

# Предавање 5b

Машински материјали

# СВОЈСТВА ДЕФОРМАЦИЈЕ

- Процентуално издужење,  $A$
- Процентуално сужење попречног пресека епрувете,  $Z$ .

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

$$Z = (S_0 - S_u) / S_0 \times 100 \text{ [%]}$$

•Где су  $S_0$  и  $S_u$  – почетна и крајња површина попречног пресека.

•Где су  $l_0$  и  $l_u$  – почетна мерна дужина епрувете и дужина епрувете након лома.

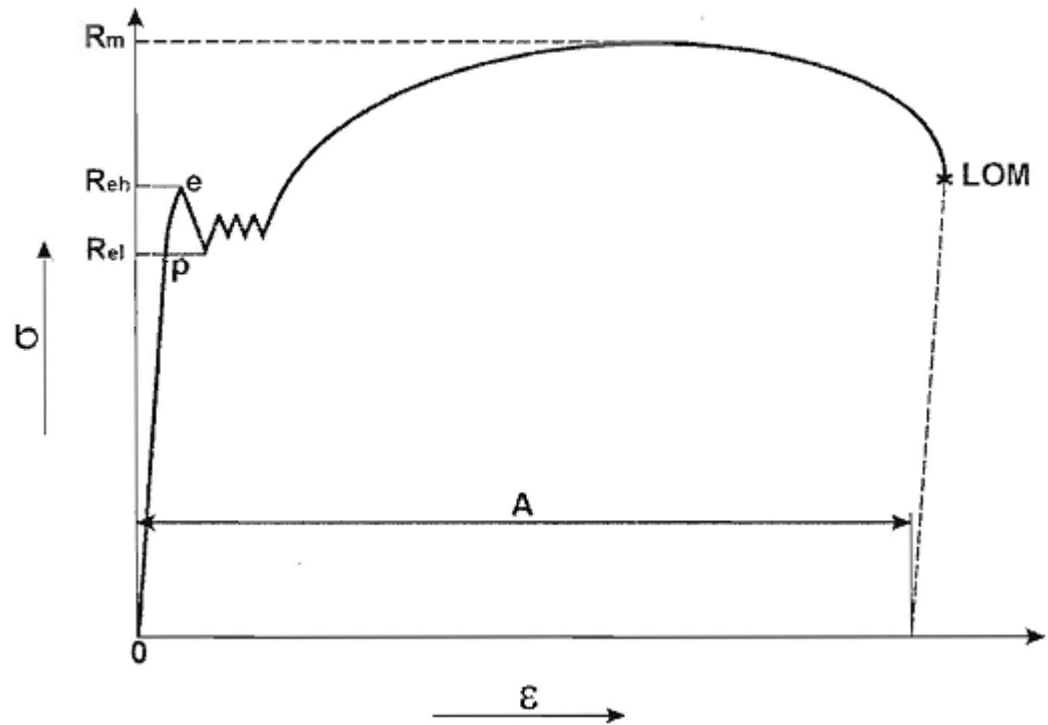
# Процентуално издужење-ε

Тренутно издужење:

$$\Delta L = L - L_0,$$

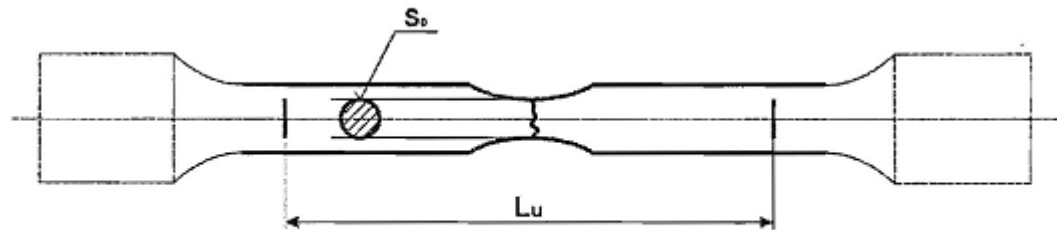
сведену на мерну дужину  
тзв. **процентуално**  
**издужење:**

$$\varepsilon = L - L_0 / L_0 = \Delta L / L_0 \times 100 (\%)$$

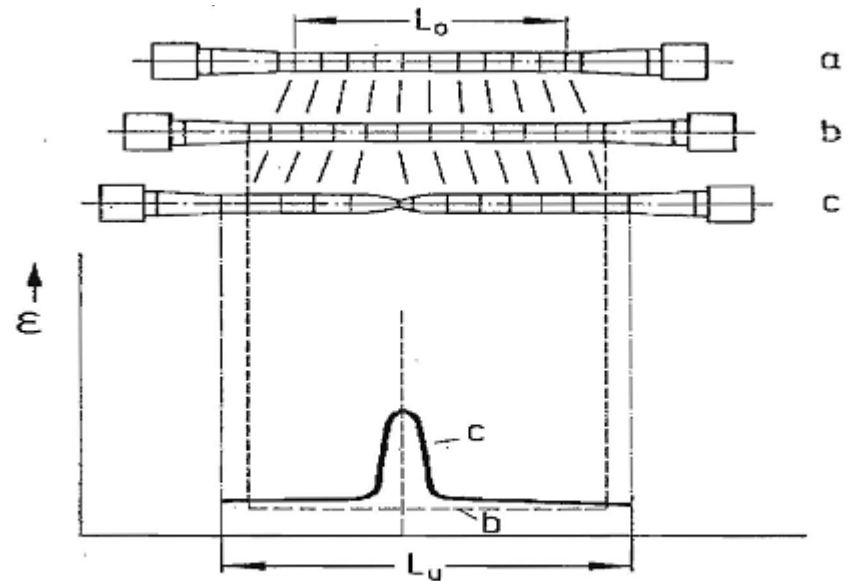


Дијаграм напон-издужење

# Корекција мерне дужине епрувете

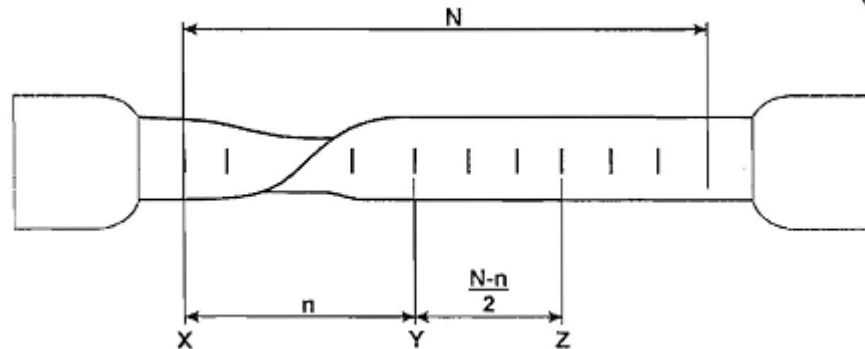


Sl.10.11. Skica prelomljene epruvete



Sl.10.12. Veličina izduženja po mernoj dužini

# Корекција мерне дужине



Ако се место прекида епрувете налази на једној трећини од краја епрувете, а не на средини мерне дужине, користи се следећи поступак мерења:

- 1) Пре испитивања се почетна мерна дужина епрувете подели на  $N$  једнаких делова.
- 2) После испитивања мерни део на краћем делу прекинуте епрувете се означи са  $X$ , а на дужем делу означи са  $Y$  тачка која је на истом броју подеока од прекида као тачка  $X$ . Ако је  $n$  број делова између  $X$  и  $Y$ , издужење после прекида одређује се на следећи начин: Ако је  $(N-n)$  паран број, мери се растојање између  $X$  и  $Y$  и дужина  $(N-n)/2$  подеока као растојање између  $Y$  и  $X$ .

Затим се процентуално издужење после прекида израчунава помоћу обрасца:

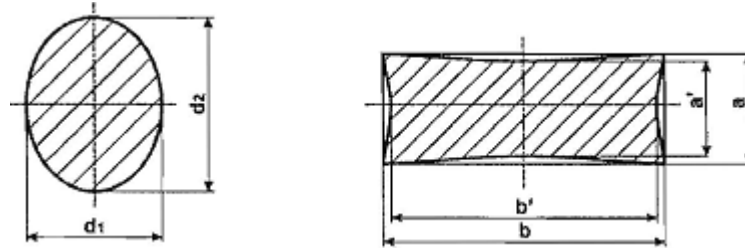
$$A = (XZ + 2YZ - L_0) / L_0 \times 100 [\%]$$

# Сужење

Процентуално сужење попречног пресека после прекида се израчунава према обрасцу:

$$Z = (S_0 - S_u) / S_0 \times 100 \text{ [\%]}$$

$$S_u = a' \times b'$$



Скица површине прелома

Брзина оптерећења при испитивању затезањем најмања је 1 а највећа 30 МПа s-1, у зависности од модула еластичности материјала

# ТВРДОЋА

Под **тврдоћом** подразумевамо физичко својство, тј. отпор којим се супроставља једно тело ка продирању другог тврђег тела у његову површину.

Тврдоћа се може одредити:

- Статичким
- Динамичким
- Специјалним методама

Код **статичких метода** сила испитивања која делује на утискивач *постепено расте до максималне вредности.*

Код **динамичких испитивања** сила на утискивачу се *остварује ударом*, или се тврдоћа *одређује на основу еластичног одскока утискивача од површине која се испитује.*

# ПРЕГЛЕД МЕТОДА МЕРЕЊА ТВРДОЋЕ

## Статичке методе:

- **Бринел (Brinell)** метода  
HBS, HBW
- **Викерс (Vickers)** метода,  
HV
- **Роквел (Rockwell)**  
метода, HRC
- **Кнуп (Кноор)** метода, HK

## Динамичке методе:

- **Полди (Poldy)** метода,  
HP
- **Склероскопска** метода  
(по Шору (Shore)), HSh
- **Дуроскопска** метода, HD



# СТАТИЧКЕ МЕТОДЕ МЕРЕЊА ТВРДОЋЕ

**Тврдоћа по Бринеловој методи** дефинише се као *однос силе и површине утискивача*.

Утискивач је у облику куглице пречника  $D$  (1, 2,5; 5 и 10mm) а може да буде направљен од челика (HBS) или од тврдог метала- волфрам карбида (HBW). Између тврдоће по Бринеловој методи и затезне чврстоће успостављен је однос и код већине нискоугљеничних челика важи релација  **$R_m = 3,45HB$** .

**Тврдоћа по Викерсовој методи** се дефинише као однос силе и површине отиска утискивача.

Утискивач је у облику правилне четворостране пирамиде са дијаматским врхом и углом при врху од  $136^\circ$ .

Мерило тврдоће по **Роквеловој методи** је дубина утискивања утискивача. Утискивач може да буде у облику куглице направљене од челика или у облику конуса са дијамантским врхом.

# СТАТИЧКЕ МЕТОДЕ МЕРЕЊА ТВРДОЋЕ

**Тврдоћа по Кноор-овој методи** дефинише као однос силе и површине отиска утискивача. Утискивач је у облику издужене пирамиде и има дијамантски врх. При мерењу тврдоће се користе веома мала оптерећења, овом методом се одређује микротврдоћа. Тврдоћа је погодна за одређивање тврдоће металних зрна као и фаза у легурама.

**Полди (Poldy)** метода, НР је метода испитивања тврдоће ударом .

Тврдоћа се одређује тако што се челична куглица пречника  $D$  (10mm) дејством силе  $F$  истовремено утискује у испитивани материјал и материјал познате тврдоће, еталон. С обзиром да су оба отиска (на материјалу и еталону) добијена дејством исте силе  $F$ , деобом израза за тврдоћу по Бринелу и испитиваног материјала и еталона добија се израз за тврдоћу по Полдију.

Полдијева метода се сматра модификованом Бринеловом методом.

**Склероскопска метода** (по Шору (Shore)), НSh је метода испитивања тврдоће еластичним одскоком.

Склероскоп је стаклева цев у који се налази мали тег (утискивач) са дијамантским врхом.

Са одређене висине утискивач пада на површину материјала чија се тврдоћа мери.

Мерило тврдоће је висина првог еластичног одскока утискивача.

