

1.

Osnove čvrstoće

1.1. Pojam i vrste opterećenja

Nauka o čvrstoći proučava utjecaj vanjskih sila i momenata na ponašanje čvrstih (realnih) tijela.

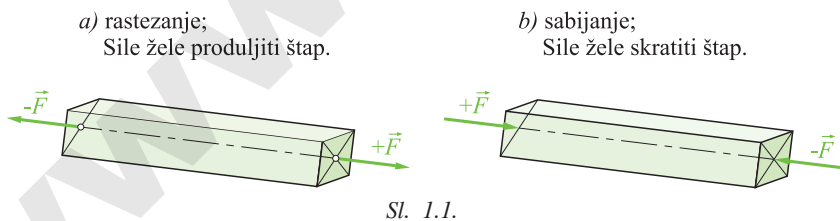
Djelovanje vanjskih sila i momenata na tijelo naziva se **opterećenje**.

Proizvoljno opterećenje tijela može zahtijevati složenu analizu naprezanja i deformacija, stoga se opterećenja svode na **osnovna opterećenja**,

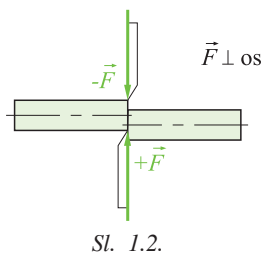
a tijelo koje se promatra je *štap* sa svojom uzdužnom osi koja je ujedno i njegova težišna os.

Ovisno o tome kako opterećenje djeluje u odnosu na os štapa postoje ove **osnovne vrste opterećenja**:

1. *osno ili aksijalno opterećenje*: djeluje u osi štapa;

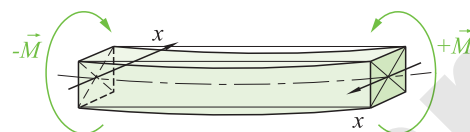


2. *opterećenje na odrez ili smično*: djeluje okomito na os štapa i želi ga prerezati;



3. opterećenje na savijanje ili fleksija:

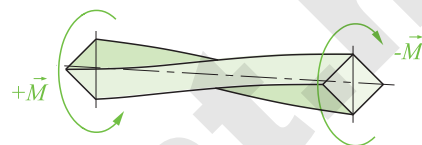
zakretanjem oko osi x nastaje savijanje štapa;



Sl. 1.3.

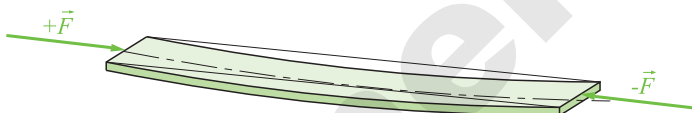
4. opterećenje na uvijanje ili torzija:

zakretanjem oko uzdužne osi štapa u suprotnim smjerovima nastaje uvijanje (sukanje) štapa;



Sl. 1.4.

5. opterećenje na izvijanje:



Sl. 1.5.

pri sabijanju dugačkih štapova male površine presjeka u odnosu na njegovu dužinu nastaje izvijanje.

Navedene vrste opterećenja mogu se pojaviti u trima oblicima:

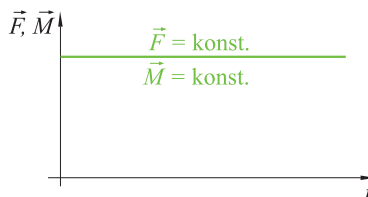
- statičkom ili mirnom;
- dinamičkom jednosmjernom obliku ili pulsiranju;
- dinamičkom dvosmjernom obliku ili osciliranju.

Statičko ili **mirno opterećenje** nastaje kada sile ili momenti tijekom vremena zadržavaju svoju veličinu pa je:

$$F = \text{konst.}$$

$$M = \text{konst.}$$

U dijagramu: opterećenje (F, M) — vrijeme (t) (sl. 1.6) predstavljeno je ravnom crtom.



Sl. 1.6. Statičko ili mirno opterećenje

Takvo opterećenje materijali najlakše podnose, pa ono može biti za 1/3 veće od dinamičkog jednosmjernog i 2/3 od dinamički dvosmjernog opterećenja.

Primjer statičkog opterećenja su različiti prednaponi: kao opterećenje postolja stroja uslijed vlastite težine, opterećenje osovine prikolice zbog vlastite težine prikolice, sabijena opruga amortizera itd.

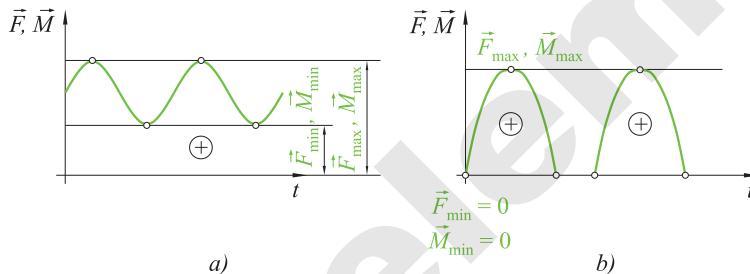
Dinamičko jednosmjerno opterećenje ili **pulsiranje** tijekom vremena mijenja veličinu, a zadržava isti smjer:

$$F \neq \text{konst.}$$

$$M \neq \text{konst.}$$

$$\text{smjer } + \text{ ili } - = \text{konst.}$$

Iz dijagrama: opterećenje — vrijeme vidi se da opterećenje koleba između minimalne i maksimalne vrijednosti, a smjer je ostao pozitivan (sl. 1.7).



