

5. ISPITIVANJE MATERIJALA DINAMIČKIM DJEJSTVOM SILE

Mnogi mašinski dijelovi u toku rada izloženi su djelstvu opterećenja koja izazivaju promjenljivo naponsko stanje, koje se vremenom mijenja. Tako, na primjer, elementi klipnog mehanizma izloženi su djelstvu takvih sile. Sile koje djelstvuju na vagonsku osovinu, iako su konstantne, izazivaju naponska stanja koja se mijenjaju po zakonu sinusoide. Ovo potiče od obrtanja osovine oko ose, pri čemu čestice prelaze iz zone pritiska u zonu istezanja, i obrnuto.

Ispitivanja pokazuju da pri promjenljivim naprezanjima, poslije izvjesnog broja promjena opterećenja, dolazi do loma, iako pri statičkom djelstvu istog takvog naprezanja ne bi došlo do bilo kakvih trajnih deformacija.

Broj promjena pri kome dolazi do loma zavisi od veličine napona i mijenja se u veoma širokim granicama. Ako su naprezanja veoma velika, dovoljno je 5 do 10 promjena napona da bi došlo do loma. To se može najbolje vidjeti ako uzmemo komad žice i naizmjenično ga savijamo. Što je veće savijanje, prije dolazi do loma. Sa smanjenjem naprezanja povećava se broj promjena. Pri veoma malim naponima izdržavaju se milioni i milijarde promjena, a pri još manjim naponima, može da izdrži neograničeno dugo.

Ispitivanja su pokazala da materijali bolje podnose statičko nego dinamičko djelstvo sile. Na ponašanje materijala pri dinamičkom opterećenju utiče i način djelstva sile. Prema načinu djelstva, sva dinamička opterećenja možemo podijeliti na:

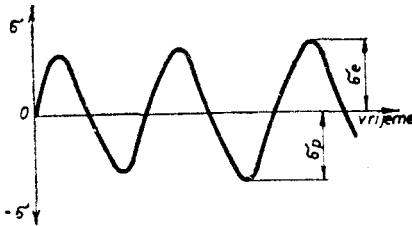
- promjenljiva opterećenja i
- udarna opterećenja.

Promjenljivo opterećenje je predstavljeno obično sinusnom linijom (slika 5.1). Pri tome se naponi sa nekom učestanošću mijenjaju između maksimalne ili minimalne vrijednosti.

Ispitivanje materijala pod djelstvom promjenljivog opterećenja naziva se ispitivanje zamaranjem.

Cilj ovih ispitivanja je da se odredi vrsta i veličina napona koji dovodi do loma pri djelstvu sile koje izazivaju naizmjenična naprezanja.

Ispitivanje promjenljivim opterećenjem može se izvoditi zatezanjem, pritiskivanjem, savijanjem, uvijanjem ili kombinovanim dinamičkim naprezanjima na epruvetama ili gotovim mašinskim dijelovima.



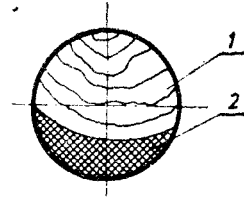
Slika 5.1. Promjenljivo opterećenje

5.1. ZAMOR MATERIJALA

Posmatranjem preloma usljed zamora mogu se uočiti različite zone: zona preloma usljed zamora (1) i zona nasilnog loma (2) (slika 5.2). U zoni preloma usljed zamora kristali se veoma teško mogu razlikovati golim okom, a taj dio preloma ima gladak izgled i mat boju. Zona nasilnog loma je hrapavija, ima krupnozrnastu strukturu i čistu sjajnu površinu. U početku se smatralo da prilikom dinamičkih opterećenja dolazi do promjene strukture. Međutim, stvarnih promjena strukture pri dinamičkim opterećenjima nema.

Uzroci preloma usljed zamora mogu biti vidljivi i nevidljivi.

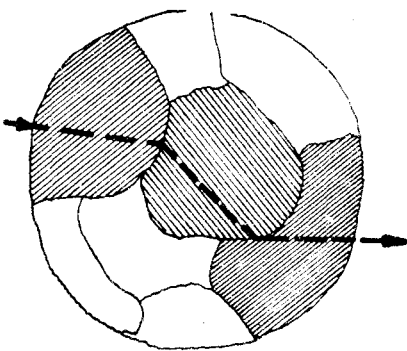
Vidljivi uzroci preloma su greške u materijalu (gasni mjehurovi, zaostala šljaka, pore, mikro-pukotine) i površinske greške nastale u procesu obrade ili eksploatacije (zarezi, korodirana mjesta, udarena mjesta itd.). Osim toga i konstruktivni detalji, kao što su: otvori, oštri prelazi, žljebovi, zavojnice itd. mogu biti uzroci preloma usljed zamora. Sve ove greške i konstruktivni detalji su uzroci koji izazivaju koncentraciju naprezanja, a ova potpomaže prelom usljed zamora.



Slika 5.2. Prelom usljed zamora

Nevidljivi uzroci preloma usljed zamora su posljedica unutrašnjih napona koji su uneseni u materijal prilikom livenja, kovanja, termičke obrade, zavarivanja itd. Ovi naponi potiču od heterogenosti strukture materijala. Ovo se naročito ističe kod legura (npr., čelik, ferit + cementit), kod kojih pojedine mikrostrukture imaju različit koeficijent toplotnog širenja. Mikrostrukture koje imaju veći koeficijent širenja prilikom zagrijavanja vrše pritisak na susjedne mikrostrukture sa manjim koeficijentom širenja i izazivaju unutrašnje napone.

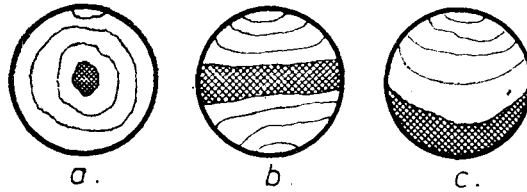
Naponi izazvani od spoljnih sila slažu se sa unutrašnjim naponima u pojedinim metalnim zrnima. U metalnim zrnima koja imaju visoke unutrašnje napone spoljašnji naponi mogu izazvati takva naprezanja koja prelaze



Slika 5.3. Prelom kroz kristalna zrna

izazvati takva naprezanja koja prelaze granicu jačine materijala na kidanje. Usljed toga javlja se pukotina koja se postepeno širi u metalnom zrnu i napada susjedno metalno zrno. Spajanjem pukotina u susjednim zrnima dolazi do širenja pukotine. Pri tome prelom ide kroz metalna zrna (slika 5.3). Širenjem pukotine smanjuje se poprečni presjek. U trenutku kada pukotina, usljed zamora, oslabi površinu poprečnog presjeka u tolikoj mjeri da u preostalom dijelu naponi porastu preko jačine materijala, dolazi do nasilnog loma (zona 2). Zbog ovakvog načina deformacija na mjestu preloma uočavaju se dvije zone. Na osnovu izgleda preloma usljed zamora može se odrediti uzrok loma. Ako je površina nasilnog loma velika, znači da su naponi bili veći od dinamičke čvrstoće materijala.