# Tvrdoća po Brinelu

$HB = F/A$ , gde je  $F$ = sila pritiska,  $A$ = površina kugle kalote-otiska

Izvođenje izraza za HB:

Površina kugle kalote:  $A = \pi D \cdot h$

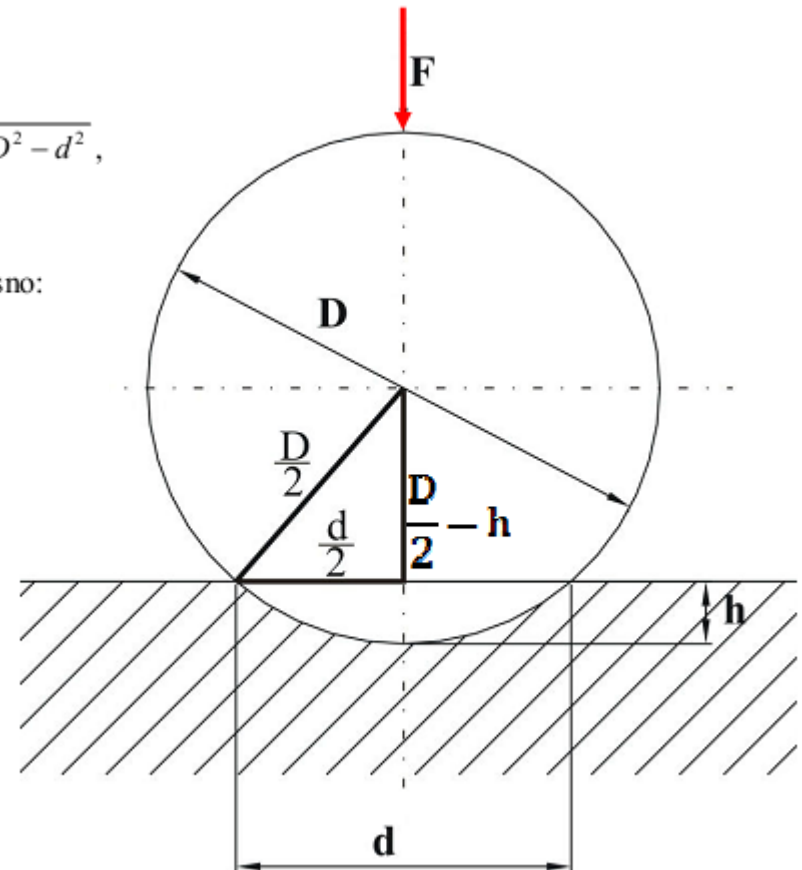
Prema slici je:  $\frac{D}{2} - h = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$ , tj. dubina otiska:  $h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - d^2}$ ,

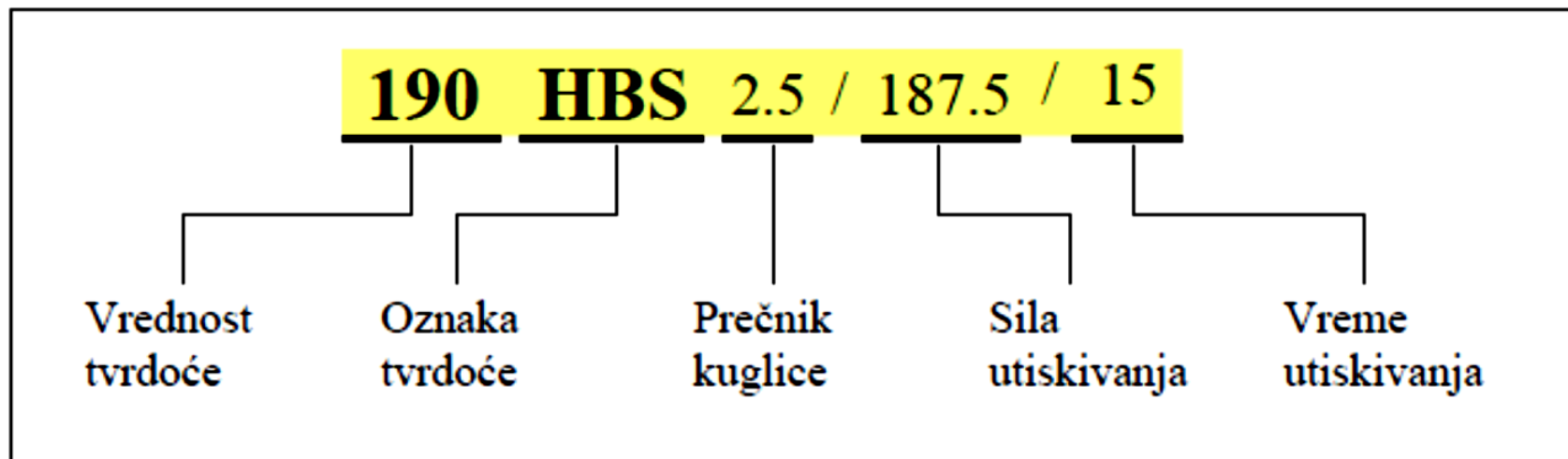
odnosno:  $h = \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$ , pa je:  $A = \pi \cdot D \cdot \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$ ; odnosno:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Pošto s esila izražava u (N), treba predhodni izraz  
Podeliti sa 9,81. Konačan izraz za tvrdoću HB:

$$HB = \frac{0.204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$





#### Utiskivač i sila utiskivanja



*Utiskivač u obliku kuglice*

Za ispitivanje tvrdoće po Brinelu utiskivač je čelična kuglica prečnika 10, 5 i 2.5 mm. Izuzetno prečnik kuglice može biti 1 i 2 mm. Dozvoljeno odstupanje prečnika kuglice odgovara kvalitetu 6 prema ISO standardima.

Materijal kuglice je okaljani čelik tvrdoće 850 HV.

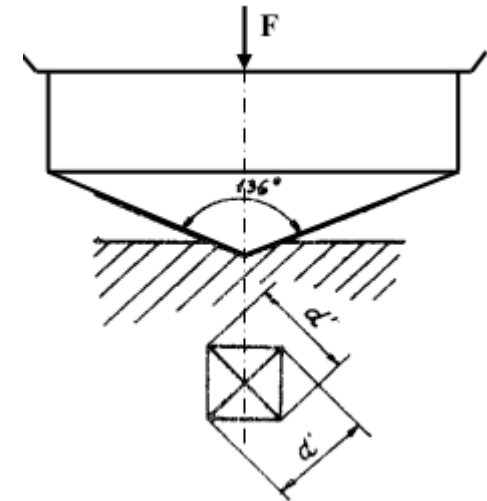
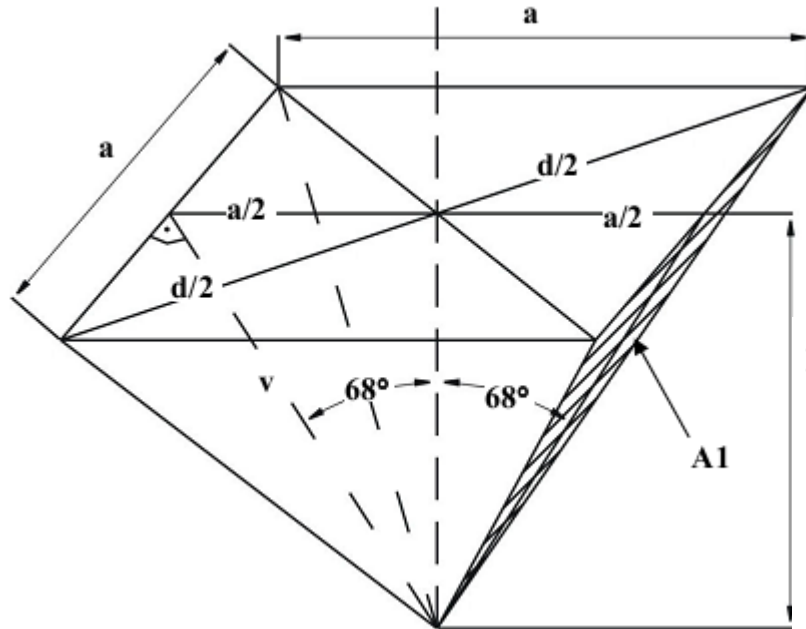
Prečnik kuglice i sila utiskivanja pri ispitivanju tvrdoće po Brinelu određuje se iz uslova:

