



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



**ODABRANA POGLAVLJA IZ  
MEHANIČKIH SVOJSTAVA MATERIJALA**

- Predavanja -

ak. god. 2016./17.

**Prof.dr.sc. Danko Ćorić**

**Doc.dr.sc. Željko Alar**

Ova interna skripta prvenstveno je namijenjena studentima dodiplomskog studija strojarstva, brodogradnje i zrakoplovstva Sveu ili-ta u Zagrebu Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Pregledali:

Prof.dr.sc. Mladen Franz, Sveu ili-te u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Prof.dr.sc. Vinko Ivu-i , Sveu ili-te u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

## SADRŽAJ:

1. UVOD	5
2. STATI KO VLA NO ISPITIVANJE	13
3. UTJECAJ ZAREZA (UTORA) NA REZULTATE STATI KOG VLA NOG ISPITIVANJA	24
4. UTJECAJ SNIŽENE TEMPERATURE NA REZULTATE STATI KOG VLA NOG ISPITIVANJA	27
5. UTJECAJ POVIŠENE TEMPERATURE NA REZULTATE STATI KOG VLA NOG ISPITIVANJA	28
6. PUZANJE MATERIJALA	29
6.1 Puzanje u kristalima	35
6.2 Puzanje po granicama zrna	37
7. ZAOSTALA NAPREZANJA	43
7.1 Podjela zaostalih naprezanja	44
7.2 Uzroci nastanka zaostalih naprezanja	45
7.3 Mjerenje zaostalih naprezanja	50
8. UMOR MATERIJALA	51
9. MEHANIKA LOMA	63
9.1 Uzroci i kriteriji nastanka loma	63
9.2 Modeli pukotina	65
9.3 Fraktografija	68
9.4 Vrste lomova	68
9.4.1 žilavi lom	70
9.4.2 Krhki lom	71
9.5 Koncepti mehanike loma	72
9.5.1 Linearno-elasti na mehanika loma (LEML)	73
9.5.2 Linearno-elasti na mehanika loma s ograni enim te enjem	79
9.5.3 Elasti no-plasti na mehanika loma	81
9.6 Eksperimentalno utvr ivanje lomne čilavosti $K_{Ic}$	81
9.6.1 Oblik i dimenzije epruvete	82
9.6.2 Na in provedbe ispitivanja	83

9.7 Lomna Oilavost konstrukcijskih materijala i korelacija s drugim mehani kim svojstvima	86
10. TENZOMETRIJA	89
10.1. Mehani ka mjerila deformacije	90
10.2. Mehani ko-opti ka mjerila deformacije (Martensovo ogledalo)	90
10.3. Mehani ko-elektri na mjerila deformacije	92
10.4. Elektri na mjerila deformacije (DMS mjerne trake)	93
10.5. Kvalitativne metode odre ivanja naprezanja	100

# 1. UVOD

Materijali se odlikuju raznovrsnim fizikalno-kemijskim svojstvima, od gustoće, talizta, kemijske postojanosti otpornosti na koroziju, otpornosti na trošenje, električne i toplinske vodljivosti, magnetske permeabilnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinskog rastezanja sve do prozirnosti ili boje. Ovisno o svojim fizikalno-kemijskim svojstvima materijali posjeduju i raznovrsna tehnološka svojstva, koja daju uvid u njihovo ponašanje pri raznim postupcima obrade i spajanja, poput lijevnosti, kovnosti, rezljivosti, zakaljivosti, zavarljivosti ili lemljivosti. Mehaničko ponašanje materijala, kao i mnoga tehnološka svojstva, u prvom su redu određeni mehaničkim svojstvima materijala. Jedno od njih je i već spomenuta gustoća, definirana kao omjer mase i obujma ili kao masa jedinice obujma materijala.

Otpornost materijala općenito se može definirati kao skupina zahtjeva koji se postavljaju na materijal s gledišta eksploatacijskih karakteristika proizvoda. Pored otpornosti materijala tu su i neki drugi zahtjevi:

- funkcionalnost;
- pouzdanost;
- trajnost i sl.

Pod otpornošću materijala podrazumijeva se otpornost mehaničkom opterećenju ili mehaničkom otpornost, otpornost vanjskim utjecajima (otpornost koroziji, visokoj ili niskoj temperaturi), te otpornost trošenju ili tribološka otpornost. Ovakva podijeljena treba uzimati strogo budući da se sve tri vrste otpornosti u većoj ili manjoj mjeri prekrivaju.

Mehanička otpornost materijala određena je njegovim mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva zauzimaju istaknuto mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima jer se temeljem njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. Prilikom dimenzioniranja potrebno je sagledati intenzitet, način i trajanje svih mogućih mehaničkih opterećenja koja će se pojaviti tijekom eksploatacije. Stoga se strojni dijelovi odnosno dijelovi konstrukcija dimenzioniraju na osnovu onih mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene

eksploatacijske uvjete. Osnovni je cilj da se tijekom eksploatacije ne pojavi lom odnosno plasti na ili trajna deformacija zto bi funkcionalno onemogu ilo rad strojnog dijela ili itave konstrukcije.

Mehani ka svojstva materijala, kao i sva ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala odre enog (kemijskog) sastava odre enim tehnolozkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovaraju eg tehnolozkog postupka posti0e ciljano (mikro)strukturno stanje koje e dati 0eljena (mehani ka) svojstva. Poznavanjem korelacije mikrostruktura . mehani ka svojstva mogu e je unaprijed prora unati mehani ka svojstva koriste i odre ene (mikro)strukturne parametre. Me utim, to vrijedi samo za idealne tvari.

Za idealni kristal teoretska %razdvojna+ vrsto a,  $\sigma_{teo}$ , potrebna za razdvajanje kristalnih ravnina, slika 1, odre ena je izrazom:

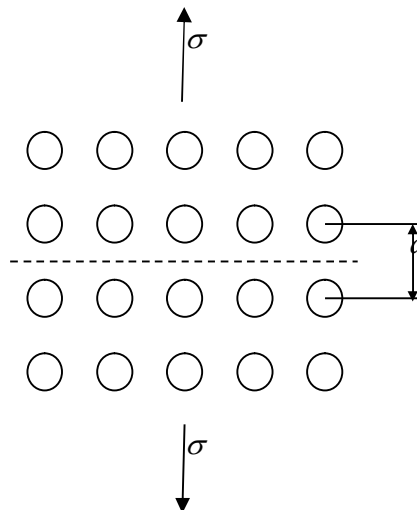
$$\sigma_{teo} = 2 \left( \frac{E \cdot \gamma}{d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

gdje je:

$E$  - modul elasti nosti, MN/m<sup>2</sup>;

$\gamma$  - povrzinska energija (energija potrebna za stvaranje nove povrzine), J/m<sup>2</sup>;

$d$  - razmak kristalnih ravnina.



Slika 1. Razdvajanje ravnina kristalne strukture

Za kubi nu kristalnu rešetku razmak kristalnih ravnina iznosi:

$$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}}, \text{ gdje je} \quad (2)$$

$a$  parametar jedini ne elije (najmanja udaljenost između atoma u odre enom smjeru kristalne rešetke), a  $h, k, l$  su Millerovi indeksi ravnina.

U tablici 1 navedene su vrijednosti teoretske %azdvojne+ vrsto e za idealne kristale bakra,  $\alpha$ -0eljeza, grafita ( $C_g$ ) i dijamanta ( $C_d$ ).

Tablica 1. Vrijednosti modula elasti nosti, povrzinske energije i teoretske %azdvojne+ vrsto e za idealne kristale nekih materijala

Materijal	$E$ N/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ J/m <sup>2</sup>	( $h k l$ )	$\sigma_{teo}$ N/mm <sup>2</sup>
Cu	192 000	1,65	(1 1 1)	39 000
Cu	67 000	1,65	(1 0 0)	25 000
$\alpha$ -Fe	132 000	2,00	(1 0 0)	30 000
$\alpha$ -Fe	260 000	2,00	(1 1 1)	46 000
$C_g$	10 000	0,07	(0 0 0 1)	1 400
$C_d$	1 210 000	5,4	(1 1 1)	205 000

Teoretsko smi no naprezanje potrebno za smicanje kristalnih ravnina, slika 2, idealnog kristala dano je izrazom:

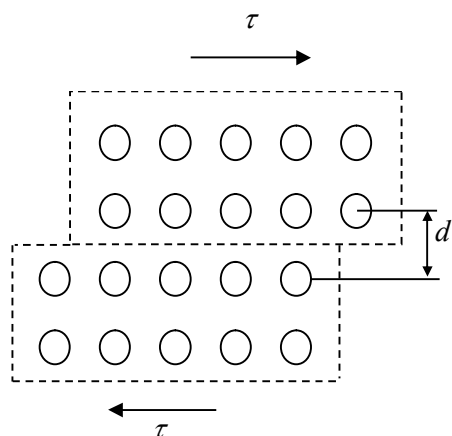
$$\tau_{teo} = \frac{G \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot d}, \quad (3)$$

gdje je:

$G$  - smi ni modul, MN/m<sup>2</sup> ili N/mm<sup>2</sup>;

$b$  - burgersov vektor;

$d$  . razmak kristalnih ravnina.



Slika 2. Smicanje kristalnih ravnina

Vrijednost teoretskog smi nog napreznaja približno je jednaka:

$$\tau_{teo} \approx \frac{G}{10} \quad (4)$$

U tablici 2 uspore bene su vrijednosti teoretskog smi nog napreznaja za idealne kristale  $\alpha$ -Fe, Cu i Al.

Tablica 2. Vrijednosti modula smika i teoretskog smi nog napreznaja za idealne kristale nekih materijala

Materijal	G N/mm <sup>2</sup>	$\approx \tau_{teo}$ N/mm <sup>2</sup>
$\alpha$ -Fe	84 000	8 400
Cu	46 000	4 600
Al	27 000	2 700

Me utim stvarne vrijednosti %azdvojne+ vrsto e i smi nog napreznaja za realne materijale bitno su ni0e. Tako stvarno smi no napreznaje za  $\alpha$ -Fe iznosi samo  $\approx 10$  N/mm<sup>2</sup>. Razlog toliko sni0enoj stvarnoj vrijednosti u odnosu na teoretsku je prisutnost nesavrzenosti u (mikro)strukturi realnih materijala. Kod kristalnih materijala te nesavrzenosti nazivamo nepravilnostima (defektima) kristalne gra e. Nepravilnosti kristalne strukture nulte, prve, druge i tre e dimenzije bitno smanjuju mehani ka svojstva realnog materijala u odnosu na idealnu tvar. Posebice je va0na uloga



dislokacija. No te iste nepravilnosti u realnim materijalima mogu poslužiti za njihovo ovrzivanje. Stoga se svi mehanizmi ili postupci ovrzivanja temelje se na postojanju mikrostrukturnih prepreka koje usporavaju ili spreavaju gibanje dislokacija i time oteavaju te enje materijala. Zbog toga se nužno povećava granica razvlačenja dok vlačna vrstina ne mora rasti. Osnovni mehanizmi ovrzivanja jesu sljedeći:

### 1. Ovrzivanje stvaranjem kristala mjezanaca (legiranjem)

Ovaj mehanizam ovrzivanja temelji se na postojanju točkastih ili nula-dimenzionalnih zapreka - stranih atoma (atoma legiranih elemenata) otopljenih u kristalnoj rešetki osnovnog metala pri čemu nastaju intersticijski ili supstitucijski kristali mjezanaca. Otopljeni atomi legiranih elemenata oteavaju gibanje dislokacija i uslijed čega nastupa porast granice razvlačenja,  $\Delta Re_1$ :

$$\Delta Re_1 = A \cdot G \cdot c^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

gdje je:

- A . koeficijent ovrzivanja (određen vrstom legiranog elementa);
- G . smični modul, MN/m<sup>2</sup> ili N/mm<sup>2</sup>;
- c . udjel legiranog elementa, %.

### 2. Ovrzivanje faznom transformacijom

Najpoznatiji primjer ovrzivanja faznom transformacijom je kaljenje čelika kada se nadkritičnim zagrijanjem u postupku kaljenja događa preklonjena pretvorba (transformacija) austenita u martenzit čime se povećava tvrdoća i vrstina. Ovaj postupak ovrzivanja općenito se temelji na dva mehanizma:

- stvaranje kristala mjezanaca. Ovrzivanje je posljedica postojanja točkastih zapreka gibanju dislokacija čime nastupa porast granice razvlačenja  $\Delta Re_1$ . U slučaju martenzitne transformacije kod čelika dolazi do intersticijskog ulaza atoma ugljika u rešetku čeljeza.

- umna0anje dislokacija zbog izvitoperenja kristalne rešetke. Pove anjem gusto e dislokacija (linijskih ili 1-dimenzionalnih zapreka) u strukturi materijala zbog izvitoperenja (distorzije) kristalne rešetke dislokacije se me usobno ometaju u gibanju zto se prema vani o ituje kao porast granice razvla enja  $\Delta Re_2$ :

$$\Delta Re_2 = \frac{G \cdot b}{2 \cdot \pi} \cdot \rho^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

gdje je:

$G$  . modul smika, MN/m<sup>2</sup> ili N/mm<sup>2</sup>;

$b$  . burgesov vektor;

$\rho$  - gusto a dislokacija, cm<sup>-2</sup>.

### 3. O vrsnu e hladnom deformacijom

O vrsnu e hladnom deformacijom tako er se temelji na pove anju gusto e dislokacija (linijskih ili 1-dimenzionalnih zapreka) u mikrostrukturi materijala te stoga vrijedi mehanizam o vrsnu a  $\Delta Re_2$ . Ÿto je vizi stupanj plasti ne deformacije ve a je i gusto a dislokacija i time je ote0ano njihovo kretanje pa e i granica razvla enja biti viza. Me utim, ovim mehanizmom o vrsnu a dolazi do znatnog smanjenja 0ilavosti materijala. Na ovaj na in posebno su o vrstljivi metali i legure s FCC rešetkom (npr. austenitni elici, Al- i Cu- legure).

### 4. O vrsnu e granicama zrna (usitnjenjem zrna)

Ovaj postupak o vrsnu a temelji se na postojanju granica zrna, povrzinskih ili 2-dimenzionalnih zapreka gibanju dislokacija. Nailaskom na granice zrna dislokacije se gomilaju na granicama te je potrebna dodatna energija u vidu narinutog naprezanja da bi one %avladale+prepreku i nastavile gibanje zto se prema vani o ituje kroz porast granice razvla enja  $\Delta Re_3$ :

$$\Delta Re_3 = K_z \cdot D^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

gdje je:

$K_z$  . koeficijent djelovanja granica zrna;

$D$  . veličina zrna, mm.

Stoga je koeficijent djelovanja granica zrna tim efikasniji što je kristalno zrno sitnije i time veći broj i duljina granica zrna. Prednost je ovog mehanizma u tome da se istovremeno povećava i čvrstoća materijala. Usitnjavanje zrna obično se kombinira s ostalim načinima povećanja čvrstoće.

#### 5. Očvršćenje precipitacijom

Radi se izlučivanju prostornih ili trodimenzionalnih zapreka gibanju dislokacija kao što su izdvojene faze karbida, nitrida, intermetalnih spojeva. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topljivosti stranih atoma (atoma legiranih elemenata) u kristalnoj rešetki osnovnog metala. Djelovanje tih faza ogleda se kroz njihovu raspodjelu i vrstu (koherentne, polukoherentne, nekoherentne), veličinu i međusobni razmak. Nailaskom na precipitacije dislokacije ih mogu odrezati ili zaobići i za to je opet potrebna određena energija pri djelovanju vanjskog opterećenja te se javlja porast granice razvlačenja  $\Delta Re_4$ :

$$\Delta Re_4 = \frac{G \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{L}{2 \cdot b}, \quad (8)$$

gdje je:

$G$  . modul smika, MN/m<sup>2</sup> ili N/mm<sup>2</sup>;

$b$  . Burgesov vektor;

$L$  . razmak između čestica.

Za precipitacijsko očvršćenje povoljnije je prisustvo što većeg broja jednoliko raspoređenih malih tvrdih čestica (precipitata) koje dislokacije ne mogu odrezati i one ih morajuobilaziti.

U realnim materijalima utjecaj mikrostrukturnih nepravilnosti nije moguće egzaktno obuhvatiti proračunom i time to ne izražavati neko mehaničko svojstvo. Stoga se mehanička svojstva utvrđuju eksperimentalnim putem. To se ne odnosi samo na mehanička svojstva materijala već i dijelova konstrukcija (strojnih elemenata) pa i kompletnih konstrukcija. Naime na mehaničku otpornost ne utječe samo mehanička svojstva materijala već i oblik (geometrija) strojnog dijela. Različiti zarezi, utori i sl. bitno utječu na mehaničku otpornost.

Na području ispitivanja mehaničkih svojstava razvila se različita laboratorijska oprema, a pri ispitivanju se često nastoje imitirati uvjeti u kakvima će neki materijal ili pak strojni dio biti eksploatiran.

Tako na in opterećenja (naprezanja) mogu biti:

- na vlak;
- na tlak;
- na savijanje;
- na uvijanje (torziju).

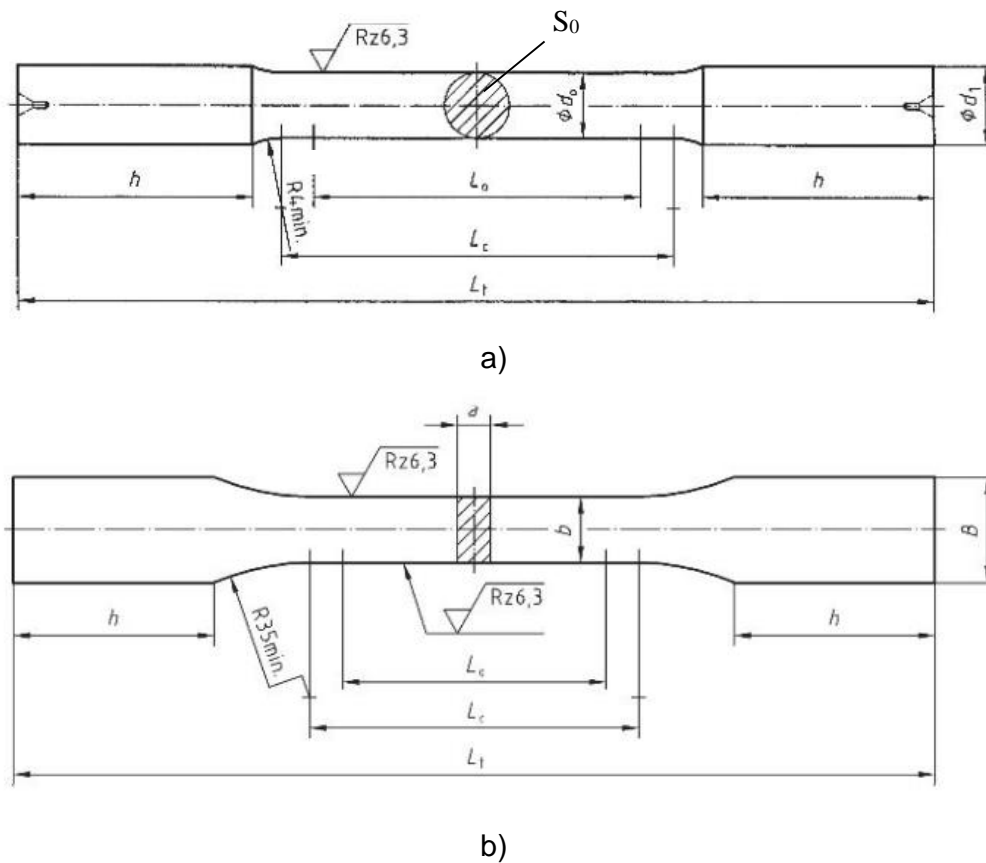
Nadalje, opterećenje (naprezanje) mogu biti statičko, konstantno opterećenje tijekom vremena ili s malim prirastom opterećenja u jedinici vremena, odnosno dinamičko ukoliko se intenzitet mijenja tijekom vremena. Ta promjena je najčešće periodičnog karaktera. Opterećenje također mogu biti i udarno.

Često se prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava simuliraju i neki drugi eksploatacijski uvjeti kao npr. povišena (visoka) temperatura ili pak snižena temperatura. Ispitivanje se mogu provoditi mehaničkim opterećenjem u uvjetima djelovanja korozionog medija itd.

## 2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava, te je to ujedno i najčešće primjenjeno ispitivanje mehaničkih svojstava. 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. Za takvo sporo opterećivanje je najprikladniji hidraulični pogon kraljice. Kod takvog hidrauličkog sistema moguće je u svakom trenutku rasteretiti ispitni uzorak.

Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima (epruvetama) okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka (limovi), slika 3.



Slika 3. Epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115

- a) okrugla epruveta
- b) plosnata epruveta

Oznake na slici 3 zna e:

$d_0$  - po etni promjer epruvete, mm;

$L_0$  - po etna mjerna duljina epruvete, mm;

$h$  . duljina "glave" epruvete, mm;

$L_t$  . ukupna duljina epruvete, mm;

$a$  . debljina plosnate epruvete, mm;

$b$  - zirina plosnate epruvete, mm;

$B$  - zirina glave plosnate epruvete, mm;

$S_0$  . ploztina (povrzina) po etnog presjeka epruvete, mm<sup>2</sup>.

Ploztina po etnog presjeka okrugle epruvete iznosi:

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2. \quad (10)$$

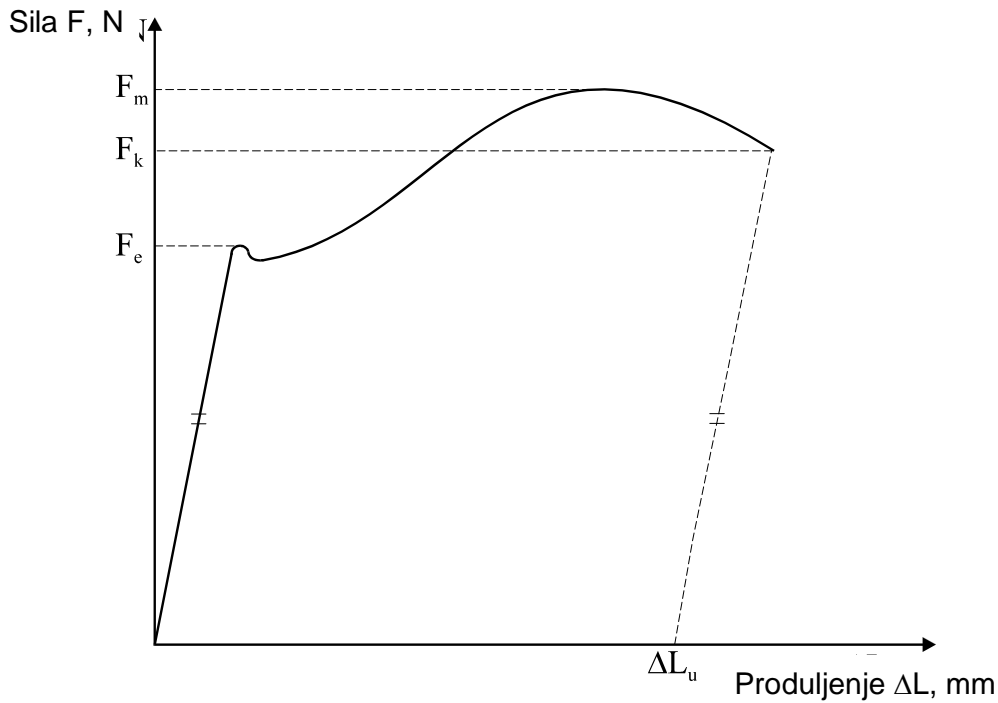
Budu i da se ovim ispitivanjem utvr uju i neka svojstva kojima se opisuje deformabilnost materijala, a na osnovi kojih se materijali tako er mogu me usobno uspore ivati, dimenzije epruvete u uzdu0nom smjeru u odre enom su razmjeru s dimenzijom epruvete u popre nom smjeru. Kod epruveta okruglog presjeka po etna mjerna duljina  $L_0$  treba, prema dogovoru, biti jednaka peterostrukom ili deseterostrukom po etnom promjeru  $d_0$  ili op enito:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (11)$$

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}. \quad (12)$$

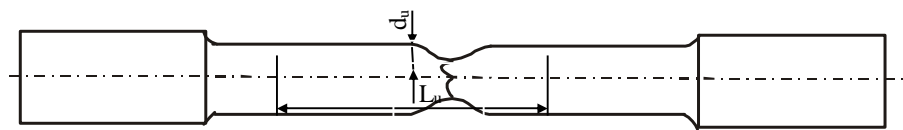
Normalna epruveta ima po etni promjer  $d_0=20$  mm i po etnu mjernu duljinu  $L_0=200$  mm.

Iznos sile kojom je optere ena epruveta za vrijeme stati kog vla nog ispitivanja iskazan je na skali kidalice u N ili kN. Budu i da je pri svakom naprezanju prisutna deformacija, tako se i pri ovom ispitivanju epruveta produljuje. Na pisa u kidalice crta se dijagram  $F - \Delta L$ . Dijagram  $F - \Delta L$  (dijagram kidanja) za neki niskouglni ni konstrukcijski elik izgleda ovako:



Slika 4. Dijagram sila  $F$  - produljenje  $\Delta L$  za konstrukcijski elik

U prvom dijelu dijagrama  $F - \Delta L$  linearna je ovisnost sile i produljenja. Takva linearna ovisnost vrijedi sve do dostizanja  $F_e$  - sile razvlačenja ili tečenja. Nakon dostizanja te sile epruveta se nastavlja produljivati uz ak mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je opet povećanje sile. U tom dijelu statičkog pokusa vize ne postoji linearna ovisnost između prirasta sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostizanja  $F_m$  - maksimalne sile, nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz smanjenje potrebne sile zbog lokaliziranog intenzivnog smanjenja ploštine poprečnog presjeka. Konačno pri vrijednosti  $F_k$  - konačne sile dolazi do loma epruvete. Sastavimo li puknutu epruvetu te izmjerimo razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$  (početna mjerna duljina) dobit ćemo konačnu mjernu duljinu  $L_u$ , slika 5.



### Slika 5. Epruveta nakon kidanja

Produljenje nakon kidanja  $\Delta L_u$  iznosi:

$$\Delta L_u = L_u - L_o, \text{ mm} \quad (13)$$

Ta vrijednost naznačena je također na apscisi dijagrama na slici 4, a dobiva se na taj način da se iz konačne točke dijagrama kidanja povuče paralela s linearnim dijelom dijagrama te na x-osi presjecizte s apscisom.

Iznosi sila pri statičkom opterećenju pokusu ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir ploština poprečnog presjeka epruvete, odnosno ukoliko se umjesto sile  $F$  ne uvede naprezanje  $\sigma$ , koje se određuje izrazom:

$$\sigma = \frac{F}{S_o}; \text{ N/mm}^2 \quad (14)$$

gdje je:

$F$  - sila izražena u Njutnima, a

$S_o$  - ploština poprečnog presjeka epruvete u  $\text{mm}^2$ .

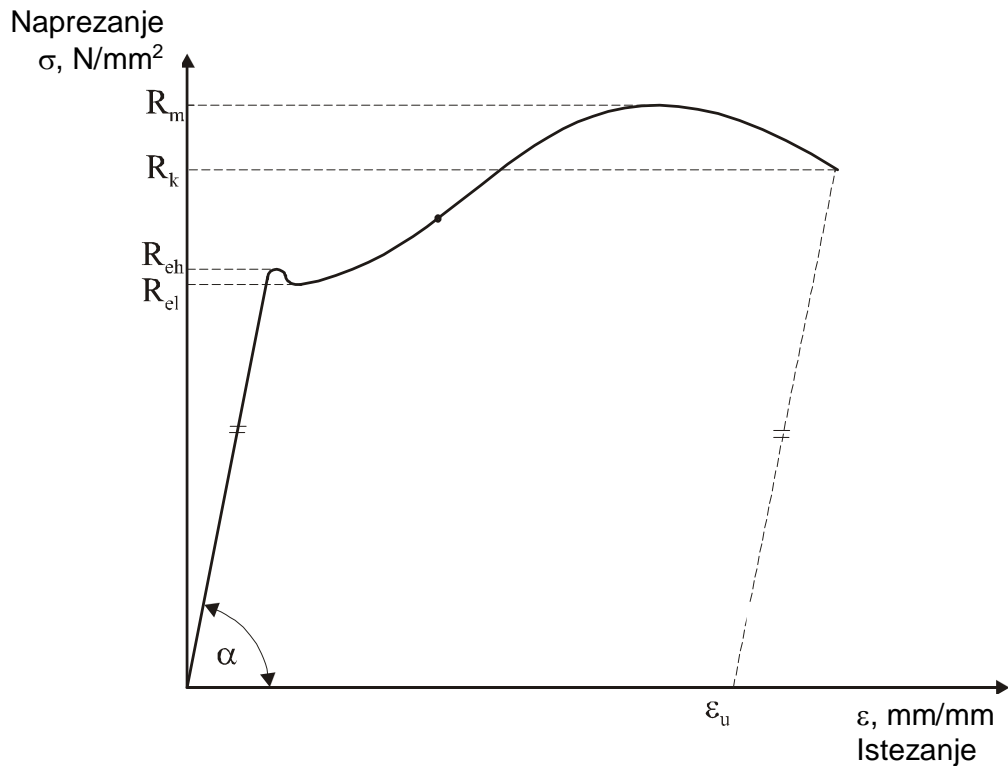
Pored jedinice naprezanja  $\text{N/mm}^2$  naprezanje se izražava i u Paskalima ( $\text{Pa}=\text{N/m}^2$ ).

Ukoliko se produljenje  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L_o$  dobiva se relativno produljenje ili istezanje  $\varepsilon$  prema izrazu :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}, \text{ mm/mm} \quad (15)$$

Na taj način iz dijagrama  $F - \Delta L$  dobiva se konvencionalni ili normalizirani dijagram naprezanje  $\sigma$  - istezanje  $\varepsilon$  koji je za isti konstrukcijski materijal u normaliziranom stanju prikazan na slici 6.





Slika 6. Dijagram naprezanje  $\sigma$ - istezanje  $\varepsilon$  za konstrukcijski elik u normaliziranom stanju

Dijagram po inje iz ishodzita Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

što je modul elasti nosti (Youngov modul)  $E$  ve i za isto istezanje  $\varepsilon$  biti e potrebno ve e naprezanje  $\sigma$ , odnosno nagib Hookeovog pravca e biti strmiji. Modul elasti nosti je elasti na konstanta materijala koja ovisi o vrsto i veze izme u atoma u kristalnoj rezetki ili amorfnoj strukturi.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

što je veza izme u atoma ja a, ve i je modul elasti nosti. Tako najve i modul elasti nosti ima diamant 1.200.000 N/mm<sup>2</sup>.

