

# Ispitivanje tvrdoće inženjerskih materijala

---

Pein, Marina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:627855>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Stručni studij**

**ISPITIVANJE TVRDOĆE INŽENJERSKIH MATERIJALA**

**Završni rad**

**Marina Pein**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju****Osijek, 19.09.2023.****Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Marina Pein
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	A 4624, 27.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	10806023881
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Dalibor Buljić, dipl. ing.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Doc. dr. sc. Venco Čorluka
<b>Naslov završnog rada:</b>	Ispitivanje tvrdoće inženjerskih materijala
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada</b>	
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	19.09.2023.

*Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:**Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.*

Datum:



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 10.10.2023.

Ime i prezime studenta:

Marina Pein

Studij:

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika

Mat. br. studenta, godina upisa:

A 4624, 27.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Ispitivanje tvrdoće inženjerskih materijala**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dalibor Buljić, dipl. ing.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1 Zadatak završnog rada</b> .....	1
<b>2. POVIJESNI RAZVOJ I OSNOVNE ZNAČAJKE ISPITIVANJA TVRDOĆE</b> .....	2
<b>2.1 Usporedba tvrdoće sa drugim mehaničkim svojstvima inženjerskih materijala</b> .....	4
<b>3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE</b> .....	6
<b>3.1 Brinellova metoda ispitivanja tvrdoće</b> .....	7
<b>3.1.1. Mjerna oprema za ispitivanje Brinellovom metodom</b> .....	8
<b>3.2 Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće</b> .....	9
<b>3.2.1. Mjerna oprema za ispitivanje Vickersovom metodom</b> .....	12
<b>3.3. Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće</b> .....	13
<b>3.3.1 Mjerna oprema za ispitivanje Rockwellovom metodom</b> .....	15
<b>3.4. Ispitivanje tvrdoće prijenosnim uređajima</b> .....	16
<b>3.4.1. Metoda ultrazvučne kontaktne impedancije</b> .....	16
<b>3.4.2. Metoda odskoka (DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20)</b> .....	17
<b>3.4.3. Optička metoda Through Indenter Viewing</b> .....	18
<b>4. ISPITIVANJE TVRDOĆE METALNIH MATERIJALA U LABORATORIJU</b> .....	20
<b>4.1. Ispitivanje tvrdoće materijala stacionarnim uređajem ISH-R150</b> .....	21
<b>4.2. Ispitivanje tvrdoće materijala prijenosnim uređajem dynaROCK II</b> .....	25
<b>4.3. Analiza ispitnih rezultata</b> .....	28
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	30
<b>LITERATURA</b> .....	31

# 1. UVOD

Po definiciji tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Ispitivanje tvrdoće je vjerojatno najčešće uporabljeno ispitivanje nekog mehaničkog svojstva. Tvrdoća se s inženjerskog aspekta može odnositi i na otpornost savijanju, prodiranju, abraziji ili rezanju. Na tvrdoću utječe atomska i molekularna struktura materijala, kao i njegov sastav i način vezivanja. Postoje različite ljestvice i metode koje se koriste za ispitivanje tvrdoće, a svaka je prikladna za različite vrste materijala i uvjete ispitivanja [1].

Inženjerski materijali imaju široku primjenu u području različitih grana industrije. Ovi materijali su odabrani ili dizajnirani s ciljem pružanja određenih svojstava koja su potrebna za specifične primjene.

Ispitivanja materijala imaju višestruku svrhu, osim što se provode kako bi se utvrdile svojstva materijala tijekom proizvodnje ili nabave, također se koriste za određivanje načina upotrebe te s ciljem poboljšanja njihovih karakteristika kako bi se omogućilo stvaranje novih materijala za nove proizvode ili područja primjene. Uz svakodnevni tehnički napredak, uvode se nove metode i unaprjeđuju postojeći postupci ispitivanja tvrdoće.

Uređaji za ispitivanje tvrdoće, poznati kao tvrdomjeri, su jednostavniji i jeftiniji od uređaja za ispitivanje drugih mehaničkih svojstava, kao što su kidalice i puzalice. Neke od najpoznatijih metoda ispitivanja tvrdoće su Brinellova, Vickersova i Rockwellova.

## 1.1 Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je prikazati i objasniti metode ispitivanja tvrdoće inženjerskih materijala, analizirati njihovu primjenu i usporediti različite pristupe u određivanju tvrdoće. Uz to, naglasak će biti stavljen na razumijevanje prednosti i ograničenja svake metode ispitivanja tvrdoće, kao i na važnost pravilne pripreme uzoraka i preciznosti mjerenja.

## 2. POVIJESNI RAZVOJ I OSNOVNE ZNAČAJKE ISPITIVANJA TVRDOĆE

Povijesni razvoj mjerenja tvrdoće u inženjerskoj praksi razvijao se tijekom vremena kako je potreba za procjenom svojstava materijala postajala sve važnija. U davna vremena tvrdoća se kvalitativno procjenjivala grebanjem jednog materijala o drugi. Ova subjektivna metoda omogućila je osnovno razumijevanje relativne tvrdoće, ali joj je nedostajala standardizacija.

Mjerenje tvrdoće prvi se puta pojavljuje 1722. godine u obliku ispitivanja minerala testom zarezom. Kasnije se pojavljuje Mohsova ljestvica koja se sastoji od deset minerala prikazanih u tablici 2.1. poredanih od najtvrđeg dijamanta do najmekšeg talka. Svaki mineral može ogrebat i one koji se nalaze ispod njega u hijerarhiji ljestvice. Mohsova ljestvica nije linearna; razlika u tvrdoći između 9 i 10 znatno je veća od one između 1 i 2. Iako nije bila tehnika kvantitativnog mjerenja, odigrala je značajnu ulogu u klasifikaciji i usporedbi tvrdoće različitih minerala i materijala [2].

