

1.

Nauka o čvrstoći

Nauka o čvrstoći je dio tehničke mehanike koja proučava ravnotežu između vanjskih i unutarnjih sila u materijalu te deformacije materijala koje pri tome mogu nastati.

Nauka o čvrstoći materijala omogućuje da u skladu s namjenom, uvjetima i veličinom opterećenja neke konstrukcije, odredimo najpovoljniji oblik i dimenzije elemenata konstrukcije.

1.1. Temeljni pojmovi nauke o čvrstoći, pojam i vrste opterećenja i naprezanja

1.1.1. Kruta i čvrsta tijela

Kruta tijela su zamišljena tijela koja se ne mogu deformirati pod utjecajem vanjskih sila. Takvih tijela u prirodi nema, ali su zamišljena radi toga da se lakše odredi ravnoteža vanjskih sila u statici i da se olakša proučavanje zakonitosti gibanja u kinematici.

U prirodi postoje *čvrsta tijela*. To su sva tijela koja se pod utjecajem vanjskih sila mogu deformirati, tj. promijeniti svoj oblik i dimenzije. Predmet proučavanja nauke o čvrstoći su realna ili čvrsta tijela. Ako smatramo da su čvrsta tijela idealna, tada ona imaju sljedeća svojstva:

- a) *neprekidnost ili kontinuiranost* — to znači da su molekule i atomi tijela jednoliko i neprekinuto raspoređeni po njegovom čvrstom volumenu;
- b) *homogenost* — pod time se podrazumijeva da su svojstva tijela u svim točkama njegova volumena jednaka;
- c) *zakonitost između naprezanja i deformacija* — između naprezanja i deformacija tijela postoji određena zakonitost bez obzira na njegov oblik, dimenzije i materijal.

Ovdje je potrebno istaknuti da čvrsta tijela prema tome mijenjaju li ili ne elastična ili neka druga svojstva ovisno o pravcu opterećenja, mogu biti:

- a) *izotropna* — svojstva čvrstog tijela su u svim pravcima ista;
- b) *anizotropna* — svojstva čvrstog tijela se mijenjaju ovisno o pravcu djelovanja opterećenja (npr. anizotropan materijal je drvo jer ima različita svojstva u pravcu vlaknaca od svojstva opterećenja okomitih na njih).

Nauka o čvrstoći proučava izotropna čvrsta tijela. Ukoliko bude primjenjen anizotropan materijal u nekoj konstrukciji, posebno će biti naglašeno njegovo svojstvo u promatranom pravcu opterećenja.

1.1.2. Podjela idealnih čvrstih tijela

Prema mehaničkim svojstvima koja su jako važna za različite konstrukcije, idealna čvrsta tijela su svrstana u tri grupe:

- a) *elastična* — nakon prestanka djelovanja vanjskih sila ta tijela se u potpunosti vraćaju na početni oblik i veličinu;
- b) *plastična* — nakon prestanka djelovanja vanjskih sila ta tijela se ne vraćaju na početni oblik i veličinu, već nastaju trajne plastične deformacije;
- c) *visokoelastična* — to su ona tijela kod kojih uslijed djelovanja vanjskih sila (opterećenja) nastaje pojava *puzanja* ili *relaksacije*.

Puzanje je pojava gdje pri konstantnom opterećenju nastaju trenutne deformacije tijela koje s vremenom rastu.

Opadanje unutarnjih sila tijekom vremena pri deformaciji viskoelastičnih tijela nazivamo relaksacija (opadanje naprezanja).

1.1.3. Čvrstoća, krutost i elastična stabilnost konstrukcije

Budući da se u Nauci o čvrstoći obrađuje čvrstoća, krutost i stabilnost konstrukcija ili njezinih dijelova, navest ćemo definicije tih pojmova.

Pod pojmom *čvrstoća konstrukcije*¹ ili *njenog dijela*, podrazumijevamo *spособnost prenošenja opterećenja bez loma*.

Krutost konstrukcije je njezina otpornost na deformiranje. Ako se neka konstrukcija pod određenim opterećenjem manje deformira, njena je krutost veća i obrnuto.

Elastična stabilnost konstrukcije je njena sposobnost da zadrži početni ravnotežni oblik.

Iz toga proizlazi da svaka konstrukcija ili njezin dio mora zadovoljavati uvjete čvrstoće, krutosti i stabilnosti.

Uvjet čvrstoće znači da najveća naprezanja u konstrukciji moraju biti manja od čvrstoće materijala.

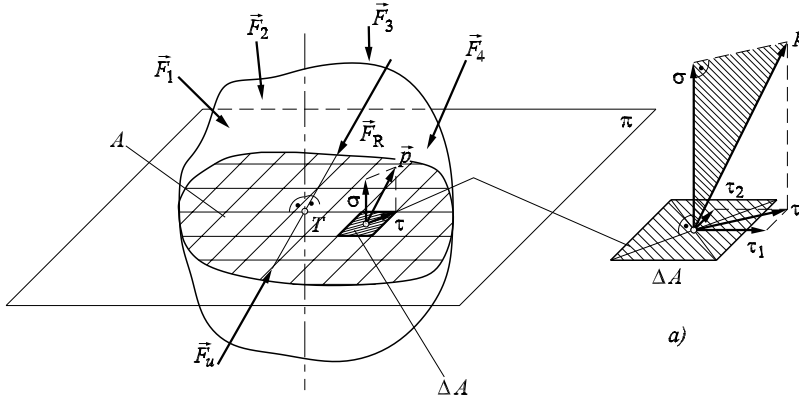
Uvjet krutosti zahtijeva da najveće deformacije konstrukcije budu u okviru dopuštenih granica.

Uvjet stabilnosti znači da konstrukcija bez obzira na naprezanje, poprima uvijek stabilni oblik ravnoteže.

