

# **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA**

**RAZORNE METODE –POSTUPCI S  
RAZARANJEM**

# **STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE**

- **Statički vlačni pokus - utvrđuju se osnovna mehanička svojstva ispitnog uzorka, epruvete**
- **To najčešće primjenjeno ispitivanje mehaničkog svojstva.**
- **Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude  $\leq 10 \text{ N/mm}^2$  u sekundi.**

**Uređaji za ispitivanje (kidalice) mogu biti različite veličine s obzirom na silu kojom mogu djelovati na epruvetu, a njihovi glavni dijelovi su:**

**1. Kućište**

**2. Mehanizam za prijenos sile na uzorak (mehanički ili hidraulički)**

**3. Držači epruvete (“čeljusti”)**

**4. Uređaj za registriranje sile i produljenja.**

- Epruveta ( $d_0$  i  $L_0$  mm) postavi se u čeljusti kidalice i kontinuirano vlačno opterećuje do loma.
- Tijekom ispitivanja bilježi se sila na kojoj je došlo do tečenja materijala – granica razvlačenja ( $F_e$ , N) i maksimalno postignuta sila ( $F_m$ , N).
- Nakon ispitivanja izmjeri se duljina epruvete poslije kidanja ( $L_u$  mm) i promjer epruvete nakon kidanja ( $d_u$  mm).
- Tijekom vlačnog pokusa kontinuirano se pisačem bilježi dijagram sila – produljenje.



Hidraulička kidalica



Mehanička kidalica



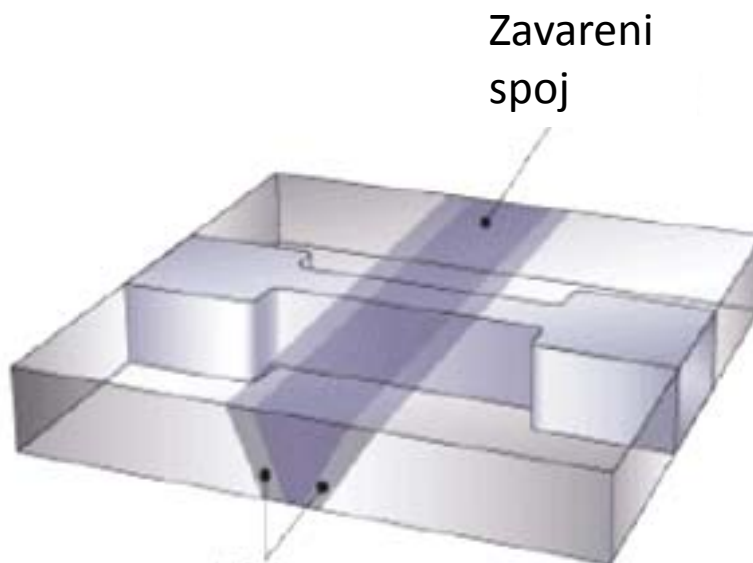
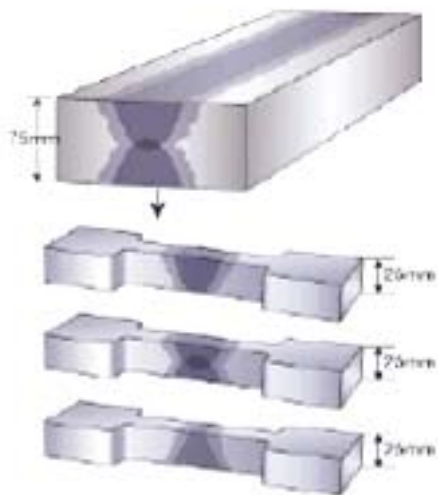
Uređaj za registriranje sile i  
produljenja

- Ispitivanja je potrebno voditi prema važećim normama radi mogućnosti međusobne usporedbe dobivenih rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava.
- Norme po kojima se izvode vlačni pokusi pri sobnoj temperaturi su: HRN C.A4.001, HRN C.A4.002 i HRN EN 10002-1, DIN 50115

One definiraju:

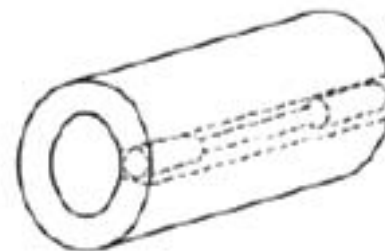
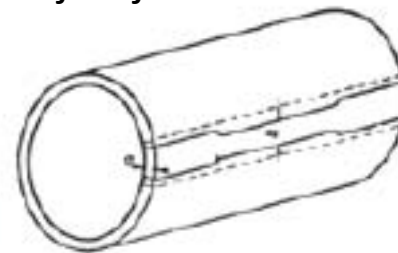
- a) oblik i mjere ispitnog uzorka, epruvete
- b) brzinu opterećenja,
- c) temperaturu prostora u kojem se izvodi ispitivanje i
- d) način provođenja ispitivanja i izračunavanja rezultata.

## Mjesta s kojih se uzimaju ispitni uzorci, epruvete



Zona utjecaja topline (ZUT)

Tanja cijev



Deblja cijev

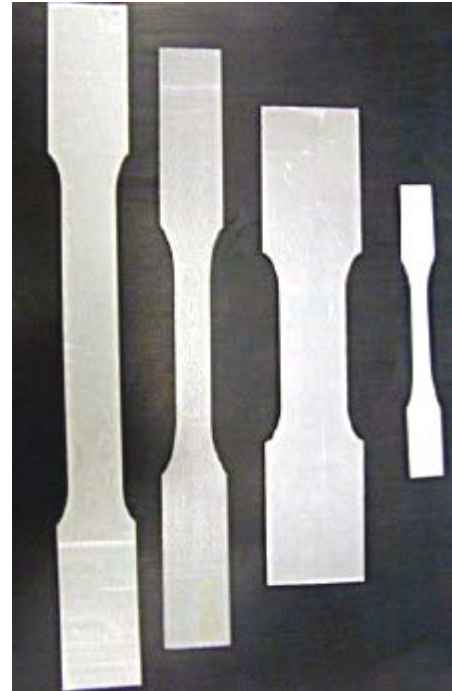


# Oblici ispitnih uzoraka, epruveta

Ispitni uzorci, epruvete mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka

