

MERENJE TVRDOĆE

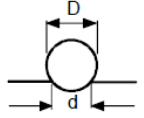
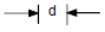
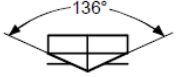

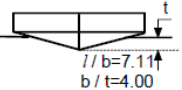
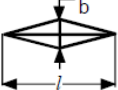
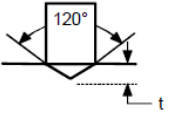
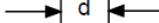
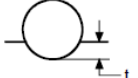
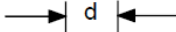
Pod **tvrdocom** podrazumevamo fizičko svojstvo, tj. otpor kojim se suprotstavlja jedno telo ka prodiranju drugog tvrdog tela u njegovu površinu. Tvrdoa se može odrediti:

- Statičkim
- Dinamičkim
- Specijalnim metodama

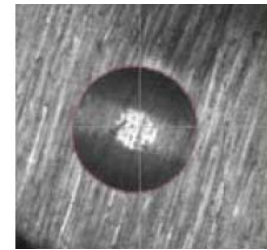
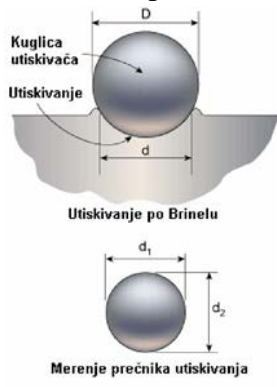
Kod statičkih metoda sila ispitivanja koja deluje na utiskivač postepeno raste do maksimalne vrednosti.

Kod dinamičkih ispitivanja sila na utiskivaču se ostvaruje udarom, ili se tvrdoća određuje na osnovu elastičnog odskoka utiskivača od površine koja se ispituje.

PREGLED METODA MERENJA TVRDOĆE	
Statičke metode	Dinamičke metode
• Brinel (Brinell) metoda HBS, HBW	• Poldi (Poldy) metoda, HP
• Vickers (Vickers) metoda, HV	• Skleroskopska metoda (po Šoru (Shore)), HSh
• Rokvel (Rockwell) metoda, HRC	• Durosopska metoda, HD

Metoda	Utiskivač	Izgled utiskivača		Opterećenje	Formula za izračunavanje tvrdoće	
		Bočni pogled	Pogled odozgo			
Brinel	Kuglica od čelika ili volfram karbida prečnika 10 mm			F	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Dijamantska piramida			F	$HV = \frac{1.854}{d^2}$	
Knup	Dijamantska kupa			F	$HK = \frac{14.2}{l^2}$	
Rokvel A C D	Dijamantska kupa			60 kg 150 kg 100 kg	HRA = HRC = HRD =	100-500 t
B F G	1/16" prečnika čelične kuglice			100 kg 60 kg 150 kg 100 kg	HRB = HRF = HRG = HRE =	130-500 t
E	1/8" prečnika čelične kuglice					

Tvrdoća po **Brinellovoj metodi (HB)** definiše se kao odnos sile i površine utiskivača.



Otisak u materijalu (kalota)

Utiskivač je u obliku kuglice prečnika D (2,5mm, 5mm i 10mm) a može da bude napravljen od čelika (HBS) ili od tvrdog metala - volfram karbida (HBW). Na kuglicu se preko sistema poluga i tegova deluje opterećenjem $F=K \cdot D^2$, daN. Za čelike se uzima $K = 30$, a za mekše materijale (neželezne) usvaja se $K = 10, 5, 1.5$ ili 1. Pri pravilno odabranoj sili, prečnik otiska d treba da bude u granicama: $d = (0.25-0.6) D$.

Postupak ispitivanja se sastoji u tome da se kuglica određenog prečnika, određeno vreme, utiskuje određenom silom u materijal a zatim izmeri prečnik otiska i izračuna površina istog.

Normalno se deluje silom od 30 kN na kuglicu, prečnika 10 mm, za vreme od 30 sec.

Između tvrdoće po Brinellovoj metodi i zatezne čvrstoće uspostavljen je odnos i kod većine niskougleničnih čelika važi relacija $R_m=3,45HB$.



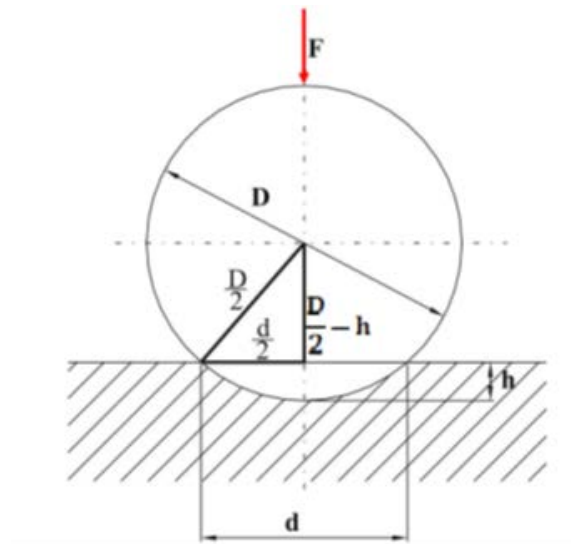
Utiskivač u obliku kuglice

$$HB = F/A$$

gde je F = sila pritiska, A = površina kalote otiska kugle

Izvođenje izraza za HB:

Površina kalote kugle: $A = \pi D \cdot h$

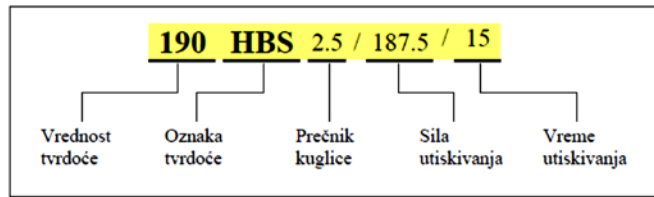


Prema slici je: $\frac{D}{2} - h = \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$, tj. dubina otiska: $h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$,

odnosno: $h = \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$, pa je: $A = \pi \cdot D \cdot \frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$; odnosno:

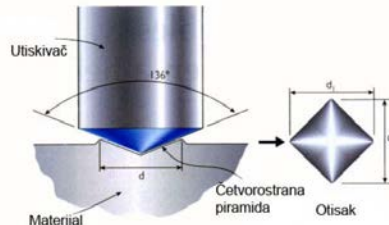
$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Primer oznake: 190 HBS 2.5/187.5/15 (197 HBS D/F/ τ_2)



Tvrdoća po **Vickersovoj metodi (HV)** se definiše kao odnos sile i površine otiska utiskivača.

Utiskivač je u obliku pravilne četvorostrane piramide sa dijamantskim vrhom i uglom pri vrhu od 136° . Utiskuje se pod opterećenjem od 5, 10, 20, 30, 50, 100 daN, odnosno preko poluge na koju deluju tegovi od 5, 10, 20, 30, 50 i 100 kg.



