

#### 4. ISPITIVANJE MATERIJALA

Razvoj tehnike postavlja sve veće zahtjeve ako je u pitanju materijal. Mašinski elementi, izrađeni od različitih vrsta materijala, moraju da budu sigurni i da imaju određen vijek trajanja. Ovi zahtjevi se mogu udovoljiti pronalazenjem novih legura. Udovoljenje tih uslova moguće je samo na osnovu svestranih ispitivanja, što podrazumijeva usavršavanje metoda kontrole.

Ispitivanja se izvode sa ciljem utvrđivanja određenih osobina materijala. Vrijednosti dobivene ispitivanjem mogu se smatrati valjanim samo ako su dobijene u uslovima sličnim onima u kojima će taj materijal raditi.

Prema osobinama koja se utvrđuju, sva ispitivanja možemo podijeliti na:

- hemijska ispitivanja
- fizička ispitivanja
- mehanička ispitivanja
- tehnološka ispitivanja
- strukturna ispitivanja i
- defetoskopska ispitivanja.

Hemijska ispitivanja imaju za cilj određivanje hemijskog sastava, otpornosti prema koroziji itd. Na osnovu hemijskog sastava možemo procijeniti karakteristike čvrstoće, magnetna i korozivna svojstva, način obrade, mogućnost zavarivanja itd.

Fizička ispitivanja imaju za cilj određivanje fizičkih osobina, kao što su: gustina materijala, temperatura i toplota topljenja, koeficijent toplotnog širenja, provodljivost toplote, električne i magnetne osobine i dr.

Zavisno od temperatura na kojima se izvode, ispitivanja se mogu podijeliti na: ispitivanja na povišenim temperaturama, ispitivanja na sniženim temperaturama i ispitivanja na temperaturama okoline. Ispitivanja na temperaturi okoline smatraju se normalnim ispitivanjima i posebno se ne naglašavaju. Ispitivanja na povišenim ili sniženim temperaturama imaju za cilj utvrđivanje osobina na tim temperaturama, što se mora posebno naglasiti.

Prema namjeni, ispitivanja se mogu podijeliti na:

- prijemna ispitivanja
- redovnu kontrolu i
- posebna ispitivanja.

Prijemna ispitivanja se izvode pri kupoprodaji proizvoda. Imaju za cilj da se utvrdi da li materijal ima odgovarajući sastav, mehaničke osobine,

kvalitet i drugo. Na ovaj način se izbjegavaju nesporazumi između kupca i prodavca. Ukoliko se ispitivanjem utvrde odstupanja od zahtjeva utvrđenih ugovorom ili standardom, kupac ima pravo na reklamaciju.

Redovnu kontrolu obavljamo pri izradi i montaži. Ona može biti međufazna, ako se vrši u procesu proizvodnje, i finalna, ako se vrši na kraju procesa proizvodnje.

Specijalna ispitivanja mogu biti raznovrsna. Najčešće služe u naučno-istraživačke ili eksperimentalno-istraživačke svrhe.

Prema stanju materijala po završetku ispitivanja, ispitivanja se mogu podijeliti na ispitivanja sa razaranjem i ispitivanja bez razaranja. Ako se u toku ispitivanja mašinski dio ili epruveta uništava, tako da se ne može ugraditi u mašinu, takva ispitivanja nazivamo ispitivanja sa razaranjem. Ukoliko prilikom ispitivanja mašinski dio ne mijenja oblik, tako da se može ugraditi u mašinu bez bilo kakvih smetnji, takva ispitivanja nazivamo ispitivanja bez razaranja.

Prema načinu djelovanja opterećenja u toku ispitivanja sva ispitivanja možemo podijeliti na:

- statička ispitivanja i
- dinamička ispitivanja.

#### 4.1. STATIČKA ISPITIVANJA

Statička ispitivanja su najčešća. To su takva ispitivanja kod kojih se epruveta ili dio koji se ispituje podvrgava djelstvu mirnog (statičkog) ili lagano rastućeg opterećenja. Pri ovom ispitivanju ne smije biti udarnih (naglih) opterećenja.

Zavisno od vrste naprezanja koje izaziva opterećenje, statička ispitivanja mogu biti:

- ispitivanje na zatezanje
- ispitivanje na pritisak
- ispitivanje na smicanje
- ispitivanje na savijanje i
- ispitivanje na torziju.

U grupu statičkih ispitivanja spadaju i najvažnije metode ispitivanja tvrdoće:

- ispitivanje tvrdoće po Brinelu
- ispitivanje tvrdoće po Rokvelu i
- ispitivanje tvrdoće po Vikersu

#### 4.2. ISPITIVANJE MATERIJALA ZATEZANJEM

Ispitivanje materijala zatezanjem obavlja se na specijalno obrađenim probnim štapovima-epruvetama ili neobrađenim elementima (lanci, užad, cijevi i dr.) silama koje lagano rastu. Pod djelstvom sila dolazi do deformacija,

koje su praćene povećanjem dužine (izduženje) i smanjenjem poprečnog presjeka (suženje).

Materijal se odupire spoljnjem djejtvu sila, i da bi se nastavile deformacije, potrebno je stalno povećavati silu. Kada spoljne sile prekorače kohezione sile koje vladaju u materijalu, dolazi do loma.

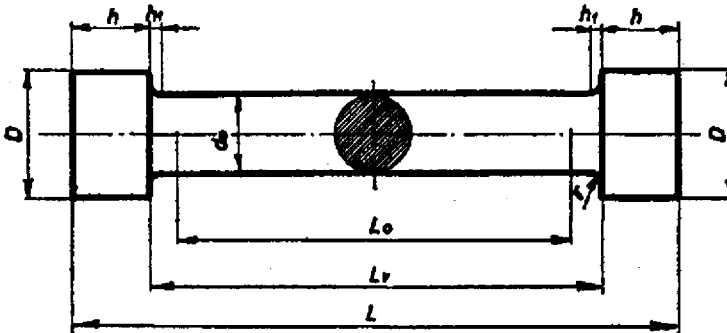
Cilj ispitivanja zatezanjem je da se odrede svojstva otpornosti i sposobnosti deformacije. Ovim ispitivanjem određuju se sljedeća svojstva otpornosti: granica proporcionalnosti ( $\sigma_{pr}$ ), modul elastičnosti ( $E$ ), granica elastičnosti ( $\sigma_e$ ), granica razvlačenja ( $\sigma_v$ ) i zatezna čvrstoća ( $\sigma_m$ ). Svojstva deformacije određuju se izduženjem ( $\delta_5$  ili  $\delta_{10}$ ) i kontrakcijom poprečnog presjeka ( $\psi$ ).

Da bi se izvršilo ispitivanje, moramo imati određeni broj epruveta, mašinu za ispitivanje (kidalicu) i uređaje za mjerenje sile i izduženja.

#### 4.2.1. Epruvete za ispitivanje

Epruveta je uzorak materijala obrađen na određen oblik i mjere propisane standardom. Uzorak od kojeg se epruveta pravi mora reprezentovati materiju čije osobine ispitujemo.

Prilikom uzimanja uzorka moramo voditi računa o strukturnim promjenama materijala koje bi imale uticaja na rezultate ispitivanja. Ako se uzorak isijeca makazama ili termičkim sječenjem, dolazi do strukturnih promjena u zoni rezanja, što se obradom na potrebne mjere mora odstraniti. Obradene epruvete moraju biti glatke, bez zareza i tragova obrade. Posljednji sloj materijala koji se skida mora biti veoma tanak, a brzina rezanja mala, uz obilno hlađenje, kako toplota koja se razvija u procesu obrade ne bi izazvala strukturne promjene površinskog sloja.



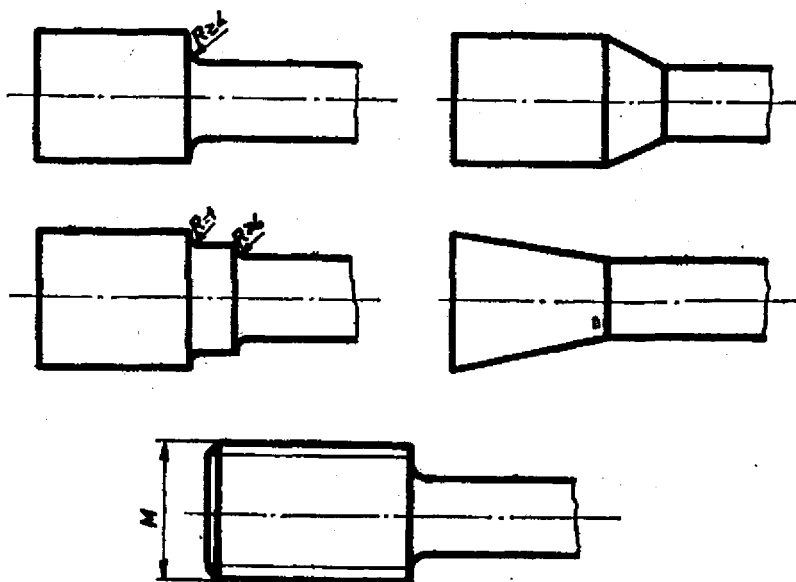
Slika 4.1. Standardna epruveta

Epruvete su najčešće kružnog presjeka, a mogu biti i drugog oblika, što zavisi od presjeka materijala koji se ispituje. Pošto oblik epruvete ima uticaja na rezultate dobijene ispitivanjem, to se pogodnim izborom dimenzija ovaj uticaj svodi u granici dozvoljenih odstupanja.

Epruvete za ispitivanje materijala zatezanjem mogu biti tehničke i standardne.

Tehničke epruvete se posebno ne obrađuju. To su lanci, cijevi, čelična užad, žica, betonsko gvožđe, gotovi mašinski elementi itd. Ispitivanje se vrši u stanju u kojem se predmeti primjenjuju.

Standardne epruvete se posebno obrađuju na mašinama alatkama. Na slici 4.1. prikazan je radionički crtež standardne epruvete. Na crtežu se uočavaju dva karakteristična presjeka: srednji, smanjeni i krajnji, ojačani. Prelaz sa stanjenog na ojačani presjek izveden je postepeno kako bi se izbjegla koncentracija naprezanja. Na stanjenom presjeku dešavaju se deformacije i vrše sva mjerenja, zbog čega se ovaj dio epruvete zove mjerni. Ojačani dio epruvete služi za hvatanje u čeljusti mašine. Prelaz sa stanjenog na ojačani dio može biti izveden na različite načine (slika 4.2). Glava epruvete i



Slika 4.2. Oblici glave epruvete

prelaz moraju biti dovoljno dimenzionisani da ne bi došlo do deformacija i loma epruvete u tom dijelu. Ako prilikom ispitivanja dođe do loma van mjerne dužine  $l_0$  rezultati nisu valjani i ispitivanje se mora ponoviti novom epruvetom. Za najpreciznija mjerenja najpogodnije su epruvete kod kojih je na glavi narezana metrička zavojnica.

Za ispitivanje se koriste normalne i proporcionalne epruvete.

Normalne epruvete su kružnog poprečnog presjeka, prečnika  $d_0 = 20\text{mm}$ . Prema mjernoj dužini  $l_0$  mogu biti: duge i kratke.

Normalne duge epruvete imaju dužinu  $l_0 = 10 d_0$  a normalne kratke  $l_0 = 5 d_0$ .

Proporcionalne epruvete su proizvoljnog oblika, poprečnog presjeka i dimenzija. Najčešće su okrugle, kvadratne i pravougaone. Koriste se u slučajevima kada nemamo dovoljno materijala da bismo napravili normalnu epruvetu ili kada mašina za kidanje ne može da izvrši prekid epruvete; mogu biti: duge i kratke.

Kod proporcionalnih dugih epruveta mjerna dužina  $l_0$  određuje se prema obrascu  $l_0 = 11,3 \sqrt{A_0}$ , gdje je  $A_0$  [mm<sup>2</sup>] površina poprečnog presjeka. Mjerna dužina proporcionalnih kratkih epruveta je  $l_0 = 5,65 \sqrt{A_0}$ .

Stanjeni dio epruvete  $l_v$  je nešto duži od  $l_0$  — da bi se u krajnjim mjernim tačkama mogli postaviti instrumenti za mjerenje deformacija. Kod epruveta okruglog presjeka ova dužina je  $l_v = l_0 + d_0$ , a kod pravougaonih  $l_v = l_0 + b$ .

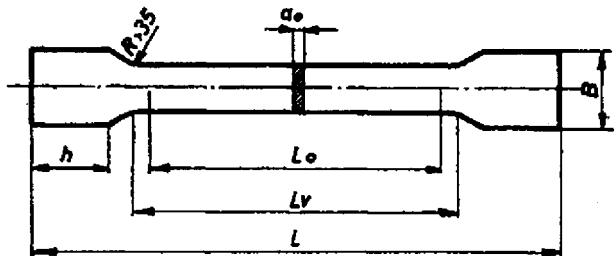
U tabeli 4.1. date su dimenzije epruveta okruglog presjeka prema slici 4.1.

Tabela 4.1.

Mjere u mm.

Prečnik epruvete	$d_0$	6	8	10	12	14	16	18	20	25
Dimenzije glave	$D$	8	10	12	15	17	20	22	24	30
	$h$	25	30	35	40	45	50	55	60	70
Proporcionalne kratke epruvete $l_0 = 5 d_0$	$l_0$	30	40	50	60	70	80	90	100	125
	$l_v$	36	48	60	72	84	96	108	120	150
	$L$	95	115	140	160	180	205	230	250	308
Proporcionalne duge epruvete $l_0 = 10 d_0$	$l_0$	60	80	100	120	140	160	180	200	250
	$l_v$	66	88	110	132	154	176	198	220	275
	$L$	125	155	190	220	250	285	310	350	450

Na slici 4.3. dat je izgled epruvete pravougaonog poprečnog presjeka, a u tabeli 4.2. dimenzije za limove čija je debljina veća od 6 mm.



Slika 4.3. Epruveta pravougaonog poprečnog presjeka

Tabela 4.2.