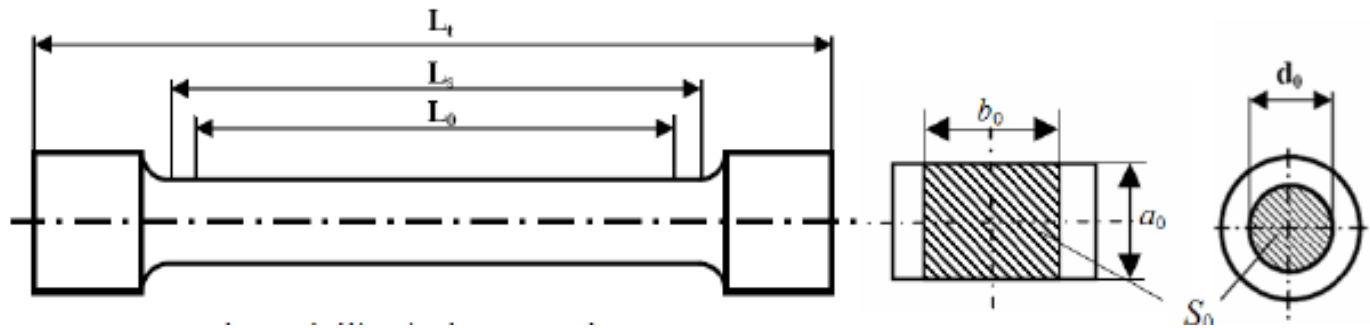


Ispitni uzorci, epruvete od različitih materijala okruglog poprečnog presjeka



Ispitni uzorci, epruvete od lima četvrtastog poprečnog presjeka

## Oblik i mjere epruvete



$L_0$  - početna mjerna duljina epruvete, mm

$L_s$  - stvarna duljina epruvete, mm

$L_t$  - ukupna duljina epruvete, mm

$d_0$  - početni promjer okrugle epruvete, mm

$a_0$  - početna debljina plosnate epruvete, mm

$b_0$  - početna širina plosnate epruvete, mm

$S_0$  - početna površina poprečnog presjeka epruvete okruglog oblika

$S_0$  - početna površina poprečnog presjeka plosnate epruvete

$$\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2$$

$$a_0 \cdot b_0, \text{ mm}^2$$

**U izvještaju o rezultatima ispitivanja uvijek se mora navesti i vrsta epruvete.**

## Primjer za okrugle epruvete

- Dimenzije epruvete u uzdužnom smjeru u određenom su razmjeru s dimenzijom epruvete u poprečnom smjeru.
- Za epruvete okruglog presjeka početna mjerna duljina  $L_0$  treba, prema dogovoru, biti jednaka peterostrukom ili deseterostrukom početnom promjeru  $d_0$  ili općenito:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$$

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}.$$

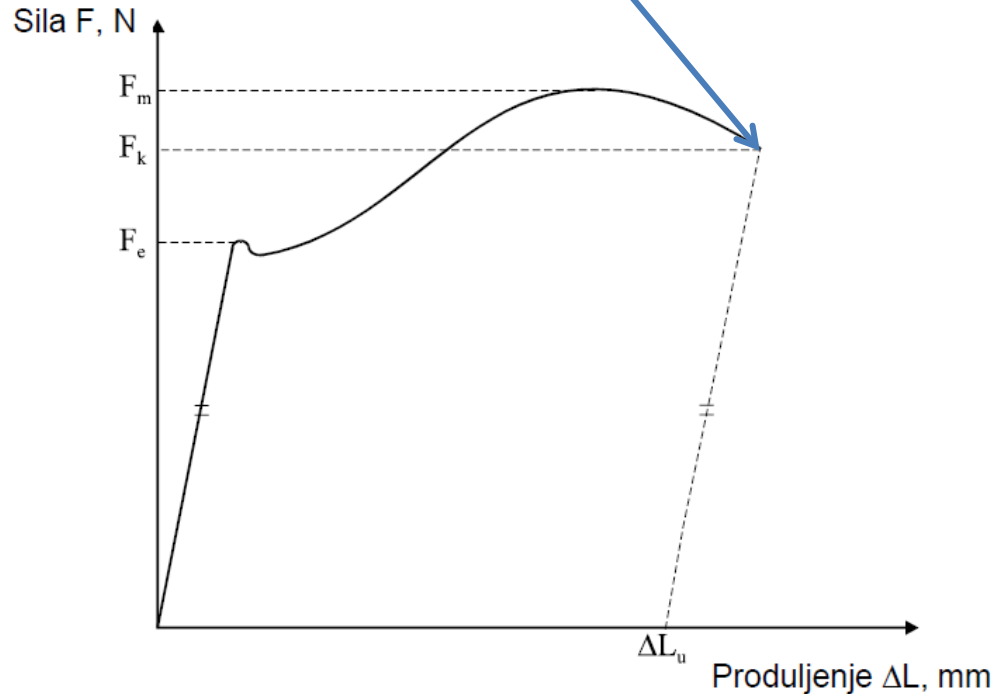
- **Normalna epruveta ima početni promjer  $d_0 = 20$  mm i početnu mjernu duljinu  $L_0 = 200$  mm.**

➤ Nakon kidanja epruvete odredi se produljenje epruvete  $\Delta L_u$ .

➤ **Produljenje nakon kidanja  $\Delta L_u$**  iznosi:

$$\Delta L_u = L_u - L_o, \text{ mm}$$

➤  $\Delta L_u$  se dobiva tako da se iz konačne točke kidanja na dijagramu povuče paralela s linearnim dijelom dijagrama te nađe presjecište s apscisom.



Dijagram sila  $F$  produljenje  $\Delta L_u$  za konstrukcijski čelik

- Ukoliko se produljenje  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L_0$  dobiva se **relativno produljenje ili istežanje  $\varepsilon$**  :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ mm/mm}$$

- Iznosi sila kod statičkog vlačnog ispitivanja ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala. Za to je potrebno uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka epruvete pa **se umjesto sile  $F$  uvodi naprežanje  $\sigma$**  :

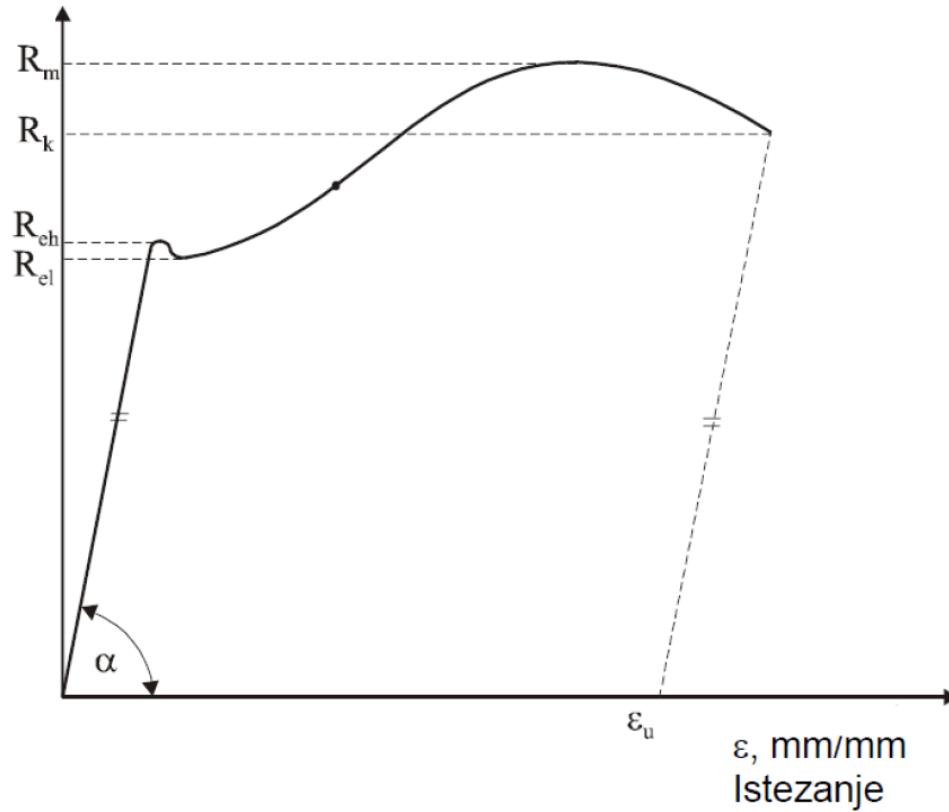
$$\sigma = \frac{F}{S_0}; \text{ N/mm}^2$$

gdje je  $F$  sila izražena u Njutnima, a  $S_0$  površina početnog poprečnog presjeka epruvete u  $\text{mm}^2$ .

Pored jedinice naprežanja  $\text{N/mm}^2$  naprežanje se izražava i u Paskalima (  $\text{Pa}=\text{N/m}^2$ ).