Svako naprezanje u području gdje vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju. Hookeov pravac je, uz izvjesno pojednostavljenje, s gornje strane ograničen granicom razvlačenja  $R_e$ . Granica razvlačenja  $R_e$  je ono naprezanje kod kojeg se epruveta produljuje uz konstantno ili čak privremeno smanjenje naprezanja.

Granica razvlačenja  $R_e$  utvrđuje se izrazom :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2, \quad (18)$$

gdje je:

$F_e$  - sila tečenja, N a

$S_0$  -  $\text{mm}^2$  ploština početnog presjeka,  $\text{mm}^2$ .

Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti (sl.6):

-  $R_{eh}$  - gornja granica razvlačenja i

-  $R_{el}$  - donja granica razvlačenja.

Granica razvlačenja predstavlja ono naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopuzteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja.

Naprezanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  izazivaju pored elastične i plastične (trajnu) deformaciju epruvete.

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se *vlačna ili rastezna čvrstoća*  $R_m$  i jednako je omjeru maksimalne sile  $F_m$  i ploštine početnog presjeka  $S_0$ :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (19)$$

Veličinu  $R_m$  pogrešno je nazivati maksimalnim naprežanjem, nego je to naprežanje pri maksimalnoj sili. Naime ploština presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje se naglo smanjivati pa stvarno naprežanje unatoč smanjenju sile raste! Vlačna vrstoća  $R_m$  predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti

Nakon dostignutog naprežanja  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po istavom ispitnom dijelu već se lokalizira na jednom mjestu.

Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se *konačno naprezanje*  $R_k$  koje je jednako:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (20)$$

gdje je:

$F_k$  - konačna sila, N

$S_0$  - ploština početnog presjeka, mm<sup>2</sup>.

Statikom vlakom pokusom utvrđuje se i *konačno relativno produljenje (konačno istezanje)*  $\varepsilon_u$  prema jednačini:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (21)$$

*Istezljivost A* definirana je sljedećim izrazom :

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \% \quad (22)$$

Uobičajeno je da se pokraj simbola  $A$  ne navodi nikakva oznaka ukoliko je istezljivost utvrđena na kratkoj epruveti ( $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ ) odnosno oznaka 11,3 ( $A_{11,3}$ ) koja pokazuje da je istezljivost utvrđena na dugačkoj epruveti ( $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ ). Budući da je na kratkoj epruveti ( $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ ) nejednolična deformacija epruvete u blizini mjesta prijeloma epruvete u odnosu na jednolično produljenje epruvete dalje od mjesta preloma jače zastupljena nego kod dugačke epruvete ( $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ ), veličina  $A$  uvijek je veća od veličine  $A_{11,3}$  za isti materijal. Na osnovi iznosa istezljivosti  $A$  materijali se međusobno uspoređuju u pogledu deformabilnosti. No iznos istezljivosti daje samo informaciju o deformabilnosti materijala u uzdužnom (aksijalnom) smjeru epruvete.

Kako se epruveta prilikom statičkog vlakog pokusa istovremeno produljuje i sužava (volumen je konstantan!) veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u

smjeru poprečnom na djelovanje opterećenja naziva se *kontrakcijom*  $Z$ . Ona predstavlja relativno suženje ploštine presjeka epruvete u odnosu na ploštinu početnog presjeka:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \%, \quad (23)$$

gdje je:

$S_0$  - ploština početnog presjeka,  $\text{mm}^2$  a

$S_u$  - ploština presjeka epruvete na mjestu preloma,  $\text{mm}^2$ .

Dijagram naprezanje - istezanje kakav smo do sada razmatrali naziva se inženjerski ili konvencionalni dijagram iji tijekom kvalitativno odgovara dijagramu sila  $F$  - produljenje  $\Delta L$ . To me utim nije "stvarni" dijagram naprezanje - istezanje! Nije zbog toga što se iznosi naprezanja utvrđuju pomoću izraza (14) dijeljenjem sila s ploštinom početnog presjeka  $S_0$  što je ispravno samo u području elastičnih deformacija ( $\sigma < R_e$ ) gdje se zbog promjenljivosti volumena unatoč produljenju epruveta ne sužuje. Stvarno naprezanje jednako je :

$$\sigma_s = \frac{F}{S}, \text{ N/mm}^2 \quad (24)$$

gdje je  $S$ , stvarna ploština presjeka epruvete u  $\text{mm}^2$ .

U području plastičnih deformacija ( $\sigma > R_e$ ) ploština početnog presjeka se smanjuje pa je naprezanje  $\sigma_s$  veće od inženjerskog  $\sigma$ ! Posebno je ta razlika izražena nakon dostizanja maksimalne sile  $F_m$  (odnosno vlačne vrstne sile  $R_m$ ) jer se deformacija epruvete lokalizira i nastaje vrat epruvete. U inženjerskom dijagramu naprezanje - istezanje je na osi apscisa istezanje  $\varepsilon$  određeno izrazom (15), odnosno dijeljenjem produljenja  $\Delta L$  s početnom mjernom duljinom  $L_0$ . Ako se uzme u obzir da je relativno produljenje promjena duljine podijeljena s trenutnom duljinom stvarno istezanje  $\varepsilon_s$  utvrđuje se izrazom koji predstavlja sumu produljenja  $\Delta L$  u pojedinim trenucima ispitivanja podijeljenim s mjernom duljinom epruvete u trenutku neposredno prije toga :

$$\varepsilon_s = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \frac{L_3 - L_2}{L_2} + \dots + \frac{L_n - L_{n-1}}{L_{n-1}} \quad (25)$$

ili

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0} \quad (26)$$

Nakon zto se epruveta po ne plasti no deformirati iz konstantosti volumena proizlazi :

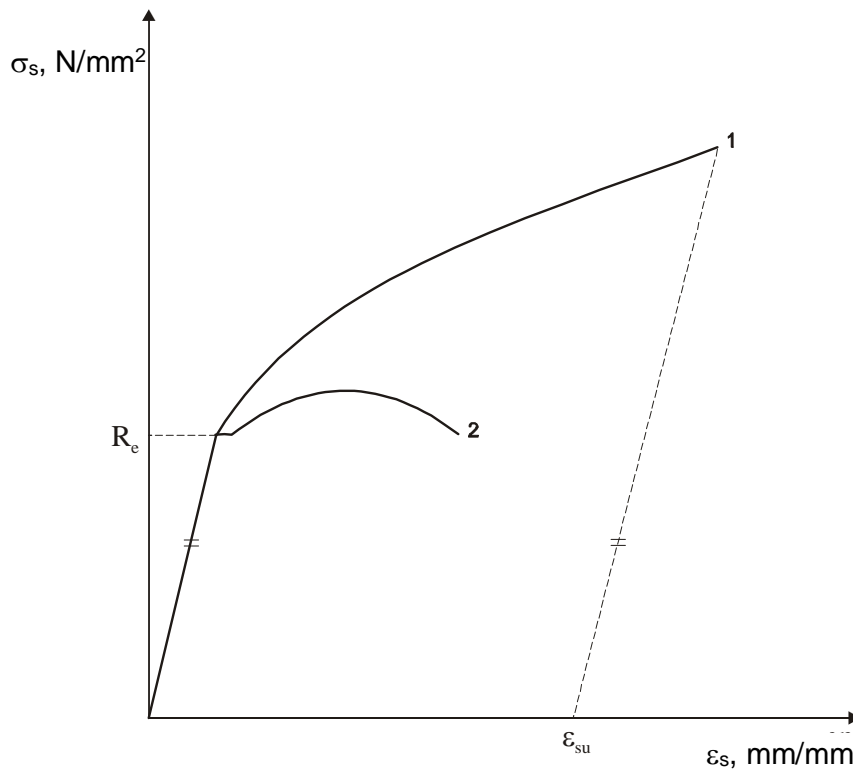
$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad (27)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{S_0}{S} = \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \text{ pa je} \quad (28)$$

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0} = 2 \ln \frac{d_0}{d} \quad (29)$$

Posebno je važno izraz za stvarno istezanje u ovom obliku primjenjivati nakon dostignute maksimalne sile  $F_m$ , jer se od tada epruveta ne produkuje po cijeloj mjernoj duljini jednoliko već se deformacija koncentira na jednom mjestu epruvete.

Kvalitativni stvarni dijagram naprezanje - istezanje za neki konstrukcijski elik prikazan je na slici 7.



Slika 7. Kvalitativni stvarni dijagram  $\sigma-\varepsilon$  (1) za neki konstrukcijski elik uz odgovaraju i konvencionalni dijagram (2)

U elasti nom podru ju dijagrama ( $\sigma_s < R_e$ ) stvarno naprezanje i istežanje povezuje Hookeov zakon:

$$\sigma_s = E \cdot \varepsilon_s \quad (30)$$

U plasti nom podru ju ( $\sigma_s > R_e$ ) vrijedi :

$$\sigma_s = R_e + k \cdot \varepsilon_s^n \quad (31)$$

gdje je:

$k$  - konstanta materijala,  $N/mm^2$ , a

$n$  - koeficijent o vrz enja iji se iznos za metalne materijale kre e od 0,25 do 0,5.

Inženjerski ili konvencionalni dijagram naprezanje - istežanje daje dostatne podatke za konstrukcijske svrhe budu i da se dijelovi strojeva i ure aja u eksploataciji

ne optereuju izvan elastičnog područja u kojem su oba dijagrama identična. Međutim u cilju izučavanja ponašanja materijala pri obradi deformiranjem dostatne podatke daje tek stvarni dijagram naprezanje-istezanje. Stvarni dijagram naprezanje-istezanje nam konačno daje odgovor na pitanje zbog čega vrijednost  $R_m$  ne smijemo zvati maksimalnim naprezanjem već samo naprezanjem kod maksimalne sile!

Slijede i odnosi vrijede između  $\sigma_s$  i  $\sigma$  odnosno  $\varepsilon_s$  i  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_s = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon) \text{ mm/mm} \quad (32)$$

$$\sigma_s = \frac{F}{S} \text{ iz } S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \text{ slijedi } S = \frac{S_0 \cdot L_0}{L} \quad (33)$$

$$\sigma_s = \frac{F \cdot L}{S_0 \cdot L_0} = \frac{F}{S_0} \cdot \left( \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \frac{F}{S_0} (1 + \varepsilon) = \sigma (1 + \varepsilon) \text{ N/mm}^2 \quad (34)$$

Razlika između  $\varepsilon_s$  i  $\varepsilon$  je za male vrijednosti tih veličina neznatna, dok je za veće vrijednosti razlika značajna, tablica 3:

Tablica 3. Razlika vrijednosti  $\varepsilon$  i  $\varepsilon_s$

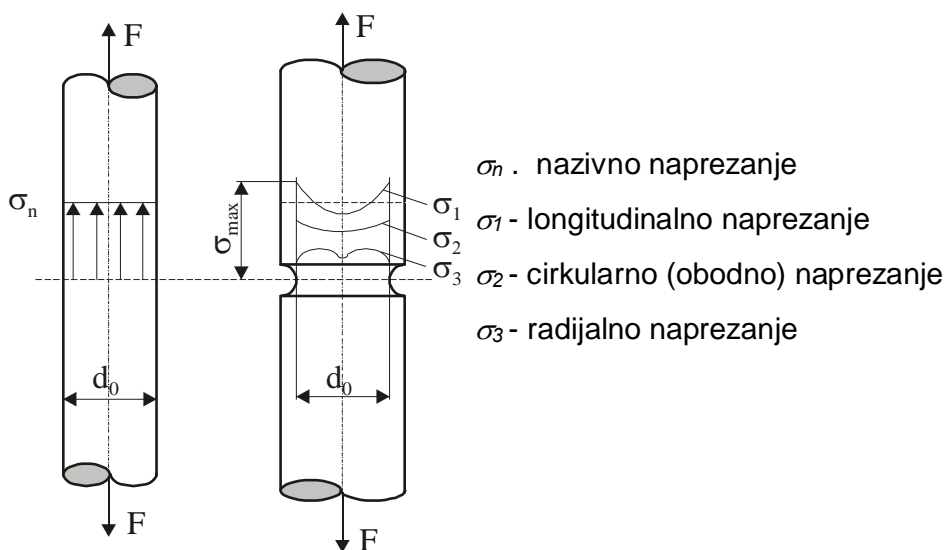
$\varepsilon$ mm/mm	$\varepsilon_s$ mm/mm	Pogreška %
0,02	0,0197	≈1
0,06	0,0583	≈3
0,10	0,0950	≈5
0,30	0,2620	≈13

### 3. UTJECAJ ZAREZA (UTORA) NA REZULTATE STATIČKOG VLAČNOG ISPITIVANJA

Ponašanje materijala pri statičkom vlačnom ispitivanju ovisi prvenstveno o mikrostrukturi materijala koja je definirana kemijskim sastavom i tehnološkim parametrima obrade. Dodatan je utjecaj vanjskih parametara (temperatura okoline, brzina prirasta opterećenja i sl.) o kojima će biti govora kasnije.

Kod ispitivanja mehaničkih svojstava gotovih strojnih dijelova uvodi se pojam *vrstoće oblika*. Naime različite nepravilnosti u geometriji strojnih dijelova (utori, prelazni radijusi i sl.) dovode do promjene rasporeda i intenziteta naprezanja te je za strojni dio s utorom ili prelaznim radijusom karakteristična pojava vizeosnog stanja naprezanja. To je osobito važno kod dinamičkog naprezanja, ali utječe i na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja.

Utjecaj vizeosnog stanja naprezanja na rezultate statičkog vlačnog pokusa ispituje se opterećivanjem ispitnih uzoraka sa utorima (mehanički zarezanim ispitnim uzorcima), slika 8.



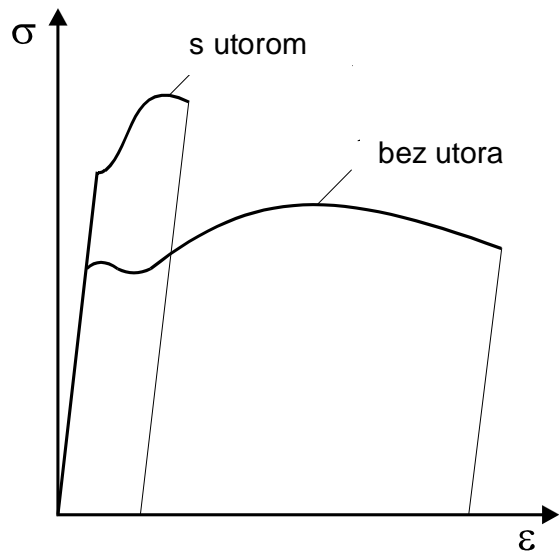
Slika 8. Raspored naprezanja u vlačno napregnutoj cilindričnoj epruveti i epruveti s utorom



Posljedica utora na vlačno opterećenoj epruveti je uspostava troosnog nehomogeno raspoređenog stanja naprezanja. U smjeru opterećivanja u zarezanoj epruveti nastaju longitudinalna naprezanja  $\sigma_1$ , okomito na njih cirkularno naprezanje  $\sigma_2$ , a u smjeru okomitom na  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  radijalno naprezanje  $\sigma_3$ . U korijenu utora nastupa maksimalno longitudinalno naprezanje  $\sigma_1 = \sigma_{max}$ , čiji iznos raste sa smanjenjem radiusa zakrivljenosti utora. Odnos tog maksimalnog naprezanja i nazivnog naprezanja za epruvetu istog promjera  $d_0$  ali bez utora je  $\alpha_k$  i naziva se *faktor oblika*:

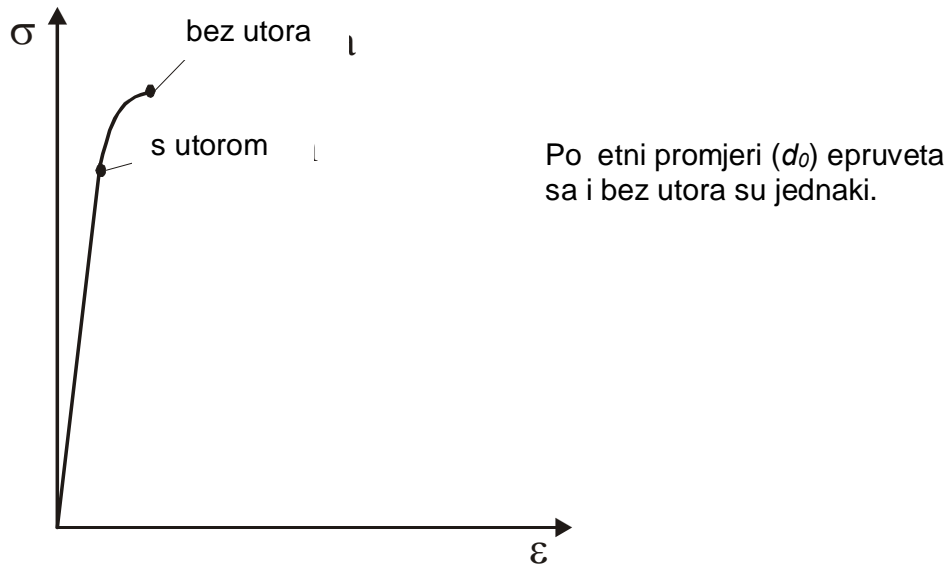
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (35)$$

Kako prisustvo utora utječe na izgled dijagrama naprezanje  $\sigma$  – istezanje  $\varepsilon$ ? Odgovor na to pitanje daju nam dijagrami na slikama 9 i 10, koji pokazuju utjecaj utora na tijek dijagrama  $\sigma$ – $\varepsilon$  za jedan čilavi materijal kakav je op i konstrukcijski elik odnosno krhki materijal npr. sivi lijev.



Po etni promjeri ( $d_0$ ) epruveta sa i bez utora su jednaki.

Slika 9. Dijagrami  $\sigma$ – $\varepsilon$  za epruvetu sa i bez utora od op eg konstrukcijskog elika

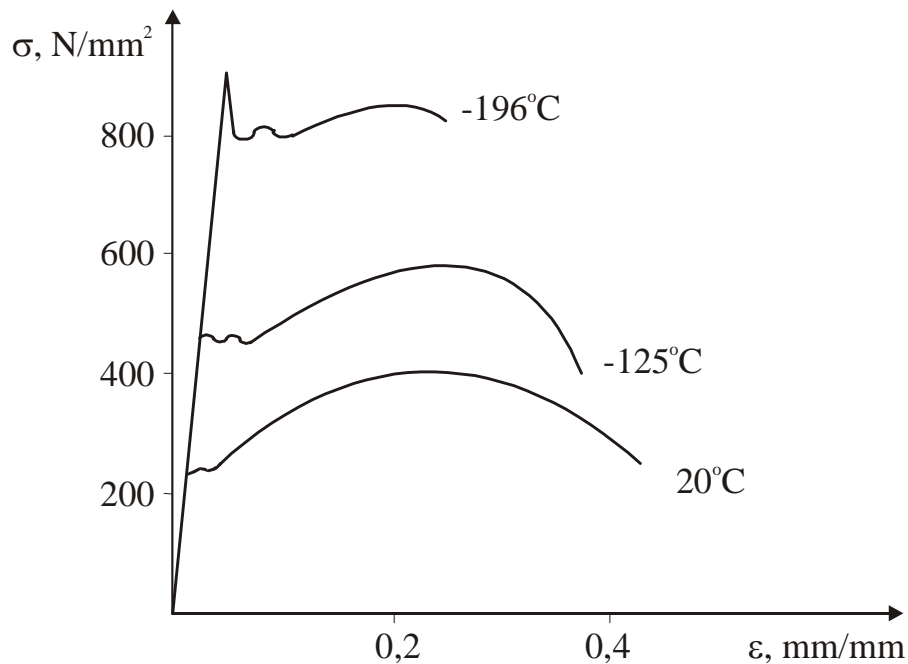


Slika 10. Dijagrami  $\sigma$ - $\epsilon$  za epruvetu sa i bez utora od sivog lijeva

Bitna je razlika u djelovanju utora na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja za čilave odnosno krhke materijale. Kako dijagram na slici 9 pokazuje maksimalna sila potrebna za lom epruvete od čilavih materijala kakav je op i konstrukcijski elik ve a je kod zarezane epruvete nego kod glatkog ispitnog uzorka. Suprotno tomu kod krhkih materijala kakav je sivi lijev utor smanjuje potrebnu maksimalnu silu za lom epruvete, slika 10. Razlog tomu je što kod čilavih materijala zbog koncentracije naprezanja u korijenu utora dolazi do lokalnog ovrzavanja materijala pa kod epruvete s utorom rastu i granica razvlačenja  $R_e$  i vlačna vrstoća  $R_m$  dok se istezljivost  $A$  smanjuje. No takvo djelovanje utora ni u kojem slučaju nije povoljno budući da je rad potreban za prijelom epruvete (a u eksploataciji strojnog dijela) bitno smanjen u odnosu na nezarezanu epruvetu. Kod krhkih materijala koncentracija naprezanja u korijenu utora ne uzrokuje lokalno ovrzavanje. Za razliku od čilavih materijala i pojave smičnog loma kao posljedice smičnih naprezanja koja se ne povećavaju uslijed prisustva utora kod krhkih materijala javlja se odreznik lom koji izazivaju longitudinalna naprezanja koja rastu zbog prisutnosti utora pa zarezana epruveta puca pri nižoj vrijednosti narinutog naprezanja nego glatka epruveta. Stoga su kod epruvete s utorom vrijednosti granice razvlačenja  $R_e$  i vlačne vrstoće  $R_m$  niže.

#### 4. UTJECAJ SNIŽENE TEMPERATURE NA REZULTATE STATIČKOG VLAČNOG ISPITIVANJA

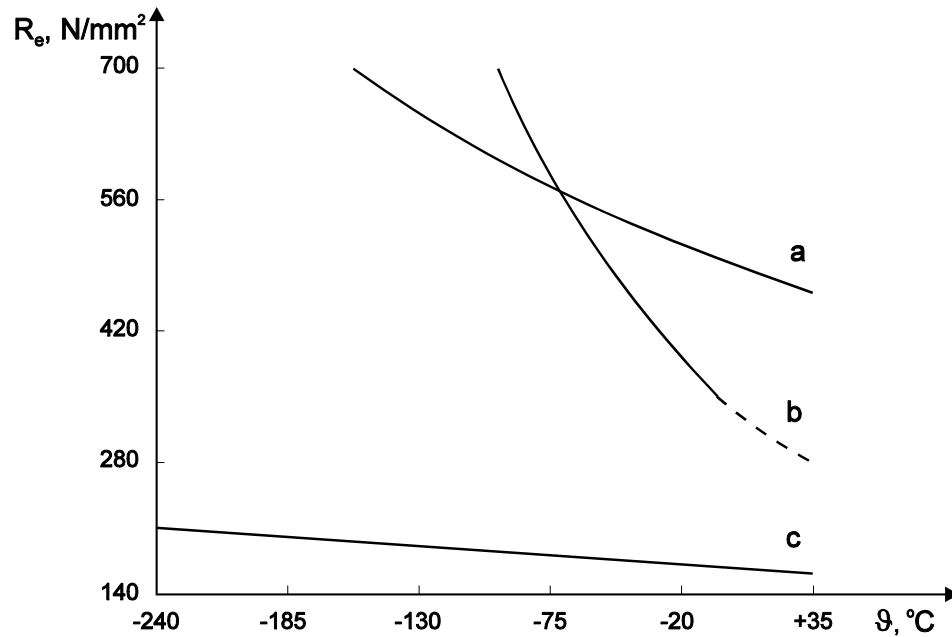
Me u vanjske uvjete koji djeluju na mehani ka svojstva spada tako er i temperatura okoline. Utjecaj snižene temperature osobito je znakovit pri ispitivanju udarnog rada loma, ali je primjetan i u uvjetima statikog optere enja pri statikom vlačnom ispitivanju. Da bi se utvrdio utjecaj snižene temperature na rezultate statikog vlačnog pokusa epruvetu treba kontinuirano tokom ispitivanja ohla ivati u odgovaraju ojoj komori. Utjecaj snižene temperature na rezultate statikog vlačnog pokusa za obi an uljni ni konstrukcijski elik prikazuje slika 11.



Slika 11. Utjecaj snižene temperature na rezultate statikog vlačnog ispitivanja op eg konstrukcijskog elika 0361

Sa sniženjem temperature ispitivanja granica razvla enja  $R_e$  i vlačna vrstoa  $R_m$  rastu, vrijednosti granice razvla enja  $R_{eh}$  i  $R_{el}$  postaju izraženije, dok se istezljivost  $A$  smanjuje. Vrijednost modula elastinosti  $E$  se ne mijenja na zto ukazuje nepromijenjeni nagib Hookeovog pravca za sve temperature ispitivanja. Utjecaj snižene temperature na mehani ka svojstva mnogo je znakovitiji kod legura sa BCC rešetkom (svi elici osim austenitnih) nego kod legura sa FCC rešetkom. Slika 12 pokazuje promjenu granice

razvla enja sa sni0enjem temperature za dva elika (BCC rezetka) i za tehni ki isti nikal (FCC rezetka)



Slika 12. Utjecaj sni0ene temperature na granicu razvla enja

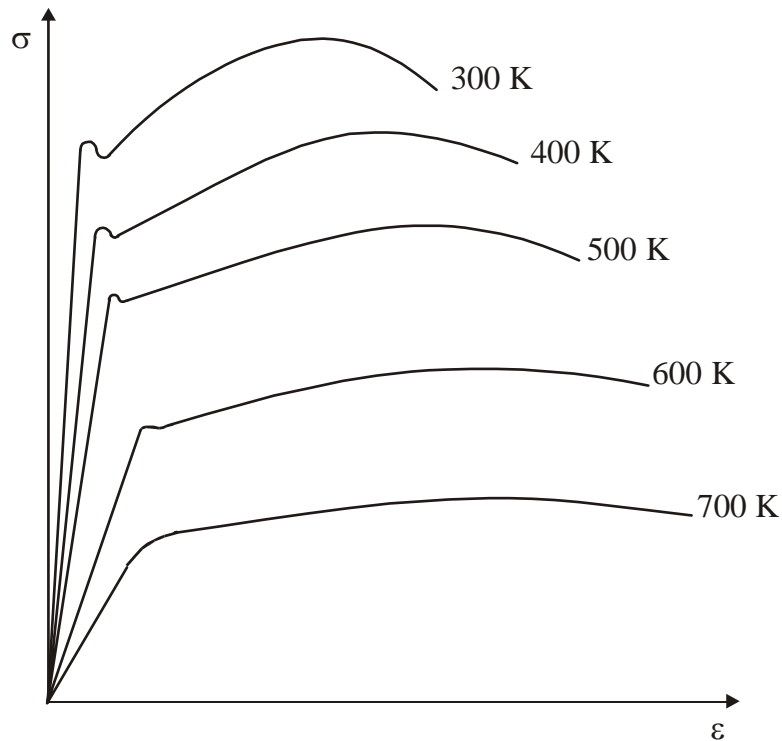
- a- elik 5480
- b- elik 1430
- c- tehni ki ist nikal

## 5. UTJECAJ POVIŠENE TEMPERATURE NA REZULTATE STATIČKOG VLAČNOG ISPITIVANJA

Utjecaj povizene temperature u uvjetima statikog optere enja kratkotrajnog djelovanja uvod je u ponazanje materijala pri ovakvom naprezanju u uvjetima dugotrajnog optere ivanja zto ima za posljedicu puzanje materijala.

S ciljem utvr ivanja ponazanja materijala pri povizenim temperaturama statiki vlni pokus mo0e se provesti na epruveti koja je tijekom ispitivanja ugrijana na odre enu temperaturu. Takvo ispitivanje provodi se na materijalima koji e u eksploataciji biti izlo0eni povizenoj temperaturi (kotlogradnja, energetska postrojenja i

sl.). Utjecaj povizene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja općeg konstrukcijskog elika prikazan je na slici 13.



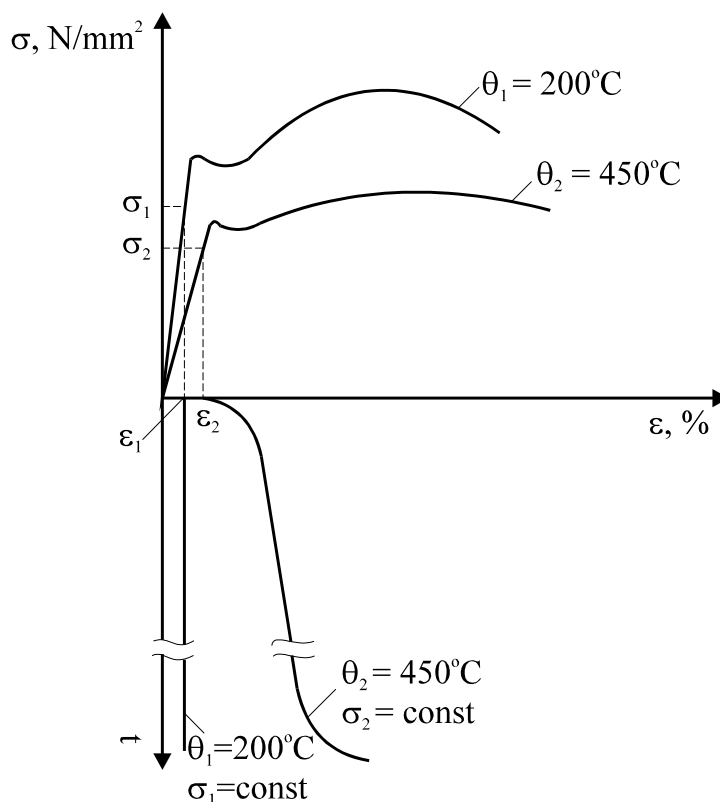
Slika 13. Utjecaj povizene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja općeg konstrukcijskog elika (kvalitativni dijagram)

Povizenjem temperature ispitivanja smanjuje se otpornost materijala ( $R_e$ ,  $R_m$ ), granica razvlačenja  $R_e$  postaje slabije izražena, a istezljivost  $A$  se povećava. Modul elastičnosti  $E$  smanjuje se s povećanjem temperature.

## 6. PUZANJE MATERIJALA

U poglavlju 5 opisan je utjecaj povizene temperature na mehanička svojstva utvrđena kratkotrajnim statičkim opterećivanjem epruvete. Utjecaj povizene temperature tim je značajniji što je trajanje opterećivanja epruvete ili strojnog dijela u eksploataciji, dugotrajnije.

