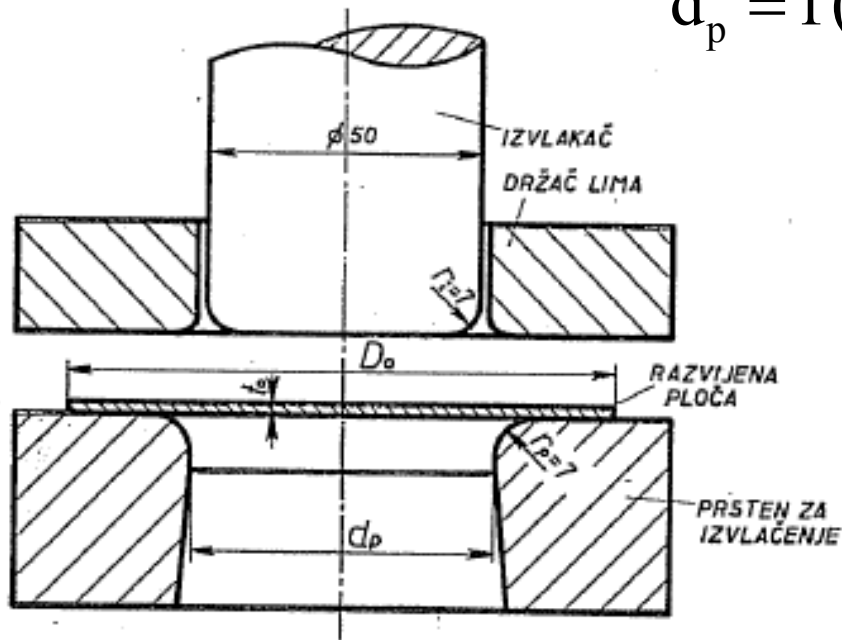
Uticaj trenja na rezultate ispitivanja:

- trenje zavisi od oblika čela žiga
- uticaj trenja na maksimalnu silu je manji ako je veći poluprečnik zaobljena čela žiga.
- povećanje podmazivanje žiga dovodo do smanjenja sposobnosti dubokog izvlačenja, odnosno smanjenju maksimalne sile koja se može preneti.

Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju A.E.G. postupak (Cup drawing test)

- Izvodi se na univerzalnim presama pomoću specijalnog alata.
- Prečnik žiga je konstantan ($d_z=50\text{mm}$), a varira se prsten za izvlačenje (matrica).
- Set od 20 različitih prstenova ($t=0,2 \div 3,5\text{mm}$)

$$d_p = f(t)$$



PRIMER ZA VELIČINE PREČNIKA d_p (GARNITURA SADRŽI 20 RAZLIČITIH PRSTENOVA):

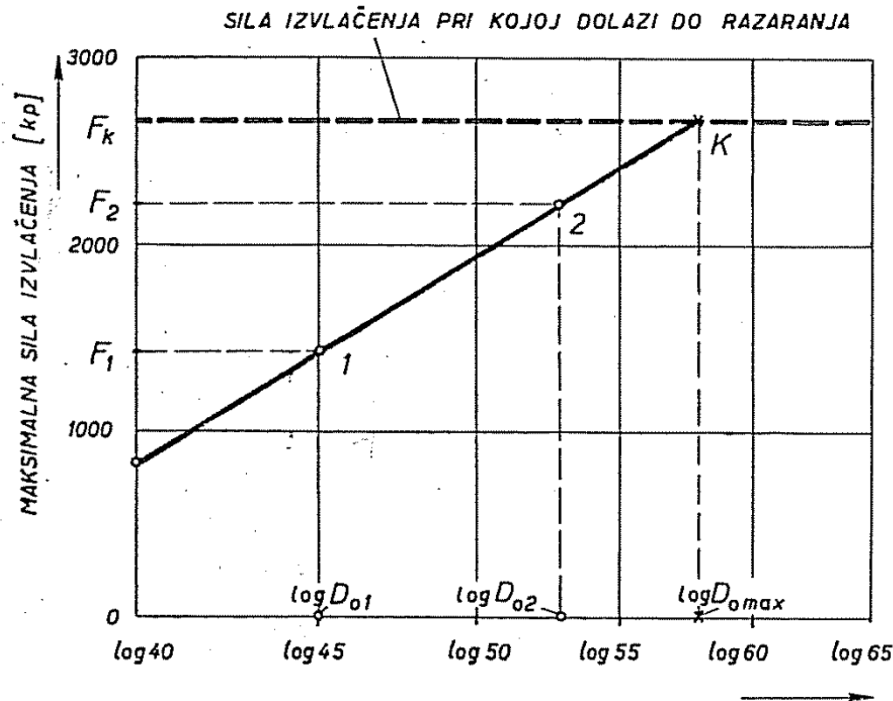
ZA DEBLJINU LIMA $t_0 = 0,2\text{mm}$, $d_p = 50,44\text{mm}$,
 - II - - II - - II - $t_0 = 1,0\text{mm}$, $d_p = 52,08\text{mm}$;
 - II - - II - - II - $t_0 = 3,5\text{mm}$, $d_p = 57,21\text{mm}$;

ITD.

Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju

Schmidt-ov postupak

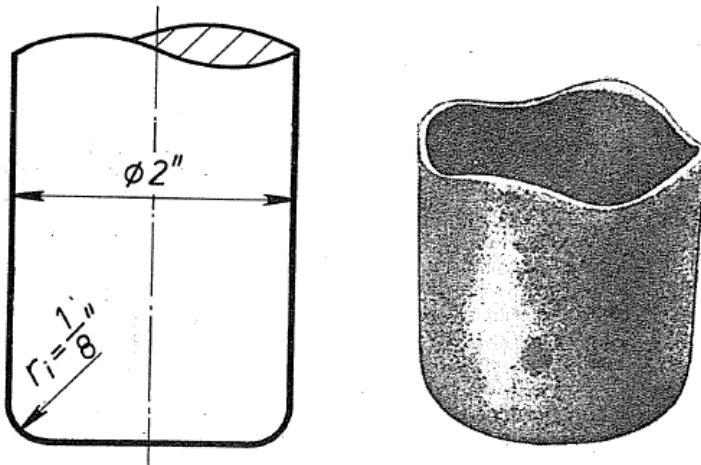
- Pojednostavljeni postupak za određivanje graničnog stepena izvlačenja ($\beta_{0 \max}$)
- Linearna veza između maksimalne sile na izvlačaču (F_{\max}) i logaritma početnog prečnika ($\log D_0$)
- Dva testa (tačke 1 i 2), treći test (tačka K) se izvodi radi određivanja sile razaranja (F_K)



$$\log D_{0 \max} = \log D_{01} + \frac{F_K - F_1}{F_2 - F_1} (\log D_{02} - \log D_{01})$$

Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju Swift-ov postupak

- Principijelno se ne razlikuje od metode A.E.G.
- Postupak čisto duboko izvlačenja šupljeg cilindričnog tela ravnim izvlakačem ($d=2''$) u svrhu određivanja $\beta_{0 \max}$



Modifikovani Swift-ov postupak

a) $\phi 32 \pm 0,05$ sa poluprečnikom zaobljenja ivice čela $4,5 \pm 0,1$ mm,

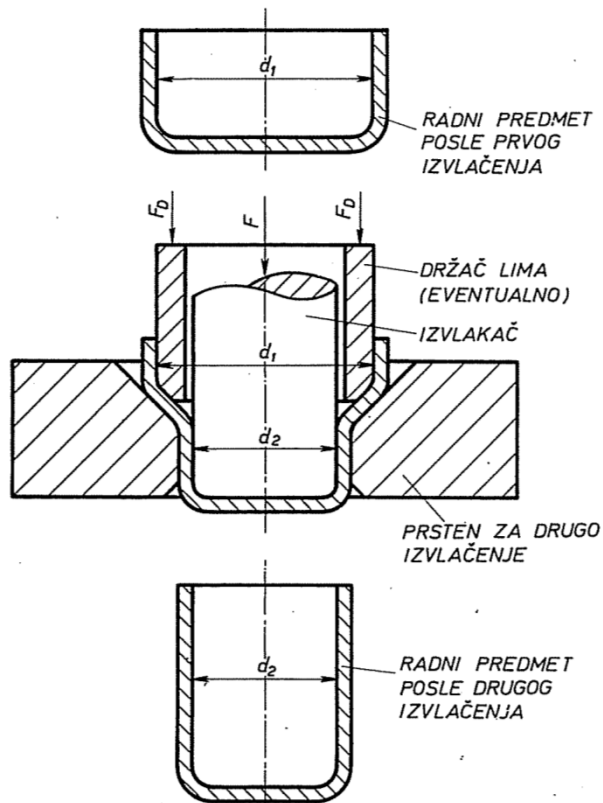
b) $\phi 50 \pm 0,05$ sa poluprečnikom zaobljenja ivice čela $5 \pm 0,1$ mm.

Izvlakač sa prečnikom 32 mm upotrebljava se za lim debljine 0,3—1,24 mm,
a sa prečnikom 50 mm za debljine 0,45—1,86 mm.

Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju

Ispitivanje višestrukim izvlačenjem

- Kod ovog postupka obradak posle prve operacije izvlačenja ide na drugu, zatim na treću itd., odnosno do pojave razaranja.
- Obično se izvodi u dve faze



$$\beta_u = \frac{D_0}{d_i} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_i = \frac{D_0}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} \cdot \dots \cdot \frac{d_{i-1}}{d_i}$$