Na taj se način iz dijagrama sila  $F$  - *produljenje  $\Delta L$*  dobiva **“inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprežanje  $\sigma$  – istežanje  $\varepsilon$ .**

Naprezanje  
 $\sigma$ , N/mm<sup>2</sup>



**“Inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprezanje  $\sigma$  - istezanje  $\epsilon$**

**Konvencionalni dijagram naprezanje  $\sigma$  - istežanje  $\varepsilon$**  počinje u ishodištu dijagrama kao Hookeov pravac za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

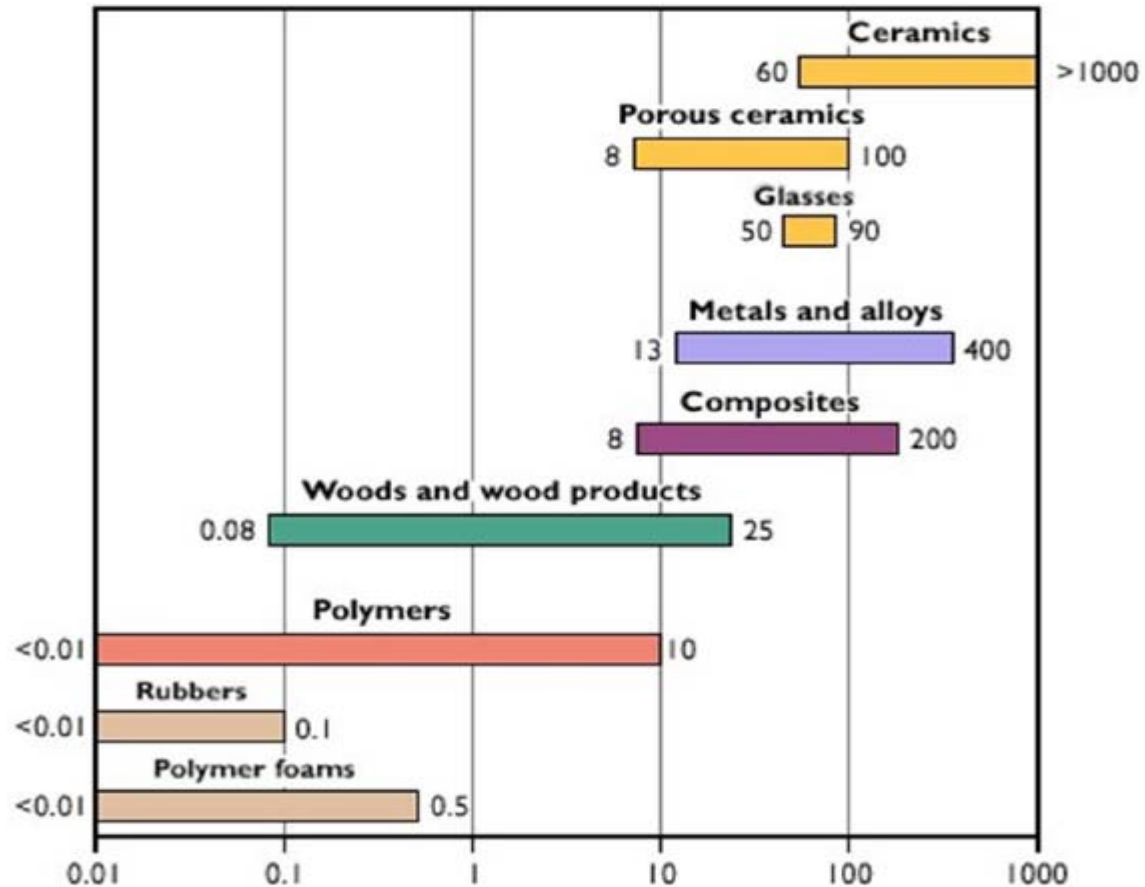
gdje je  $E$  modul elastičnosti (Youngov modul). Što je  $E$  materijala veći za isto će istežanje  $\varepsilon$  biti potrebno veće naprežanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeova pravca biti će strmiji. **Modul elastičnosti  $E$  je elastična konstanta materijala koja ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi.**

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ N/mm}^2$$

Nagib Hookeova pravca definira karakteristiku materijala **Youngov modul ili modul elastičnosti  $E$**  ( $E = \text{tg}\alpha$ , MPa).

- **Modul elastičnosti je veći što je jača veza između atoma.**
- **Najveći modul elastičnosti ima dijamant 1.200.000 N/mm<sup>2</sup>.**
- Za čelik iznosi  $E_{\text{č}} = 210\,000$  MPa.

# Youngov modul elastičnosti $E$ za različite materijale



Fleksibilnost ← Youngov modul elastičnosti (GPa) → Krutost



## “Inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprezanje $\sigma$ - istezanje $\varepsilon$ : značenje oznaka

- U području gdje vrijedi Hookeov zakon svako naprezanje izaziva samo elastičnu deformaciju.
- Hookeov pravac je, uz izvjesno pojednostavljenje, s gornje strane ograničen granicom razvlačenja  $R_e$ .
- Granica razvlačenja (tečenja)  $R_{e-}$  - naprezanje kod kojeg se epruveta produljuje uz konstantno ili čak privremeno smanjenje naprezanja.
- Granica razvlačenja (tečenja)  $R_e$  - naprezanje koje odvaja područje elastične od područja plastične deformacije.
- Granica razvlačenja (tečenja)  $R_{e-}$ : 
$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2,$$

gdje  $F_e$ , N sila tečenja, a  $S_0$ , mm<sup>2</sup> površina početnog presjeka epruvete.

## Dijagram naprezanje $\sigma$ - istezanje $\varepsilon$ (nastavak)

- **Granica razvlačenja (tečenja)  $R_e$**  - dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja u eksploataciji uz odabrani stupanj sigurnosti.
- Naprežanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  izazivaju pored elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete – ona nisu dozvoljena za konstrukcijske elemente.

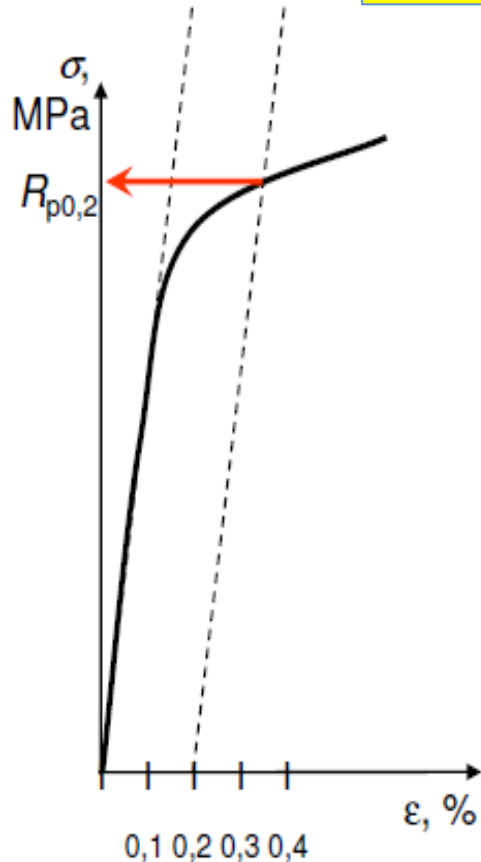
- Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti:  $R_{eh}$  - gornja granica razvlačenja i  $R_{el}$  - donja granica razvlačenja.

$R_{eh}$  - gornja granica razvlačenja: 
$$R_{eh} = \frac{F_{eh}}{S_0}, \text{ MPa}$$

$R_{el}$  - donja granica razvlačenja: 
$$R_{el} = \frac{F_{el}}{S_0}, \text{ MPa}$$

- Vrijednosti granice razvlačenja koje su propisane u tehničkim uvjetima isporuke materijala (obično kao minimalne vrijednosti), odnose se na gornju granicu razvlačenja  $R_{eh}$ .