¹ Ovdje treba razlikovati pojmove čvrstoće konstrukcije i čvrstoće materijala.

1.1.4. Pojam opterećenja i naprezanja

Sustav vanjskih sila koje djeluju na neko tijelo, sl. 1.1, nazivamo opterećenjem.



Sl. 1.1.

Djelovanje vanjskih sila se može zamijeniti njihovom rezultantom:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \dots + \vec{F}_i.$$

Ravnotežu opterećenja \vec{F}_R po zakonu akcije i reakcije čini unutarnja sila \vec{F}_u koja je po pravcu i modulu jednaka vanjskoj sili, ali je suprotnog smjera:

$$\vec{F}_u = \vec{F}_R,$$

Ako tijelo na bilo kojem mjestu presječemo s ravninom π okomitom na njegovu os, dobijemo površinu A . Nju razdjelimo na jediničnu površinu ($\Delta A = 1 \text{ mm}^2$). Radi jednostavnosti pretpostavimo da se unutarnja sila \vec{F}_u jednoliko rasporedila po čitavoj površini A , te na svaku jediničnu površinu otpada ista vrijednost p . Vrijednost jedinične unutarnje sile p nazivamo naprezanjem ili *naprezanje je unutarnja sila koja se odnosi na jedinicu površine presjeka*, tj.:

$$p = \frac{\vec{F}_u}{\Delta A}. \quad (1)$$

Budući da je naprezanje p zauzelo opći položaj u odnosu na površinu ΔA , ono se rastavlja na komponente σ i τ .

- komponenta σ je okomita na jediničnu površinu ΔA i predstavlja *normalno naprezanje*;
- komponenta τ leži u ravnini površine presjeka i predstavlja *tangencijalno naprezanje*. Iz sl. 1.1a) se vidi da ga čine dvije međusobno okomite komponente τ_1 i τ_2 , pa je ukupna vrijednost tangencijalnog naprezanja:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}.$$

Veličina ukupnog naprežanja se također odredi prema Pitagorinom poučku iz osjenčanog trokuta na sl. 1.1a):

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}.$$

1.1.5. Jedinice naprežanja

Jedinica naprežanja proizlazi iz izraza za naprežanje (1). U njega uvrstimo za silu F_u , prema ISO sustavu mjernih jedinica, 1 N, a za površinu 1 m^2 , pa je:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa (paskal)}.$$

U strojarstvu se češće rabi jedinica 1 megapaskal — 1 MPa:

$$1 \text{ MPa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Elastične konstante različitih materijala izražavamo u GPa:

$$1 \text{ GPa} = 10^3 \text{ MPa} = 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

1.1.6. Zadatak nauke o čvrstoći

Tri su osnovna zadatka nauke o čvrstoći:

1. *zadatak*: Zadano je opterećenje, materijal i oblik konstrukcije. Treba odrediti poprečne dimenzije konstrukcije ili dijelova konstrukcije tako da budu zadovoljeni uvjeti čvrstoće, krutosti i stabilnosti.

2. *zadatak*: Poznate su dimenzije i opterećenje, a treba odrediti raspored naprežanja i deformacije u konstrukciji.

3. *zadatak*: Poznata je konstrukcija, njene dimenzije i materijal, a traži se analiza naprežanja, deformacije i dopušteno naprežanje.

Prvi zadatak se naziva *dimenzioniranje*, vrši se pri izvođenju novih konstrukcija. U drugom se vrši provjera deformacija za poznato opterećenje, a treći zadatak se odnosi na konstrukciju kojoj želimo promijeniti namjenu, pa je potrebno provjeriti dopuštena naprežanja materijala za nova naprežanja.

1.1.7. Vrste opterećenja

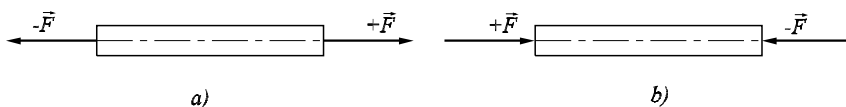
Opterećenje izaziva deformaciju tijela. Kako će se tijelo ponašati prilikom opterećenja ovisi o njegovoj vrsti jer neka podnosi lakše, a neka teže.

Osnovne vrste opterećenja prikazana su na slikama od 1.2 do 1.6, a čine ga:

1. **Oсно ili aksijalno opterećenje**, sl. 1.2

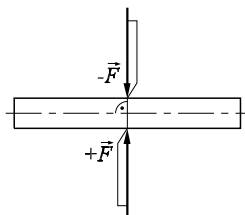
a) *vlak ili rastezanje* — Opterećenje (vanjske sile) djeluje u osi i želi rastegnuti štاپ.

b) *tlak ili sabijanje* — Opterećenje također djeluje u osi tijela, ali ga nastoji stlačiti.



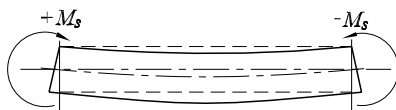
Sl. 1.2.

2. Smicanje ili odrez, sl. 1.3 — Opterećenje djeluje okomito na os tijela i želi ga prerezati.



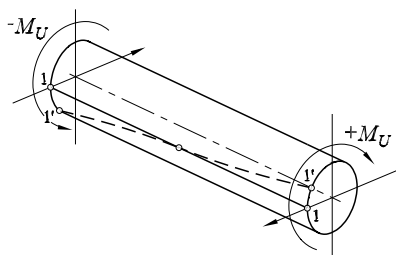
Sl. 1.3.

3. Savijanje ili fleksija, sl. 1.4 — Djeluju li u istoj ravнини na tijelo dva momenta suprotnog smjera, nastaje opterećenje na savijanje ili fleksija.