Tab. 2.1. Mohsova ljestvica tvrdoće

Mohsova tvrdoća	Mineral
1	Talk [ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ]
2	Gips ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )
3	Kalcit ( $CaCO_3$ )
4	Fluorit ( $CaF_2$ )
5	Apatit [ $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ ]
6	Ortoklas ( $KAlSi_3O_8$ )
7	Kvarc ( $SiO_2$ )
8	Topaz [ $Al_2SiO_4(OH, F)_2$ ]
9	Korund ( $Al_2O_3$ )
10	Dijamant (C)

Mohsova metoda ispitivanja tvrdoće koristila se gotovo do kraja 19. stoljeća. Kada je došlo do rasta industrije i sve veće potrebe za ispitivanjem tvrdoće, 1912. godine, Johan August Brinell je iznio svoju metodu ispitivanja tvrdoće pomoću kuglice određenog promjera. Koristeći promjer kuglice i veličinu otiska, Brinell je vrlo brzo mogao odrediti tvrdoću materijala pa je njegova metoda često korištena u industriji.

Stanley Rockwell je 1914. godine predstavlja svoju metodu koja je omogućavala ispitivanje tvrdoće toplinski obrađenih materijala. Određivanje tvrdoće materijala prema Rockwell metodi temeljilo se na dvije ključne varijable: prva je bila ovisna o stupnju opterećenja, dok je druga bila definirana oblikom i dimenzijama samog indentora. Godine 1921., Rockwell je unaprijedio ovu tehniku zamijenivši kaljeni kuglični indentor dijamantnim stošcem. Ova promjena omogućila je preciznije mjerenje tvrdoće, čak i za najtvrde materijale.

Tijekom godina napredak u tehnologiji i materijalima doveo je do razvoja specijaliziranih metoda ispitivanja tvrdoće. To uključuje ispitivanje mikro tvrdoće, koje koristi niža opterećenja i manje indente za mjerenje tvrdoće tankih slojeva i pojedinih mikrostruktura, te prijenosne uređaje za ispitivanje tvrdoće koji omogućuju mjerenja na licu mjesta.

Danas se metode ispitivanja tvrdoće nastavljaju razvijati i poboljšavati, uključujući napredne instrumente, automatizaciju i računalnu analizu podataka. Ova poboljšanja omogućuju točnija i pouzdanija mjerenja tvrdoće za širok raspon materijala, pridonoseći kontroli kvalitete, odabiru materijala i razumijevanju ponašanja materijala u različitim inženjerskim primjenama.

Radi potrebe za usporedbom izmjerenih karakteristika i performansi koriste se standardizirane metode ispitivanja tvrdoće. Neke od njih su ASTM i one koje je razvila Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO). Ovi standardi propisuju način na koji će se uzorak pripremiti i ispitati. Također postoje standardi koji definiraju terminologiju i nomenklatura kao i klasifikacijske i specifikacijske sheme.



## 2.1 Usporedba tvrdoće sa drugim mehaničkim svojstvima inženjerskih materijala

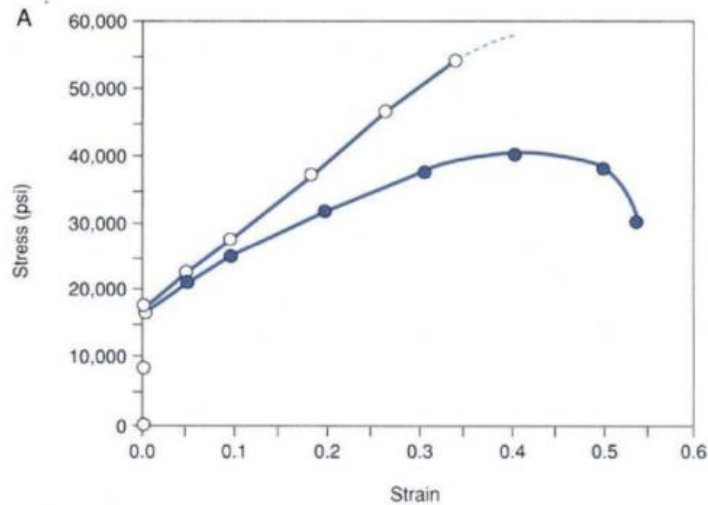
Mehanička svojstva materijala upotrebljavaju se u svrhu razlikovanja vrste materijala te za njihovu pravilnu primjenu. Za mehanička svojstva zaslužna su prije svega fizikalna načela kao što su tlak koji govori kolika sila djeluje na neku površinu i naprezanje koje se definira kao opiranje tijela djelovanju opterećenja koje dovodi do privremene ili trajne promjene oblika tijela. Nепрепозnavanje potencijalne važnosti ovih načela može dovesti do lošeg dizajna materijala te katastrofalnih posljedica na rad sustava u kojima se materijali upotrebljavaju stoga je potrebno sagledati međusobne odnose različitih mehaničkih svojstava [3].

Čvrstoća se odnosi na sposobnost materijala da izdrži primijenjeno opterećenje bez plastične deformacije ili kvara. Obično se iskazuje preko značajki kao što su vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća ili granica tečenja. Tvrdoća i čvrstoća su povezana, ali različita svojstva. Dok tvrdi materijali obično imaju visoku čvrstoću, postoje slučajevi u kojima materijali mogu biti tvrdi, ali ne nužno i čvrsti ili obrnuto.

