

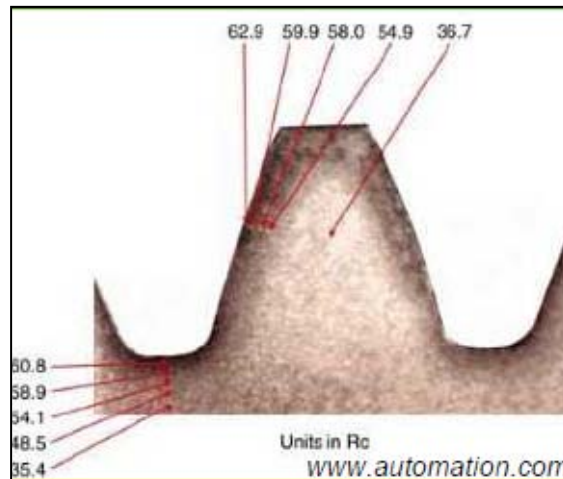
ODREĐIVANJE TVRDOĆE MATERIJALA

- Određivanje tvrdoće je jedna od bržih i manje skupih metoda za određivanje mehaničkih svojstava materijala, a pritom ispitivani materijal ostaje gotovo neoštećen tijekom određivanja tvrdoće.
- **Tvrdoća materijala nije fizikalna konstanta materijala** – njezina vrijednost ne ovisi samo o ispitivanom materijalu nego i o metodi određivanja tvrdoće. Također, ona ovisi o mehaničkim svojstvima materijala - plastičnosti materijala, granici elastičnosti, modulu elastičnosti, čvrstoći, itd.
- Važnost ispitivanja tvrdoće je u vezi s drugim mehaničkim svojstvima materijala.
- Kada se tvrdoća određuje različitim metodama tada je utjecaj na mehanička svojstva različit. Zato je vrlo važno odabrati metodu koja daje usporedbene i pouzdane rezultate koji zadovoljavaju zahtjeve za daljnju primjenu materijala.

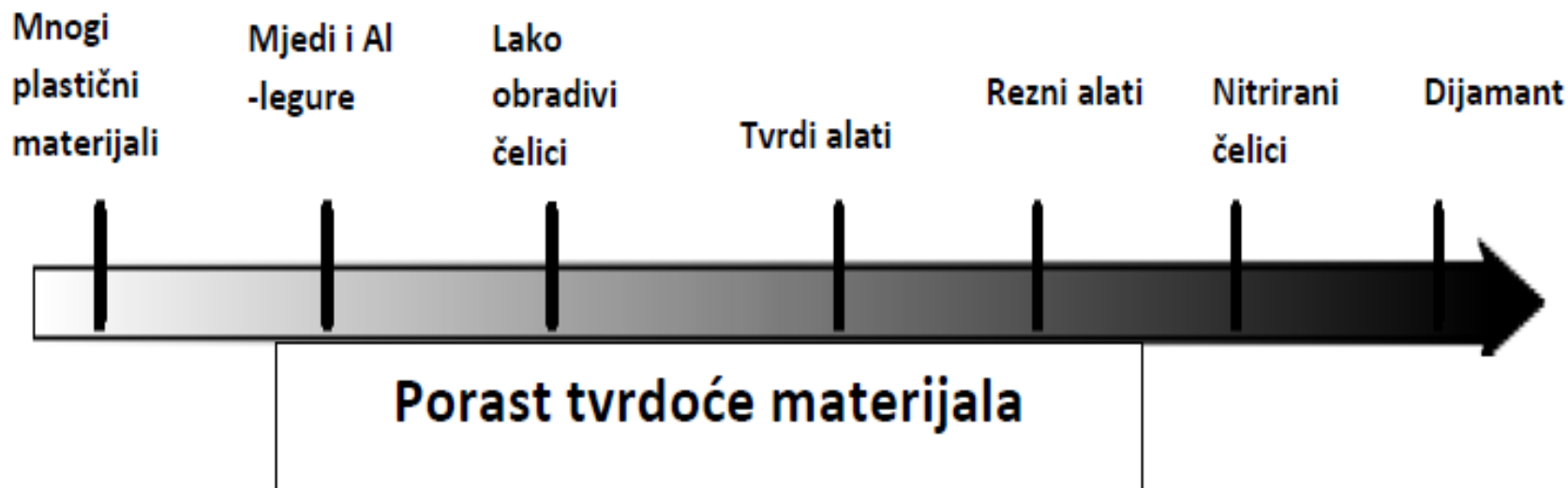
- Ispitivanje tvrdoće može se koristiti u mnogim inženjerskim primjenama za dobivanje osnovnih podataka o mehaničkim svojstvima materijala.
- Na primjer u inženjerstvu površina gdje se različitim postupcima poboljšava tvrdoća površine materijala, izratka.
- Važna je za metalurgiju praha, za kovane proizvode, za limove, ekstrudirane proizvode, toplinski i mehanički obrađene proizvode.