$$\beta_{2 \max} \approx 1,4$$

$$\beta_{u \max} \approx 2,6 \div 3$$

Postupci zasnovani na dubokom izvlačenju

Ispitivanje višestrukim izvlačenjem

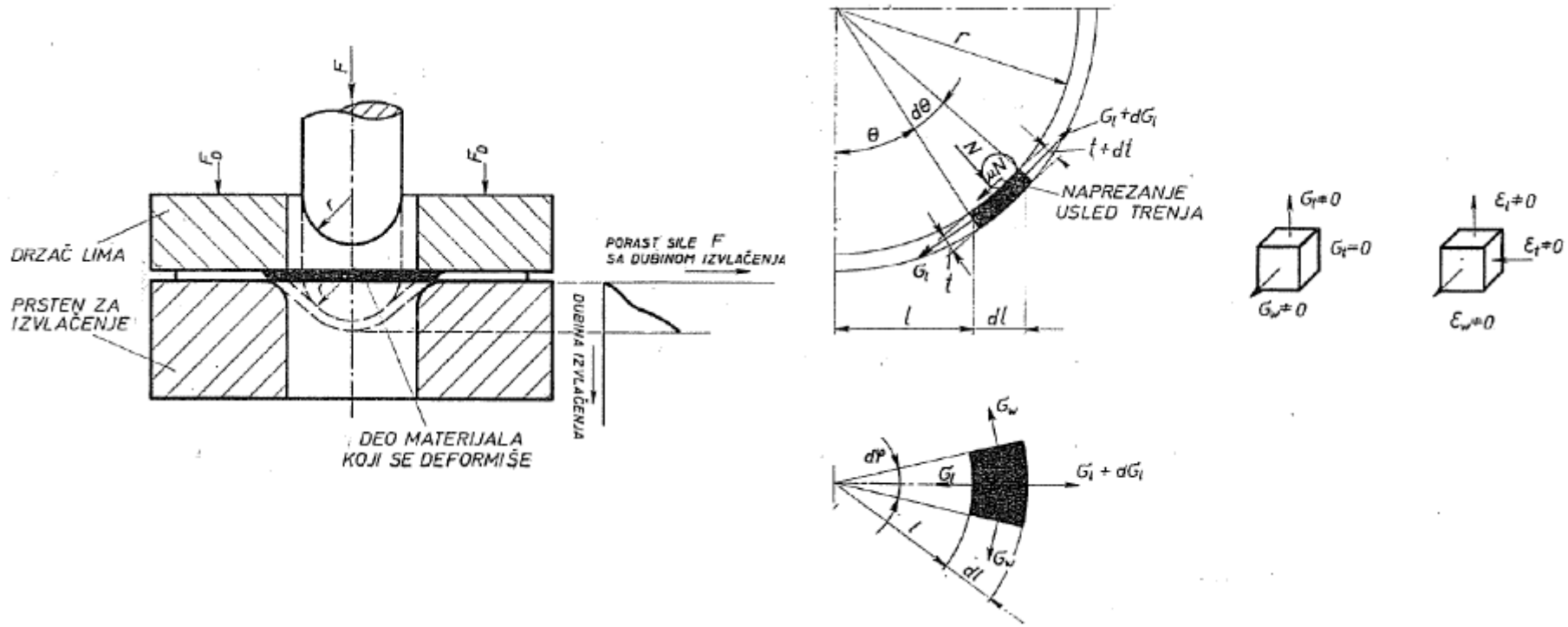
Tabela 4

Broj materijala		Prečnici izvlačača za prvu operaciju		2. operacija	3. operacija	4. operacija	5. operacija	6. operacija	7. operacija	β_u
		$d_1 = 32 \text{ mm}$	$d_1 = 45,7 \text{ mm}$							
1	D_{0max} ili d_n	71	98	—						
	β_{nmax}	2,22	2,15	(1,11)*						2,15
2	D_{0max} ili d_n	69	96	32,0	25,2	—				
	β_{nmax}	2,16	2,10	1,43	1,27	(1,06)				3,80
3	D_{0max} ili d_n	70,5	98	32,0	—					
	β_{nmax}	2,20	2,15	1,43	(1,07)					3,06
4	D_{0max} ili d_n	69	95	27,5	23,9	—				
	β_{nmax}	2,16	2,08	1,66	1,17	(1,05)				4,04
5	D_{0max} ili d_n	71	98	32,0	29,7	—				
	β_{nmax}	2,22	2,15	1,43	1,08	(1,08)				3,30
6	D_{0max} ili d_n	70	98	32,0	25,2	20,4	—			
	β_{nmax}	2,19	2,15	1,43	1,27	1,24	(1,05)			4,80
7	D_{0max} ili d_n	70	97	32,0	25,2	20,4	—			
	β_{nmax}	2,19	2,12	1,43	1,27	1,24	(1,06)			4,75
8	D_{0max} ili d_n	70	96	32,0	25,2	20,4	17,4	—		
	β_{nmax}	2,19	2,10	1,43	1,27	1,24	1,17	(1,05)		5,50
9	D_{0max} ili d_n	70	97	32,0	25,2	20,4	17,4	14,9		
	β_{nmax}	2,19	2,12	1,43	1,27	1,24	1,17	1,17		6,50
10	D_{0max} ili d_n	70	98	32,0	25,2	20,4	17,4	15,7	—	
	β_{nmax}	2,19	2,15	1,43	1,27	1,24	1,17	1,11	(1,04)	6,25
11	D_{0max} ili d_n	70	98	34,3	27,5	22,0	18,35	16,5	—	
	β_{nmax}	2,19	2,15	1,33	1,25	1,25	1,17	1,11	(1,05)	5,95
12	D_{0max} ili d_n	70,5	99	34,3	27,5	22,7	19,3	16,5	—	
	β_{nmax}	2,20	2,17	1,33	1,25	1,21	1,18	1,17	(1,05)	6,00

*) Brojevi u zagradama odnose se na stepene izvlačenja pri koji ma je u toku ispitivanja došlo do razaranja materijala. Na primer, materijal pod rednim brojem 1. ne može se uspešno izvlačiti u drugoj operaciji.