Žilavost je mjera sposobnosti materijala da apsorbira energiju i plastično se deformira prije loma. Kombinira snagu i rastezljivost. Dok se tvrdoća primarno usredotočuje na otpornost na udubljenje ili grebanje, žilavost uzima u obzir sposobnost materijala da se odupre lomu pri udaru ili dinamičkom opterećenju.

Elastičnost se odnosi na sposobnost materijala da povрати svoj izvorni oblik nakon deformacije kada se ukloni primijenjeno opterećenje. Materijali visoke elastičnosti pokazuju minimalnu trajnu deformaciju. Tvrdoća ne označava izravno elastičnost materijala, ali može neizravno utjecati na nju. Tvrdi materijali obično su lomljiviji i imaju manju elastičnost u usporedbi s mekšim, rastezljivijim materijalima.

Suprotno od elastičnih svojstava su plastična svojstva čvrstih materijala da mogu pod utjecajem opterećenja doživjeti trajne deformacije i nakon što se opterećenje ukloni, zadržati te deformacije gotovo u potpunosti. Plastičnost se obično javlja u većini konstrukcijskih materijala kada su izloženi visokim naprezanjima (iznad granice tečenja), pod povišenom temperaturom ili pod dugotrajnim opterećenjem. Slika 2.1. prikazuje plastičnu deformaciju metala u ovisnosti o porastu naprezanja [4].



### SI.2.1. Plastična deformacija metala pri naprežanju

Duktilnost opisuje opseg do kojeg materijal može proći plastičnu deformaciju bez loma. Duktilni materijali mogu se izdužiti ili izvući u žice bez lomljenja. Tvrdoća i duktilnost često su obrnuto povezane, budući da su tvrdi materijali manje duktilni i lomljiviji. Međutim, mogu postojati iznimke gdje materijali pokazuju i visoku tvrdoću i značajnu duktilnost.

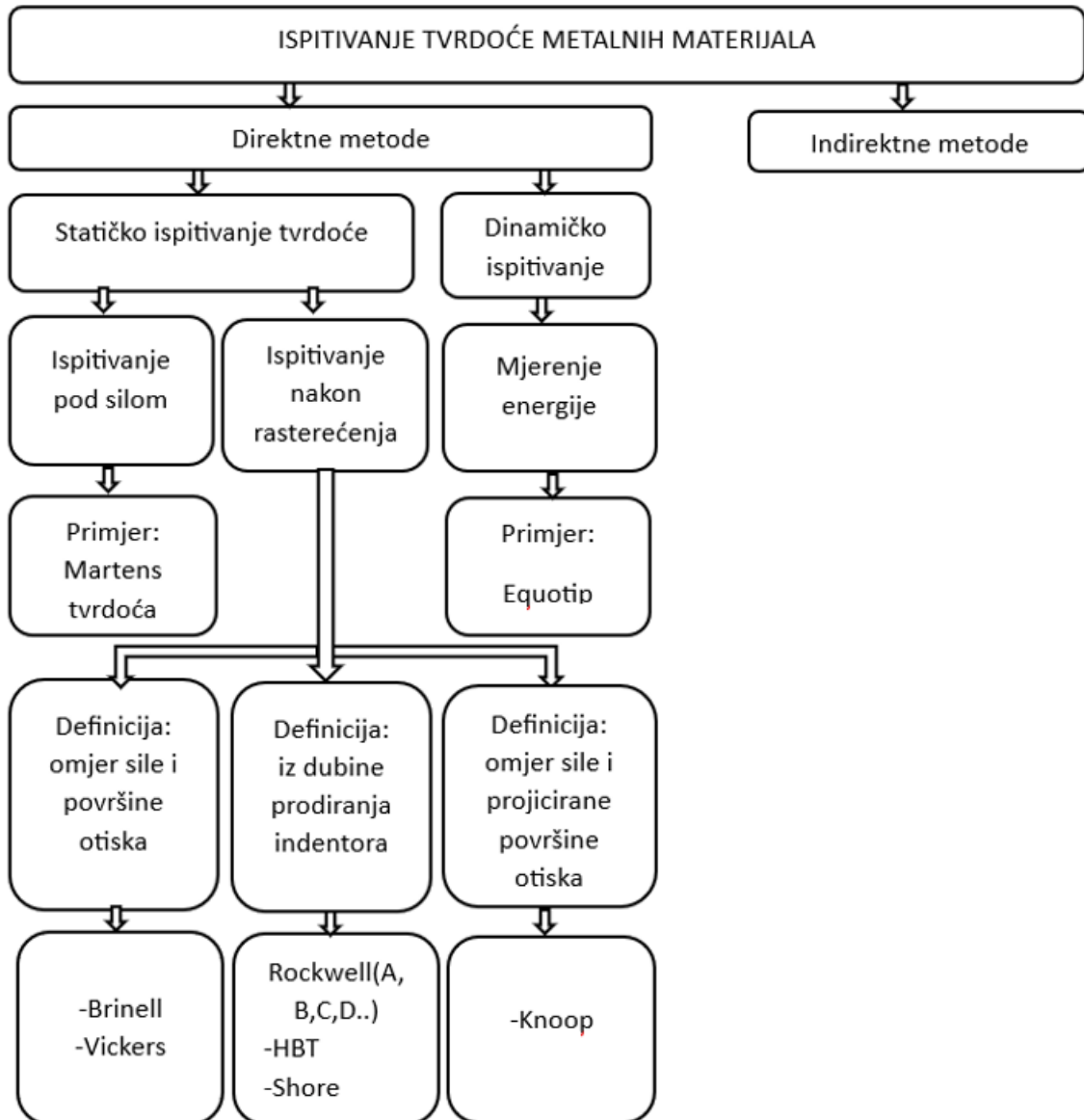
Otpornost na umor odnosi se na sposobnost materijala da se odupre oštećenju ili kvaru pod cikličkim opterećenjem. To je ključno za materijale koji su izloženi opetovanim naprežanjima, kao što su komponente izložene izmjeničnim opterećenjima ili vibracijama. Dok tvrdoća može neizravno utjecati na otpornost na zamor utječući na čimbenike poput početka i širenja pukotine, specifična svojstva zamora određuju se kroz namjensko ispitivanje zamora. Zamor može dovesti do katastrofalnog loma ako njegovi učinci nisu pretpostavljeni u projektiranju inženjerskih konstrukcija i komponenti.