Nitirana površina (toplinski obrađena površina)
radi povećanja tvrdoće površine materijala

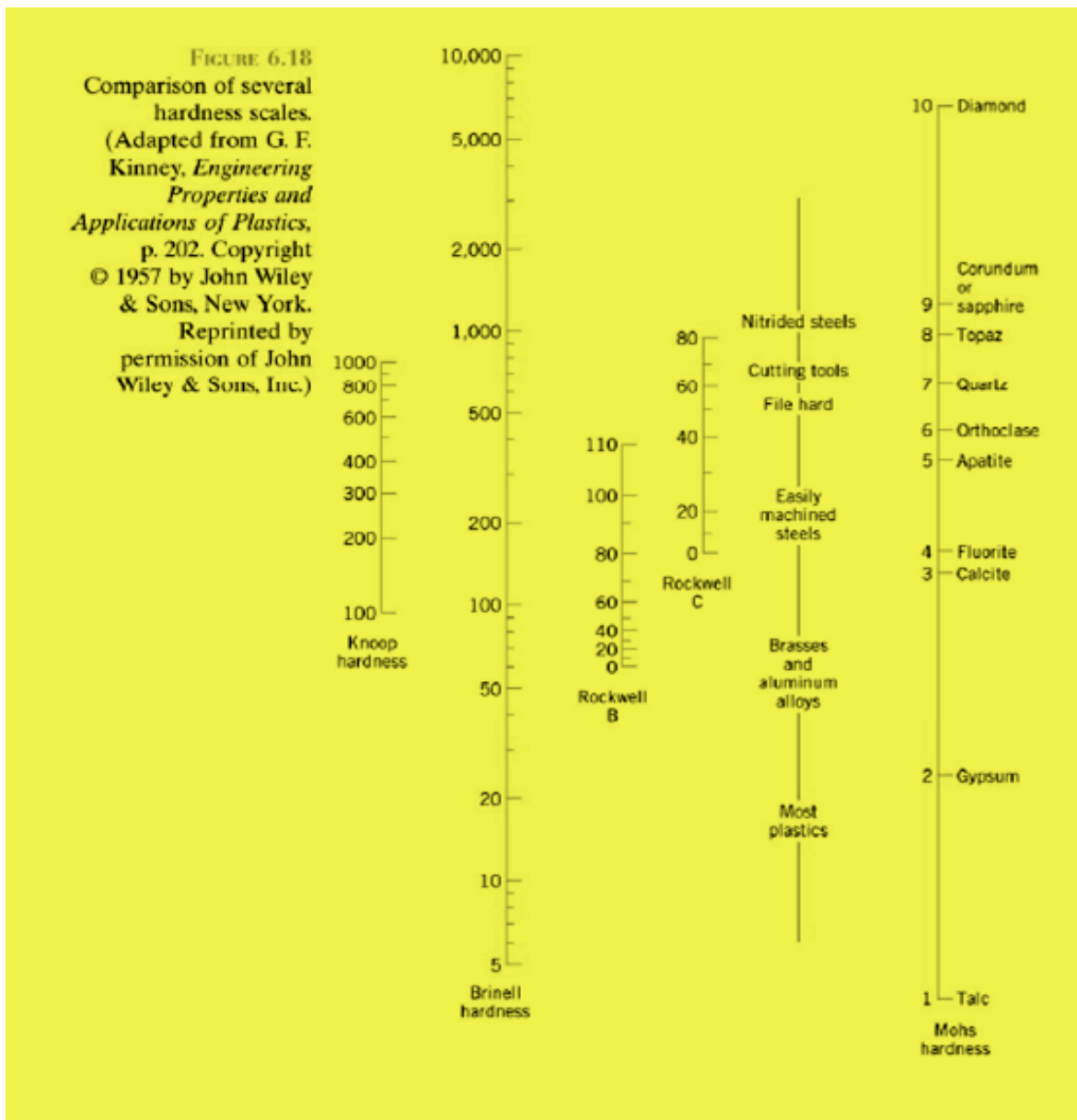


Variranje vrijednosti tvrdoće na zubu zupčanika



Adapted from Fig. 6.18, *Callister 6e*. (Fig. 6.18 is adapted from G.F. Kinney, *Engineering Properties and Applications of Plastics*, p. 202, John Wiley and Sons, 1957.)

Usporedba vrijednosti tvrdoće materijala s obzirom na metodu određivanja tvrdoće



- **Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju stranog tijela u njegovu površinu.**
- **Tvrdoća je otpor materijala ka plastičnoj deformaciji koji je uzrokovan prodiranju stranog tijela u njegovu površinu.**

Podjela metoda određivanja tvrdoće temelji se prema obliku i vrsti materijala penetratora.

ODREĐIVANJE TVRDOĆE MATERIJALA

STATIČKE METODE

Brinellova

Penetrator je čelična kuglica

Sila ispitivanja koja djeluje na penetrator postupno raste do maksimalne vrijednosti

Vickersova

Penetrator je četverostrana istostranična dijamantna piramida

Rockwellova

Penetratori su čelična kuglica ili dijamantni stožac

DINAMIČKE METODE

Poldyeva

Sila na penetratoru određuje se udarom

Obično su prenosivi uređaji

Shoreova

Tvrdoća se određuje na temelju elastičnog odskoka penetratora od površine koja se ispituje

BRINELLOVA METODA

Švedski znanstvenik dr. J. A. Brinell izumio je 1900. godine test za određivanje tvrdoće materijala, posebno metala.

To je najstariji test koji se i danas često koristi za određivanje tvrdoće kovanih i lijevanih proizvoda kod kojih je mikrostruktura materijala previše naglašena pa zbog toga nisu pogodne Rockwellova ili Vickersova metoda određivanja tvrdoće.

Brinellova metoda često se koristi za velike konstrukcijske dijelove.

Mijenjanjem sile pri testiranju i dimenzija čelične kuglice mogu se ispitati skoro svi metali Brinellovom metodom.