Mjere u mm

Debljina epruvete	$a_0$	5	5	6	7	8	10	10	12	15	18
Širina epruvete	$b_0$	10	16	20	22	25	25	31	26	30	30
Dimenzije glave	$B$	15	22	27	29	33	33	40	34	40	40
	$h$	30	30	50	50	60	60	70	70	70	70
	$A_0$	50	80	120	154	200	250	310	312	450	540
Proporcionalne kratke $l_0 = 5,65 \sqrt{A_0}$	$l_0$	40	50	60	70	80	90	100	100	120	130
	$l_0$	50	65	80	90	105	115	130	125	150	160
	$L$	140	155	210	220	260	275	300	300	325	335
Proporcionalne duge $l_0 = 11,3 \sqrt{A_0}$	$l_0$	80	100	120	140	180	180	200	200	240	260
	$l_0$	90	115	140	160	185	205	230	225	270	290
	$L$	180	205	270	290	340	360	400	400	445	465

U posebnu grupu spadaju tzv. mikroeprovete. To su epruvete malog prečnika, čija se dužina kreće u granicama od 5 do 10 mm. (slika 4.4). Ispitivanje se obavlja na specijalnim mašinama, na kojima se veoma precizno određuje izduženje i sila. Rezultati dobijeni ispitivanjem na mikroeprevetama odstupaju za 2 do 3% u odnosu na rezultate dobijene ispitivanjem na normalnim i proporcionalnim epruветama.



Slika 4.4. Mikroeproveta

Posebnim standardima propisani su oblici i dimenzije epruveta za ispitivanje sivog liva, temper-liva, liva pod pritiskom, bakra itd.

Prije početka ispitivanja provjeravaju se dimenzije epruvete. Prečnik epruvete mjeri se mikrometrom na tri mjesta (na krajevima mjerne dužine  $l_0$  i na sredini) i uzima srednja vrijednost prečnika  $d_0$ . Mjerna dužina  $l_0$  mjeri se pomoću pomičnog mjerila.

#### 4.2.2. Mašine za ispitivanje zatezanjem

Mašine za ispitivanje zatezanjem zovu se kidalice. Prema principu rada dijele se na mehaničke i hidraulične. Ove mašine su obično univerzalne i na njima se, pored ispitivanja zatezanjem, može obaviti ispitivanje pritiskivanjem, savijanjem i smicanjem.

Kidalice imaju tri osnovna dijela, i to:

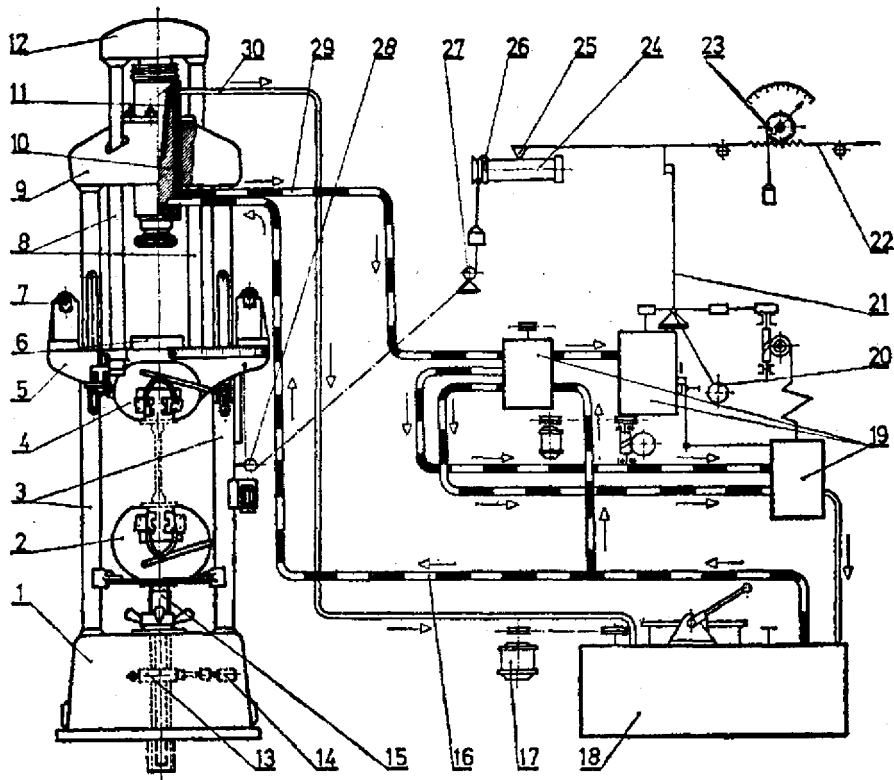
- pogonski dio
- dio za ispitivanja i
- uređaj za očitavanje sile.

Kod kidalice na mehanički pogon, pogon se može ostvariti ručno ili mašinski. Od elektromotora preko pužnog prenosa obrće se zavojno vreteno, za koje je vezana pokretna čeljust kidalice. Zavisno od smjera obrtanja elektromotora imamo spuštanje ili podizanje čeljusti. Epruveta se veže između pokretne i nepokretne čeljusti.

Kidalice na hidraulični pogon su pogodnije za rad i njima se postiže veća preciznost rada.

Uređaji za očitavanje sile po konstrukciji mogu biti veoma različiti.

Kidalice su obično snabdjevene uređajem za snimanje dijagrama sila-izduženje. Na slici 4.5. data je shema univerzalne kidalice.



Slika 4.5. Shema univerzalne kidalice

Kidalica se sastoji od dva rama, pokretnog i nepokretnog. Postolje (1), dva stuba (3) i traverza (9) čine nepokretni ram. Pokretni ram se sastoji od stola (5), dva stuba (8) i traverze (12) za koju je vezan klip (10). Klip je smješten u cilindru (11) u nepokretnoj traverzi (9). Ulje pod pritiskom dovodi se iz rezervoara (18) pomoću cjevovoda (16) u cilindar čime se pokretni ram podiže. Za pokretni sto (5) vezana je pokretna čeljust (4) koja služi za učvršćivanje epruvete. Drugi kraj epruvete veže se za nepokretnu čeljust (2).

Podizanje i spuštanje nepokretne čeljusti, da bi se izvršilo učvršćivanje epruvete, ostvaruje se pomoću elektromotora (14), i pužnog prenosa (13).

Pužni točak je nepokretna navrtka, koja obrtanjem u lijevu ili desnu stranu vrši podizanje ili spuštanje zavojnog vretena (15), koje je vezano za nepokretnu čeljust.

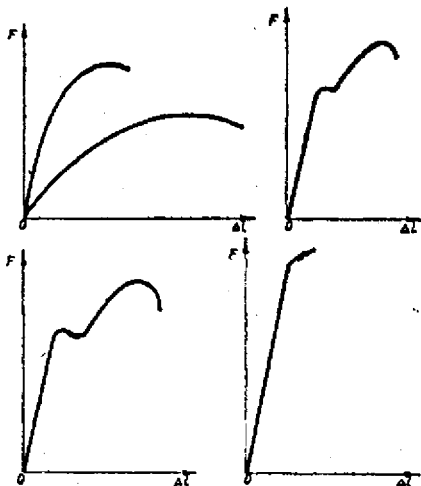
Na pokretnom ramu (5) postavljena su dva valjkasta oslonca (7), koja služe za ispitivanje materijala na savijanje. Ispitivanje na pritisak izvodi se između pritisnih ploča (6).

Pritisak ulja ostvaruje se pomoću pumpe koju pokreće elektromotor (17). Mjerenje sile vrši se pomoću uređaja sa klatnom. Cilindar (11) je cjevovodom (29) vezan za uređaj za mjerenje sile (19), koji je povezan sa klatnom (20). Za klatno je vezan vertikalni štap (21) koji potiskuje horizontalnu polugu (22), na čijem se kraju nalazi pisaljka (25). Pisaljka služi za snimanje dijagrama  $F - \Delta l$ . Drugi dio poluge je ozubljen i vezan s cilindričnim zupčanikom (23). Za osovinu zupčanika vezana je kazaljka i ona pokazuje veličinu sile.

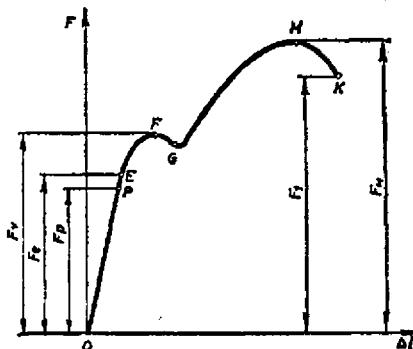
Na doboš (24) namotana je milimetarska hartija na kojoj se snima dijagram. Okretanje doboša ostvaruje se pomoću kanapa (26). Kanap je namotan na doboš i preko koturova (27) i (28) vezan za pokretni sto (5). Podizanje stola za veličinu  $\Delta l$  registruje se na dobošu. Po završetku ispitivanja ulje se vraća u rezervoar cjevovodom (30).

### 4.2.3. Dijagrami naprezanje-izduženje

Prilikom ispitivanja na zatezanje snima se dijagram izduženje  $\Delta l$  i sila  $F$ . Ovaj dijagram može se i konstruisati — ako se u toku ispitivanja za razne vrijednosti sile  $F$  očitaju veličine izduženja. Na apscisu se nanose vrijednosti izduženja  $\Delta l = l_1 - l_0$  u mm, a na ordinatu sila  $F$  u N. Dobijeni dijagram daje sliku ponašanja materijala pod djejtvom zatežuće sile. Na slici 4.6. prikazani su karakteristični oblici dijagrama  $F - \Delta l$  za različite vrste materijala.



Slika 4.6. Karakteristični oblici dijagrama  $F - \Delta l$



Slika 4.7. Dijagram  $F - \Delta l$  za meki čelik



Na slici 4.7. dat je dijagram za meki čelik sa karakterističnim tačkama. Sa slike se vidi da se dijagram može razdijeliti u četiri zone.

Zona OE naziva se zona elastičnosti. U ovoj zoni izduženje  $\Delta l$  je proporcionalno sa silom i do granice P važi *Hukov zakon*. Sve deformacije u ovoj zoni su elastične. Po prestanku dještva sile epruveta se vraća u prvobitni položaj. Izduženja  $\Delta l$  su veoma mala. Prekoračenjem granice E u materijalu nastaju trajne deformacije i po prestanku djelovanja sile epruveta se ne vraća u prvobitni položaj. Tačka P na dijagramu označava granicu proporcionalnosti, a tačka E granicu elastičnosti.

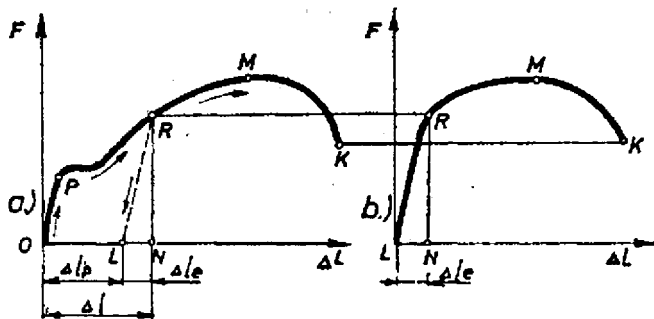
Zona EFG naziva se zona velikih deformacija. U ovoj zoni dolazi do znatnog povećanja izduženja za veoma malo povećanje sile, a kod nekih materijala izduženje raste uz pad sile (dio dijagrama FG). Ova zona nije karakteristična, jer se ne pojavljuje kod većine materijala. Tačka F pokazuje gornju granicu velikih deformacija, a tačka G donju granicu velikih deformacija.

Zona GM naziva se zona ojačavanja materijala. U ovoj zoni raste izduženje — uz porast opterećenja. Izduženja brže rastu nego u zoni OE. U periodu ojačavanja materijala na epruveti se primjećuje mjesto budućeg preloma (slika 4. 8.). To mjesto predstavlja suženje epruvete, koje brzo raste



Slika 4.8. Suženje epruvete

uz blag porast opterećenja — do maksimalne vrijednosti, koja odgovara tački M, poslije čega dolazi do pada sile uz dalji porast izduženja. Ova izduženja imaju lokalni karakter i dešavaju se samo u zoni suženja, zbog čega se zona MK zove zona lokalnih velikih deformacija. U tački K dolazi do preloma epruvete. Kod mnogih materijala (krtih) nema pojave suženja epruvete i prekid se dešava uz veoma male deformacije, bez zone MK.



Slika 4.9. Dijagram očvršćavanja materijala

Ako epruvetu opteretimo silom do zone ojačavanja materijala, na primjer, do tačke R (slika 4.9), a zatim lagano rasterećujemo, tada će zavisnost

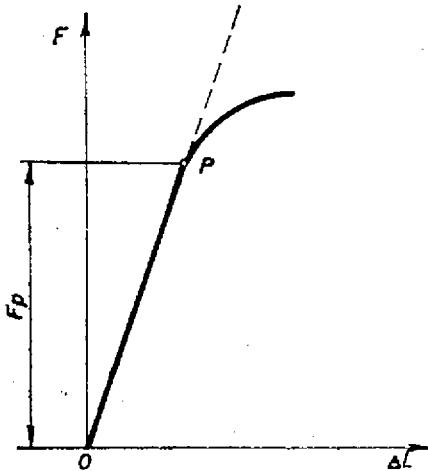


- granicu razvlačenja  $\sigma_v$
- zateznu čvrstoću  $\sigma_m$ .

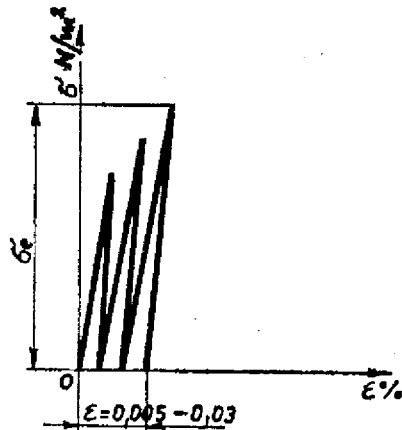
Granica proporcionalnosti je granica do koje još postoji proporcionalnost između naprezanja i izduženja. U oblasti proporcionalnosti važi Hukov zakon. Napon na granici proporcionalnosti se određuje prema obrascu:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0}, \frac{N}{m^2}.$$

Granica proporcionalnosti se utvrđuje opitom ili grafički — iz dijagrama deformacije. Grafičko određivanje granice proporcionalnosti nije dovoljno tačno, a sastoji se u sljedećem: produži se linija proporcionalnosti i gdje se ona odvaja od krive ispitivanja, tu se nalazi granica proporcionalnosti (slika (4.11)). Glavni nedostatak ove metode je nemogućnost tačnog određivanja



Slika 4.11. Granica proporcionalnosti



Slika 4.12. Granica elastičnosti

mjesta gdje prava linija dijagrama prelazi u krivu liniju. Ovo se može otkloniti primjenom novog grafičkog postupka, kada se određuje tzv. uslovna (tehnička) granica proporcionalnosti. Granica elastičnosti pri zatezanju je maksimalni napon koji u materijalu ne izaziva trajne plastične deformacije poslije prestanka djelovanja sile. Svaki napon koji je manji od granice elastičnosti izaziva samo elastična naprezanja i po prestanku djelovanja sile iščezavaju sva naprezanja.