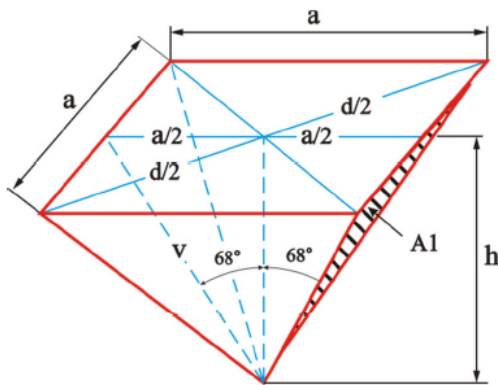
$$HV = \frac{F}{A}; \text{ gdje je } F = \text{sila pritiska}$$

$$A = \text{površina otiska (4} \cdot A_1)$$

$$\text{srednja veličina dijagonale je: } d = \frac{d_1 + d_2}{2} [\text{mm}]$$

Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Vickers-u

Izvođenje izraza za HV:



$$a = \frac{d}{\sqrt{2}}; v = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}; \text{ odnosno}$$

$$A_1 = \frac{a \cdot v}{2} = \frac{\frac{d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}}{2} = \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ};$$

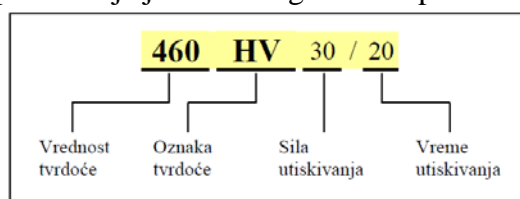
ukupna površina otiska A je:

$$A = 4 \cdot A_1 = 4 \cdot \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}; \text{ odnosno:}$$

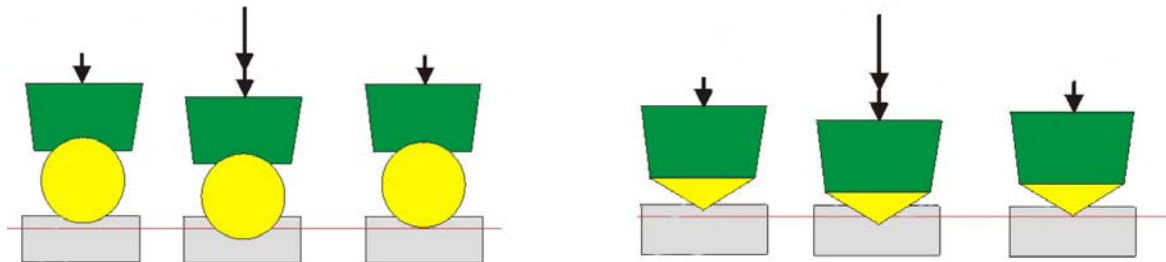
$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}.$$

Metoda po Vickersu naročito je pogodna za kontrolu tvrdoće veoma tvrdih površina kao što su kaljene, cementirane, nitrirane površine. Pored toga mogu se meriti tvrdoće tankih predmeta ako se primene mala opterećenja kojima se deluje na utiskivač.

Tvrdoća HV bliska je tvrdoći HB u granicama 250-600; izvan ovog intervala tvrdoće se znatno razlikuju, te za prevođenje jedne u drugu služe uporedne tablice.



Merilo tvrdoće po **Rokvelovoj metodi (HRB i HRC)** je dubina utiskivanja utiskivača. Utiskivač može da bude u obliku kuglice napravljene od čelika ili u obliku kupe sa dijamantskim vrhom.

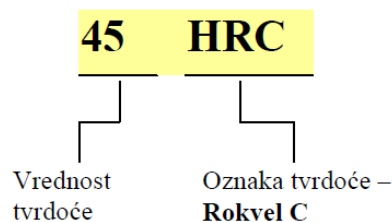


Šematski prikaz merenja tvrdoće po Rokvel metodi - čelična kuglica (levo) i dijamantska kupa (desno)

Utiskivač kod metode **HRC** je dijamantska kupa sa uglom od 120° . Najpre se ručnim okretanjem pritiskivača uvodi predopterećenje od $10\ daN$, a zatim pomoću poluge standardno opterećenje od $140\ daN$. Posle uklanjanja glavnog opterećenja očitava se HRC, i najzad uzorak potpuno rasterećuje.

Druga skala **HRB** upotrebljava se za merenje tvrdoće relativno mekših materijala ($HB < 400$). Kao utiskivač koristi se čelična kuglica prečnika $1/16$ inča na koju se deluje pomoćnim i glavnim opterećenjem od $(10+90)\ daN$. Merenje tvrdoće po Rokvelu je veoma brzo, a otisak je gotovo nevidljiv.

Označavanje tvrdoće po Rokvel metodi izvodi se na sledeći način:



MEHANIČKA ISPITIVANJA DINAMIČKIM DELOVANJEM SILE

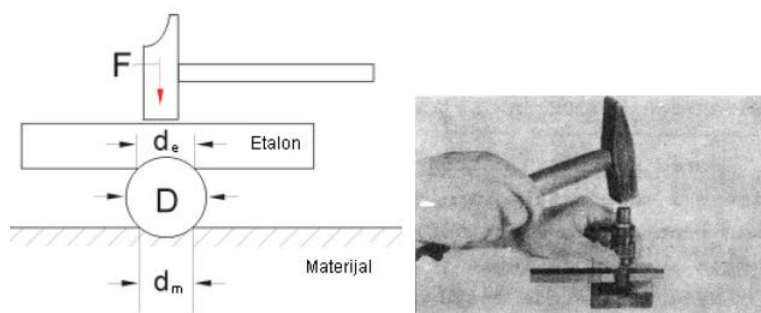
MERENJE TVRDOĆE

Ove metode zasnovane su na dinamičkom dejstvu sile na utiskivač, kao i na udarno-elastičnom odskoku utiskivača od predmeta čija se tvrdoća meri. Reč je o jednostavnim, brzim, lakim i jeftinim metodama merenja, ali i nešto smanjene tačnosti. Primenuju se u slučaju delova velike mase (dimenzija) i složene geometrije, ili kada na finalnim delovima nije dozvoljena bilo kakva deformacija (valjci valjaoničkih stanova, batovi kovačkih čekića, rezni alati i dr.).

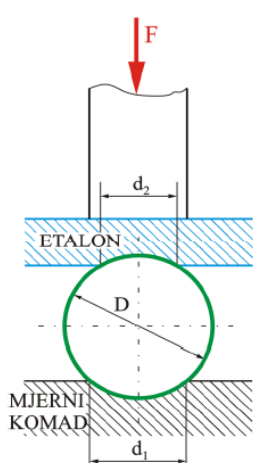
Najviše su u primeni Poldi, skleroskopska i duroskopska metoda.

Za ispitivanje tvrdoće metodama sa dinamičkim dejstvom sila nemamo naših standarda, pa se koriste preporuke stranih standarda ili proizvođača opreme.

Poldi (Poldy) metoda (HP) je metoda ispitivanja tvrdoće udarom (čekićem).



Tvrdoća se određuje tako što se čelična kuglica prečnika $D=10\text{ mm}$ dejstvom sile F istovremeno utiskuje u ispitivani materijal i materijal poznate tvrdoće, etalon.



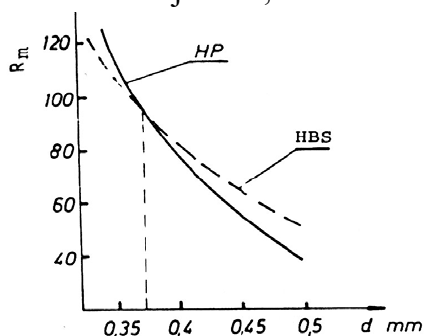
S obzirom da su oba otiska (na materijalu i etalonu) dobijena dejstvom iste sile F , deobom izraza za tvrdoću po Brinelu i ispitivanog materijala i etalona dobija se izraz za tvrdoću po Poldiju. Tvrdoća uzorka prema Brinelu HB_{uz} uz poznatu tvrdoću etalona HB_{et} nalaze se u odnosu:

$$\frac{HB_{uz}}{HB_{et}} = \frac{0,204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_2^2})} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d_1^2})}{0,204 \cdot F}, \text{ odakle je}$$

$$HB_{uz} = HB_{et} \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_1^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_2^2}}$$

Standardni etalon ima čvrstoću $R_m = 70 \cdot 9,81 = 686,7\text{ [N/mm}^2\text{]}$, tj. tvrdoću $HB_{et} = 197$.