Otpornost na puzanje mjeri sposobnost materijala da se odupre deformaciji pod kontinuiranim naprežanjem ili opterećenjem tijekom vremena, osobito na visokim temperaturama. Tvrdi materijali mogu pokazivati dobru otpornost na puzanje zbog svoje stabilne atomske strukture, sprječavajući ili usporavajući proces puzanja.

Odnosi između ovih mehaničkih svojstava mogu varirati ovisno o sastavu materijala, mikrostrukturi i metodama obrade. Inženjeri i znanstvenici razmatraju kombinaciju ovih svojstava kako bi odabrali materijale prikladne za specifične primjene, uzimajući u obzir faktore kao što su nosivost, otpornost na trošenje, uvjeti okoline i zahtjevi proizvodnje.

### 3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

Razne su metode ispitivanja tvrdoće ovisno o materijalu koji se ispituje. Slika 3.1. prikazuje podjelu metoda ispitivanja materijala na direktne i indirektne te podjelu direktnih metoda na statičke i dinamičke kao i njihovu praktičnu primjenu.



Sl. 3.1. Podjela metoda ispitivanja tvrdoće metalnih materijala

### 3.1 Brinellova metoda ispitivanja tvrdoće

Brinellova metoda široko je korištena metoda za ispitivanje tvrdoće materijala, posebice metala. Uključuje primjenu poznatog opterećenja na površinu materijala pomoću kuglice od kaljenog čelika i mjerenje promjera nastalog udubljenja. Kao rezultat uzima se prosječna vrijednost koja je rezultat barem dvaju mjerenja.

Na temelju materijala koji se ispituje potrebno je odabrati odgovarajuće opterećenje i veličinu indentora. Indentori za ispitivanje tvrdoće po Brinellu izrađene su od kaljenog čelika čija tvrdoća iznosi 450 HB ili od tvrdog metala s tvrdoćom do 650 HB. Uređaj za mjerenje tvrdoće Brinellovom metodom primjenjuje različite sile utiskivanja, koje se kreću od 980,7 N do 29420 N, ovisno o svojstvima ispitivanog materijala i promjeru kuglice koja se koristi za utiskivanje.

Površina kuglice mora biti polirana. Materijali čija je tvrdoća veća od 650 HB se ne preporučuju za ispitivanje po Brinellovom postupku kako bi se izbjegli pogrešni rezultati. Potrebno je osigurati stabilnu podlogu na koju će se postaviti uzorak koji se ispituje, kako bi se osiguralo pravilno usmjeravanje sile utiskivanja [5].

Teorijski Brinellova tvrdoća izračunava se pomoću formule:

$$HB = \frac{0,102F \cdot 2}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3-1)$$

Gdje je:

D= promjer kuglice

d=promjer otiska (kalote)

F=opterećenje

Faktor opterećenja izračunava se pomoću formule:

$$n = \frac{F \cdot 0,102}{D^2} \quad (3-2)$$

### 3.1.1. Mjerna oprema za ispitivanje Brinellovom metodom

Uređaj za ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom sastoji se od poluge, utega i hidrauličkog mehanizma. Ispitni materijal se postavlja na vertikalno podesivo postolje prikazano na slici 3.2. Pomoću poluge kuglica pritiska materijal s unaprijed određenom silom koja se može očitati na ekranu.

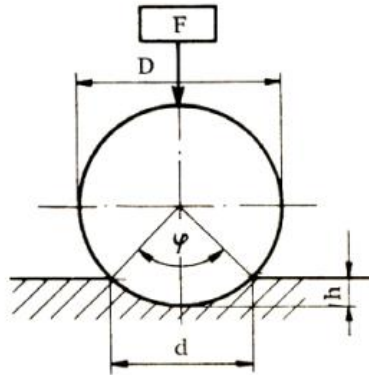


Sl. 3.2. Brinellov uređaj za ispitivanje tvrdoće

Vertikalno podesivo postolje je ravna, kruta površina na koju se stavlja uzorak materijala tijekom ispitivanja tvrdoće. Pruža podršku i stabilnost tijekom ispitivanja.

Nakon obavljenog testa, udubljenje se mjeri pomoću optičkog sustava. Mjeri se promjer udubljenja koji se koristi za izračunavanje Brinellove tvrdoće. Opterećenje se zadržava određeno vrijeme kako bi se osigurala odgovarajuća dubina udubljenja. Nakon vremena zadržavanja, opterećenje se uklanja i mjeri se promjer otiska u materijalu.

Za Brinellovo ispitivanje tvrdoće koriste se četiri različite veličine indentora (kuglica) koje imaju promjer od 1 mm, 2,5 mm, 5 mm i 10 mm. Na slici 3.3. prikazana je kuglica određenog promjera  $D$  te promjer otisaka  $d$  koji ona ostavlja u materijalu nad kojim se provodi ispitivanje [6].