Prekoračenjem granice elastičnosti nastaju trajne deformacije.

Granica elastičnosti nalazi se neposredno pored granice proporcionalnosti i kod običnih vrsta čelika ta razlika je toliko mala da se određuje samo jedna od njih.

I u granicama elastičnosti postoje male plastične deformacije od 0,001 do 0,03%, koje se mogu zanemariti. Granica elastičnosti određena zaostalim malim deformacijama je tehnička granica elastičnosti i označava se  $\sigma_{0,005}$ ;  $\sigma_{0,01}$ ;  $\sigma_{0,03}$  itd. Indeks 0,001 do 0,03 pokazuje da je granica elastičnosti određena kao napon koji izaziva trajne deformacije od 0,001 do 0,03%. Ovo ispitivanje spada u grupu veoma preciznih ispitivanja i rjeđe se izvodi.

Granica elastičnosti se određuje višestupnim opterećenjem i rasterećenjem (slika (4.12)). Pri svakom novom opterećenju napon se poveća za oko  $30 \text{ N/mm}^2$ . Kod svakog novog rasterećenja, pomoću veoma preciznih tenzometara, mjere se zaostala trajna izduženja, sve dok se ne postigne željena trajna deformacija. Napon na granici elastičnosti  $\sigma_e$  određuje se po obrascu:  $\sigma_e = \frac{F}{A_0}$ ,  $\text{N/m}^2$ .

Modul elastičnosti je konstanta za određeni materijal i važi samo u području proporcionalnosti i određuje se prema obrascu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{A_0 \Delta l}, \text{N/m}^2.$$

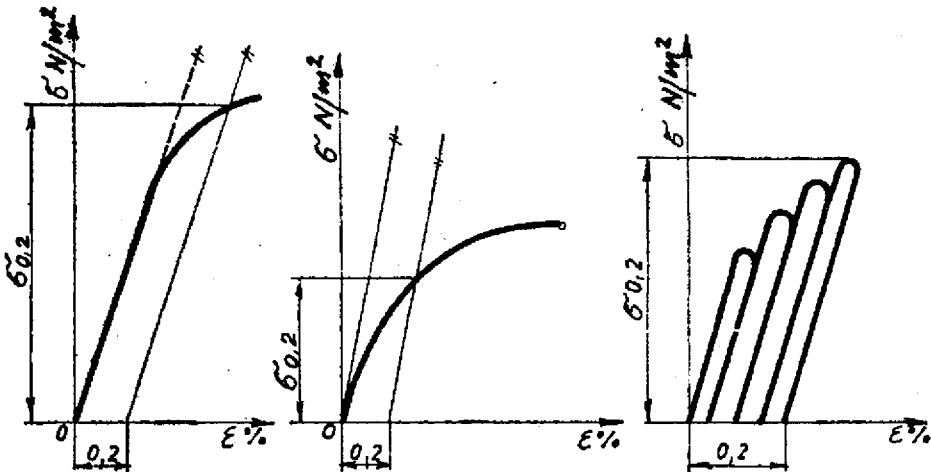
Granica razvlačenja ima veoma velik značaj, jer se uzima kao osnova za proračun svih elemenata izloženih naprezanju na istezanje. Određuje se prema obrascu:

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_0}, \text{N/m}^2.$$

Granicu razvlačenja možemo lako odrediti samo kod malog broja materijala koji imaju oblik dijagrama — prema slici 4.10. Međutim, kod veoma velikog broja materijala (kaljeni i legirani čelici, bakar, aluminijum, olovo i drugi) nema jasno izražene granice razvlačenja.

Na osnovu mnogobrojnih ispitivanja utvrđeno je da granica razvlačenja odgovara naponu koji izaziva trajne deformacije od  $0,2\%$ . Zbog toga se često granica razvlačenja označava sa  $\sigma_{0,2}$ .

Napon na granici razvlačenja može se odrediti grafički i uzastopnim opterećenjem i rasterećenjem sa mjerenjem trajnih deformacija.



Slika 4.13. Određivanje granice razvlačenja

Grafički način određivanja granice razvlačenja prikazan je na slici 4.13. U dijagramu  $\sigma - \varepsilon$  na apscisu se nanese relativno izduženje  $\varepsilon = 0,2$  i povuče

prava paralelna sa pravom OP (zona proporcionalnosti na dijagramu) do presjeka sa krivom dobijenom ispitivanjem. Presječna tačka određuje napon na granici razvlačenja.

Tačnije određivanje granice razvlačenja vrši se postupkom uzastopnih opterećenja i rasterećenja slično kao kod određivanja granice elastičnosti. Poslije svakog rasterećenja mjere se zaostale trajne deformacije.

Napon koji izaziva trajne deformacije od 0,2 naziva se napon na granici razvlačenja. Očitavanje deformacija  $\Delta l$  vrši se preciznim tenzometrom.

Zatezna čvrstoća lako se određuje, jer se u toku ispitivanja uvijek registruje maksimalna sila. Prema maksimalnoj sili određuje se zatezna čvrstoća materijala, prema obrascu:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0}, \text{N/m}^2.$$

Pored određivanja svojstava otpornosti, zatezanjem se mogu odrediti i svojstva deformacije, i to:

- izduženje i
- kontrakcija.

Izduženje je najvažnije svojstvo deformacije i određuje se prema obrascu:

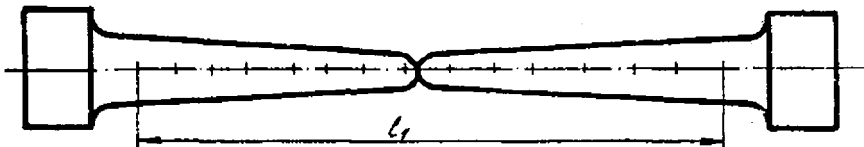
$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \%,$$

gdje je:

$l_1$  – mm – dužina epruvete poslije preloma i

$l_0$  – mm – mjerna dužina epruvete.

Na veličinu izduženja utiče mjesto preloma epruvete zbog čega se za isti materijal mogu dobiti različite vrijednosti izduženja. U slučajevima kada prelom nije na sredini, posebnom metodom prelom svodimo na sredinu. Da bismo ovo mogli izvršiti, prije ispitivanja mjernu dužinu epruvete podijelimo na 10 do 20 jednakih dijelova. Dijeljenje se vrši pomoću lenjira ili posebnog aparata kod koga se za jedan obrtaj ručice epruveta pomjeri za jednu podjelu, a poseban nož načini zarez veoma male dubine. Materijali koji su osjetljivi na zarez obilježavaju se mastilom ili olovkom.



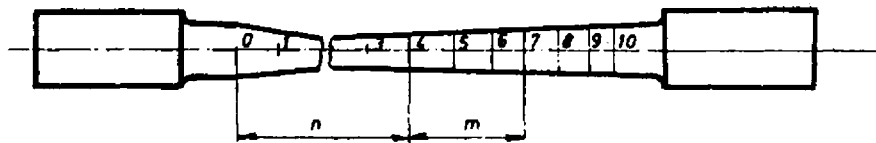
Slika 4.14. Prekid epruvete na sredini

Ako je prelom nastao na sredini epruvete, krajevi preloma se dobro sastave i izmjeri dužina  $l_1$  između krajnje obilježenih crtica pomoću pomičnog mjerila (slika 4.14).

Ako je do preloma došlo u krajnjoj trećini (kod kratkih epruveta), ili u jednoj petini (kod dugačkih epruveta), vršimo korekciju dužine  $l_1$ . Korekcija se izvodi na sljedeći način: prvo se izbroji broj cijelih podjela na kraćem

dijelu epruvete i odbroji isti broj podjeljaka na dužem dijelu epruvete (slika 4.15). Pomoću pomičnog mjerila izmjeri dužina  $n$ . Ostatak podjeljaka na dužem dijelu epruvete podijeli na dva dijela i pomoću pomičnog mjerila izmjeri polovina podioka  $m$  bliža prelomu. Na taj način smo prelom fiktivno sveli na sredinu. Računskim putem određujemo dužinu epruvete  $l_1$ :

$$l_1 = n + 2m.$$



Slika 4.15. Prekid u prvoj trećini

Izduženje  $\delta$  se obilježava indeksom 5 ili 10 ( $\delta_5$  ili  $\delta_{10}$ ), što zavisi od toga kojom epruvetom smo vršili ispitivanje. Indeks 5 se odnosi na kratku epruvetu, a indeks 10 na dugu epruvetu.

Kontrakcija ili suženje presjeka je procentualno smanjenje površine presjeka na mjestu preloma. Određuje se prema obrascu:

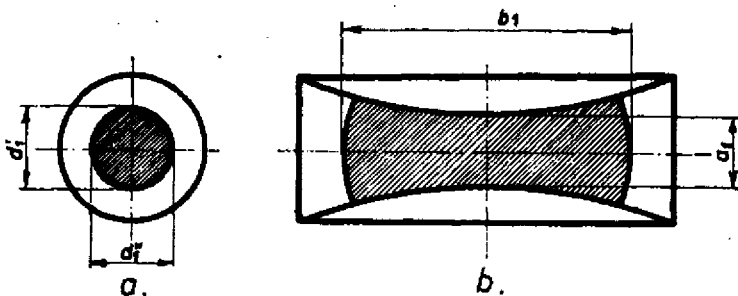
$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100 \%,$$

gdje je:

$A_0$  – mm<sup>2</sup> – prvobitna površina presjeka,

$A_1$  – mm<sup>2</sup> – površina presjeka na mjestu preloma.

Na mjestu preloma dobije se nepravilan oblik presjeka (slika 4.16).



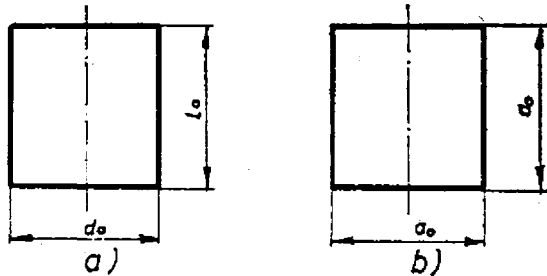
Slika 4.16. Površina preloma

Krajevi epruvete se dobro sastave i pomoću pomičnog mjerila izmjere kod kružnog presjeka dva međusobno normalna prečnika  $d'_1$  i  $d''_1$ . Na osnovu izmjerenih prečnika određuje se srednji prečnik  $d_1 = \frac{d'_1 + d''_1}{2}$ , pa je po-

vršina na mjestu preloma  $A_1 = \frac{d_1^2 \pi}{4}$  mm<sup>2</sup>. Kod epruveta pravougaonog presjeka dolazi do savijanja strana ka unutrašnjosti, pa se površina preloma određuje prema obrascu:  $A_1 = a_1 \cdot b_1$ .

### 4.3. ISPITIVANJE MATERIJALA PRITISKOM

Ponašanje materijala pod djelovanjem sila pritiska ispitujemo na specijalnim presama ili univerzalnim kidalicama. Ispitivanje se izvodi na epruvetama oblika valjka ili kocke (slika 4.17). Prečnik valjka se kreće u granicama od 10 do 30 mm, a dužina  $l_0 = (1 \text{ do } 3) d_0$ . Veće visine valjka se

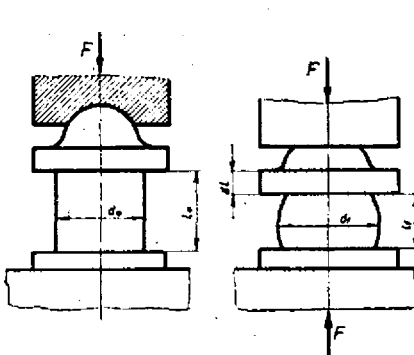


Slika 4.17. Epruvete za ispitivanje pritiskom

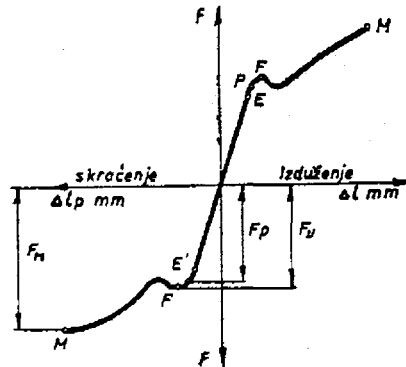
ne upotrebljavaju zbog pojave izvijanja. Dok ispitivanjem na istezanje uvijek dobijamo prelom epruvete, to ispitivanjem na pritisak nije uvijek moguće. Meki čelici, meki metali (olovo, bakar, aluminijum i dr.) se ne mogu polomiti pritiskom, zbog čega se rijetko ispituju na ovaj način.

Pritiskom se najčešće ispituje liveno gvožđe, kaljeni čelik, mesing, beton, kamen, cigla i slično. Kruti materijali pod djelovanjem sila pritiska se lome, pa je moguće odrediti svojstva otpornosti i sposobnosti deformacija.

Dobro obrađena epruveta postavlja se između dvije ravne ploče koje izvođe pritisak. Ploče su kaljene, a jedna od njih mora biti zgloбно vezana za mašinu da bi se dobio ravnomjeran pritisak po cijelom presjeku epruvete (slika 4.18). Sa povećanjem sile pritiska  $F$  dolazi do skraćenja epruvete



Slika 4.18. Ispitivanje na pritisak



Slika 4.19. Dijagram  $F - \Delta l$  pri ispitivanju na pritisak

za  $\Delta l = l_0 - l_1$  i povećanja prečnika. Prilikom izvođenja ispitivanja snima se dijagram sila — skraćenje ( $F - \Delta l$ ), koji ima sličan oblik kao dijagram

dobijen ispitivanjem na istezanje, samo što je u trećem kvadrantu (slika 4.19).

Na osnovu snimljenog dijagrama ili očitanih vrijednosti sila  $F$  i odgovarajućih skraćenja  $\Delta l$  crta se dijagram napon — skraćenje ( $\sigma_p - \varepsilon$ ).