## Konvencionalna ili tehnička granica razvlačenja $R_{p0,2}$



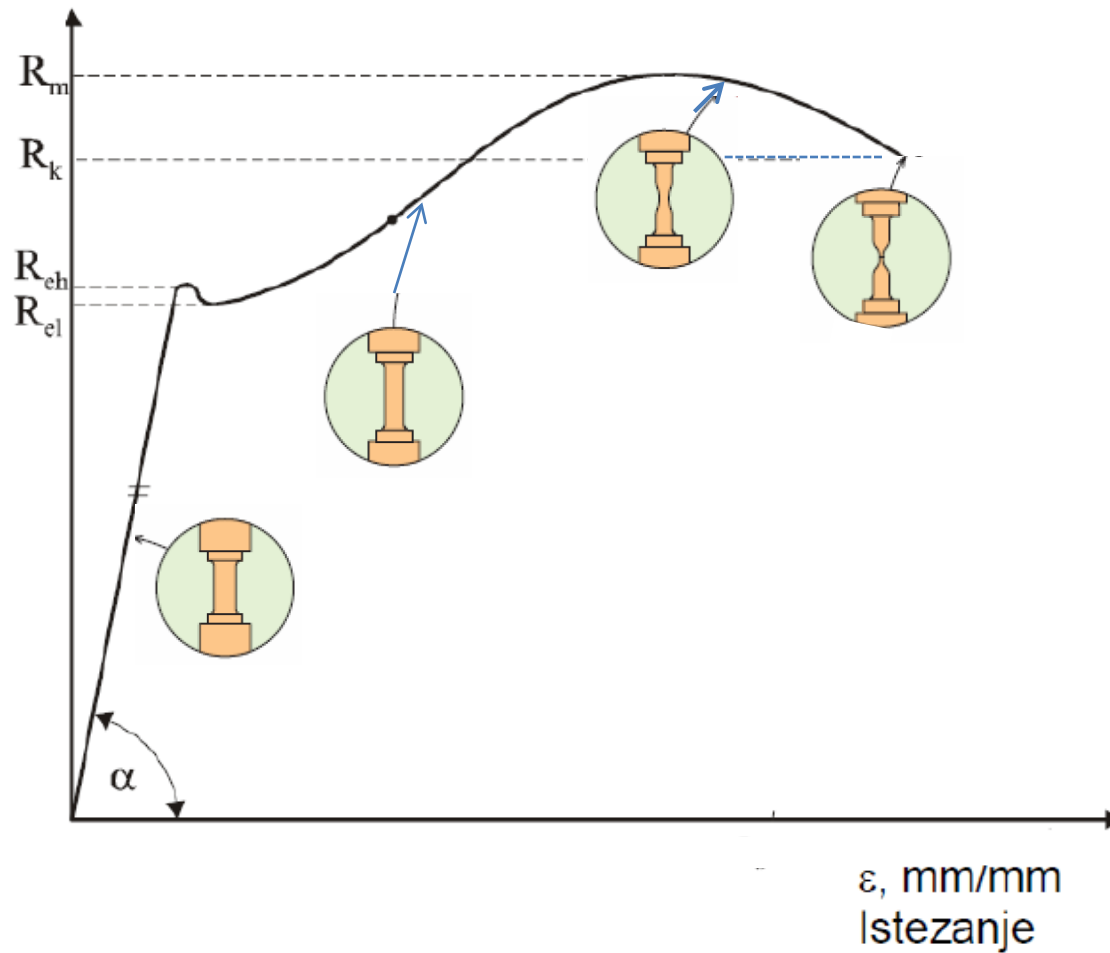
- Kod materijala kod kojih nije izražena granica razvlačenja  $R_e$  određuje se tehnička ili konvencionalna granica razvlačenja  $R_{p0,2}$ .
- **$R_{p0,2}$  je ono naprezanje koje u materijalu izaziva trajnu deformaciju od 0,2 %.**
- Kod određivanja  $R_{p0,2}$  upotrebljava se grafička metoda na dijagramu naprezanje-jedinično istezanje, a temelji se na uvjetu da je nakon prestanka djelovanja opterećenja krivulja povratka ravna crta tj. Hookeov pravac.
- Povučete li se pravac paralelan Hookeovom pravcu kroz istezanje od 0,2%, sjecište s krivuljom naprezanje - jedinično istezanje dati će naprezanje  $R_{p0,2}$ .

➤ **Vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$  - naprezanje kod maksimalne sile  $F_m$  je omjer maksimalne sile  $F_m$  i površine početnog presjeka  $S_0$ :**

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2$$

- **Vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$  nije maksimalno naprezanje nego naprezanje pri maksimalnoj sili.**
- **Od trenutka postizanja maksimalne sile  $F_m$  površina presjeka epruvete počinje se naglo smanjivati tako da stvarno naprezanje usprkos smanjenju sile raste!**
- **Vlačna čvrstoća  $R_m$  predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti.**
- **Nakon dostignutog naprezanja  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj epruveti nego je lokalizira na jednom mjestu (“vrat”- vrijedi za žilave metale koji nisu krhki kao na primjer magnezij Mg).**

Naprezanje  
 $\sigma$ , N/mm<sup>2</sup>



**Promjene na metalnoj epruveti tijekom statičkog vlačnog ispitivanja shematski prikazane na konvencionalnom dijagramu naprezanje  $\sigma$  - istežanje  $\varepsilon$**

➤ **Konačno naprezanje  $R_k$**  - naprezanje kod kojeg **dolazi do loma epruvete**:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je  $F_k$  konačna sila, a  $S_0$  površina početnog presjeka epruvete.

➤ **Konačno relativno produljenje (konačno istežanje)  $\varepsilon_u$**  određeno statičkim vlačnim ispitivanjem:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm}$$

➤ **Istezljivost  $A$**  definirana je sljedećim izrazom :

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \%$$

## Izgledi prijelomnih površina kod žilavog i krhkog loma



Udubljeni i izbočeni žilavi lom



Krhki lom – nema  
plastične deformacije

Adapted from Fig. 8.3, *Callister 7e*.

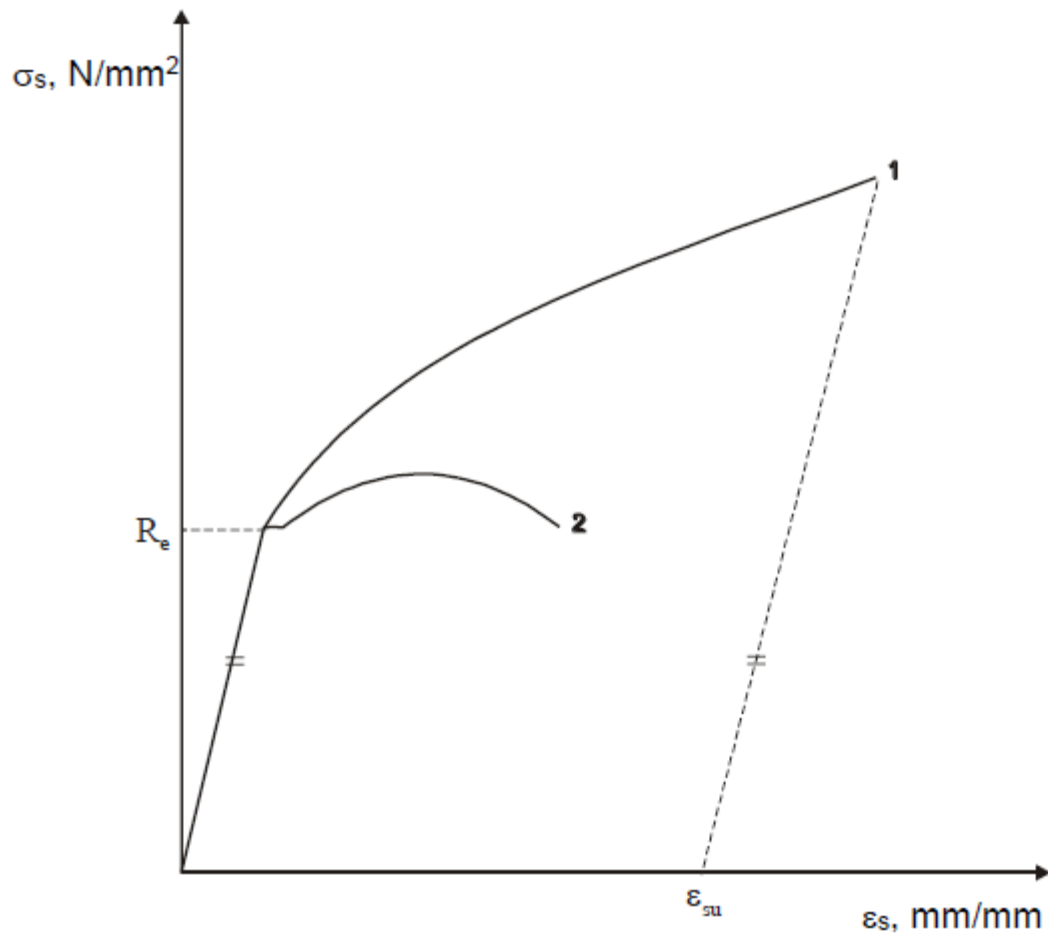
- **Dijagram naprezanje - istežanje kakav smo do sada opisivali naziva se "inženjerski" ili konvencionalni dijagram čiji tijek kvalitativno odgovara dijagramu sila  $F$  – produljenje  $\Delta L$ .**
- **To međutim nije "stvarni" dijagram naprezanje - istežanje!**