$$\frac{F}{D^2} = const.$$

# Ispitivanje HV tvrdoće po Vickersu

$HV = \frac{F}{A}$ ; gdje je  $F$ =sila pritiska  
 $A$ =površina otiska ( $4 \cdot A_1$ )

srednja veličina dijagonale je:  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  [mm]



Prema gornjoj slici je:  $a = \frac{d}{\sqrt{2}}$ ;  $v = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}$ ; odnosno

$$A_1 = \frac{a \cdot v}{2} = \frac{\frac{d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}}{2} = \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ}; \text{ a ukupna površina otiska } A \text{ je:}$$

$$A = 4 \cdot A_1 = 4 \cdot \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}; \text{ odnosno:}$$

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

# Ispitivanje tvrdoće po Rokvelu C

## Utiskivač :

Kod HRB –čelilna kuglica 1/16"-Rokvel B

Kod HRC- dijamantska kupa ugao pri vrhu 120°, zaobljenje vrha 0,2mm-Rokvel C

Sile utiskivanja:

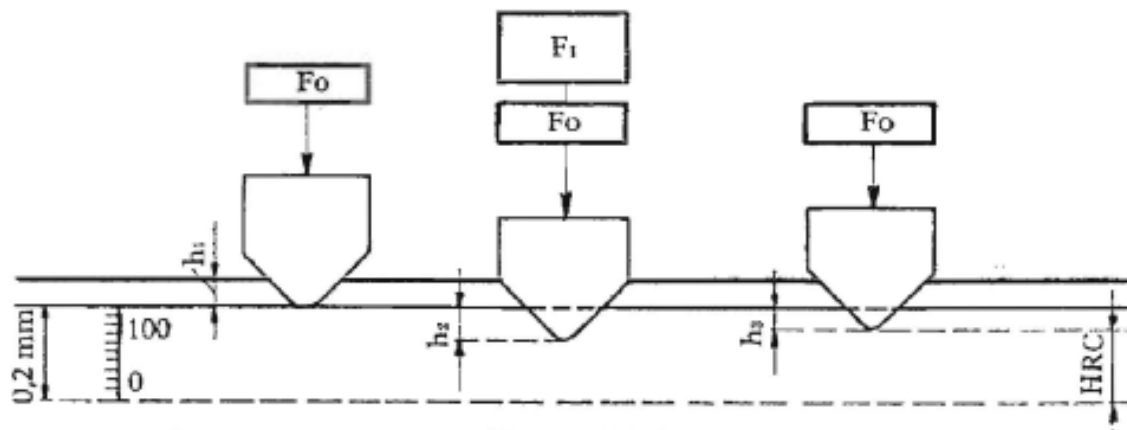
Sila predopterećenja:

$F_0 = 10 \text{ daN}$

Glavna sila:

za HRC  $F_1 = 140 \text{ daN}$

Za HRB  $F_1 = 90 \text{ daN}$



$$\text{HRB} = 130 - h_3 / 0,002$$

$$\text{HRC} = 100 - h_3 / 0,002$$

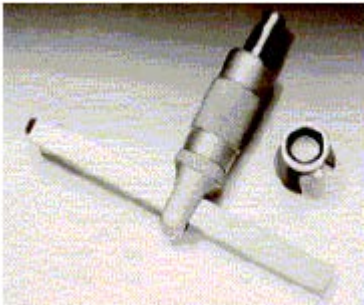
Vreme utiskivanja zavisi od tvrdoće materijala,

$\tau = 10 \text{ do } 15 \text{ s}$  za čelik

$\tau = 30 \text{ s}$  za obojene metale

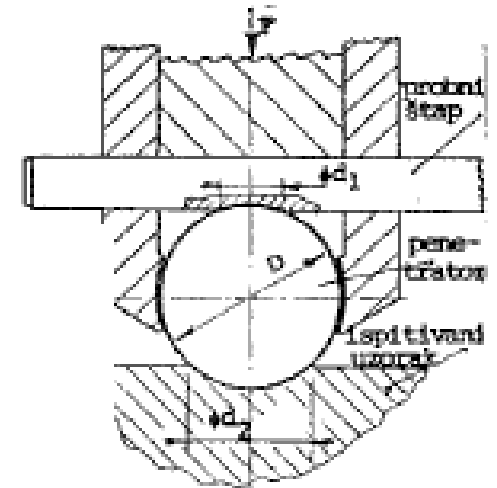
# Ispitivanje tvrdoće po Poldiju

Modifikovana Brinelova metoda



Metoda po Poldiju je metoda merenja tvrdoće udarom.

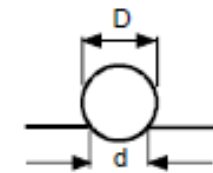
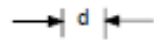
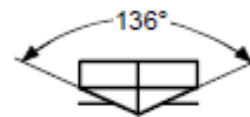

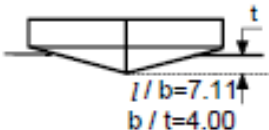
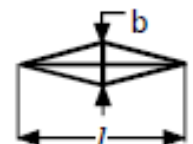
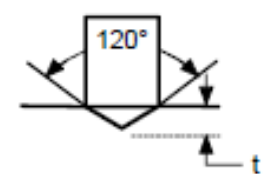
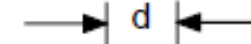
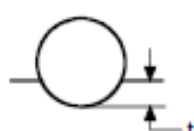
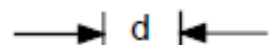
$$\frac{HB_{uz}}{HB_{et}} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_2^2})}, \text{ odakle je}$$
$$\frac{HB_{uz}}{HB_{et}} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_1^2})}$$



$$HB_{uz} = HB_{et} \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_1^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_2^2}}$$

Tvrdoća se određuje tako što se čelična kuglica prečnika D (10mm) dejstvom sile F istovremeno utiskuje u ispitivani materijal i materijal poznate čvrstoće, etalon.