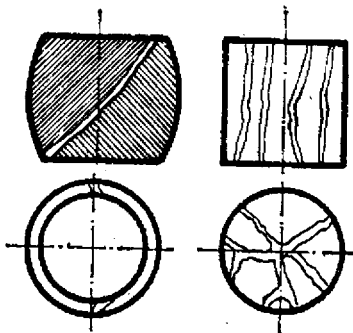
Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja određuju se sljedeća svojstva otpornosti:

- granica proporcionalnosti  $\sigma_{ppr}$ ,
- granica elastičnosti  $\sigma_{pe}$ ,
- granica velikih skraćenja  $\sigma_{pv}$ ,
- pritisna čvrstoća  $\sigma_{pm}$ .

Naponi se određuju na isti način kao i kod ispitivanja zatezanjem.

Pošto granica velikih skraćenja kod svih materijala nije jasno izražena, to se u tim slučajevima određuje tehnička granica velikih skraćenja  $\sigma_{p0,2}$ . Ona se određuje na isti način kao kod istezanja.

Pritisnu čvrstoću ne možemo odrediti za sve materijale. Određuje se samo kod krutih materijala, kod kojih se epruveta lomi. Na slici 4.20. prikazani su prelomi epruveta na dva ili više nepravilnih dijelova.



Slika 4.20. Izgled preloma epruvete

Pritisna čvrstoća se određuje prema obrascu:

$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0}, \text{ N/m}^2.$$

Za žilave materijale, kod kojih ne možemo dobiti prelom, određuje se tehnička granica velikih skraćenja  $\sigma_{p0,2}$  — prema obrascu:

$$\sigma_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{A_0}, \text{ N/m}^2.$$

Granica elastičnosti i proporcionalnosti pri pritisku se rijetko određuju

Svojstva deformacije se određuju na osnovu jediničnog lomnog skraćenja i raširenja epruvete.

Jedinično lomno skraćenje se određuje na osnovu dužine epruvete poslije preloma. Polomljena epruveta se pažljivo sastavi i izmjeri dužina  $l_1$ , na osnovu čega se određuje jedinično lomno skraćenje  $\varepsilon_p$ :

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

Raširenje epruvete određuje se na osnovu razlike površine prije i poslije ispitivanja, prema obrascu:

$$\psi_p = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \cdot 100 \%$$

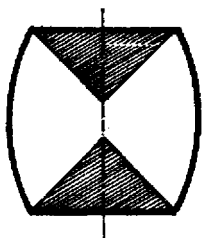


gdje je:

$A_1$  – mm<sup>2</sup> – najveća površina presjeka poslije završenog ispitivanja

$A_0$  – mm<sup>2</sup> – površina presjeka prije ispitivanja.

Posmatranjem deformisane epruvete dolazimo do zaključka da deformacije nisu jednako raspoređene po cijeloj epruveti. Najveće deformacije dešavaju se na sredini epruvete, zbog čega epruveta dobija oblik bureta. Uzrok ovakvih



Slika 4.21. Zone ometanja deformacija

nih površina epruveta gube se ispućenja, a kod krutih materijala znatno se smanjuje pritisna čvrstoća.

deformacija je trenje koje se javlja između čeonih površina epruvete i pritisnih ploča. Sile trenja ometaju deformacije na čeonim površinama, što se prenosi dublje u materijal. Zone ometanog širenja materijala pri deformacijama na pritisak obuhvaćene su konusima čije osnove leže na čeonim stranama epruvete (slika 4.21). Ometano širenje materijala ima za posljedicu neravnomjernu raspodjelu napona. Najveći smičući naponi javljaju se na stranama konusa ometanog širenja gdje se pojavljuju prve pukotine. Uticaj trenja može se smanjiti podmazivanjem čeonih

#### 4.4 ISPITIVANJE MATERIJALA SAVIJANJEM

Ispitivanje materijala savijanjem izvodi se radi određivanja čvrstoće na savijanje  $\sigma_{sm}$ . Najviše se primjenjuje za ispitivanje sivog liva, a rjeđe za čelik i ostale legure. Zbog velike plastičnosti kod čelika i drugih legura ne dolazi do loma, pa ne možemo odrediti čvrstoću na savijanje. Kod ovih materijala određuje se napon na granici velikih razvlačenja.

Uzroci za ispitivanje sivog liva savijanjem izrađuju se livenjem odvojeno od odlivka, livenjem uz odlivak ili isijecanjem iz odlivka.

Dimenzije epruveta za ispitivanje savijanjem zavise od mjerodavne debljine zida odlivka i biraju se prema tabeli 4.3. Ispitivanje se obavlja na

Tabela 4.3.

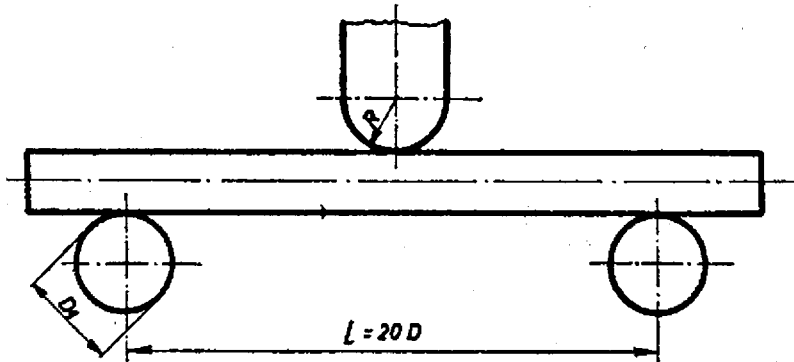
Dimenzije epruveta za ispitivanje na savijanje

Mjerodavna debljina zida u mm	Prečnik $D$ mm	Minimalna dužina mm
od 4 do 8	13	300
iznad 8 do 15	20	450
iznad 15 do 30	30	650
iznad 30 do 45	45	1000

epruvetama okruglog ili kvadratnog presjeka. Epruvete okruglog presjeka, dobijene livenjem uz odlivak ili odvojeno od odlivka ispituju se bez naknadne

mehaničke obrade, dok se epruvete dobijene isijecanjem iz odlivka moraju mehaničkom obradom dovesti na odgovarajuće mjere.

Ispitivanje na savijanje obavlja se na specijalnim ili univerzalnim mašinama za ispitivanje materijala. Epruveta se oslanja na dva valjkasta oslonca,



Slika 4.22. Ispitivanje sivog liva savijanjem

a na sredini pritiskuje pritiskivačem (slika 4.33). Dimenzije epruvete oslonaca date su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4.

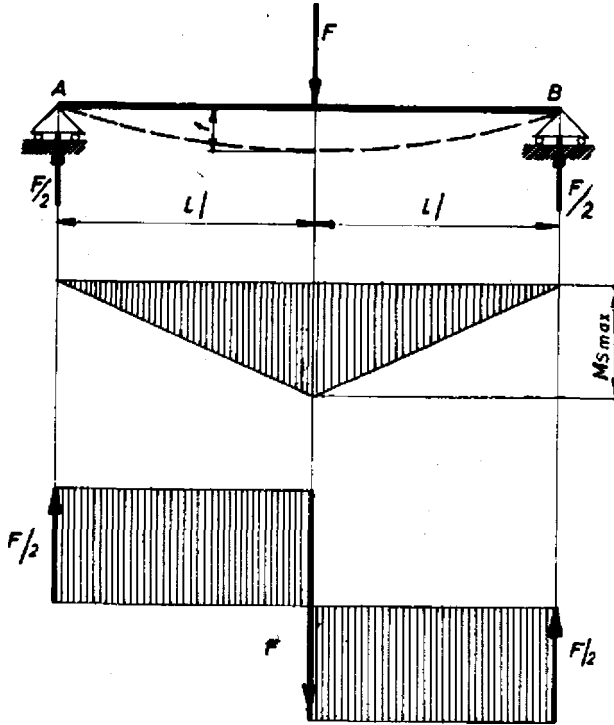
Dimenzije oslonaca i epruveta

Prečnik epruvete $D$ mm	Dimenzije u mm			Predopterećenje $N$
	oslonac $D_1$	pritiskivač $R$	rastojanje $l$	
13	20 – 30	10 – 15	260	40 – 80
20	50 – 60	25 – 30	400	100 ÷ 200
30			600	200 – 400
45			900	400 – 800

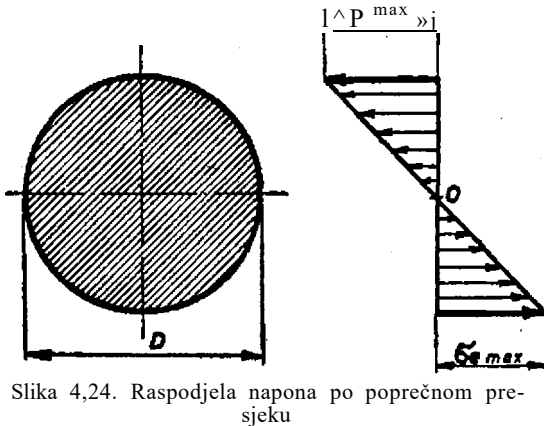
U toku ispitivanja sila se mora polagano povećavati tako da brzina porasta napona ne pređe  $3 \frac{\text{kN/cm}^2}{\text{s}}$ .

Sila  $F$  kojom pritiskivač djeluje na epruvetu izaziva u početku elastične deformacije, a zatim i plastične. Pod djelovanjem sile stvara se ugib, koji raste sa njenim porastom. On je najveći na sredini epruvete ispod sile (slika 4.23). Naponi na savijanje nisu ravnomjerno raspoređeni po poprečnom presjeku. Na savijenoj epruveti sa strane djelovanja sile materijal je napregnut na pritisak, a na suprotnoj strani na istezanje. Napon na savijanje po poprečnom presjeku je linearno raspoređen (slika 4.24). Najveći naponi javljaju se u površinskim slojevima epruvete, a idući prema sredini opadaju. U sredini epruvete, neutralna osa, napon je jednak nuli. Zbog ovakve raspodjele napona jedna vlakna (donja) se istežu, dok se druga (gornja) skraćuju.

Prilikom ispitivanja na savijanje mjeri se ugib  $f$  u funkciji sile i konstruiše se dijagram momentat savijanja — ugib ( $A_i — f$ ). Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja određuju se svojstva otpornosti i svojstva deformacija.



Slika 4.23. Opterećenje epruvete pri savijanju



Slika 4.24. Raspodjela napona po poprečnom presjeku

Kod materijala koji se pri ispitivanju lome određuje se savojna čvrstoća  $\sigma_{sn}$  — prema obrascu:

$$\sigma_{sn} = \frac{M_{s,max}}{W} \text{ N/m}^2.$$

gdje je:  
 $M_{s,max}$  — Nm — maksimalni moment savijanja u trenutku loma epruvete.  
 $W$  —  $\text{m}^3$  — aksijalni otporni moment.

Maksimalni moment savijanja izračunavamo prema slici 4.23, a prema obrascu:

$$M_{s,max} = \frac{F \cdot L}{4}$$

gdje je:

•  $F_{\text{mai}} - N$  — maksimalna sila savijanja pri lomu epruvete

$l - m$  — razmak između oslonaca.

Otporni momenat je karakteristika poprečnog presjeka i za kružni po-  
prečni presjek je:

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \ll 0,1D^3, \text{ m}^3.$$

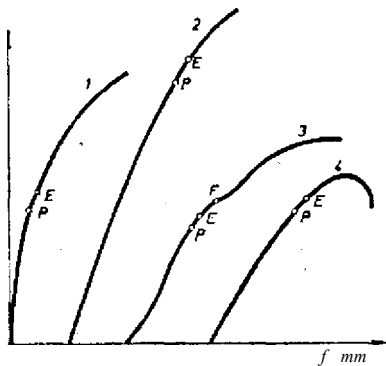
Uvrštavanjem ovih vrijednosti u izraz za savojnu čvrstoću dobijamo:

$$\frac{8 F_{\text{mai}}}{7lD^3} \text{ m'}$$

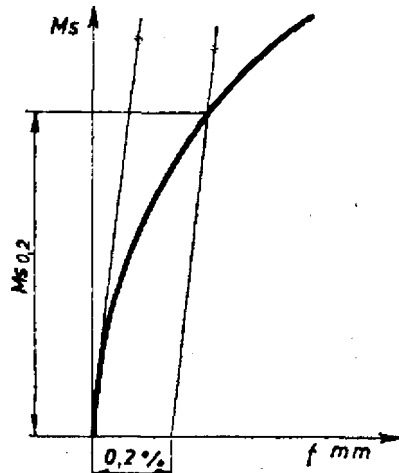
Svojstvo deformacije se, određuje maksimalnim ugibom, koji se po-  
stiže pri lomu epruvete. Da bi se što tačnije odredio maksimalni ugib pri  
prelomu, mjerenje ugiba započinje tek kada se postigne predopterećenje,  
koje je dato u tabeli 4.4.

Kod materijala koji se u toku ispitivanja na savijanje ne lome nije moguće  
odrediti savojnu čvrstoću. Za ovakve materijale određuje se tehnička granica  
razvlačenja pri savijanju ( $f_{t0,2}$ ).

Prilikom ispitivanja na savijanje crta se dijagram momenat savijanja  
— ugib ( $M_s - f$ ). Oblik dijagrama zavisi od vrste materijala i njegovih  
osobina. Na slici 4.25. dati su dijagrami ( $M_s - f$ ) za nekoliko različitih  
materijala. Na pravolinijskom dijelu dijagrama važi proporcionalnost iz-  
među  $M_t - f$  i tu se nalaze granica proporcionalnosti i granica elastičnosti.  
Kod krive 3 (za meki ugljenični čelik) jasno se uočava granica razvlačenja,



Slika 4.25. Dijagrami momenat-ugib ( $M_s - f$ ): 1 — sivi liv, 2 — kaljeni čelik, 3 — meki ugljenični čelik, 4 — srednje i visoko ugljenični čelik



Slika 4.26. Granica razvlačenja pri savijanju

a kod krive 4 ne može se uočiti. Slično kao kod ispitivanja na istezanje i  
ovdje određujemo tehničku granicu razvlačenja  $f_{t0,2}$ . Na apscisu se nanese

0,2% trajne deformacije (ugiba) i povuče linija paralelna sa pravolinijskim dijelom dijagrama (slika 4.26). Tačka koja se dobije u presjeku krive ispitivanja odgovara momentu na granici razvlačenja. Na osnovu ovog podatka određuje se granica razvlačenja prema obrascu:

$$\sigma_{0.2} = \frac{Af_{s0.2}}{W} = \frac{32M_{\#0.2}}{\pi D^3} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

#### 4.5. ISPITIVANJE MATERIJALA UVIJANJEM

Pri ispitivanju materijala na uvijanje (torziju) služe epruvete okruglog ili kvadratnog presjeka. Na slici 4.27. prikazana je epruveta okruglog pre-



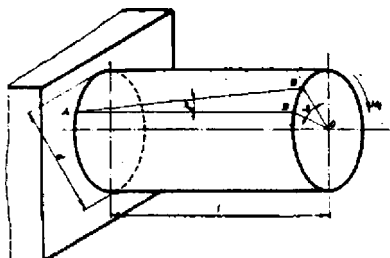
Slika 4.27. Epruveta za ispitivanje uvijanjem

sjeka, a u tabeli 4.5. dimenzije epruvete. Epruveta se učvršćuje u čeljusti mašine i opterećuje obrnim momentom koji izaziva uvijanje vlakana. Kako je srednji mjerni dio epruvete manjeg presjeka, to će se sve plastične deformacije obaviti na mjernoj dužini  $l$ .