**Nije zbog toga što se iznosi naprežanja određuju dijeljenjem sila  $s$  površinom početnog presjeka  $S_0$ , što je ispravno samo u području elastičnih deformacija ( $\sigma < R_e$ ) gdje se zbog promjenljivosti volumena usprkos produljenju epruveta ne sužuje. Stvarno naprežanje jednako je :**

$$\sigma_s = \frac{F}{S}, \text{ N/mm}^2$$

gdje je  $S$  stvarna površina presjeka epruvete.





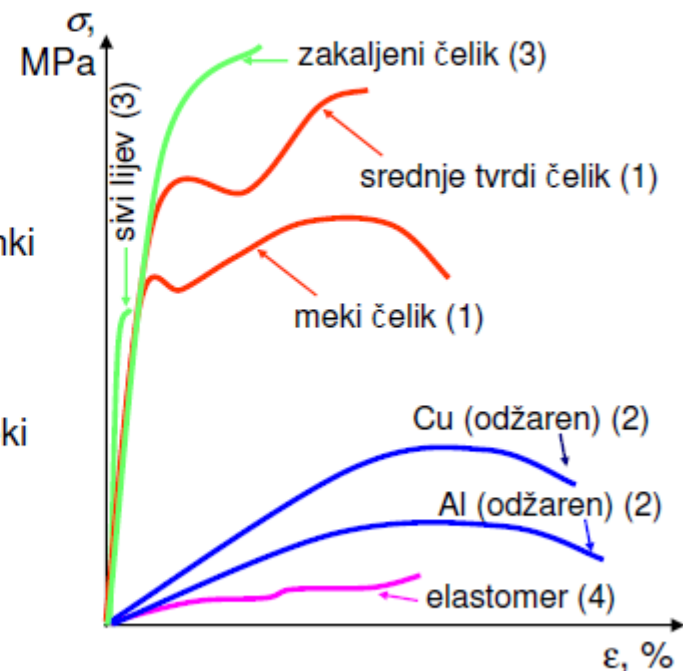
**(1) Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje  $\sigma$  – istezanje  $\varepsilon$  za neki konstrukcijski čelik, (2) Odgovarajući konvencionalni dijagram**

- **“Inženjerski” ili konvencionalni dijagram naprezanje - istežanje daje dostatne podatke za konstrukcijske svrhe budući da se dijelovi strojeva i uređaja u eksploataciji ne opterećuju izvan elastičnog područja u kojem su oba dijagrama identična.**
- **U cilju izučavanja ponašanja materijala pri obradi deformiranjem dostatne podatke daje tek stvarni dijagram naprezanje istežanje.**
- **Stvarni dijagram naprezanje - istežanje nam konačno daje odgovor na pitanje zbog čega vrijednost  $R_m$  ne smijemo zvati maksimalnim naprezanjem već samo naprezanjem kod maksimalne sile!**

## Konvencionalni dijagrami naprezanje $\sigma$ - istežanje $\epsilon$ nekih materijala

Dijagrami različitih materijala mogu se podjeliti u četiri osnovna oblika:

1. s izraženom granicom razvlačenja (npr. meki i srednje tvrdi čelici)
2. s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u elastično/plastično područje deformacija (npr. bakar i aluminij).
3. bez područja elastično/plastičnih deformacija (krhki materijali koji se lome gotovo bez plastične deformacije, npr. sivi lijev ili zakaljeni čelik)
4. s entropijskom elastičnom deformacijom, npr. neki organski materijali i polimeri tipa elastomera



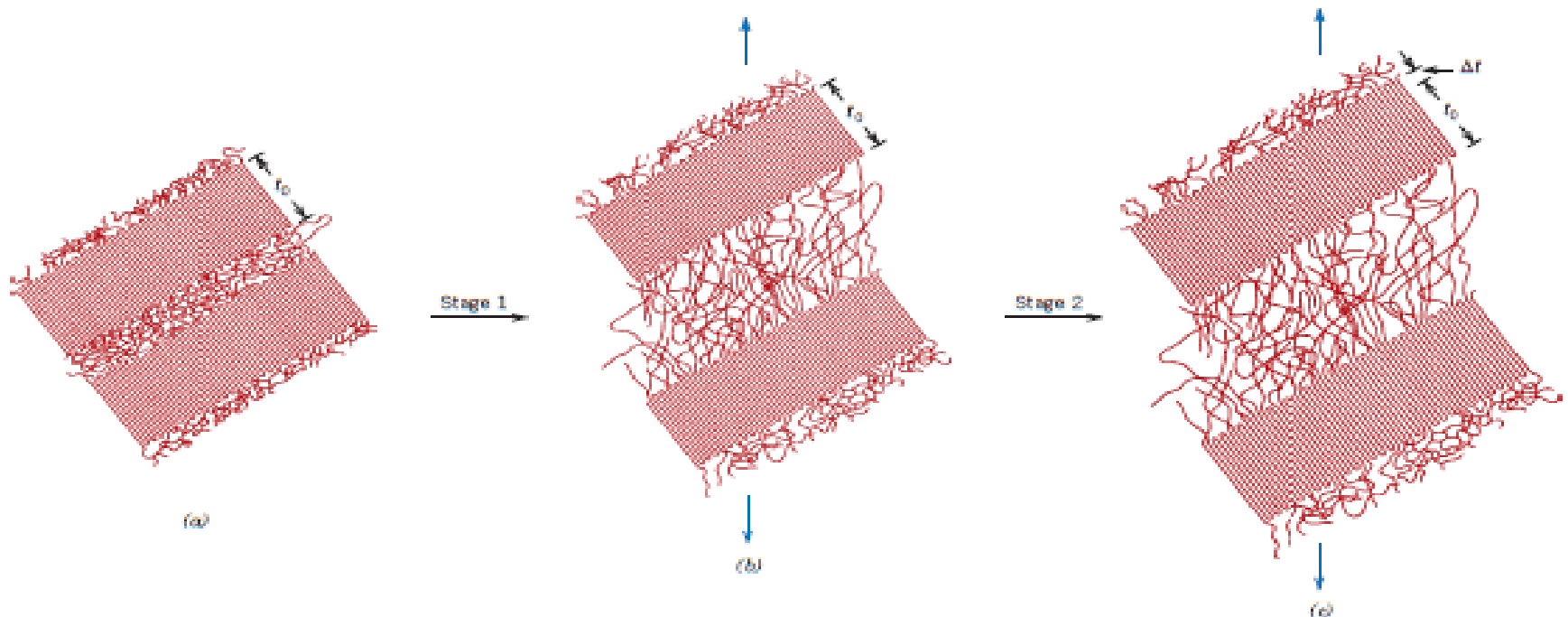
- Čvrstoća materijala kod granice tečenja (popuštanja) i vlačna čvrstoća mijenjaju se s obzirom na : toplinsku i mehaničku obradu materijala, na prisutnost nečistoća, itd.
- Promjene su povezane s ponašanjem dislokacija u materijalu.  
Modul elastičnosti je relativno neosjetljiv na te utjecaje.
- Čvrstoća materijala kod granice tečenja (popuštanja), vlačna čvrstoća i modul elastičnosti smanjuju se s porastom temperature
- Duktilnost raste s porastom temperature.