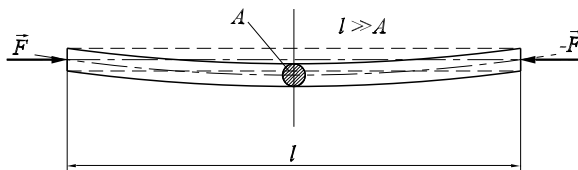
Sl. 1.4.

4. Uvijanje ili torzija, sl. 1.5 — Djeluju li u ravнини okomitoj na os štapa paralelno razmaknuta dva momenta suprotnih smjerova, nastaje opterećenje na uvijanje ili torzija.



Sl. 1.5.

5. Izvijanje, sl. 1.6 — U slučaju sabijanja štapa kojemu je dužina l mnogo veća od površine poprečnog presjeka A , on će se izviti, a neće nastupiti tlačno opterećenje.

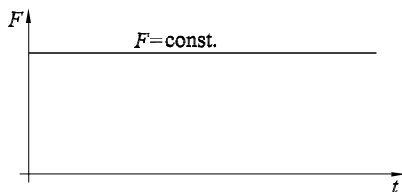


Sl. 1.6.

Navedene vrste opterećenja tijela mogu se javiti u tri oblika:

- a) *statičkom ili mirnom*, sl. 1.7;
- b) *dinamičkom jednosmjernom obliku ili pulsiranju*, sl. 1.8;
- c) *dinamičkom dvosmjernom obliku ili osciliranju*, sl. 1.9.

a) *Statičko ili mirno opterećenje* — To je opterećenje koje se tijekom vremen



Sl. 1.7.

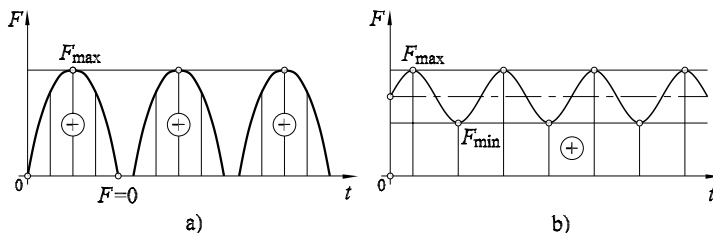
na ne mijenja. Iz dijagrama opterećenja se vidi da je sila F (opterećenje) tijekom vremena t , stalna veličina. Takvo opterećenje materijali najlakše podnose, pa ono može biti veće u odnosu na dinamička opterećenja.

Primjer statičkog opterećenja su različiti prednaponi, npr. opruga ugrađena u vozilo stalno je opterećena težinom vozila, tijelo pritegnutog vijka stalno je opterećeno vlačnim opterećenjem, osovine prikolice stalno su opterećene težinom prikolice itd.

Statičkim opterećenjem možemo smatrati i vlastitu težinu elementa ili konstrukcije. Ovo opterećenje označavamo sa I (rimski 1).

b) *Dinamičko jednosmjerno opterećenje ili pulsiranje* — Iz dijagrama na sl. 1.8a) i b), koji opisuju ovo opterećenje, proizlazi da se intenzitet opterećenja tijekom vremena mijenja. Ta promjena može biti periodična i neprekidna. Pulsiranje materijali teže podnose, pa dopušteno opterećenje konstrukcije moramo smanjiti.

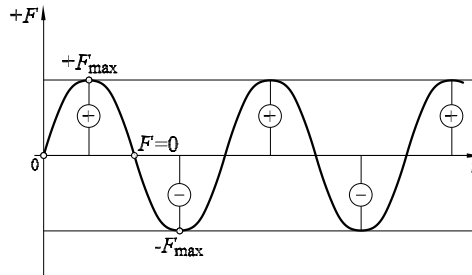
Tipičan primjer takvog opterećenja je opterećenje na uvijanje vratila u nekom stepenastom mjenjaču broja okreta gdje je rotacija u istom smjeru, npr. uže dizalice, zupci zupčanika, lančanika itd. Oznaka ovog opterećenja je rimski II .



Sl. 1.8. *Dinamičko jednosmjerno opterećenje: a) periodično pulsiranje — opterećenje raste od 0 do F_{\max} , a potom se intenzitet sile smanjuje do vrijednosti $F = 0$, te nakon kratke vremenske stanke sve se periodično ponavlja; b) neprekidno pulsiranje — opterećenje neprekidno koleba između maksimalne i minimalne vrijednosti u vremenu t*

c) *Dinamičko dvosmjerno opterećenje ili osciliranje (titranje)* — Ovo opterećenje je opisano dijagramom na sl. 1.9. Iz njega se vidi da opterećenje tijekom vremena mijenja veličinu i smjer. Ovdje periodično opterećenje raste od nulte do neke maksimalne vrijednosti u pozitivnom smjeru, pa potom opada na nultu vrijednost. Nakon toga, opterećenje ponovo raste do neke maksimalne vrijednosti, ali u suprotnom (negativnom) smjeru, te nakon toga slijedi pad opterećenja na nultu vrijednost i ponavljanje opisanog procesa.

Za strojarsku praksu ovo je najnepovoljnije opterećenje, jer najviše zamara materijal. Označavamo ga s rimskim *III*. Tipičan primjer ovog opterećenja je opterećenje vratila radnih i pogonskih strojeva u pogonu, kada promatramo njihovo opterećenje na savijanje te opterećenje opruga.



Sl. 1.9. Dinamičko dvosmjerno opterećenje — osciliranje

1.1.8. Vrste naprezanja

*Naprezanje je unutarnja sila podijeljena površinom na koju djeluje*¹. Ono se može pojaviti u dva oblika:

- a) **aksijalno** σ — djeluje uzduž osi predmeta ili okomito na površinu poprečnog presjeka;
- b) **tangencijalno** τ — djeluje okomito na os predmeta ili u ravnini površine presjeka, sl. 1.1.