Sl. 1.7. Prikazano je dinamički jednosmjerno opterećenje: a) neprekidno, b) periodično.

Pulsiranje materijali teže podnose, pa ono iznosi 2/3 statičkog opterećenja. Primjer neprekidnog pulsiranja je opterećenje vratila stepenastog mjenjača koje rotira uvijek u jednom smjeru. Primjer periodičnog pulsiranja je uža ili lanac pri dizanju tereta u radnim ciklusima.

Dinamičko dvosmjerno opterećenje ili **osciliranje** tijekom vremena mijenja veličinu i smjer:

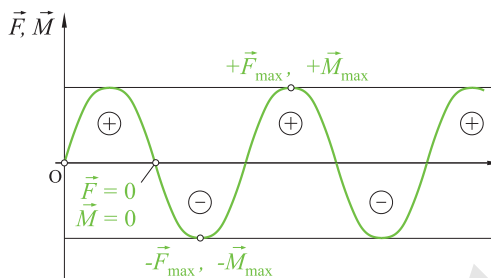
$$F \neq \text{konst.}$$

$$M \neq \text{konst.}$$

$$\text{smjer } + \text{ ili } - \neq \text{konst.}$$

Promjena veličine i smjera opterećenja vidi se iz dijagrama na slici 1.8.

Oscilatorno opterećenje je najnepovoljnije, jer najviše zamara materijal, pa on može podnijeti svega 1/3 veličine statičkog opterećenja.

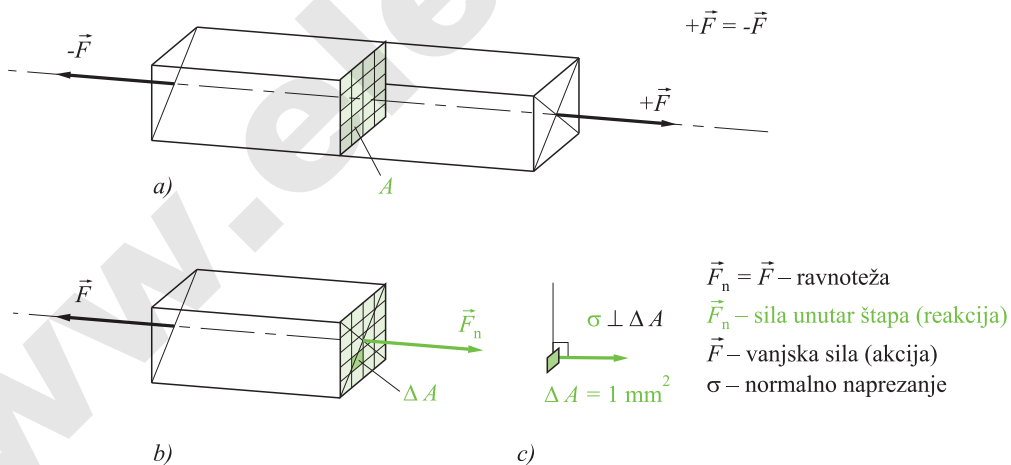


Sl. 1.8. Dinamički dvosmjerno opterećenje

To je tipično opterećenje lisnatih i zavojnih torzijskih opruga, vitalnih dijelova strojeva i uređaja pri radu, dijelova motora s unutarnjim izgaranjem itd.

1.2. Pojam i vrste napreznja

Štap na slici 1.9 opterećen je vlačnim silama $+\vec{F}$ i $-\vec{F}$.

Sl. 1.9. Štap opterećen aksijalnim vlačnim opterećenjem — normalno napreznje σ

Uslijed opterećenja $\pm\vec{F}$ štapa (sl. 1.9a)) javit će se unutar štapa **unutarnja sila \vec{F}_n**

kao reakcija na vanjsko opterećenje. Unutarnja sila \vec{F}_n drži u statičkom smislu ravnotežu s vanjskom silom \vec{F} (sl. 1.9b)) pa je:

$$\vec{F} = \vec{F}_n.$$

Maksimalna veličina sile \vec{F}_n jednaka je

veličini kohezijskih sila

između atoma i molekula materijala štapa. U slučaju da vanjske sile nadvladaju unutarnje (koheziju), tj. kada je veličina

$$F > F_n,$$

doći će do **deformacije** ili **loma** štapa na najslabijem mjestu poprečnog presjeka A.

Smisao je čvrstoće da se uspostavi ravnoteža vanjskih i unutarnjih sila i da ne dođe do trajne deformacije (loma).

Vanjske sile opterećuju štap, a unutarnje vrše naprezanje u materijalu štapa.

Ako se zamisli da se unutarnja sila \vec{F}_n jednakomjerno rasporedila po površini poprečnog presjeka A, čija se veličina matematički može izraziti kvocijentom

$$\frac{F_n}{A},$$

dobije se naprezanje štapa (sl. 1.9b)). Kod aksijalnog opterećenja naprezanje je okomito (normalno) na površinu presjeka A (sl. 1.9c)) i označava se grčkim slovom $\vec{\sigma}$ (sigma).