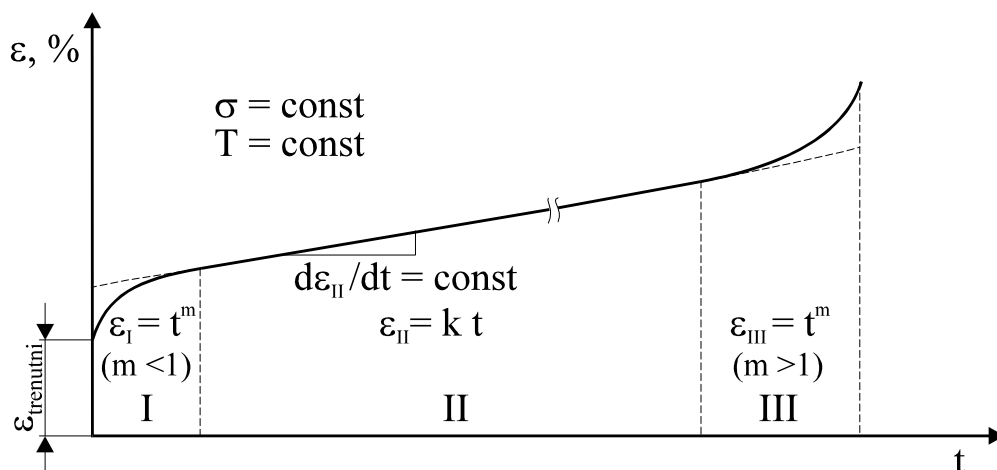
Pretpostavimo da su kvalitativni dijagrami naprežanje  $\sigma$  - istezanje  $\varepsilon$  (slika 14) dobiveni ispitivanjem dvije epruvete od kotlovskog elika na povizenim temperaturama  $\theta_1$  i  $\theta_2$ , te da je temperatura  $\theta_2$  viša od temperature  $\theta_1$ . Utjecaj povizene temperature na tijek dijagrama je baš onakav kako je opisan u poglavlju 5.



Slika 14. Dijagrami  $\sigma$ - $\varepsilon$  te "zakrenuti" dijagrami puzanja za dvije povizene temperature ispitivanja za isti elik za kotlove.

Pretpostavimo nadalje da je epruveta od istog elika napregnuta dulje vrijeme na temperaturi  $\theta_1$  nekim konstantnim naprežanjem  $\sigma_1$  koje je manje od granice razvlačenja  $R_e$  za tu temperaturu. Onog trenutka kada je epruveta napregnuta naprežanjem  $\sigma_1$  ona se istegnula za iznos  $\varepsilon_1$  (slika 14). Daljnjim praćenjem istezanja tijekom vremena utvrđeno je da se ono nije više povećavalo! Epruveta od istog elika napregnuta je na temperaturi  $\theta_2$  naprežanjem  $\sigma_2$  opet manjim od granice razvlačenja  $R_e$  za tu temperaturu, što je proizvelo istezanje  $\varepsilon_2$ . Međutim, praćenjem istezanja utvrđeno je da ono tijekom vremena raste, te da na kraju dolazi čak do loma epruvete! Donji dijagram na slici 14 predstavlja dijagram puzanja zakrenut za  $90^\circ$ , a slika 15 prikazuje

Normalni dijagram puzanja kojemu je os apscisa vrijeme izraženo najez e u satima, a ordinata istezanje u postocima.



Slika 15. Dijagram puzanja

Dijagram ne po inje u ishodiztu koordinatnog sustava zbog toga zto dolazi do trenutnog istezanja u trenutku optere ivanja epruvete. Dijagram, odnosno sam proces puzanja, podijeljen je u tri stadija.

U prvom stadiju koji se naziva i po etni stadij puzanja istezanje se ostvaruje prema izrazu:

$$\varepsilon_I = t^m \quad (36)$$

a vrijednost eksponenta  $m$  je manja od 1, pa se nakon naglog prirasta istezanja u jedinici vremena na po etku optere ivanja prirast postupno smanjuje do prijelaza u slijede i stadij. U ovom stadiju je deformacija velika zbog sre ivanja nepravilnosti kristalne rešetke.

U drugom stadiju puzanja koji se naziva stadijem konstantne brzine (gradijenta) puzanja kao zto i ime govori prirast istezanja u jedinici vremena je približno konstantan te je dijagram je približno pravac za koji vrijedi:

$$\varepsilon_{II} = k \cdot t \quad (37)$$

Nakon drugog stadija puzanja nastupa treći i završni stadij puzanja kada opet dolazi do sve veće prirasta istezanja u jedinici vremena (porast brzine puzanja) te vrijedi:

$$\varepsilon_{III} = t^m \quad (38)$$

a eksponent  $m$  je veći od 1. U tom trećem stadiju puzanja dolazi konačno i do loma epruvete.

Iz dijagrama na slici 14 proizlazi da je ispitani elik za naprezanje  $\sigma_1$  na temperaturi  $\vartheta_1$  otporan puzanju dok je za naprezanje  $\sigma_2$  na temperaturi  $\vartheta_2$  neotporan pojava puzanja.

Puzanje materijala je toplinski aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji nastaje u uvjetima dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja na povišenoj temperaturi. Stoga na pojavu puzanja materijala utječu slijedeći parametri:

- *temperatura tališta materijala;*
- *tip atomske veze i kristalne rešetke materijala;*
- *mikrostrukturno stanje materijala.*

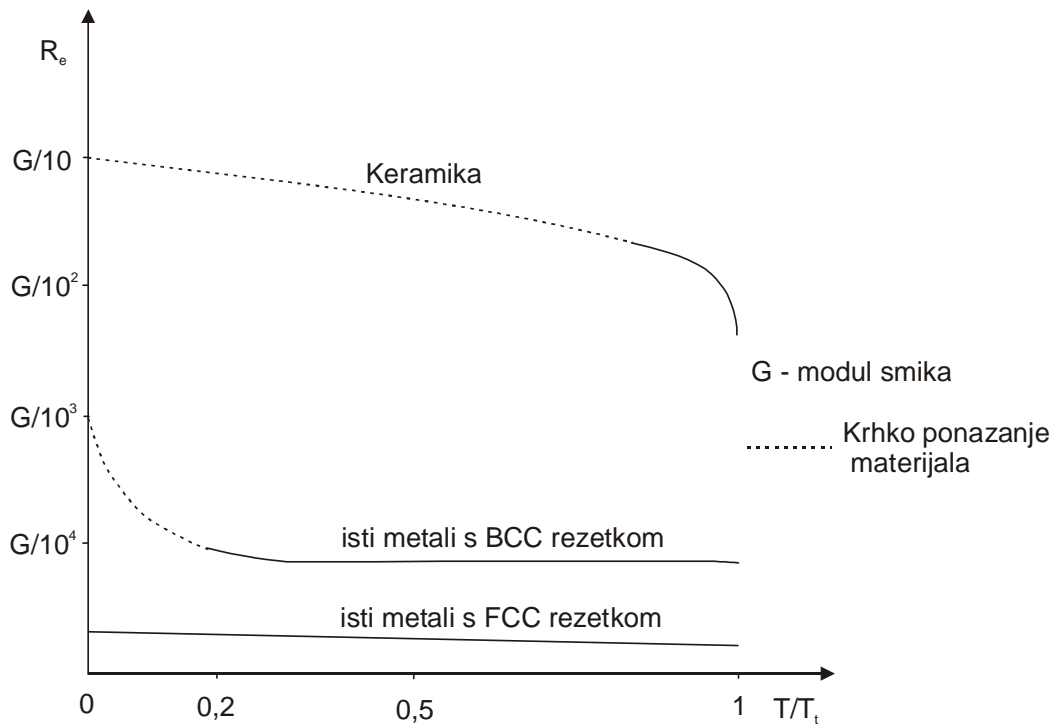
Temperatura tališta  $T_t$  (krutizta) materijala predstavlja teoretski gornju granicu koriztenja materijala u konstrukcijske svrhe. Budući da je puzanje materijala toplinski aktiviran proces u kojem nastupa difuzija te oporavak taj proces značajnije nastupa u temperaturnom području :

$$T > 0,3 \cdot T_t, \text{ K} \quad (39)$$

zato za elike iznosi oko 700 K, aluminijske slitine oko 350 K, dok olovo i polimerni materijali puzaju već na sobnoj temperaturi. U tom pogledu najpogodniji materijali su keramika i teško taljivi prelazni metali zbog visoke temperature tališta.

Plastičnost u kristalnim zrnima je zapravo gibanje dislokacija. Značajna je razlika u naprezanju potrebnom za početak gibanja dislokacija kod kristala kod kojih su atomi povezani metalnom vezom (metali) i odgovarajućeg naprezanja kod kristala s kovalentnom ili ionskom vezom, slika 16.





Slika 16. Ovisnost granice razvlačenja  $R_e$  o omjeru temperature  $T/T_t$

Zbog nedirektne veze me u atomima dislokacije se kod FCC metala lako gibaju kod svih temperatura. Nasuprot tome kod kovalentno vezanih atoma (keramike) takav pomak dislokacija (plastično tečenje materijala) moguće je tek pri temperaturama neznatno nižim od temperature taljenja  $T_t$ . Stoga se i u tom pogledu keramički materijali bitno u znatnoj prednosti u odnosu na metalne materijale, no kod keramike nastupa problem velike krhkosti na nižim temperaturama. Samo zbog toga se koriste još uvijek najviše metali ali ne isti ve legure.

Glede mikrostrukturnog stanja najbolju otpornost puzanju imaju oni materijali koji posjeduju najviše prepreka za otežano gibanje dislokacija u kristalnoj rešetci. To vrijedi u itavim temperaturnom području, teoretski od 0 K do temperature talizta materijala no postoje neke specifičnosti budući da se pri vizim temperaturama ubrzavaju toplinski aktivirani procesi:

- kretanje dislokacija je brže i odvija se na drugi način nego što je to slučaj na nižim temperaturama;
- moguća je promjena mikrostrukture zbog difuzijskog premještanja atoma i defekata.

Utjecaj pojedinih mehanizama o vrsnu a na povizenje granice razvla enja kod niskih i povizened temperatura prikazan je u tablici 4.

Tablica 4. Djelovanje mehanizama o vrsnu a pri niskim i povizened temperaturama

	$\Delta Re_1$ Legiranje (stvaranje kristala mjezanaca) 0-dim. defekti	$\Delta Re_2$ Hladno deformiranje 1-dim. defekti	$\Delta Re_3$ Usitnjenje zrna 2-dim. defekti	$\Delta Re_4$ Precipitacija 3-dim. defekti
Nisko temperaturno deformiranje	+	++	++	++
Visoko temperaturno deformiranje - puzanje	+	+ -	-	++

+Pove anje Re;

++Jako pove anje Re;

- Smanjenje Re

Podaci iz tablice 4 pokazuju da pri visokim temperaturama o vrz enje nastupa stvaranjem kristala mjezanaca ( $\Delta Re_1$ ) i precipitacijom ( $\Delta Re_4$ ). Hladno deformiranje mo0e pove ati, ali i smanjiti otpornost puzanju ako pri vizim temperaturama nastupi rekristalizacija. Smanjenjem kristalnog zrna smanjuje se i otpornost materijala prema pojavi puzanja.

Olakzana plasti na deformabilnost metala na povizened temperaturama mogu a je zbog dva procesa:

1. Na povizened temperaturama kretanje dislokacija je puno br0e, a i sam na in njihovog gibanja je druga iji u odnosu na gibanje pri ni0im temperaturama. Kod niskih temperatura je mogu e kretanje bridnih dislokacija samo u njihovim kliznim ravninama ("konzervativno" kretanje) dok kod visokih temperatura mo0e nastupiti "penjanje" bridnih dislokacija u smjeru okomitom na njihovu kliznu ravninu ("nekonzervativno" kretanje).

2. Nadalje kod niskih temperatura uslijed deformacije i povećanja gustoće dislokacija materijal ovrzava dok se kod visokih temperatura dislokacije "lijepe" oporavkom ili rekristalizacijom.

Svi su ti procesi ovisni o temperaturi i vremenu. Njihova je brzina uvjetovana brzinom stvaranja i kretanja vakancija u rešetci. Mjerilo za tu brzinu je energija aktivacije puzanja koja je upravo proporcionalna energiji aktivacije difuzije. To znači da se materijali s niskim koeficijentom difuzije imaju bolju otpornost puzanju od onih kod kojih je taj koeficijent visok. Budući da je koeficijent difuzije kod  $\gamma$ -Fe oko 100 puta manji nego kod  $\alpha$ -Fe, austenitne legure imaju bolju otpornost puzanju od feritnih legura! Drugi parametar koji utječe na brzinu puzanja je nametnuto naprezanje  $\sigma$ . Stoga se brzina puzanja računa prema slijedećem izrazu:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^m \cdot e^{-\frac{Q_p}{kT}}, \text{ gdje je} \quad (40)$$

gdje je:

$\sigma$  - naprezanje;

$T$  - apsolutna temperatura;

$A$  - konstanta

$m$  - konstanta

$Q_p$  - energija aktivacije puzanja, energija potrebna za skok atoma pri puzanju;

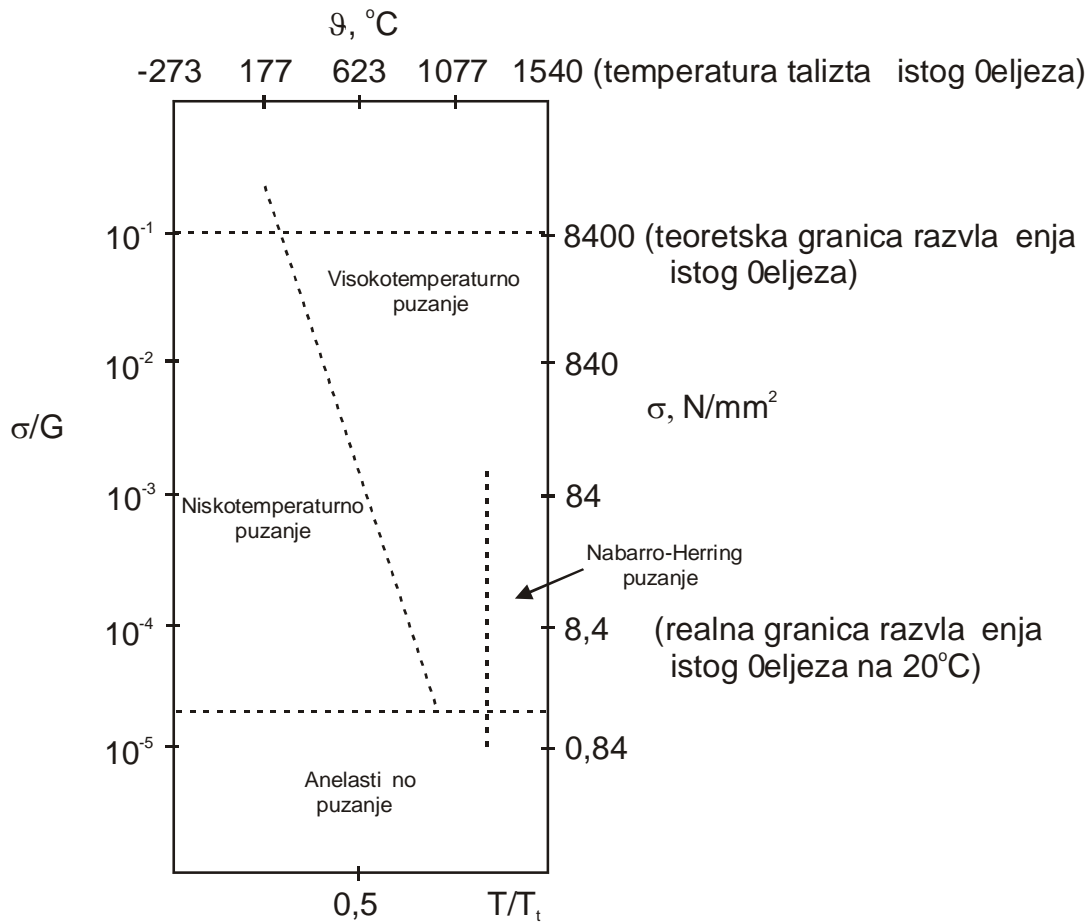
$k$  - plinska konstanta.

Vrijednosti konstanti  $A$  i  $m$  ovisne su o naprezanju i vremenu ali također variraju i s promjenom mikrostrukture (rast zrna, rast čestica, oporavak).

Puzanje nastupa u kristalima (transkristalno) te po granicama zrna (interkristalno).

## 6.1 Puzanje u kristalima

Na dijagramu na slici 17 prikazani su različiti mehanizmi puzanja na primjeru istog Oeljeza. Isti princip primjenjiv je i za ostale metale.



Slika 17. Mehanizmi puzanja u kristalima

### Visokotemperaturno puzanje

Kod visokotemperaturnog puzanja plastično deformiranje ne uzrokuje ovrženje materijala te se deformacija ovisna o vremenu pri konstantnoj gustoći dislokacija odvija uz konstantnu brzinu puzanja  $d\varepsilon/dt$ .

### Niskotemperaturno puzanje

Deformacija materijala tijekom vremena se usporava zbog nastupajućeg ovršenja materijala uzrokovano povećanjem gustoće dislokacija. Stoga je moguće da na kraju ova deformacija i prestane odnosno da je brzina puzanja jednaka nuli.

Budući da je sa stanovišta primjene materijala najvažnije visokotemperaturno puzanje osnovni je pokazatelj brzine puzanja gustoća dislokacija i brzina kretanja dislokacija:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = b \cdot \rho \cdot v, \quad (41)$$

gdje je:

- $d\varepsilon/dt$  - brzina puzanja;
- $b$  - burgersov vektor, cm;
- $\rho$  - gustoća dislokacija, cm<sup>-2</sup>;
- $v$  - prosječna brzina kretanja (klizanja i penjanja) dislokacija, cm/s.

Ukoliko je gustoća dislokacija konstantna (visokotemperaturno puzanje) brzina puzanja ovisi o brzini kretanja dislokacija. Brzina  $v$  ovisi o nametnutom naprežanju  $\sigma$  i koeficijentu samodifuzije  $D_{vd}$  (difuzije vlastitih atoma), budući da se dislokacije penju pomicanjem vakancija:

$$v \approx \frac{b^2}{k \cdot T} \cdot \sigma \cdot D_{vd} \text{ [m/s]}, \quad (42)$$

gdje je:

- $b$  - burgersov vektor, m;
- $k$  - plinska konstanta, J/K;
- $T$  - apsolutna temperatura, K;
- $\sigma$  - naprežanje, N/m<sup>2</sup>;
- $D_{vd}$  - koeficijent vlastite difuzije, m<sup>2</sup>/s.

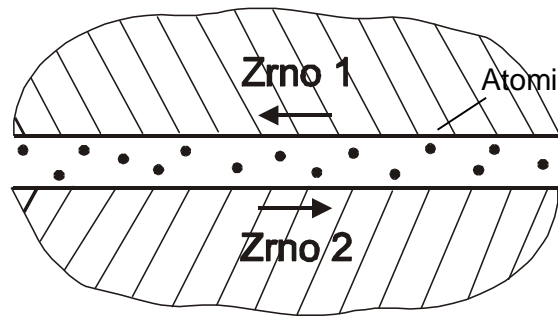
Dakle, osnovni je mehanizam za povećanje otpornosti puzanju smanjenje brzine kretanja dislokacija prisustvom zrna (veći broj sitnih čestica (precipitacijsko ovrženje)). Poželjno je da čestice budu tvrde nekoherentne fino rasprzene (čestice) ili koherentne velikog volumnog udjela sa visokom energijom stvaranja granica antifaza (superlegure).

## 6.2 Puzanje po granicama zrna

Za razliku prema puzanju materijala pri niskim temperaturama gdje granice zrna povoljno djeluju na mehaničku otpornost materijala budući da predstavljaju

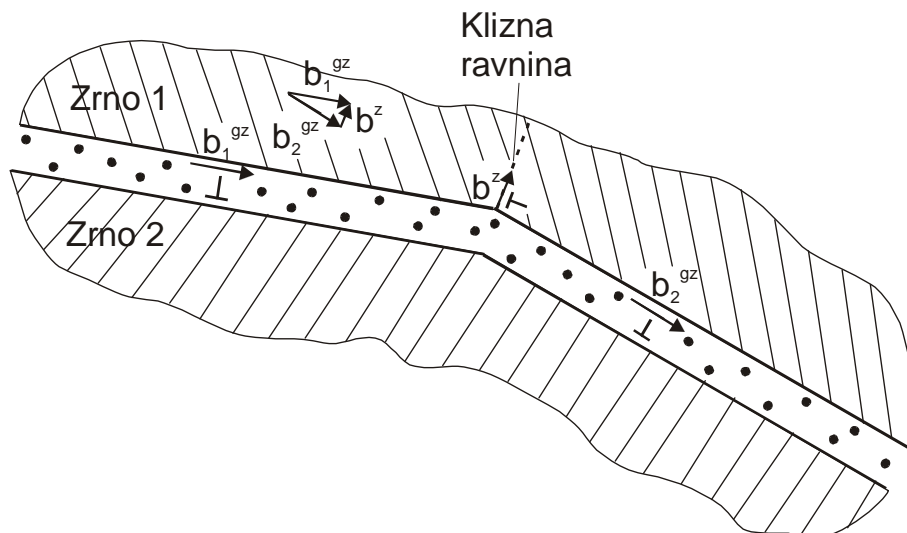
prepreku za gibanje dislokacija (o vrz nje  $\Delta Re_3$ ), s gledizta otpornosti puzanju granice zrna djeluju nepovoljno.

Da bi se razumjela mehani ka svojstva granica zrna potrebno je spoznati njihovu atomsku strukturu tj. polo0aj atoma na granicama. Kod ravnih granica zrna atomi oba zrna u kontaktu periodi ki su smjeztjeni uzdu0 granica, slika 18.



Slika 18. Klizanje uzdu0 ravnih granica zrna

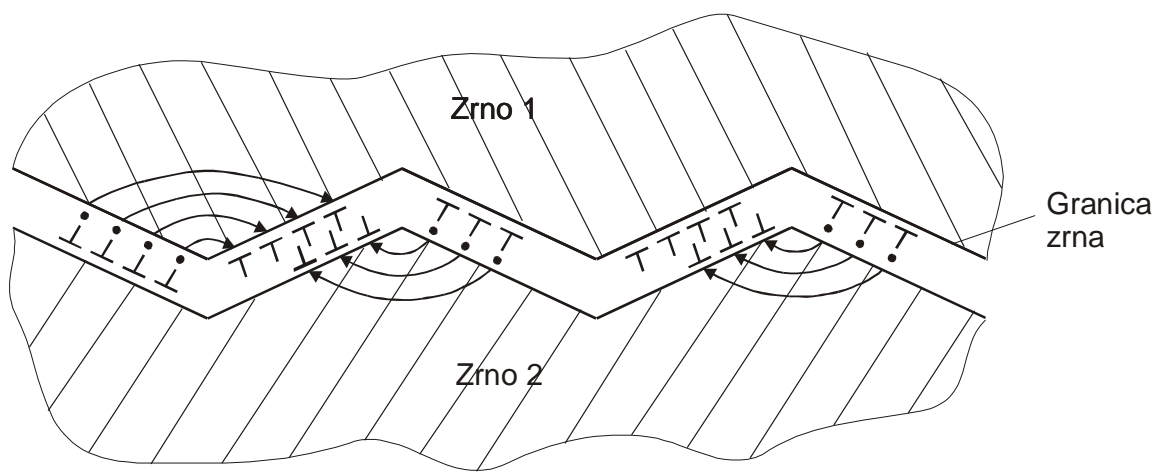
Na ravnim granicama zrna mogu e je konzervativno gibanje dislokacija odnosno klizanje jednog zrna prema drugom. No granice zrna vrlo su rijetko posve ravne ve su nepravilnog oblika (neravne, prisutne izbo ine) sastavljene od ravnih dijelova koji me usobno stoje pod nekim kutem, slika 19.



Slika 19. Klizanje uzdu0 neravnih granica zrna

Kod neravnih granica zrna situacija je drugačija. Dislokacija granice zrna  $b_1$  može svladati (prije i za vrijeme) samo ako dijelom pređe u zrno,  $b_2$ . Za to je potrebno određeno smižno naprezanje. Ukoliko ono nije dovoljno deformacija ostaje elastična, i klizanje uzduž granica zrna prestaje.

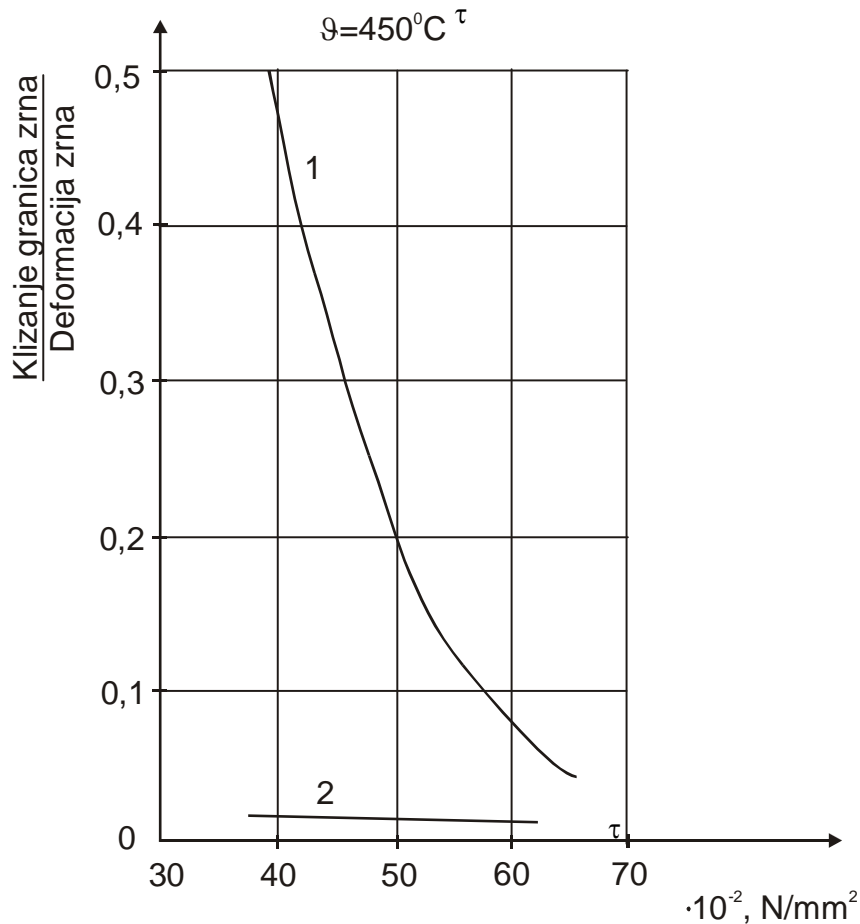
Ukoliko su mogu i difuzijski procesi, kojima pogoduje visoka temperatura u procesu puzanja, dolazi do premjeztanja atoma iz područja tla nog u područje vlačnog naprezanja, slika 20.



Slika 20. Difuzijsko premjeztanje atoma uzduž neravnih granica zrna

Na taj način bridne dislokacije zaobilaze kutna mjesta, klizanje (plastično deformiranje) po granici zrna se nastavlja. Kako je takva pojava klizanja po granicama zrna za puzanje nepovoljna materijali koji se primjenjuju na visokim temperaturama moraju imati što krupnije zrno sa što manjim brojem i duljinom granica zrna.

Nadalje, segregacija atoma legirnih elemenata i disperzija čestica uzduž granica zrna ograničavaju kretanje dislokacija i smanjuju puzanje po granicama. Atomi legirnih elemenata sa slabom topivošću u kristalnoj rešetki precipitiraju na granicama zrna i time smanjuju klizanje. Dijagram na slici 21 pokazuje kako dodatak od samo 0,05% oeljeza aluminiju, gotovo potpuno onemogućava klizanje po granicama zrna.



Slika 21. Ovisnost klizanja o smi nom naprezanju za isti aluminij (krivulja 1 - granica zrna bez estica) i aluminij legiran s 0,05% Oeljeza (krivulja 2 - granica zrna sa esticama)

Na osnovi provedenih razmatranja brzinu puzanja mogu e je smanjiti na sljede e na ine:

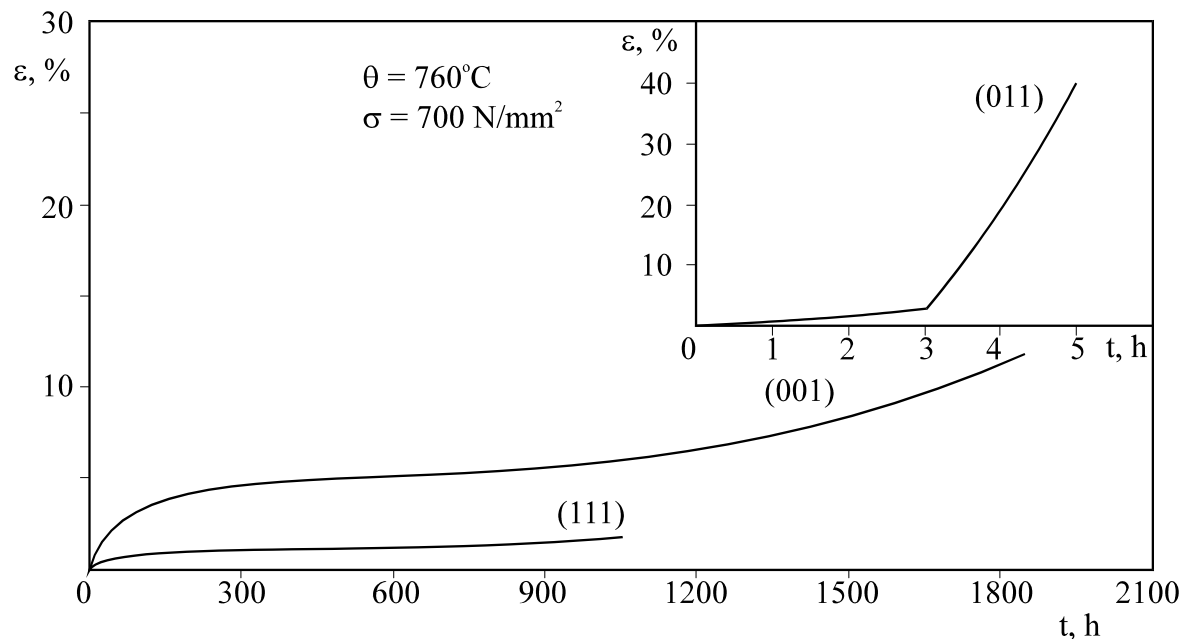
- Upotrebom materijala s kovalentnom vezom i visokom temperaturom talizta;
- Kristalnom strukturom materijala s malim koeficjentom samodifuzije (npr.  $\gamma$ -Fe umjesto  $\alpha$ -Fe);
- Legiranjem materijala onim legirnim elementima iji atomi prvenstveno segregiraju na mjestima penjenja dislokacija;
- Upotrebom materijala s velikim zrnima ili ak monokristalnog materijala (mali broj i duljina granica zrna). Orijentacija granica zrna u strukturi mora biti takva da su one podvrgnute minimalnom smi nom naprezanju;



- Koriztenjem materijala koji sadr0e estice jednoliko raspore ene u kristalima . estice koje se ne transformiraju i ne rastu na radnoj temperaturi;
- Koriztenjem materijala s esticama precipitiranim po granicama zrna. Precipitacija estica po granicama zrna mora biti u istoj mjeri kao i u zrnima, ako ne i ve a.