Postupci zasnovani na razvlačenju

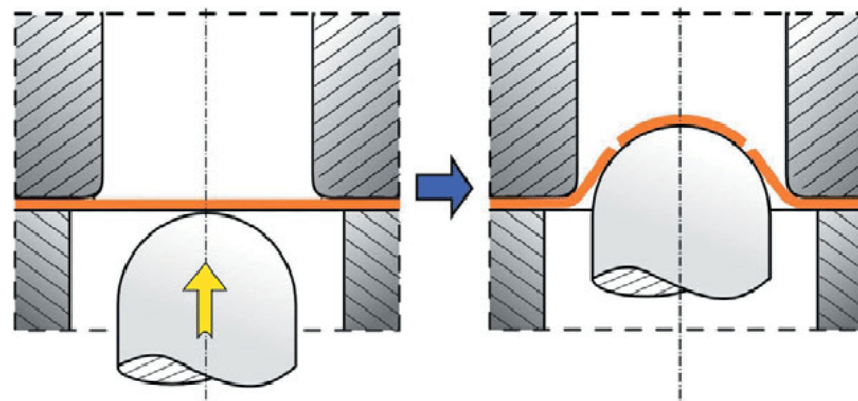
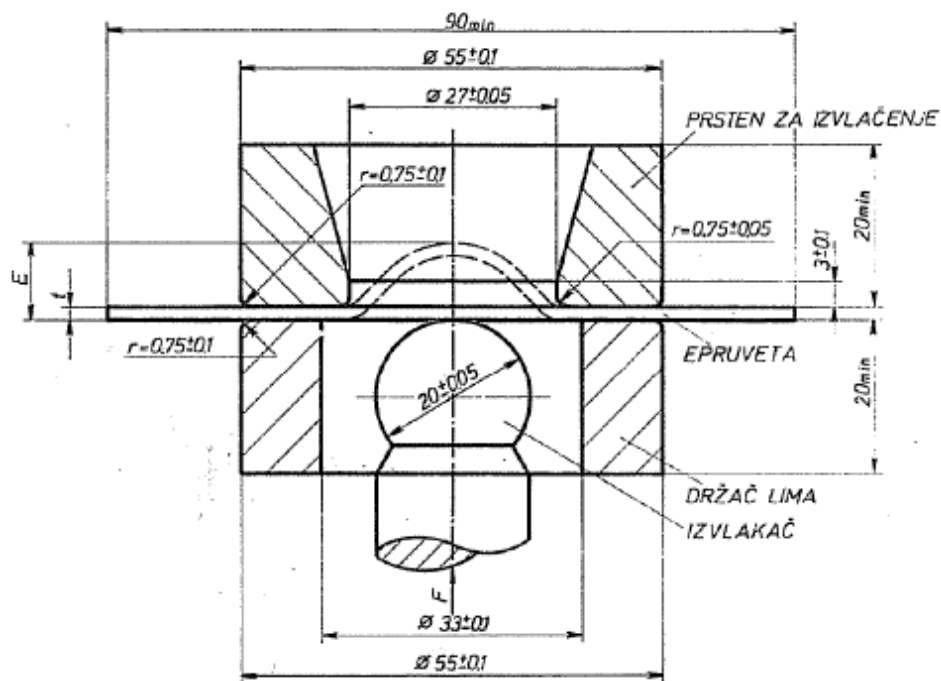
- Razvlačenje** – postupak oblikovanja gde se vrši istovremeno razvlačenje lima u više pravaca, pri čemu se obod obratka drži fiksiranim (ne povlači se ka centralnom delu kao kod dubokog izvlačenja).



Postupci zasnovani na razvlačenju

Ericksen-ov test

- Postupak razvijen 1912 god.
- Standard: ISO 20482 / ASTM E643-84
- Za ispitivanje limova debljine $0,2 \div 2$ mm. Brzina izvlačenja $0,1 \div 0,3$ mm/sec



Postupci zasnovani na razvlačenju

Erichsen-ov test

Tools for the Cupping test to Erichsen/Olsen (ISO 20482 / ASTM E643-84)⁽⁴⁾



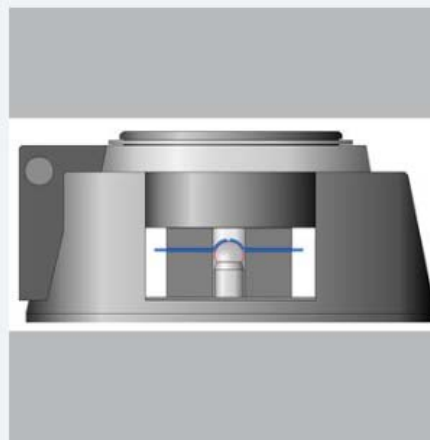
Tools for the cupping test to Erichsen or Olsen (ISO 20482 / ASTM E643-84)

From the left: Die, blank holder, draw matrix



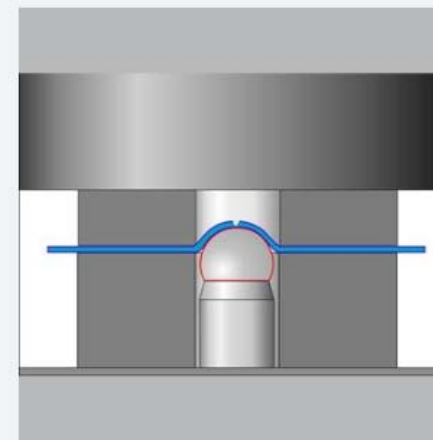
Cupping tests on a metal strip

For a cupping test, at least three tests are performed.