Kako je veličina sila

$$F_n = F,$$

stoga je konačan izraz **aksijalnog** ili **normalnog naprezanja**:

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

Jedinica za naprezanje proizlazi iz jednadžbe naprezanja:

$$\sigma = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ mm}^2} = 1 \text{ MPa} \quad (\text{megapaskal})$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} \quad (\text{paskal}), \quad 1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}.$$

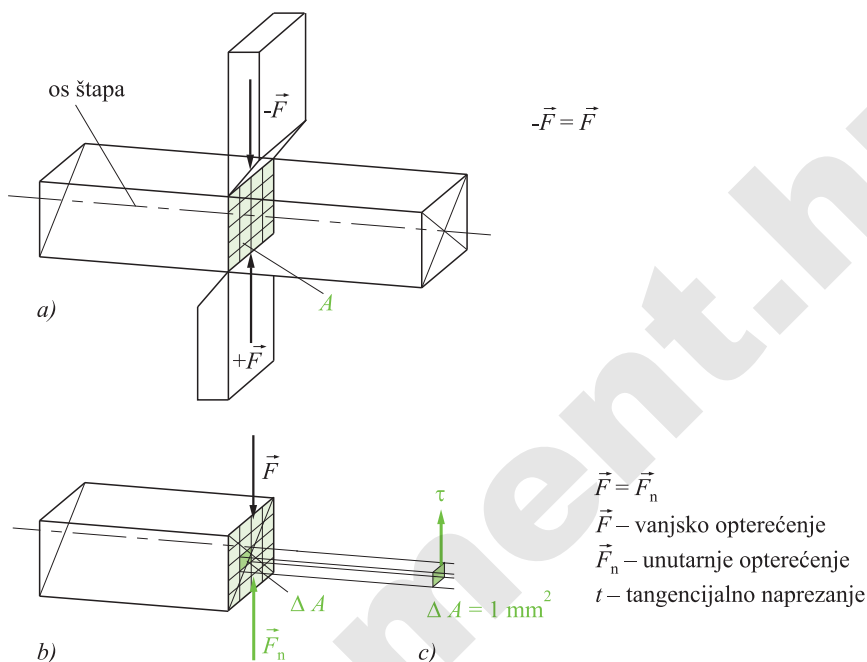
Ukoliko vanjske sile djeluju okomito na os štapa i žele ga prerezati (sl. 1.10a)) javit će se unutarnja sila \vec{F}_n koja je paralelna s poprečnim presjekom A. Podjelom unutarnje sile s površinom poprečnog presjeka dobije se

tangencijalno naprezanje

štapa (sl. 1.10b)), koje se označava grčkim slovom $\vec{\tau}$ (tau):

$$\tau = \frac{F_n}{A} = \frac{F}{A} \quad / \text{MPa} /.$$

Tangencijalno naprezanje τ leži u ravnini poprečnog presjeka (sl. 1.10c)):

Sl. 1.10. Štap opterećen smičnim opterećenjem — tangencijalno naprezanje τ

Sažetak

Vanjske sile i momenti vrše opterećenje štapa.

Sile u štapu su unutarnje sile. Javljaju se kao reakcija na vanjske i predstavljaju kohezijsku silu materijala štapa.

Unutarnje sile vrše naprezanje štapa.

Naprezanje je kvocijent između unutarnje sile i površine poprečnog presjeka.

Kod normalnog naprezanja unutarnja je sila okomita na površinu poprečnog presjeka:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad / \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ ili MPa} \quad / \quad \rightarrow \vec{F} \perp A.$$

Kod tangencijalnog naprezanja unutarnja sila je paralelna s površinom poprečnog presjeka:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad / \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ ili MPa} \quad / \quad \rightarrow \vec{F} \parallel A.$$

U skladu s opterećenjem u štapu javit će se sljedeća vrsta naprezanja:

1. normalno ili aksijalno (vlačno i tlačno),
2. tangencijalno ili smično (odrez).

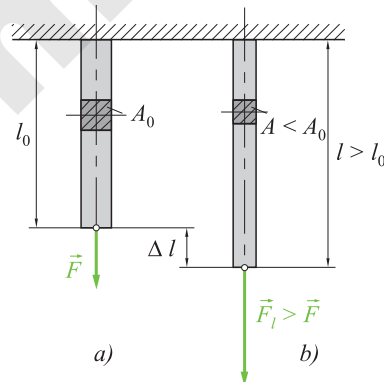
Pri ostalim opterećenjima javljaju se kombinacije normalnog i tangencijalnog naprezanja pa treba rabiti terminologiju:

- naprezanje pri savijanju σ_s ;
- naprezanje pri uvijanju σ_u ;
- naprezanje pri izvijanju σ_i .

1.3. Pojam čvrstoće i deformacije

Štap početne duljine l_0 i poprečnog presjeka A_0 na gornjem kraju je učvršćen, a na donjem opterećen silom \vec{F} (sl. 1.11a) te se isteže.