U tom smislu proizvedene su monokristalne turbinske lopatice od Ni-superlegure. Bitno je da orijentacija monokristala bude takva da je smjer kristalne rezetke najbolje otporan puzanju u smjeru najve ih vanjskih naprezanja. Na slici 22 prikazani su dijagrami puzanja za razli ite smjerove djelovanja konstantnog naprezanja za Ni-superleguru slijede eg kemijskog sastava:

9%Cr, 10%Co, 2%Ti, 5%Al, 12,5%W, 0,05%Zr, 0,015%B, 0,15%C - ostalo Ni.



Slika 22. Dijagrami puzanja za različite smjerove djelovanja naprezanja na monokristalnu epruvetu od Ni-superlegure

Najbolju otpornost puzanju legura pokazuje u smjeru kristalnih ravnina {001}, a daleko najslabiju za smjer kristalnih ravnina {110}, pa se koriztenjem takve anizotropije može znatno povisiti trajnost turbinskih lopatica.

Ispitivanje otpornosti puzanju uglavnom se provodi na jednakim epruvetama kao i kod statičkog vlačnog pokusa, a najčešće se koriste epruvete okruglog poprečnog presjeka s navojnim glavama. Moguća je također uporaba okruglih epruveta s prstenastim utorom (odnos unutarnjeg i vanjskog promjera od 0,6 do 0,8).

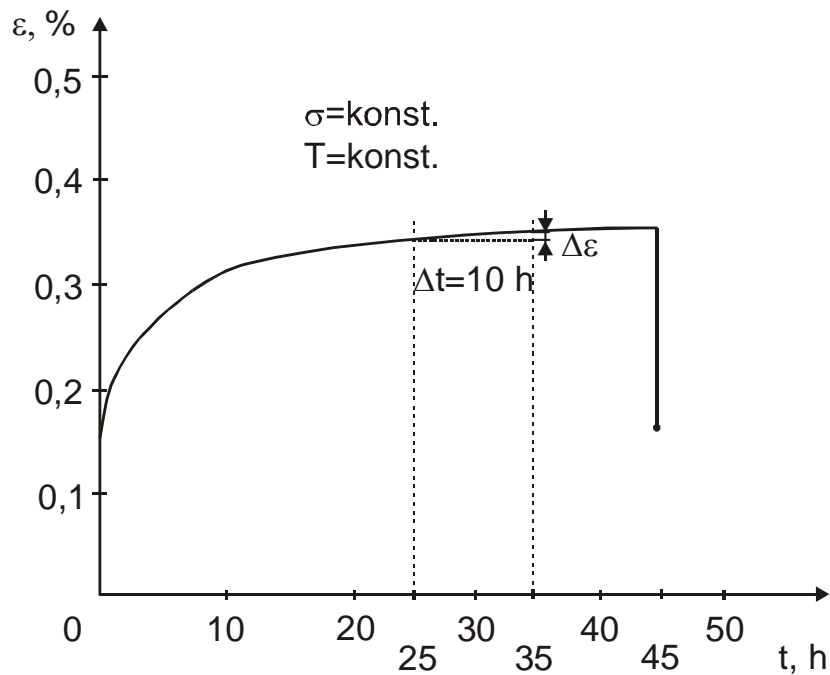
Ispitivanje se provodi direktnim opterećivanjem epruveta pri nekoj temperaturi i to ili s utezima ili sustavom poluga te registriranjem produljenja u zadanim vremenskim razmacima. Epruvete se tijekom ispitivanja nalaze u pećnici koja ima kojim se termostatom regulira temperatura ispitivanja. Uređaji za takvo dugotrajno opterećivanje epruveta konstantnim opterećenjem nazivaju se puzalicama. Ispitivanje otpornosti puzanja su kratkotrajna ukoliko je vrijeme ispitivanja  $t \leq 100$  h, a dugotrajna su ona čije je trajanje duže od 100 h.

Mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost materijala puzanju su :

*Granica puzanja*  $R_{p,t/g}$  predstavlja vlačno naprezanje koje pri temperaturi ispitivanja  $g$  nakon određenog trajanja ispitivanja " $t$ " ostavlja u epruveti trajnu deformaciju  $\varepsilon$ . Najčešće je ona: 0,1; 0,2; 0,5 ili 1%. Primjerice  $R_{p0,2/1000/500}$  predstavlja naprezanje koje je nakon 1000 h ispitivanja pri 500 °C trajno produljilo epruvetu za 0,2%.

*Statička izdržljivost*  $R_{m,t/g}$  je ono vlačno naprezanje koje pri temperaturi  $g$  nakon zadanog trajanja ispitivanja " $t$ " dovodi do loma epruvete. Npr.  $R_{m/100000/475}$  je naprezanje koje dovodi do loma epruvete nakon 100000 h ispitivanja pri 475 °C. Analogno statičkom vlačnom pokusu mehanička svojstva koja karakteriziraju deformabilnost materijala pri puzanju su istezljivost  $A_{t,g}$  odnosno kontrakcija  $Z_{t,g}$ . Navedena mehanička svojstva određuju se dugotrajnim ispitivanjima koja traju  $10^4$  ili  $10^5$  sati.  $10^4$  sati iznosi vize od jedne godine, a  $10^5$  sati vize od 11 godina.

Zbog dugotrajnosti primjenjuju se i kratkotrajna ispitivanja kojima je moguće odrediti granicu puzanja  $R_{dvm/g}$ . Granica puzanja predstavlja ono konstantno naprezanje koje između 25. i 35. sata ispitivanja izaziva brzinu puzanja  $\Delta\varepsilon/\Delta t = 10^{-3}$  %/h, a dodatno nakon rasterećenja trajnu deformaciju  $\varepsilon_{pl} < 0,2$  %, slika 23.



Slika 23. Kratkotrajno ispitivanje otpornosti puzanju

## 7. ZAOSTALA NAPREZANJA

Zaostala naprezanja su mikro i makro naprezanja prisutna u predmetu (izradku, strojnom dijelu) bez djelovanja vanjskih sila i momenata u tom trenutku, a nalaze se u mehaničkoj ravnoteži.

Spoznaja o veličini zaostalih naprezanja prisutnih u materijalu važna je budući da se tokom izradbe, te osobito uporabe, superponiraju s naprezanjima koja su rezultat djelovanja vanjskih sila ili momenata. To ponekad dovodi do plastične deformacije strojnih dijelova ili čak do pojave loma.

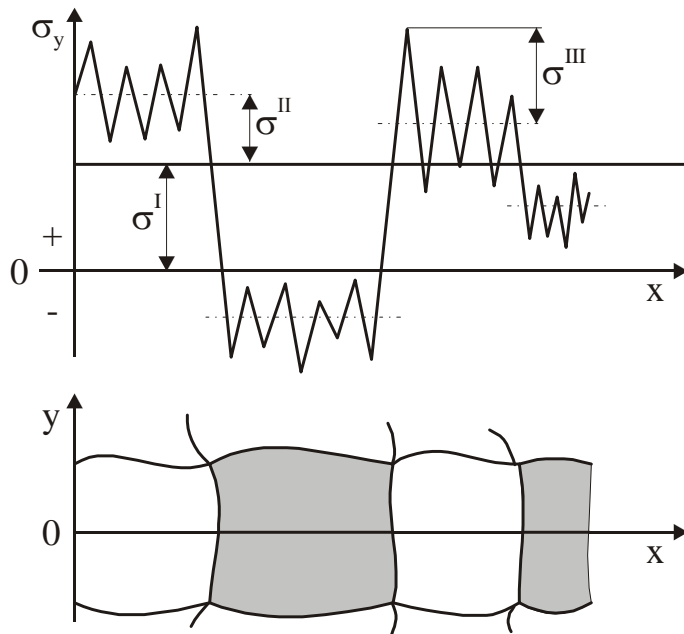
Zaostala naprezanja kao pojava uočena su još davno kod prirodnih materijala (kamen, drvo), a tek kasnije kod metalnih materijala, budući da se kod njih veći dio zaostalih naprezanja može odgraditi plastičnom deformacijom (izvitoperenjem) koja je često nevidljiva golim okom.

## 7.1 Podjela zaostalih napreznaja

Nakon prvotne podjele zaostalih napreznaja na mikro i mako zaostala napreznaja ustalila se podjela na zaostala napreznaja prvog, drugog i tre eg reda (vrste).

Zaostala napreznaja prisutna u nekom predmetu rezultat su superponiranja zaostalih napreznaja prvog, drugog i tre eg reda (slika 24):

$$\sigma = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (43)$$



$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \\ \sigma^I &= \frac{\int \sigma \cdot ds}{\int ds} \\ \sigma^{II} &= \frac{\int \sigma \cdot ds}{\int ds} - \sigma^I \\ \sigma^{III} &= \sigma - \sigma^I - \sigma^{II} \end{aligned}$$

Slika 24. Shematski prikaz sumiranja zaostalih napreznaja

Zaostala napreznaja prvog reda  $\sigma^I$  prisutna su u ve em podru ju predmeta, odnosno prote0u se preko ve eg broja kristalnih zrna. Pripadaju e sile odnosno momenti nalaze se u ravnote0i u itavom predmetu. Diranjem ravnote0e sila ili momenata nastaju makroskopske promjene dimenzija (izvitoperenje). Zaostala napreznaja prvog reda nazivaju se i makro zaostalim napreznajima.

$\sigma^{II}$  - zaostala napreznaja drugog reda imaju konstantan iznos unutar jednog ili nekoliko kristalnih zrna (slika 24). U ravnote0i se nalaze sile odnosno momenti manjeg broja susjednih zrna. Poreme ajem ravnote0e sila ili momenata mogu se pojaviti

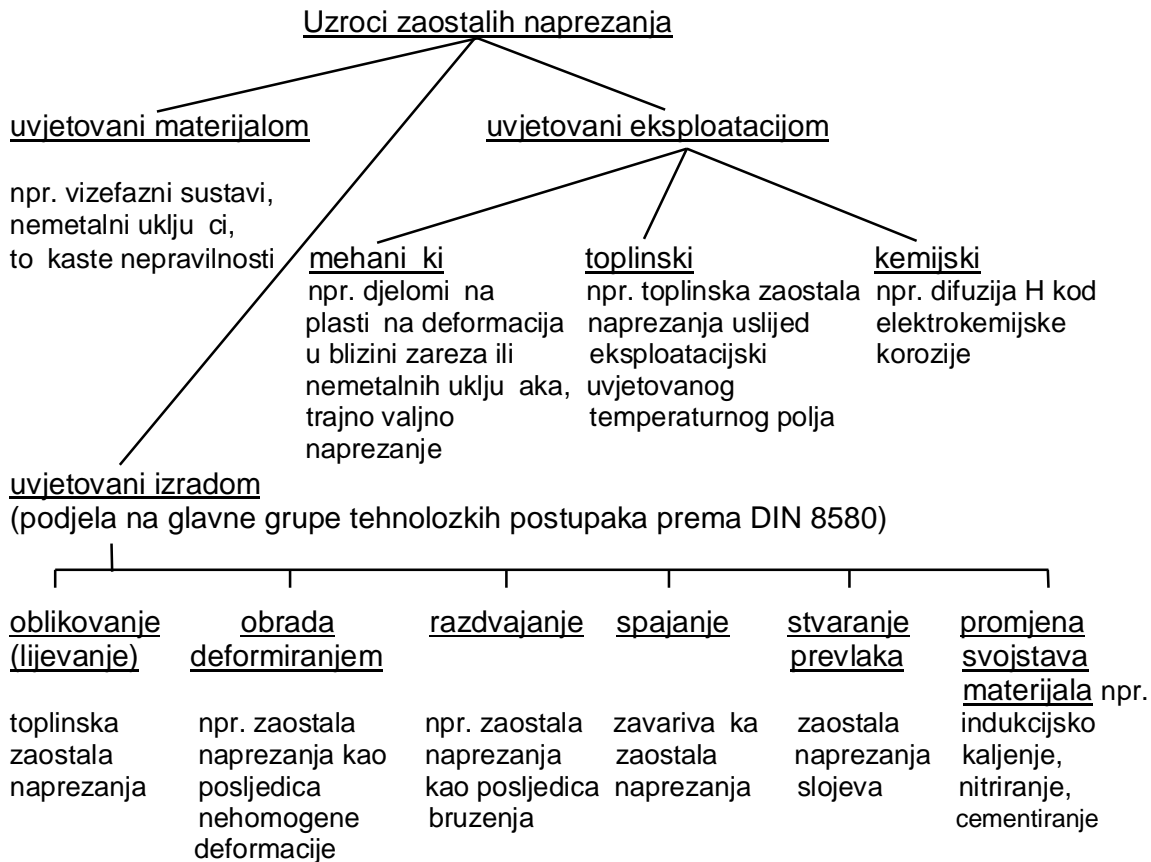
makroskopske promjene dimenzija. Zaostala naprezanja drugog reda pripadaju skupini mikro zaostalih naprezanja.

$\sigma'''$  - zaostala naprezanja trećeg reda razlikuju se već na nekoliko atomskih razmaka u kristalnoj rešetki, a odgovarajuće sile odnosno momenti nalaze se u ravnoteži samo unutar djela kristalnog zrna. Naružavanjem ravnoteže sila i momenata u ovom slučaju ne mogu nastupiti makroskopske promjene dimenzija predmeta. Zaostala naprezanja trećeg reda nazivaju se i mikro zaostalim naprezanjima.

## 7.2 Uzroci nastanka zaostalih naprezanja

Zaostala naprezanja prisutna u strojnom dijelu ili dijelu konstrukcije unesena su samim materijalom, tokom izrade ili su nastala tokom uporabe (eksploatacije).

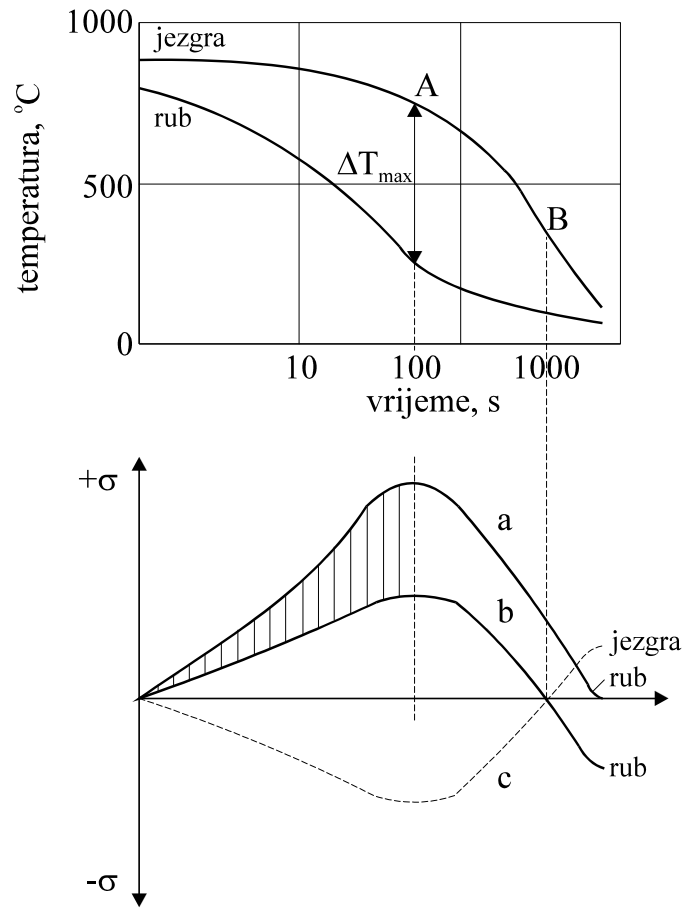
Zaostala naprezanja uvjetovana materijalom su mikro zaostala naprezanja (pretežno  $\sigma'''$ ), dok su zaostala naprezanja nastala tokom izradbe ili uporabe gotovo uvijek makro zaostala naprezanja  $\sigma'$  (eventualno  $\sigma''$ ). Uzroci pojave zaostalih naprezanja prikazani su shematski na slici 25 .



Slika 25. Shematski prikaz uzroka zaostalih naprezanja

Pored uzroka pojave zaostalih naprezanja navedeni su i primjeri za pojedine slu ajeve.

Za primjer nastanka zaostalih naprezanja prvog reda ( $\sigma$ ) naj ez e se navode toplinska zaostala naprezanja (lijevanje, toplinska obrada). Razmotrit e se na primjeru hla enja (gazenja) eli nog valjka  $\varnothing 100$  mm. Ovaj valjak gasi se u vodi s temperature  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Rose-ov model). Na slici 26 u dijagramu temperatura - vrijeme prikazane su krivulje hla enja ruba i jezgre eli nog valjka.



Slika 26. Krivulje hlađenja i toplinska naprezanja za čelični valjak hlađen u vodi s 850 °C

Kao što dijagram pokazuje rub se ohlađuje znatno brže od jezgre, te je u toj točki A temperaturna razlika najveća i iznosi  $\approx 600$  °C. Zbog temperaturnog polja (razlike temperature ruba i jezgre) u valjku nastupaju toplinska naprezanja :

$$\sigma = E \cdot \beta \cdot \Delta T , \quad (44)$$

gdje je:

$E$  - modul elastičnosti;

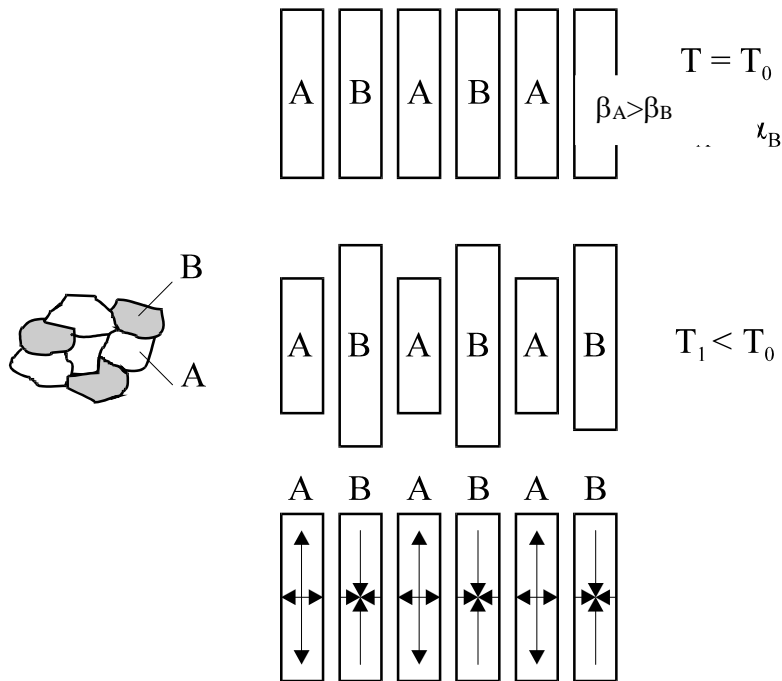
$\beta$  - koeficijent toplinske dilatacije;

$\Delta T$  - razlika u temperaturi.

Stežanje ruba (primjereno sniženoj temperaturi), onemogućava znatno toplija jezgra, što dovodi do pojave vlačnih naprezanja u rubnoj zoni i tlačnih naprezanja u jezgri valjka budući da oba naprezanja trebaju biti u ravnoteži (donji dijagram na slici 26). Naznačena su samo uzdužna (longitudinalna) naprezanja. Cirkularna naprezanja (tangencijalna, obodna) su istog reda veličine dok su radijalna zanemarivo mala. U trenutku kada se temperatura jezgre i ruba izjednače (sl. 26) toplinska naprezanja jednaka su nuli te nema nikakvih zaostalih naprezanja (krivulja *a* na slici 26). To vrijedi samo u slučaju kada toplinska naprezanja ne dostižu vrijednost granice razvlačenja (tečenja)  $R_e$ . Stoga krivulja *a* vrijedi za neki materijal s relativno visokom granicom razvlačenja. Budući da se s povišenjem temperature granica razvlačenja elastično smanjuje (pri 600 °C  $R_e$  iznosi približno samo trećinu vrijednosti granice razvlačenja na sobnoj temperaturi), toplinska naprezanja dostižu vrijednost granice razvlačenja i ne mogu biti veća od njenog iznosa jer nastupa plastična deformacija odnosno tečenje materijala (zrafičano područje između krivulja *a* i *b*). Krivulje *b* i *c* stoga vrijede za neki materijal s nižom vrijednošću granice razvlačenja pa toplinska naprezanja lako dostižu njen iznos. Nakon toga dolazi do stežanja jezgre (krivulja *c*) i smanjenja vlačnih naprezanja u rubnoj zoni (krivulja *b*) pa su u točki B toplinska naprezanja ruba i jezgre jednaka nuli, a uz daljnje odvođenje topline dolazi do pojave tlačnih zaostalih naprezanja na rubu i vlačnih zaostalih naprezanja u jezgri. Veličina zaostalih naprezanja je to veća što je veća temperaturna razlika u točki A, što znači da se s povećanjem masivnosti komada odnosno intenziteta ohlađivanja mogu očekivati veća zaostala naprezanja. Nadalje materijal s višom granicom razvlačenja kod povišenih temperatura ima i manja zaostala toplinska naprezanja pri gaženju.

Zaostala naprezanja drugog reda ( $\sigma''$ ) nastaju primjerice kod vizefaznih materijala koji posjeduju strukturne faze s različitim koeficijentima toplinske dilatacije. Slika 27 prikazuje shematski jedan dvofazni sustav gdje faza A ima veći koeficijent toplinskog istežanja od faze B.





Slika 27. Pojava zaostalih napreznja kao posljedica razli itih koeficijenata toplinske dilatacije

Pretpostavimo li da na nekoj temperaturi  $T_0$  nisu prisutna nikakva napreznja , hla enjem na temperaturu  $T_1$  faza A ima ve u tendenciju smanjenja volumena (skupljanja) od faze B. Budu i da su obje faze vrsto spojene granicama faza u fazi A javljaju se (i eventualno zaostaju) vla na napreznja, a u fazi B tla na napreznja u istom iznosu.

Zaostala napreznja tre eg reda ( $\sigma'''$ ) prisutna su u svakom realnom materijalu koji nema idealnu mikrostrukturu. Kod materijala s kristalnom strukturom (svi metalni materijali, neke keramike i polimeri) prisutne su kristalne nepravilnosti, tj. svi atomi nisu uredno smjeztjeni na svojim polo0ajima u kristalnoj rezetki ve su prisutne to kaste, linijske i povrzinske nepravilnosti, odnosno praznine, uklju inski/zamjenbeni atomi, bridne i vij ane dislokacije te malokutne i velikokutne granice zrna. Sve navedene nepravilnosti uzrokuju prisustvo zaostalih napreznja tre eg reda.

### 7.3 Mjerenje zaostalih napreznja

Usporedo sa spoznajom o zaostalim napreznjima razvile su se i najrazli itije metode za njihovo mjerenje. Metode za mjerenje zaostalih napreznja uglavnom se dijele na razorne, polurazorne i nerazorne metode.

Grupu razornih i polurazornih metoda ine razli iti isto mehani ki ili mehani ko-elektri ki postupci. Ovim metodama mogu e je samo mjerenje zaostalih napreznja 1. reda, a nedostatak je tako er da se elementi konstrukcije ili strojeva ispitani ovim metodama ne mogu dalje koristiti.

Postupci mjerenja zaostalih napreznja rengenskom difrakcijom, ultrazvukom i magnetskim metodama spadaju u skupinu nerazornih metoda. Osim zto nimalo ne ozte uju ispitane dijelove s nekim od ovih postupaka mogu e je izmjeriti i mikro zaostala napreznja ( $\sigma'$  i  $\sigma''$ ).

U tablici 5 navedeni su razli iti postupci za mjerenje zaostalih napreznja. Za svaki postupak naveden je stupanj razvijenosti, stupanj ulaganja u istra0ivanje i razvoj te u estalost primjene pojedine metode (stanje u bivznoj Zapadnoj Njema koj 80-tih godina).

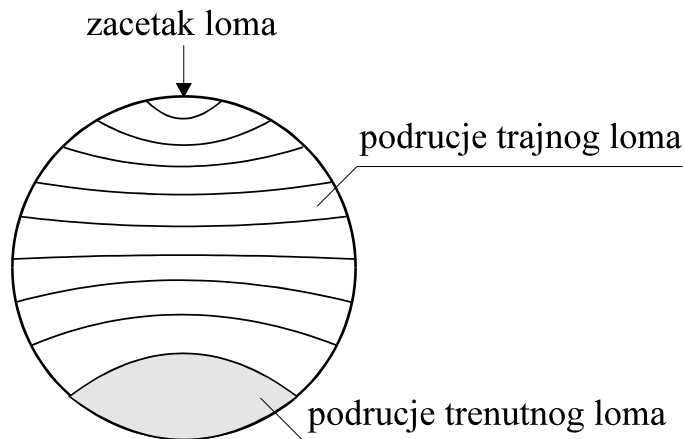
Tablica 5. U estalost primjene i stupanj razvijenosti pojedinih metoda za mjerenje zaostalih napreznja

		Stupanj razvijenosti postupka	Istra0ivanje i razvoj	Kontrola kvalitete u proizvodnji
Mehani ko-elektri ki razorni postupci	Razdvajanje, Izbuzivanje, Tokarenje	90	5	10
	Greben, Kru0ni Olijeb (mehani ki)	90	5	5
	Kru0ni Olijeb (DMS)	80	10	20
	Buzenje provrta	70	10	20
	Ostali postupci	50		5
Nerazorni postupci	Rengen	70	35	30
	Ultrazvuk	30	20	5
	Magnetski	30	15	5
			100	100

## 8. UMOR MATERIJALA

esto dijelovi strojeva i konstrukcija nisu napregnuti statičkim naprezanjem već promjenjivim (dinamičkim) naprezanjem. Unatoč tome zbog je iznos takvog dinamičkog naprezanja niži od granice razvlačenja, nakon nekog vremena može doći do pojave loma ukoliko je takvo naprezanje promjenjivog intenziteta i dugotrajno. Zbog je dimenzioniranje dinamički opterećenih dijelova strojeva i konstrukcija korištenjem podataka o mehaničkim svojstvima utvrđenim statičkim ispitivanjem nedovoljno točno ili sasvim netočno. Posljedica toga je pojava *umora materijala* odnosno postupnog razaranja materijala zbog dugotrajnog djelovanja promjenjivog (dinamičkog) naprezanja kojeg je rezultat prijelom strojnog dijela. Pojava umora materijala poznata je već od sredine 19. stoljeća, a opisao ju je Wöhler.

Karakteristična prijelomna površina od umora shematski je predstavljena na slici 28.

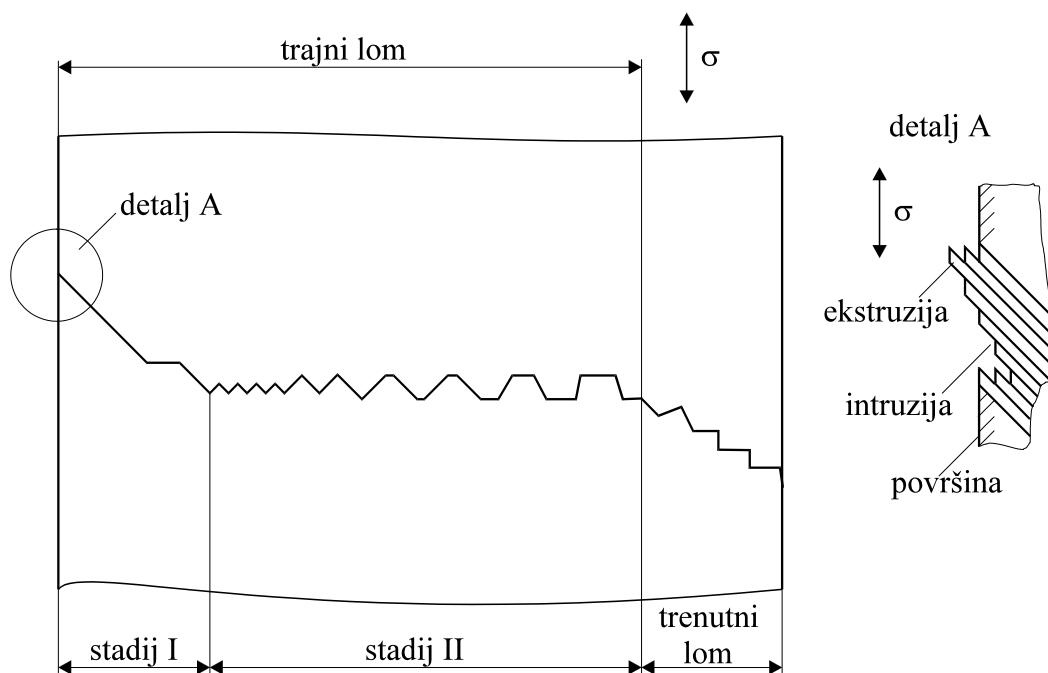


Slika 28: Shematski prikaz prijelomne površine kao posljedice umora materijala

Karakteristika loma od umora materijala je da nema pojave vidljive plastične deformacije čak i ako se radi o čvrstom materijalu. Prijelomna površina sastoji se od zglavljene svjetle površine s brazdama napredovanja pukotine. Brazde podsjećaju na godove drveta. Taj dio prijelomne površine nastajao je dulje vremena pa se i naziva područjem *trajnog loma*. Drugi dio prijelomne površine - područje *trenutnog loma* - je hrapav, zagasit i zrnat, a nastao je u trenutku kada je nametnuto naprezanje zbog smanjenja nosive plohe naraslo na iznos jednak vlačnoj vrstoći materijala. Odnos

povrzina trajnog i trenutnog loma te njihov razmjeztaj na prijelomnoj povrzini ovisi o vrsti i intenzitetu dinami kog naprezanja te intenzitetu koncentracije naprezanja.

Za izradak ili epruvetu idealno glatke povrzine, bez koncentratora naprezanja o kojima e biti govora kasnije, klica loma je posljedica lokalne nehomogene deformacije uslijed koje dolazi do formiranja plo astih tvorevina koje proklizavanjem tvore izbo ine (ekstruzije) i udubine (intruzije) na povrzini (slika 29). Takve neravnine na povrzini, a osobito udubine predstavljaju koncentratore naprezanja odnosno potencijalna mjesta stvaranja inicijalne pukotine. Inicijalna pukotina nastala na povrzini ziri se kod materijala s kristalnom strukturom pod kutem od  $\approx 45^\circ$  u odnosu na normalno naprezanje tj. u smjeru maksimalnog smi nog naprezanja ( stadij I, slika 29.) Takav na in zirenja pukotine prisutan je samo kroz nekoliko kristalnih zrna. Brzina zirenja pukotine u ovom stadiju ovisi o okolnom mediju. Pri ispitivanju na zraku brzina iznosi  $\approx 10^{-7}$  mm po ciklusu naprezanja. Pri promjenjivom naprezanju velike amplitude ili u prisutnosti koncentratora naprezanja konstrukcijskog ili tehnolozkog porijekla stadij I se uop e ne pojavljuje.