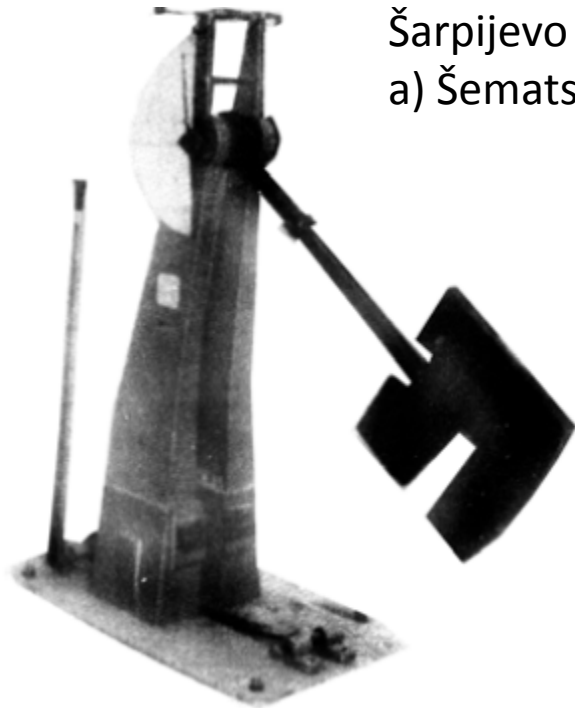
S obzirom da su oba otiska (na materijalu i etalonu) dobijena dejstvom iste sile F, deobom izraza za tvrdoću po Brinelu ispitivanog materijala i etalona dobija izraz za tvrdoću po Poldiju.

| Metoda                | Utiskivač  | Izgled utiskivača   |  | Opterećenje                         | Formula za izračunavanje tvrdoće              |           |
|-----------------------|--|---|--|-------------------------------------|---|-----------|
|                       |  | Bočni pogled  | Pogled odozgo  |                                     |   |           |
| Brinel                | Kuglica od čelika ili volfram karbida prečnika 10 mm |    |    | F                                   | $HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ |           |
| Vickers               | Dijamantska piramida                                 |    |    | F                                   | $HV = \frac{1.854}{d^2}$                      |           |
| Knup                  | Dijamantska kupa                                     |    |    | F                                   | $HK = \frac{14.2}{l^2}$                       |           |
| Rokvel<br>A<br>C<br>D | Dijamantska kupa                                     |   |    | 60 kg<br>150 kg<br>100 kg           | HRA =<br>HRC =<br>HRD =                       | 100-500 t |
| B<br>F<br>G           | 1/16" prečnika čelične kuglice                       |  |  | 100 kg<br>60 kg<br>150 kg<br>100 kg | HRB =<br>HRF =<br>HRG =<br>HRE =              | 130-500 t |
| E                     | 1/8" prečnika čelične kuglice                        |   |  |                                     |   |           |

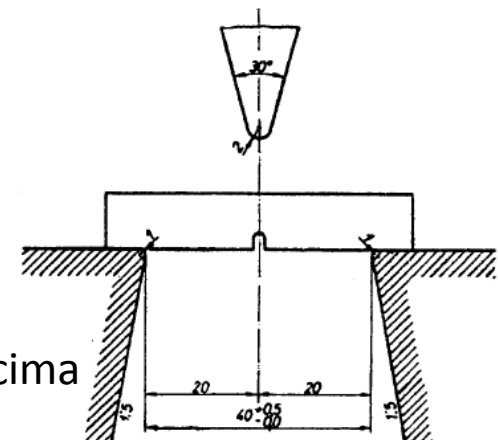
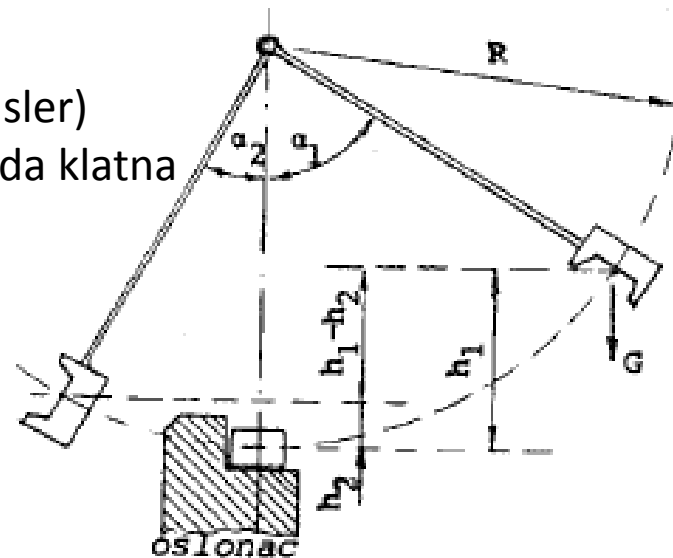


# Ispitivanje udarne žilavosti

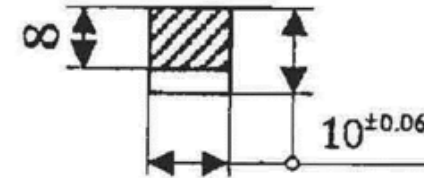
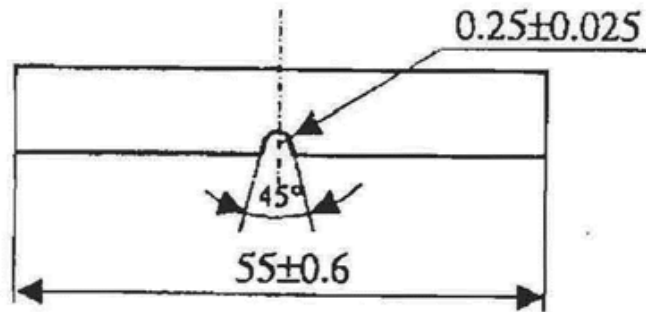
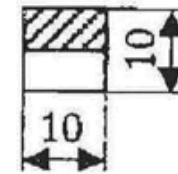
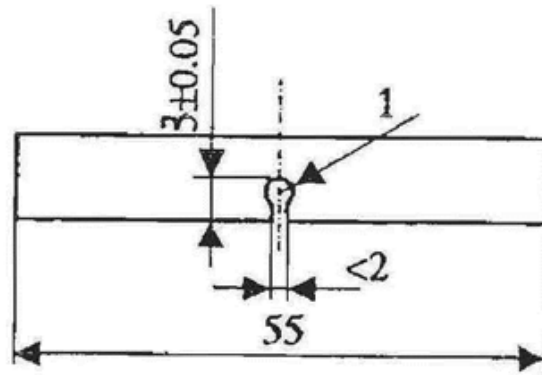
- Ispitivanje udarne žilavosti predstavlja dinamička ispitivanja materijala