BRINELLOVA METODA

- **Koristi se za meke i srednje tvrde materijale.**
- **Penetrator je kuglica od kaljenog čelika** (za tvrdoće do 450 HB) ili od tvrdog metala (za tvrdoće do 650 HB) promjera D koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala.

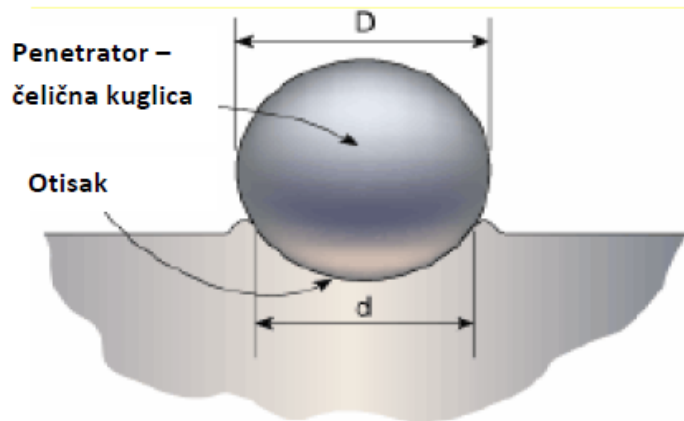
U ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kalote promjera baze d i dubine h .

Tvrdoća po Brinellu (oznaka HB) je omjer primijenjene sile F (N) i površine kalote otiska S (mm²):

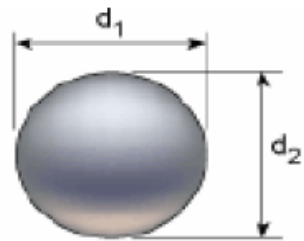
$$HB = \frac{F \cdot 0,102}{S} = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h}$$

- Brinellovom metodom **mjeri se promjer utisnute čelične kuglice, kalote d** (mm), a ne dubina prodiranja kuglice h :

$$HB = \frac{F \cdot 0,204}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



Utiskivanje penetratora po Brinellovoj metodi



Određivanje promjera otiska kojeg je penetrator ostavio na ispitivanom uzorku metala

Penetrator, indenter ili utiskivač



Prednosti Brinellove metode:

- jednostavna priprema površine
- lako mjerenje promjera otiska

Normirani promjeri čelične kuglice D su 10, 5, 2,5, 2 i 1 mm, a mjerenje vrijedi ako promjer otiska d iznosi od 0,25 do 0,6 D , pa u ovisnosti o tvrdoći materijala treba varirati i silu F .

Zbog toga je uveden stupanj opterećenja X :
$$X = \frac{F \cdot 0,102}{D^2}$$

Nedostaci Brinellove metode:

- ne mogu se mjeriti tvrdoće veće 650 HB
- tvrdoća je ovisna o opterećenju i prema X (stupnju opterećenja) potrebno je izabrati odgovarajuću silu F .

Primjer: 128 HB 5/250/15 - nakon mjerenja otisak je velik i ostavlja vidljiv trag

gdje su: 128 - iznos tvrdoće, 5 - D u mm, 250 - F u N pomnožena s 0,102 i 15 - vrijeme utiskivanja u s.

Vrijednosti stupnja opterećenja X za pojedine grupe metalnih materijala dane su u tablici:

Vrijednosti stupnja opterećenja X za pojedine grupe metalnih materijala:

| Stupanj opterećenja X | 30 | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 |
|-----------------------|--|------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Materijal | Fe-C legure Ti legure Ni-Co legure | Cu legure Ni legure | Al legure Mg legure Zn legure | ležajni materijali | Pb Sn bijela kovine |
| Trajanje opterećenja | od 10 do 15 s | | | | do 180 s |

VICKERSOVA METODA

- Metoda je slična Brinellovoj metodi. Razlika je u tome što je penetrator četverostrana istostranična dijamantna piramida s vršnim kutom 136° .
- Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj po Brinellu, a izračunava se po prema izrazu:

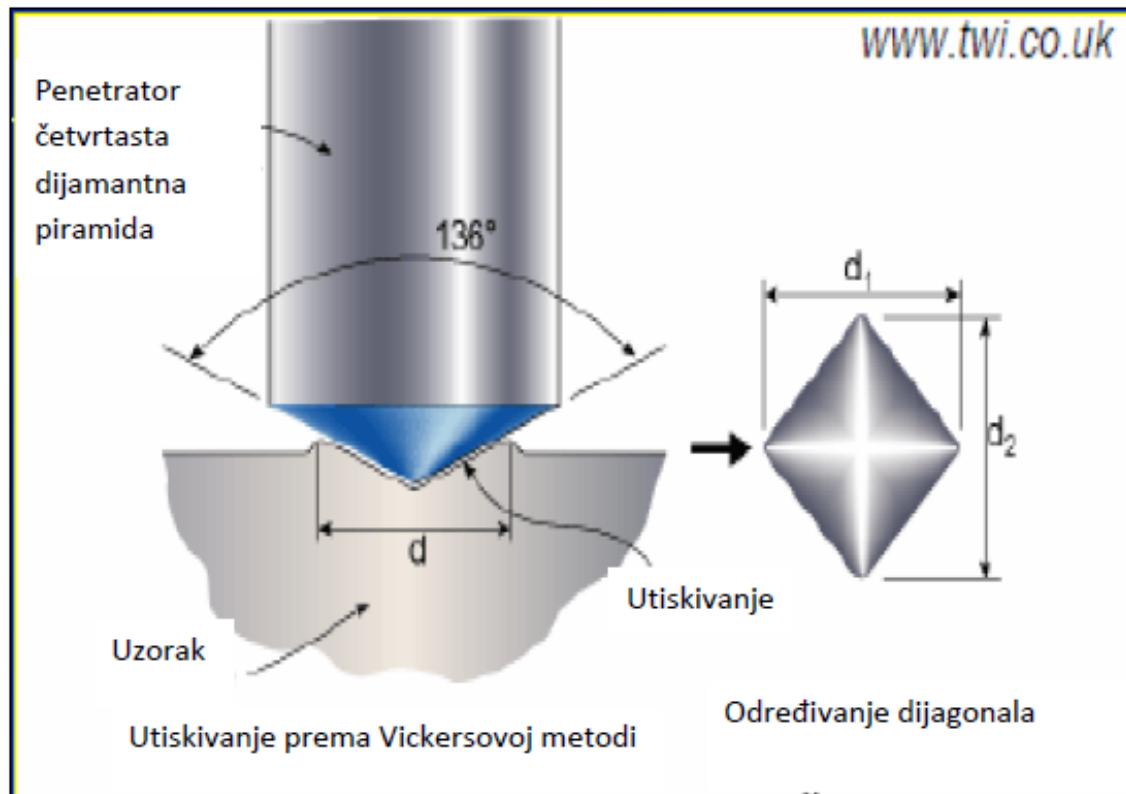
$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S}$$

- Kod Vickersove metode površina otisnuća se računa pomoću dijagonale $d = (d1 + d2) / 2(mm)$:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

- Ova metoda je univerzalna i primjenjuje se za tvrde i meke materijale.

Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja.



Shema određivanja tvrdoće prema Vickersovoj metodi

Trajanje opterećenja iznosi 10 do 15 s, a iznimno za mekane materijale može se produžiti.

Prednosti:

- univerzalna metoda
- moguće je mjerenje vrlo tankih i vrlo tvrdih materijala

Nedostaci:

- potrebna je posebna priprema ispitne površine
- potreban je mjerni mikroskop za očitavanje dijagonala otiska
- mogućnost loma dijamantne piramide.

Razine ispitnih sila Vickersove metode:

Smanjivanjem sile utiskivanja povećava se rasipanje rezultata, što je posebno izraženo kod ispitivanja mikrotvrdoće.

Primjer: **430 HV10** gdje su: 430 - iznos tvrdoće, 10 – ispitna sila F u N pomnožena s 0,102

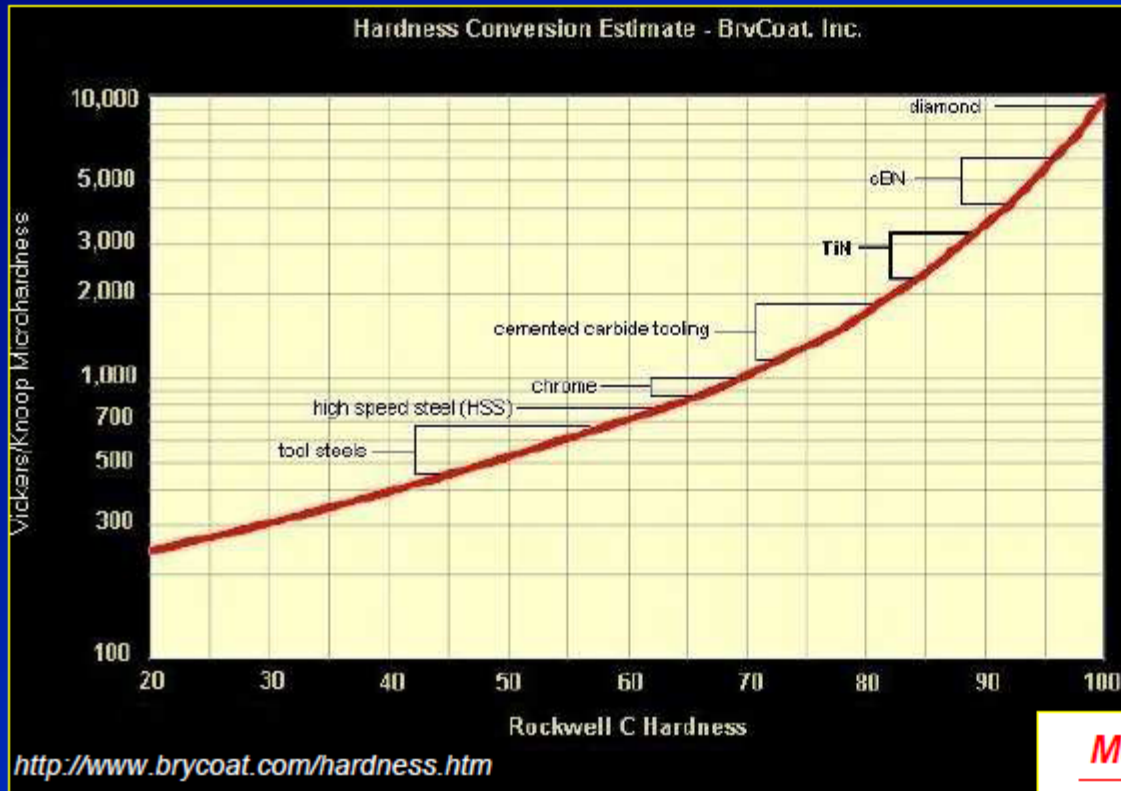
Razine ispitnih sila Vickersove metode

| Razina ispitnih sila F , N | Oznaka tvrdoće | Naziv | Tip mjerenja |
|---------------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|
| $49 \leq F < 980$ | $\geq HV5$ | Makrotvrdoća | Uopćena |
| $1,961 \leq F < 49$ | HV0,2 do $<HV5$ | Semimikrotvrdoća | Tanki uzorci |
| $0,098 \leq F < 1,961$ | HV0,01 do $<HV0,2$ | Mikrotvrdoća | Pojedinih faza u mikrostrukturi |