Vrijednost sile \vec{F} tijekom vremena raste i mjeri se, tako da je u svakom trenutku vremena poznata veličina opterećenja štapa. Uslijed opterećenja štap će se u nekom vremenu t za vrijednost sile \vec{F}_t produžiti za određenu veličinu Δl , koja se također mjeri pa se točno zna njezina veličina za vrijednost sile (sl. 1.11b)).



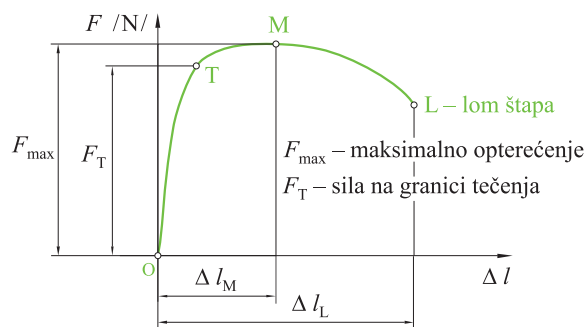
Sl. 1.11. Vlačno opterećenje štapa rastućom silom F u tijeku vremena t

Produljenje štapa Δl /mm/ naziva se **apsolutno produljenje**.

Opterećenje štapa i u skladu s njim produljenje, traje sve do njegovog loma.

Opisani pokus može se prikazati dijagramom opterećenje F /N/ — apsolutno produljenje Δl /mm/ (slika 1.12). U njemu su označene točke koje imaju sljedeće značenje:

- O — početak opterećenja;
- T — granica tečenja;
- M — maksimalno opterećenje;
- L — lom štapa.



Sl. 1.12. Dijagram opterećenja F i apsolutnog produljenja Δl

Iz dijagrama $F-\Delta l$ vidi se da do točke T (granice tečenja) apsolutno produljenje raste puno sporije od opterećenja. Kada opterećenje dosegne vrijednost veću od unutarnjih kohezijskih sila u materijalu, dolazi do popuštanja pa će apsolutno produljenje od točke T do M rasti brže od porasta opterećenja. U točki M je opterećenje doseglo svoju najveću vrijednost F_{\max} , te nakon toga slijedi njegov pad do točke L kada će se štap i fizički razdvojiti (slomiti).

Čvrstoća štapa određena je kvocijentom maksimalnog opterećenja i početne površine poprečnog presjeka štapa, a označava se velikim slovom R i indeksom m (R_m^1):

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad / \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} /$$

čvrstoća materijala = $\frac{\text{maksimalno opterećenje}}{\text{početna površina poprečnog presjeka}}$

Za primjenu materijala jako je važno znati njegovu

čvrstoću na granici tečenja:

$$R_T = \frac{F_T}{A_0} \quad / \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} /$$

gdje je:

R_T / $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ / — čvrstoća na granici tečenja²;

F_T / N / — opterećenje na granici tečenja;

A_0 / mm^2 / — početna površina poprečnog presjeka.

Štap će u opisanom pokusu imati

uzdužnu i poprečnu deformaciju.

Uzdužna deformacija se očituje u njegovom produljenju početne dužine l_0 na neku konačnu l , za neku vrijednost Δl :

$$\Delta l = l - l_0 \quad / \text{mm} /$$

U čvrstoći se uzdužna deformacija često izražava kao kvocijent apsolutnog produljenja i početne duljine, te naziva

relativno produljenje:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

¹ ranija oznaka σ_M

² ranija oznaka σ_R

Relativno produljenje ε (epsilon) nema dimenzije, a može se izraziti postotkom:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \% .$$

Poprečna će se deformacija očitovati u smanjenju površine poprečnog presjeka. Početna površina A_0 će se smanjiti za vrijednost ΔA na konačnu površinu presjeka A :

$$\Delta A = A_0 - A \quad / \text{mm}^2 / .$$

Vrijednost ΔA je apsolutno suženje poprečnog presjeka štapa.

Konačno, površina presjeka A uzima se na mjestu prijeloma štapa. Poprečna deformacija može se izraziti kao **relativna deformacija** (**relativno suženje** ili **kontrakcija**):

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta A}{A_0} ,$$

ili u postotku:

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100 \% .$$

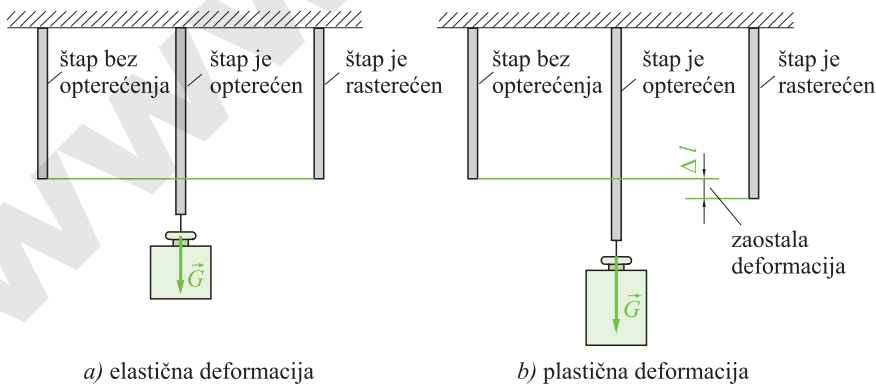
Dužinske i poprečne deformacije mogu se javiti u **elastičnom** i **plastičnom području**

dijagrama ispitivanja $F-\Delta l$. Ta područja dijeli granica tečenja T , pa su sve deformacije od točke:

O-T — elastične deformacije;

T-L — plastične deformacije.