Cross-section of a cupping test

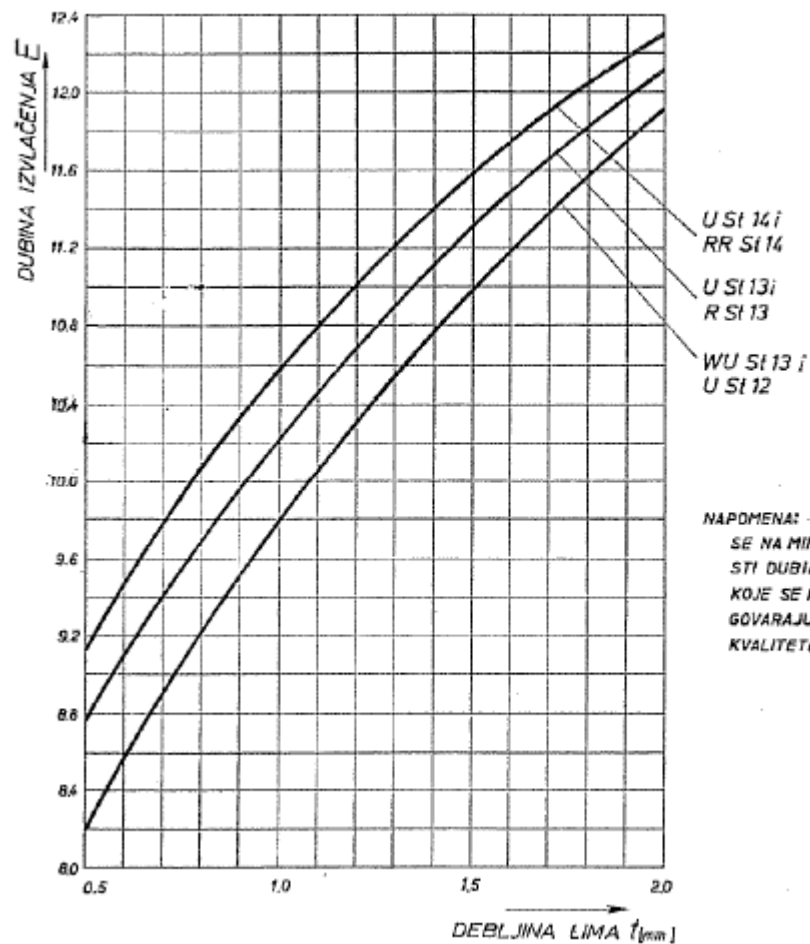
The specimen is pulled until a crack occurs.



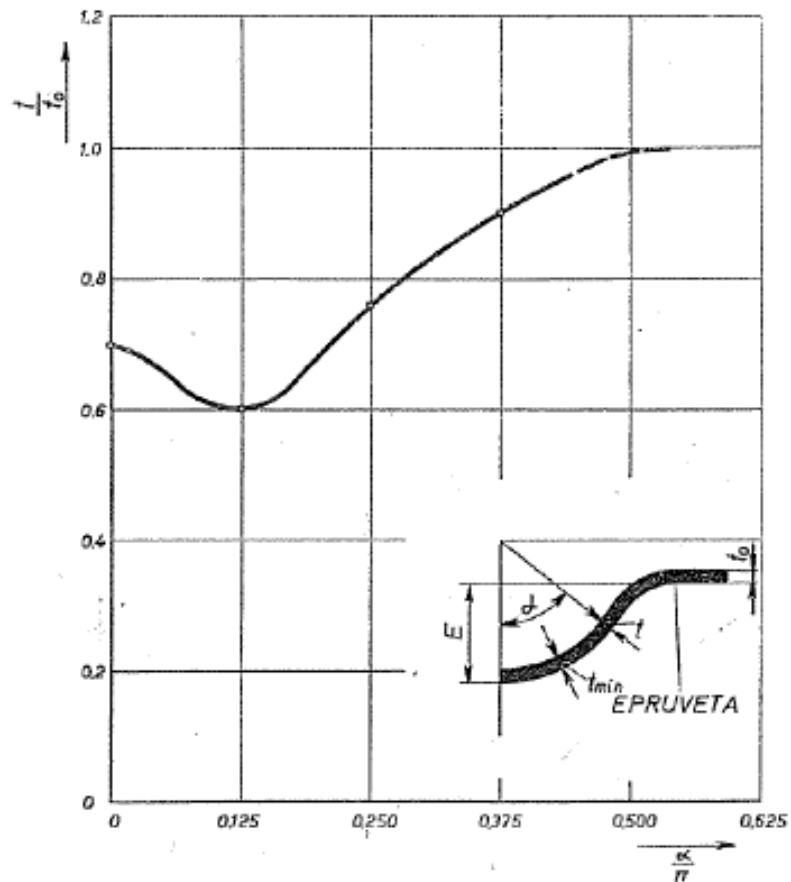
Detailed illustration of the cupping test

With the test, the indentation depth as well as the force are determined.