Uređaj za mjerenje
tvrdoće po Vickersovoj
metodi

Vickers hardness values of materials



| <i>Materials</i> | <i>H_v</i> |
|------------------|----------------------|
| Tin | 5 |
| Aluminium | 25 |
| Gold | 35 |
| Copper | 40 |
| Iron | 80 |
| Mild steel | 230 |
| Full hard steel | 1000 |
| Tungsten carbide | 2500 |



ROCKWELLOVA METODA

- Mjeri se dubina prodiranja penetratora.

Upotrebljava se više vrsta penetratora:

- **upotrebljava se čelična kuglica (HRB metoda)** za meke i srednje tvrde materijale (aluminij, meki čelik, Cu-legure i sl.)
- **upotrebljava se dijamantni stožac (HRC metoda)** za tvrde materijale

Kod ove metode se vrijednost tvrdoće očitava neposredno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja.

Trajanje jednog ispitivanja je 10 sekundi.

Dijamantni stožac ima vršni kut 120° i polumjer zaobljenja 0,2 mm, dok promjeri čeličnih kuglica iznose $1/16$ ", $1/8$ ", $1/4$ " i $1/2$ ". (" – inča)

ROCKWELLOVA HRB METODA

Rockwellova HRB - metoda koristi se za meke i srednje tvrde materijale (aluminij, meki čelik, Cu-legure i sl.)

Dubina prodiranja penetratora:

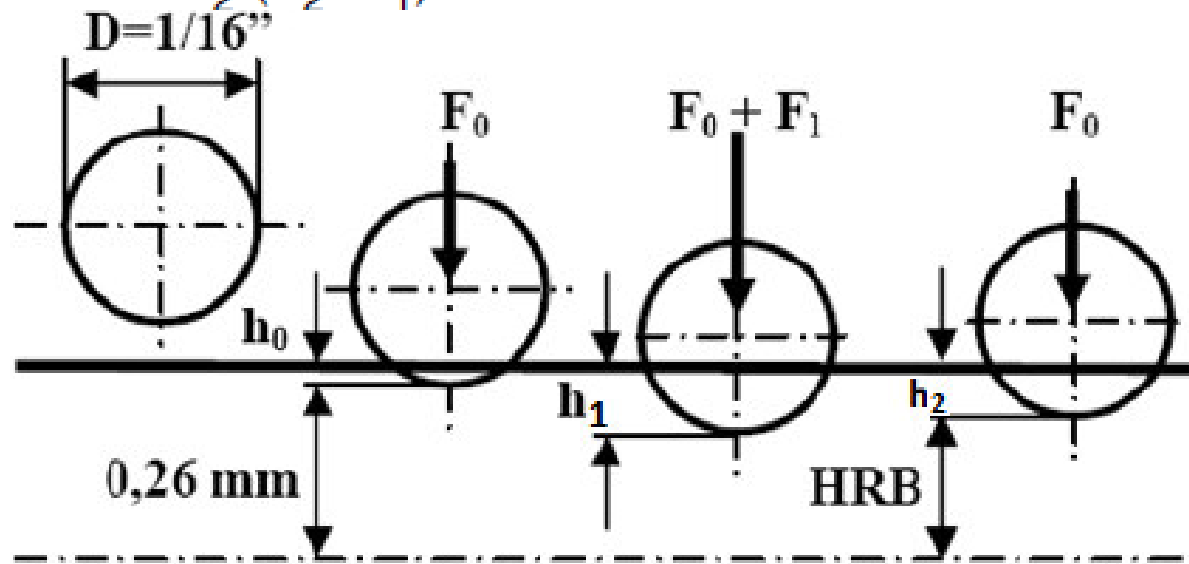
- Kod HRB metode ukupna moguća dubina prodiranja penetratora iznosi 0,26 mm i podijeljena je na 130 dijelova, pa Rockwellova jedinica za tvrdoću iznosi 0,002 mm.
- **Mjerno područje HRB-metode je od 35 do 100 HRB.**
- **Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:**

Prva faza – predopterećenje $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kp), penetrator (čelicna kuglica) prodire na dubinu h_0 koja predstavlja početni položaj za mjerenje dubine prodiranja.

Druga faza – glavno opterećenje $F_1 = 883 \text{ N}$ (90 kp) koje se dodaje na predopterećenje ($F_0 + F_1 = 981 \text{ N}$ (100 kp) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .

Treća faza - rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$).

dubini h_2 ($h_2 < h_1$).



Tvrdoća po HRB metodi određuje se po izrazu:

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

Mjerno područje HRB-metode je od 35 do 100 HRB.

ROCKWELLOVA HRC METODA

Rockwellova HRC - metoda koristi se za tvrde materijale (npr. toplinski obrađeni čelici).