Poldijeva metoda se smatra modifikovanom Brinelovom metodom. Razlika vrednosti tvrdoća po Brinel i Poldi metodi ne prelazi 2%. Kod tvrdih materijala brojna vrednost tvrdoće po Poldi metodi je veća, a za mekše materijale je manja.



HBS - tvrdoća etalona izmerena po Brinel metodi, odnosno HB_{et}
HP - tvrdoća uzorka izmerena po Brinel metodi, odnosno HB_{uz}

Dijagram odnosa HP i HBS

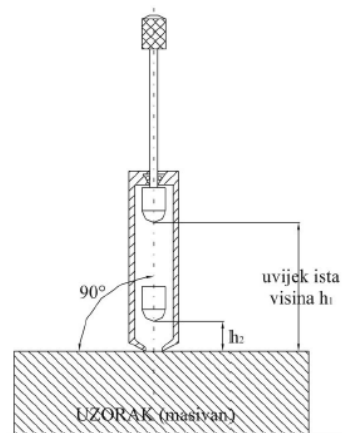
Skleroskopska metoda (po Šoru (Shore)) (HSh) je metoda ispitivanja tvrdoće elastičnim odskokom. Visina odskoka zavisa je od vrste materijala, njegove tvrdoće, modula elastičnosti, stanja površine, mase predmeta, kao i aparata za merenje.

Skleroskop je staklena cev dužine 245 mm, podeljene na 130 podeoka u koji se nalazi mali teg (utiskivač) sa dijamantskim vrhom mase 2.5g. Sa određene visine utiskivač slobodno pada bez trenja na površinu materijala čija se tvrdoća meri.

Merilo tvrdoće je visina prvog elastičnog odskoka utiskivača. U najvišoj tački odskoka utiskivač se zaustavi kočnicom. Visina odskoka je uvek manja od početne visine pada za iznos utrošen na plastičnu deformaciju podloge i elastične deformacije u metalu. Kod mekših materijala je odskok niži nego kod tvrdih. Visina odskoka u milimetrima se preko tablice preračunava u vrednost tvrdoće prema Brinellu. Postoje uređaji s induktivnim očitavanjem položaja tege nakon odskoka i bročanim prikazom rezultata.



Shoreov skleroskop



Ispitivanje tvrdoće prema Shoreu

Uslovi ispitivanja

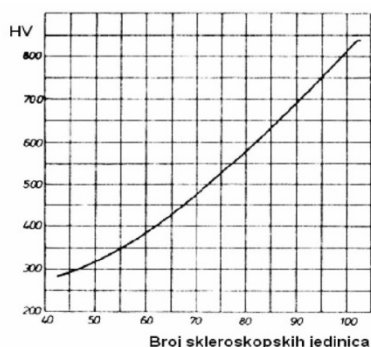
Pošto naš standard nije definisao ovu metodu, koriste se preporuke proizvođača:

- Primenuje se pri merenju tvrdoća čelika i tvrdih livova tvrdoće 225 do 940 HV;
- Na istom mestu uzorka izvodi se samo jedno merenje;
- Vrednost tvrdoće uzorka je srednja vrednost iz najmanje 5 pojedinačnih merenja visina prvih odskoka utiskivača;
- Temperatura pri ispitivanju je sobna (izuzetno i do 10-35°C);
- Masa postolja, na koju se postavlja uzorak mora biti najmanje 2-5 kg.

Tok rada pri merenju

- Aparat za merenje - Šorov skleroskop, čvrsto se postavlja na površinu uzorka ili radnog predmeta, pri čemu se kontrola upravnosti proverava libelom;
- Podiže se utiskivač u najviši položaj;
- Oslobađa se utiskivač da slobodno pada (pritiskom na dugme);
- Pažljivo se prati odskok utiskivača i registruje visina odskoka;

Na osnovu srednje vrednosti elastičnog odskoka utiskivača može se tvrdoća po Šoru preračunati u tvrdoću po Vickersu.

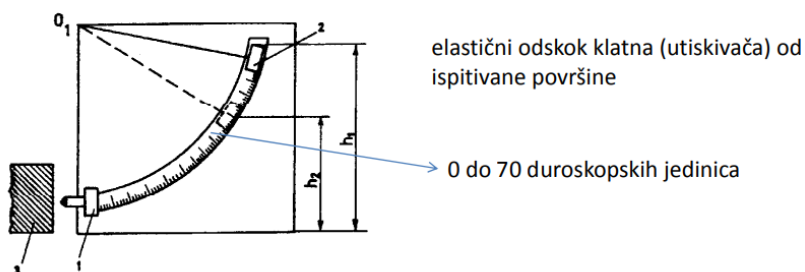


Odnos tvrdoće po Šoru i tvrdoće po Vickersu

Dobra strana skleroskopa je njegova jednostavnost. Uređaj je jeftin.

Mana mu je mala preciznost, kao i da tvrdoća može da se meri samo na horizontalnim površinama.

Duroskopska metoda (HD) je metoda koja je otklonila manu skleroskopske metode, jer meri tvrdoću isključivo na vertikalnim površinama.



Šematski izgled duroskopa: 1) utiskivač; 2) klatno sa tegom; 3) ispitivani uzorak

Duroskop

Princip rada ovog aparata baziran je na padu malog tega (2), obrtnog oko neke ose, sa početne visine – h_1 i njegovom udaru u utiskivač (1), koji je naslonjen na površinu radnog predmeta čija se tvrdoća meri (3). Kinetička energija tega troši se na utiskivanje utiskivača, ostvarujući delimično plastične, a delom elastične deformacije. Usled elastičnog odskoka podiže se teg do neke visine – h_2 . Ova visina se uočava pomoću kazaljke koja je, podešena tegom pri odskoku ostala na toj visini. Visina odskoka, određena položajem kazaljke, očitava se na skali duroskopa i predstavlja meru tvrdoće po ovoj metodi. Skala ima 70 podeoka.

Vrši se najmanje 5 merenja, s tim što se pri svakom narednom merenju uzorak pomeri.

Uslovi ispitivanja

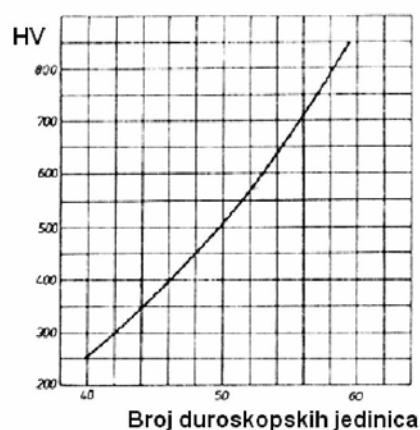
Pošto naš standard nije definisao ovu metodu, koriste se preporuke proizvođača:

- Primenuje se pri merenju tvrdoća malih i komplikovanih delova, kao i delova u završnoj fazi mašinske obrade (zupčanici, radilice i dr.);
- Mogu se ispitivati kako metalni tako i nemetalni materijali, keramika i sl.
- Na istom mestu uzorka izvodi se samo jedno merenje;
- Vrednost tvrdoće uzorka je srednja vrednost iz najmanje 5 pojedinačnih merenja visina prvih odskoka utiskivača;
- Temperatura pri ispitivanju je sobna (izuzetno i 10-35°C).

Tok rada pri merenju

Tok rada je lak i brz, zahvaljujući konstrukciji aparata:

- Klatno se postavlja (podize) u gornji položaj okretanjem odgovarajuće navrtke na zadnjoj strani aparata;
- Aparat se prislanja uz vertikalnu površinu predmeta;
- Pomoću libele aparat se postavlja u horizontalni položaj;
- Pritiskom na taster za aktiviranje oslobađa se teg sa klatnom koji pada na utiskivač (ne sme doći do pomeranja aparata);
- Na lučnoj skali, koja je podjeljena na 70 podeoka, očitava se broj duroskopskih jedinica na mestu zaustavljanja kazaljke;
- Prevođenje duroskopskih jedinica u tvrdoću po Vickersu, izvodi se preko dijagrama



Odnos tvrdoće po Vickersu i broja duroskopskih jedinica

Skleroskopska i duroskopska metoda mere tvrdoću kod delova kod kojih ne bi smela da se ošteti površina materijala.