Postupci zasnovani na razvlačenju Ericshen-ov test



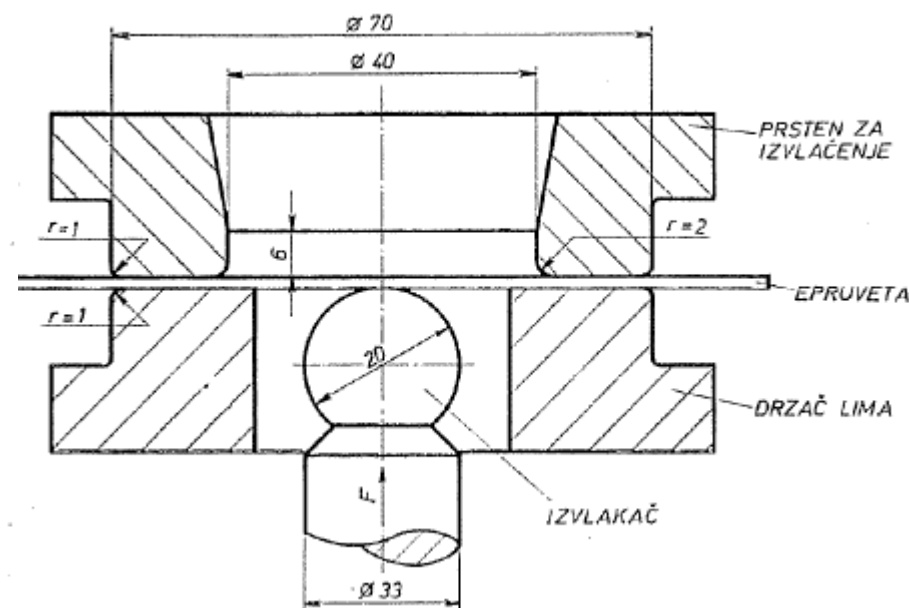
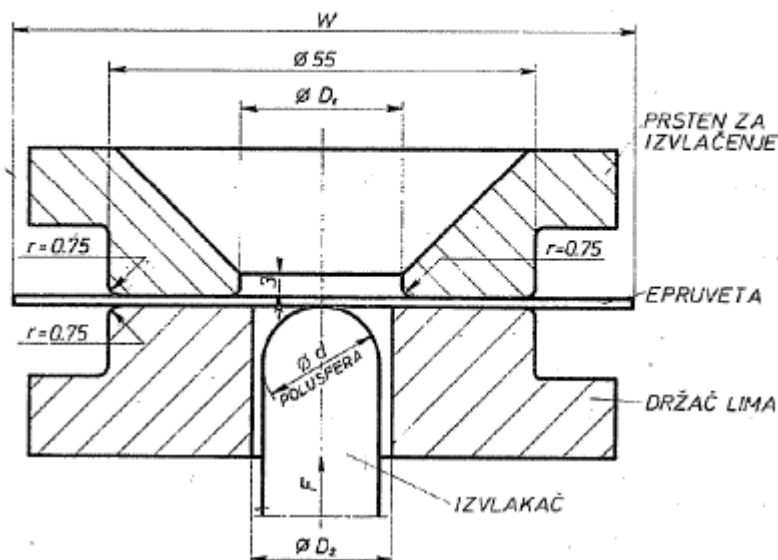
NAPOMENA: KRIVE SE ODNOSE NA MINIMALNE VREDNOSTI DUBINA IZVLAČENJA KOJE SE POSTIŽU ZA ODGOVARAJUĆE NOMINALNE KVALITETE LIMA



Postupci zasnovani na razvlačenju Erichsen-ov test

Standard: DIN-50102

Erichsen test za limove debljive $2 \div 3$ mm



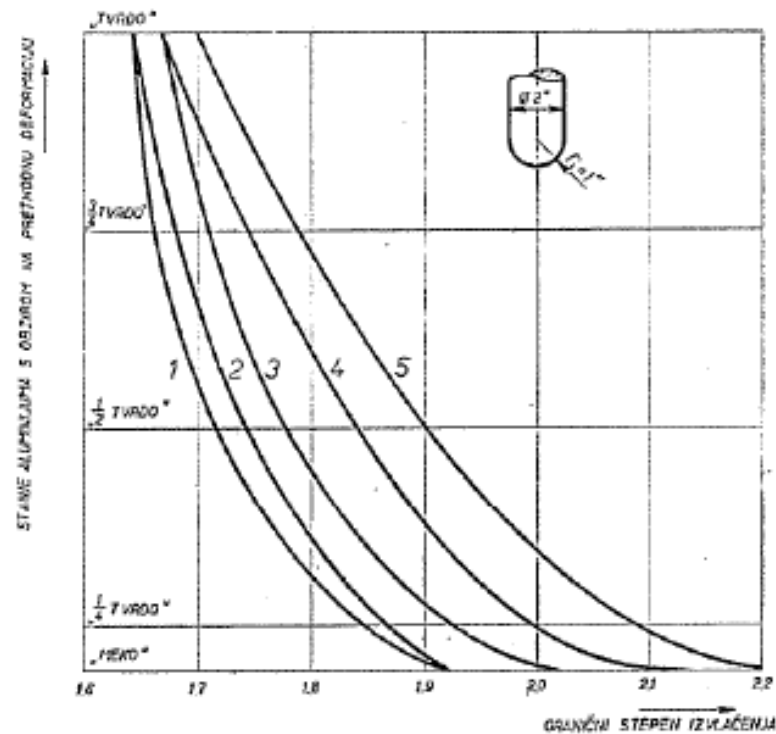
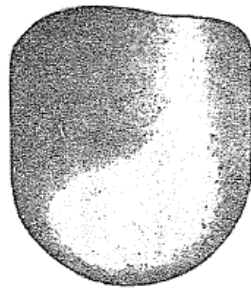
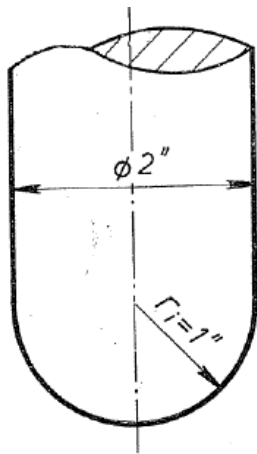
ŠIRINE LIMA W i DEBLJINE t	DIMENZIJE ALATA		
	d	D_1	D_2
$55 = W < 90$ $0.2 \leq t \leq 2$	15	21	18
$30 \leq W < 55$ $0.2 \leq t \leq 1$	8	11	10

Osnovne dimenzije uređaja za ispitivanje po Erichsen-u limova čija je širina manja od 90 mm (prema standardu DIN-50102)