Na prelomnoj površini mogu se uočiti jače ili slabije izražene uže ili šire linije (pojasevi) (slika 5.4). Ove linije nazivaju se linije odmora. U toku rada mašine postoje različiti periodi u kojima je mašina opterećena jače ili slabije. Ove promjene u režimu rada odražavaju se na brzinu razvijanja preloma. Kod jednosmjernog rotirajućeg napreznja na savijanje linije odmora su približno koncentrični krugovi, a završni lom nastaje u sredini oko neutralne ose.

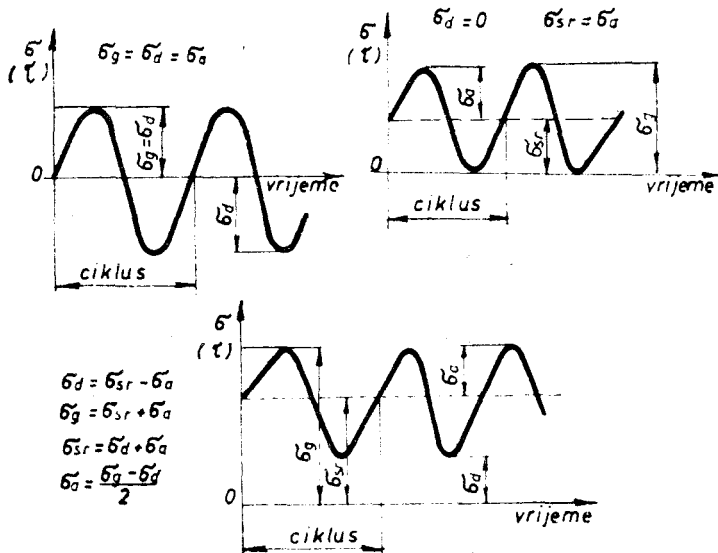


Slika 5.4. Izgled preloma usljed zamora: a – napreznje na savijanje (rotacija), b – napreznje suprotnosmjernim savijanjem, c – napreznje na pritisak – istezanje

Kod suprotnosmjernog savijanja (osovina se ne obrće) linije odmora imaju oblik približno paralelnih linija, a završni lom nastaje u sredini po površini – u obliku pojasa.

5.2. ISPITIVANJE I PRIKAZIVANJE DINAMIČKE ČVRSTOĆE MATERIJALA

Zamor materijala izazivaju različite vrste promjenljivih opterećenja. Na slici 5.5. prikazana su tri karakteristična načina promjene opterećenja:



Slika 5.5. Vrste opterećenja

- naizmjenično promjenljivo (istezanje i pritisak)
- jednosmjerno promjenljivo od 0 do maksimuma i
- jednosmjerno promjenljivo sa predopterećenjem.

Kod ovakvih opterećenja naponi se mijenjaju između gornje i donje granice vrijednosti po zakonu sinusne linije. Oznake napona na slici su:

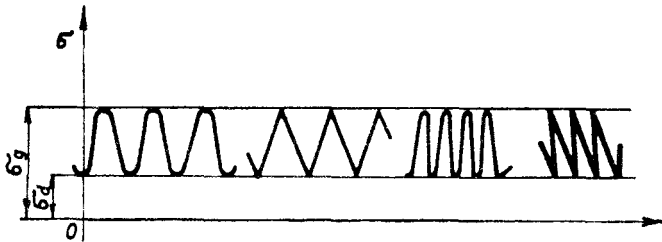
σ_g — gornji granični napon

σ_d — donji granični napon

$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2}$ — srednji napon

$\sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2}$ — amplitudni napon.

Proces nastanka pukotina pri promjenljivim naprezanjima vezan je za sabiranje plastičnih deformacija. Pri tome dinamička jačina materijala zavisi samo od gornjeg i donjeg napona, a ne zavisi od zakona promjene napona unutar intervala $\sigma_g - \sigma_d$. Prema tome, zakoni promjene napona, prikazani na slici 5.6. imaju isti uticaj na dinamičku čvrstoću materijala. Ispitivanja takođe pokazuju da broj promjena opterećenja u jedinici vremena (učestalost) nema uticaja na dinamičku čvrstoću materijala. Naponi, isti po veličini pri statičkom opterećenju izazivali bi neznatne deformacije, dok bi pri dinamičkom opterećenju, poslije izvjesnog broja promjena, izazivali zamor i prelom usljed zamora materijala.



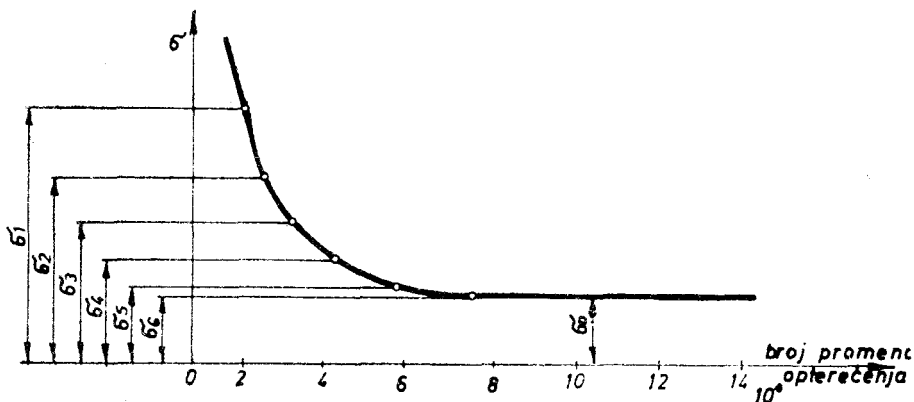
Slika 5.6. Zakoni promjene napona

Ispitivanja su pokazala da se odnos između dinamičke čvrstoće materijala σ_D i zatezne čvrstoće σ_M kreće u granicama od 0,4 do 0,6 za čelik, dok se kod ostalih metala kreće u granicama od 0,25 do 0,35.

Dinamička čvrstoća σ_D određuje se ispitivanjem zamaranjem silama promjenljive vrijednosti. Ispitivanje se izvodi na standardnim epruvetama ili na konstruktivnim elementima. Oblik epruvete zavisi od načina ispitivanja. Često može biti izveden sa zarezom, rupom i prelaznim zaobljenjem da bi se ispitao uticaj oblika na dinamičku čvrstoću materijala. Za dinamička ispitivanja potrebno je više epruveta istog oblika i dimenzija, da bi se mogla odrediti dinamička jačina materijala. Broj epruveta zavisi od željene tačnosti i kreće se: za skraćena ispitivanja od 3 do 6, za normalna ispitivanja od 10 do 15, a za statičke metode od 50 do 100 komada. Sve epruvete moraju biti obrađene na isti način i polirane.

Svaka epruveta izlaže se različitom promjenljivom opterećenju i utvrđuje se broj promjena opterećenja do preloma. Pri sljedećem ispitivanju smanjuje se

opterećenje. Smanjenjem opterećenja povećava se broj promjena do preloma. Rezultati ispitivanja unose u koordinatni sistem kod koga se na ordinatu nanosi napon a na apscisu broj promjena opterećenja (slika 5.7). Unošenjem podataka u dijagram dobijamo tačke čijim spajanjem dobijamo kontinualnu liniju koja se zove *Velerova kriva*.