Šarpijevo klatno (Amsler)  
a) Šematski prikaz rada klatna



b) Položaj epruvete na osloncima



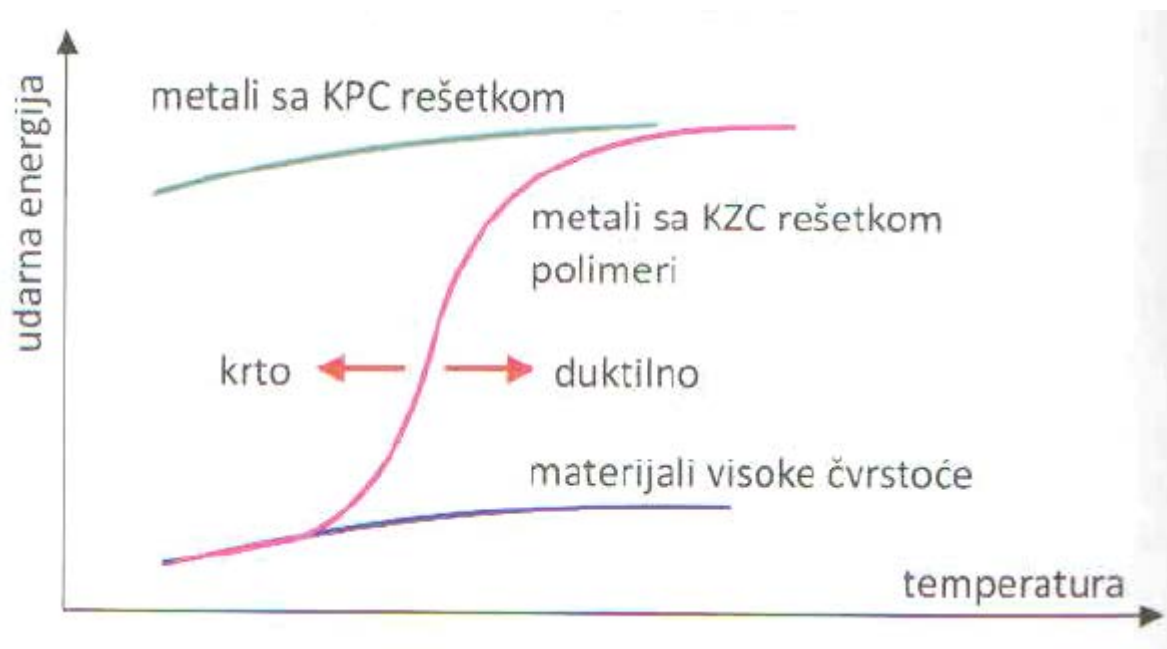
Sl.10.44. Šarpijev uzorak a) sa U i b) sa V zarezom

Жилавост је мера отпорности материјала према кртом лому. Испитивање је ударно савијање са брзим дејством силе.

Metali sa KZC rešetkom na višim temperaturama lome se duktilno, a na nižim krto. Ovakvo ponašanje je karakteristično za čelik.

Za legure sa KPC rešetkom (Al, Cu, austenitni čelici) udarna energija loma je na nižim temperaturama neznatno niža nego na povišenim.

Materijali visoke čvrstoće (alatni čelici) imaju nisku udarnu energiju loma bez obzira na temperaturu.



Uticaj temperature na energiju udara u zavisnosti od tipa kristalne rešetke

# Oblici loma

Lom materijala je razdvajanje čvrstog tela na dva ili više komada.

Lom se odigrava stvaranjem prsline i njenim širenjem.

Metalni materijali se lome na različite načine, zavisno od:

Vrste i stanja metala i legura,  
Temperature,  
Brzine opterećenja,  
Naponskog stanja,  
Radne sredine.

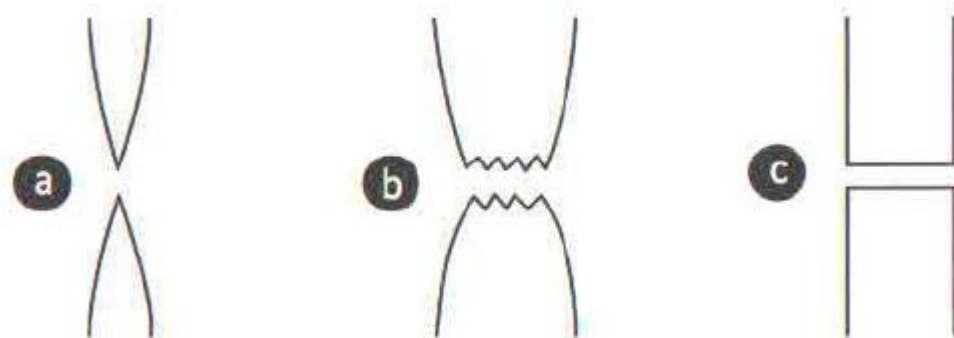
Razlikuju se dva osnovna oblika loma:

1. Krti lom
2. Duktilni lom



Slika 1 Izgled površine loma posle kidanja

- a) Duktilni lom legure aluminijuma
- b) Krti lom srednjeugljeničnog čelika



Makroskopski izgled preloma:

- a) Potpuno duktilni, b) umereno duktilni, c) krti

# Krti lom

Krtom lomu predhodi veoma nizak stepen plastične deformacije kao i nizak nivo apsorbovane energije pre loma (mala žilavost).

Nastala prslina se brzo širi i bez povećanja napona.