Elastične i plastične deformacije prikazuje slika 1.13a) i b).



Sl. 1.13. Elastična i plastična deformacija

Iz slika 1.13a) i b) slijedi:

Kod elastične deformacije štap nakon rasterećenja poprima svoj prvobitan oblik i veličinu.

Kod plastične deformacije štap nakon rasterećenja trajno mijenja oblik i veličinu.

Elastični materijali će u dijagramu $F-\Delta l$ imati velik razmak između točaka O–T (granice tečenja) i pogodni su za

konstrukcije,

npr., mostova, dizalica, brodova, naftnih i plinskih platformi, strojeva, prometala itd.

Plastični materijali imaju kraći razmak od točke O do T, tj. granice tečenja, pa su pogodni za

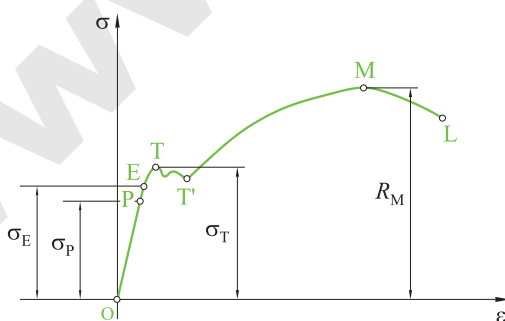
plastičnu obradu metala,

kao kovanje, valjanje, duboko izvlačenje, vučenje i sl.

1.4. Dijagram: naprezanje — relativno produljenje

Pri ispitivanju čvrstoće R_m materijala, svojstva materijala mogu se zorno vidjeti iz dijagrama: naprezanje — relativno produljenje ($\sigma-\varepsilon$) (sl. 1.14).

Ispitivanje je standardizirano međunarodnim ISO normama. Iz materijala čija se čvrstoća ispituje izradi se epruveta standardnog oblika i dimenzija i pričvrsti u kidalicu. Aktiviranjem kidalice počne ispitivanje³. Kidalica ima uređaj koji iscrta dijagram ispitivanja.



Sl. 1.14. Dijagram $\sigma-\varepsilon$ za mekani čelik

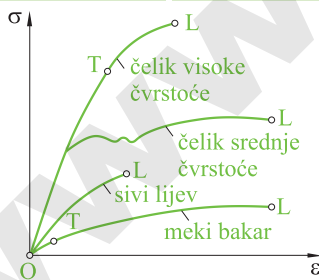
Za mekani čelik dijagram ispitivanja $\sigma-\varepsilon$ ima oblik kao na slici 1.14.

- O — početak ispitivanja;
- P — granica proporcionalnosti;
- E — granica elastičnosti;
- T — gornja granica tečenja ili čvrstoća na granici tečenja;
- T' — donja granica tečenja;
- M — maksimalno naprezanje ili čvrstoća materijala;
- L — lom epruvete (štapa).

³ Način ispitivanja čvrstoće materijala obrađuje se u predmetu Tehnički materijali.

Značenje karakterističnih točaka u dijagramu $\sigma-\varepsilon$

Točka	Ponašanje materijala	Oznaka graničnog naprezanja
P = granica proporcionalnosti	Do te točke naprezanje je proporcionalno deformaciji. Za koliku se vrijednost poveća sila u proporcionalnom odnosu, povećat će se i produljenje. Do te točke vrijedi Hookeov ⁴ zakon proporcionalnosti.	$\sigma_P = \frac{\text{sila na granici } P}{\text{početna površina presjeka}}$
E = granica elastičnosti	Do ove točke materijal zadržava svoju elastičnost. Nakon rasterećenja poprimit će početnu duljinu l_0 i oblik.	$\sigma_E = \sigma_{0,01}^5 = \frac{\text{sila na granici } E}{\text{početna površina presjeka}}$
T = gornja granica tečenja	Prijeđe li se točka E, materijal će vrlo brzo “popustiti” te će do donje granice tečenja T' deformacija ε rasti i kada naprezanje pada. Nakon rasterećenja materijal više neće imati početnu duljinu l_0 , već će biti trajno produljen (deformiran).	$\sigma_T = \sigma_{0,2}^6 = \frac{\text{sila na granici } T}{\text{početna površina presjeka}}$ ranija oznaka σ_R
M = čvrstoća materijala	Prelaskom točke T' dolazi do “ojačavanja” materijala te je za njegovo daljnje deformiranje potreban porast opterećenja. Ono raste do točke M, a zatim pada, jer je na mjestu budućeg presjeka površina A sve manja.	$R_m = \frac{\text{maksimalna sila}}{\text{početna površina presjeka}}$ ranija oznaka σ_m

Sl. 1.15. Usporedni dijagram $\sigma-\varepsilon$ za neke materijale

Za svaki se materijal ispitivanjem može dobiti dijagram $\sigma-\varepsilon$ pa se njegovom usporedbom mogu odrediti svojstva i primjena. Na slici 1.15 prikazan je dijagram $\sigma-\varepsilon$ za materijale koji se najčešće koriste.