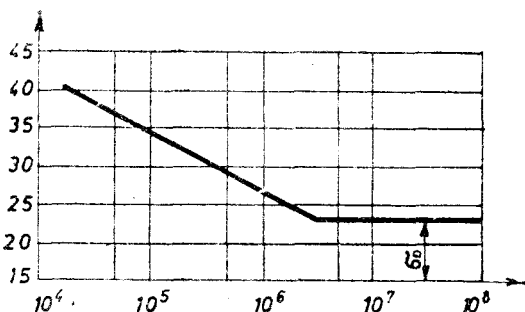
Slika 5.7. Velerova kriva

Na Velerovoj krivoj razlikujemo dva dijela: u prvom dijelu, koji se odnosi na više napone, prelomi dolaze pri manjem broju promjena. Što je veći napon — to je broj promjena opterećenja do preloma manji.

Drugi dio dijagrama predstavlja pravu liniju koja se asimptotski približava jednom naponu. Napon koji odgovara horizontalnom dijelu krive zove se dinamička čvrstoća materijala i označava se σ_D .

Dinamička čvrstoća materijala je najveći promjenljivi napon koji jedan materijal može po želji dugo da izdrži bez preloma i bez pojave nedozvoljenih deformacija.

Broj promjena opterećenja, pri kome Velerova kriva prelazi u liniju paralelnu sa apscisom, naziva se graničnim brojem promjena opterećenja. Granični broj promjena opterećenja za čelik iznosi oko $10 \cdot 10^6$, a za lake metale oko $100 \cdot 10^6$.



Slika 5.8. Velerova kriva sa apscisom u logaritamskoj razmjeri

Rezultati ispitivanja dobijeni zamaranjem mogu biti predstavljeni i u logaritamskom dijagramu. Na ordinatu nanosimo napon u kN/cm^2 , a na apscisu broj promjena opterećenja u logaritamskoj razmjeri (slika 5.8).

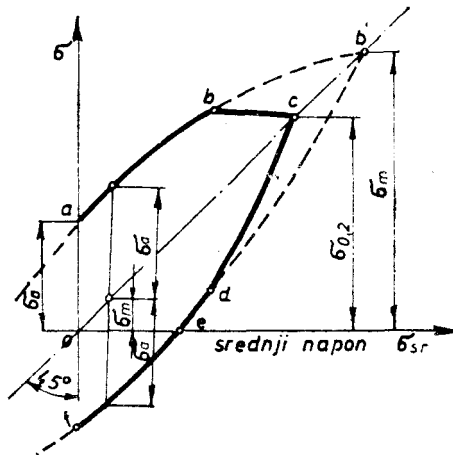
Prednost ovakvog načina prikazivanja rezultata ispitivanja je u lakoći crtanja dijagrama, jer i dio krive linije prelazi u kosu pravu liniju.

Na ovaj način možemo dobiti Velerove krive linije za naprezanja na istezanje, pritisak, savijanje i uvijanje za sve vrste opterećenja. Dobijene vrijednosti dinamičke čvrstoće, na istezanje, pritisak, savijanje i uvijanje se međusobno razlikuju.

Na osnovu određene dinamičke čvrstoće konstruišu se dijagrami dinamičke čvrstoće koji daju podatke o gornjem i donjem graničnom naponu, pri kome ne dolazi do preloma ni poslije velikog broja promjena opterećenja. Najpoznatiji dijagram dinamičke čvrstoće je Smitov dijagram (slika 5.9).

Na apscisi i na pravoj liniji povučenoj kroz koordinatni početak pod uglom od 45° , nanese su vrijednosti srednjeg napona σ_{sr} .

Linija a-b-c zove se linija gornjeg graničnog napona, a linija c-d-e-f linija donjeg graničnog napona. Ako naponi ostaju u području ograničenom linijama graničnih napona, do preloma neće doći ni poslije beskonačnog broja promjena opterećenja.



Slika 5.9. Smitov dijagram

Smitov dijagram ima primjenu samo do granice razvlačenja $\sigma_{0,2}$. Zbog toga je povučena linija granice razvlačenja $\sigma_{0,2}$ i dobijena tačka c. Isprekidane linije do tačke b' odgovaraju stvarnim naponima do preloma.

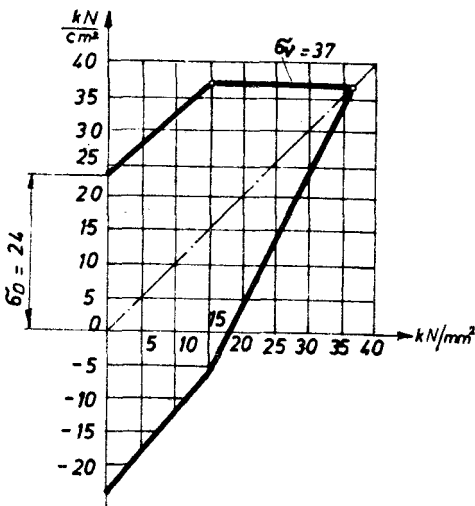
Linija c-d konstruiše se na osnovu simetričnosti u odnosu na liniju b-c i pravu pod uglom od 45° koja prolazi kroz koordinatni početak.

Na osnovu Smitovog dijagrama možemo odrediti vrijednost dinamičkog napona za bilo koju vrstu opterećenja — prema obrascu:

$$\sigma = \sigma_{sr} + \sigma_a.$$

Na slici 5.10. dat je stvarni izgled Smitovog dijagrama za konstruktivni čelik Č. 0545.

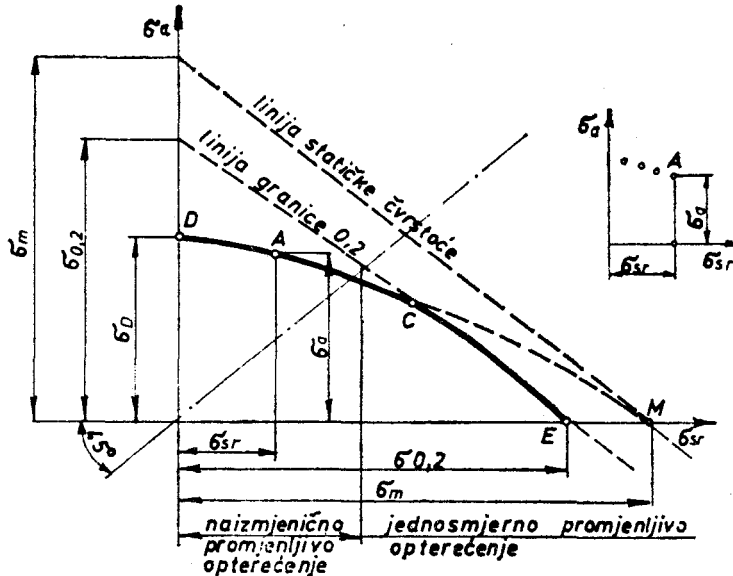
Osim Smitovog dijagrama, često se uzima i Hajov dijagram (slika 5.11). Na ordinatu se nanosi amplitudni napon (σ_a), a na apscisi srednji napon (σ_{sr}).