Kombinovani i specijalni simulativni postupci

Kombinovani testovi – ideja je da se istovremeno ostvare različiti vidovi deformisanja, tj. deformacioni procesi karakteristični za procese dubog izvlačenja i razvlačenja

Swift-ov test sa polusferičnim žigom



- 1 - BEZ PODMAZIVANJA
- 2 - IZVLAČAČ PODMAZAN GRAFITIRANOM MAŠĆU
- 3 - PRETEN ZA IZVLAČENJE PODMAZAN GRAFITIRANOM MAŠĆU
- 4 - OBE STRANE PODMAZANE GRAFITIRANOM MAŠĆU
- 5 - OBE STRANE PODMAZANE KALCIJUM OLEATOM

Određivanje dijagrama granične deformabilnosti za lim

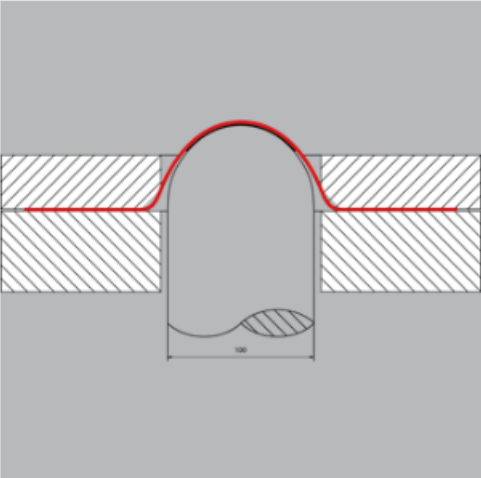
Nakajima i Marciniak testovi

Tools for the forming limit curve (FLC) to ISO 12004



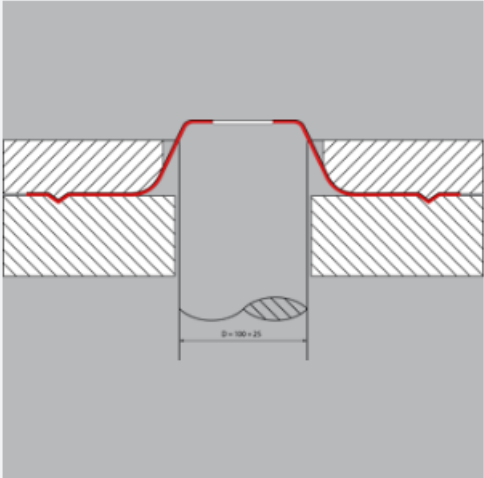
Tools for the forming limit curve (FLC) to ISO 12004

Left: Die and blank holder to Marciniak
Right: Die and blank holder to Nakajima



Sketch: Forming limit curve to Nakajima

The forming limit curve to Nakajima is performed using a hemispherical cupping die.



Sketch: Forming limit curve to Marciniak

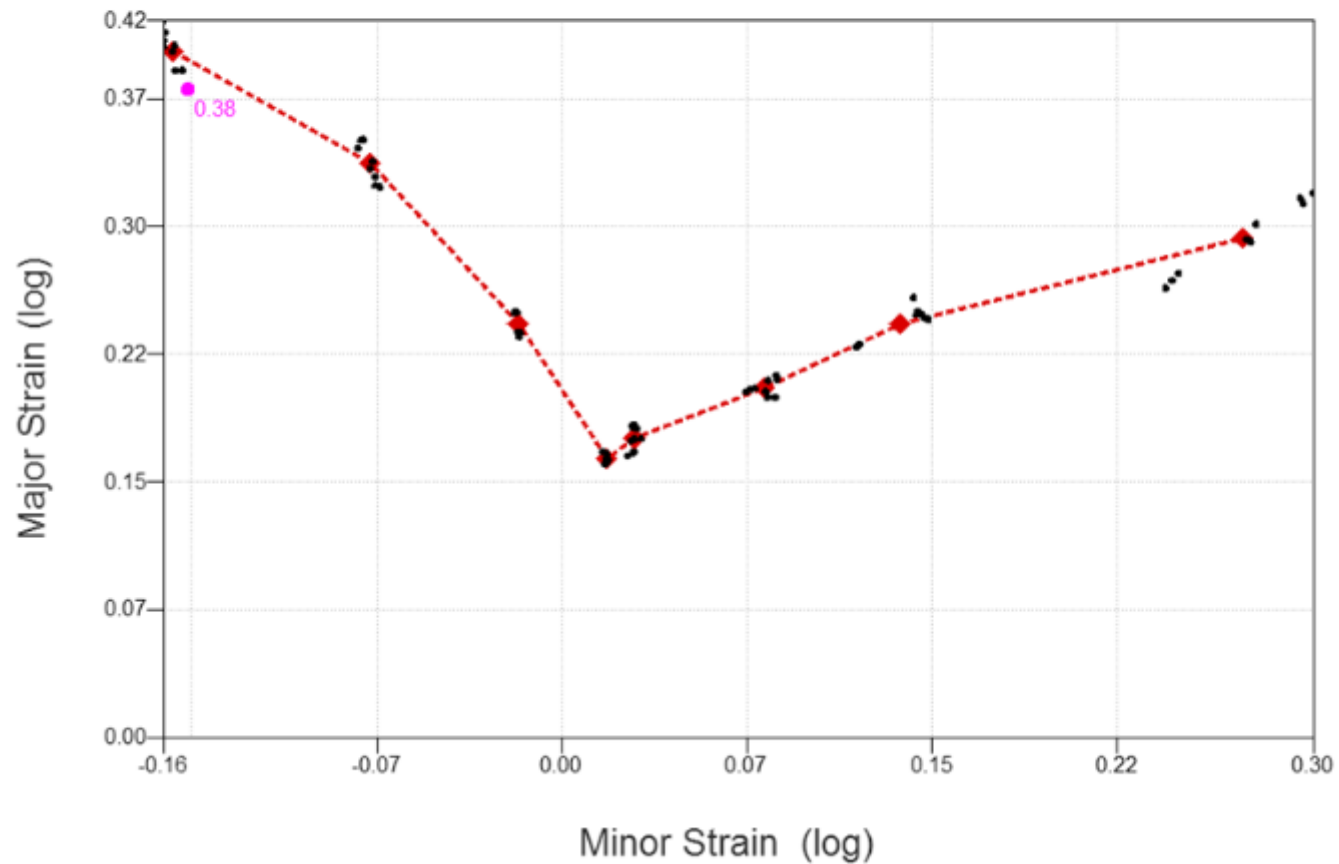
The forming limit curve to Marciniak is determined using a flat cupping die.