Tabela 4.5.

Dimenzije epruvete

Dimenzije epruvete u mm								
$d$	$l$	$D$	10	$l$	$L$	$h$	$r$	$h$
10	$l$	15	100	110	250	65	5	7 - 8
10	7	15	100	100	282	81	5	6 — 8
15	12	20	150	165	300	60	7,5	10-12



Slika 4.28. Deformacije pri uvijanju

Pri uvijanju presjeci epruvete ne mijenjaju oblik, ali se jedan prema drugom zaokreće za izvjestan ugao. Jedan kraj epruvete je vezan za nepokretnu čeljust, a drugi za pokretnu. Pod djejtvom momenta torzije  $M_t$  dolazi do zaokretanja pokretne čeljusti za ugao  $\gamma$  (slika 4.28). Vlakno AB se zaokrenulo za ugao  $\gamma$  u položaj AB'. U području elastičnih deformacija

ugao zaokretanja  $\gamma$  se može izračunati prema obrascu:

$$\gamma = \frac{V}{d/2}$$

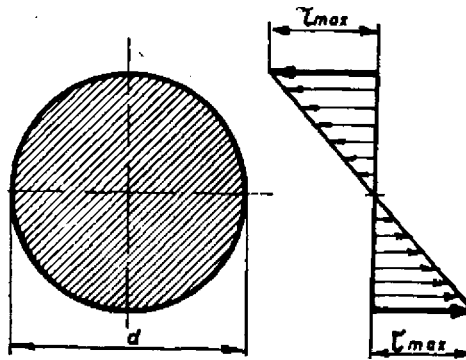
gdje je:

$l$  — mm — rastojanje između dva susjedna presjeka

$d$  — mm — prečnik epruvete.

Sa povećanjem momenta uvijanja raste ugao uvijanja  $\gamma$ , a takođe i naprezanja na uvijanje.

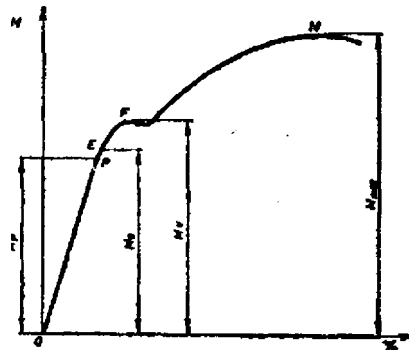
Naprezanje na uvijanje se ravnomjerno prenosi po dužini epruvete, a linearno po presjeku. Najveća naprezanja trpe spoljnja vlakna, dok idući ka sredini napon na uvijanje opada i u sredini napon je jednak nuli (neutralna osa). Na slici 4.29. data je raspodjela napona na uvijanje po poprečnom presjeku.



Slika 4. 29. Raspodjela navojka po poprečnom presjeku

Ša povećanjem napona na uvijanje raste ugao  $\gamma$  a epruveta zadržava kružni oblik bez smanjivanja presjeka.

Pri ispitivanju na uvijanje snima se dijagram, moment uvijanja — ugao uvijanja ( $M - \gamma$ ). Ovaj dijagram može se i konstruisati ako se u toku ispitivanja za razne vrijednosti momenta uvijanja  $M$  očitaju vrijednosti ugla uvijanja. Na slici 4.30. prikazan je jedan dijagram  $M - \gamma$  za meki čelik. Dijagram je sličan dijagramu dobijenom pri ispitivanju na istežanje. Na dijagramu se uočavaju granice proporcionalnosti i elastičnosti, koje su veoma blizu jedna druge. Ako se epruveta koja je bila opterećena do granice elastičnosti rastereti, vratiće se u prvobitni položaj. Ispitivanja pokazuju da



Slika 4.30. Dijagram uvijanja  $M - \gamma$

su deformacije koje izazivaju momenti uvijanja dva puta manje nego pri istežanju ili pritisku. Zbog toga granici elastičnosti  $\tau_{0.01}$  i granica razvla-

čenja  $\sigma_{0,2}$  pri istezanju odgovaraju granica elastičnosti  $t_{k0>0\epsilon}$  i granica razvlačenja  $r_{u0i}$  pri uvijanju.

Granica plastičnosti je uočljiva na dijagramu samo kod malog broja materijala. Kod materijala kod kojih nije jasno izražena određuje se tehnička granica plastičnosti slično kao kod ispitivanja na istezanje.

Naponi na torziju određuju se prema obrascu:

$$\tau = \frac{M}{W_{0r}} = \frac{16 M}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

gdje je:

$$W_{0r} = \frac{\pi d^3}{16} \text{ m}^3 \text{ — polarni otporni moment poprečnog presjeka}$$

$d$  —  $m$  — prečnik epruvete.

Na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem određuju se svojstva otpornosti pri uvijanju:

— granica proporcionalnosti

$$\tau_{upr} = \frac{16 M_p}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

— granica elastičnosti

$$\tau_{el} = \frac{16 M_{\epsilon}}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

— granica plastičnosti

$$\tau_{pl} = \frac{16 M_{pl}}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

ili tehnička granica plastičnosti

$$\tau_{h0,4} = \frac{16 A_{f0,4}}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

— uvojna čvrstoća

$$\tau_{um} = \frac{16 M_{mx}}{\pi d^3} = \frac{N}{m^2}$$

Ispitivanja pokazuju da između granice razvlačenja pri uvijanju i granice razvlačenja pri istezanju postoji odnos:

$$= 0,5 \text{ do } 0,577.$$

\* $\nu$

Karakteristična veličina pri uvijanju je modul klizanja. Modul klizanja predstavlja otpor materijala prema elastičnim deformacijama pri uvijanju. On je konstantan u području proporcionalnosti i može se odrediti mjerenjem ugla uvijanja i odgovarajućeg momenta uvijanja. Određuje se prema obrascu:

$$\Theta = \frac{32 A_i \cdot l}{\pi d^4 - r_p} = \frac{N}{m^2}$$

## 4.6. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Tvrdoća je otpor kojim se jedno tijelo suprotstavlja prodiranju drugog tvrdog tijela u njegovu površinu. Mjerilo tvrdoće je veličina otiska koji ostavlja utiskivač tačno određenog oblika i veličine, izrađen od veoma tvrdog materijala, pod djelovanjem određene sile, na površini ispitivanog materijala.

Prema načinu djelovanja sile, ispitivanja tvrdoće mogu se podijeliti na:

- statička ispitivanja
- dinamička ispitivanja tvrdoće.

Kod statičkog ispitivanja tvrdoće sila ravnomjerno raste do maksimalne vrijednosti i djeluje izvjesno vrijeme, a zatim se vrši lagano rasterećenje. Kod dinamičkog ispitivanja tvrdoće sila se ostvaruje udarom ili se tvrdoća određuje elastičnim odskokom utiskivača od površine predmeta. Veću primjenu imaju metode statičkog određivanja tvrdoće.

Postoji više metoda statičkog i dinamičkog određivanja tvrdoće, koje se međusobno razlikuju po obliku utiskivača (lopta, piramida, konus) vrsti i veličini sile. Rezultati dobijeni ispitivanjem po različitim metodama za isti materijal znatno se razlikuju. Zbog toga se ne mogu zamjenjivati vrijednosti jedne tvrdoće sa vrijednostima druge tvrdoće. Postoje empirijski obrasci koji daju mogućnost preračunavanja jedne vrste tvrdoće u drugu. Osim toga, postoje i uporedne tabele prema kojima se mogu upoređivati različite tvrdoće. Obrasci i tabele za preračunavanje jedne vrste tvrdoće u drugu nemaju opšti značaj, jer važe samo za jedan materijal, dok za drugi materijal važe drugi obrasci.

Pri određivanju tvrdoće najčešće se primjenjuju tri statičke metode, i to:

- Brinelova
- Rokvelova i
- Vikersova.

### 4.6.1. Ispitivanje tvrdoće po Brinelu

Za ispitivanje tvrdoće po Brinelu korisimo se utiskivačem u obliku čelične kuglice, koja se utiskuje određenom silom u površinu predmeta. Mjerilo tvrdoće je veličina otiska koji ostavi kuglica u površini ispitivanog materijala (slika 4.31). Brojna vrijednost tvrdoće predstavlja srednje natezanje po površini otiska koji ostavi kuglica.

Prema tome, tvrdoća po Brinelu se može izraziti:

$$HB = \frac{F}{D\pi h} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$

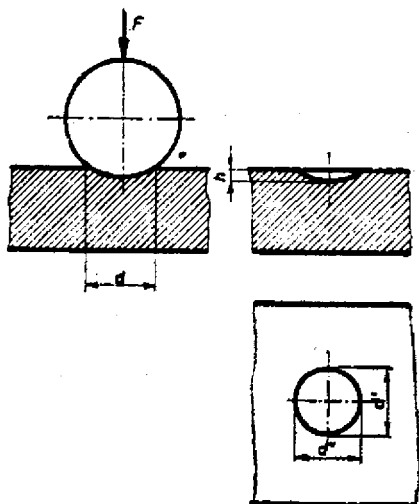
gdje je:

- $F$  — kN — sila utiskivanja
- $D$  — cm — prečnik kuglice
- $h$  — cm — dubina otiska
- $d$  — cm — srednji prečnik otiska.

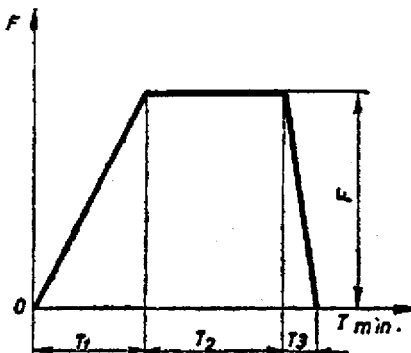
Prilikom mjerenja veličina  $h$  i  $d$  treba razlikovati stabilizovani i nestabilizovani otisak. Nestabilizovani otisak dobija se u toku ispitivanja, a stabilizovani poslije rasterećenja utiskivača. Dimenzije nestabilizovanog otiska



su nešto veće od stabilizovanog — zbog pojave elastičnih deformacija, koje nestaju poslije rasterećenja utiskivača. Dubina otiska ( $h$ ) se smanjuje, dok prečnik otiska ( $d$ ) ostaje neizmijenjen. Zbog toga otisak neće biti kalota, već neka sferna površina.



Slika 4.31. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu



Slika 4.32. Vrijeme utiskivanja kuglice pri ispitivanju tvrdoće po Brinellu

Na veličinu otiska utiče i vrijeme ispitivanja. Ako ispitivanje traje kratko vrijeme, dimenzije otiska su manje, pa je izmjerena tvrdoća nešto veća od stvarne tvrdoće materijala. Ukupno vrijeme ispitivanja možemo podijeliti u tri intervala (slika 4.32). U prvom intervalu, koji traje  $T_1 = 15$  sekunda, sila se ravnomjerno brzinom povećava do maksimalne vrijednosti. Postizanjem maksimalne vrijednosti sile  $F$  započinje drugi vremenski interval  $T_2$ , koji može biti kraći ili duži, što zavisi od vrste materijala koji se ispituje.

Tabela 4.6.

Vrsta materijala		vrijeme držanja pod punim opterećenjem
Čelik	$\sigma_m \leq 110 \text{ kN/cm}^2$	30
	$\sigma_m > 110 \text{ kN/cm}^2$	15
	$\sigma_m > 140 \text{ kN/cm}^2$	10
Bakar i legure bakra		10 do 15
Aluminijum i legure aluminijuma		30
Olovo		60
Magnezijum i legure magnezijuma		120
Ležišne legure		180

Pod dejstvom sile  $F$  kuglica izaziva trajne deformacije materijala koje prelaze granicu plastičnosti. Da bi se izvršile plastične deformacije (tečenje) materijala, i da bi se uspostavila ravnoteža između naprezanja i deformacija,

potrebno je izvjesno vrijeme. Kod mekih materijala ovo vrijeme je duže nego kod tvrdih.

Vrijeme trajanja punog opterećenja  $T_2$  bira se iz tabele 4.6.

Po završetku plastičnih deformacija nastupa period rasterećenja  $T_3$ , koje traje od 10 do 15 s.

Za ispitivanje tvrdoće po Brinelu koristimo se kuglicama prečnika  $D = 10; 5$  i  $2,5$  mm, a izuzetno 1 i 2 mm. Izrađene su od legiranog i okaljenog čelika tvrdoće oko  $850 \text{ HV}$  i služe za ispitivanje materija čija je tvrdoća po Brinelu manja od  $450 \text{ kN/cm}^2$ . Pored čeličnih kuglica, uzimaju se i kuglice od tvrdoga metala, kojim možemo mjeriti tvrdoću do  $650 \text{ kN/cm}^2$ . Prekoračenjem ovih vrijednosti tvrdoće, deformišu se i same kuglice, pa dobijeni rezultati nisu tačni.

Da bi rezultati ispitivanja bili dobri, potrebno je da prečnik otiska ( $d$ ) bude:  $d = (0,2 \text{ do } 0,5) D$ . Za ostvarenje ovog odnosa  $\left(\frac{d}{D}\right)$  treba birati prečnik utiskivača  $D$  i silu utiskivanja  $F$  — zavisno od vrste i dimenzija materijala. Pri ovome mora biti obezbijeden uslov da je:

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

gdje je  $K$  konstanta koja zavisi od vrste materijala. U tabeli 4.7. date su preporuke za izbor prečnika kuglice i sile utiskivanja za različite debljine i vrste materijala.

Prije početka mjerenja dimenzija otiska treba najprije pregledati otisak. Na poleđini ne smije biti nikakvih tragova deformacija. Da bi se ovo izbjeglo, potrebno je da debljina materijala bude 8, odnosno 10 puta veća od dubine otiska (slika 4.33).