Slika 5.10. Smitov dijagram za čelik Č.0545

nanosi amplitudni napon (σ_a), a na apscisi srednji napon (σ_{sr}).

Kada je srednji napon jednak nuli, tada imamo čisto dinamičko naprezanje pa je $\sigma_a = \sigma_D$. Pri bilo kom srednjem naponu ispitivanjem određujemo amplitudni napon σ_a pri kome je materijal sposoban izdržati neograničen broj promjena opterećenja. Tako dobijenu vrijednost unosimo u dijagram i dobijamo tačku A. Ako ponovimo ispitivanje sa drugim vrijednostima srednjeg napona σ_a i sve rezultate unesemo u dijagram, dobićemo niz tačaka, čijim spajanjem dobijamo kontinualnu krivu liniju DACM.



Slika 5.11. Hajov dijagram

Dijagram ima praktičnu primjenu samo do granice razvlačenja $\sigma_{0,2}$.

Hajov dijagram daje mogućnost ocjene otpornosti nekog mašinskog dijela koji radi u uslovima promjenljivih opterećenja.

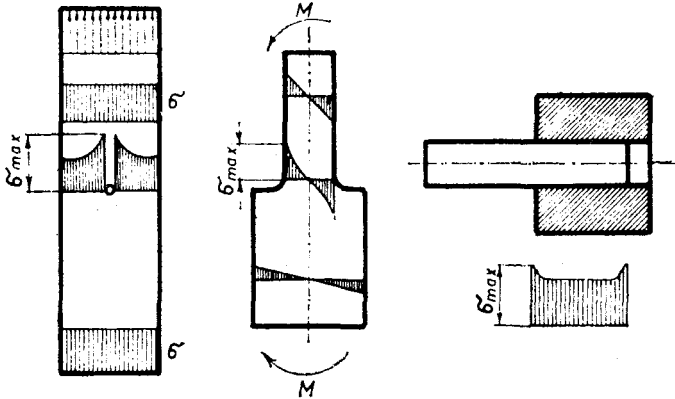
Pretpostavimo da je za jedan mašinski dio promjenljivo opterećenje definisano srednjim naponom σ_{sr} i amplitudnim naponom σ_a . Te veličine mogu se smatrati kao koordinate tačke u dijagramu $\sigma_{sr} - \sigma_a$ (slika 5.11). Ako se tačka nalazi unutar dijagrama ograničenog linijom DACE, posmatrani mašinski dio u takvim uslovima promjenljivog opterećenja može raditi neograničeno dugo. Ako se tačka nalazi van dijela dijagrama ograničenog linijom DACE, mašinski dio će se polomiti poslije određenog broja promjena opterećenja.

5.3. FAKTORI KOJI UTIČU NA DINAMIČKU ČVRSTOĆU

Jedan od najjačih faktora koji utiču na dinamičku čvrstoću materijala je koncentracija naprezanja.

Mnogobrojna teoretska i eksperimentalna ispitivanja pokazuju da u oblasti naglih promjena oblika elastičnog tijela (otvori, zarez, žljebovi, prelazi sa većeg na manji presjek, itd.), a takođe i u zoni kontakta dva spregnuta dijela dolazi do porasta naponskog stanja (slika 5.12).

Pri istezanju štapa sa malim otvorom, zakon ravnomjerne raspodjele napona u blizini otvora se remeti. Kontinuitet napona je prekinut, a uz otvor pojavljuje se maksimalni napon. Na sličan način pri savijanju štapa sa prelaznim zaobljenjem u zoni prelaza sa većeg na manji presjek dolazi do porasta napona, što u prvom redu zavisi od poluprečnika zaobljenja. Kod presovanih sklopova (čahura i osovina) na krajevima čahure i osovine dolazi do porasta napona. Ovakvih primjera u praksi ima jako mnogo.



Slika 5.12. Koncentracija naprezanja

Pošto ove promjene imaju lokalni karakter, ovakva naprezanja se zovu lokalna naprezanja, a lokalno povećanje napona naziva se koncentracija naprezanja.

Veličina lokalnih naprezanja zavisi od geometrijskog oblika predmeta, a osnovni pokazatelj koncentracije naprezanja je faktor zarez α_K :

$$\alpha_K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n},$$

gdje je:

σ_{max} — $\frac{kN}{cm^2}$ — maksimalni napon koji se određuje eksperimentalno

$\sigma_n = \frac{F}{A}, \frac{kN}{cm^2}$ (pri istezanju) nominalni napon.

Faktor zarez pokazuje koliko je puta veći maksimalni od nominalnog napona.

Veličina faktora zarez zavisi od oblika zarez, vrste naprezanja (savijanje, istezanje, torzija), dubine zarez poluprečnika, zaobljenja i dimenzija predmeta i ima istu vrijednost za sve materijale.

I na dinamičku čvrstoću jak uticaj imaju različite vrste žljebova, zarez i prelaznih zaobljenja. Kao pokazatelj uticaja zarez na dinamičku čvrstoću materijala služi koeficijent uticaja zarez β_K :

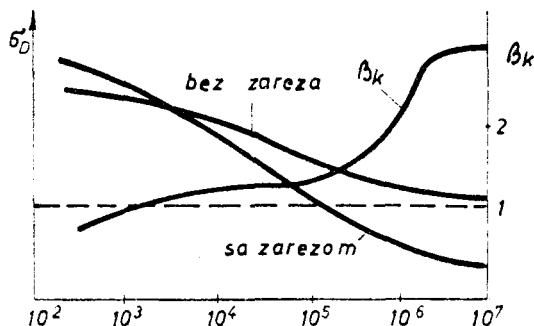
$$\beta_K = \frac{\sigma_D}{\sigma_{DZ}},$$

gdje je:

σ_D — dinamička jačina materijala bez zareza

σ_{DZ} — dinamička jačina materijala sa zarezom.

Zarezi kod manjeg broja promjena opterećenja imaju povoljan uticaj na dinamičku čvrstoću — zbog ojačavanja materijala. Sa povećanjem broja promjena opterećenja, zarezi imaju nepovoljnije djeystvo i izazivaju lom materijala pri nižim naponima (slika 5.13). Zbog toga koeficijent uticaja zareza ima kod vremenske dinamičke čvrstoće manju vrijednost, dok kod stvarne dinamičke čvrstoće ima veću vrijednost.



Slika 5.13. Lom materijala pri nižim naponima

Vrijednosti koeficijenta β_k zavise od vrste materijala, oblika i dimenzija zareza, kvaliteta obrađene površine, vrste i veličine naprežanja i od dimenzija tijela.

Koeficijent β_k ima manje vrijednosti od α_k . Male razlike između koeficijenata β_k i α_k ukazuju da je materijal slabo osjetljiv ili da je neosjetljiv na zarez.