Određivanje dijagrama granične deformabilnosti za lim

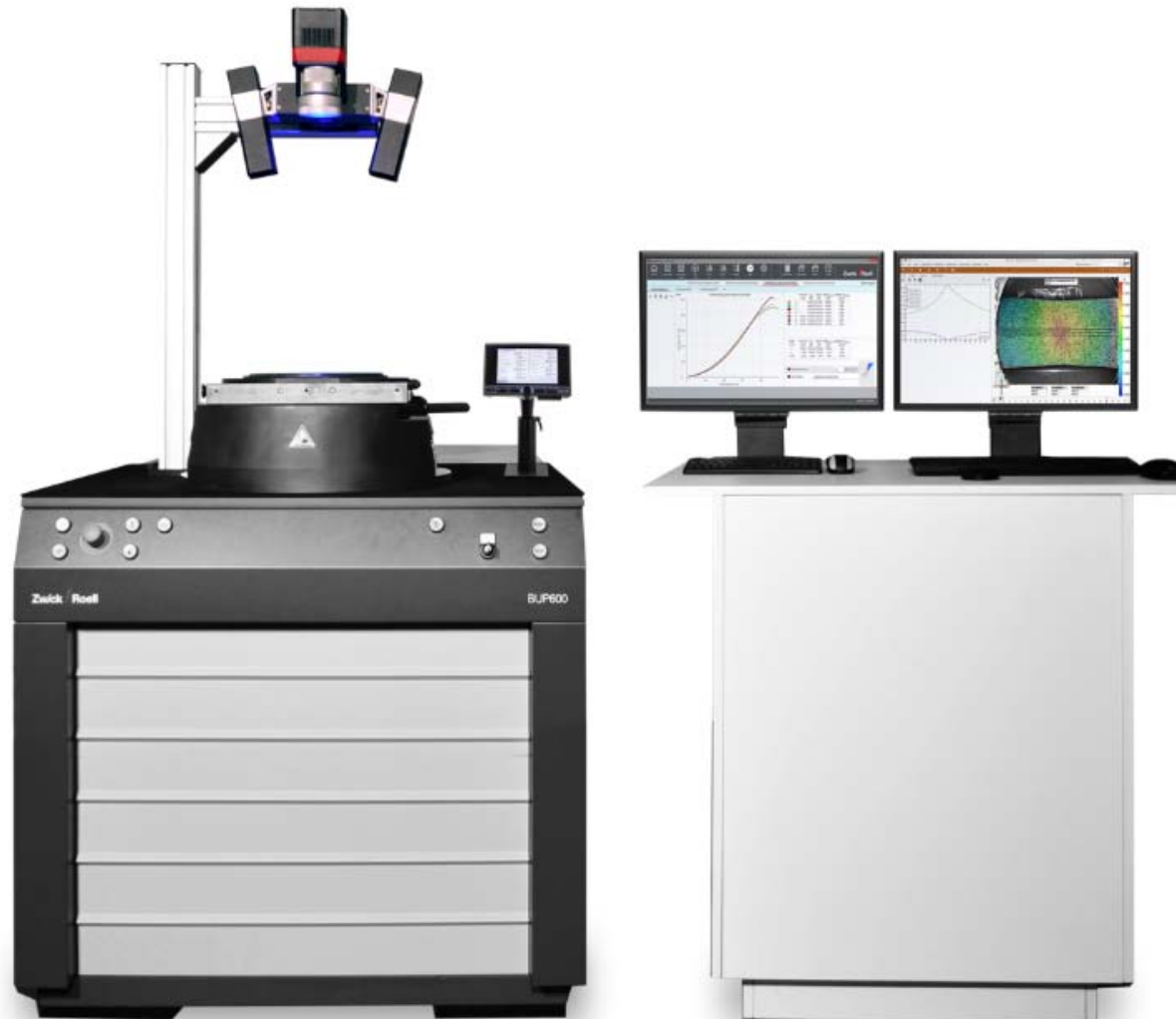
The attainable deformations of different specimen shapes define the forming limit curve of a material.

As a rule, three specimens are prepared for each geometry, with three sections on each specimen. For the forming limit curve a minimum of 5 specimen geometries are tested (here there are 8).



Određivanje dijagrama granične deformabilnosti za lim

Optički 3D merni sistem Aramis



Određivanje dijagrama granične deformabilnosti za lim

The hydraulic bulge test to ISO 16808