Ako promatramo naprezanje kao posljedicu opterećenja, tada se aksijalna naprezanja javljaju kod osnih ili aksijalnih opterećenja — rastezanja i sabijanja, pa se za njih rabe izrazi *naprezanje na vlak* i *naprezanje na tlak*.

Analogno tome, tangencijalno naprezanje će se javiti kao posljedica opterećenja na smicanje ili odrez. Budući da ovdje naprezanje i opterećenje djeluje okomito na os predmeta, za ovo naprezanje se rabi izraz *naprezanje na odrez ili smik*. Kod svih ostalih opterećenja naprezanje na vlak, naprezanje na tlak i naprezanje na odrez mogu se javiti istodobno. Primjer za to je opterećenje na savijanje ili fleksija. Zbog toga za ostala opterećenja treba rabiti terminologiju: *naprezanje pri savijanju*, *naprezanje pri uvijanju* i *naprezanje pri izvijanju*.

Iz rečenog slijede ove vrste naprezanja:

1. *naprezanje na vlak* (vlačno naprezanje),
2. *naprezanje na tlak* (tlačno naprezanje),
3. *naprezanje na odrez* ili smik (smično naprezanje).

U konstrukciji se mogu istovremeno pojaviti različita naprezanja, kao npr. savijanje i vlak, savijanje i tlak, savijanje i uvijanje itd. Naprezanja koja se pri tome javljaju nazivamo *složenim naprezanjima*.

¹ Definicija preuzeta iz: Alfirević, I. *Nauka o čvrstoći*, Tehnička knjiga, Zagreb, str. 11

1.2. Ispitivanje čvrstoće materijala, dopušteno naprezanje i koeficijent sigurnosti

Čvrstoća konstrukcije je sposobnost prenošenja opterećenja bez pojave loma ili nedopuštenih deformacija.

Ona ovisi o vrsti naprezanja. Budući da naprezanje može biti aksijalno i tangencijalno, toliko ima i vrsta čvrstoće, pa tako imamo vlačnu, tlačnu i smičnu čvrstoću.

Za jasnu sliku o čvrstoći nekog materijala dovoljno je poznavati njegovu vlačnu čvrstoću.

Ispitivanje čvrstoće spada u mehanička ispitivanja koja se dijele na:

- a) *statička ispitivanja* — ispitni materijal se podvrgava djelovanju vrlo laganog rastućeg opterećenja;
- b) *dinamička opterećenja* — ispitni materijal se podvrgava opterećenju kojemu se mijenja veličina i smjer.

1.2.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće materijala

Za ispitivanje vlačne čvrstoće služe ispitivalice koje nazivamo kidalicama. Svaka kidalica se sastoji iz:

1. uređaja za nametanje opterećenja,
2. uređaja za mjerenje sile,
3. uređaja za mjerenje deformacije ispitnog materijala,
4. uređaja za ispis dijagrama ispitivanja $F - \Delta l$.

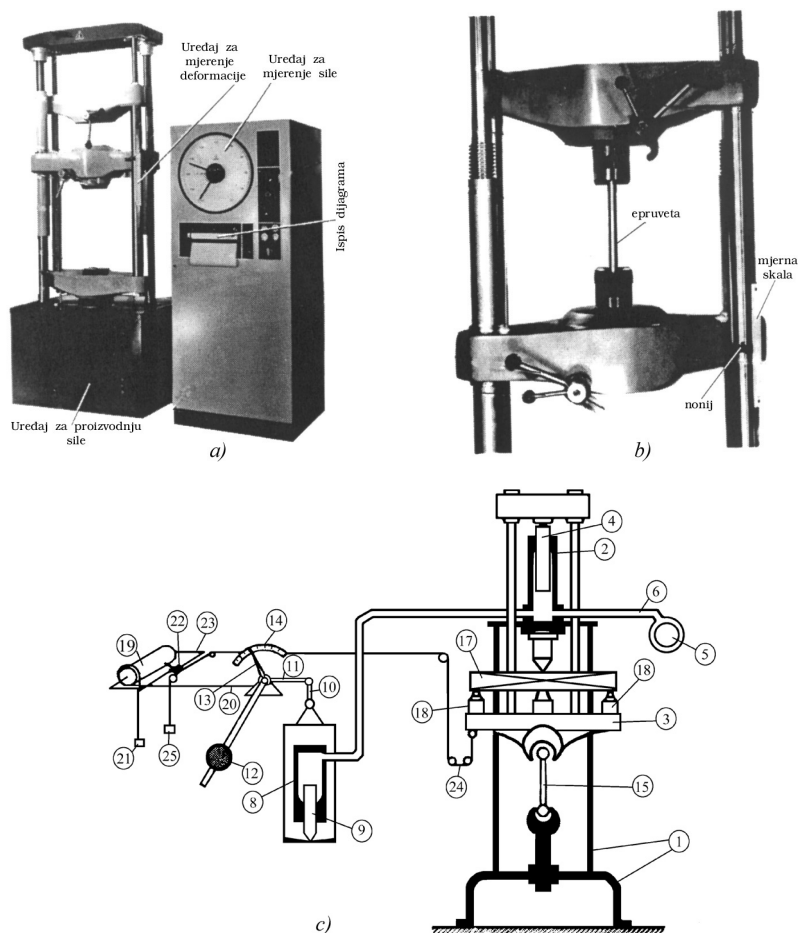
Na slici 1.10 a) prikazana je univerzalna kidalica koja može ispitivati i tlačnu čvrstoću te čvrstoću na odrez i pri savijanju. Na slici 1.10 b) se nalazi detalj s epruvetom za vlačno ispitivanje, a na slici 1.10 c) prikazana je shema jedne univerzalne kidalice.