Slika 29. Shematski prikaz nastanka loma od umora materijala

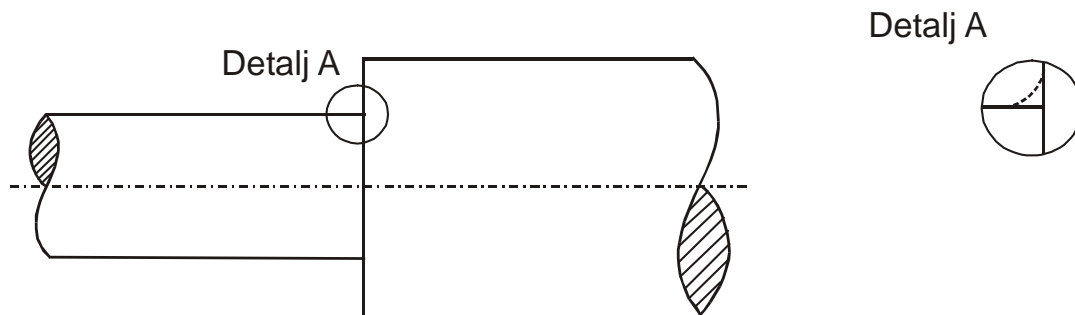
U stadiju II pukotina se ziri transkristalno, naj ez e okomito na smjer djelovanja normalnog naprezanja. U tom stadiju zirenja pukotine nastaju karakteristi ne brazde kao posljedica stalnog izmjenjivanja "zatupljenja" i "oztrenja" vrha pukotine. Razmak

izme u brazdi je pokazatelj brzine zirenja pukotine. Smanjenjem nosivog presjeka naprezanje stalno raste, brzina zirenja pukotine se poveća pa razmak izme u brazdi postaje sve veći. Kada se ploština presjeka smanji toliko da naprezanje u nosivom dijelu presjeka dostigne veličinu vlačne vrstene materijala nastupa trenutni lom. Površina trenutnog loma je puno hrapavija od površine trajnog loma.

Ovo je bilo objašnjenje nastanka loma od umora za izradak idealne strukture bez prisutnosti različitih koncentratora naprezanja. Koncentratori naprezanja mogu biti:

1. konstrukcijskog;
2. tehnološkog i
3. eksploatacijskog porijekla.

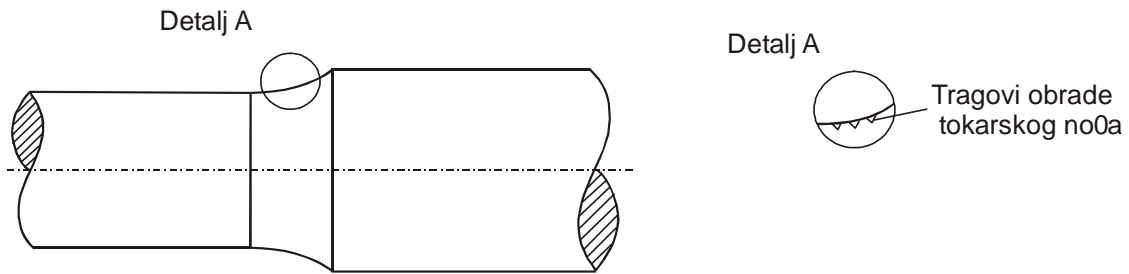
Konstrukcijske koncentratore naprezanja predstavljaju mjesta s nedovoljno velikim radijusom zaobljenosti zto se često susreće na osovinama i vratilima promjenjivog presjeka, slika 30.



Slika 30. Konstrukcijski koncentator naprezanja uslijed neodgovarajućeg prelaznog radijusa

Konstrukcijski koncentratore naprezanja su također i utori za klin na vratilu, navoji na vijcima itd.

Tehnološki koncentratore naprezanja mogu nastati već u postupku lijevanja (pore, lunke, uključujući i sl.), toplom oblikovanju (pukotine nastale kao posljedica izlucivanja), u postupku toplinske obrade (pukotine kao posljedica provedene toplinske obrade) ili se mogu raditi o različitim utovima nastalim tijekom obrade odvajanjem čestica (tokarenje, glodanje), slika 31.

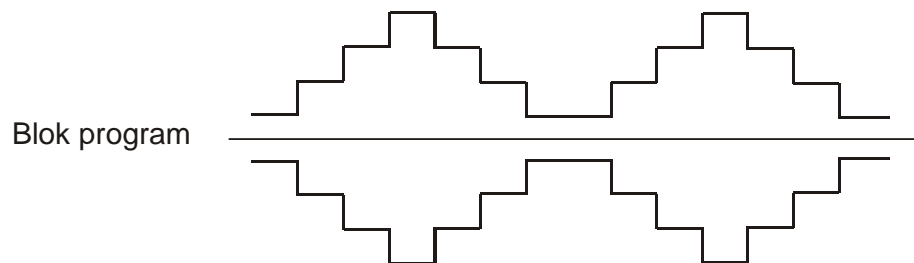


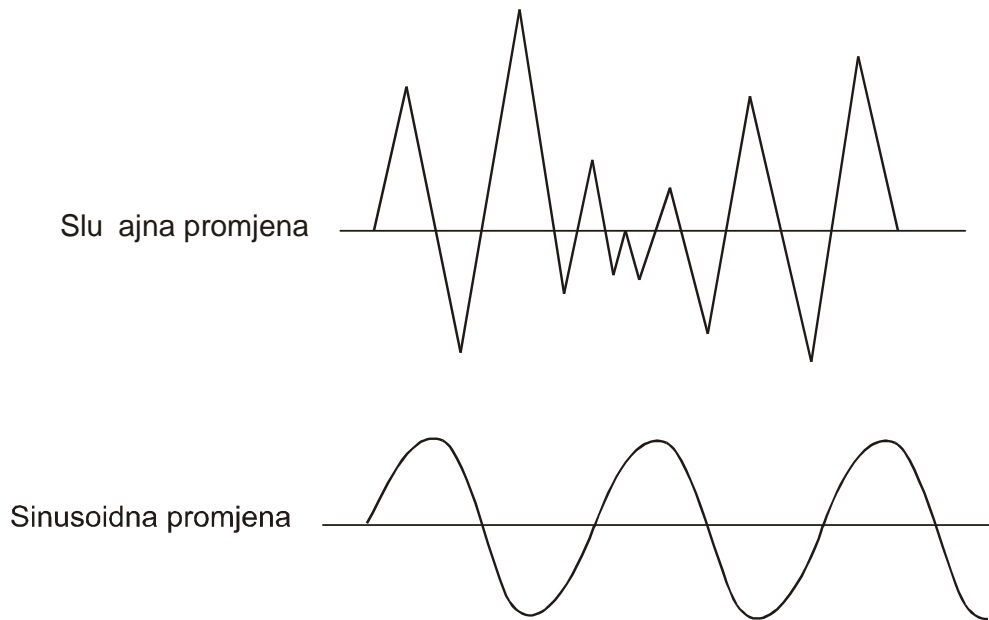
Slika 31. Tehnološki koncentator naprezanja kao posljedica neravne površine nakon tokarenja

Eksploatacijski koncentatori naprezanja nastaju tijekom uporabe kao posljedica udarca pri montaži/demontaži te uslijed pojave napetostne korozije, vodikove bolesti i sl.

Mehaničko svojstvo koje karakterizira otpornost materijala prema pojavi umora materijala naziva se *dinamička izdržljivost*. Svrha ispitivanja dinamičke izdržljivosti je utvrđivanje ponašanja materijala ili dijelova strojeva odnosno konstrukcija u uvjetima dugotrajnog djelovanja promjenjivog (dinamičkog) naprezanja. Analogno statičkom naprezanju i dinamičko naprezanje može biti vlačno - tlačno, savojno, uvojno (torzijsko).

Ispituje se uređajima koji omogućuju promjenljivo ("titrajno") opterećivanje epruveta ili strojnih dijelova a nazivaju se pulzatori ili umaralice. Umaralice rade hidraulički, servohidraulički ili na principu elektromagnetske rezonancije. Moderne umaralice omogućuju različite naime promjenjivog naprezanja, slika 32:



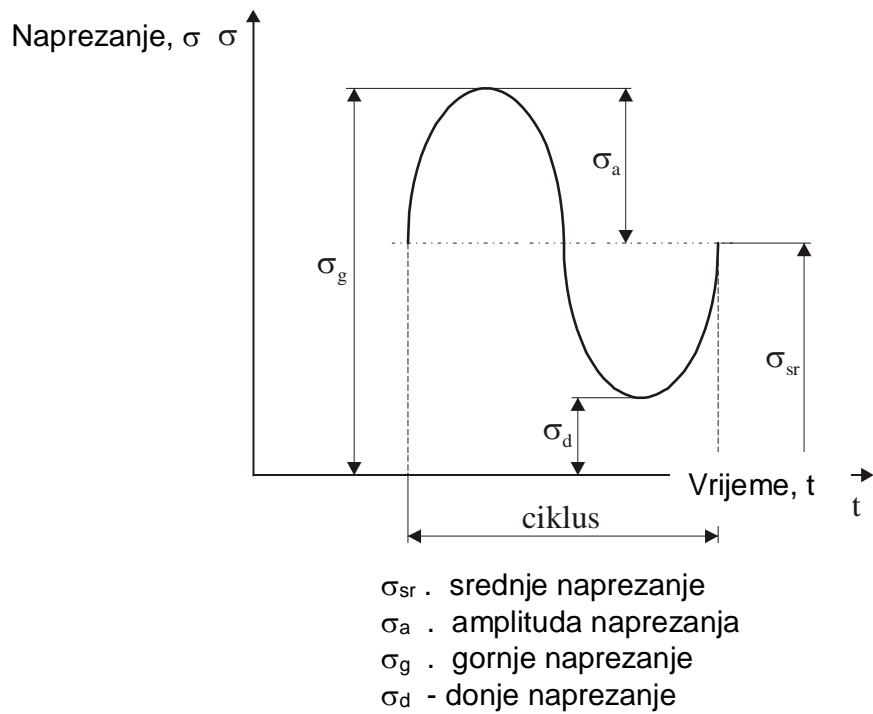


Slika 32. Različiti oblici promjenjivog naprezanja

Pri ispitivanju dinamičke izdržljivosti nastoje se simulirati takvi uvjeti dinamičkog (promjenjivog) naprezanja kakvi vladaju u eksploataciji. To se osobito odnosi na ispitivanje dinamičke izdržljivosti strojnih elemenata ili celovitih sklopova pa i konstrukcija. U tom slučaju dobiva se podatak o dinamičkoj izdržljivosti strojnog dijela, gdje su za razliku od ispitnog uzorka prisutni i mogući koncentratori naprezanja. Također ispitivanje se mora provoditi u okolnim uvjetima zto sličnijim onima u eksploataciji (visoka odnosno niska temperatura, vlažni zrak, korozivni medij i sl.)

Ukoliko je frekvencija promjene dinamičkog opterećenja " $f$ " manja od 5 Hz radi se o niskofrekventnom ispitivanju. Ispitivanje s frekvencijom  $5 \text{ Hz} < f < 30 \text{ Hz}$  je srednjefrekventno, a ukoliko je frekvencija " $f$ " veća od 30 Hz govori se o visokofrekventnom ispitivanju.

Kod ispitivanja dinamičke izdržljivosti (pogotovo na ispitnim uzorcima) najčešće se primjenjuje promjenjivo naprezanje sinusoidnog karaktera, slika 33.



Slika 33 : Parametri sinusoidnog promjenjivog naprezanja

Srednje naprezanje predstavlja aritmetičku sredinu gornjeg i donjeg naprezanja:

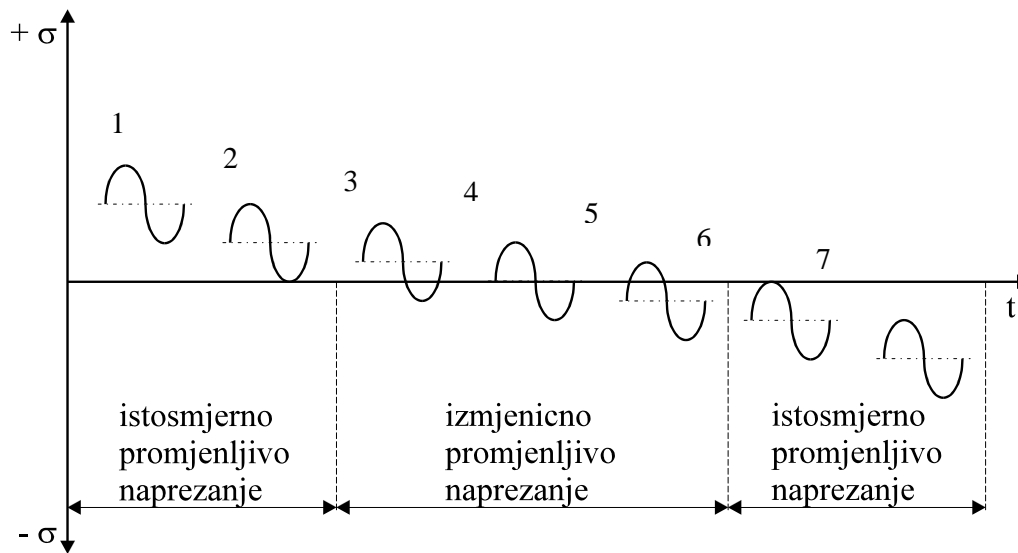
$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2} \quad (45)$$

Amplituda naprezanja je polovica razlike između gornjeg i donjeg naprezanja:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2} \quad (46)$$

Ovisno o tome odvijaju li se promjenjivo naprezanje samo u području tlaka odnosno samo u području vlaka ili pak naizmjenice zadire u oba područja govori se o istosmjernom odnosno izmjenjivom promjenjivom naprezanju, slika 34.





Slika 34 : Razliiti tipovi sinusoidnog promjenjivog naprezanja

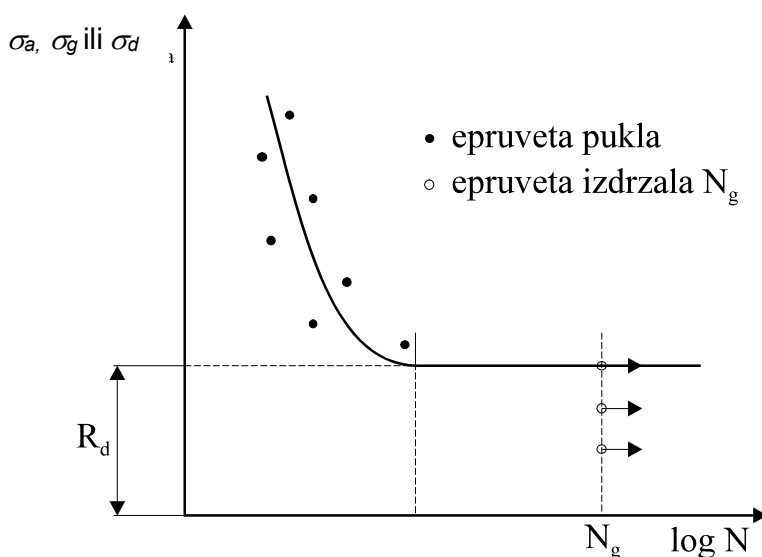
1. Obi no vla no istosmjerno promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} > \sigma_a$ ;
2. Po etno vla no istosmjerno promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} = \sigma_a$ ;
3. Nesimetri no izmjeni no promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} > 0$ ,  $\sigma_{sr} < \sigma_a$ ;
4. Simetri no izmjeni no promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} = 0$ ,  $\sigma_a = \sigma_g$ ;
5. Nesimetri no izmjeni no promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} < 0$ ,  $\sigma_{sr} < \sigma_a$ ;
6. Po etno tla no istosmjerno promjenjivo naprezanje  $\sigma_{sr} = \sigma_a$ ;
7. Obi no tla no istosmjerno promjenjivo naprezanje  $|\sigma_{sr}| > \sigma_a$ .

Za utvrivanje dinami ke izdrOljivosti izabire se jedan od tipova promjenljivog naprezanja, te se provodi tzv. Wöhlerov pokus. Naj ez e se dinami ka izdrOljivost odre uje za tipove promjenljivog naprezanja 2, 4 ili 6. Za svaki nivo promjenljivog naprezanja, iskazan amplitudom naprezanja  $\sigma_a$  (tip 4), gornjim napreznjem  $\sigma_g$  (tip 2) ili donjim napreznjem  $\sigma_d$  (tip 6) ispituje se 6 do 10 istovrsnih epruveta. Posebnu paOnju treba pokloniti izradi i zavrznoj obradi epruveta s obzirom da je jak utjecaj razli itih koncentratora naprezanja na vrijednost dinami ke izdrOljivosti.

Oblik i dimenzije epruveta ovise o na inu prihvata odnosno o na inu optere ivanja na pulzatorima. Za vla no - tla na ispitivanja epruvete su, ovisno o obliku poluproizvoda, okruglog ili etvrtastog popre nog presjeka. Za obi no savijanje rabe se

epruvete četvrtastog poprečnog presjeka, a za rotacijsko savijanje epruvete okruglog poprečnog presjeka. Epruvete za ispitivanje uvijanjem su okruglog poprečnog presjeka.

Rezultati Wöhlerova pokusa ucrtavaju se u Wöhlerov dijagram, u koji se za pojedine vrijednosti dinamičkog naprezanja unose podaci o izdržanom broju ciklusa do loma epruvete, slika 35.



Slika 35 : Wöhlerov dijagram

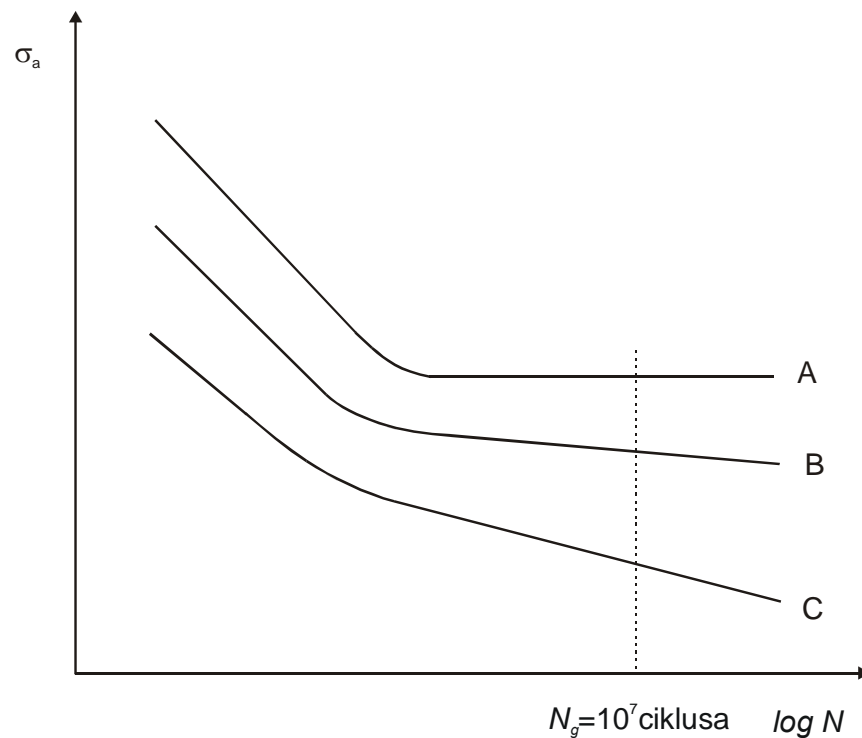
Najveće dinamičko (promjenjivo) naprezanje ( $\sigma_a$ ,  $\sigma_g$  ili  $\sigma_d$ ) koje epruvete izdrže kroz praktički beskonačan broj ciklusa bez pojave loma ili makropukotina naziva se *dinamička izdržljivost* -  $R_d$ ,  $N/mm^2$ . Kako je  $R_d$  beskonačan broj ciklusa idealan pojam tj. svako ispitivanje ima svoje ograničeno trajanje utvrđuje se granični broj ciklusa  $N_g$ . Kod metalnih materijala a posebno kod konstrukcijskih elika, Wöhlerova krivulja se asimptotski približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti, dok se kod polimernih materijala Wöhlerova krivulja približava apscisi pa se ne može pouzdano utvrditi dinamička izdržljivost.

Uobičajene vrijednosti graničnog broja ciklusa  $N_g$  za metalne materijale jesu sljedeće :

- za elik :  $N_g=10^7$  ciklusa;
- za bakar i bakrene legure :  $N_g=5 \cdot 10^7$  ciklusa;
- za lake metale i njihove legure :  $N_g=10^8$  ciklusa.

Grani ni broj ciklusa ne ovisi samo o vrsti materijala već i o njegovoj namjeni. Rasipanja rezultata kod ispitivanja dinamičke izdržljivosti vrlo su velika. Moguće je da se za jednaku razinu napreznja brojevi ciklusa do loma epruvete odnose čak kao 1:10, pa se za pouzdano utvrđivanje dinamičke izdržljivosti za svaki nivoa napreznja ispituje više i broj epruveta (6 do 10) uz statističku obradu rezultata ispitivanja.

Nadalje radi eliminacije utjecaja tehnoloških koncentatora napreznja epruvete je nakon bruženja potrebno i polirati. Također, značajan je utjecaj i korozije na vrijednost dinamičke izdržljivosti, slika 36.

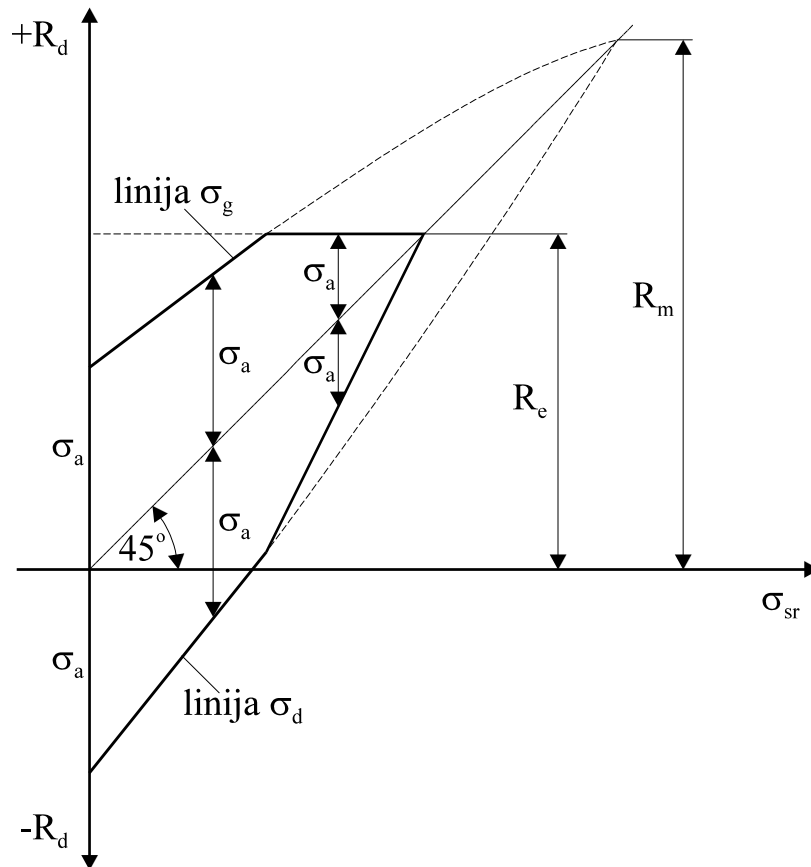


Slika 36. Utjecaj korozije materijala na dinamičku izdržljivost

- A . polirana površina
- B . korodirana površina
- C . interkristalna korozija

Dijagram na slici 36 vrijedi za konstrukcijski čelik. U slučaju prisustva interkristalne korozije epruvete pucaju i kod vrlo velikog broja ciklusa pri relativno maloj amplitudi napreznja pa ne postoji izražena dinamička izdržljivost (krivulja C asimptotski se približava nuli).

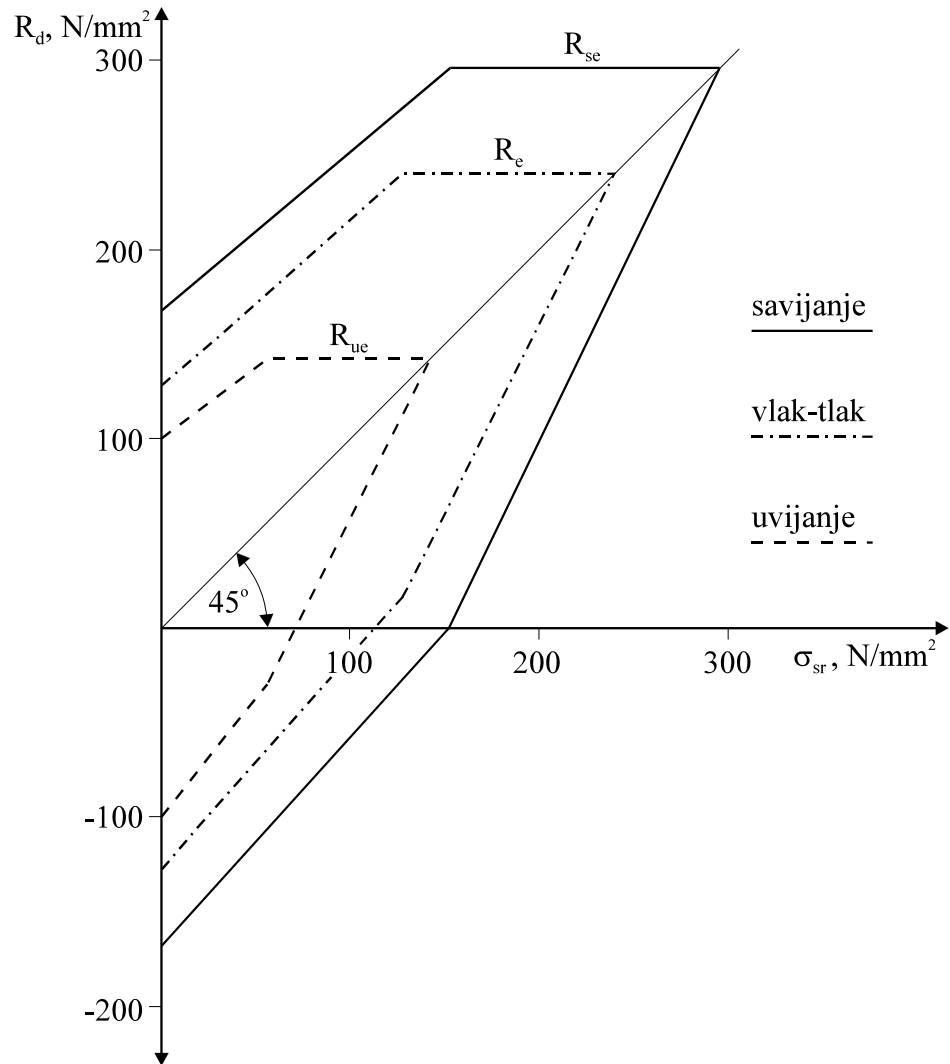
Wöhlerov dijagram daje podatak o iznosu dinami ke izdr0ljivosti nekog materijala samo za jedan tip promjenjivog naprezanja. Za konstruktore je esto potreban podatak o iznosu dinami ke izdr0ljivosti nekog materijala za razli ite tipove promjenjivog naprezanja. Takve podatke daje *Smithov dijagram*, slika 37.



Slika 37. Smithov dijagram

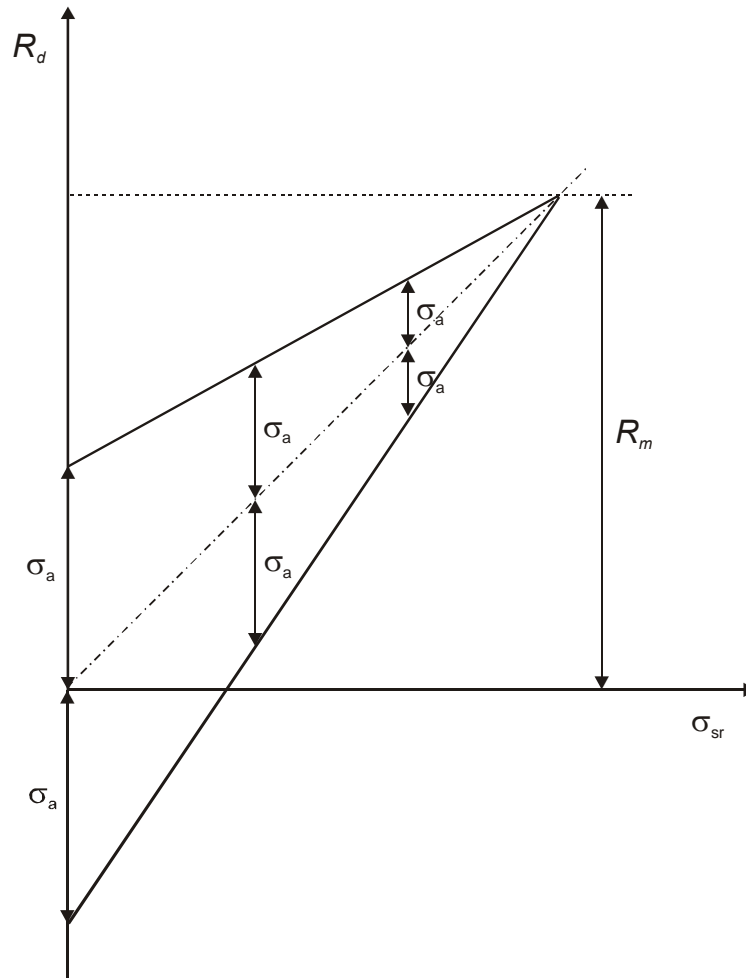
U Smithovom dijagramu je prikazana ovisnost dinami ke izdr0ljivosti  $R_d$  o srednjem naprezanju  $\sigma_{sr}$ . S gornje strane dijagrama podru je dinami ke izdr0ljivosti ograni eno je linijom gornjih naprezanja  $\sigma_g$  te s granicom razvla enja  $R_e$ , a s donje strane s linijom donjih naprezanja  $\sigma_d$ . Tako se iz Smithovog dijagrama dobiva podatak o veli ini dozvoljene amplitude naprezanja za odre ene vrijednosti  $\sigma_{sr}$ . S pove anjem srednjeg naprezanja  $\sigma_{sr}$  dozvoljena amplituda naprezanja  $\sigma_a$  se smanjuje. Za grani ni slu aj  $\sigma_{sr} = R_e$  dozvoljena amplituda je jednaka nitzici  $\sigma_a = 0$ ! Smithov dijagram na slici 37 daje podatke o dinami koj izdr0ljivosti nekog materijala za vlna no-tla no promjenjivo

naprezanje. Dinami ka izdr0ljivost nekog materijala mo0e se naravno ispitivati i u uvjetima ostalih na ina optere ivanja kao zto su na primjer savojno ili uvojno promjenjivo optere enje. Smithov dijagram na slici 38 daje podatke o dinami koj izdr0ljivosti op eg konstrukcijskog elika 0361 za razli ite na ine optere ivanja.