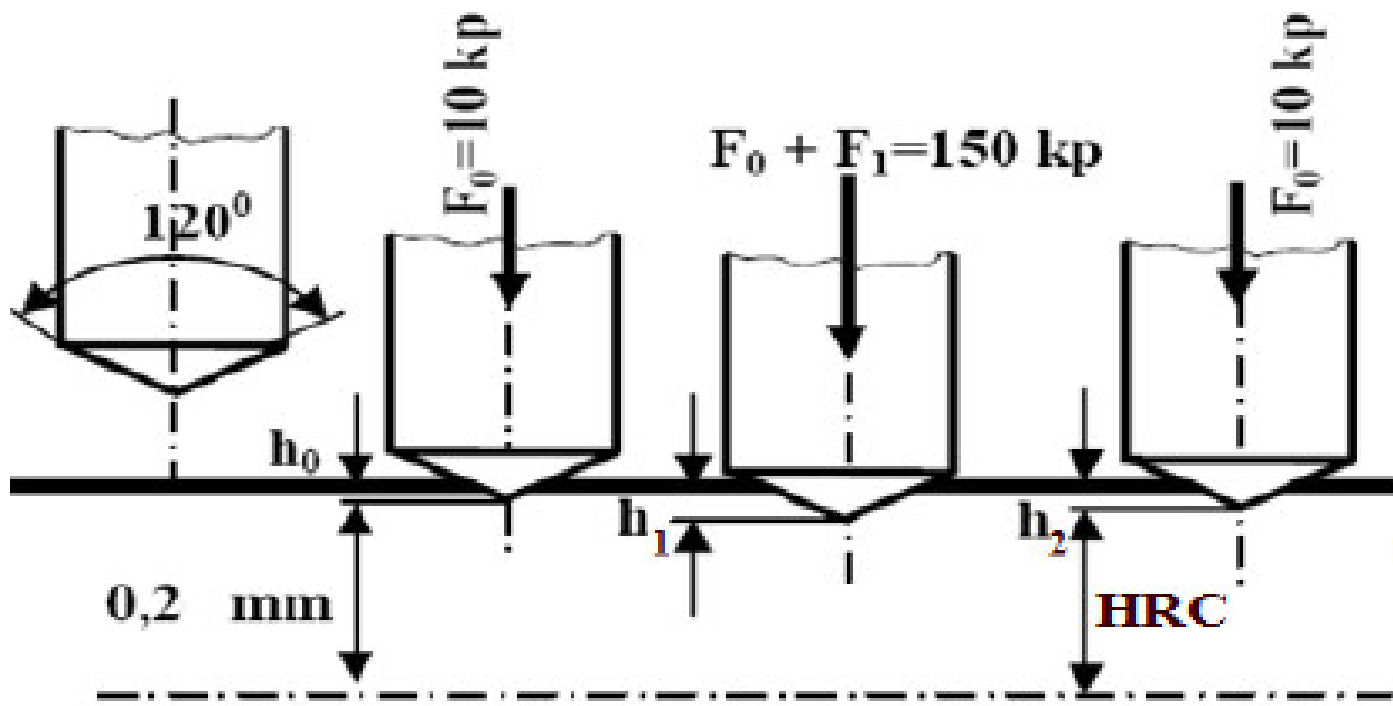
Penetrator je dijamantni stožac.

Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:

Prva faza – predopterećenje $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kp), penetrator (dijamantni stožac) prodire na dubinu h_0 tj. početni položaj mjerenja.

Druga faza – glavno opterećenje $F_1 = 1373 \text{ N}$ (140 kp) koje se dodaje napredopterećenje ($F_0 + F_1 = 1471 \text{ N}$ (150 kp)) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .

Treća faza - rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$).



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

Dubina prodiranja penetratora: $e = h_2 - h_0, mm$

Kod HRC metode ukupna moguća dubina prodiranja penetratora iznosi 0,2 mm i podijeljena je na 100 dijelova, pa Rockwellova jedinica za tvrdoću iznosi 0,002 mm.

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

HRC = – Mjerno područje HRC-metode je od 20 do 70 HRC.



Uređaj za mjerenje
tvrdoće po
Rockwellovoj metodi

ROCKWELLOVA METODA

Prednosti:

- veća brzina mjerenja tvrdoće
- neposredno očitavanje tvrdoće na uređaju
- plitak otisak

Nedostaci:

- mogućnost loma dijamantnog stošca
- nepreciznost ± 2 HRB/HRC.