ISPITIVANJE ŽILAVOSTI METALA I LEGURA

Žilavost je jedna od najvažnijih osobina metala i legura zasnovana na dinamičkom dejstvu sile. Pod **žilavošću** se podrazumeva sposobnost nekog materijala da se suprotstavi dejstvu udara. Ukoliko se za lom uzorka dinamičkim udarom utroši veći rad, utoliko se taj materijal smatra žilavijim. Materijali sa malom žilavošću najčešće su tvrdi i kruti.

Između žilavosti i zatezne čvrstoće postoje velike razlike u međusobnim odnosima, tako mnogi materijali iste zatezne čvrstoće imaju različite vrednosti žilavosti. Materijali koji imaju veće vrednosti zatezne čvrstoće i manju kontrakciju, po pravilu imaju i manju žilavost. Međutim, visokim vrednostima kontrakcije ne odgovara uvek i povećana žilavost. Ispitivanje žilavosti metala i legura primenjuje se posle skoro svih vrsta obrade materijala.

Za ispitivanje žilavosti metala i legura koristi se Šarpijevo klatno, a sam postupak obuhvaćen je standardom SRPS EN 10045-1.

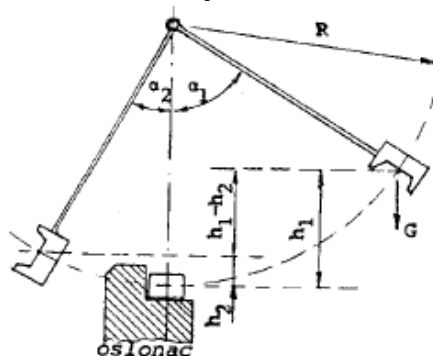
Žilavost po Šarpiju definiše se kao utrošeni rad po jedinici površine epruvete iznad zarez, da bi se ista slomila od jednog udarca.

Na slici je prikazano Šarpijevo klatno firme Amsler i šematski prikaz rada Šarpijevog klatna.

Uređaj se sastoji od klatna dužine R obrtnog oko osovine O . Na slobodnom kraju klatna nalazi se teg mase G . Masa tega podešena je tako da klatno pri slobodnom padu sa najvišeg položaja ostvari rad od 300J. Raspoloživi rad može biti još 100J i 200J.

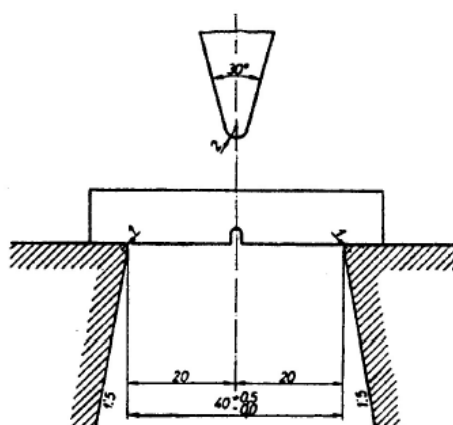
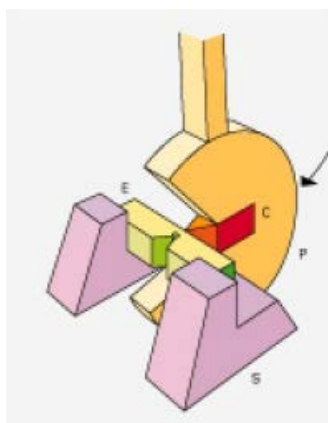


Šarpijevo klatno (Amsler)



a) šematski prikaz rada klatna

Na donjem delu uređaja nalaze se dva oslonca na koja se postavlja epruveta. Rastojanje između oslonaca iznosi 40 mm, a po potrebi može se menjati. Unutrašnje strane oslonca imaju nagib 1:5, a ivice su zaobljene sa poluprečnikom krivine 1 mm, kako je to prikazano na slici.



Deo tega koji neposredno udara epruvetu izrađen je u obliku noža čije strane zaklapaju ugao od 30° , zaobljen poluprečnikom 2 mm. Nož klatna udara epruvetu nasuprot zarezu na epruveti, kao što je prikazano na slici iznad. Pri udaru nož treba da dodiruje epruvetu po celoj visini.

Obrtanje klatna oko osovine treba da se obavlja sa najmanjim trenjem. Pri praznom hodu klatna ugao otklona klatna sme da bude najviše za 1% manji od početnog ugla. Brzina klatna u trenutku udara na epruvetu treba da iznosi 5-7 m/s.

Pre početka ispitivanja klatno se podigne na visinu h_1 pri čemu je ugao otklona klatna α_1 . U ovom položaju klatno raspolaže potencijalnom energijom $A_1 = G \cdot h_1 = 100; 200$ ili 300 J. Koja će se vrednost potencijalne energije izabrati zavisi od žilavosti materijala i visine h_1 . Puštanjem klatna da slobodno pada sa visine h_1 ono udara u epruvetu pri čemu se deo

energije utroši na lom epruvete, dok se preostali deo energije utroši na otklon klatna na drugu stranu, tj. za podizanje klatna na visinu h_2 , zauzimajući ugao otklona α_2 .

Prema tome utrošeni rad biće:

$$A_0 = A_1 - A_2 = G \cdot h_1 - G \cdot h_2 \quad [\text{J}]$$

Vrednosti h_1 i h_2 mogu se izraziti preko dužine klatna (R) i ugla otklona α_1 i α_2 :

$$h_1 = R \cdot (1 - \cos \alpha_1)$$

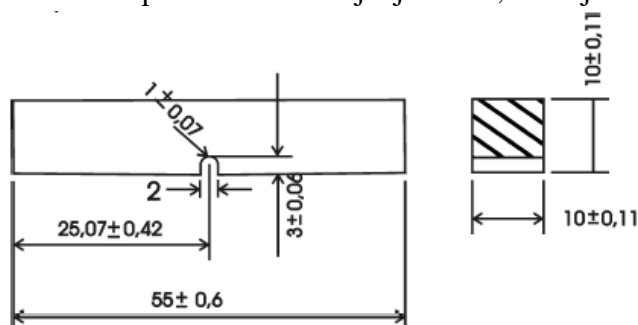
$$h_2 = R \cdot (1 - \cos \alpha_2)$$

Zamenom ovih vrednosti u jednačinu za utrošeni rad dobiće se:

$$A_0 = G \cdot R \cdot (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad [\text{J}]$$

Velčine G , R i α_1 su poznate i predstavljaju karakteristike klatna. Promenljiv je samo ugao otklona α_2 čija se vrednost očitava na ugrađenom uglomeru sa kazaljkom.

Prema standardu SRPS C.A4.004 za ispitivanje žilavosti po Šarpiju primenjuju se epruvete prizmatičnog oblika, kvadratnog poprečnog preseka, sa zarezom na sredini dubine 2; 3 ili 5mm i prečnikom zaobljenja 2 mm, kako je to prikazano na slici.



Epruveta za ispitivanje žilavosti po Šarpiju



Izgled polomljene i cele epruvete

Kao normalna (najčešće korišćena) epruveta za ispitivanje žilavosti smatra se epruveta sa dubinom zareza 3 mm. Žilavost metala i legura obeležava se sa k i izračunava se kao utrošeni rad po jedinici površine epruvete iznad zareza:

$$k = \frac{A_0}{S_0} \quad [\text{J}/\text{cm}^2]$$

Uz oznaku za žilavost dodaju se indeksi 2; 3 ili 5 koji označavaju dubinu zareza. Površina poprečnog preseka epruvete iznad zareza iznosi 0,8; 0,7 ili 0,5 cm^2 , što zavisi od dubine zareza.