Slika 38. Smithov dijagram za vlakno-tlačno, savojno i uvojno optere ivanje elika 0361

Za krhke materijale (sivi lijev) Smithov dijagram izgleda druga ije, slika 39.



Slika 39. Smithov dijagram za sivi lijev

Povizenje dinami ke izdr0ljivosti mogu e je ostvariti svim mehanizmima o vrz avanja:  $\Delta Re_1$ ,  $\Delta Re_2$ ,  $\Delta Re_3$ ,  $\Delta Re_4$ .

Dodatno treba voditi ra una o isto i materijala ( elika) budu i da razli iti uklju ci, izlu evine i sl. predstavljaju potencijalne koncentatore naprezanja.

## 9. MEHANIKA LOMA

Mehanika loma bavi se proučavanjem nastanka i napredovanja pukotine u krutim tijelima.

Termin *mehanika loma* ima dvostruki smisao. U uoem smislu ona se odnosi na istraživanje uvjeta razvoja pukotine. U zirem smislu mehanika loma obuhvaća i dio mehanike otpornosti materijala koja se odnosi na završnu fazu procesa deformiranja materijala pod djelovanjem opterećenja. Zbog toga se u mehanici loma proučavaju razni problemi mehanike otpornosti i loma konstrukcija. Ovako postavljena mehanika loma povezuje teoretska razmatranja s rezultatima eksperimenata, te analizira pojavu lomova i havarija konstrukcija u eksploataciji.

### 9.1 Uzroci i kriteriji nastanka loma

Lom se može definirati kao makroskopsko razdvajanje materijala koje dovodi do gubitka nosivosti krutog tijela. Fizikalni uzrok loma je djelovanje naprezanja koje zajedno s utjecajem okolnog medija razara atomsku i/ili molekularnu vezu, te se na taj način formira nova slobodna površina. Teoretsko naprezanje potrebno za razdvajanje idealnog kristala tj. za stvaranje nove slobodne površine u kristalnoj strukturi (teoretska vrsta a) utvrđuje se sljedećim izrazom:

$$\sigma_{teo} = 2 \cdot \left( E \cdot \frac{\gamma}{d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (47)$$

pri čemu su:

$E$ , modul elastičnosti, N/mm<sup>2</sup>;

$\gamma$ , povrzinska energija (energija potrebna za stvaranje nove površine) J/mm<sup>2</sup>, te

$d$ , razmak kristalnih ravnina, nm.

Za kubni kristalni sustav udaljenost između kristalnih ravnina računava se prema izrazu:

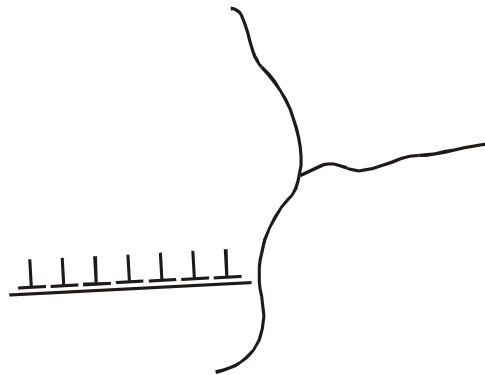
$$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (48)$$

gdje je:

$a$  parametar rešetke,  $a$   
 $h, k, l$  Millerovi indeksi.

Teoretska  $\sigma_{\text{teoretska}}$  vrsto  $a$  vrijedi samo za idealnu kristalnu strukturu i mnogostruko je ve  $a$  od stvarnog naprezanja za realnu kristalnu strukturu. Razlog tomu je prisutnost kristalnih nesavrzenosti u realnim kristalima koje bitno smanjuju otpornost tehni kih materijala u odnosu na idealne.

U samom materijalu realne kristalne strukture dolazi do koncentracije naprezanja usljed gomilanja dislokacija pri naila0enju na prepreku kao zto je granica zrna, granica faza ili uklju ak, slika 40.



Slika 40. Nakupljanje dislokacija u kristalnoj strukturi realnih materijala

Stoga je lokalno naprezanje na granicama zrna vizestruko ve e od nametnutog naprezanja:

$$\sigma_{\text{lokalno}} = n \cdot \sigma, \quad (49)$$

gdje je:

$\sigma_{\text{lokalno}}$  . lokalno naprezanje na granicama zrna;

$n$  . broj dislokacija;

$\sigma$  - nametnuto naprezanje.

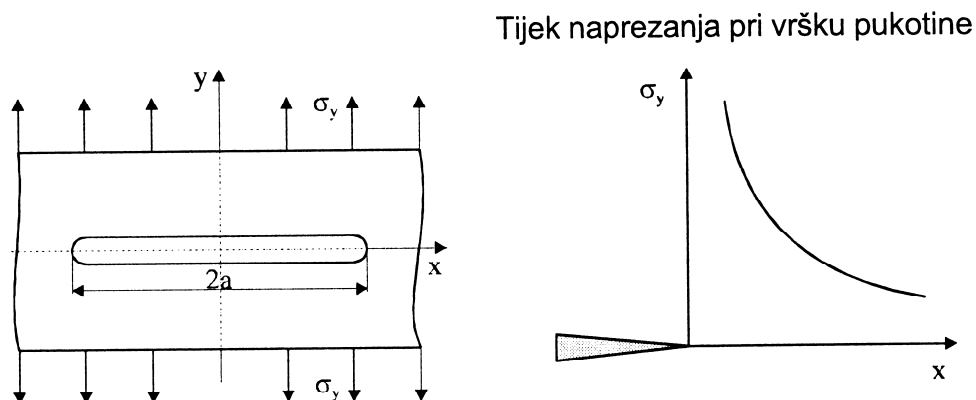
Posljedica takve koncentracije naprezanja je transkristalno rascjepno zirenje pukotine. U slu aju male vrsto e granica zrna ili kada se zbog povizene temperature (puzanje) javlja  $\sigma_{\text{teoretska}}$  enje+ po granicama dolazi do pojave interkristalnog loma. Kod vizefaznih



materijala prije nastanka pukotine dolazi do plasti ne deformacije mekani je faze. Na taj na in gomilaju se dislokacije na granici faza i stvaraju pukotine u krhkoj fazi. Pri djelovanju promjenjivog dinami kog napreznja inicijalna pukotina nastaje na povrzini usljed formiranja intruzija i ekstruzija (umor materijala).

## 9.2 Modeli pukotina

Za ocjenu stabilnosti krutog tijela koje sadrži pukotinu potrebno je definirati kontinuirano-mehani ki model pukotine. Najpoznatiji model pukotine koji se temelji na energetske hipotezi loma je *Griffithov* model. Griffithov model pretpostavlja usku i duga ku pukotinu duljine  $2a$  koja se nalazi u vla no napregnutoj plo i neograni ene istezljivosti, slika 41.



Slika 41. Griffithov model pukotine

Kriterij stabilnosti prema Griffithu je odnos oslobo ene elasti ne distorzijske energije pri pove anju pukotine te energije potrebne za stvaranje nove povrzine. Prema Griffithu, elasti na distorzijaska energija  $W_e$  oslobo ena pri pove anju pukotine mora biti jednaka ili ve a od energije potrebne za stvaranje nove povrzine loma  $W_p$  da bi pukotina bila stabilna.

Elasti na distorzijaska energija jednaka je:

$$W_e = \pi \cdot \sigma^2 \cdot \frac{a^2}{E}, \quad (50)$$

gdje je:

$\sigma$  - vla no napreznje;

$a$  . duljina pukotine;

$E$  . Youngov modul

$W_p$  energija potrebna za stvaranje obje nove površine loma:

$$W_p = 4 \cdot a \cdot \gamma_o, \quad (51)$$

gdje je  $\gamma_o$  . površinska energija.

Kriterij za prozirenje pukotine je:

$$\frac{dW_e}{da} = \frac{dW_p}{da} \text{ ili} \quad (52)$$

$$2 \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot \frac{a^2}{E} = 4 \cdot a \cdot \gamma_o \quad (53)$$

pa proizlazi da je kritično naprezanje jednako:

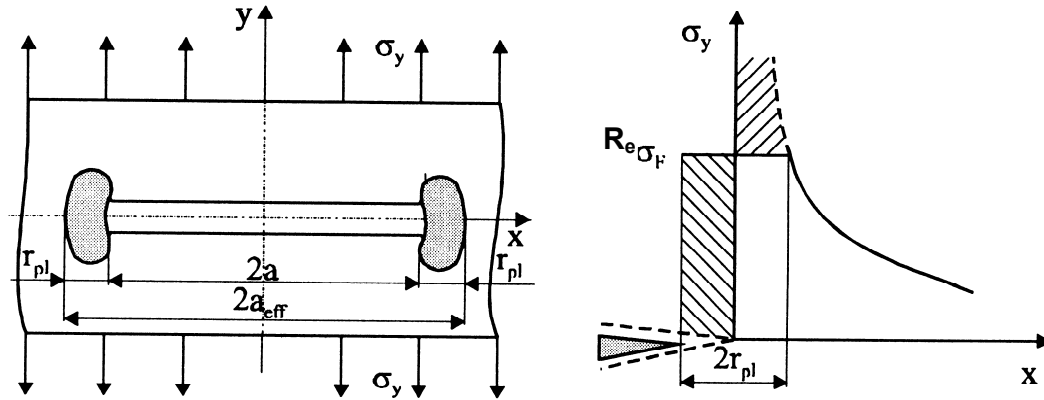
$$\sigma_c = \left[ \frac{2 \cdot E \cdot \gamma_o}{\pi \cdot a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

odnosno kritična duljina pukotine:

$$a_c = \frac{2 \cdot E \cdot \gamma_o}{\pi \cdot \sigma^2} \quad (55)$$

Eksperimentalna istraživanja su potvrdila mogućnost korištenja izraza (54) i (55) samo za iznimno krhke materijale (staklo, keramika), dok je za čilavije materijale zbog složenog utvrđivanja iznosa vrijednosti efektivne površinske energije  $\gamma_{ef}$  primjena ovih izraza ograničena.

Daljnje poboljšanje Griffithova modela načinio je Irwin s pretpostavkom postojanja plastične zone na vrhu pukotine, odnosno fiktivnog produljenja pukotine za polumjer plastične zone, slika 42.



Slika 42. Irwinov model pukotine

Prema ovom modelu, u korijenu pukotine (plasti na zona) naprezanje je jednako granici razvlacenja  $R_e$  i ne mo0e biti ve e od toga. Na taj na in naprezanje u korijenu pukotine nije vize neizmjerne veliko zto je bio osnovni nedostatak Griffithova modela. Na osnovi ovakvog Griffith-Irwinova modela temelji se *koncept linearno-elastične mehanike loma*.

Na osnovu navedenih razmatranja proizlaze sljede e definicije koje opisuju pojedine stadije loma:

*Nastanak pukotine* . pojava pukotine u dijelu materijala koji je do tog trenutka bio bez pukotine.

*Duljina pukotine* - mo0e biti reda veli ine nekoliko atomskih razmaka, mikroskopska i makroskopska.

*Pokretanje pukotine* . prijelaz iz stanja mirovanja u stanje kretanja zto mo0e biti izazvano stati kim ili dinami kim optere enjem.

*Proširenje pukotine* . pove anje pukotine s kona nim ishodom loma materijala.

Prozirenje pukotine karakterizirano je vrstom, mehanizmom i uzrokom procesa pove anja pukotine. Stoga se razlikuje stabilno, nestabilno odnosno subkriti no zirenje pukotine.

*Stabilno proširenje pukotine* . popra eno je stalnim utrozkom energije tijekom zirenja pukotine i u ve ini slu ajeva dovodi do pojave makroskopskog Oilavog loma.

*Nestabilno proširenje pukotine* . tijekom propagiranja pukotine dolazi do stalnog osloba anja energije. Pukotina napreduje velikom brzinom i dovodi do krhkog loma. Nestabilno zirenje pukotine mo0e nastupiti sa ili bez prethodnog stabilnog zirenja

pukotine.

*Subkritično proširenje pukotine* . proces dugotrajnog stabilnog zirenja pukotine karakterističan za umor materijala, puzanje ili napetosnu koroziju koji završava ubrzanim stabilnim ili nestabilnim zirenjem pukotine.

*Kočenje pukotine* - prijelaz pukotine iz procesa brzog zirenja u stanje mirovanja.

### **9.3 Fraktografija**

Fraktografija je znanstvena disciplina koja se bavi ispitivanjem prijelomne površine da bi se analizirao uzrok loma, a time objasnio i eventualni uzrok havarije. Fraktografija u ovom smislu pretpostavlja promatranje oblika, položaja i hrapavosti lomne površine bilo golim okom ili povećalom.

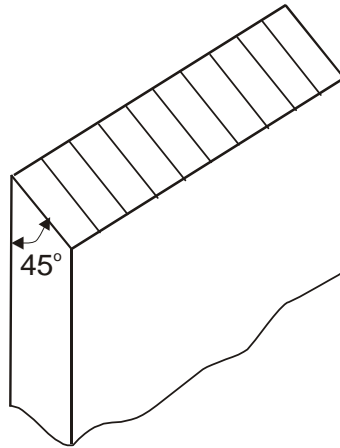
Mikrofraktografija podrazumijeva sve isto ali uz uporabu transmisijskog ili skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Skenirajući elektronski mikroskopi odlikuju se velikom dubinskom oštrom pogodom za promatranje topografije prijelomne površine. Osim toga često su opremljeni i mikroanalizatorom koji omogućuje kvantitativnu kemijsku analizu prijelomne površine.

### **9.4 Vrste lomova**

Relativno jednostavno je utvrditi da li se radi o trenutnom (nasilnom) lomu ili lomu od umora materijala kada je lomna površina karakterističnog izgleda. Makroskopski i mikroskopski lom može biti čilav ili krhak. Kod makroskopski čilavog loma u blizini mjesta prijeloma prisutna je plastična deformacija, dok kod krhkog prijeloma ona izostaje.

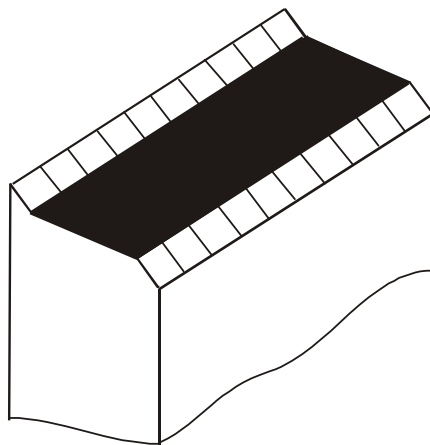
Nadalje, prema obliku lom može biti smični, razdvojni (ravninski) ili mješoviti (smično-razdvojni).

*Smični lom* . lomna površina smještena je pod  $45^\circ$  prema stjenki, a posljedica je ravninsko stanje naprezanja i troosno stanje deformacije, slika 43.



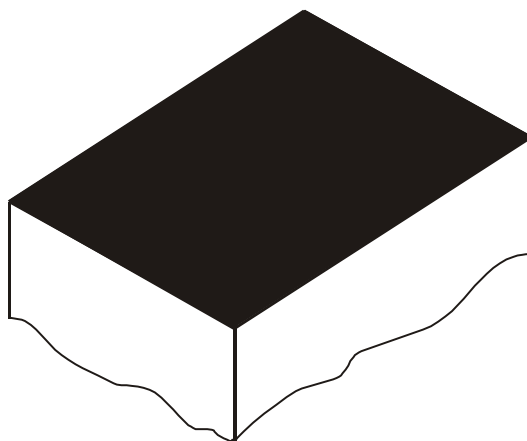
Slika 43. Položaj prijelomne površine smičnog loma

*Mješoviti (smično-razdvojni) lom* . Na rubu lomne površine prisutno je ravninsko stanje naprezanja, a u srednjem dijelu troosno stanje naprezanja, slika 44.



Slika 44. Položaj prijelomne površine mješovitog loma

*Razdvojni (ravninski) lom* . Na lomnoj površini vlada troosno stanje naprezanja i ravninsko stanje deformacije. S povećanjem debljine strojnog dijela povećava se sklonost prema ravninskom (razdvojnog) lomu, slika 45.

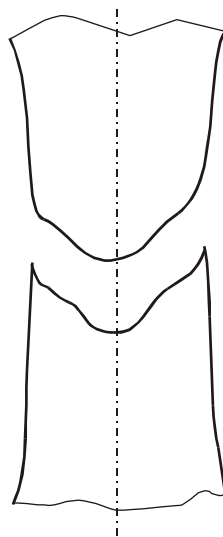


Slika 45. Položaj prijelomne površine razdvojnog (ravninskog) loma

Mikroskopska obilježja loma posljedica su različitih mogućnosti zarenja pukotine. Kod materijala s kristalnom strukturom (svi metali, njihove legure, keramike, neki polimeri) lom može biti *transkristalni* ili *interkristalni*. Transkristalni lom nastupa kroz kristalno zrno, a interkristalni lom napreduje uzduž granica zrna.

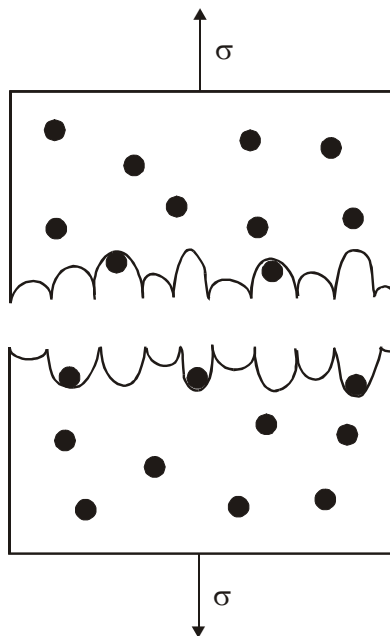
#### 9.4.1 Žilavi lom

Žilavi lom popraćen je makroskopski vidljivom plastičnom deformacijom u neposrednoj blizini loma. Lomna površina metalnih materijala karakterističnog je izgleda, zagasita i hrapava. Kod plosnatih dijelova smještena je pod kutem od  $45^\circ$  prema stjenki (smisli lom), a kod okruglih dijelova prijelomna površina je ljevkastog oblika, slika 46.



Slika 46. Žilavi lom okruglih dijelova

Kod žilavog loma tehničkih materijala prisutne su na prijelomnoj površini udubine (jamice) nastale plastičnom deformacijom metalne matrice oko čestica (uključujući, između ostalog, izluzevine) koje su tvrđe od same matrice. Pri promatranju prijelomne površine na skenirajućem elektronskom mikroskopu često se mogu zamjetiti čestice prisutne u dnu jamica. Stoga se takav lom naziva *jamičasti lom*, slika 47.

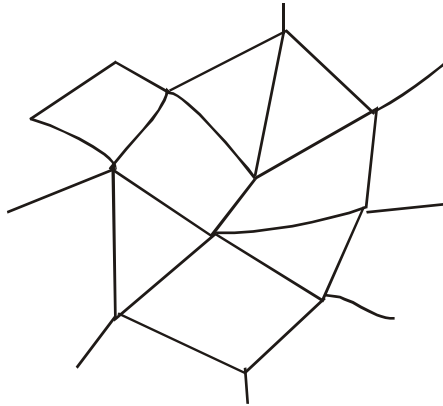


Slika 47. Jamičasti lom

Broj i dubina jamica ovise o broju čestica i duktilnosti matrice. Što je materijal duktilniji, dubina jamica je veća. Jamice se mogu javiti i u slučaju kada u makro-razmjerima nije prisutna plastična deformacija (visoko vršni naponi). Žilavi lom je uvijek transkristalan, dakle napreduje kroz kristale.

#### 9.4.2 Krhki lom

Suprotno žilavom lomu kod krhkog loma nema prisutne plastične deformacije u makro-razmjerima. Prijelomna površina je svjetla jer se sastoji od mikroglatkih ploha koje dobro reflektiraju svjetlo. U mikro-razmjerima krhki lom može biti transkristalan ili interkristalan, slika 48.



Slika 48. Interkristalni krhki lom

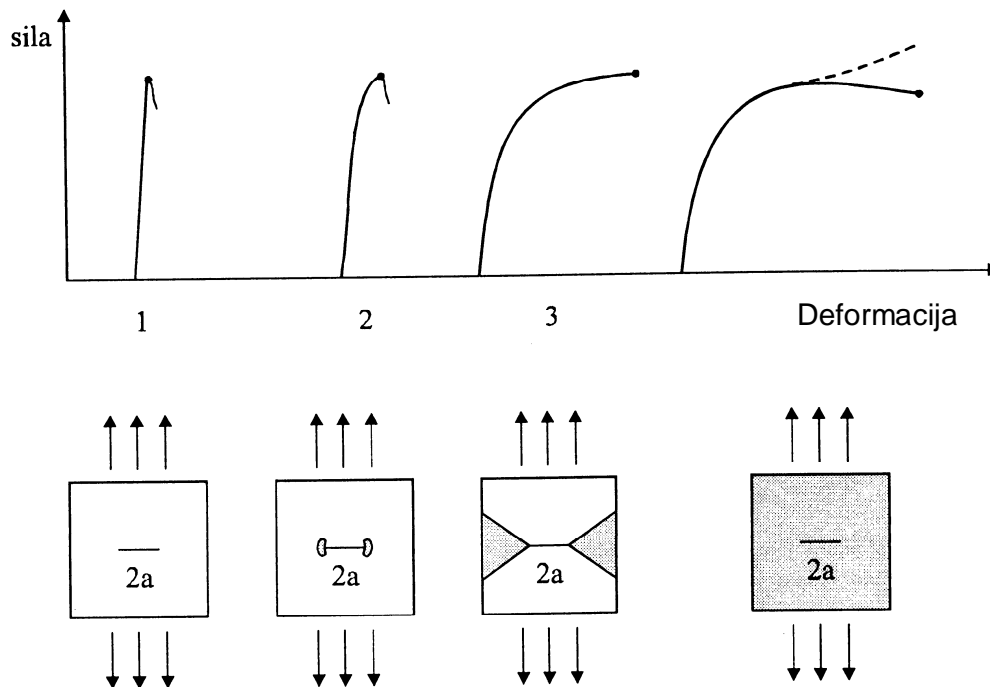
Transkristalni krhki lom slijedi određene kristalne ravnine u pojedinim kristalnim zrnima. Kod materijala s BCC rešetkom to su najčešće ravnine  $\{100\}$ , a kod HCP rešetke ravnine  $\{0001\}$ . Naime, ovaj lom se javlja kada naprezanje na granicama zrna prijeđe kritičnu vrijednost (koncentratori naprezanja) te lom napreduje razarajući vezu između atoma u određenim ravninama kristalne rešetke. Takav lom nosi naziv *rascjepni lom*.

Makro i mikro izgled loma pri cikličkom promjenjivom naprezanju ("lom od umora materijala") opisan je u poglavlju 8. U makro-razmjerima lom od umora materijala uvijek je pretežno krhak, tj. bez plastične deformacije strojnog dijela u okolini prijelomne površine.

### 9.5 Koncepti mehanike loma

Na temelju različitog ponašanja materijala tijekom djelovanja sile/naprezanja proizlaze definicije kriterija loma strojnih dijelova odnosno epruveta koji sadrže pukotine, slika 49.





Slika 49. Stadiji deformacije krutog tijela s pukotinom

- 1 - linearno-elasti na deformacija
- 2 - stvaranje ograni ene plasti ne zone (ograni eno te enje)
- 3 - elasti no-plasti na deformacija
- 4 - svekoliko te enje

U mehanici loma svekoliko te enje materijala ima smisla samo ako je lom posljedica prozirenja pukotine u tijelu, a ne posljedica plasti ne deformacije koja usljed o vrz enja materijala uzrokuje lom.

Na temelju shematski prikazanih dijagrama sila . produljenje na slici 49 utvr uju se pojedini koncepti mehanike loma:

- *linearno-elastična mehanika loma (LEML),*
- *linearno-elastična mehanika loma s ograničenim tečenjem (prisutnost plastične zone),*
- *elastično-plastična mehanika loma (EPML).*

### 9.5.1 Linearno-elastična mehanika loma (LEML)

Ovaj koncept mehanike loma omogu uje kvantitativno razmatranje procesa loma u uvjetima linearno-elasti ne deformacije sve do loma. Takvo razmatranje mogu e je

provesti analizom raspodjele naprezanja pri vrhu pukotine pomoću teorije elastičnosti kao i sagledavanjem energetske bilance kod zirenja pukotine.

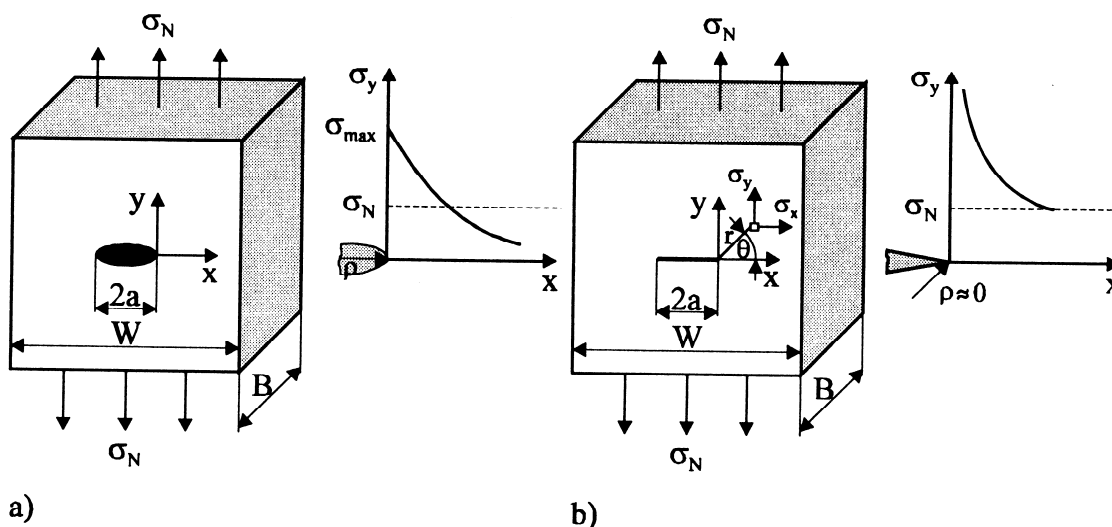
Pukotina se može smatrati granicom slijedećem zarezu s polumjerom zakrivljenosti  $\rho \approx 0$ , te se na taj način može analiza raspodjele naprezanja pri vrhu pukotine nastaviti na već spominjani utjecaj zarez na raspodjelu naprezanja (vidi poglavlje 3). Prema slici 50a) dolazi u korijenu zarez do koncentracije naprezanja:

$$\sigma_{max} = \alpha_k \cdot \sigma_n, \quad (56)$$

gdje je:

$\alpha_k$  - faktor oblika;

$\sigma_n$  - nazivno naprezanje.



Slika 50. Usporedba raspodjele naprezanja pri vrhu zarez (a) i pukotine (b) pri jednoosnom vlačnom naprezanju

Za zarez eliptičnog oblika vrijedi:

$$\sigma_{max} = \sigma_n \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \left( \frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (57)$$

gdje je:

$\sigma_n$  . nazivno naprezanje;

$a$  - velika poluos elipse;

$\rho$  - polumjer zakrivljenosti zarez.

Za  $a \gg \rho$  proizlazi:

$$\sigma_{max} \approx 2 \cdot \sigma_n \cdot \left(\frac{a}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (58)$$

Prijelazom zarez u idealno ozru pukotinu ( $\rho \rightarrow 0$ ) dolazi do matemati kog singulariteta pri vrzku pukotine, odnosno vrijednost  $\sigma_{max}$  poprima beskona no veliku vrijednost. Time se odnosi koji vrijede za opis stanja naprezanja pri vrhu zarez ne mogu primijeniti za pukotine, ve je potrebno uvesti pojam *faktor intenziteta naprezanja* kao grani ne vrijednosti elasti nog djelovanja zarez. S pomo u faktora intenziteta naprezanja,  $K$ , kvantitativno se opisuje polje naprezanja i deformacije pri vrzku pukotine:

$$\sigma_{ij} = K \cdot (2 \cdot r \cdot \pi)^{-\frac{1}{2}} \cdot f_{ij}(\theta), \quad (59)$$

gdje je:

$\sigma_{ij}$  . normalna odnosno smi na naprezanja na mjestu u blizini vrzka pukotine  $ij$

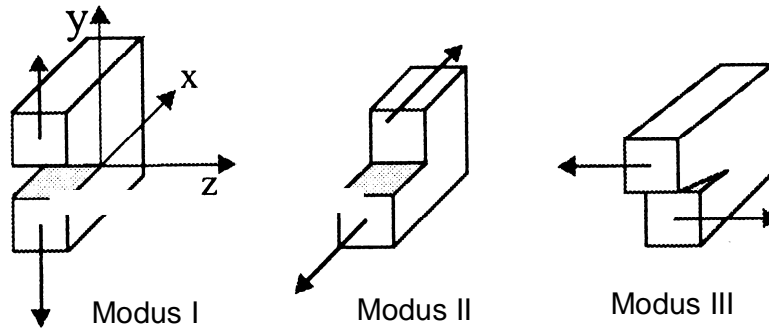
je polo0aj defniran polarnim koordinatama  $r$  i  $\theta$  (slika 50b);

$f_{ij}$  - bezdimenzionalna funkcija ovisna samo o  $\theta$ .

Faktor intenziteta naprezanja fizikalno predstavlja mjerilo inteziteta porasta naprezanja u tom podru ju. Dimenzije faktora intenziteta naprezanja jesu  $Nmm^{-3/2}$  ili  $MNm^{-3/2}$  te vrijedi:

$$1 Nmm^{-3/2} = 0,03162 MNm^{-3/2} \quad (60)$$

Prema mogu em na inu otvaranja pukotina (slika 51) razlikuju se i inteziteti naprezanja  $K_I$ ,  $K_{II}$  i  $K_{III}$ .



Slika 51. Na in otvaranja pukotine

Modus I - jednostavno otvaranje  
pukotine

Modus II - uzdužno smicanje

Modus III - poprečno smicanje

U praksi na in otvaranja pukotine I ima najveće značenje. Koristi se kod strojnih dijelova s vanjskim i unutarnjim pukotinama, opterećenih vlačnim ili savojnim opterećenjem, te kod konstrukcija podvrgnutih unutarnjem pritisku. Za na in otvaranja pukotine I dobiva se eksplicitno rješenje jednačine (59) putem tzv. *Williams-Irwinove* jednačine:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \frac{K_I}{(2 \cdot r \cdot \pi)^{\frac{1}{2}}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \\ \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \end{bmatrix}$$

Za ravninsko stanje deformacije zbog nemogućnosti deformacije u smjeru osi z javlja se još jedna komponenta napreznja:

$$\sigma_z = \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y), \quad (61)$$

gdje je  $\nu$  - Poissonov broj.