MATERIJAL	$\delta$ [mm]
čelik, sivi liv aluminijum i olovo	$\delta > 8h$
bakar	$\delta > 10h$

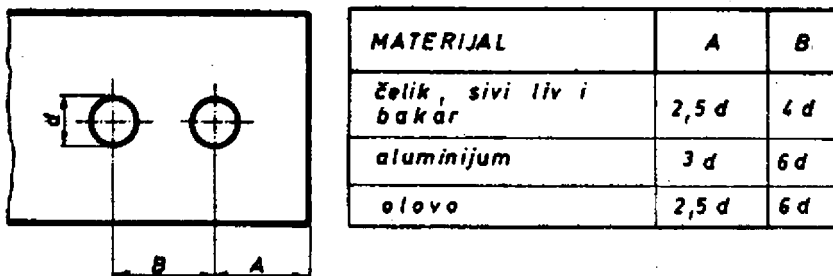
Slika 4.33. Debljina materijala i dubina otisaka

Tabela 4.7.

Dimenzije kuglice i opterećenje

Debljina materijala (mm)	Prečnik kuglice	Opterećenje $F_u$ kN					
		30 $D_2$	10 $D_2$	5 $D_2$	2,5 $D_2$	1,25 $D_2$	0,5 $D_2$
Preko 6	10	29,4	9,8	4,9	2,45	1,225	0,49
Od 3 do 6	5	7,35	2,45	1,225	0,6125	0,30625	0,1225
Ispod 3	2,5	1,8375	0,6125	0,30625	0,153125	0,075565	0,0306
Površinsko ispitivanje	1	0,294	0,098	0,049	0,0245	0,01225	0,0049
Vrsta materijala		čelik žel. liv. temper- liv si- vi liv	bakar, mesing bronz- nikl	alumi- nijum magne- zijum cink i live mesing	ležišni metali	olovo kalaj	bijeli metal

Osim toga, pri uzimanju otiska mora se voditi računa o rastojanju centra otiska od ivice materijala i o rastojanju između centara dvaju susjednih otisaka (slika 4.34).



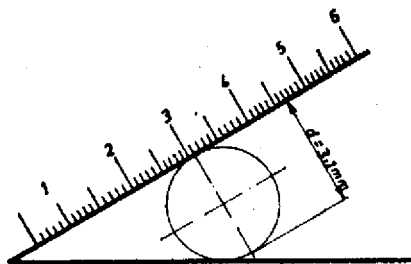
Slika 4.34. Rastojanje otiska

Po JUS standardima treba izvršiti najmanje tri mjerenja tvrdoće. Uzima se srednja vrijednost tvrdoće.

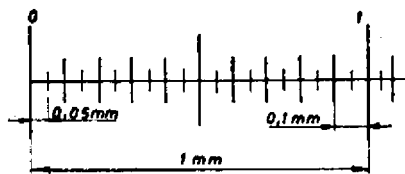
Način mjerenja otiska zavisi od tačnosti mjerenja, koja ne smije biti manja od 0,25% prečnika utiskivača  $D$ . Mjerenje se najčešće izvodi pomoću lenjira ili lupa koje imaju različito povećanje.

Pomoću lenjira može se postići tačnost očitavanja  $1/50$  do  $\frac{1}{100}$  mm.

Da bi se ovo postiglo, lenjir mora biti dovoljno oštar. Način mjerenja prikazan je na slici 4.35. Otisak se „uraključuje“ između krakova lenjira i na strani gdje je podjela pročita se prečnik otiska.



Slika 4.35. Mjerenje otiska pomoću lenjira



Slika 4.36. Skala sa podjelom

Lupe koje imaju različito povećanje imaju skalu sa podjeljcima 0,05 mm (slika 4.36).

Lupa se postavlja iznad otiska, tako da nulti podjeljak tangira otisak sa jedne strane, a na drugoj strani pročitaemo otisak na mjestu gdje jedna crtica skale tangira drugu stranu otiska (slika 4.37).

S obzirom da otisak nema pravilan oblik, mjerimo dva međusobno normalna prečnika  $d'$  i  $d''$ . Na osnovu izmjerenih prečnika određuje se srednji prečnik otiska  $d$ , koji se koristi u izračunavanju tvrdoće:

$$d = \frac{d' + d''}{2}, \text{mm.}$$

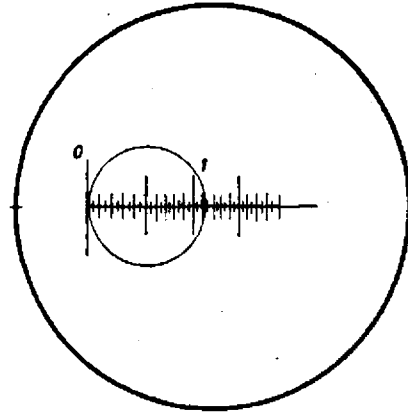
Tvrdoća po Brinelu označava se sa  $HB$  pod uslovom da je ispitivanje izvršeno sa kuglicom prečnika 10 mm, silom utiskivanja  $F = 29,4 \text{ kN}$  i vremenom trajanja punog opterećenja  $T_2 = 10 - 15 \text{ s}$ . Ako su uslovi ispitivanja izmijenjeni, tada pored oznake za tvrdoću  $HB$  treba dopisati dopunske oznake koje izražavaju uslove ispitivanja i to sljedećim redom: prečnik kuglice  $D$ , sila utiskivanja  $F$  i vrijeme trajanja sile  $T_2$ . Tako, na primjer, ako je ispitivanje tvrdoće izvršeno sa kuglicom  $D = 10 \text{ mm}$ , silom  $F = 29,4 \text{ N}$  i vremenom trajanja punog opterećenja  $T_2 = 30 \text{ s}$ , a izračunata tvrdoća  $302 \text{ kN/cm}^2$ , tada bismo je označili:

$$HB_{10|29,4|30} = 302 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Na osnovu izmjerene tvrdoće po Brinelu moguće je odrediti zateznu čvrstoću materijala  $\sigma_m$  prema obrascu:

$$\sigma_m = C \cdot HB, \text{ kN/cm}^2,$$

gdje je  $C$  konstanta koja zavisi od vrste i strukture materijala. Tako čelik valjan, ili presovan ima jednu konstantu  $C$ , a kaljen drugu. Vrijednosti konstante  $C$  date su u tabeli 4.8.



Slika 4.37. Očitavanje otiska pomoću lupe

Tabela 4.8.

Vrijednosti konstante  $C$

Materijal	$C$
Čelik	0,33 do 0,36
liveno gvožđe	0,20
Aluminijum (liven)	0,27
Aluminijum (valjan)	0,35
Duraluminijum	0,36
Olovo	0,29
Bakar (žaren)	0,55
Bakar (valjan)	0,40
Mesing (liven)	0,35
Mesing (valjan)	0,37
Cink	0,42
Bijeli metal	0,22
Niki	0,38
Elektron	0,40

Brinelova metoda nije pogodna za ispitivanje tankih limova i materijala čija je tvrdoća veća od  $650 \text{ kN/cm}^2$ .

#### 4.6.2. Ispitivanje tvrdoće po Rokvell-u

Po Rokvellu mjerilo tvrdoće je dubina otiska koji ostavi specijalni utiskivač na koji djeluje određena sila. Kao utiskivač služe čelične kuglice odgovarajućeg prečnika ili dijamantski konus sa uglom konusa  $120^\circ$  i poluprečnikom zaobljenja vrha  $r = 0,2 \text{ mm}$ .

U zavisnosti od vrste materijala i debljine uzorka bira se utiskivač i veličina sile. U tabeli 4.9. date su karakteristike različitih postupaka ispitivanja tvrdoće po Rokvelu.

Tabela 4.9.

Oznake i karakteristike Rokvelovog postupka

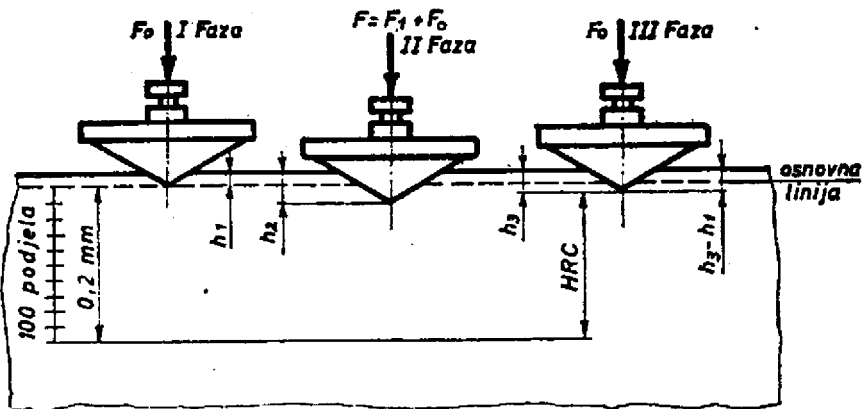
Vrsta postupka	Karakteristike postupka			Boja
	Oznaka tvrdoće	Utiskivač	Ukupna sila utiskivanja u N	
B	HRB	Kugla	980	crvena
C	HRC	Dijamantski konus	1470	crna
A	HRA	Dijamantski konus	588	crna

Pod dejstvom ukupnog opterećenja utiskivač u površini predmeta ostavlja trajni otisak čija dubina predstavlja mjerilo tvrdoće. Tvrdoća po Rokvelu je bezdimenzioni broj i izražava se u jedinicama Rokvelovih skala.

Kod svih Rokvelovih postupaka mjerenje tvrdoće se odvija u tri faze: u prvoj fazi utiskivač se optereti predopterećenjem  $F_0$ , čime se uklanjaju uticaji neravnina i drugih grešaka koje bi mogle uticati na tačnost mjerenja tvrdoće; u drugoj fazi utiskivač se opterećuje glavnim opterećenjem  $F_1$  koji skupa s predopterećenjem  $F_0$  izaziva plastične i elastične deformacije. U trećoj fazi skida se glavno opterećenje, a utiskivač se ostavlja pod dejstvom predopterećenja, kada se vrši očitavanje tvrdoće.

Po JUS-u standardizovana su dva postupka mjerenja tvrdoće po skali B i C.

Ispitivanje tvrdoće po skali C vrši se utiskivanjem dijamantskog konusa (slika 4.38).



Slika 4.38. Postupak ispitivanja tvrdoće po skali C

Utiskivač se postavlja normalno na površinu predmeta čiju tvrdoću mjerimo i lagano, bez trzaja opteretimo sa predopterećenjem  $F_0 = 98$  N. Zatim se skala okrene da bi se kazaljka poklopila sa 0 na crnoj skali. Poslije

toga lagano se utiskivač opterećuje glavnim opterećenjem  $F_1 = 1372$  N, tako da skupa sa predopterećenjem  $F_0$  čini ukupno opterećenje:

$$F = F_0 + F_1 = 98 + 1372 = 1470 \text{ N.}$$

Kada se kazaljka zaustavi, glavno opterećenje  $F_1$  se odstranjuje, i ostaje samo predopterećenje. Skidanjem glavnog opterećenja poništavaju se elastične deformacije mašine i predmeta i ostaju samo plastične. Tada se na skali pročita vrijednost tvrdoće. Skala (C) za mjerenje tvrdoće podijeljena je na 100 jednakih dijelova, tako da svaka podjela predstavlja jednu jedinicu Rokvelove tvrdoće. Jedna Rokvelova jedinica za tvrdoću odgovara dubini otiska od 0,002 mm. Zbog toga bi tvrdoća prema slici bila izražena:

$$\frac{h_3 - h_1}{0,002}$$

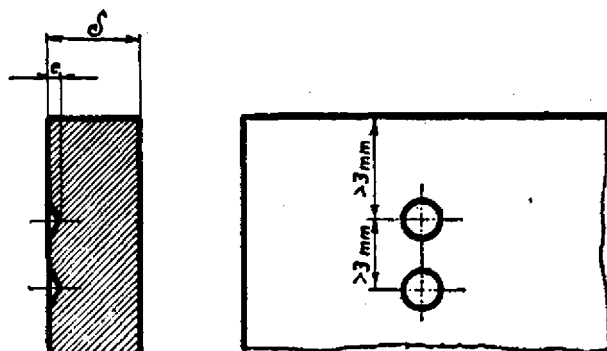
Ovako određena tvrdoća imala bi veću vrijednost za mekše materijale, dok bi za tvrde bila manja. Da bi se to izbjeglo, tvrdoća se određuje po obrascu:

$$HRC = 100 - \frac{h_3 - h_1}{0,002}$$

Skala C se koristi pri određivanju tvrdoće  $HRC \geq 20$ . Debljina lima na kome mjerimo tvrdoću mora biti 8 puta veća od dubine otiska (slika 4.39). Rastojanje otiska od ivice, a takođe i rastojanja između dva susjedna otiska mora biti veća od 3 mm.

Rokvelovu tvrdoću po skali B određujemo utiskivanjem čelične kuglice sa ukupnim opterećenjem  $F = 980$  N. Postupak je potpuno isti kao i pri određivanju tvrdoće po skali C, a prikazan je na slici 4.40.

U prvoj fazi utiskivač se dovede u dodir sa površinom predmeta i optereti sa predopterećenjem  $F_0 = 98$  N. Zatim se skala zakrene tako da se 30 podjeljaka crvene skale poklopi s kazaljkom.



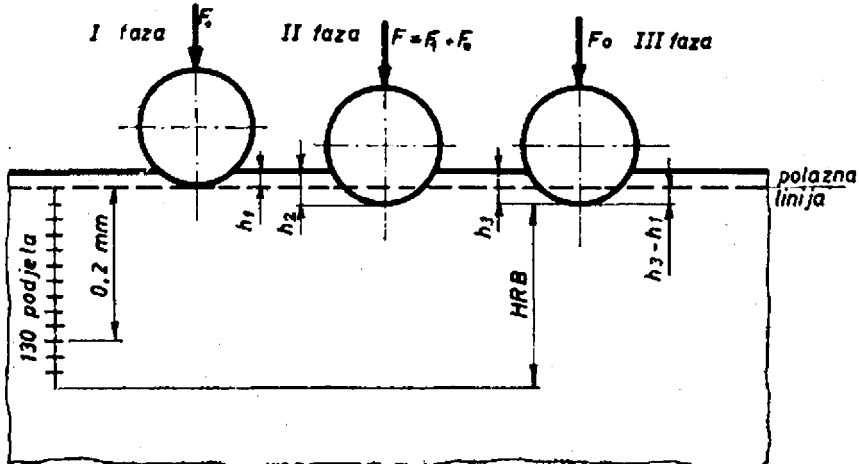
Slika 4.39. Debljina materijala i dubina otiska

U drugoj fazi optereti se utiskivač sa glavnim opterećenjem  $F_1 = 882$  N, tj. ukupnim opterećenjem,

$$F = F_0 + F_1 = 98 + 882 = 980 \text{ N.}$$

Kada se kazaljka zaustavi, skida se glavno opterećenje  $F_1$ , a ostaje predopterećenje  $F_0$ . Tada se pročita na crvenoj skali vrijednost tvrdoće. Tvrdoća po skali B određuje se prema obrascu:

$$HRB = 130 - \frac{h_3 - h_1}{0,002}$$



Slika 4.40. Postupak ispitivanja tvrdoće po skali B

Postupak B primjenjuje se za ispitivanje materijala čija je tvrdoća  $HRB = 25$  do  $100$ .