Potrebno je izvršiti najmanje dva ispitivanja pa onda izračunati srednju vrednost žilavosti.

Pri ispitivanju treba voditi računa o temperaturi uzorka (najpodesnija je $20 \pm 2^\circ\text{C}$), jer žilavost materijala u velikoj meri zavisi od temperature. Na višoj temperaturi žilavost metala i legura je veća i obratno. Utvrđeno je da za veći broj materijala postoji kritična temperatura pri kojoj se žilavost jako smanjuje. Ova temperatura naziva se **temperatura krtog loma**. Sa padom temperature dolazi se do krtog loma sa izraženom zrnastom kristalnom strukturom i vrlo malo deformisanim presekom.



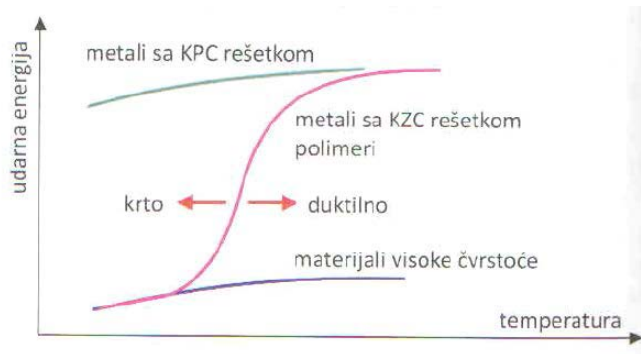
Vrste preloma: krto (levo) i žilavi (desno)

Struktura je vrlo važan parametar od kojeg zavisi žilavost metala i legura.

Metali sa KZC rešetkom na višim temperaturama lome se duktilno, a na nižim krto. Ovakvo ponašanje je karakteristično za čelik.

Za legure sa KPC rešetkom (Al, Cu, austenitni čelici) udarna energija loma je na nižim temperaturama neznatno niža nego na povišenim.

Materijali visoke čvrstoće (alatni čelici) imaju nisku udarnu energiju loma bez obzira na temperaturu.

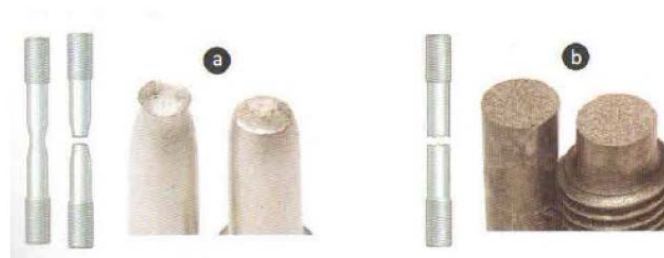


Uticaj temperature na energiju udara u zavisnosti od tipa kristalne rešetke

Lom materijala je razdvajanje čvrstog tela na dva ili više komada. Lom se odigrava stvaranjem prsline i njenim širenjem. Metalni materijali se lome na različite načine, zavisno od: vrste i stanja metala i legura, temperature, brzine opterećenja, naponskog stanja, radne sredine.

Razlikuju se dva osnovna oblika loma:

- Krto lom
- Duktilni lom



Slika 1 Izgled površine loma posle kidanja
 a) Duktilni lom legure aluminijuma
 b) Krto lom srednjeugljeničnog čelika

Pored izgleda prelomnih površina može se i na osnovu dijagrama napon-deformacija proceniti da li se radi o krtoj ili duktilnoj materijalu.

ISPITIVANJE MATERIJALA NA ZAMOR

Veliki broj delova i konstrukcija izložen je u toku rada opterećenjima promenljivim po veličini, a često i po smeru. Usled dugotrajnog dejstva periodično promenljivih opterećenja može da nastane postepeno razaranje materijala.

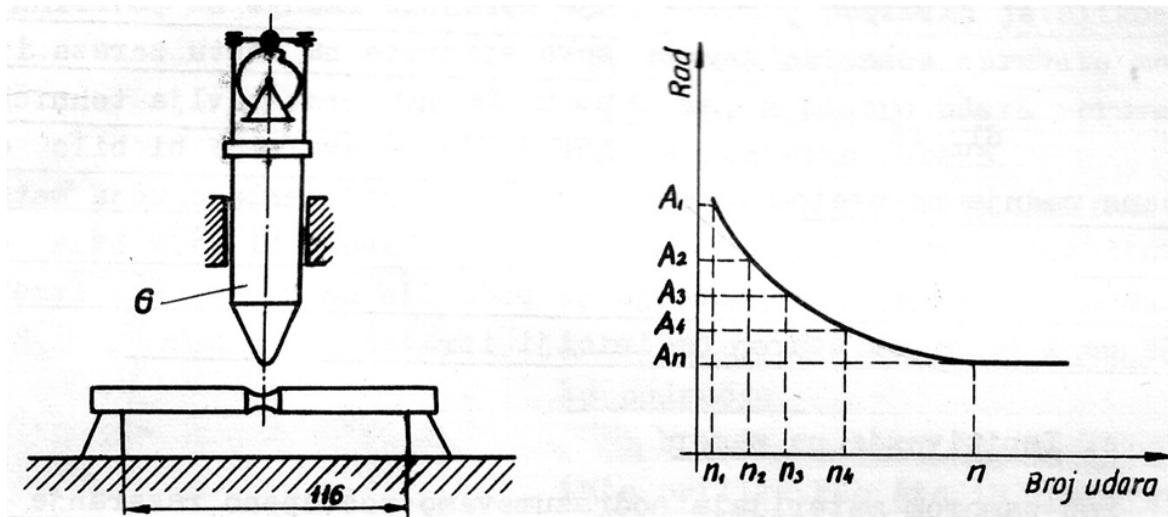
Pod *zamorom materijala* podrazumevamo postepeno razaranje materijala usled velikog broja ponovljenih, po predznaku promenljivih naprezanja, a svojstvo materijala da izdrži ta naprezanja je *izdržljivost materijala*.

Jedan od prvih i najstarijih načina ispitivanja materijala na zamaranje jeste - **ispitivanje na zamor ponovljenim udarima**.

Sastoji se u tome da se odredi najveći pojedinačni rad potreban da epruveta ispitivanog materijala izdrži neograničeni broj udara, a da se pri tom ne razori. Pod neograničenim brojem udara podrazumevamo milion ili nekoliko miliona udara.

Ovo ispitivanje se obavlja na mašini tipa Krup (slika ispod). Postupak se sastoji u tome da dejstvujemo udarima sa radom A_1 pri čemu se, recimo, epruveta slomi nakon n_1 udara. Nakon toga smanjujemo teg (G), tako, da pojedinačni rad udara bude manji i iznosi A_2 , a epruveta se lomi nakon n_2 udara i to tako da je $n_2 > n_1$. Opet smanjujemo rad udara na vrednost A_3 i utvrđujemo da epruveta izdrži n_3 udara, nakon čega se slomila, pri tome je $n_3 > n_2$.

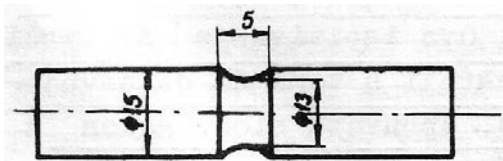
Tako smanjujući rad doći ćemo do rada kada će epruveta moći da izdrži vrlo veliki broj udara a da se ne slomi. Ova vrednost rada i broj udara može da bude utvrđena grafičkim putem crtanjem *Velerove krivulje* (slika ispod), kod koje će biti izražen rad kao paralelna crta osi apscisa sa odgovarajućim brojem udara n , pri kojem ne dolazi do loma materijala.