O–T — elastične deformacije

T–L — plastične deformacije

⁴ izg. Hukov

⁵ Granice elastičnosti je teško odrediti pa se uzima tehnička granica elastičnosti. Ona nastaje pri opterećenju u kojem nastaju trajne deformacije u vrijednosti 0,01 do 0,05 % u odnosu na prvobitnu duljinu epruvete l_0 , pa je naprezanje na granici elastičnosti označeno s $\sigma_{0,01}$.

⁶ Donja granica tečenja je određena naprezanjem pri kojemu nastaje trajno produljenje od 0,2 % prvobitne dužine štapa pa je oznaka naprezanja na granici tečenja $\sigma_{0,2}$.

Iz dijagrama se vidi da čelik visoke čvrstoće nije pogodan za plastičnu obradu, npr. valjanjem, jer je granica tečenja T vrlo visoko, a područje plastičnih deformacija kratko. No, zato on ima vrlo veliko područje elastičnih deformacija, pa je pogodan za primjenu u konstrukcijama.

Meki bakar ima granicu tečenja T vrlo nisko i veliko područje plastičnih deformacija pa je pogodan za plastičnu obradu, ali se ne smije primijeniti za konstrukcije, jer mu je čvrstoća mala.

1.5. Dopušteno naprezanje i koeficijent sigurnosti

Svaki dio strojarske konstrukcije zadržava svoju funkciju ako je opterećen do **granice elastičnosti**.

Pređe li se ta granica, strojni dio će se trajno deformirati ili će nastupiti njegov lom. Stoga je temelj za dimenzioniranje elemenata svake konstrukcije manje naprezanje od čvrstoće na granici tečenja R_T ili čvrstoće materijala R_m .

Naprezanje koje je manje od čvrstoće R_T i R_m naziva se **dopušteno naprezanje**,

ili to je ono naprezanje koje će u konstrukciji uzrokovati samo **elastične deformacije**, a nosi oznaku za naprezanje:

- na vlak: $\sigma_{v,dop}$
- na tlak: $\sigma_{t,dop}$
- na smik: $\tau_{o,dop}$
- pri savijanju: $\sigma_{s,dop}$
- pri uvijanju: $\tau_{u,dop}$
- pri izvijanju: $\sigma_{i,dop}$.

Dopušteno naprezanje za elastične materijale s izrazitom granicom tečenja:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_T}{\nu}; \quad \nu = 1, 2 \text{ i } 2,1$$

Dopušteno naprezanje za krte materijale:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_m}{\nu}; \quad \nu = 2, 0 \text{ i } 5,0$$

Dopušteno naprezanje je manje od čvrstoće R_T ili R_m za vrijednost **koeficijenta sigurnosti ν (mi)**.

Veći koeficijent sigurnosti treba odabrati kada su elementi visoko opterećeni i prijeti opasnost od loma te kada opterećenja ne mogu do kraja biti jasno definirana.

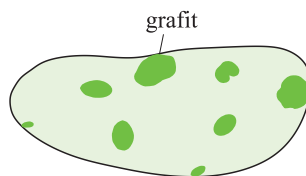
Vrijednosti dopuštenih napreznja za neke materijale navedena su u tablici na sljedećoj stranici. U tablici su rimskim brojevima označena opterećenja:

- I. — statičko
- II. — dinamičko jednosmjerno
- III. — dinamičko dvosmjerno.

Materijal		čelik	čelik	čelični lijev	lijevano željezo	lijevana bronca	strojarska bronca	mjed valjana
Čvrstoća materijala R_m /N/mm ² /		300–500	500–700	360–600	135–175	200–250	180–220	200–300
Vlak σ_{vd} /MPa/	I.	90–150	120–180	60–120	30–35	40–50	30–40	40–60
	II.	60–100	80–120	40–80	20–23	27–33	20–27	27–40
	III.	30–50	40–60	20–40	10–12	13–17	10–13	13–20
Tlak σ_{td} /MPa/	I.	90–150	120–180	90–150	90–100	40–50	30–40	40–60
	II.	60–100	80–120	60–100	60–66	27–33	20–27	27–40
Specifičan pritisak p /MPa/	I.	80–100	100–150	80–100	70–80	30–40	25–35	30–45
	II.	53–67	70–100	53–67	47–53	20–27	17–23	27–30
	III.	27–33	35–50	27–33	23–27	10–13	8–12	13–15
Savijanje σ_{sd} /MPa/	I.	90–150	120–180	75–120	30–40	40–50	60–90	40–60
	II.	60–100	80–120	50–80	ovisi o obliku presjeka	27–33	40–60	27–40
	III.	30–50	40–60	25–40		13–17	20–30	13–20
Smik τ_{vd} /MPa/	I.	72–120	96–144	48–96	30–35	—	45–70	32–48
	II.	48–80	64–96	32–64	20–23	—	30–47	21–32
	III.	24–40	32–48	16–32	10–12	—	15–23	11–16
Uvijanje τ_{ud} /MPa/	I.	60–120	90–144	48–96	20–35	30–40	45–70	32–48
	II.	40–80	60–96	32–64	ovisi o obliku presjeka	20–27	30–47	21–32
	III.	20–40	30–48	16–32		10–13	15–23	11–16

Tablica 1. Dopuštena naprezanja

Iz tablice je vidljivo da lijevano željezo (sivi lijev) nema visoku čvrstoću na vlak, ali zato ima veliku tlačnu čvrstoću. Zbog toga su dopuštena tlačna naprezanja tri puta veća od vlačnih. Razlog tome je veliki sadržaj ugljika izlučen u obliku grafitnih listića ili zrnaca (sl. 1.16).