Primjer: 98 HRB

gdje je: 98 - iznos tvrdoće izmjeren Rockwellovom HRB metodom

Primjer: 59 HRC

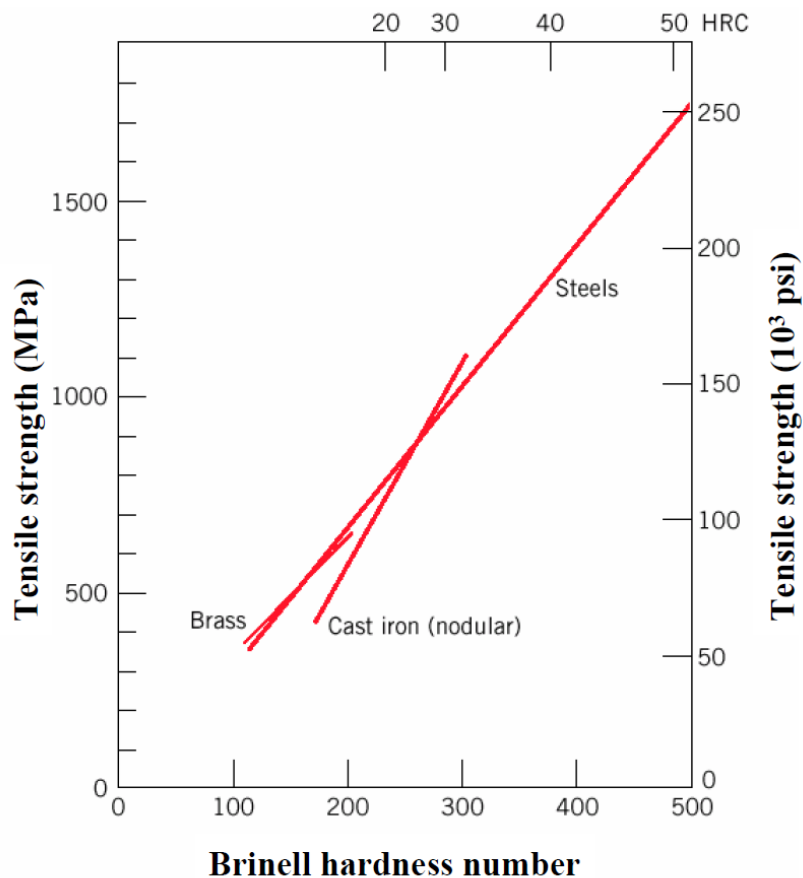
gdje je: 59 - iznos tvrdoće izmjeren Rockwellovom HRC metodom

**Prikaz različitih oznaka, vrste i dimenzija penetratora (indentera) s
obzirom na vrstu materijala kojima se određuje tvrdoća po
Rockwellovoj metodi**

| Scale symbol and prefix letter | Indenter | Total load (kg) | Dial Numerals | Typical applications of scales |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|--|
| A | Diamond cone | 60 | Black | Cemented carbides, thin steel, shallow depth case-hardened steel. |
| B | 1.588 mm dia. steel ball | 100 | Red | Copper alloys, soft steels, aluminium alloys, malleable iron. |
| C | Diamond cone | 150 | Black | Steel, hard cast iron, pearlitic malleable iron, high depth case-hardened steel. |
| D | Diamond cone | 100 | Black | Thin steel, medium depth case-hardened steel. |
| E | 3.175 mm dia. steel ball | 100 | Red | Cast iron, aluminium and magnesium alloys, bearing metals. |
| F | 1.588 mm dia. steel ball | 60 | Red | Annealed copper alloys, thin soft sheet metals. |
| G | 1.588 mm dia. steel ball | 150 | Red | Phosphor bronze, beryllium copper, malleable iron. |
| H | 3.175 mm dia. steel ball | 60 | Red | Aluminium, lead, zinc. |
| K | 3.175 mm dia. steel ball | 150 | Red | Soft bearing metals. |

Neke karakteristike metoda određivanja tvrdoće

| Type | Penetrator | Typical range of loads, kg | General hardness range covered | Surface preparation before testing | Typical applications |
|---------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|
| Rockwell C | Diamond cone | 150 | Medium to very hard | Fine grinding | Production testing of finished parts |
| Rockwell B | 1/16 inch steel ball | 100 | Soft to medium | Fine grinding | Production testing of finished parts |
| Brinell | 10 mm steel ball | 500-3000 | Soft to hard | Coarse grinding | Production testing of unfinished parts |
| Vickers | Diamond pyramid | 5-100 | Very soft to very hard | Fine grinding | Laboratory investigations |
| Microhardness | Diamond pyramid | 0.01-50 | Very soft to very hard | Fine polishing | Test of micro-constituents of alloys and ceramics |



I vlačna čvrstoća i tvrdoća materijala mogu se smatrati otpornošću materijala ka plastičnoj deformaciji.

Tvrdoća materijala proporcionalna je vlačnoj čvrstoći (konstanta proporcionalnosti je različita za različite materijale).

Usporedba tvrdoće i vlačne čvrstoće za čelike (steels), mjed (brass), lijevano željezo -nodularno (cast iron- nodular)

Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, pp. 36 and 461; and Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, Vol. 2, 9th edition, H. Baker (Managing Editor), American Society for Metals, 1979, p. 327.]

SHOREOVA METODA

- **Mjeri se elastični odskok probojca (durometar)** s čeličnim ili dijamantnim vrhom, određene mase, koji pada na ispitivani materijal s određene visine i kojem se mjeri visina odskoka.
- **Visina odskoka je proporcionalna tvrdoći materijala.**
- Ovaj postupak je pogodan za mjerenje tvrdoće plastike i guma (polimera i elastomera).
Pri mjerenju tvrdoće po Shoreu postoji nekoliko varijanti mjerenja u dinamičkim i statičkim uvjetima.
- Skala tvrdoće se kreće od 0 za materijale male tvrdoće kada se proboj u cijelosti utisne u uzorak, do 100 kada je dubina utiskivanja 0 ili nema nikakvog utiskivanja.

Ispitni uzorak treba biti deblji od 6 mm, promjera većeg od 30 mm.

VRSTE ISPITIVANJA TVRDOĆE PO SHOREU

- Postoji 12 vrsta mjerenja tvrdoće po Shoreu (A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOOS, R), od kojih su najčešće dvije: **Shore A** i **Shore D**.
- **Shore A** se koristi za mjerenje tvrdoće kod mekih plastika i guma
- **Shore D** se koristi kod tvrdih plastika i guma.
- Kod svih vrsta mjerenja skala tvrdoće se kreće od 0 za materijale male tvrdoće, kada probojac u cijelosti utisne uzorak, do 100 kada je dubina utiskivanja 0 ili nema nikakvog utiskivanja.