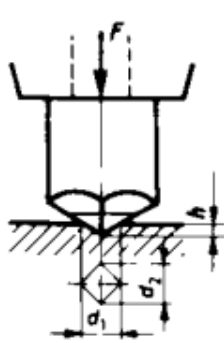
Sl. 3.3. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće Brinell metodom

Opterećenje na uzorku treba održavati točno određeno vrijeme. Udubljenja moraju biti postavljena tako da zadrže dovoljan razmak od ruba uzorka i između pojedinačnih udubljenja. Ova metoda ima širok raspon mjerenja zahvaljujući dostupnosti niza veličina utiskivača i opterećenja.

### 3.2 Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće

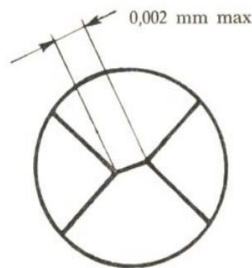
Metoda ispitivanja tvrdoće po Vickersu provodi se primjenom opterećenja na površinu materijala pomoću dijamantnog indentora piramidalnog oblika. Zbog malog udubljenja koje stvara njime se mogu ispitivati vrlo tanki materijali kao što su folije, mali dijelovi i male površine. Ovom metodom može se ispitivati tvrdoća gotovo svih vrsta materijala kao što su keramika, metali i kompoziti.

Ispitivanje se provodi korištenjem dijamantne četverostrane piramide čije suprotne strane zatvaraju kut od  $136^{\circ} \pm 30'$  kako bi se osiguralo da otisci budu geometrijski slični, bez obzira na primijenjeno opterećenje. Kada se primijeni sila  $F$  na ispitni uzorak, piramida ostavlja otisak u obliku šuplje piramide, s kvadratnom bazom čija su dijagonala označena kao  $d_1$  i  $d_2$ , kako je prikazano na slici 3.4.



Sl. 3.4. Otisak utiskivača pri određenoj sili u materijalu

Sve četiri strane piramide moraju naginjati prema jednoj točki, što znači da udaljenost između dviju suprotnih strana ne smije premašiti 0,002 mm, kako je prikazano na slici 3.5. Indentor također zahtijeva temeljno poliranje i mora biti bez ikakvih površinskih grešaka.



Sl.3.5.Pravilan izgled otiska

Teorijski tvrdoća po Vickersu računa se prema formuli:

$$HV = \frac{0,102 \cdot F}{\frac{d^2}{2 \cos 22}} = \frac{1,89 \cdot F}{d^2} \quad (3-4)$$

Gdje je:

$F$ = opterećenje

$d$ = srednja vrijednost dijagonale otiska u mm

Raspon opterećenja za ispitivanje tvrdoće po Vickersu varira ovisno o tvrdoći materijala. Standardne vrijednosti primijenjene sile kod Vickersove metode variraju od 49,03 do 980,7 N, no koriste se i manja opterećenja.

Prije mjerenja treba zadovoljiti nekoliko uvjeta, a jedan od tih uvjeta je imati ravnu i glatku površinu uzorka za točno mjerenje i precizno utiskivanje. Kada se opterećenje primijeni na ispitni uzorak dopušteno vrijeme utiskivanja je od 10 do 15 sekundi. Kada istekne vrijeme za utiskivanje, opterećenje se uklanja te se izračunavaju dimenzije udubljenja. Što je udubljenje manje, veća je mogućnost pogreške i obrnuto.

Za ispitivanje čelika koristi se u pravilu opterećenje do 294 N. Za ispitivanje bakra i njegovih legura koristi se sila od 24,5 N do 49 N. Laki metali i njihove legure opterećuju se silom od 147,15 N. Vickersova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina koja se označava kao HV.

Pored tvrdoće, također se bilježi i upotrijebljena sila za utiskivanje. Na primjer, oznaka 640 HV10 znači da je vrijednost izmjerene tvrdoće 640 HV, a indenter je koristio silu od  $10 \cdot 9,81$  [N] tijekom razdoblja od 10 do 15 sekundi. Ako se vrijeme utiskivanja produži, to se također evidentira u oznaci. Primjer, oznaka 28 HV1/30 označava izmjerenu tvrdoću od 28 HV, primijenjenu silu za utiskivanje od  $1 \cdot 9,81$  N, i trajanje utiskivanja od 30 sekundi.

Pri ispitivanju tankih limova, nitriranih i cementiranih dijelova koriste se manja opterećenja kako bi se dobili otisci manjih dubina. Kako bi se odredila tvrdoća potrebno je napraviti tri otiska i naći srednju vrijednost.

Mjerenje Vickersove tvrdoće provodi se pri temperaturama od 10°C do 35°C. Međutim, optimalni uvjeti ispitivanja nalažu da temperatura bude unutar raspona od  $23 \pm 5$ °C.

Prednosti Vickersove metode su univerzalno utiskivanje, zbog univerzalnog oblika utiskivača potrebno je manje vremena za kalibraciju. Prednost je i to što ispitani materijal nije potpuno oštećen nakon ispitivanja, stoga se može koristiti u druge svrhe. Također ima širok raspon primjene, Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće prikladna je za mjerenje tvrdih materijala poput metala, kao i za mjerenje mekših materijala poput polimera Još jedna od prednosti je i otpornost dijamanta na deformaciju zbog čega indentori ne trebaju zamjenu. Vickersov test tvrdoće pruža precizno i točno mjerenje tvrdoće, posebno za lomljive materijale, tanke premaze i mikrostrukture.