## Kako se prepoznaje krti lom?

- Površina loma je makroskopski ravna i normalna na zateznu silu
- Nema vidljive plastične deformacije
- Struktura preloma je zrnasta (granularna) ili kristalasta sa velikim brojem ravnih pljosn koje reflektuju svetlost
- Lom se dešava veoma brzo i pri niskom nivou utrošene energije
- Praćena je zvučnim efektom

Postoje dva moguća mehanizma krtog loma:

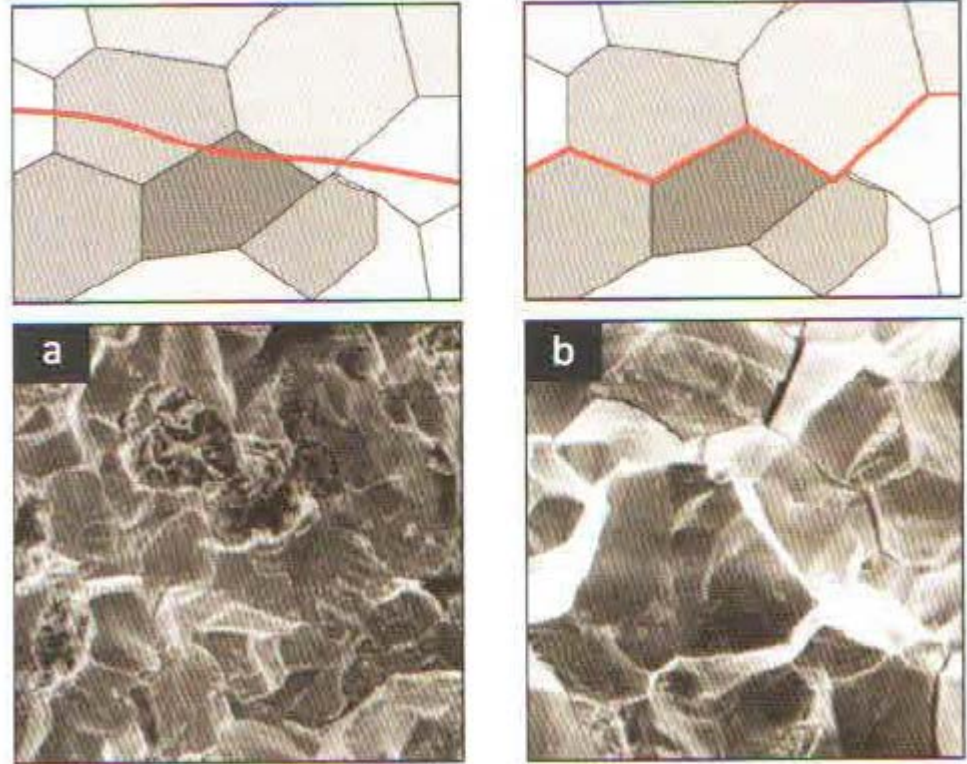
- Transkristalni i
- Interkristalni lom

# Krti lom

**Krta prslina** je normalna na pravac dejstva napona pri čemu je površina preloma ravna, kao što je prikazano na slici 2a) i 2b).

Transkristalni lom se odvija duž određenih kristalografskih ravni (koje nisu ravni klizanja) kroz metalna zrna mehanizmom cepanja (slika 2a)

Interkristalni lom se odvija duž granica zrna zbog izdvajanja sekundarnih faza, nečistoća i drugih grešaka (slika 2b)).  
Površina krtog loma je svetlucava.



Slika 2 Šematski prikaz i izgled prelomnih površina:  
a) Transkristalnog i b) interkristalnog krtog loma

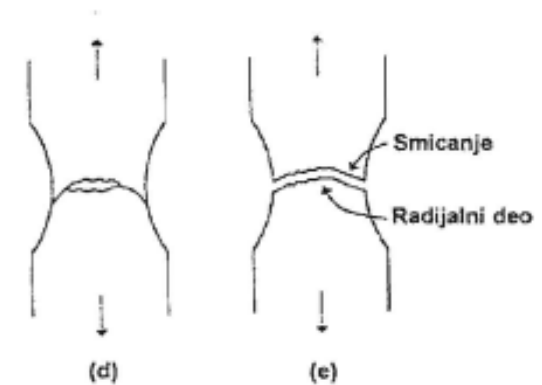
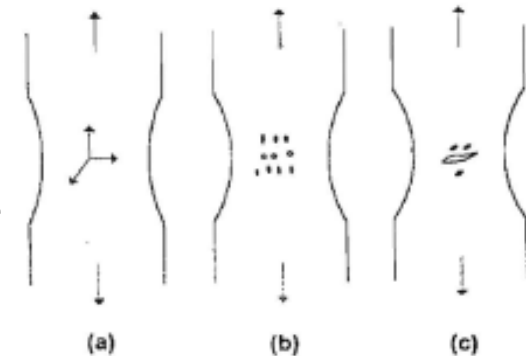
# Duktilni lom

## Kako se prepoznaje duktilni lom?

- Vidljiva plastična deformacija
- Pri zatezanju lom je u obliku kupe i čaše ili dvostruke čaše
- Površina loma je siva i vlaknasta
- Duktilna prslina raste sporo.

Pri ispitivanju zatezanjem, dolazi do lokalnog suženja (stvara se vrat).

Lom započinje u centralnom delu vrata, stvaranjem prsline koja je normalna na osu zatezanja.



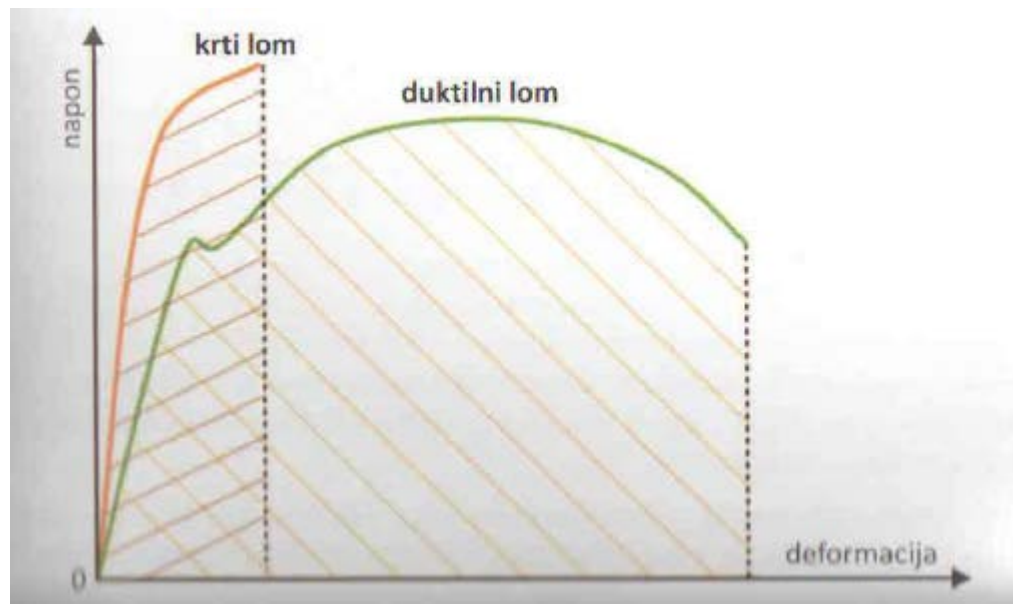
Duktilni lom

Sa povećanjem stepena deformacije, prslina raste prema krajevima epruvete.