Za ravninu u kojoj se nalazi pukotina ( $\theta=0$ ) vrijedi:

$$\sigma_y = K_I \cdot (2 \cdot r \cdot \pi)^{-\frac{1}{2}} \quad (62)$$

Gornji izraz vrijedi za modus otvaranja pukotine I. Odgovaraju i izrazi daju se napisati i za ostale načine otvaranja pukotine (II i III). Kao granični slučaj za unutarnju pukotinu nekog neograničeno istezljivog tijela za  $a \ll W$  dobiva se:

$$K_I = \lim \sigma_y \cdot (2 \cdot r \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} = \sigma_y \cdot (a \cdot \pi)^{\frac{1}{2}}, \quad (63)$$

gdje je  $a$  - polovina duljine pukotine.

Za opis konačnih dimenzija strojnog dijela i geometrije pukotine uvodi se korekturna funkcija pa općeniti izraz za faktor intenziteta naprezanja za način otvaranja pukotine I glasi:

$$K_I = \sigma_n \cdot (a \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot f, \text{ gdje je} \quad (64)$$

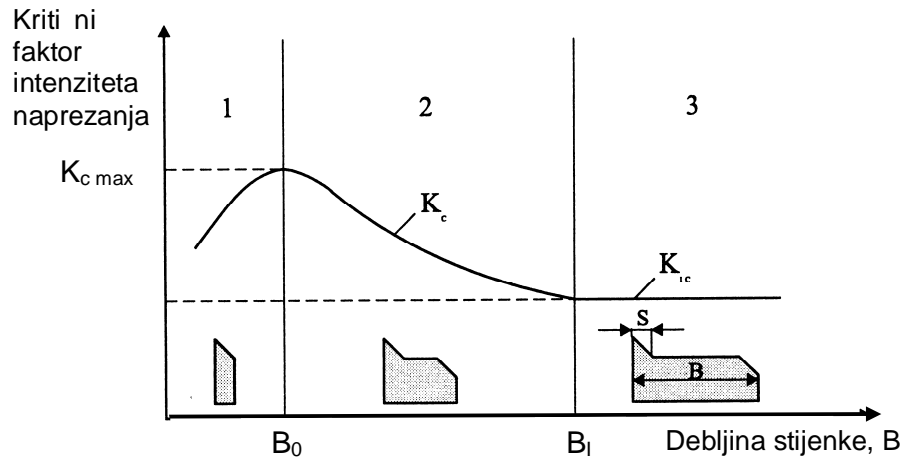
$K_I$  - faktor intenziteta naprezanja za modus otvaranja pukotine I;

$\sigma_n$  - nazivno naprezanje;

$a$  - polovina duljine pukotine;

$f$  - korekturna funkcija.

Kriterij za lom kod LEML-a je po etak nestabilnog zirenja jedne do tog trenutka mirujuće pukotine dostizanjem kritične vrijednosti faktora intenziteta naprezanja u uvjetima ravninskog stanja deformacije. Takve kritične vrijednosti intenziteta naprezanja  $K_{Ic}$ ,  $K_{IIc}$  i  $K_{IIIc}$  nazivaju se lomna ili pukotinska čvrstoća te predstavljaju mehaničko svojstvo koje karakterizira čvrstoća materijala. Budući da se ravninsko stanje deformacije može postići samo u debelostjenim strojnim dijelovima ili epruvetama, proizlazi ovisnost kritičnog faktora intenziteta naprezanja  $K_c$  o debljini stijenke (slika 52).



Slika 52. Ovisnost kritičnog faktora intenziteta naprezanja o debljini stijenke

- 1 - ravnično stanje naprezanja (smi ni lom)
- 2 - miježano stanje naprezanja (smi ni i ravnični lom)
- 3 - ravnično stanje deformacije (ravnični lom)

U području 1 vrijedi ravnično stanje naprezanja. Za neku debljinu  $B_0$  kritični faktor intenziteta naprezanja  $K_c$  dostiže maksimum, a za sve manje debljine stijenke uo lijev je smi ni lom. U području 2 s povećanjem debljine stijenke povećava se udio ravničkog loma ali je uz rubove još značajan udjel smi nog loma. U tom području prisutno je mješovito stanje naprezanja i deformacije. Pri debljini stijenke  $B_1$  kritični faktor intenziteta naprezanja dostiže svoju minimalnu vrijednost  $K_{tc}$  te u području 3 nastupa gotovo isti ravnični lom kao posljedica ravničkog stanja deformacije. Izvjestan minimalni udio smi nog loma pojavljuje se uz rubove stijenke. Odnos debljine stijenke i faktora intenziteta naprezanja pokazuje i izraz:

$$B = \frac{1}{\beta} \cdot \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2, \quad (65)$$

gdje je  $R_e$  - granica razvlačenja materijala.

Za  $\beta < 1 \dots 1,3$  potpuno je onemogućeno istezanje te je prijelom ravan - nastupa razdvojni lom.

Za  $\beta = 4 \dots 6$  slijedi prijelaz u mješovito stanje naprezanja ili deformacije te raste udio smi nog loma.

Za  $\beta > 10$  lom je potpuno smi an - nastupa ravninsko stanje naprezanja.

### 9.5.2 Linearno-elastična mehanika loma s ograničenim tečenjem

Kao zto je ve prije spomenuto, prema Irwin-Griffithu i kod makroskopski krhkog loma pri vrzku pukotine dolazi do formiranja *plastične zone*. Pod pretpostavkom da je ta plasti na zona zanemarivo mala u odnosu na dimenzije strojnog dijela i joz nosivi dio popre nog presjeka, efektivna duljina pukotine ( $a_{ef}$ ) se pove ava za polumjer plasti ne zone,  $r_{pl}$ :

$$a_{ef} = a + r_{pl} \quad (66)$$

U tom sluaju efektivni faktor intenziteta naprezanja iznosi:

$$K_{ef} = \sigma \cdot (a_{ef} \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot f\left(\frac{a_{ef}}{W}\right), \quad (67)$$

gdje je  $W$  - zirina strojnog dijela.

Veli ina plasti ne zone mo0e se grubo procijeniti ako se u izraz (62) umjesto naprezanja uvrsti granica razvla enja  $R_e$ :

$$r_{pl} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \quad (68)$$

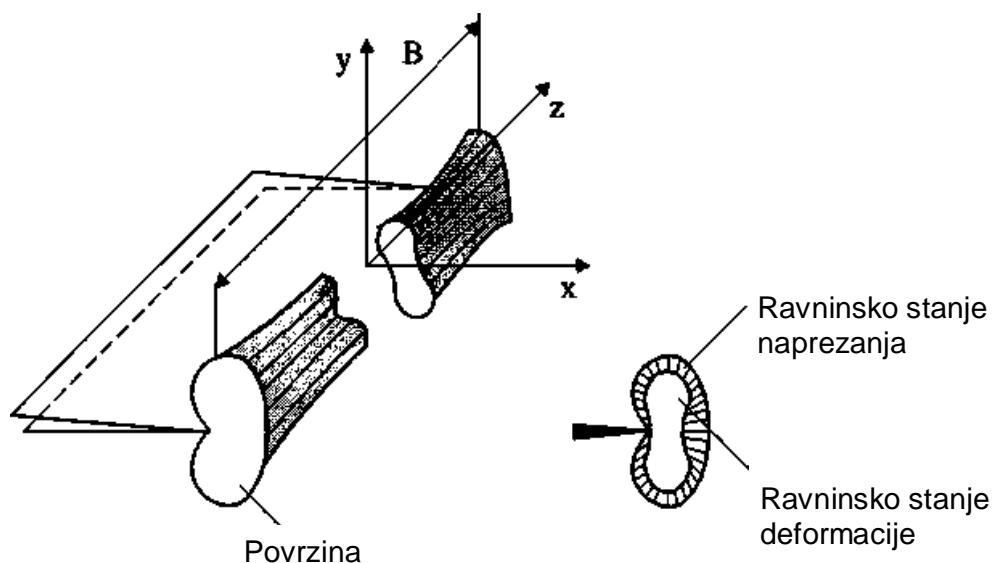
zto vrijedi za ravninsko stanje naprezanja, odnosno :

$$r_{pl} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)^2 \quad (69)$$

za ravninsko stanje deformacije.

Zbog prijelaza iz ravninskog stanja naprezanja u rubnom podru ju u ravninsko stanje

deformacije u jezgri, plasti na zona ima oblik "pasje kosti" (slika 53).



Slika 53. Oblik plasti ne zone

No trodimenzionalni prora uni metodom kona nih elemenata uzimanjem u obzir procesa o vrz ivanja pokazali su da stvarni oblik odstupa od prikazanog modela, odnosno da je razlika u veli ini plasti ne zone izme u povrzine i jezgre manja zto je posljedica smanjenja faktora intenziteta naprezanja u smjeru od jezgre ka povrzini. S rastom debljine stijenke strojnog dijela ili epruvete te smanjenjem mogu nosti popre ne deformacije, plasti na se zona smanjuje. Eksperimentalno je mogu e registrirati plasti nu zonu ve bo nim osvjetljavanjem polirane povrzine. Nadalje, koriste se tako er metode mjerenja mikrotvrdo e, nagrizanja za utvr ivanje prisutnosti dislokacija te rekristalizacijsko 0arenje. Uvo enjem efektivne duljine pukotine, odnosno lomne 0ilavosti, proziru je primjenjivosti LEML-a uz uvjet da budu zadovoljeni uvjeti:

$$\frac{2 \cdot r_{pl}}{a} < 0,4 \quad i \quad \frac{\sigma_n}{R_e} \leq 0,9 \quad (70)$$

Ako nije tako, mora se primijeniti koncept elasti no-plasti ne mehanike loma.



### 9.5.3 Elastično-plastična mehanika loma

Koncept linearno-elastične mehanike loma nije primjenjiv ukoliko je područje plastične deformacije uz vrzак pukotine toliko veliko da se ono više ne može zanemariti u odnosu na veličinu pukotine i dimenzije strojnog dijela ili epruvete. Na taj način primjena LEML-a kod većine konstrukcijskih materijala iznimno je ograničena. LEML se primjenjuje samo u uvjetima vrlo niskih temperatura eksploatacije ili velike debljine stijenke. U slučaju većine plastične deformacije prije loma primjenjuje se koncept *elastično-plastične mehanike loma* (EPML) ili *mehanike loma s tečenjem* (MLT).

Praktički to znači da EPML omogućuje utvrđivanje mehaničkih svojstava na području mehanike loma izvan područja primjenjivosti LEML-a, što znači kod epruveta (strojnih dijelova) relativno malih dimenzija. Nadalje, EPML omogućava formuliranje kriterija mogućih havarija u uvjetima elastično-plastičnog ponašanja materijala prije pojave loma. Ti se kriteriji odnose na stabilno zarenje pukotine nakon njezinog iniciranja. Nužnost primjene takvih kriterija loma pojavljuje se u slučaju kada se u području lokalne plastične deformacije (npr. posljedica koncentracije naprezanja) ili pojave lokalne krhkosti (npr. zavar ili utjecaj okolnog medija) pukotina počinje ziriti stabilno, a naknadno u području elastičnog naprezanja nastavlja stabilno ili nestabilno kretanje. Dva najvažnija koncepta na području elastično-plastične mehanike loma su *COD-koncept* i *J-integral*.

### 9.6 Eksperimentalno utvrđivanje lomne žilavosti $K_{Ic}$

Zbog specifičnih zahtjeva definiranih konceptom LEML-a, odnosno linearno-elastičnim ponašanjem materijala do loma, za eksperimentalno utvrđivanje lomne žilavosti  $K_{Ic}$  moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

- dimenzije epruvete moraju biti znatno veće od veličine plastične zone pri vrzaku pukotine,
- u trenutku nestabilnog zarenja pukotine mora postojati mogućnost precizne registracije opterećenja,
- za odgovaranje u geometriju epruvete mora biti poznata jednačina, tj. odnos između faktora intenziteta naprezanja, naprezanja i duljine pukotine.

Jednad0ba za odre ivanje faktora inteziteta naprezanja  $K_I$  jednaka je:

$$K_I = \sigma \cdot a^{\frac{1}{2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (71)$$

gdje je:

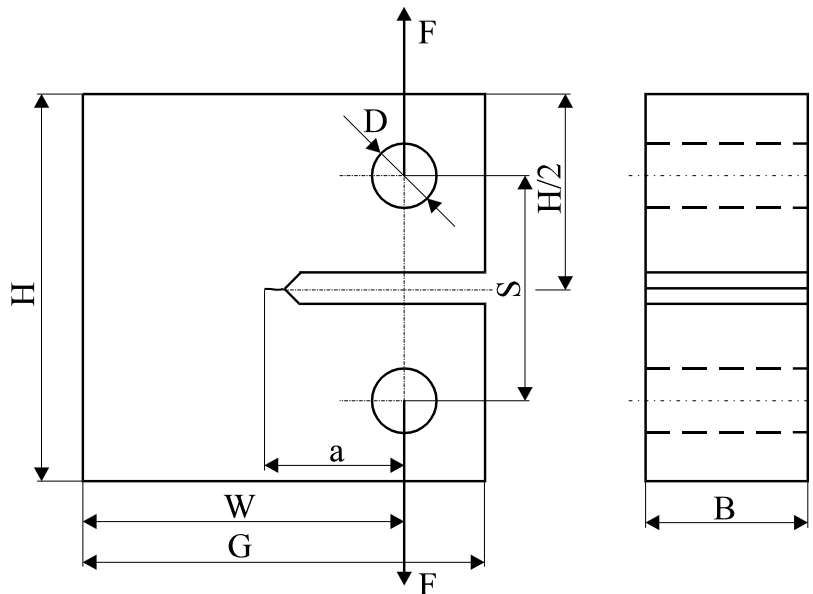
- $\sigma$  . naprezanje;
- $a$  . polovina duljine pukotine;
- $W$  - zirina epruvete (strojnog dijela);
- $f$  . korekturna funkcija.

Korekturna funkcija  $f(a/W)$  predstavlja faktor geometrije dan u obliku aproksimacijskog polinoma:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = c_1 + c_2\left(\frac{a}{W}\right) + c_3\left(\frac{a}{W}\right)^2 + \dots \quad (72)$$

### 9.6.1 Oblik i dimenzije epruvete

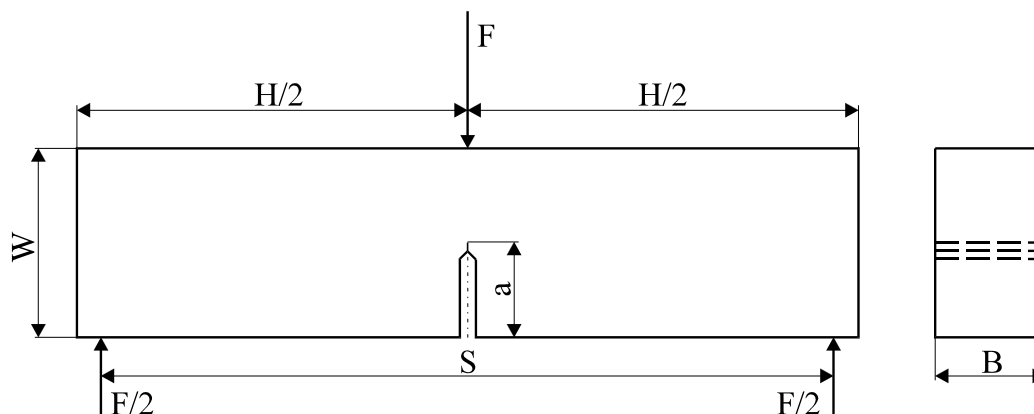
Ispitivanje se naj ez e provodi na kompaktnoj vlačnoj epruveti (slika 54) ili na epruveti za troto kasto savijanje (slika 55).



Slika 54. Kompaktna vlačna epruveta

Faktora inteziteta naprezanja određuje se iz izraza:

$$K_I = \frac{F}{B \cdot W^{\frac{1}{2}}} \cdot f_1 \left( \frac{a}{W} \right) \quad a = (0,45 \text{ do } 0,55)W \quad (73)$$



Slika 55: Epruveta za troto kasto savijanje

$K_I$  slijedi iz izraza:

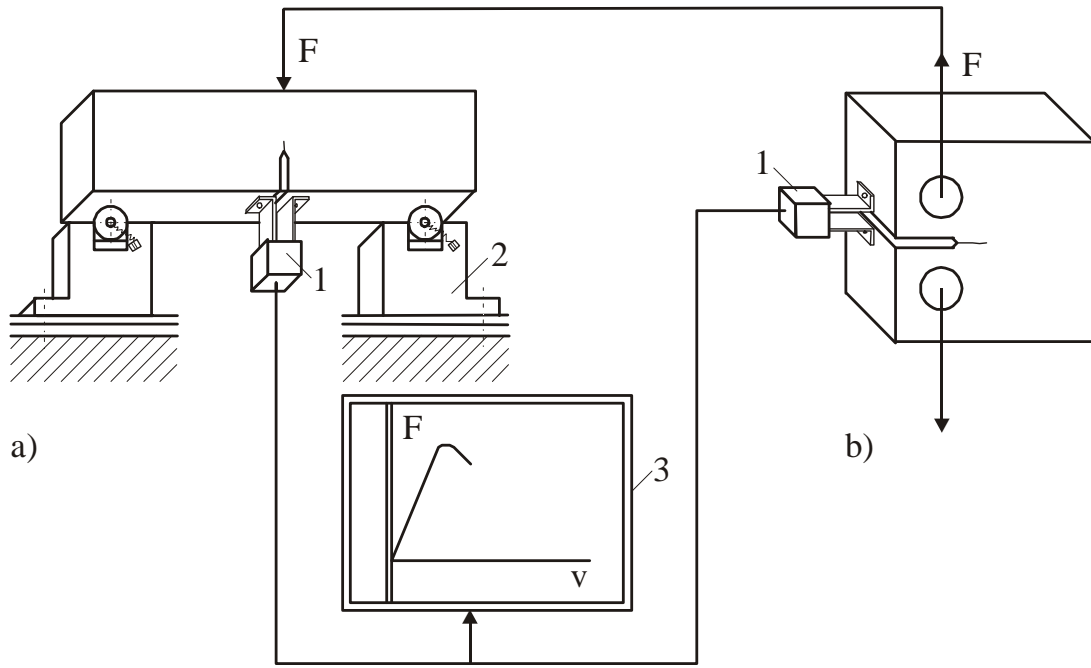
$$K_I = \frac{F \cdot S}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} \cdot f_2 \left( \frac{a}{W} \right) \quad a = (0,45 \text{ do } 0,55)W \quad (74)$$

### 9.6.2 Način provedbe ispitivanja

Postupak ispitivanja se provodi u dvije faze:

- stvaranje realne pukotine promjenljivim naprežanjem na umaralici (pulzatoru),
- stati ko ispitivanje do loma uz snimanje dijagrama sila-prozirenje pukotine na univerzalnoj kidalici.

Provo enjem ispitivanja na servo-hidrauli kom ure aju mogu e je oba ispitivanja provesti na istom ure aju. Snimanje dijagrama sila-prozirenje pukotine (druga faza ispitivanja) shematski je prikazano na slici 56.

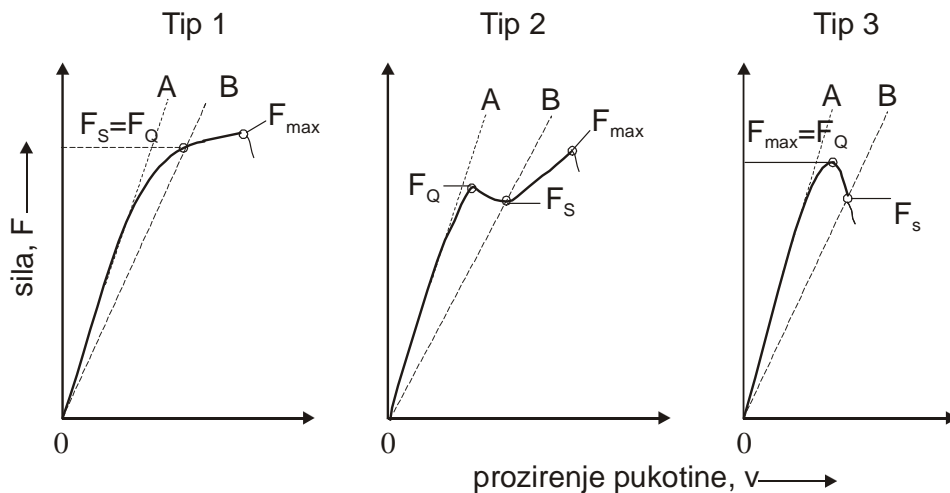


1 - mjera prozirenja pukotine      2 - naprava za savijanje      3 - x-y pisa

Slika 56. Shematski prikaz snimanja dijagram sila-prozirenje pukotine

- a) kod epruvete za troto kasto savijanje
- b) kod kompaktne vlakne epruvete

S obje strane mehanički izrezanog utora u vrz uje se mjera prozirenja pukotine, te se promjena zirine pukotine zajedno s električnim signalom za silu prenosi na pisa. Ovisno o vrsti materijala i vanjskim uvjetima ispitivanja (npr. temperatura ispitivanja) mogu nastupiti tri karakteristična tipa dijagrama sila - prozirenje pukotine (slika 57).



Slika 57. Tipovi dijagrama sila - prozirenje pukotine

Kod krivulje tipa 1 prije dostignu a maksimalne sile  $F_{max}$ , koja označava po etak nestabilnog zirenja pukotine i pojave loma, dolazi do izvjesne plasti ne deformacije i do stabilnog zirenja pukotine. Na in utvr ivanja sila  $F_Q$  koja karakterizira tu pojavu je slijede i:

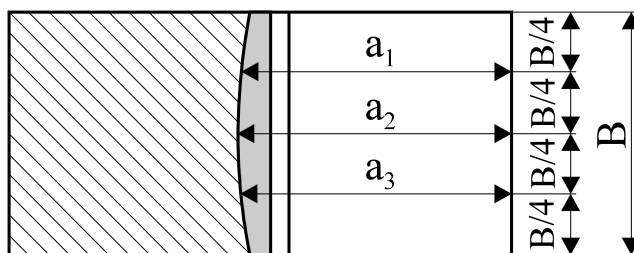
Ucrtavanjem pravca OB koji ima 5% bla0i nagib od tangente OA nalazi se presjecizte pravca s krivuljom, a ordinata presjecizta predstavlja iznos sile  $F_Q$ . Uvjet za primjenljivost LEML-a odnosno ograni ene plasti ne zone je slijede i:

$$\frac{F_{max}}{F_Q} \leq 1,1 \quad (75)$$

Kod krivulje tipa 2 nakon relativno dugog linearno-elasti nog ponazanja materijala i dostizanja sile  $F_Q$  dolazi do privremenog smanjenja sile (sli no kao kod sile te enja pri stati kom vla nom pokusu) koje karakterizira ograni eno nestabilno zirenje pukotine.

Krivulju tipa 3 karakterizira gotovo linearno-elasti no ponazanje materijala. Nestabilno zirenje pukotine po inje kod sile  $F_{max}$  koja je jednaka sili  $F_Q$ .

Duljinu pukotine potrebno je izmjeriti u ravnini pukotine na tri mjesta s to noz u od 0,1 %. Izmjera duljine pukotine je srednja vrijednost od tri mjerenja, slika 58.



Slika 58. Na in utvr ivanja duljine pukotine

Iz utvr ene sile  $F_Q$  izra unava se faktor intenziteta naprezanja  $K_Q$  tako da se vrijednost sile  $F_Q$  uvrsti u odgovaraju i izraz za odre ivanje faktora intenziteta naprezanja (izrazi 73 i 74). Vrijednost  $K_Q$  predstavlja kriti ni intenzitet naprezanja  $K_{Ic}$  ukoliko su zadovoljeni kriteriji definirani konceptom LEML-a. Prisutnost ravninskog stanja deformacije zajam ena je izrazima:

$$\text{zirina epruvete : } B \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad (76)$$

$$\text{duljina pukotine : } a \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2 \quad (77)$$

Ukoliko dobivena vrijednost  $K_Q$  uvrštena u gornja dva izraza (76) i (77) zadovoljava nejednadobu, prihva a se kao lomna 0ilavost materijala  $K_{Ic}$ .

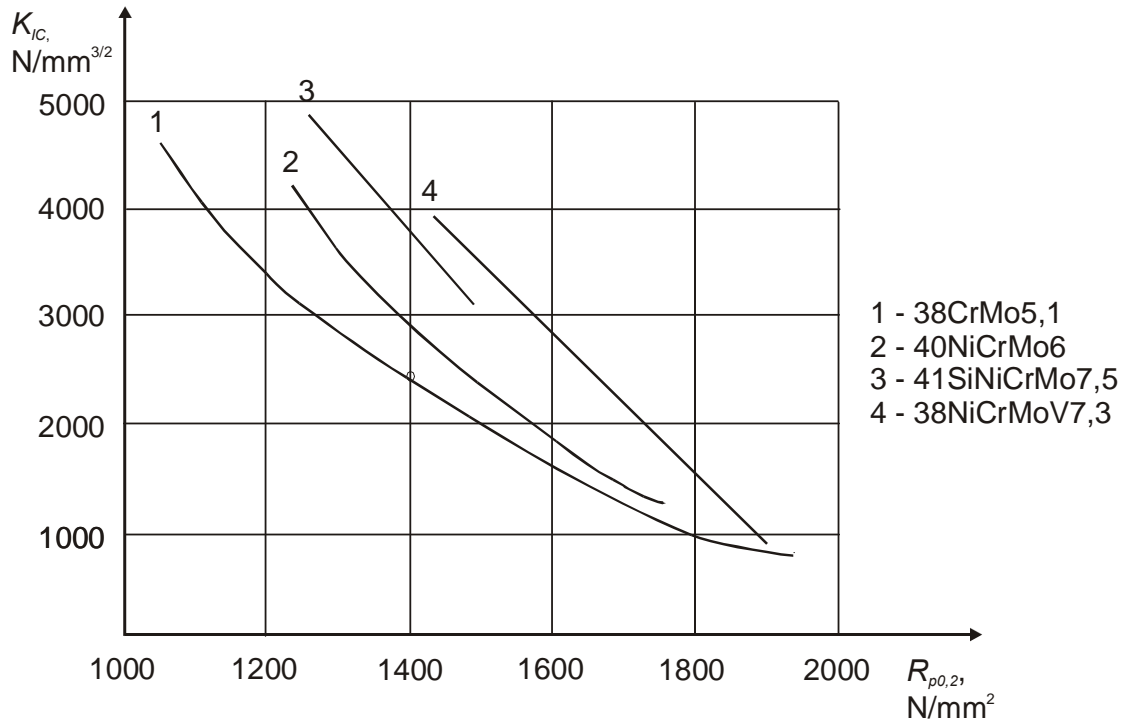
### 9.7 Lomna žilavost konstrukcijskih materijala i korelacija s drugim mehaničkim svojstvima

Budu i da su elici za poboljzavanje jedna od najva0nijih skupina konstrukcijskih materijala, kod kojih se zahtjeva visoka vrsto a i povizena 0ilavost, kod tih elika osobito su va0ne zna ajke lomno-mehani kih svojstava. U tablici 6 navedene su vrijednosti lomne 0ilavosti  $K_{Ic}$  i konvencionalne granice razvla enja  $R_{p0,2}$  za neke od ovih elika.

Tablica 6. Vrijednosti lomne 0ilavosti i konvencionalne granice razvla enja elika za poboljzavanje

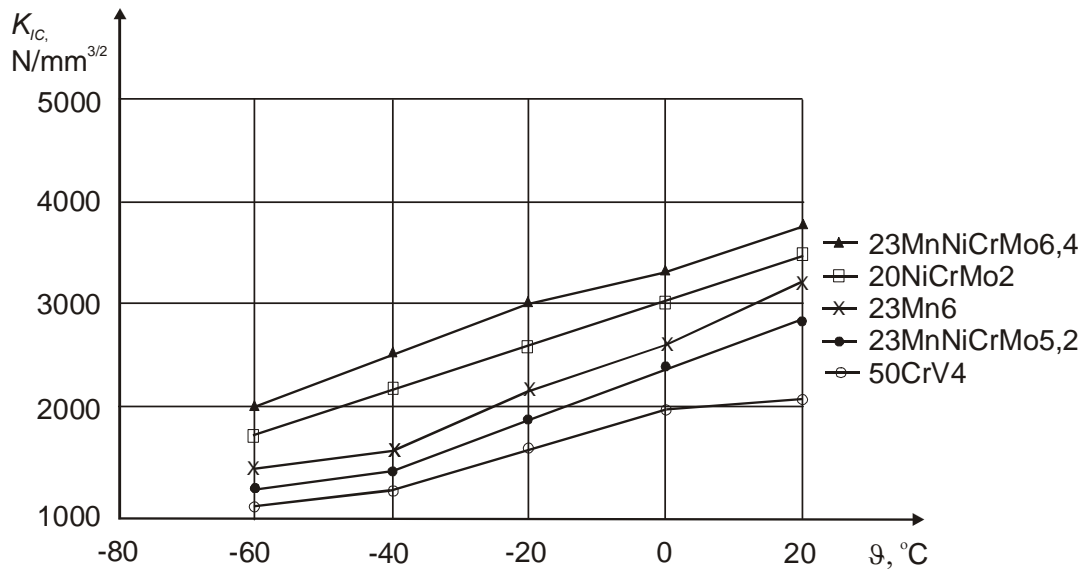
Oznaka elika	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ , N/mm <sup>3/2</sup>
.4731	450	2100
.4732	480	1900
.5431	1300	2500
.5480	670	4320

Na dijagramu 59 grafi ki je prikazana ovisnost lomne 0ilavosti i konvencionalne granice razvla enja elika za poboljzavanje.



Slika 59. Ovisnost lomne 0ilavosti i konvencionalne granice razvla enja kod elika za poboljšavanje

Poput udarne radnje loma i lomna 0ilavost ovisna je o temperaturi ispitivanja, slika 60.