Nedostaci ove metode su potreba za detaljnom pripremom površine koja će se ispitivati kao i potreba za mjernim mikroskopom za veličinu otiska u materijalu. Obično se koristi u istraživanju materijala, kontroli kvalitete i karakterizaciji mikrostruktura.

Na Vickersovu vrijednost tvrdoće utječu čimbenici kao što su primijenjeno opterećenje, geometrija indentora i veličina udubljenja, što treba navesti prilikom izvještavanja o rezultatima ispitivanja.

### 3.2.1. Mjerna oprema za ispitivanje Vickersovom metodom

Osnovni dijelovi tvrdomjera za ispitivanje Vickersovom metodom obuhvaćaju mehanizam za primjenu odgovarajuće sile opterećenja, otvor za kameru i modul za mjerenje veličine otiska. Rezultati mjerenja prikazuju se na zaslonu s tipkovnicom prikazano na slici 3.6.



Sl.3.6. Vickersov uređaj za ispitivanje tvrdoće [7]

Kada je riječ o prijenosu opterećenja na indenter, sustavi opterećivanja pomoću utega to čine to na dva različita načina: direktnim postavljanjem utega i putem polužnog sustava koji koristi utege. Sustav za primjenu opterećenja mora konstantno održavati precizne vrijednosti sile.

Kod Vickersove metode, za mjerenje veličine otiska koriste se posebni mjerni mikroskopi visoke rezolucije koji omogućuju vrlo precizna mjerenja posebno kada se radi o ispitivanju mikrotvrdoće ili nanotvrdoće.

### 3.3. Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće

Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće mjeri dubinu prodiranja utiskivača u materijal pod određenim opterećenjem. Vrijednost tvrdoće po Rockwellu određuje se na temelju dubine prodiranja utiskivača i korištene ljestvice tvrdoće. Površina uzorka, usprkos pažljivoj obradi, sadrži nepravilnosti koje mogu imati utjecaj na rezultate ispitivanja. Zbog toga se za utvrđivanje Rockwellove tvrdoće koristi razlika između dvije dubine koje su nastale primjenom različitih sila prilikom utiskivanja. Oblik i dimenzija indentora značajno utječu na vrijednosti Rockwellove tvrdoće. Postupci ispitivanja Rockwellovom metodom prikazani su u tablici 3.1 [1].

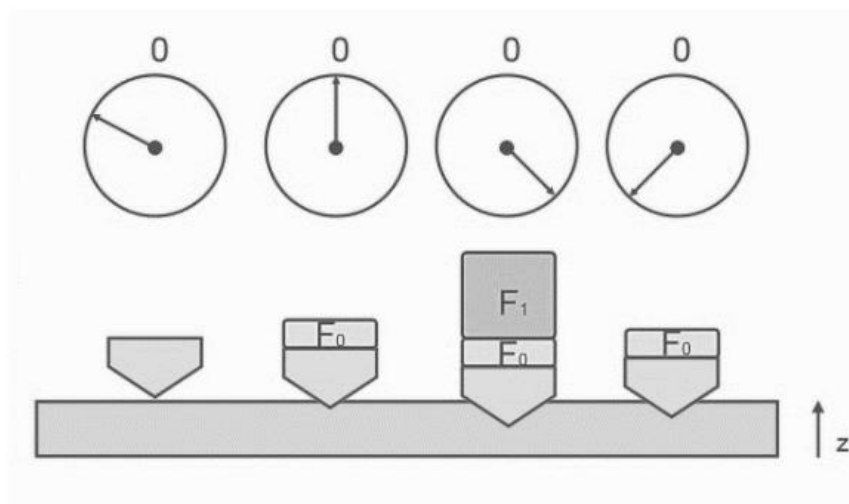
Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće ima različite ljestvice, kao što su Rockwell HRC postupak ispitivanja dijamantnim stošcem koje se upotrebljava za kaljeni čelik i slitine. Drugi postupak je HRB koji se upotrebljava za nekaljeni čelik.

Tab 3.1. Ispitivanje tvrdoće Rockwellovom metodom

Metoda	C	A	B	F
Oblik indentora	Stožac s kutem od 120°	Stožac s kutem od 120°	Kuglica promjera 1,5875 mm	Kuglica promjera 1,5875 mm
Vrsta indentora	Dijamant	Dijamant	Kaljeni čelik	Kaljeni čelik
<i>FO</i> , N	98	98	98	98
<i>FI</i> , N	1471	588	980	588
Maks.dubina prodiranja	0,200	0,200	0,260	0,260
Oznaka tvrdoće	HRC	HRA	HRB	HRF
Utvrđivanje tvrdoće	100-e	100-e	130-e	130-e
Područje mjerenja	20-70 HRC	60-88 HRA	35-100 HRB	60-100 HRF
Primjena	Toplinski obrađeni čelici	Vrlo tvrdi materijali (tvrdi metal)	Čelici, Cu-legure	Hladno valjani limovi od čelika i Cu-legura

U procesu ispitivanja tvrdoće materijala, koristi se dijamantni indentor u obliku stošca koji se prislanja na površinu uzorka uz primjenu pred opterećenja početnom silom  $F_0$ . Nakon malog utiska, pozicija mjerača dubine se postavlja u početni položaj. Zatim se postupno, bez udara, tijekom 1 do 8 sekundi, primjenjuje dodatno opterećenje  $F_1$  nakon prethodne primjene sile  $F_0$ , što čini ukupno ispitno opterećenje  $F$ . Indentor je potrebno je zadržati u krajnjoj točki  $4 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ . U slučaju tvrdih materijala, indentacija se gotovo trenutačno događa, dok kod mekših materijala može biti potrebno nekoliko sekundi.