Tada nastaje smicajni lom pod uglom od 45 stepeni u odnosu na osu zatezanja.

Na koji način još može da se proceni da se radi o krtom ili duktilnom materijalu?

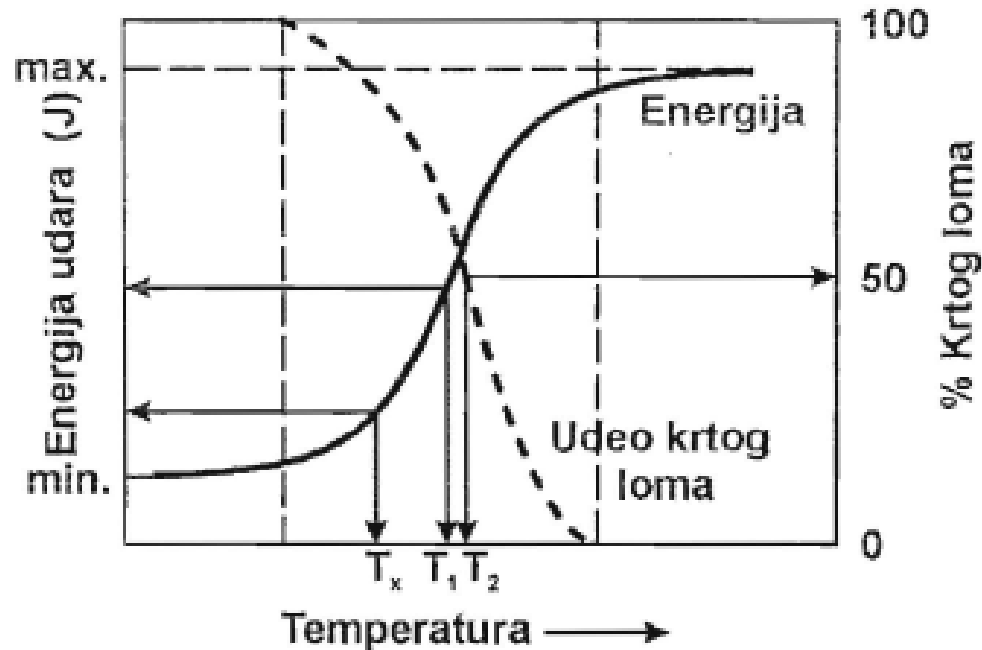
Pored izgleda prelomnih površina može se i na osnovu dijagrama napon-deformacija proceniti da li se radi o krtom ili duktilnom materijalu.





# Prelaz iz duktilnog u kruti lom

## Prelazna temperatura

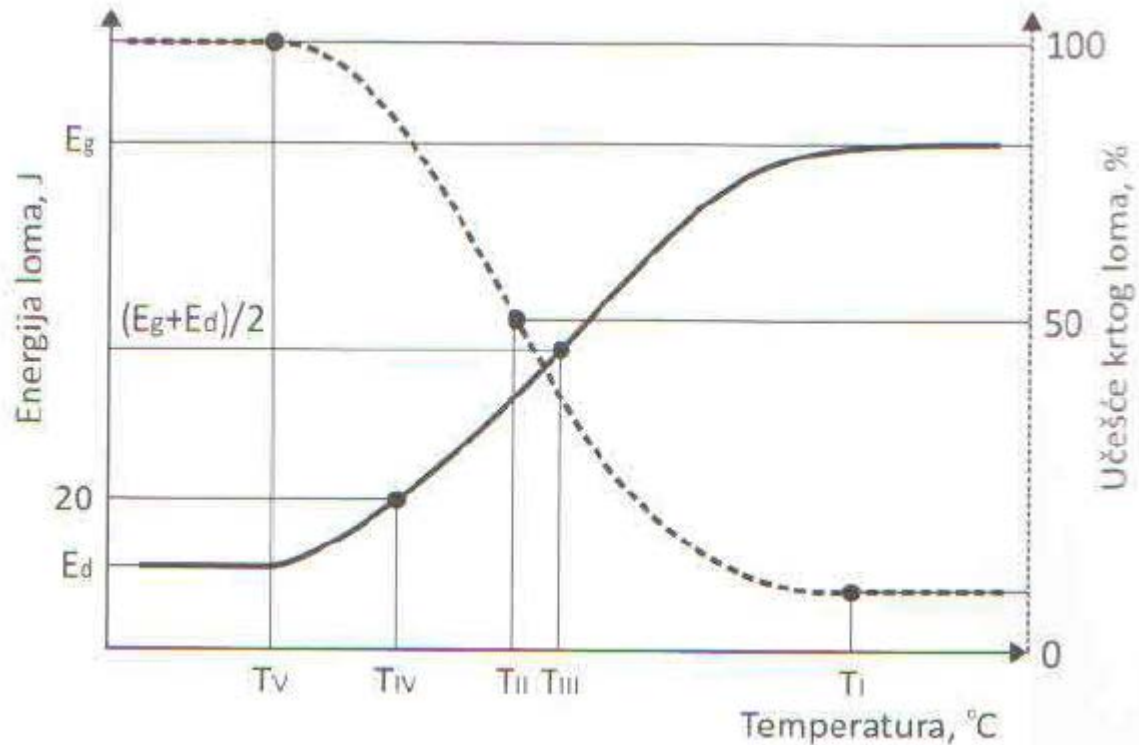


Slika 3 Smanjenje energije udara na niskim temperaturama

Na veličinu energije udara veoma utiče niska temperatura. Na niskim temperaturama dolazi do izrazitog smanjenja energije udara, slika3.

Ova pojava se javlja samo kod metala sa zapreminski centriranom kubnom rešetkom, odnosno kod konstrukcionih čelika.

# PRELAZNA TEMPERATURA PO RAZLIČITIM KRITERIJUMIMA



$T_I$ - prelazna temperatura potpune duktilnosti- prelazna temperatura pri kojoj se potpuno duktilni lom prvi put transformiše u mešoviti

$T_{II}$ -prelazna temperatura 50% duktilni-50% krti lom

$T_{III}$ - prelazna temperatura 50% apsorbovane energije

$T_{IV}$ -prelazna temperatura 20J, temperatura na kojoj apsorbovana energija udara jednaka aritmetičkoj sredini energije donjeg i gornjeg praga.

$T_v$ -prelazna temperatura nulte plastičnosti-temperatura na kojoj mešoviti lom transformiše u krti.