Iz nje se vidi da uređaj za nametanje opterećenja ima uljnu sisaljku 5 koja tlači ulje vodom 6 ispod klipa 4 koji se nalazi u cilindru 2. Na taj način se nametne opterećenje potrebno za ispitivanje čvrstoće, koje će podizati pokretni most 3. Pokretni most 3 i postolje 1 imaju čeljusti za stezanje epruvete 15, koja će se uslijed podizanja mosta 3 istežati. Uređaj za mjerenje sile se sastoji od cilindra 8 u koji preko voda 6 iz cilindra 2 dolazi ulje i potiskuje klip 9. Klip 9 će posredno djelovati na gibanje polužja 10 i 11 te će podizati uteg 12. On će preko njihala pokretati kazaljku 13, pa se na skali 14 mogu očitati vrijednosti postignute sile istežanja epruvete 15.

U ovoj konstrukciji kidalice je uređaj za mjerenje deformacije u sklopu uređaja za ispis dijagrama ispitivanja $F - \Delta l$ (sila–apsolutno produljenje). On se sastoji iz valjka 19 na kojemu je namotan papir (obično milimetarski). Valjak se okreće pomoću uzice 20 koja je namotana na osovinu kazaljke 13. Da bi uzica bila uvijek zategnuta, na njenom kraju nalazi se uteg 21. Svaki pomak kazaljke 13 izazvat će isti pomak valjka 19 na kojem će pisaljka 22 zabilježiti promjenu vrijednosti sile po ordinati dijagrama.

Promjenu deformacije će pisaljka 22 bilježiti po apscisi horizontalnim gibanjem po vodilici 23, izazvanim uzicom 24. Uzica 24 je vezana za pokretni most 3, te putem kolotura vodi do pisaljke 22.

Stalnu napetost u uzici vrši uteg 25.

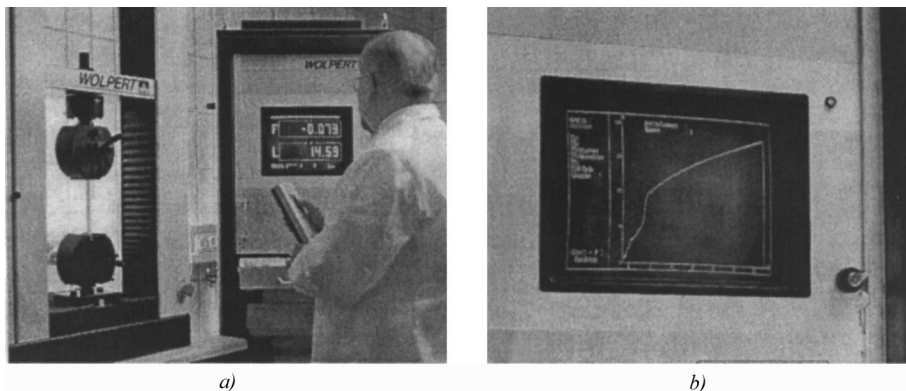


Sl.1.10. a) univerzalna kidalica; b) detalj s učvršćenom epruvetom; c) shema univerzalne kidalice: 1 postolje sa stupovima; 2 cilindar; 3 pokretni most; 4 stap; 5 hidraulična sisaljka; 6 tlačni vod; 8 cilindar uređaja za mjerenje sile; 9stap; 10 i 11 polužje uređaja za mjerenje sile; 12 uteg; 13 kazaljka; 14 skala u kN; 15 epruveta za ispitivanje na vlačnu čvrstoću; 17 epruveta za ispitivanje čvrstoće na savijanje, tlak i odrez; 18 oslonci; 19 valjak s namotanim milimetarskim papirom; 20 uzica valjka; 21 uteg; 22 pisaljka; 23 vodilica; 24 uzica pisaljke; 25 uteg

Deformacija epruvete 15, tj. njezino povećavanje početne dužine l_0 , bilježi se na uređaju za ispis dijagrama $F - \Delta l$. Naime, gibanjem mosta 3 prema gore, on za sobom povlači uzicu 24, a ona pisaljku 22, te će svaka deformacija epruvete 15 za određenu vrijednost sile biti zabilježena na papiru omotanom oko valjka 19. Deformacija se može mjeriti izravno kao što to pokazuje sl. 1.10 b). Uz pokretni most je pričvršćena skala u milimetrima, a na pokretnom mostu je pričvršćen nonius koji omogućuje očitavanje deformacije točnosti do 0.01 mm.

Na slici 1.11 prikazani su detalji jedne suvremene kidalice koja podatke o vrijednostima sile i deformacije daje digitalno. Podatke o sili i deformaciji obrađuje računalo

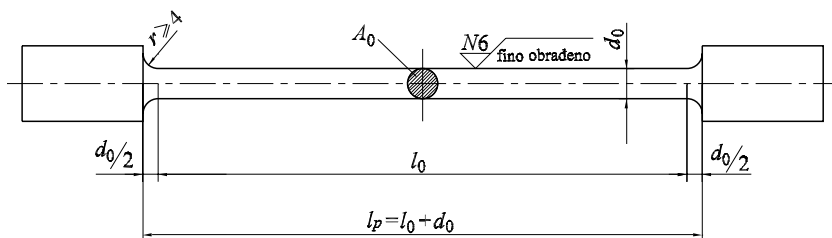
koje na monitoru ispisuje sliku dijagrama ispitivanja. Sliku ispitanog dijagrama možemo putem pisaača ispisati na papir.



Sl. 1.11.

Uzorak materijala koji se ispituje obradi se na određeni oblik i dimenzije propisane standardima. Tako pripremljene uzorke zovemo epruvetama. Za ispitivanje vlačne čvrstoće koristimo epruvete kružnog, kvadratnog i pravokutnog presjeka.