Veću osjetljivost na zarez imaju čelici sa većom čvrstoćom i tvrdoćom. Osjetljivost na zarez može se popraviti termičkom obradom. Kaljenom čeliku otpuštanjem povećavamo žilavost i plastičnost, čime mu smanjujemo osjetljivost na zarez.

Aluminijum, mesing, kovane bronzne, silumin i duraluminijum, nerđajući čelici, sivo liveno gvožđe i čelični liv, imaju malu osjetljivost na zarez.

Kod sivog livenog gvožđa i čeličnog liva unutar materijala ima velik broj zareza metalurškog porijekla (uključujući šljake, oksidi, gasni mjehurovi itd.), tako da spoljni zarezi nemaju bitnog uticaja na dinamičku čvrstoću.

Na vrijednosti dinamičke čvrstoće imaju uticaj i dimenzije predmeta. Sa povećanjem dimenzija predmeta opada dinamička čvrstoća. Ovo smanjenje dinamičke čvrstoće potiče od povećanog broja metalurških grešaka unutar materijala većeg presjeka.

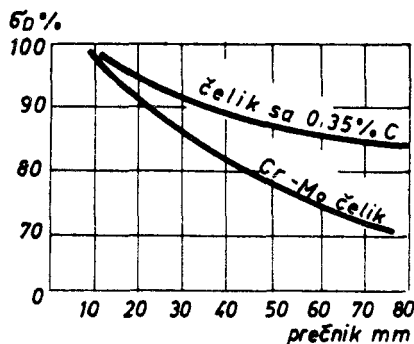
Osim toga, na većoj površini postoji i veći broj površinskih grešaka (zarezi usljed obrade, neravnine i sl.), koje utiču na smanjenje dinamičke čvrstoće. Na slici 5.14. vidi se uticaj prečnika epruvete na dinamičku čvr-

stoću. Dijagram pokazuje smanjenje dinamičke čvrstoće u % — u odnosu na epruvetu prečnika 10 mm.

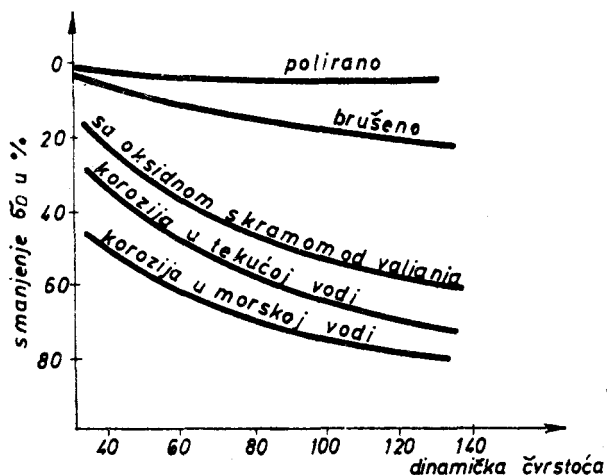
Dinamička čvrstoća u znatnoj mjeri zavisi od stanja površine. Ovo je naročito značajno kod naprezanja na savijanje i uvijanje zbog toga što površinski slojevi trpe najveće napone. Greške koje potiču od obrade (tragovi alata, neravnine) i pojava korozije koja zahvata površinu predmeta pogoduju koncentraciji naprezanja, što dovodi do smanjenja dinamičke čvrstoće.

Na dijagramu prikazanom na slici 5.15. vidi se uticaj ovih faktora na dinamičku čvrstoću.

Greške u materijalu koje nastaju u procesu dobijanja (lunker, pore, oksidi, šljaka, strukturne nehomogenosti) znatno utiču na dinamičku čvr-



Slika 5.14. Uticaj prečnika na dinamičku čvrstoću



Slika 5.15. Uticaj stanja površine na dinamičku čvrstoću

stoću. Sve ove greške pogoduju zamoru materijala, čime se smanjuje dinamička čvrstoća materijala.

5.4. METODE POVEĆANJA DINAMIČKE ČVRSTOĆE

Na povećanje otpornosti materijala protiv zamora može se uticati na više načina:

- pravilnim oblikovanjem i dimenzionisanjem dijelova kako bi se smanjila koncentracija naprezanja,

- sprečavanjem korozije i
- ojačavanjem površinskih slojeva.

Ojačavanjem površinskih slojeva znatno se povećava dinamička čvrstoća dijelova napregnutih na savijanje i uvijanje. Pošto kod ovih vrsta naprezanja najveće napone trpe spoljne površine, to njihovim ojačavanjem postižemo jak efekat u borbi protiv zamora.

Površinsko ojačavanje materijala možemo postići:



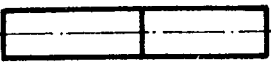
- hladnim ojačavanjem
- površinskim kaljenjem
- nitriranjem i
- cementacijom.

Hladnim ojačavanjem stvaramo u površinskom sloju trajne (lokalne) deformacije. Ovo možemo postići na dva načina: izlaganjem površine bombardovanju mlazom pijeska ili čeličnih kuglica. Pod dejstvom mlaza površinski sloj se plastično deformiše, dok unutrašnji slojevi ispod deformisanog sloja trpe pritisak. Deformacije unutrašnjih slojeva su elastične. Po prestanku dejstva mlaza unutrašnji elastično deformisani slojevi teže da se vrate u prvobitni položaj, čime se u površinskom sloju stvara napon na pritisak.

Isti efekat možemo postići izlažući površinu predmeta dejstvu sile preko valjaka.

Površinskim kaljenjem takođe stvaramo u površinskom sloju dodatne napone na pritisak.

Hemijsko-termičkom obradom možemo znatno uticati na dinamičku čvrstoću. Naročito veliki efekat postižemo nitriranjem. Nitriranjem toliko ojačamo površinu da u toj zoni nema pojave zarez a pri opterećenju, već

Oblik epruvete	Dinamička čvrstoća $\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ na savijanje		Povećanje %
	prije nitriranja	poslije nitriranja	
	56	71	27
	23	48	109
	29	55	89

Slika 5.16. Povećanje dinamičke čvrstoće poslije nitriranja

se javlja tek ispod nitriranog sloja. Koliki ćemo efekat postići, zavisi od debljine nitriranog sloja. Sa povećanjem debljine nitriranog sloja povećavamo otpornost materijala protiv zamora. Naročito veliki efekat postižemo kod epruveta sa zarezom (slika 5.16).

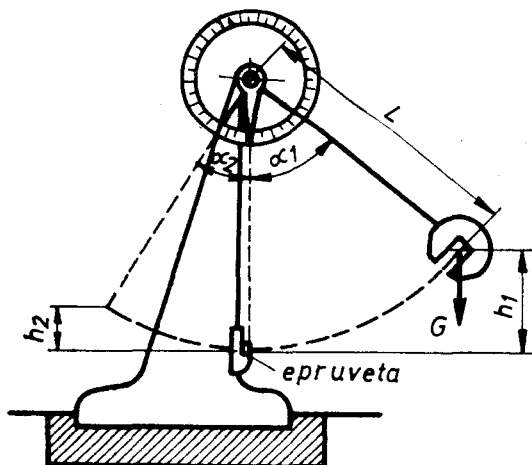
5.5. ISPITIVANJE ŽILAVOSTI MATERIJALA PO ŠARPIJU

Ispitivanje žilavosti materijala vrši se udarnim opterećenjem. Epruveta određenog oblika i dimenzija lomi se jednim udarcem. Pri udaru epruveta je izložena savijanju. Cilj ispitivanja je da se odredi sklonost materijala ka krtom lomu, provjeri kvalitet termičke obrade i sklonost materijala ka povećanju krtosti u toku eksploatacije.