Cijeli proces može se pratiti putem indikatora na uređaju. Kada se indikator stabilizira, postupno se oslobađa opterećenje  $F_1$ , što je prikazano na slici 3.7, dok se uzorak ne vrati u stanje samo s početnom silom  $F_0$ . Time se eliminiraju elastične deformacije i brojač prikazuje samo razliku između pred opterećenja i ukupnog ispitnog opterećenja.



Sl 3.7. Postupak ispitivanja Rockwellovom metodom

Rockwellova metoda koristi standardizirane indentore, pred opterećenje, opterećenje i mjerne jedinice.

Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće je relativno brza i jednostavna za izvođenje, što je čini popularnim izborom u industriji za procjenu tvrdoće različitih materijala. Brinellova i Vickersova metoda imaju nedostatak zbog potrebe za mjerenjem dimenzija otiska.

Nasuprot tome, Rocwellova metoda nema ovaj nedostatak, ali ima nižu rezoluciju tvrdoće, koja opada sa povećanjem tvrdoće materijala koji se ispituje. Također Rockwellov test tvrdoće nije prikladan za ekstremno tanke ili vrlo tvrde materijale.

### 3.3.1 Mjerna oprema za ispitivanje Rockwellovom metodom

Tvrdoća po Rockwellu temelji se na razlici između dubine prodiranja pri većim i manjim opterećenjima. Što je ta razlika veća, to je tvrdoća manja i materijal je mekši. Rockwellova vrijednost tvrdoće očitava se izravno s brojčanika ili digitalnog zaslona uređaja za ispitivanje prikazano na slici 3.8. Izvještava se kao broj iza kojeg slijedi odgovarajuća ljestvica tvrdoće (npr. HRC ili HRB).



Sl.3.8.Rockwellov uređaj za ispitivanje tvrdoće

Prije nego što se primijeni veće opterećenje, ispitni uzorak mora biti sigurno postavljen na mjestu kako bi se spriječilo klizanje i kako bi se nakovanj i indentor pravilno namjestili.

Mehanizam za podizanje koristi se za podešavanje visine ispitnog uzorka u odnosu na indentor. To omogućuje pravilno pozicioniranje materijala i osigurava dosljedno ispitivanje. Mehanizam za stezanje čvrsto drži uzorak materijala na mjestu tijekom ispitivanja kako bi se spriječilo bilo kakvo pomicanje koje bi moglo utjecati na točnost rezultata

Pouzdanost dobivenih rezultata u mjerenju tvrdoće iznimno je važna i ovisi o karakteristikama uređaja i okolnim uvjetima. Potrebno je posebno obratiti pažnju na pravilnu primjenu opterećenja jer se mogu javiti nepredviđena naprezanja koja rezultiraju nepreciznim mjerenjima zbog neadekvatnog odabira ispitnog opterećenja. Mehanička oštećenja uređaja također mogu uzrokovati probleme u preciznosti mjerenja.

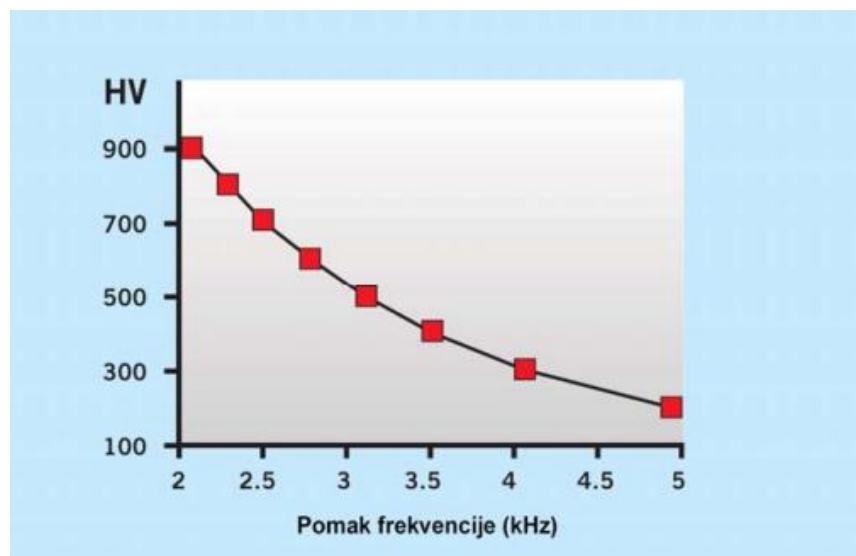
### 3.4. Ispitivanje tvrdoće prijenosnim uređajima

Kod standardnih stacionarnih tvrdomjera prema Brinellu, Rockwellu, ili Vickersu potrebno je pripremiti ispitni uzorak što često iz praktičnih razloga nije moguće. Kako bi se riješio ovaj problem razvijeni su prijenosni tvrdomjeri kojima se mogu ispitivati dijelovi različite opreme tamo gdje se ona nalazi. Prijenosni tvrdomjeri prema metodama UCI, (odskoka) i TIV efikasno se koriste u stvarnom terenskom okruženju.

#### 3.4.1. Metoda ultrazvučne kontaktne impedancije

Metoda ispitivanja tvrdoće nazvana ultrazvučna kontaktna impedancija (UCI) koristi Vickersov dijamant pričvršćen na sondi koja oscilira na ultrazvučnoj frekvenciji. Umjesto optičkog mjerenja, područje otiska se elektronički otkriva mjerenjem pomaka frekvencije ultrazvuka. Sonda se sastoji od Vickersovog dijamanta pričvršćenog na sondi koja oscilira pod utjecajem piezoelektričnih pretvarača [8].