Na slici 1.12 prikazana je jedna *standardna epruveta* kružnog presjeka.



Sl. 1.12.

Kotirane dimenzije na sl. 1.12 znače:

d_0 / mm/ — nazivni promjer epruvete ili promjer prije ispitivanja (standardiziran na $d_0 = 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$ i 25 mm);

l_0 / mm/ — mjerna dužina epruvete;

l_p / mm/ — stvarna dužina.

Iz slike 1.12 se vidi da je mjerna dužina epruvete dobivena tako da se sa svake strane od stvarne dužine oduzme po pola promjera. Ove epruvete se izrađuju kao *normalne* i *proporcionalne*. Normalne mogu biti izrađene kao:

a) kratke: $l_0 = 5d_0$ / mm/;

b) duge: $l_0 = 10d_0$ / mm/.

Proporcionalne epruvete se koriste kada nema dovoljno materijala za izradu normalnih epruveta. I one se izrađuju kao:

a) kratke: $l_0 = 5.65\sqrt{A_0}$ / mm/;

b) duge: $l_0 = 11.3\sqrt{A_0}$ / mm/, gdje je:

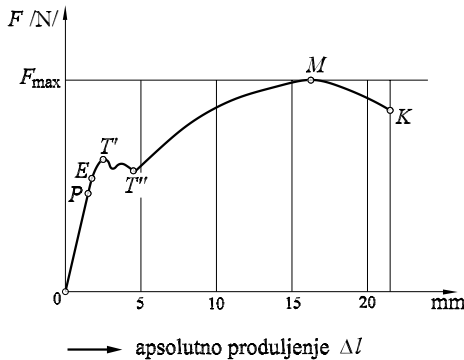
A_0 / mm²/ — površina poprečnog presjeka epruvete, sl. 1.12, a koja također može biti krug, kvadrat ili pravokutnik.

Pored standardnih epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće služe i *tehničke* epruvete. To su lanci, čelična užad, cijevi, različiti profili, žica, gotovi strojni dijelovi itd. Te epruvete se posebno ne obrađuju, već se ispitivanje vrši u stanju u kojem se ugrađuju u konstrukciju.

Standardne epruvete se izrađuju obilnim hlađenjem da se struktura materijala ne promijeni jer ona utječe na čvrstoću. Površina tijela mora biti fino obrađena bez ogrebotina i tragova obradbe, a prijelaz s tijela na glavu epruvete mora biti izveden s propisanim zaobljenjem r .

Prilikom vlačnog ispitivanja poseban uređaj crta dijagram $F-\Delta l$. Njega možemo i sami nacrtati ako u tijeku ispitivanja za određenu vrijednost sile F očitamo apsolutno produljenje epruvete Δl . Na ordinatu se nanese sila F u određenom mjerilu, a na apscisu odgovarajuća vrijednost apsolutnog produljenja Δl , također u određenom mjerilu. Spajanjem tako dobivenih točkica nastaje dijagram naprezanja $F-\Delta l$.

Na slici 1.13 prikazan je jedan takav dijagram za meki čelik. To je karakteristični dijagram pogodan za analizu naprezanja. Na njemu se mogu uočiti točke:



- 0 — početak naprezanja;
- P — granica proporcionalnosti;
- E — granica elastičnosti;
- T' — gornja granica tečenja;
- T'' — donja granica tečenja¹;
- M — lomna čvrstoća ili čvrstoća materijala;
- K — točka loma.

Sl. 1.13.

- a) **Točka P — granica proporcionalnosti:** Do te točke materijal se rasteže proporcionalno opterećenju. Za određeni porast sile F , proporcionalno će porasti produljenje Δl . Epruveta se rasteže po *Hookeovu zakonu*² ili *zakonu proporcionalnosti*. Sve deformacije materijala u ovom području su elastične. Po prestanku opterećenja epruveta se vraća na početnu dužinu l_0 , a apsolutna produljenja Δl su vrlo mala.

Naprezanje u ovoj zoni je:

$$\sigma = \frac{F_P}{A_0} \text{ /MPa/},$$

gdje je: F_P /N/ — vrijednost ordinate točke P,

A_0 /mm²/ — površina prvobitnog presjeka epruvete.

Iza točke P više ne vrijedi Hookeov zakon jer produljenja više nisu proporcionalna sili.

¹ U literaturi se još rabi naziv granica razvlačenja ili popuštanja.

² Vidi naslov Hookeov zakon.

- b) **Točka E — granica elastičnosti:** Prekoračenjem ove točke epruveta se više ne vraća na početnu dužinu l_0 već ostaje za određenu vrijednost duža, pa će epruveta trajno promjeniti oblik i dimenzije. Točku E je vrlo teško odrediti, zato se zadovoljavamo *tehničkom granicom elastičnosti, a to je naprezanje pri kojemu nastaju trajne deformacije 0.01% do 0.05% u odnosu na prvobitnu dužinu epruvete l_0 .*

Primjer.

$l_0 = 80$ mm — trajna deformacija 0.01%: $l_0 \cdot 0.0001 = 80 \cdot 0.0001 = 0.008$ mm;
 — trajna deformacija 0.01%: $l_0 \cdot 0.00005 = 80 \cdot 0.00005 = 0.04$ mm.

Prema rezultatu računa proizlazi da ako rasterećenjem kidalice zaostanu trajne deformacije dužine l_0 u granicama od 0.004 do 0.008 mm, da je tada određena točka E. Očitavanjem vrijednosti sile F_e u točki E i dijeljenjem s A_0 , dobije se naprezanje na granici elastičnosti, tj.:

$$\sigma = \sigma_{0.01/0.005} = \frac{F_e}{A_0} \text{ /MPa/}.$$

Granica elastičnosti je najvažnija osobina konstrukcijskih materijala jer je to krajnja granica do koje se smiju opteretiti elementi konstrukcije. Razmak točaka PE je to manji što je materijal bolji, a jako je izražen samo kod mekog čelika.