## Ponašanje ostalih materijala kod vlačnog ispitivanja

- Kod polimera dolazi do izravnavanja makromolekulskih lanaca prije samog loma.
- Kod keramika nema plastične deformacije – ona se krhko lomi.
- Kod PMC kompozita dolazi sve više do pucanja vlakana ojačala prije loma matrice, odnosno cijelog kompozita.

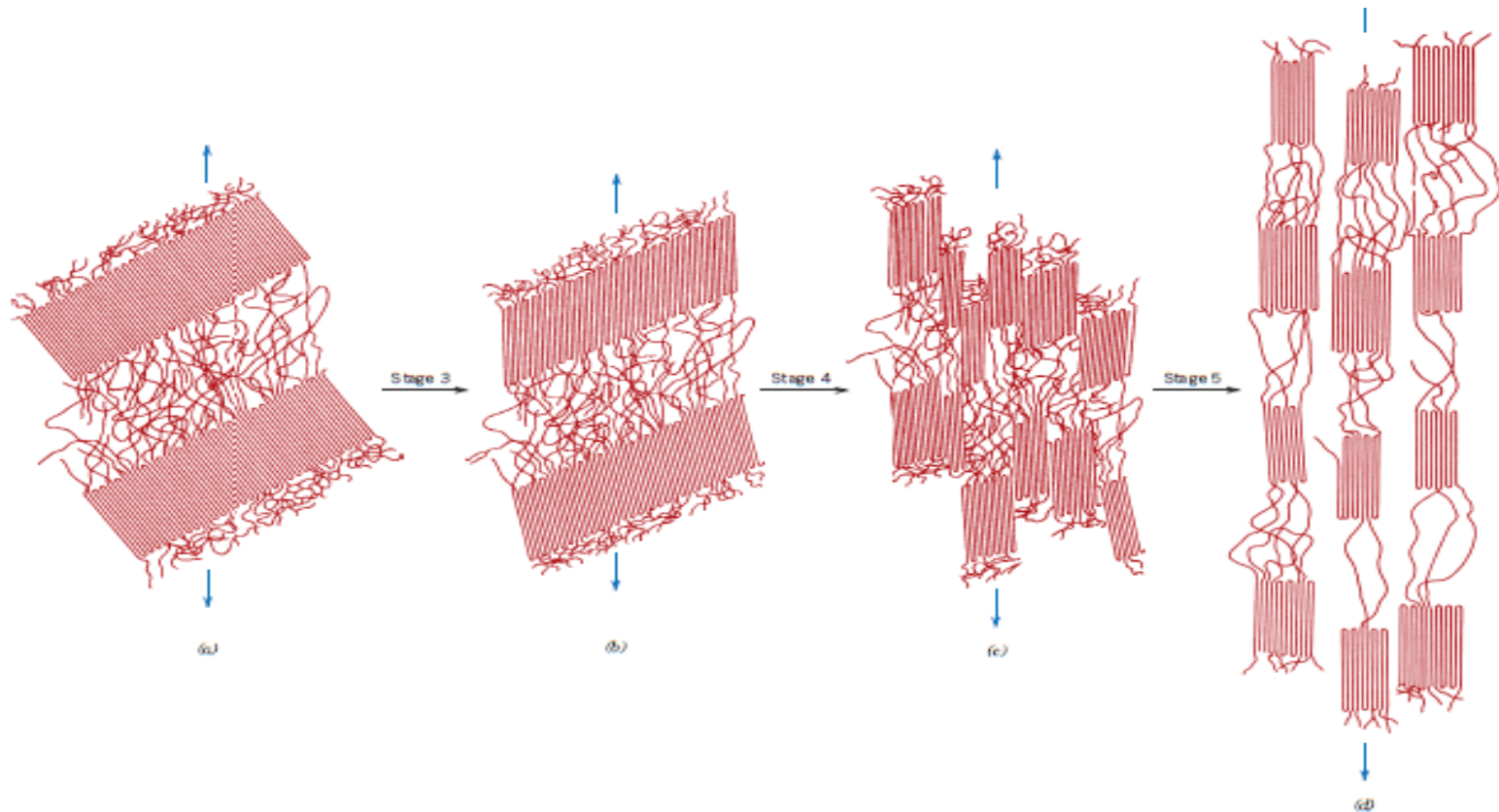
# POLIMERI

## Stupnjevi elastične deformacije polukristalnih polimera kod vlačnog naprezanja



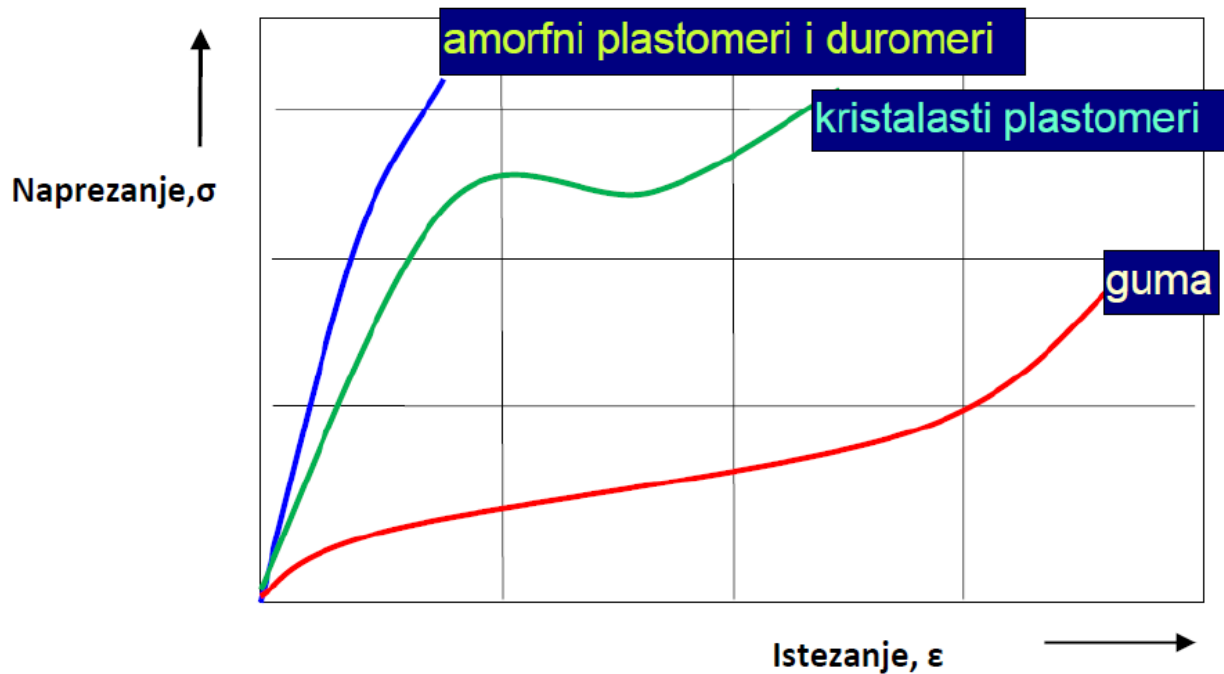
**Figure 15.12** Stages in the elastic deformation of a semicrystalline polymer. (a) Two adjacent chain-folded lamellae and interlamellar amorphous material before deformation. (b) Elongation of amorphous tie chains during the first stage of deformation. (c) Increase in lamella crystallite thickness (which is reversible) due to bending and stretching of chains in crystallite regions. (From Schultz, Jerold M., *Polymer Materials Science*, 1st edition, © 1974, pp. 500, 501. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