Ovaj način ispitivanja je vrlo dug, jer se u minuti može izvršiti najviše 60 udara, dok bi za milion udara bilo potrebno 12 dana, te se ovaj postupak malo primenjuje.

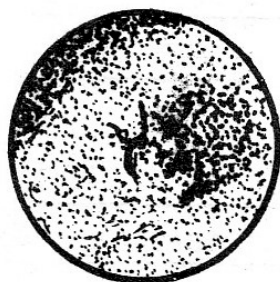
Ovaj metod ispitivanja upotrebljava se u izvesnoj meri radi vršenja relativnih proba, uzimajući za bazu poznat materijal i njegovo ponašanje pri ovoj vrsti ispitivanja.

Epruveta za ovu vrstu ispitivanja je izrađena po standardu (slika ispod). Pri ovoj vrsti ispitivanja epruveta se nakon svakog udara okrene za 180° radi naizmeničnog naprezanja gornjih i donjih slojeva epruvete.

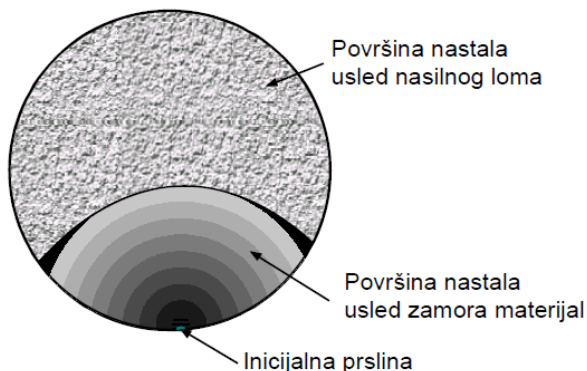


ISPITIVANJE SILOM PROMENLJIVE VREDNOSTI

Rekli smo da se metalni delovi izloženi duže vremena dinamičkom dejstvu sile promenljive vrednosti lome iako su izazvana naprezanja daleko manja po vrednosti od naprezanja pri statičkom dejstvu sile. Ovu pojavu prvi je uočio Veler, potaknut čestim lomovima lokomotivskih osovina. Pri svojim istraživanjima Veler je uočio karakterističan izgled ovih preloma za razliku od izgleda preloma nastalog pri statičkom ili udarnom naprezanju. Kod preloma, izazvanog statičkim ili udarnim naprezanjima, izgled je normalan zrnast. Međutim, kod osovina slomljenih pod dužim dejstvom dinamičkog opterećenja Veler je uočio dve potpuno različite površine preloma. U gornjem delu preloma površina je sitnozrnasta jasnog metalnog sjaja, dok je ostali deo površine preloma krupno zrnaste strukture (slika).



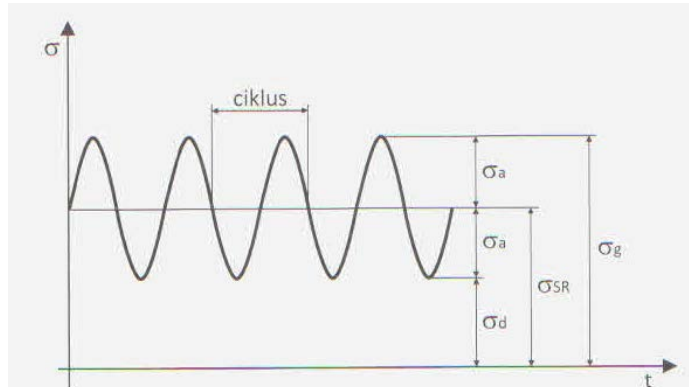
Veler je objasnio ovu pojavu time što se pri dinamičkom opterećenju usled zamora metala pojavljuju sitne prskotine između pojedinih zrna, koje se dalje povećavaju usled trenja zrna o zrno pod dejstvom daljeg dinamičkog naprezanja, te nastaje deo sitnozrnaste strukture, koja nakon preloma ima sjajan izgled. Kada se ova površina sitnih prskotina toliko proširi tj. površina preseka toliko smanji, da ne može da izdrži dalja opterećenja dolazi do naglog loma i površine preloma krupnozrnaste strukture.



Površina loma usled zamora ima karakterističan izgled, na kojoj se mogu uočiti dve međusobne različite površine, zona zamora i zona nasilnog loma. Zona zamora ima glatku i tamnu površinu u kojoj se uočavaju linije porasta zamorne prskotine.

U cilju određivanja osetljivosti metala na zamor izvode se ispitivanja silom promenljive vrednosti, pri čemu se određuje najmanji promenljivi napon pri kome pojava zamora neće nastati.

Sila promenljive vrednosti definiše se prema sinusoidnom zakonu promene.



Prema slici uočavaju se sledeće oznake:

σ_g - gornji napon, najveći napon u ciklusu,

σ_d - donji napon, najmanji napon u ciklusu,

σ_a - amplituda napona, polovina algebarske razlike gornjeg i donjeg napona,

$$\sigma_a = (\sigma_g - \sigma_d)/2$$

σ_{SR} - srednji napon, apsolutna vrednost aritmetičke sredine gornjeg i donjeg napona i

$$\sigma_{SR} = (\sigma_g + \sigma_d)/2$$

R - raspon napona, razlika gornjeg i donjeg napona.

Zamor može biti izazvan raznim vrstama opterećenja (slika ispod) i to:

- Naizmenično promenljivo (ispitivanje na zamor naizmeničnim pritiskom i zatezanjem).
- Jednosmerno promenljivo - pritisak.
- Jednosmerno promenljivo - zatezanje.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
STATIČKI PRITISAK	JEDNO SMERNO PROMENLJIVI NAPON - PRITISAK -		NAIZMENIČNO PROMENLJIVI NAPON			JEDNO SMERNO PROMENLJIVI NAPON - ZATEZANJE -		STATIČKO ZATEZANJE
—	—	POČETNO	NESIME - TRICNO	SIMETRIČNO	NESIME - TRICNO	POČETNO	—	—

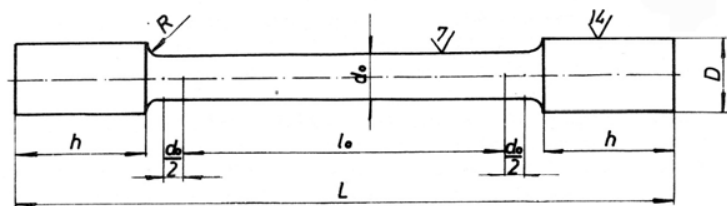
Kao merilo trajnosti materijala služi **dinamička čvrstoća**, koja predstavlja granicu do koje se može materijal izložiti neograničeno dugo dejstvu promenljivih naprezanja a da pri tome ne dođe do loma.

Dinamička čvrstoća se određuje na naročitim mašinama – **pulzatorima**, koji mogu ostvariti odgovarajući broj promena opterećenja u jedinici vremena. Pulzatori mogu biti mehanički, hidraulični i elektromagnetni, maksimalne sile 1.000.000 N, pa i više.