Vrijeme trajanja punog opterećenja kod svih postupaka mjerenja Rokvelove tvrdoće je oko  $10$  s. Vrijeme postizanja punog opterećenja kreće se od  $3$  do  $6$  s.

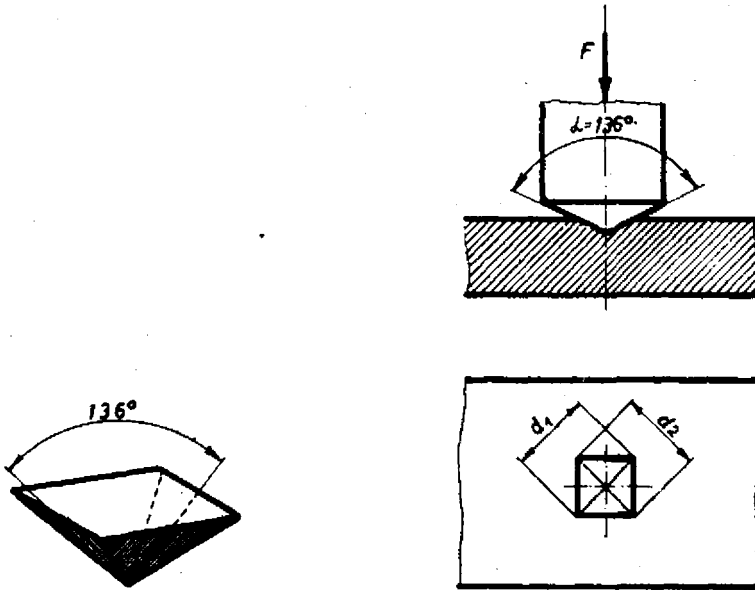
### 4.6.3. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu

Nesavršenstvo Brinelove i Rokvelove metode određivanja tvrdoće dovelo je do usavršavanja Vickersove metode. Ova metoda odlikuje se nizom preimućstava:

- mogu se ispitivati i najtvrdi materijali
- oštećenje površine je minimalno
- može se odrediti tvrdoća veoma tankih limova
- može se odrediti tvrdoća tankih slojeva kao što su: cementirani, nitrirani, hromirani itd.
- može se određivati tvrdoća pojedinih mikro-struktura koje ulaze u sastav legure (mikrotvrdoća).

Utiskivač ima oblik prave (uspravne) četverostrane piramide sa kvadratnom osnovom i propisanim uglom između suprotnih strana  $\alpha = 136^\circ$  (slika 4.41).

Pod djelovanjem sile utiskivanja  $F$ , utiskivač prodire u površinu materijala ostavljajući trajni otisak čija je horizontalna projekcija kvadrat (slika 4.42).



Slika 4.41. Utiskivač za ispitivanje tvrdoće po Vickersu

Slika 4.42. Shema ispitivanja tvrdoće po Vickersu

Pomoću mikroskopa mjere se dvije dijagonale otiska  $d_1$  i  $d_2$ , na osnovu kojih se izračunava srednja dijagonala  $d$ , koja je mjerodavna za proračun površine otiska:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ cm.}$$

Na osnovu određene dijagonale računa se površina otiska  $A$  (dio piramide koji je prodro u površinu predmeta):

$$A = \frac{d^2}{2 \sin \alpha/2} = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{1,8544} \text{ cm}^2.$$

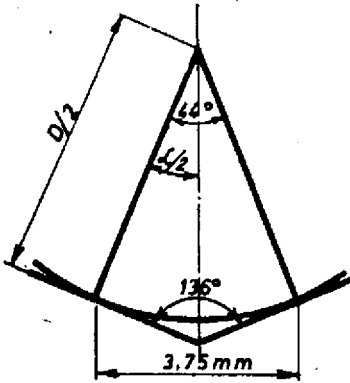
Tvrdoća po Vickersu se određuje kao odnos između sile utiskivanja površine otiska što ga ostavi piramida:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \sin \alpha/2}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

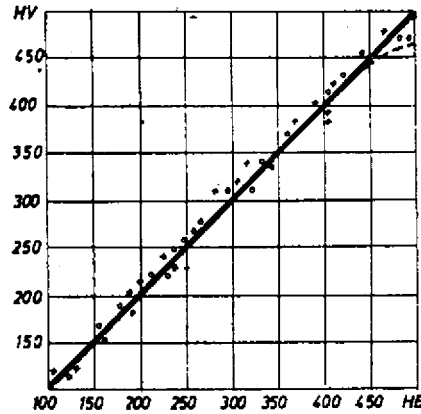
Brojne vrijednosti tvrdoće dobijene ispitivanjem po Vickersu veoma su bliske brojnim vrijednostima Brinellove tvrdoće, dobijene utiskivanjem čelične kuglice prečnika  $D = 10 \text{ mm}$  sa srednjim otiskom  $d = 3,75 \text{ mm}$ . Ovom otisku odgovara srednji ugao  $\alpha = 44^\circ$  (slika 4.43). (Zbog toga je i usvojen ugao  $\alpha = 136^\circ$ ).



Na slici 4.44. prikazane su uporedne vrijednosti tvrdoća dobijenih ispitivanjem po Brinelu i Vickersu. Tvrdoća po Brinelu je određivana utiskivanjem kuglice od tvrdog metala. Kao što se vidi iz dijagrama, tvrdoće dobijene različitim metodama imaju gotovo istu vrijednost u intervalu od 100 do 500 kN/cm<sup>2</sup>.



Slika 4.43. Odnos između parametara otiska kugle i piramide



Slika 4.44. Uporedne vrijednosti tvrdoće po Vickersu i Brinellu

Ako se Brinelova tvrdoća određuje čeličnim kuglicama, tada za tvrdoće materijala veće od 450 kN/cm<sup>2</sup>, usljed deformacija kuglice dolazi do odstupanja. Vrijednosti *HB* su manje od *HV*, što je prikazano isprekidanom linijom. Zbog toga se čelične kuglice i koriste za određivanje tvrdoće materijala do 450 kN/cm<sup>2</sup>.

Sila utiskivanja pri određivanju tvrdoće po Vickersu bira se u veoma širokom intervalu, što zavisi od debljine uzorka i očekivane tvrdoće. Prema veličini sile kojom vršimo ispitivanje tvrdoće po Vickersu, ispitivanja možemo podijeliti u tri grupe:

- makro ispitivanja  $F > 50$  N
- mikro ispitivanja  $0,02$  N  $< F < 2$  N i
- prelazna ispitivanja  $2$  N  $< F < 50$  N.

Najčešće se primjenjuju makro ispitivanja silama 50, 98, 294 i 490 N. U tabeli 4.10. date su preporuke za izbor sile utiskivanja utiskivača zavisno od debljine lima i očekivanja tvrdoće.

Tabela 4.10.

Sile utiskivanja [N]

Debljina uzorka (mm)	Tvrdoća koja se očekuje HV kN/cm <sup>2</sup>			
	25 – 50	50 – 100	100 – 300	300 – 900
0,3–0,5				50–98
0,5–1,0			50–98	98–196
1,0–2,0	50–98	50–98	98–196	–
2,0–4,0	98–196	196–490	196–490	196–490
4,0	196	294	490	

Veličina sile može biti do 1 kN pa i više. Izborom većih sila utiskivanja postoji mogućnost lakog oštećenja dijamantskog utiskivača.

Pri ispitivanju tvrdoće moramo voditi računa o vremenu trajanja ispitivanja. Povećanje opterećenja do pune vrijednosti mora biti ravnomjerno i lagano, bez udara. Puno opterećenje treba da traje od 10 do 15 s. Ukoliko vrijeme trajanja punog opterećenja odstupa od normalnog vremena, mora se posebno naglasiti.

Da bi rezultati ispitivanja tvrdoće po Vikersu bili dobri, potrebno je ispuniti sljedeće uslove:

- površina uzorka mora biti potpuno čista i fino obrađena (polirana); ne preporučuje se obrada brušenjem ili na drugim mašinama alatkama (strug, glodalica itd.), pošto se pod pritiskom alata stvara deformacioni sloj, a toplota nastala u procesu obrade može da izazove strukturne promjene;
- utiskivač mora biti strogo normalan na površinu uzorka i
- dimenzije otiska moraju zadovoljiti uslove date u tabeli na slici 4.45.

Tvrdoća po Vikersu označava se sa  $HV$ , a u indeks unose uslovi ispitivanja (sila, vrijeme).

Ako se pri ispitivanju čelika koristila sila  $F = 294 \text{ N}$  za vrijeme trajanja punog opterećenja  $T_R = 10$  do  $15 \text{ s}$ , tada se tvrdoća označava samo sa  $HV$ , na primjer,  $HV = 715 \text{ kN/cm}^2$ .

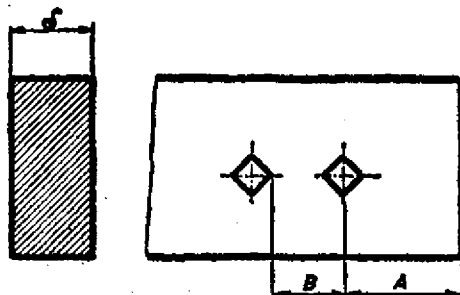


Tabela 4.11

MATERIJAL	$d$	A	B
čelik, bakar i legure bakra	$> 1,2 d$	$> 2,5 d$	$> 2,5 d$
laki metali	$> 1,5 d$	$> 2,5 d$	$> 2,5 d$

Slika 4.45. Dimenzije otiska

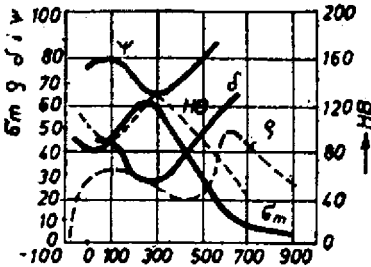
Ako su uslovi ispitivanja izmijenjeni (na primjer  $F = 500 \text{ N}$ , a vrijeme trajanja punog opterećenja  $T_R = 20 \text{ s}$ ), tada bi se tvrdoća označavala ( $HV_{F/T_R}$ ):

$$HV_{0,5/20} = 540 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

## 4.7. FAKTORI KOJI UTIČU NA STATIČKA ISPITIVANJA

Opisani postupci statičkih ispitivanja obavljaju se na sobnim temperaturama. Pod pojmom sobne temperature podrazumijeva se temperatura od  $20^{\circ}\text{C}$  sa odstupanjem do  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . JUS — standardima za svako ispitivanje propisana je temperatura ispitivanja. Međutim, veliki broj elemenata radi u

veoma nepovoljnim uslovima kao što su turbine, kotlovi, motori SUS, itd. Dijelovi ovih mašina rade pri visokim temperaturama koje negativno utiču na mehaničke osobine. Osim toga, dugotrajnim opterećenjem na povišenim temperaturama dolazi do starenja materijala i loma pri nižim opterećenjima od očekivanih.



Slika 4.46. Uticaj temperature na mehaničke osobine niskougljeničnih čelika

Sa povišenjem temperature opadaju privlačne sile između atoma, rastu brzine difuzije, dolazi do segregacije, pojave krupnozrnaste strukture, što sve utiče na smanjenje svojstava otpornosti i povećanja svojstava deformacije.

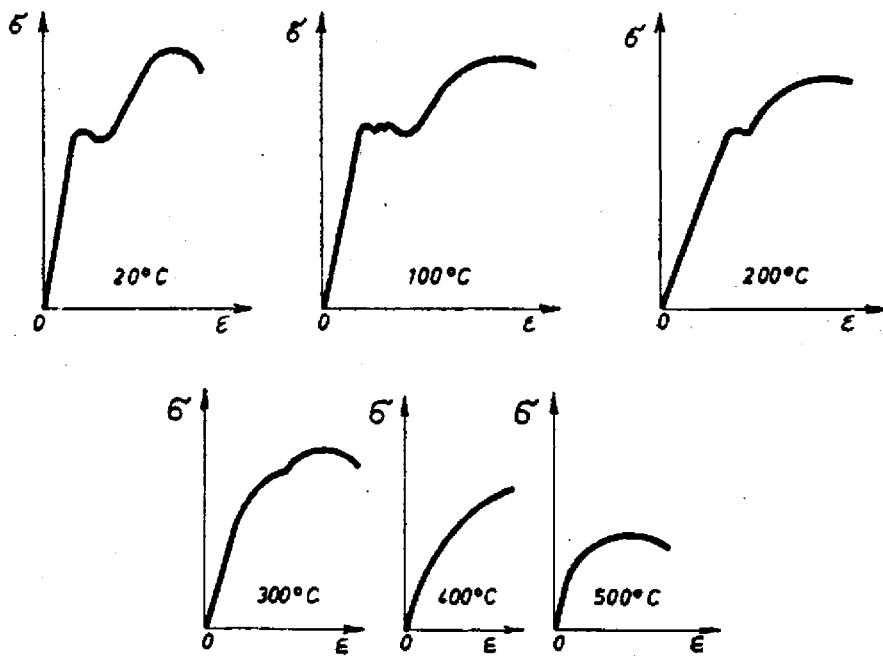
Na slici 4.46. prikazan je uticaj temperature na mehaničke osobine kod nisko-ugljeničnih čelika. Iz dijagrama se vidi da sa povećanjem temperature do  $200^{\circ}\text{C}$  rastu osobine otpornosti, a opadaju osobine deformacije. Ovo se objašnjava izlučivanjem tercijarnog cementita i nitrida iz gvožđa. Zagrijavanjem iznad ove temperature dolazi do pada svojstava otpornosti, a porasta svojstava deformacija.