## Stupnjevi plastične deformacije polukristalnih polimera kod vlačnog napreznja



**Figure 15.13** Stages in the plastic deformation of a semicrystalline polymer. (a) Two adjacent chain-folded lamellae and interlamellar amorphous material after elastic deformation (also shown as Figure 15.12c). (b) Tilting of lamellar chain folds. (c) Separation of crystalline block segments. (d) Orientation of block segments and tie chains with the tensile axis in the final plastic deformation stage. (From Schultz, Jerold M., *Polymer Materials Science*, 1st edition, © 1974, pp. 500, 501. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

## Ponašanje neke vrste polimera kod vlačnog naprezanja



**Vrijednosti modula elastičnosti  $E$  polimernih materijala približno je 10 do 100 puta manja nego ona kod metala.**



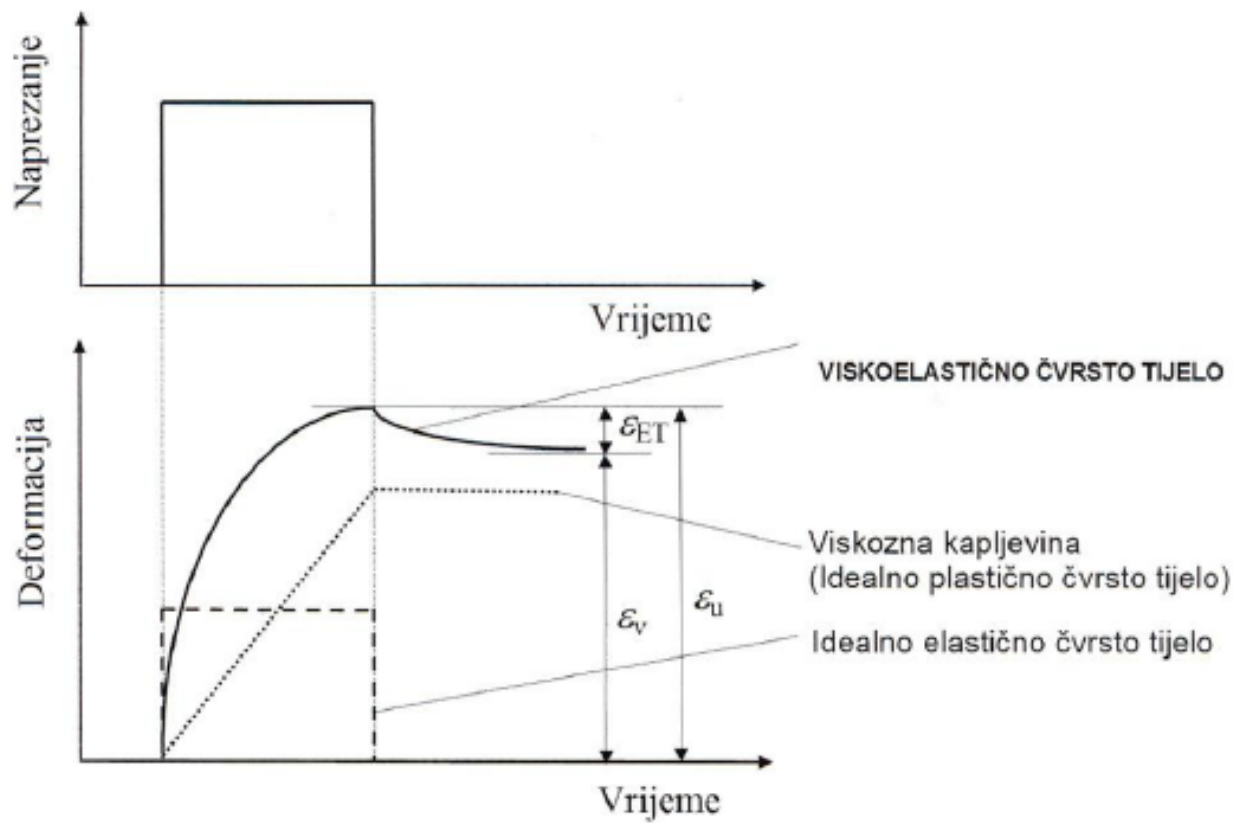
## **Mehanička svojstva polimernih materijala**

- **Viskoelastičnost : ovisnost mehaničkih svojstava o vremenu, temperaturi i djelovanja opterećenja (-odgovor na vanjsko djelovanja: ponašaju se djelomice kao elastični materijali a djelomice kao viskozne kapljevine)**
- **Zbog viskoelastičnog ponašanja polimernih materijala njihova se mehanička svojstva bitno razlikuju od svojstava metalnih materijala.**

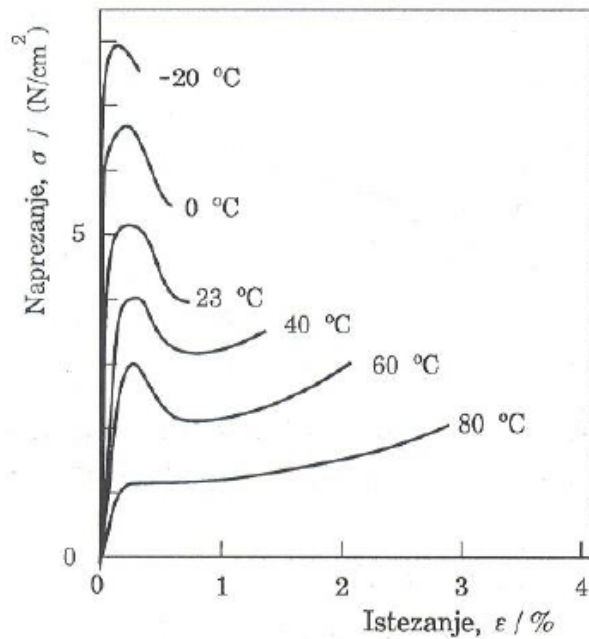
➤ **Vrijednosti rastezne (vlačne) čvrstoće polimernih materijala je za oko 10 puta manja od vrijednosti čvrstoće metala.**

**Utjecaji koji mijenjaju vlačnu čvrstoću polimernih materijala:**

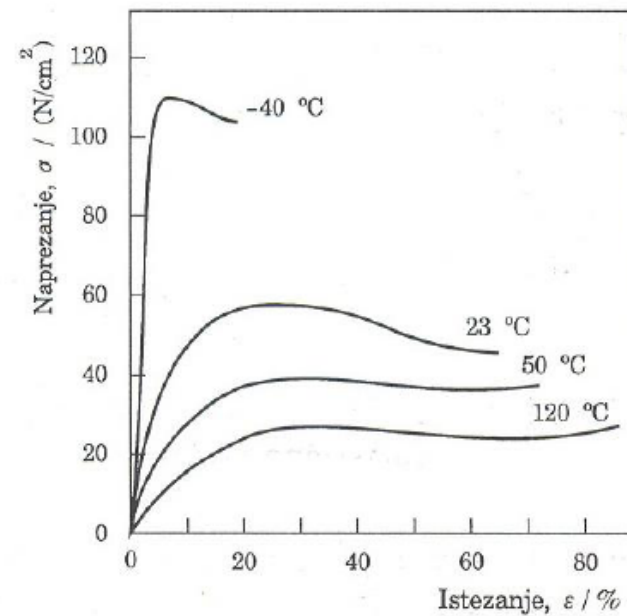
- molekulska masa (veličina makromolekule)
- obrada i naknadna obrada
- stupanj kristalnosti ili umreženosti
- temperatura, vlažnost
- opterećenja
- punila
- utjecaj okoline (UV-zračenje)