Žilavost materijala ili čvrstoća na udar pri savijanju je utrošeni rad za lom epruvete sveden na jedinicu poprečnog presjeka epruvete, tj.:

$$e = \frac{N}{A}, \frac{J}{m^2}.$$

Za ispitivanje žilavosti materijala postoji više metoda: po Šarpiju, Izodu itd. Metode se međusobno razlikuju po obliku i dimenzijama epruvete, obliku tijela kojim se vrši udar i načinu opterećenja epruvete. Po JUS-u standardizovano je ispitivanje žilavosti po Šarpiju.



Slika 5.17. Šarpijevo klatno

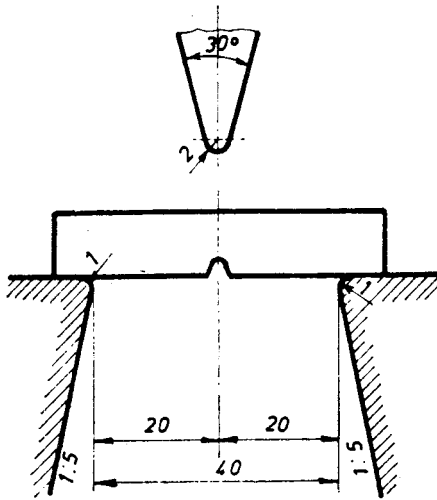
Ispitivanje po Šarpiju izvodi se na Šarpijevom klatnu (slika 5.17). Ovaj uređaj sastoji se od klatna dužine L na čijem se slobodnom kraju nalazi teg težine G . Za ispitivanje se koriste klatna koja mogu da proizvedu rad od 294 J. Pored klatna, uređaj se sastoji od ploče sa skalom podijeljenom na stepene ili, kod savremenijih uređaja, sa energetsom podjelom (kJm). Ispred ploče kreću se dvije kazaljke koje pokazuju položaje klatna i veličinu rada kojim klatno raspolaže u maksimalnim položajima.

U donjem položaju klatno prolazi između dva oslonca na koja se oslanja epruveta (slika 5.18).

Pri udaru o epruvetu nož mora da dodiruje epruvetu po cijeloj visini (10 mm).

Klatno mora da se obrće oko svoje osovine sa minimalnim trenjem.

Oslonci na koje se epruveta oslanja moraju biti na rastojanju od 40 mm i zaobljeni poluprečnikom zaobljenja 1 mm.

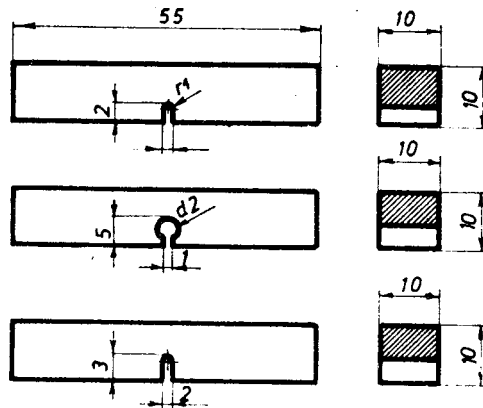


Slika 5.18. Položaj epruvete pri ispitivanju neravnine ili zaparana mjesta, moraju se odstraniti glačanjem.

Strane oslonaca izradene su sa nagibom 1 : 5. Šarpijevo klatno raspolaže uređajem za kočenje klatna.

Epruvete za ispitivanje su standardizovane (slika 5.19). Kvadratnog su poprečnog presjeka, sa žlijebom na sredini, poluprečnik 1 mm. Dubina žlijeba je različita.

Normalnom epruvetom smatra se epruveta sa dubinom žlijeba od 3 mm, a žilavost određena ovom epruvetom označava se sa ρ_3 . Osim ove epruvete, izrađuju se epruvete sa dubinama žljebova od 2 i 5 mm, a žilavosti određene ovim epruvetama nose oznake ρ_2 i ρ_5 . Žlijeb se izrađuje cilindrično na sredini epruvete i mora biti veoma fino obrađen. Ako na dnu žlijeba postoje



Slika 5.19. Standardne epruvete za ispitivanje žilavosti

Epruveta se postavlja između oslonaca tako da zarez dođe tačno na sredinu i to sa strane suprotne od one koju udara teg klatna pri padu.

Klatno se podigne na visinu h_1 . Visinu h_1 treba birati tako da brzina klatna u trenutku udara o epruvetu bude u granicama od 5 do 7 m/s. Ovo se može provjeriti prema obrascu $v = \sqrt{2gh_1}$. Epruveta se mora polomiti

jednim udarom. Ako se epruveta ne polomi jednim udarom, ispitivanje moramo ponoviti sa drugom epruvetom i to sa maksimalnim radom od 294 J. Ako se i tada epruveta ne polomi, to se u izveštaju o ispitivanju mora navesti. Tada se može upotrijebiti i epruveta sa dubinom žlijeba od 5 mm.

Klatno na visini h_1 raspolaže potencijalnom energijom (radom) $N_1 = Gh_1$. Kada se pusti iz tog položaja, pada na epruvetu, troši jedan dio rada na lom epruvete i prolazi na drugu stranu na visinu h_2 . Na visini h_2 raspolaže radom $N_2 = Gh_2$. Razlika ova dva rada predstavlja utrošeni rad na lom epruvete, tj.:

$$N = N_1 - N_2.$$

Izračunavanje utrošenog rada zavisi od podjele skale. Ako je skala energetska, tj. sa podjelom u kpm, tada se u krajnjim položajima pročitaju radovi N_1 i N_2 , pa je utrošeni rad za lom epruvete:

$$N = N_1 - N_2.$$

Ako je podjela u stepenima, tada visini h_1 odgovara ugao α_1 , a visini h_2 — ugao α_2 , a radovi sa kojima klatno raspolaže u tim položajima su:

$$N_1 = G(L - L \cos \alpha_1) = GL(1 - \cos \alpha_1) \text{ i}$$

$$N_2 = G(L - L \cos \alpha_2) = GL(1 - \cos \alpha_2).$$

Utrošeni rad za prelom epruvete je:

$$N = N_1 - N_2 = GL(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \text{ J.}$$

Na osnovu određenog utrošenog rada izračunavamo žilavost zavisno od dubine žljebova 2, 3 i 5 mm prema obrascu:

$$e_2 = \frac{N}{A_2} = \frac{N}{0,8} = 1,25 N, \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$$

$$e_3 = \frac{N}{A_3} = \frac{N}{0,7} = 1,43 N, \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$$

$$e_5 = \frac{N}{A_5} = \frac{N}{0,5} = 2 N, \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}.$$