- c) **Točke T' i T'' -r- gornja i donja granica tečenja:** Iznad granice elastičnosti produljenja i dalje rastu, ali više nisu proporcionalna sili. Nastaje zona velikih deformacija koju nazivamo zonom tečenja. Od točke E do točke T' dolazi do znatnog povećanja produljenja Δl uz vrlo malo povećanje sile F . Kod mekog čelika u zoni tečenja produljenja rastu i uz pad sile. To je zona velikih i trajnih deformacija. Na materijalu se golim okom mogu zamjetiti kose crte — sitne pukotine tzv. *Ludersove crte*.

Kraj zone tečenja ili popuštanja je u točki T'', koja je za meki čelik jasno izražena porastom sile. Za one materijale gdje ta granica nije jasna određena, *donja granicu tečenja je određena onim naprezanjem pri kojem nastaje trajno produljenje od 0.2% prvobitne dužine štapa. Ovo naprezanje nosi oznaku $\sigma_{0.2}$.*

Primjer.

Za $l_0 = 80$ mm → trajno produljenje: $l_0 \cdot 0.2\% = l_0 \cdot 0.002 = 80 \cdot 0.002 = 0.16$ mm.

Prema rezultatu bi nakon rasterećenja kidalice epruveta trebala imati dužinu $l = 80.16$ mm, što bi odgovaralo naprezanju na donjoj granici tečenja. Očitavanjem sile na toj granici i dijeljenjem s A_0 je određeno naprezanje na granici tečenja:

$$R_v = \sigma_{0.2} = \frac{F_{T''}}{A_0} \text{ /MPa/}.$$

- d) **Točka M — lomna čvrstoća ili čvrstoća materijala:** Iz točke T'' nastaje zona ojačavanja materijala, tako da je porast sile ponovo evidentan, ali rastezanje raste mnogo brže nego do tada. Najzad sila F dosiže u točki M svoju najveću vrijednost. *Maksimalna sila dijeljenja s prvobitnom površinom presjeka epruvete daje čvrstoću materijala koju označavamo sa R_m , tj.:*

$$\boxed{R_m = \frac{F_{\max}}{A_0}} \text{ /MPa/} \quad (1)$$

Formalno epruveta još nije fizički slomljena, ali je suženje (kontrakcija) njezina tijela izražena, te za njezine daljnje deformacije sile opadaju.

- e) **Točka K — lom epruvete:** Poslije točke *M* dolazi do daljnjeg izduženja epruvete uz pad sile. Ta izduženja imaju lokalni karakter i događaju se samo u zoni suženja, gdje je površina presjeka najmanja sve dok se materijal konačno ne razdvoji. Kruti materijali nemaju zonu *MK*. Kod njih nema pojave suženja epruvete, a lom se događa pri vrlo malim deformacijama.

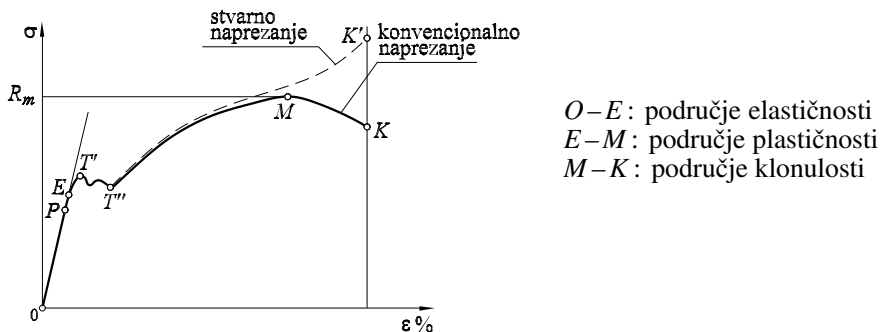
Dijagram $F-\Delta l$ se u tehničkoj praksi zamjenjuje dijagramom naprezanja i relativnog produljenja $\sigma-\varepsilon$. Tako se za isti materijal, bez obzira na različite dimenzije poprečnog presjeka, dobije uvijek isti dijagram, što kod dijagrama $F-\Delta l$ nije slučaj. Dijagram $\sigma-\varepsilon$ je sličan dijagramu $F-\Delta l$, sl. 1.14. Na njoj je prikazana krivulja konvencionalnog $T''-K$ i stvarnog naprezanja $T''-K'$. Naime mjerenjem je utvrđeno da se presjek epruvete također sužava za iznos Δd . Do točke T' poprečno suženje je jednako po čitavoj duljini epruvete, a nakon nje na određenom mjestu nastupa naglo suženje koje sve više raste dok ne nastupi lom. Sila F dijeljena s trenutnom površinom presjeka A epruvete daje krivulju $T''K'$ koja predstavlja stvarno naprezanje.

Omjer između apsolutnog produljenja Δl i početne duljine štapa l daje relativno produljenje ε , koje izraženo u postocima iznosi:

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

Relativno produljenje je bezdimenzionalni broj.

Dijagram ispitivanja vlačne čvrstoće opisuje svojstva dotičnog materijala, sl. 1.14.



Sl. 1.14.