Elektromagnetni pulzator

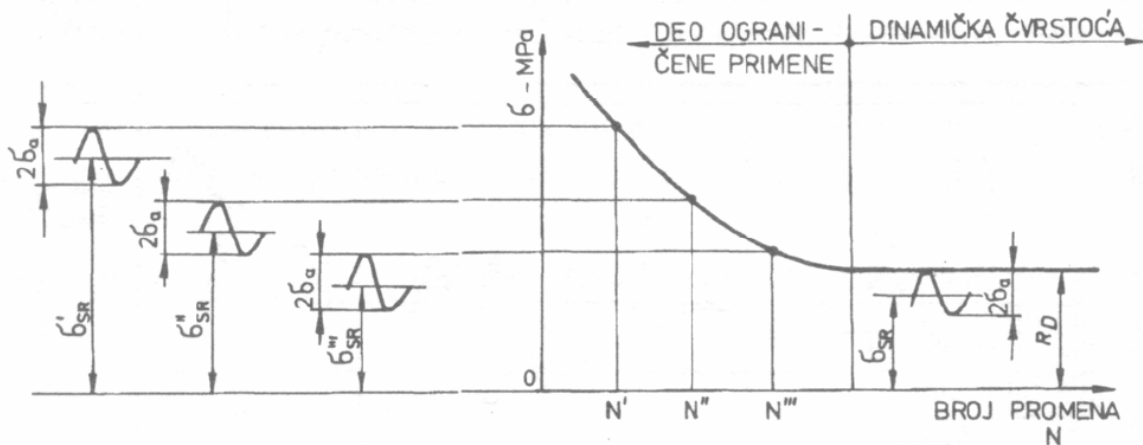
Za određivanje dinamičke čvrstoće potrebno je imati 7 do 10 jednakih epruveta specijalno obrađenih tj. poliranih bez i najmanjih prskotina i riseva.



Broj promena opterećenja zavisi od vrste materijala, i to za:

- čelik 10.000.000
- obojene metale 20.000.000
- lake metale 40.000.000 do 100.000.000

Prva epruveta izlaže se promenljivom naponu koji je određen izabranim srednjim σ_{SR} i amplitudnim naponom σ_a , pri čemu σ_g ima vrednost ispod vrednosti zatezne čvrstoće R_m . Lom usled zamora pri tom opterećenju nastaje posle N' promena ciklusa.



Velero dijagram

Druga epruveta izlaže se promenljivom naponu koji je manji od napona kod prve epruvete, a određen je izabranim srednjim naponom (σ_{SR}) pri nepromenljivom amplitudnom σ_a naponu. Lom usled zamora nastaje posle N'' promena ciklusa.

Na taj način smanjenjem srednjeg napona na većem broju epruveta (postepeno) dobija se celokupan Velerov dijagram.

Iz Velerovog dijagrama, uočava se da promenljivi napon pri nekom srednjem naponu σ_{SR} i amplitudnom naponu σ_a postaje asimptota nekom naponu R_D , koji se naziva **dinamička čvrstoća**. Drugim rečima, ako je promenljivi napon niži od dinamičke čvrstoće R_D neće nastati lom usled zamora.

Dijagram dinamičke izdržljivosti, Velerova kriva, se deli na dva dela:

- deo ograničene primene i
- deo dinamičke čvrstoće.

Pa tako se razlikuje:

R_D - Trajna dinamička čvrstoća pri kojoj uopšte ne nastaje lom pri delovanju promenljivih opterećenja i

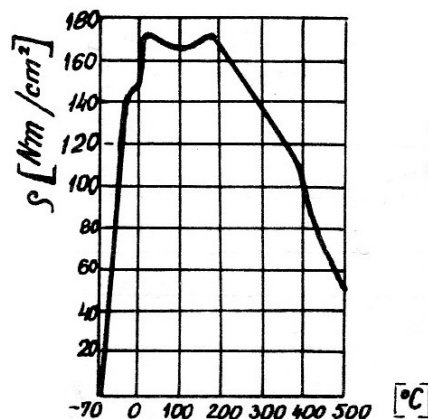
R_{Dn} – Ograničena dinamička čvrstoća pri kojoj ne nastaje lom pri N ciklusa promene delujućeg opterećenja, što je značajno za ograničeni vek trajanja elemenata kao npr. u vazduhoplovstvu.

ISPITIVANJE MATERIJALA NA NISKIM I POVIŠENIM TEMPERATURAMA

Ova ispitivanja se vrše radi određivanja mehaničkih svojstava metala na nižim i višim temperaturama od normalne, tj. na onim temperaturama na kojima će dotični metal biti upotrebljavan.

Ispitivanja kratkotrajnim opterećenjem na niskim temperaturama

Ova ispitivanja se vrše na isti način kao ispitivanja pri normalnim temperaturama. Na dijagramu, slika ispod, prikazana je promena žilavosti oplemenjenog čelika sa 0,23% C, ispitivanog epruvetom dimenzije 15x15x150 mm, sa zarezom 7 mm dubine i okrugline pri dnu 3 mm. Ispitivanje žilavosti na povišenim odnosno nižim temperaturama je teško izvodljivo, obzirom na epruvetu, koja treba da obezbedi visoku odnosno nisku temperaturu u toku ispitivanja.



Postupak ispitivanja žilavosti metala na niskim temperaturama vrši se na taj način što se dve ili više epruveta hlade u uređaju pored same mašine. Jedna od epruveta ima rupu u koju se stavlja termoelement radi merenja temperature. Hlađenje epruveta se vrši niže no što je temperatura ispitivanja. Kada je postignuta ta niža temperatura, ispitivana epruveta se postavlja na mašinu za ispitivanje, a u neposrednoj njenoj blizini, pri istim temperaturnim uslovima, epruveta sa termoelementom. Kad temperatura dostigne željenu temperaturu vrši se ispitivanje.

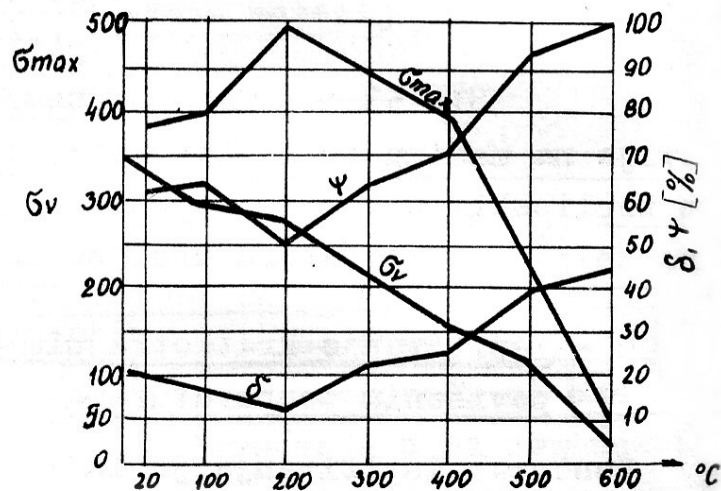
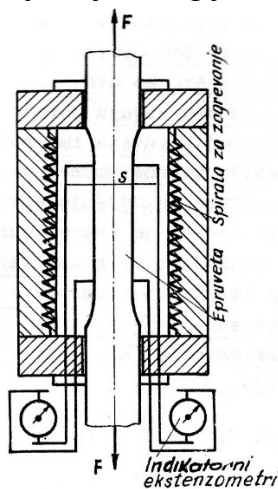
Ispitivanje kratkotrajnim opterećenjem na povišenim temperaturama

Postupak ispitivanja je isti kao i pri normalnoj temperaturi s tom razlikom što se posebnim uređajem (slika ispod *a*), koji se stavlja na epruvetu, epruveta zagreva na odgovarajuću temperaturu.

Deformacije se mere specijalnim ekstenzometrom, koji se delimično nalaze u peći a delimično van nje, kako bi prenele deformacije van peći i omogućili njihovo čitanje. Deo ekstenzometra koji se nalazi u peći treba da bude od metala otpornog na visoke temperature. Ovi ekstenzometri nazivaju se indikatorski ekstenzometri.

Međutim deformacije se mogu pratiti optičkim automatskim instrumentima.

Uticaj temperature na zateznu jačinu, granicu velikih izduženja, kontrakciju i izduženje za jedan ugljenični čelik prikazan je na dijagramu, slika ispod *b*).