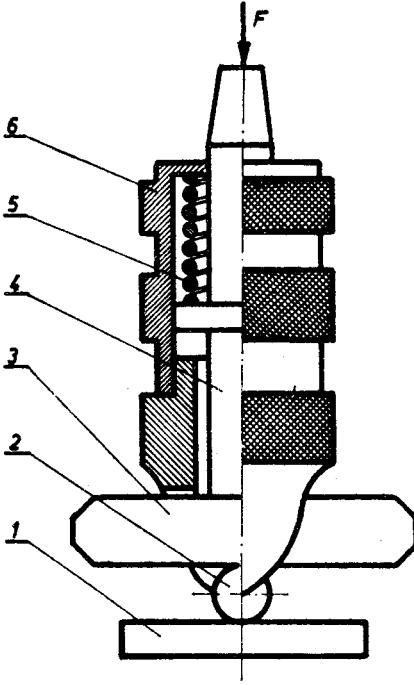
Ako je žilavost manja od $10 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$, daje se sa jednom decimalom, a iznad $10 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ zaokrugljuje na cijeli broj.

Mjerodavni su rezultati ispitivanja sa najmanje dvije epruvete. U tom slučaju žilavost je srednja vrijednost dobijena u dva ispitivanja.

Temperatura epruvete u trenutku udara klatna mora biti $20 \pm 2^\circ \text{C}$, a ako je temperatura pri ispitivanju bila različita od ove, to se mora u izveštaju o ispitivanju posebno istaći.

5.6. ISPITIVANJE TVRDOĆE MATERIJALA PO POLDIJU

Ispitivanje tvrdoće po Poldiju spada u grupu dinamičkih ispitivanja. Koristi se pri ispitivanju tvrdoće teških predmeta (odlivaka, otkivaka, postolja mašina itd.). Ispitivanje je zasnovano na udarnom djelstvu sile na utiskivač, čeličnu kuglicu prečnika $D = 10$ mm. Pod djelstvom udarnog opterećenja kuglica ostavlja trajan otisak u ispitivanom materijalu i u etalonu čija je tvrdoća poznata. Upoređivanjem veličine otiska u materijalu poznate tvrdoće i predmetu čiju tvrdoću mjerimo određujemo nepoznatu tvrdoću.



Slika 5.20. Aparat za ispitivanje tvrdoće po Poldiju

Na slici 5.20. dat je izgled Poldijevog aparata. Udarcem čekića u stub (4) aparata prenosi se udar na etalon (3). Sa etalona udar se prenosi na čeličnu kuglicu (2) i predmet (1). Etalon je šipka poznate tvrdoće HB određene po Brinelu. Pod djelstvom udarca nepoznate jačine kuglica ostavlja otisak u predmetu i etalonu. Mjerenjem prečnika otisaka koje ostavi kuglica u etalonu i predmetu možemo odrediti veličinu tvrdoće po Poldiju HP. Mjerenje otiska vrši se na isti način kao i kod Brinellove metode. Ako sa d označimo prečnik otiska na predmetu, a sa d_e prečnik otiska na etalonu, tada odnos između tvrdoće predmeta HP i tvrdoće etalona HB je:

$$\frac{HP}{HB} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d_e^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}$$

Iz ovog odnosa može se odrediti tvrdoća po Poldiju:

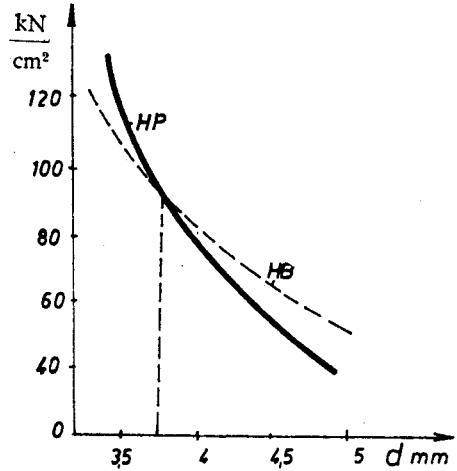
$$HP = HB \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_e^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}} \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Pored izračunavanja tvrdoće po ovom obrascu, koriste se i tabele iz kojih se za izmjerene vrijednosti otisaka d i d_e i poznatu tvrdoću HB očitava vrijednost Poldijeve tvrdoće.

Poldijeva metoda slična je Brinellovoj metodi, samo se razlikuju u načinu djelovanja sile. Poldijeva metoda je dinamička varijanta Brinellove metode, zbog čega se vrijednosti ovih tvrdoća mogu međusobno upoređivati. Razlike između rezultata dobijenih po Poldiju i Brinelu ne prelaze 2%. Na dija-

gramu prikazanom na slici 5.21. vidi se da kod materijala veće čvrstoće dobijamo veće vrijednosti tvrdoće po Poldiju nego po Brinelu, i obrnuto. Poldijeva metoda je veoma prosta i ne zahtijeva specijalne skupe uređaje. Aparat je mali i može se lako prenositi i veoma je jednostavan za rukovanje. Vrijednosti dobijene ovim postupkom zadovoljavaju, jer u odnosu na Brinelovu tvrdoću imaju minimalno odstupanje.

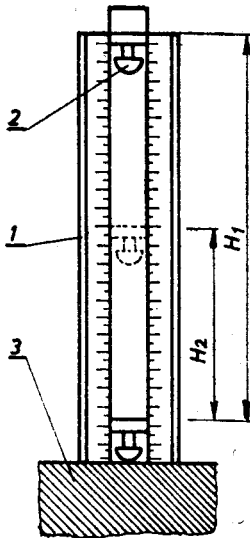
Služi za ispitivanje tvrdoće do $450 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$. Prečnik otiska mora da bude u granicama od 2 do 4 mm. Ako je prečnik otiska veći od 4 mm ili manji od 2 mm, ispitivanje se mora ponoviti.



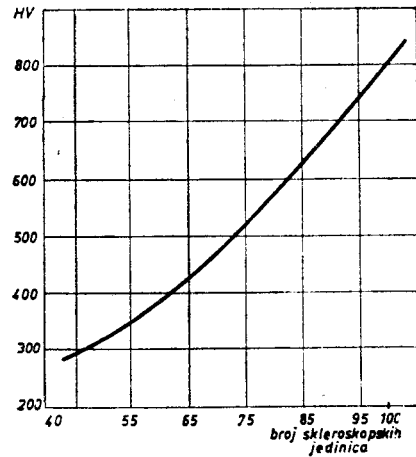
Slika 5.21. Usporedne vrijednosti tvrdoće po Poldiju i Brinelu

5.7. ISPITIVANJE TVRDOĆE MATERIJALA PO ŠORU

Ispitivanje tvrdoće po Šoru zasnovano je na elastičnom odskoku utiskivača od površine predmeta čiju tvrdoću mjerimo. Koristimo se specijalnim aparatom koji se zove Šorov skleroskop (slika 5.22).