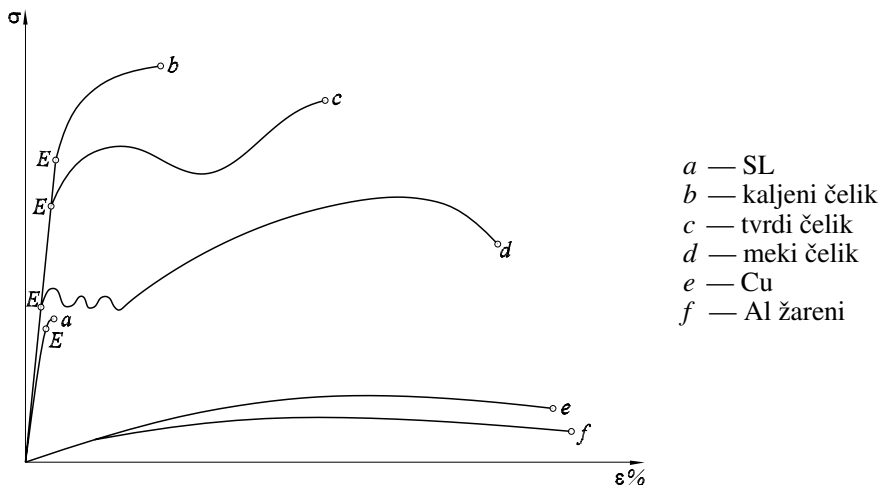
Neki materijali imaju malo područje plastičnosti te zbog toga nisu pogodni za plastičnu obradbu (kovanje, valjanje, duboko izvlačenje i sl.), sl. 1.15.

Veliko područje klonulosti je karakteristično za meke materijale, te se oni lako daju obrađivati rezanjem. Tvrdi materijali uglavnom imaju veće područje elastičnosti, a mala područja plastičnosti i klonulosti, sl. 1.15. To znači da su pogodni kao konstruktivni materijali, ali nisu pogodni za plastičnu obradbu i obradbu rezanjem.

Različiti materijali imaju veliko područje klonulosti ili tzv. *lomno produljenje* koje je izraženo formulom:

$$\rho = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

gdje je l_1 mjerna dužina prekinute epruvete, a l_0 početna mjerna duljina epruvete (prije ispitivanja).



Sl. 1.15. Dijagrami naprezanja na vlak za različite materijale

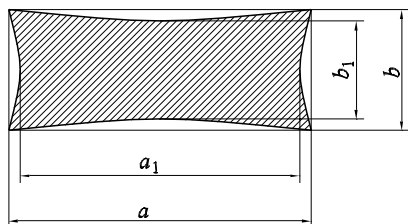
Plastičnost materijala može se odrediti smanjenjem poprečnog presjeka epruvete na mjestu loma. To se zove *prijelomno suženje* ili *kontrakcija* ψ , koja se računa formulom:

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A} \cdot 100\%$$

gdje je: A_0 — površina presjeka epruvete prije ispitivanja,
 A — površina presjeka na mjestu loma.

Ako je epruveta bila pravokutnog presjeka, tada se površina loma računa uzimajući najmanje dimenzije presjeka, sl. 1.16.

$$A = a_1 \cdot b_1 / \text{mm}^2 /$$



Sl. 1.16.

Prilikom ispitivanja vlačne čvrstoće materijala, epruveta pored deformacije izduženja ima i deformaciju smanjenja poprečnih dimenzija. Zbog toga je za potpunu informaciju o elastičnim svojstvima ispitivanog materijala potrebno poznavati i *poprečnu deformaciju* ili *relativno poprečno suženje*, koju računamo prema izrazu:

$$\epsilon_p = \frac{d_0 - d}{d_0}$$

gdje je: d_0 — promjer epruvete prije ispitivanja,
 d — promjer epruvete na mjestu loma.

Kvocijent relativnog poprečnog suženja ε_p i relativnog produljenja ε , odnosno kvocijent između relativne poprečne i relativne uzdužne deformacije je *Poissonov koeficijent*¹:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon}.$$

Negativan predznak u formuli je zbog toga da bi konačna apsolutna veličina koeficijenta bila pozitivna jer je za vlak: $-\varepsilon_p$, a $+\varepsilon$, a za tlak obrnuto: $+\varepsilon_p$, $-\varepsilon$.²

Vrijednosti Poissonovog koeficijenta za različite materijale nalaze se u tablici 1.

Materijal	Poissonov koef. μ
Čelik	0.24 – 0.32
Mekani čelik	0.30
Nikal – čelik	0.30
Krom – čelik	0.30
Čelik za opruge	0.30
Sivi lijev	0.25 – 0.27
Aluminij	0.34
Aluminijske legure	0.32 – 0.36
Bakar	0.31 – 0.35
Bronca	0.32 – 0.35
Olovo	0.42
Mjed	0.32 – 0.42
Guma	0.47
Kaučuk	0.47
Staklo	0.25
Beton	0.08 – 0.18

Tablica 1. Poissonovi koeficijenti μ

Poznavajući Poissonov koeficijent μ i relativno produljenje ili skraćenje ε , lako se može odrediti relativno smanjenje ili proširenje poprečnih dimenzija epruvete po izrazu:

$$\varepsilon_p = -\mu \cdot \varepsilon \cdot 100\%$$

Iz tab. 1 uočava se da Poissonov koeficijent ovisi o vrsti materijala i da je manji od 0.5, tj.:

$$\mu < 0.5.$$

Ostala mehanička ispitivanja čvrstoće materijala se obrađuju u okviru predmeta Tehnički materijali, te neće biti obrađena u ovom udžbeniku. Za daljnje razumijevanje gradiva iz Znanosti o čvrstoći dovoljno je poznavati vlačnu čvrstoću materijala.

Da bismo shvatili zamor materijala reći ćemo samo nešto o dinamičkim ispitivanjima čvrstoće.

¹ Poisson (Poason) – francuski znanstvenik koji je koeficijent μ u uporabu uveo 1807.g.

² Vlak: poveća se l , a smanji d ; tlak: poveća se d , a smanji l .