Granice elastičnosti i proporcionalnosti sa porastom temperature opadaju, gubi se pravolinijski dio dijagrama (zakon proporcionalnosti više ne važi). Granica plastičnosti se snižava i kod ugljeničnih čelika na temperaturi oko  $300^{\circ}\text{C}$  se gubi, i u tom se slučaju može odrediti samo tehnička granica razvlačenja  $\delta_{0.2}$  sl. 4.47.

Pored temperature, na mehaničke osobine utiče i vrijeme trajanja opterećenja na povišenim temperaturama. Ispitivanja pokazuju da produžavanjem vremena trajanja opterećenja, granica plastičnosti opada. Ukoliko je temperatura više, utoliko je veće opadanje granice plastičnosti. Kod ugljeničnih čelika zagrijavanjem do  $300^{\circ}\text{C}$  moguća je stabilizacija granice plastičnosti  $\delta_{0.2}$ . Sa zagrijavanjem preko  $300^{\circ}\text{C}$  moguće je govoriti o uslovnoj granici razvlačenja, koja zavisi od temperature i vremena naprezanja. Za legirane čelike moguća je stabilizacija granice razvlačenja  $\delta_{0.2}$  do  $400^{\circ}\text{C}$ .

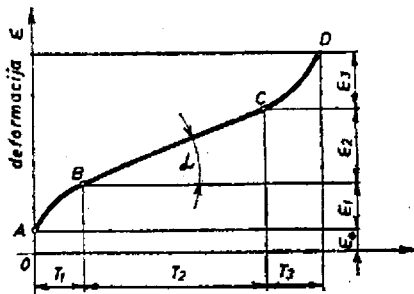
Pod dejstvom opterećenja na povišenim temperaturama dolazi do lagane plastične deformacije. Ova pojava naziva se puzanjem. Na slici 4.48. prikazan je dijagram puzanja. Sa slike se mogu uočiti tri intervala. U prvom intervalu, koji odgovara vremenu  $T_1$ , deformacije brzo rastu (u početku brzo, a kasnije sporije). U drugom intervalu, koji odgovara vremenu  $T_2$ ,

deformacije rastu konstantnom brzinom. U trećem intervalu brzina deformacije raste s povećanom brzinom i na kraju deformacije se završavaju prelomom.



Slika 4.47. Krive  $\sigma-\epsilon$  pri različitim temperaturama

Na oblik dijagrama utiču temperatura i napon. Što su veći naponi i temperature — to će prije doći do preloma. Da bi došlo do puzanja na nižim temperaturama, potreban je veći napon, i obrnuto. Puzanje se može obavljati i na sobnim temperaturama. Da bi do toga došlo, potrebno je ostvariti napon koji je veći ili jednak naponu na granici plastičnosti. Pošto su elementi napregnuti naponima koji su niži od granice elastičnosti, to do pojave puzanja ne dolazi.

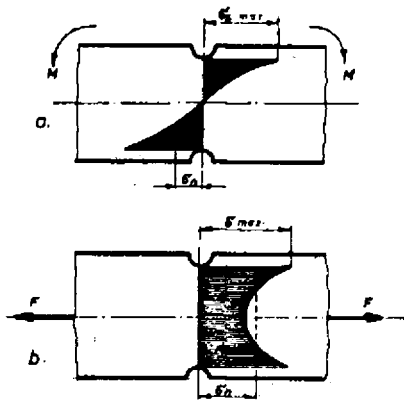


Slika 4.48. Kriva puzanja

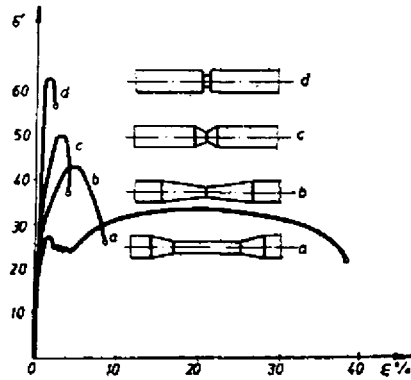
Na rezultate dobijene ispitivanjem, istezanjem, pritiskom, savijanjem i torzijom jak uticaj imaju zarez. Zarezi mogu biti različitog porijekla, a svi utiču na neravnomjernu raspodjelu napona, što se odražava na mehaničke karakteristike materijala.

Kakav i koliki uticaj će zarez imati na mehaničke karakteristike zavisi od prirode materijala i njegove homogenosti, vrste naprezanja, oblika i di-

menzija zarez. Isti oblik i dimenzije zarezu imaju jedan uticaj kod žilavih, a drugi kod krutih materijala. Na slici 4.49. prikazana je raspodjela napona pri istezanju i savijanju kod epruveta sa žlijebom. Kod krutih materijala zarez smanjuje čvrstoću, dok kod žilavih može uticati na povećanju čvrstoće.



Slika 4.49. Raspodjela napona po poprečnom presjeku kod epruvete sa zarezom



Slika 4.50. Uticaj zarezu na čvrstoću kod niskougleničnih čelika

Na slici 4.50. prikazan je uticaj oblika i dimenzija zarezu na čvrstoću kod ugljeničnog čelika.

#### 4.8. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA

Postupak zavarivanja ima ogromnu primjenu u svim oblastima metalne industrije. Zavareni spojevi rade u različitim uslovima i opterećeni su različitim vrstama opterećenja.

U statička ispitivanja zavarenih spojeva spadaju:

- ispitivanje zatezanjem,
- ispitivanje savijanjem i
- ispitivanje tvrdoće.

Ispitivanja zavarenih spojeva zatezanjem izvodimo s najmanje dvije epruvete. Uslovi zavarivanja i termičke obrade na zavarenim epruветama moraju odgovarati uslovima zavarivanja i termičke obrade konstrukcije za koju vršimo ispitivanje. Ukoliko oblik zavarenog spoja isključuje mogućnost izrade odgovarajuće epruvete (dijelovi složenog oblika cijevi i dr.), epruvete mogu biti izrađene od specijalnih dijelova pravougaonog presjeka.

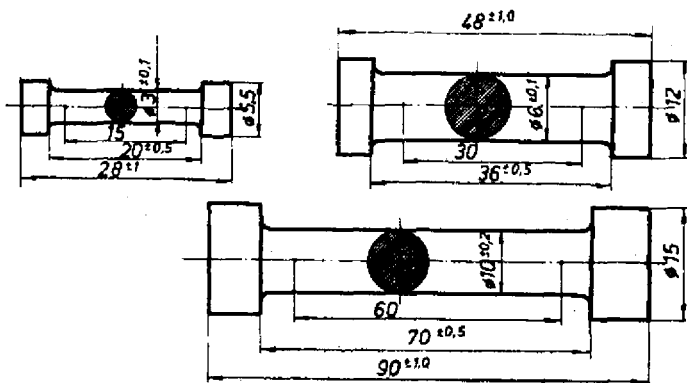
Dimenzije uzoraka koje isjecamo iz konstrukcija da bismo izvadili epruветu moraju biti uvećane za veličinu dodatka za obradu. Ako isijecanje vršimo termičkim sječenjem, dodatak za obradu mora biti dovoljan da se obradom odstrani sloj u kome je toplota imala uticaja na strukturu, a time i na mehaničke osobine. Isjecanja materijala iz konstrukcije moraju se izvoditi postupcima koji ne izazivaju veći porast temperature od 100°C u osnovnom

materijalu. Ispravljanje uzoraka od kojih se izrađuju epruvete nije dozvoljeno. Ispitivanju na zatezanje podvrgavaju se epruvete izrađene od osnovnog materijala, materijala zavarenog šava i kombinacije osnovnog materijala i zavarenog spoja.

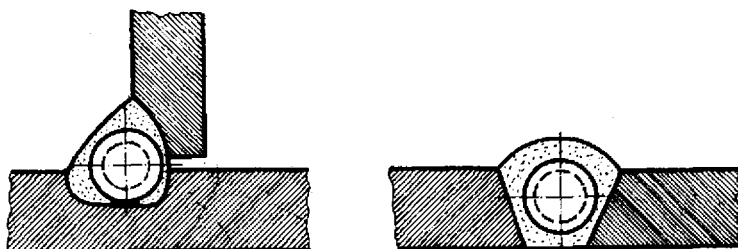
Epruvete od osnovnog materijala su iste kao i za ispitivanje osobina materijala zatezanjem, koje smo ranije obradili. Na ovim epruvetama utvrđujemo mehaničke osobine osnovnog materijala zatezanjem.

S obzirom na to da su dimenzije šava znatno manje, koristimo se epruvetama kružnog i pravougaonog presjeka, ali znatno manjih dimenzija. Na slici 4.51. dati su izgledi epruveta kružnog i pravougaonog poprečnog presjeka.

Uzimanje uzorka za ispitivanje zatezanjem prikazano je slikom 4.52.



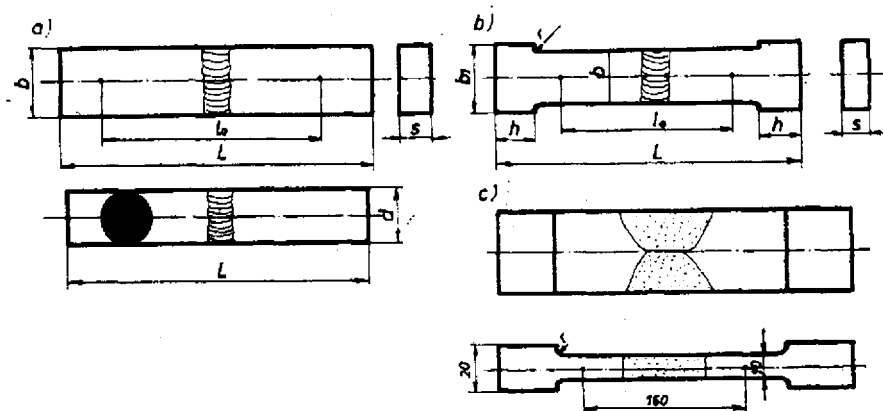
Slika 4.51. Epruvete za ispitivanje zatezanjem



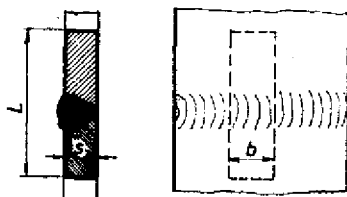
Slika 4.52. Šema isijecanja uzoraka za izradu epruvete

Zatezanjem utvrđujemo granicu proporcionalnosti  $\sigma_p$ , granicu elastičnosti  $\sigma_e$ , granicu razvlačenja  $\sigma_b$ , zateznu čvrstoću  $\sigma_m$ , modul elastičnosti  $E$ , izduženje  $\delta$  i kontrakciju  $\psi$ . Po završenom kidanju pažljivo pregledamo prelom i utvrđujemo da li na prelomu ima naprslina, šljake i drugih grešaka. Ispitivanje se izvodi na temperaturi od  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , a epruveta se mora unijeti u prostor laboratorije i držati najmanje 20 minuta, da bi se temperatura izjednačila. U zapisnik se unose podaci o temperaturi i rezultatima ispitivanja.

Za ispitivanje zavarenih spojeva primjenjuju se epruvete pravougaonog i okruglog poprečnog presjeka (slika 4.53). Na slici 4.54. prikazan je način isijecanja uzoraka iz zavarenih spojeva za izradu epruveta za ispitivanje.

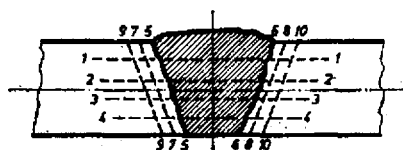


Slika 4.53. Oblici epruveta



Slika 4.54. Isijecanje uzorka

Ispitivanje tvrdoće zavisno od debljine zavarenih spojeva i očekivane tvrdoće možemo izvoditi po metodi Brinela, Rokvela ili Vikersa. Ispituje se tvrdoća šava, osnovnog materijala i zone toplotnog uticaja. Uzorak za ispitivanje izrezuje se tako da u njemu imamo sve dijelove zavarenog spoja. Shema uzimanja otisaka za mjerenje tvrdoće data je na slici 4.55.



Slika 4.55. Shema uzimanja otiska

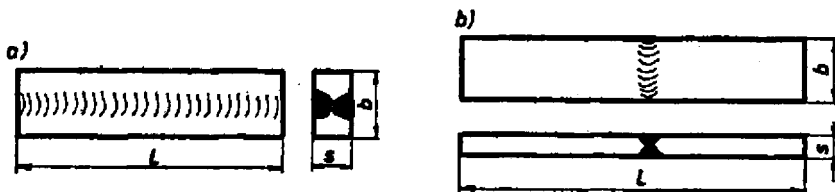
Rezultati ispitivanja se unose u zapisnik ispitivanja. Ispitivanje savijanjem radi ocjene sposobnosti savijanja zavarenih spojeva primjenjuje se do pojave prve pukotine na bilo kome mjestu epruvete. Ugao pri kome je došlo

do pojave pukotine mjeri se prema slici 4.56. i unosi u zapisnik. Ako se pri ispitivanju ne pojavljuje pukotina, nastavlja se savijanje, preko odgovarajućih umetaka ili bez umetaka, dok krajevi epruvete ne budu paralelni (vidi sliku 6.4).



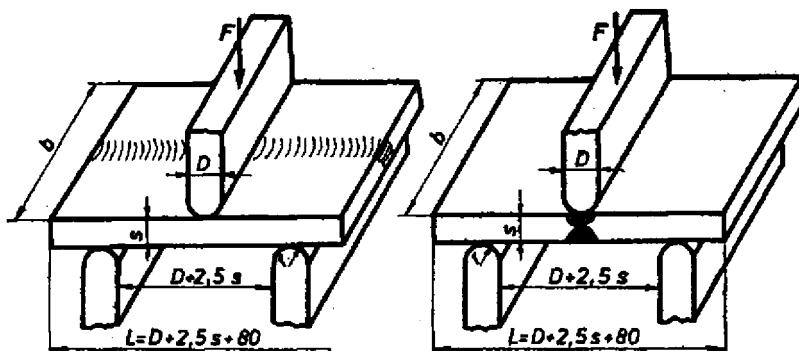
Slika 4.56. Ugao savijanja

Epruvete za ispitivanje mogu biti sa uzdužnim ili poprečnim šavom (slika 4.57).



Slika 4.57. Epruvete za ispitivanje savijanjem: a) uzdužni šav; b) poprečni šav

Schema ispitivanja na savijanje prikazana je na slici 4.58.



Slika 4.58. Shema ispitivanja savijanja zavarenih spojeva