Ispitivanje zatezne jačine dugotrajnim opterećenjima na povišenim temperaturama

Način deformisanja metala pri dugotrajnom delovanju spoljnih sila na povišenim temperaturama, sasvim je drugačiji no pri kratkotrajnim opterećenjima i normalnoj temperaturi.

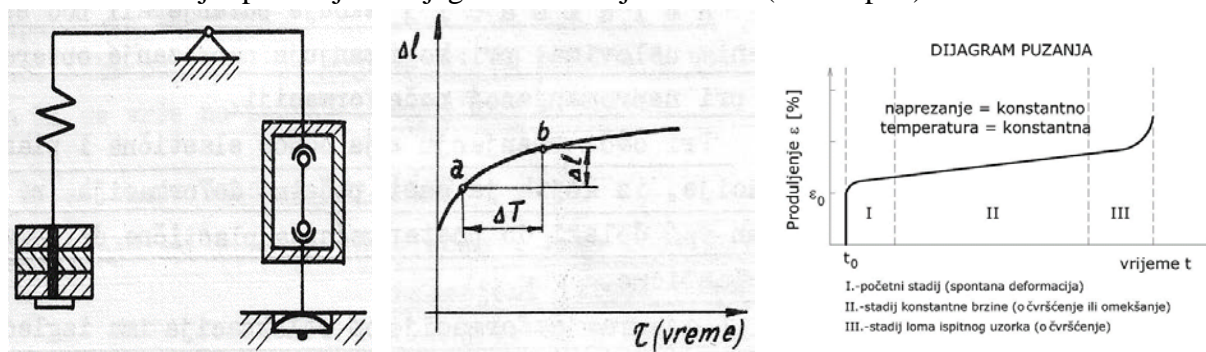
Slučajevi trajnih deformacija pri ovakvim uslovima, tj. pri dugotrajnom opterećenju na povišenim temperaturama mogu biti: puzanje, relaksacija i trajna jačina.

Puzanje je svojstvo metala da se polagano i neprekidno plastično deformiše pod dugotrajnim delovanjem postojanog opterećenja na povišenim temperaturama. Puzanje će se zaustaviti ako materijal pri rastezanju primereno očvrstne, a u protivnom se puzanje nastavlja do loma materijala.

Cilj ispitivanja puzanja je određivanje granice puzanja. Granica puzanja $R_p \epsilon/t/v$ je naprezanje pri kojem materijal dosegne određeno relativno izduženje ϵ (npr. 1%), za određeno vreme t (npr. 100.000 sati) i pri određenoj temperaturi v (npr. 400°C), što bi se za navedeni primer pisalo $R_{p1/100.000/400}$. Dugotrajnim opterećenjima (100.000 sati), stvarna trajna statička izdržljivost (**trajna statička čvrstoća**) ni nakon tako dugog vremena se ne može odrediti. U svakom primeru se može odrediti samo **vremenska statička izdržljivost**, koja vredi za određeno ograničeno trajanje opterećenja. Proporučljiva trajanja statičkih ispitivanja su 100.000 sati za metalne materijale i 10.000 sati za plastike.

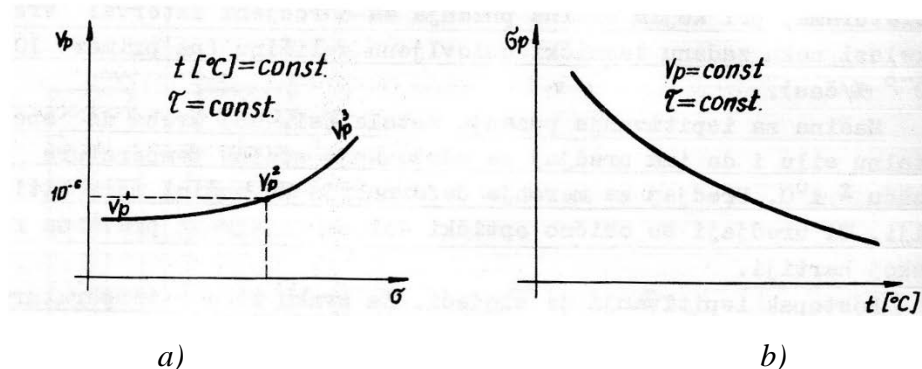
Trajna statička čvrstoća ili statička izdržljivost $R_{m_{t_0}}$ je naprezanje koje uzrokuje lom materijala nakon određenog trajanja ispitivanja t (npr. 100.000 sati) i pri određenoj temperaturi v (npr. 600 °C).

Ispitivanje puzanja se vrši na ispitnim uzorcima s navojem, na puzalicama. Uzorci se postepeno zagrevaju na temperaturu ispitivanja. Temperatura se održava konstantnom za vreme ispitivanja. Uzorci se podvrgavaju konstantnom zateznom naprezanju. Ispitivanje traje od 45 sati do nekoliko godina (100.000 sati). Beleži se izduženje ispitnog uzorka s vremenom. Za svaku zadatu temperaturu, ispituje se 4 do 5 epruveta sa raznim opterećenjima i za svaku od njih postavlja se dijagram izduženje – vreme (slika ispod).



Na osnovu izduženja i vremena mogu se dobiti brzine puzanja v_p i naprezanje σ , koji je izazvala ta brzina puzanja, crta se dijagram (slika ispod a), na kojem se iz zadane brzine puzanja određuje njeno odgovarajuće naprezanje, koja predstavlja granicu puzanja.

Radi lakše upotrebe dijagrama $v_p-\sigma$ predstavlja se u logaritamskim koordinatama (slika ispod b) granica puzanja – temperatura.

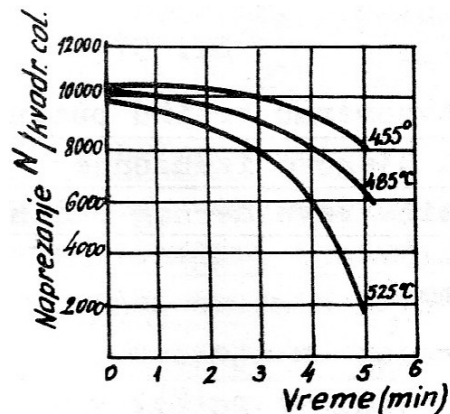


Iz ovog dijagrama vade se potrebne vrednosti za proračun mašinskih elemenata podvrgnutih jednovremenom delovanju dugotrajnih napreznja i temperature (na primer za proračune parnih kotlova itd).

Relaksacija je takođe puzanje ali pod specijalno određenim uslovima, pri kojima se smanjuje napreznje opterećene epruvete pri nepromenjenoj početnoj deformaciji.

Pri ovom smanjenju napreznja odnos elastične i plastične deformacije, iz kojih je sastavljena početna deformacija, ne ostaje postojan već dolazi do postepenog povećanja plastične deformacije na račun elastične.

Dijagram deformacija prilikom relaksacija ima izgled kao što je to prikazano slikom ispod, tj. sa porastom vremena napreznje se u epruveti smanjuje pošto ukupna deformacija (izduženje) za određeni vremenski period treba da ostane nepromenjena.



Dijagramom je prikazano nekoliko krivih relaksacija za isti čelik za rad na raznim temperaturama sa istom početnom deformacijom od 0,001.

Trajna jačina je napreznje koje proizvodi izvesno određeno deformisanje u materijalu posle izvesnog propisanog vremena.

Po nekim propisima trajna jačina je postignuta kad tri do šest časova posle početka dejstva sile istežanje iznosi 0,005%/čas ili ako nakon 3 do 10 časova početka dejstva sile istežanje iznosi 0,003%/čas ili ako nakon 25 do 35 časova istežanje iznosi 0,0015%/čas.