Sl. 1.16. Grafitna zrnca SL daju krtost

Iz tablice je također vidljivo da za statičko opterećenje žilavih materijala (čelika)

vrijedi:

$$\sigma_{\text{vdop}} = \sigma_{\text{tdop}},$$

a odnos dopuštenih naprezanja i čvrstoće je:

$$\sigma_{\text{dop}} = (0,4 - 0,6)R_m \quad \left/ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right/.$$

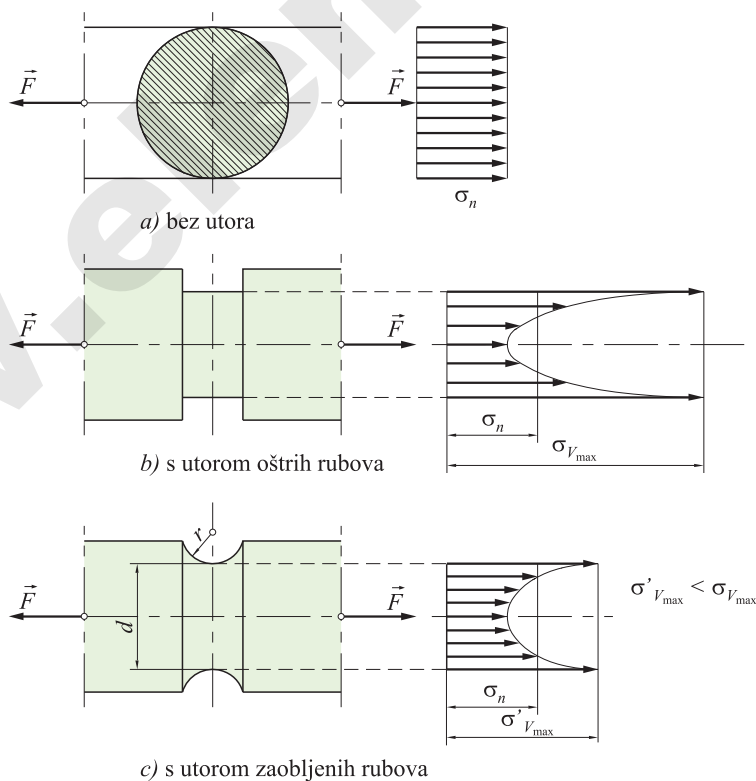
Čvrstoće aksijalnih naprezanja R_m i tangencijalnih naprezanja τ_m stoje u međusobnom odnosu:

— za čelik: $\tau_m = 0,85R_m$

— za SL: $\tau_m = 1,1R_m$.

Utjecaj utora i naglih promjena presjeka

Na dovoljnoj udaljenosti od djelovanja koncentrirane sile $-\vec{F}$, naprezanje će se po čitavoj površini presjeka rasporediti jednoliko s prosječnom vrijednosti σ_n kao na slici 1.17a).



Sl. 1.17. Usporedba naprezanja

Ako je štap izveden s utorom kao na slici 1.17b), tada raspored naprezanja na mjestu presjeka gdje je izveden utor neće biti ni približno jednolik, bez obzira na kojoj se udaljenosti od djelovanja koncentrirane sile utor nalazi. Iz dijagrama na slici 1.17b) se vidi da će se na dnu utora naprezanje višestruko povećati, a idući prema središnjoj osi presjeka ono će se parabolično smanjivati.

To višestruko povećanje naprezanja na dnu utora naziva se **koncentracija naprezanja**, σ_{\max} . Tako velika naprezanja mogu prekoračiti dopuštena i dovesti do loma ili trajne deformacije strojnog dijela ili konstrukcije.

Ispitivanja su pokazala da se koncentracija naprezanja na dnu utora smanjuje ako utor nema oštre bridove.

Utor na slici 1.17c) je izveden s nekim radijusom r . Za isto opterećenje štapa koncentracija naprezanja σ_{\max} ovdje će se smanjiti. Isti efekt postiže se pri postupnom prijelazu s manjeg na veći promjer kod osovina, vratila i ostalih strojnih dijelova i kućišta.

Iz slika 1.17a) i b) vidi se da se naprezanje na dnu utora povećalo i ono iznosi

$$\sigma_{\max} = \beta_k \cdot \sigma_n \leq \sigma_{\text{dop}},$$

gdje je:

- β_k — konstruktivni faktor dobiven ispitivanjima,
- σ_n — naprezanje u dijelu štapa bez utora.