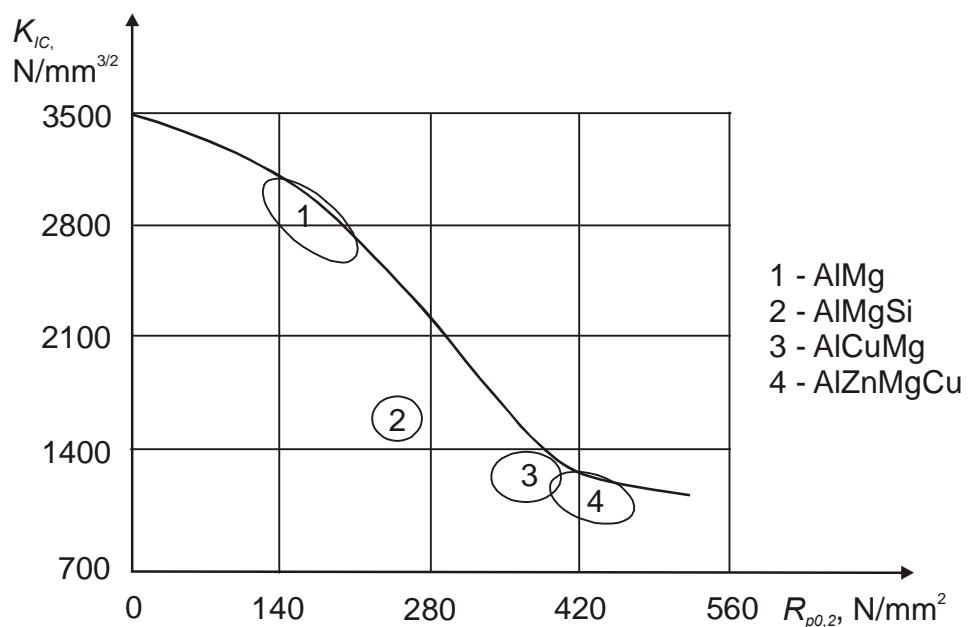
Slika 60. Temperaturna ovisnost lomne 0ilavosti kod elika za opruge i lance

Za gnje ila ke aluminijske legure koje se ponazaju 0ilavo nije potrebno odre ivati lomnu 0ilavost. Me utim za toplinski obradive aluminijske legure koje su krhke vrijednost lomne 0ilavosti je zna ajan podatak, tablica 7.

Tablica 7. Vrijednosti lomne 0ilavosti i konvencionalne granice razvla enja toplinski obradivih aluminijskih legura

Oznaka legure	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ , N/mm <sup>3/2</sup>
AlCuMg	440	880
AlCuMg2	510	810
AlZnMgCu1,5	500	910
AlZnMgCu2	450	755

Slika 61 grafi ki prikazuje ovisnost lomne 0ilavosti o konvencionalnoj granici razvla enja za neke toplinski obradive aluminijske legure.



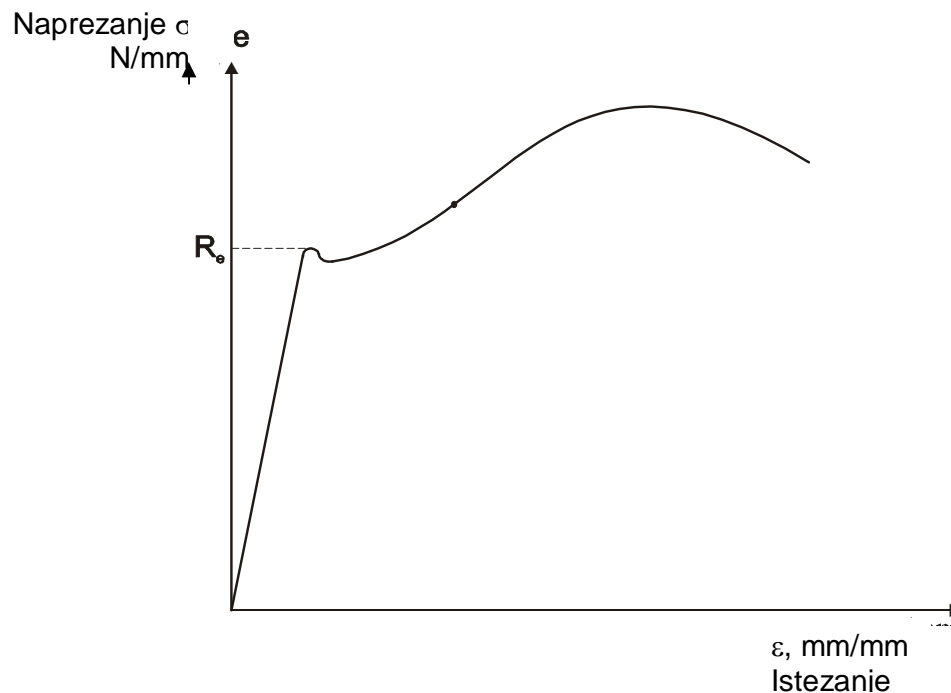
Slika 61. Ovisnost lomne 0ilavosti o konvencionalnoj granici razvla enja za toplinski obradive aluminijske legure



## 10. TENZOMETRIJA

Tenzometrija obuhvaća određivanje naprezanja na temelju mjerenja deformacije materijala. Tenzometrija pripada grupi nerazornih metoda za određivanje naprezanja bilo da se ono određuje na strojnom dijelu za vrijeme njegove eksploatacije ili kod nekog prototipnog ispitivanja.

Ovisnost između naprezanja i ostvarene deformacije materijala jasno pokazuje konvencionalni dijagram naprezanje-istezanje na slici 62.



Slika 62. Dijagram naprezanje ( $\sigma$ ) - istezanje ( $\epsilon$ ) za konstrukcijski čelik

U području elastičnosti gdje su naprezanja manja od granice razvlačenja ovisnost između naprezanja i deformacije je linearna i predložena je Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (78)$$

gdje je:

$\sigma$  - naprezanje;

$E$  - modul elastičnosti;

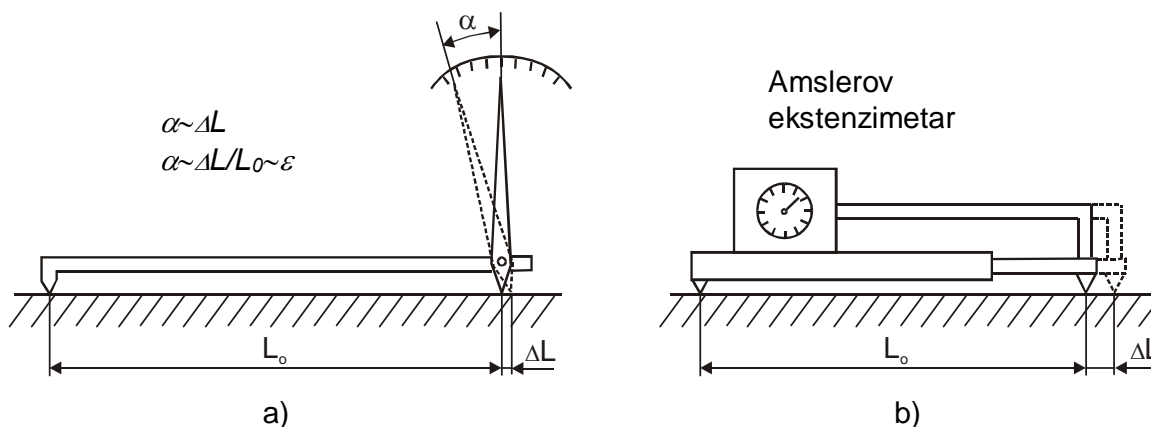
$\varepsilon$  - relativno produljenje, istežanje.

Stoga je u elasti nom području za poznatu deformaciju materijala (istežanje ili sabijanje) vrlo jednostavno odrediti iznos djelujućeg naprezanja, naravno ako je poznat materijal odnosno njegov modul elastičnosti.

Postoji više načina mjerenja deformacija. Ovdje je dan pregled mjera za deformaciju od onih jednostavnih pa do onih koji daju najtočnije podatke o deformaciji (DMS-mjerne trake).

### 10.1. Mehanička mjerila deformacije

Mehanička mjerila deformacije predstavljaju najjednostavnija mjera. Kod jednostavnih mehaničkih mjerila iznos deformacije se određuje na osnovu kuta otklona kazaljke, slika 63a, a kod mjerila s mjernim satom vrijednost deformacije direktno se očitava na samom mjernom satu, slika 63b.

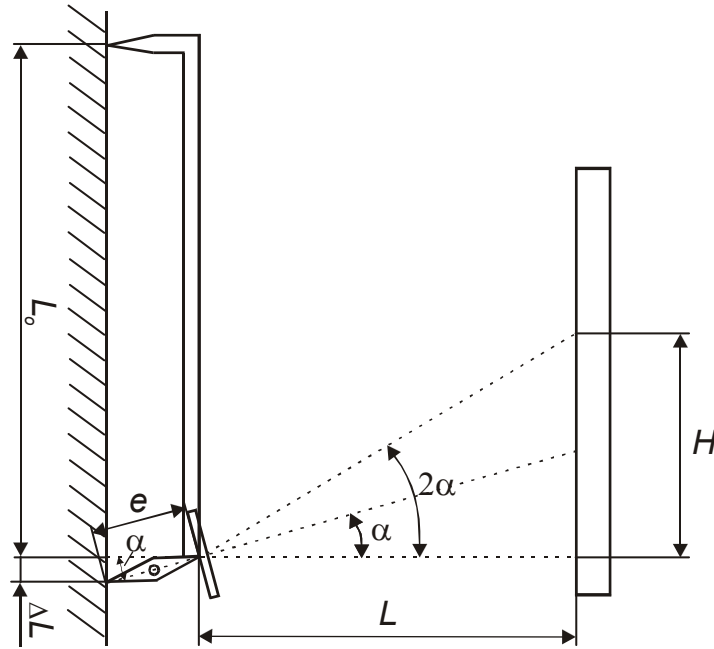


Slika 63. Mehanička mjerila deformacije

- a) Jednostavno mjerilo
- b) Mjerilo s mjernim satom

### 10.2. Mehaničko-optička mjerila deformacije (Martensovo ogledalo)

Produljenje predmeta uzrokuje zakretanje Martensovog ogledala i lom upadne zrake svjetlosti pod kutem  $2\alpha$ , slika 64.



Slika 64. Mehani ko-opti ko mjerilo deformacije

Iz slike 64 slijedi:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta L}{e}, \text{ odnosno} \quad (79)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{2L}, \quad (80)$$

gdje je:

$\Delta L$  . produljenje (deformacija);

$e$  - dimenzija ticala ( $e=4 \text{ mm}$ );

$H$  . visina reflektirane zrake;

$L$  . udaljenost podloge.

Kako je kut  $\alpha$  vrlo mali ( $\pm 2^\circ$ ) vrijedi:

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \quad (81)$$

odnosno

$$\frac{\Delta L}{e} \approx \frac{H}{2L} \quad (82)$$

Iz izraza 82 slijedi:

$$\Delta L \approx \frac{H \cdot e}{2 \cdot L} \quad (83)$$

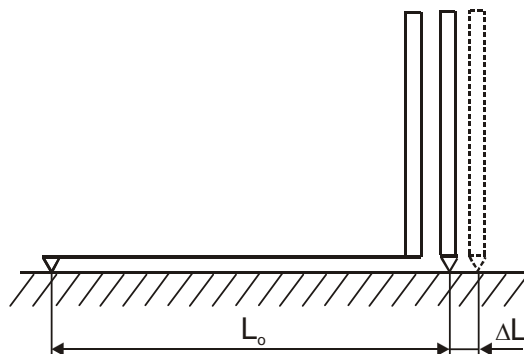
Budući da su veličine  $e$  i  $L$  konstantne, produljenje  $\Delta L$  određeno je visinom  $H$ .

Nedostaci mehaničkih i mehaničko-optičkih mjerila deformacije:

- zbog veličine ovi uređaji nisu primjenjivi za mjerenje deformacija na manjim objektima;
- nije moguće mjeriti deformacije na mjestima gdje je dozvoljeno koncentracije naprezanja;
- uređaji su osjetljivi na vibracije i mjere deformacije (naprezanja) u uvjetima statičkog opterećenja;
- nije moguće očitavanje deformacije na daljinu već samo na mjestu mjerenja te stoga uređaji nisu primjenjivi za mjerenja u nepovoljnim okolnim uvjetima (visoka i niska temperatura, otrovni plinovi i sl.);
- nije moguće automatsko bilježenje podataka.

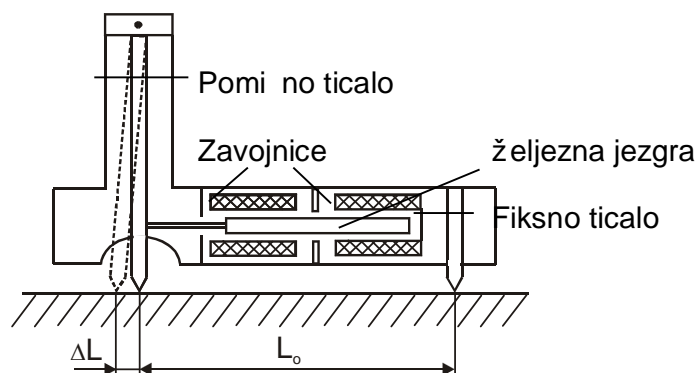
### 10.3. Mehaničko-električna mjerila deformacije

Mehaničko-električna mjerila deformacije mogu biti kapacitivna i induktivna. Kod kapacitivnih mjerila, slika 65, uslijed deformacije predmeta mijenja se udaljenost između ploha kondenzatora što se odražava na promjenu kapaciteta ( $\Delta C$ ) i ova je promjena upravo proporcionalna deformaciji predmeta ( $\Delta L$ ).



Slika 65. Kapacitivno mehaničko-električno mjerilo deformacije

Mjerenje deformacije induktivnim mjera ima, slika 66, ostvaruje se na principu pomicanja željezne jezgre unutar induktivnih zavojnica. Međusobno mijenja induktivitet zavojnica, odnosno otpor izmjenjivoj visokofrekventnoj struji. Korisno je što mjernog pojačala mogu dati električni signal i do 50000 puta.



Slika 66. Induktivno mehaničko-električno mjerilo deformacije

Prednosti mehaničko-električnih mjerača jesu sljedeće:

- mogunost mjerenja deformacije na daljinu odnosno mjerenja u nepovoljnim okolnim uvjetima;
- uređaji su manjih dimenzija i manje težine;
- mogunost mjerenja i dinamičkih naprezanja premda u ograničenom području.

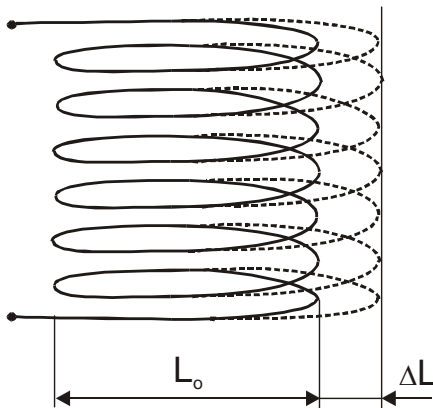
Nedostaci uređaja:

- uređaji su relativno veliki da bi mogli mjeriti deformacije na sasvim malim objektima ili na mjestima koncentracije naprezanja;
- nisu pogodni za mjerenje dinamičkih naprezanja velikih frekvencija i intenziteta (uređaji su preteški).

#### 10.4. Električna mjerila deformacije (DMS mjerne trake)

DMS mjerne trake prvi puta je upotrijebio Arthur Claude Ruge. Naime, 1938. godine ovaj je američki znanstvenik želio izmjeriti naprezanja koja bi nastupila uslijed potresa na velikom spremniku za vodu. Kako nije mogao čekati potres da bi proveo

mjerenja na inio je model spremnika i na vibracijskom postolju simulirao potres. Me utim, kada je po eo mjeritri naprezanja sa do tada poznatim mjera ima deformacije svi su oni redom popadali sa modela zbog svoje veli ine i mase. Tada se Ruge prisjetio ve dulje vremena poznatog Piezo-otpornog efekta zto ga pokazuju metali. Naime, stotinjak godina ranije Charles Wheatston je primjetio da se elektri ni otpor 0ice mijenja ako je ona deformirana pod djelovanjem optere enja. Ruge je na inio prvu mjernu traku, koja je bila zavojnica od tanke 0ice vrsto zaljepljena za mjerni objekt, slika 67.



Slika 67. Prikaz mjerne trake

Deformacija  $\varepsilon$  op enito je opisana izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad (84)$$

gdje je

$\Delta L$  - produljenje;

$L_0$  - po etna mjerna duljina.

Zbog deformacije materijala i produljenja mjerne trake javlja se promjena elektri nog otpora te se deformacija  $\varepsilon$  definira izrazom:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \quad (85)$$

gdje je:

$k$  - konstanta ovisna o vrsti materijala mjerne trake;

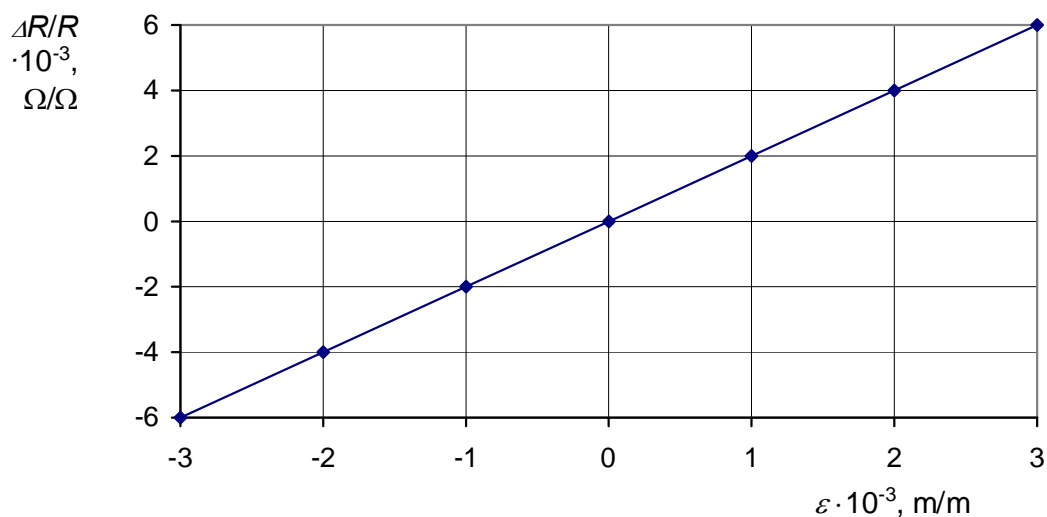
$\Delta R$  - promjena elektri nog otpora;

$R_0$  - elektri ni otpor nedeformirane trake.

Iz jednad0be 85 slijedi da je relativna promjena otpora jednaka umnozku deformacije  $\varepsilon$  i konstante  $k$ :

$$\varepsilon \cdot k = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (86)$$

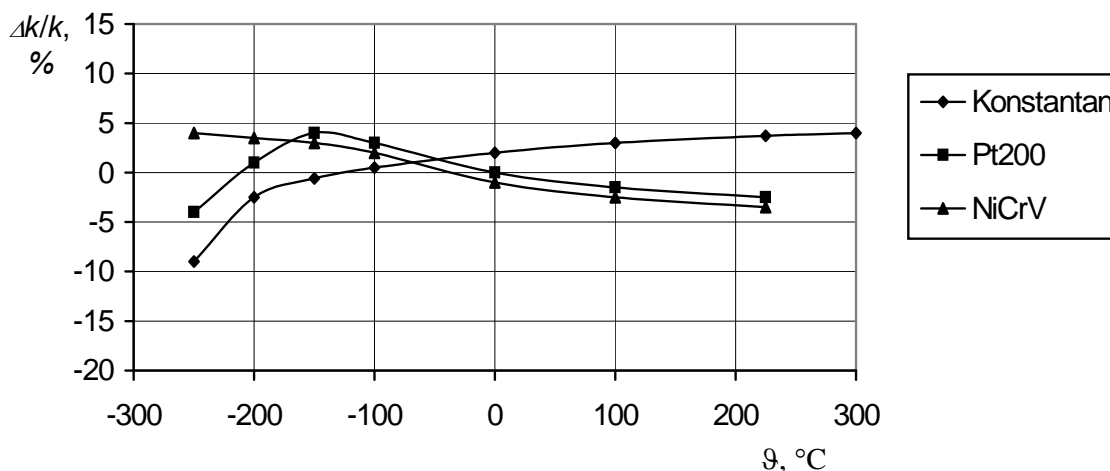
Faktor  $k$  predstavlja koeficijent pomo u kojeg se pretvara mehani ka veli ina (deformacija) u elektri nu veli inu promjene otpora. Za mjernu traku izra enu od konstantana (legura: 55 % bakra, 45 % nikla) koeficijent  $k$  iznosi 2. Odnos relativne promjene otpora i odgovaraju e iste3ljivosti je linearan, slika 68.



Slika 68. Ovisnost promjene otpora i deformacije za mjernu traku od konstantana

Uz pomo mjernog poja ala mogu e je poja ati elektri ni signal tako da se mo0e izmjerit deformacija od svega 0,01  $\mu\text{m}$ .

Vrijednost faktora  $k$  ne smije se mijenjati s promjenom okoliznje temperature, slika 69. Promjenom koeficijenta  $k$  mijenjala bi se i vrijednost deformacije koja odgovara odre enoj promjeni otpora mjerne trake.



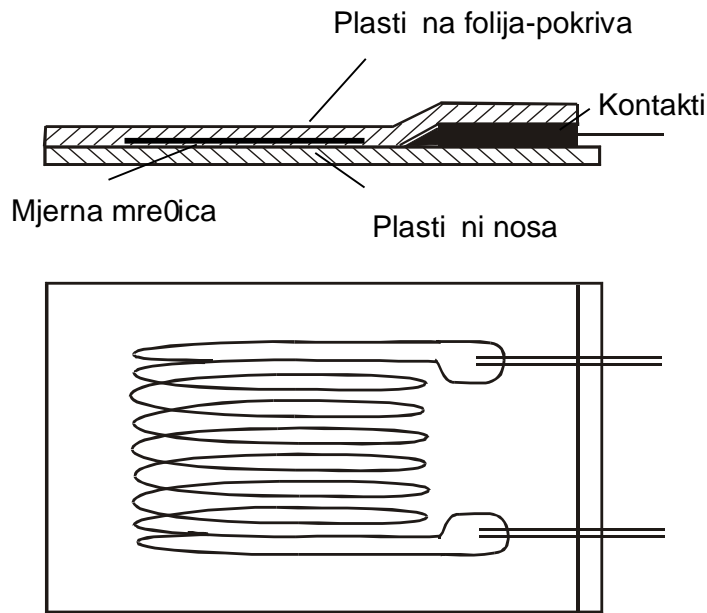
Slika 69. Utjecaj temperature na relativnu promjenu koeficijenta  $k$

Stoga su za mjerne trake podesni materijali s malom promjenom koeficijenta  $k$ . Za sva tri materijala prikazana na slici 69 o ito je da faktor  $k$  vrlo malo varira promjenom temperature te je mogu e mjeriti deformacije u zirokom podru ju temperatura od -250 °C pa sve do +300 °C ako se radi o konstantanu. U svakom slu aju za materijal mjerne trake treba odabrati onaj koji e za odre enu temperaturu primjene pokazivati najmanju promjenu koeficijenta  $k$ .

Starije izvedbe DMS-a bile su na injene od 0ice za otpornike promjera 15 μm do 25 μm, a novije izvedbe danas se rade iz tankih folija debljine 3 μm do 5μm postupkom nagrivanja metalnih folija kiselinom.

DMS mjerne trake mjere deformaciju (istezanje ili sabijanje) tako da su vrsto priljepljene na povrzini uzorka ili strojnog dijela. Pri vrz uju se naj ez e ljepilom, a rije e to kastim zavarivanjem ili plamenim ztrcanjem. S donje strane mjerne mre0ice nalazi se plasti ni nosa , a s gornje strane plasti na folija, slika 70.





Slika 70. Mjerna traka

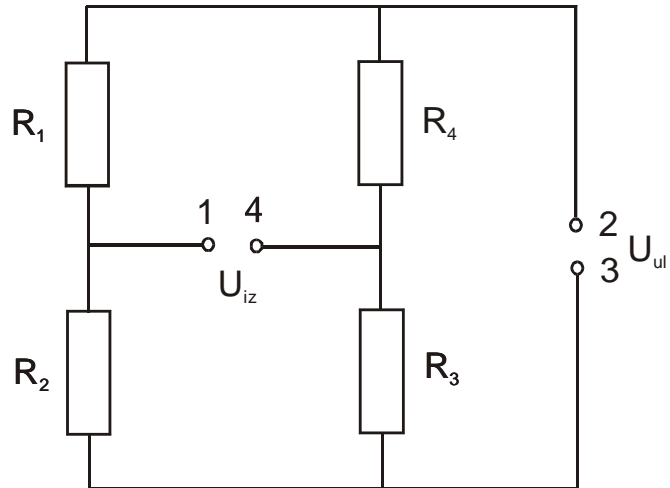
Mjerne trake se mogu koristiti i bez gornje plasti ne folije u slu aju da mjere deformacije vrlo tankih objekata ili deformacije elasti nih materijala, materijala s vrlo niskim modulom elasti nosti, kakvi su npr. polimeri.

Sredstva za u vrz ivanje traka op enito se mogu podijeliti na slijede a:

- dvokomponenta organska ljepila (podru je primjene:  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+280\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- kerami ki kit (podru je primjene:  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- plameno ztrcanje (podru je primjene:  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

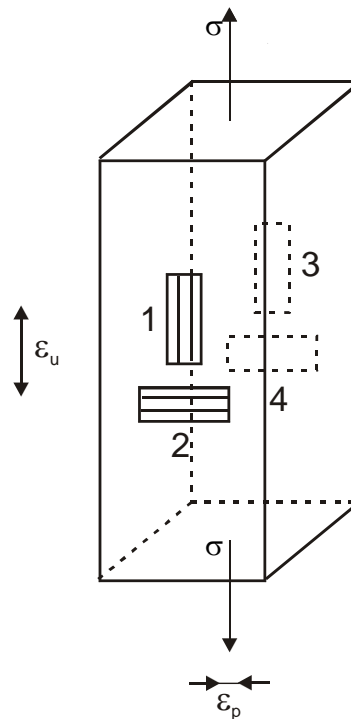
DMS mjerne trake mjere ukupnu deformaciju predmeta, dakle ne samo deformaciju koja nastaje djelovanjem mehani kog optere enja ve i toplinsku deformaciju uslijed zagrijavanja ili hla enja. Stoga je potrebno anulirati iznos deformacije koji odgovara toplinskoj dilataciji zto se posti0e primjenom tzv. temperaturno kompenziraju ih DMS mjernih traka.

DMS trake priklju uju se kao otpornici u Wheatstonov most, slika 71.



Slika 71. Wheatstonov most

Na slici 72 prikazan je raspored 4 mjerne trake spojene u puni Wheatstonov most i vrsto naljepljene na vlačno napregnuti ztapu.



Slika 72. Položaj mjernih traka na vlačno napregnutom ztapu

Mjerne trake 1 i 3 mjere uzdužnu deformaciju predmeta ( $\epsilon_u$ ), a trake 2 i 4 poprečnu deformaciju ( $\epsilon_p$ ). Zbog deformacije traka i relativne promjene njihova otpora mijenja se

vrijednost izlaznog napona s Wheatstonova mosta, te se omjer izlaznog ( $U_{iz}$ ) i ulaznog napona ( $U_{ul}$ ) može izraziti jednadžbom:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (87)$$

Pozitivna promjena otpora u trakama 1 i 3 posljedica je rastezanja traka, a negativna promjena u trakama 2 i 4 rezultat je njihova sabijanja. Budući da se relativna promjena otpora može izraziti umnožkom deformacije  $\varepsilon$  i konstante  $k$  (86) slijedi:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (88)$$

Uvođenjem Poissonove konstante  $\nu$  poprečne deformacije predmeta može se izraziti preko uzdužne deformacije te se izraz (88) može pisati u obliku:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u) + \varepsilon_u - (-\nu \cdot \varepsilon_u)] \quad (89)$$

Ako je  $\nu = 0,3$  slijedi:

$$\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{k}{4} \cdot 2,6 \cdot \varepsilon_u \quad (90)$$

Premda se DMS mjerne trake koriste i kod ispitivanja deformacija u laboratorijskim mjerenjima najznačajniji segment njihove primjene je ispitivanja na gotovim izradcima. Stoga se često koriste za mjerenje deformacija (naprezanja) u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, industriji željeznih vozila te brodogradnji.

Prednosti DMS traka:

- mogućnost mjerenja deformacija na daljinu;
- male dimenzije, mala masa;
- mogućnost mjerenja deformacija, a time i naprezanja u uvjetima visokofrekventnog dinamičkog opterećenja;

- skoro nikakva inertnost;
- mogućnost mjerenja deformacija na vrlo malim objektima ili strojnim dijelovima;
- mogućnost mjerenja deformacija u uvjetima visoke temperature (do 1000°C).

Nedostaci:

- relativno visoki troškovi;
- složen posao postavljanja i ljepljenja trake;
- potreba za mjernim pojačalom u svrhu registracije i pojačanja električnog signala.

### **10.5. Kvalitativne metode određivanja naprežanja**

Optička tenzometrija ili fotoelasticimetrija osnovana je na principu fotoelastičnih svojstava nekih polimernih materijala. Prolaskom monokromatskog snopa svjetlosti kroz dvolomac (polaroid) dolazi do razdvajanja svjetlosti na različite valne dužine. Tako se na deformiranom uzorku mogu vidjeti strujnice rasporeda naprežanja. Postoje dvije varijante korištenja ove pojave:

1. Izrada modela od polimernog materijala fotoelastičnih svojstava (prototipna ispitivanja);
2. Prevlanjenje gotovog izradka (uzorka) tankim filmom polimernog materijala pri čemu se promatra reflektirana svjetlost (Photostress).

## LITERATURA

- [1] M. Franz: Mehani ka svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje . Zagreb, 1998.
- [2] S. Figliola, D.E. Beasley: Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [3] ori , Danko; Filetin, Tomislav: **Materijali u zrakoplovstvu** / Pustai , Dragan (ur.) Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveu ilizta u Zagrebu, 2012.
- [4] Hornbogen E.:Werkstoffe, 6.Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.
- [5] Alar, željko: **Ispitivanje materijala** // Krautov strojarski priručnik / živkovi , Josip; Raonjevi , Kuzman (ur.)Zagreb : Sajema d.o.o. Zagreb, 2009.. Str. 435-454.
- [6] Donald R. Askeland; Pradeep P. Fulay; Wendellin J. Wright: Science and engeneering of materials, Sixth edition, Cengage Learning 2010.
- [7] Filetin, Tomislav; Franz, Mladen; Španić, Miroslav; Ivuzić, Vinko: **Svojstva i karakteristike materijala - Katalog opisa**, Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [8] J. R. Davis: Tensile testing, Second edition, ASM international 2004.
- [9] Internatonal standard ISO 6892-1: Metallic materials . Tensile tsting . Part 1: Method of test at room temperature, 2009.
- [10] Filetin, Tomislav; Kovačić, Franjo; Indof, Janez: **Svojstva i primjena materijala** / Filetin, Tomislav (ur.) Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveu ilizta u Zagrebu, 2002.
- [11] Marc A. Meyers; Krishan K. Chawla: Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, 2009.
- [12] R.S. Figliola, D.E. Beasley: Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [13] William F. Smith: Principles of materials science and engineering, Second edition, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.

- [14] ISO/NP 1099: Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial force-controlled method, 2006.
- [15] ASTM E139 . 11: Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials, 2011.