Slika 5.22. Šorov skleroskop



Slika 5.23. Odnos između tvrdoće po Šoru i Vickersu

Utiskivač (2) težine 0,025 N specijalnog oblika sa dijamantskim kupastim vrhom smješten je u staklenu cijev 2. Pored cijevi nalazi se skala podijeljena na 140 podjeljaka. Svaki podjeljak predstavlja jednu jedinicu Šorove tvrdoće.

Utiskivač se pušta sa visina $H_1 = 254$ mm da slobodno pada na površinu predmeta (3). Visina prvog odskoka H_2 od površine predmeta je mjera tvrdoće.

Pri udaru utiskivača o površinu predmeta jedan dio energije troši se na plastične deformacije, a drugi na elastične. Pošto i utiskivač ima malu težinu, to će raspolagati malom energijom udara i činiti veoma male plastične deformacije koje se golim okom teško mogu primijetiti.

Elastične deformacije pri rasterećenju odbacuju utiskivač uvis. Što su veće elastične deformacije, to su visine odskoka veće.

Visina odskoka zavisi od vrste materijala, — njegove tvrdoće, modula elastičnosti, mase predmeta i stanja površine. Vrijednosti tvrdoće po Šoru mogu se upoređivati samo u slučajevima ako materijali imaju isti modul elastičnosti. Moguće je upoređivati tvrdoće različitih vrsta čelika, ali se ne može upoređivati tvrdoća gume i čelika, čelika i bakra itd.

Vrijednost tvrdoće po Šoru je aritmetička sredina vrijednosti pet pojedinačnih mjerenja prvih odskoka. Pri tome na jednom mjestu može se mjeriti samo jedan odskok.

Na osnovu izmjerene Šorove tvrdoće može se pomoću dijagrama odrediti tvrdoća po Vickersu (slika 5.23).

Tvrdoća po Šoru označava se sa HSh . U tabeli 5.1 date su uporedne vrijednosti tvrdoće za čelik.

Tabela 5.1.

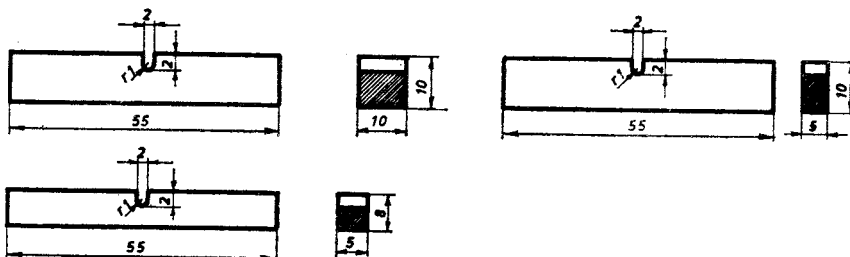
Uporedne vrijednosti tvrdoće za čelik

Brinellova tvrdoća 10/29,4/30 kN/cm ²	Prečnik otiska mm	Vickersova tvrdoća HV kN/cm ²	Rokvelova tvrdoća HRB	Rokvelova tvrdoća HRC	Šorova tvrdoća
178	4,46	193	90		30
185	4,38	200	91		31
191	4,32	205			32
201	4,20	215	95	15	
204	4,19	218		16	34
218	4,05	233	98	19	36
234	3,92	249		22	38
248	3,81	264	103	25	40
266	3,68	283		28	
274	3,60	296	107	30	
291	3,53	308			46
322	3,36	339		35	50
330	3,32	347	111	36	
349	3,23	366	112	38	53
366	3,16	383	113		55
380	3,10	399		41	57
390	3,06	410		42	58
408	3,00	428	115		60
423	2,94	448		45	62
435	2,90	461		46	63
458	2,83	488		48	66
497	2,72	537		51	71
536	2,62	594		54	76
562	2,56	634		56	80
624	2,43	756		62	89

5.8. DINAMIČKA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA

Dinamičkim ispitivanjem utvrđujemo ponašanje zavarenih spojeva pod uticajem djelovanja udarnih i promjenljivih opterećenja. Žilavost zavarenog spoja najčešće određujemo po Šarpiju. Pored toga, ispitivanja zavarenih spojeva na istezanje ili savijanje vrše se pod dejstvom promjenljive sile, s ciljem da se odredi dinamička čvrstoća.

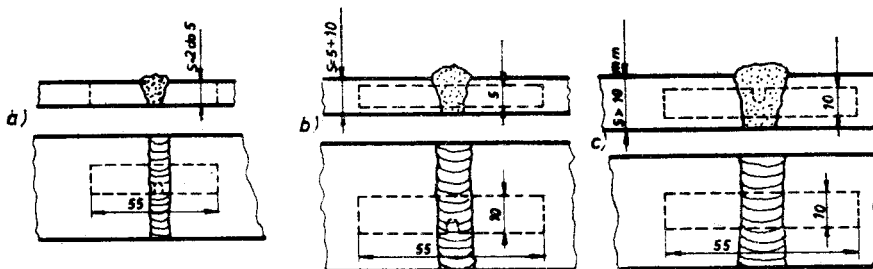
Kod ispitivanja žilavosti po Šarpiju, ispitujemo žilavost šava i žilavost u zoni toplotnog uticaja. Ispitivanje se vrši na standardnoj epruveti presjeka 10x10 sa žlijebom dubine 2 ili 3 mm, ako ima dovoljno materijala. Međutim, ako je debljina materijala od 5 do 10 mm, koristi se epruveta debljine 5 mm, (slika 5.24).



Slika 5.24. Epruveta za ispitivanje žilavosti

Zavareni spojevi čija je debljina manja od 5 mm zahtijevaju epruvetu debljine koja odgovara debljini predmeta.

Epruvete za ispitivanje se isijecaju prema slici 5.25., a zatim obrađuju na potrebne dimenzije sa odgovarajućim žljebom.



Slika 5.25. Isijecanje uzorka za izradu epruvete

Žilavost ispitujemo pomoću Šarpijevog klatna, jednim udarom pri temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Poslije preloma epruvete posmatra se prelom — da li se mogu primijetiti pore, naprsline, šljaka i druge nepravilnosti. Veličinu žilavosti, tip epruvete, uočene greške i temperaturu ispitivanja unosimo u zapisnik ispitivanja. Na ovaj način utvrđujemo žilavost zavarenog šava. Međutim, ako se želi provjeriti žilavost u zoni toplotnih uticaja, tada zarez izrađujemo na ivici šava ili na udaljenju t od ivice šava (slika 5.26.).

Mjesto zarez a veličina t u zoni toplotnih uticaja utvrđuju se dogovorom i unose u zapisnik ispitivanja, a takođe i rezultati ispitivanja.



Slika 5.26. Izrada žlijeba u zoni toplotnih promjena

Žilavost određujemo prema obrascu

$$e = \frac{N}{A}, \frac{J}{\text{cm}^2},$$

gdje je:

$N - J$ – utrošena energija na prelomu epruvete,

$A - \text{cm}^2$ – poprečni presjek epruvete.

Cilj ispitivanja promjenljivim opterećenjima je određivanje dinamične čvrstoće zavarenih spojeva. Ispitivanje se izvodi na isti način kao i ispitivanje homogenih materijala, s tom razlikom što je epruveta zavarena.