Kod oštih rubova konstruktivni faktor se kreće u granicama:

$$\beta_k = 6,20 \text{ do } 6,5.$$

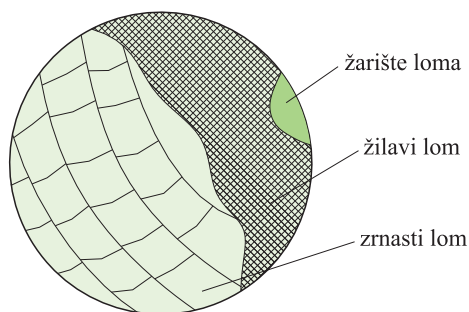
Zamor materijala

Dinamička opterećenja, a posebno dinamička dvosmjerna ili oscilatorna opterećenja imaju nepovoljan utjecaj na materijale. Takvo opterećenje dovodi do **zamora materijala** što rezultira lomom i kod naprezanja koja su bitno manja od njegove čvrstoće R_m .

Smanjenje čvrstoće materijala uslijed oscilatornog opterećenja nazivamo zamorom materijala.

Sposobnost materijala da se opire lomu uslijed dinamičkih oscilatornih opterećenja zove se dinamička izdržljivost materijala.

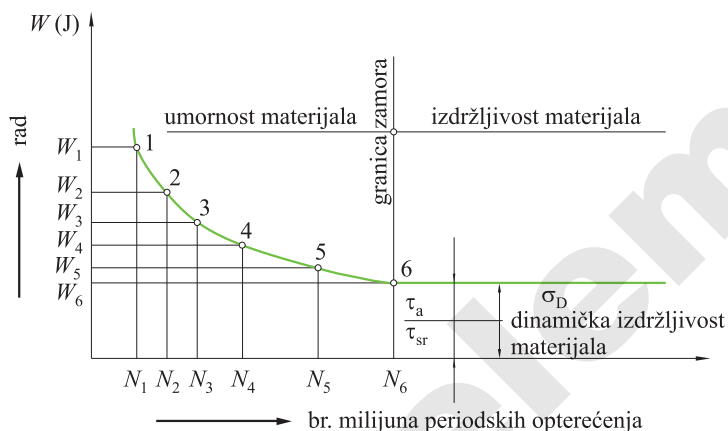
Ispitivanja su pokazala da pri oscilatornom opterećenju lom nastaje u 10 do 20 % slučajeva zbog preopterećenja, a većinom zbog pukotina koje nastaju zbog nehomogenosti strukture materijala. Te pukotine nazivamo **pukotinama zamora**.



Sl. 1.18. Izgled loma uslijed zamora materijala

Slika 1.18 nam pokazuje karakteristični izgled loma uslijed zamora materijala.

Dinamičku izdržljivost materijala ispitivao je inž. Wöhler (izg. *Veler*). On je ispitivanjem odredio granicu zamora materijala, što se vidi na dijagramu (sl. 1.18).

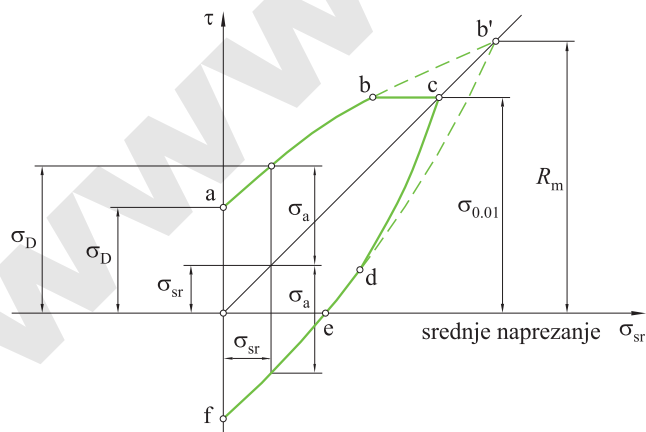


Sl. 1.19. Wöhlerov dijagram dinamičke izdržljivosti materijala

Iz njega je vidljivo mjesto gdje krivulja prelazi u pravac. To je **granica zamora**. Ona je različita za različite materijale. Iza granice zamora nastupa dinamička izdržljivost te on više ne puca ni nakon višemilijunskih periodičnih opterećenja.

Također je vidljivo da je dinamička izdržljivost ordinata do ravnog dijela Wöhlerove krivulje, σ_D .

Na osnovu Wöhlerovih dijagrama konstruiraju se dijagrami dinamičke čvrstoće materijala koji su poznati pod nazivom Smithovi (izg. *Smitovi*) dijagrami, slika 1.20.



Sl. 1.20. Smithov dijagram dinamičke čvrstoće materijala

- R_m — čvrstoća materijala
- $\sigma_{0,01}$ — naprezanje na granici elastičnosti
- σ_a — amplitudno naprezanje
- σ_{sr} — srednje naprezanje

Krivulja abc je gornja granica dinamičkog naprezanja, a donji dio krivulje c, d, e, f daje donju granicu dinamičkog naprezanja.

Područje unutar krivulja abc i cdef predstavlja područje izbora opterećenja, koje kod materijala izloženog oscilatornom opterećenju neće dovesti do loma.