Mehanička svojstva polimernih materijala jako ovise o temperaturi; s porastom temperature smanjuju se  $E$ ,  $R_e$  i  $R_m$



Poli(vinil-klorid) krhki

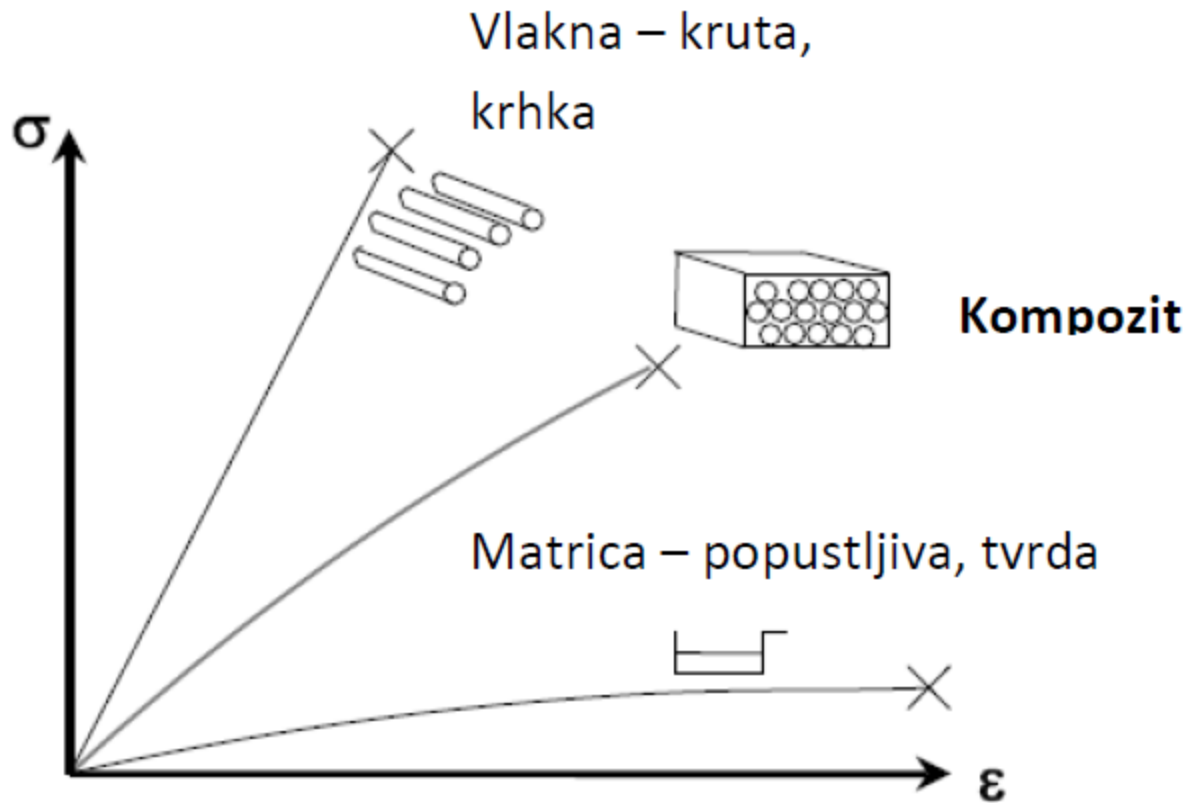


Poliamid 66 tvrdi i žilavi

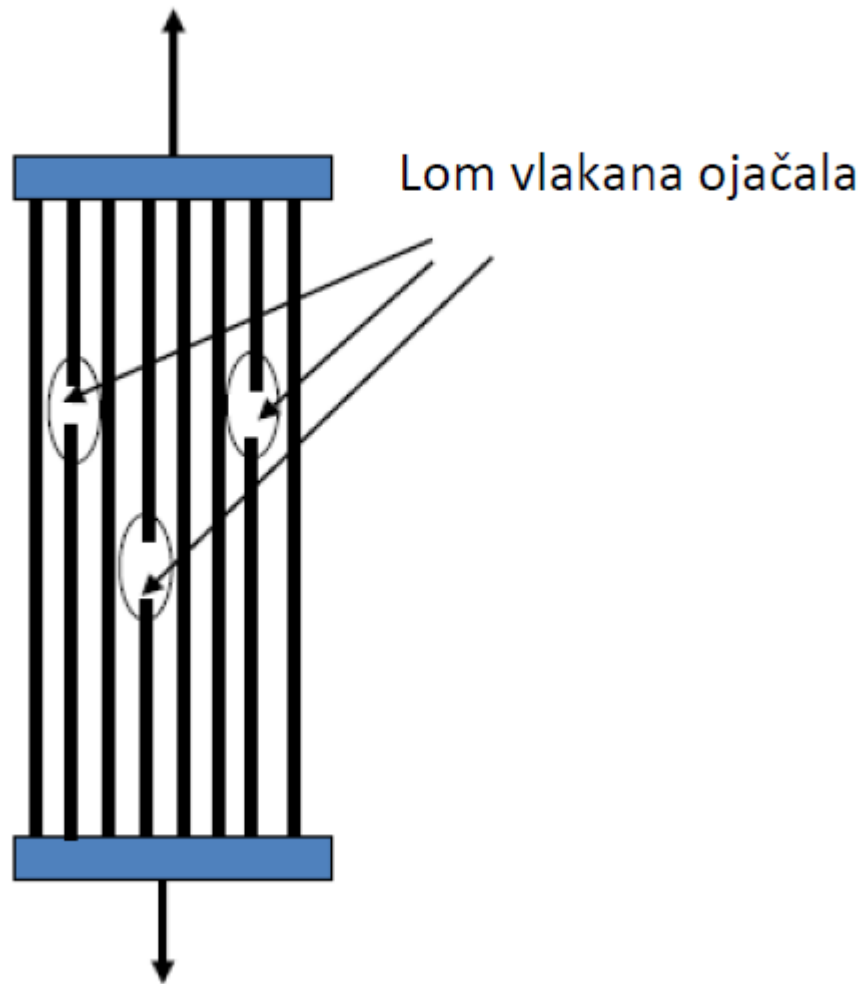
## Orientacijske vrijednosti modula elastičnosti $E$ za polimerne materijale

Skupina polimernih materijala		Modul elastičnosti, $N/mm^2$
PLASTOMERI	amorfni, neojačani	2 100...3 500
	amorfni, ojačani	oko 7 000
PLASTOMERI	kristalasti, neojačani	150...3 200
	kristalasti, ojačani	5 000...11 000
ELASTOMERI		50...150
DUROMERI	neojačani	5 000...12 000
	ojačani	9 000....15 000 i više

# KOMPOZITI



Dijagram naprezanje  $\sigma$  - istezanje  $\epsilon$  za kompozitne materijale



## LITERATURA

1. Danko Ćorić , Željko Alar: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala - interna skripta - ak. god. 2014./15.
2. Ivica Kladarić: Materijali I.:Mehanička svojstva materijala, Statički vlačni pokus
3. Kamyar Davoudi : Mechanical Properties of Polymers, 2013.
4. Atkins Paipetis: Composite Materials: Mechanical Behaviour & Testing, University of Ioannina
5. MSE 2090: Introduction to Materials Science Chapter 6, Mechanical Properties
6. Callister, William D. : Materials science and engineering : an introduction / William D. Callister, Jr.—7th ed.