Prijenosni uređaj za
ispitivanje tvrdoće po
Shoreovoj metodi

Uobičajene vrijednosti tvrdoće za neke od materijala (Tvrdoća po Shoreu)

| Postupak | Vrijednost | Shore skala |
|---|------------|-------------|
| sjedalo bicikla | 15-30 | OO |
| žvakača guma | 20 | OO |
| Prigušivač vibracija (Sorbothane) | 40 | OO |
| Prigušivač vibracija (Sorbothane) | 30-70 | A |
| Elastične gumice za spajanje | 25 | A |
| Brtva na vratima | 55 | A |
| Žljebovi na automobilskim gumama | 70 | A |
| Meki kotači na dasci za kotuiranje | 78 | A |
| O-prsten za hidrauliku | 70-90 | A |
| Tvrđi kotači na dasci za koturanje | 98 | A |
| Ebonitna guma | 100 | A |
| Krute kamionske gume | 50 | D |
| Štitnik glave (kaciga) na gradilištu (HDPE) | 75 | D |



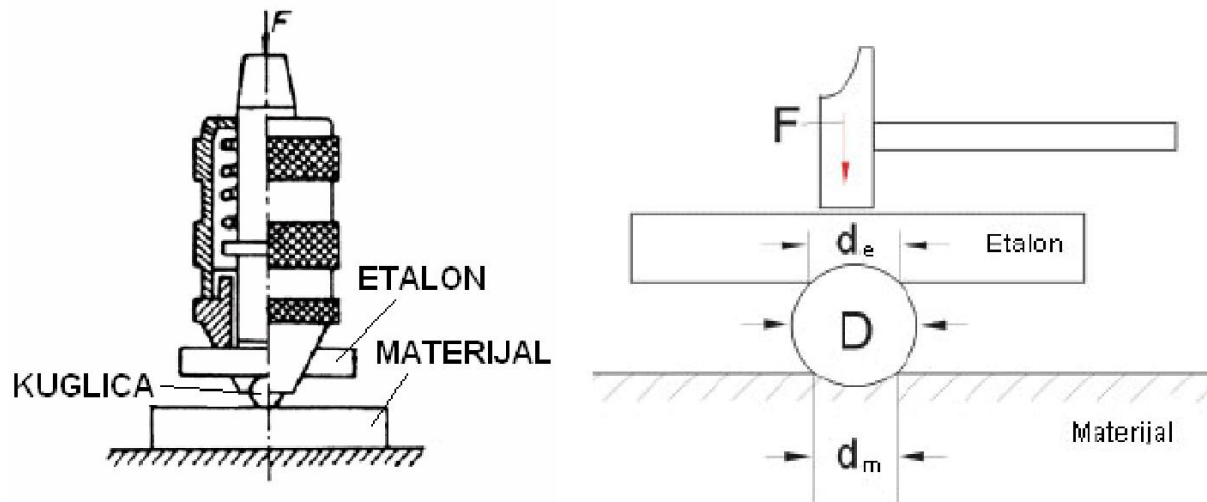
POLDYEVA METODA, HP

- Koristi se u slučajevima kada se ne može izvesti mjerenje tvrdoće statičkim metodama (npr. zbog nedostatka aparata, konstrukcijskih dijelova velikih dimenzija, kada je nekorisno razaranje uzorka i sl.).
- Rezultati dobiveni ovom metodom su za praksu zadovoljavajući.
- Mjerenje tvrdoće temelji se na udarnom djelovanju penetratora i omogućava izračunavanje tvrdoće slično tvrdoći po Brinellovoj-metodi.
- Poldyeva metoda je u principu modificirana Brinellova metoda.

Razlika vrijednosti tvrdoća po Brinell i Poldy metodi ne prelazi 2%.
Kod tvrdih materijala brojna vrijednost tvrdoće po Poldy metodi je veća, a za mekše materijale je manja.

- "Poldijev čekić" istodobno utiskuje penetrator u površinu ispitivane površine i etalon (šipku) poznate tvrdoće. Penetrator je čelična kuglica promjera $D=10$ mm.

- "Poldijev čekić" istodobno utiskuje penetrator u površinu ispitivanog materijala i etalon (šipku) poznate tvrdoće. Penetrator je čelična kuglica promjera $D=10$ mm.



Opis Poldyveve metode određivanja tvrdoće

Mjerenjem promjera otiska, pomoću lupe, određuje se tvrdoća ispitivanog predmeta pomoću tabela danih uz aparat.

Također, tvrdoća se može odrediti i analitički mjerenjem promjera otisaka kalote u materijalu i etalonu, na temelju poznate tvrdoće etalona (HBS), prema izrazu:

$$HP = HBS \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_e^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_m^2}}$$

gdje je:

HBS - etalona izmjerena po Brinellovoj metodi

D - promjer penetratora – čeleične kuglice, mm

d_e - promjer otiska u etalonu, mm

d_m - promjer otiska u ispitivanom materijalu, mm



Ispitivanje tvrdoće Poldyevom metodom

Čekić

Penetrator – čelična kuglica

Etalon –metalna šipka poznate
tvrdoće

Ispitivani materijal