Pomak frekvencije je proporcionalan otisku Vickersovog dijamanta, što omogućava određivanje tvrdoće materijala slika 3.9.

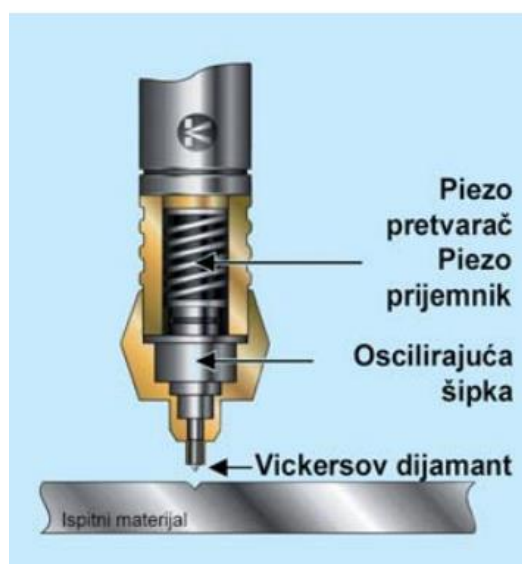


Sl. 3.9. Ovisnost frekvencije o vrijednosti HV

Nakon kalibracije, UCI metoda može se koristiti za različite materijale. Sonde su tvornički kalibrirane za čelik, ali se moderni instrumenti za ispitivanje mogu brzo kalibrirati za druge materijale

na samom mjestu ispitivanja. Modul elastičnosti ili Youngov modul materijala igra važnu ulogu u pomaku frekvencije.

Slika 3.10. prikazuje Izgled Vickersovog indentora kod UCI metode koji djeluje na površinu ispitnog materijala.



Sl 3.10. Vickersov indentor

### 3.4.2. Metoda odskoka (DynaPOCKET, DynaMIC i MIC 20)

Metoda ispitivanja tvrdoće prema Leebu, poznata i kao metoda odskoka, koristi udarno tijelo s kuglicom od volframovog karbida koje udara površinu koja se ispituje pri određenoj brzini. Gubitak energije udarnog tijela tijekom udara mjeri se kao plastična deformacija površine, koja rezultira smanjenjem brzine udarnog tijela. Mjerenje brzine prije i nakon udara omogućeno je induciranim naponom generiranim magnetom u udarnom tijelu.

Tvrdoća prema Leebu (HL) izračunava se iz omjera udarne i povratne brzine.

$$HL = \frac{VR}{V1 \cdot 1000} \quad (3-5)$$

Međutim, pretvaranje izmjerene Leebove tvrdoće u druge konvencionalne skale tvrdoće zahtijeva empirijski utvrđene pretvorbene tablice. Važno je uzeti u obzir različite vrste materijala i njihova elastična svojstva (Youngov modul) kako bi se pravilno i pouzdano izvršila pretvorba.

### 3.4.3. Optička metoda Through Indenter Viewing

TIV (Through Indenter Viewing) slika 3.11. je prijenosni instrument koji omogućuje optičko ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom.



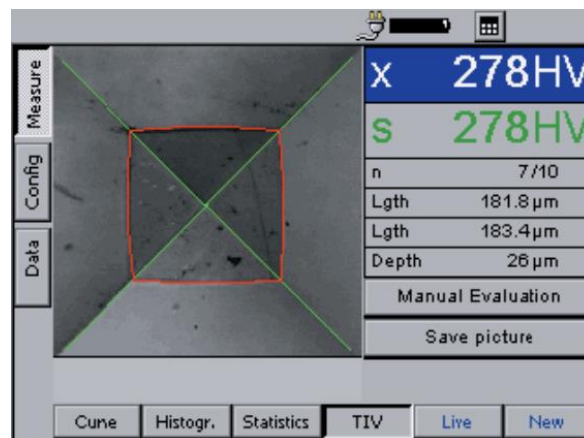
Sl.3.11.TIV uređaj

Kroz CCD (Charge-coupled device) kameru, korisnici mogu vidjeti proces prodiranja Vickersovog dijamanta u materijal koji se ispituje. TIV tehnika ne zahtijeva dodatno kalibriranje na različite materijale zbog optičke metode mjerenja i omogućuje mjerenje tankih, malih objekata i premaza.

Optički sustav omogućuje trenutnu provjeru kvalitete mjerenja i stanja indentora. TIV metoda otvara nova područja primjene za mobilno ispitivanje tvrdoće koje konvencionalni tvrdomjeri nisu mogli pružiti.

Through Indenter Viewing osigurava neovisno mjerenje u svim smjerovima, ispitivanje različitih materijala bez potrebe za ponovnim kalibriranjem, primjenu na tankim i laganim komponentama te primjenu na elastičnim materijalima.

TIV je prvi prijenosni tvrdomjer koji omogućuje izravno promatranje traga Vickersovog indentora tijekom primjene opterećenja, što je izvedeno kombinacijom optičkih leća i CCD kamere.



Sl. 3.12. Prikaz na zaslonu TIV uređaja

TIV metoda omogućuje prikazivanje rezultata slijednih ispitivanja u obliku grafova ili tablica sa statističkim podacima. Svi relevantni podaci, uključujući srednje i pojedinačne vrijednosti, te statističke podatke, vidljivi su tijekom mjerenja na zaslonu uređaja prikazanog na slici 3.12. Glavne prednosti TIV metode su postignute kroz statičku primjenu ispitnog opterećenja i ručno ili automatsko mjerenje duljine otiska Vickersovog dijamanta. Ova metoda omogućuje mobilno mjerenje tvrdoće bez dodatnih prilagodbi i kalibracija.

Prikaz otiska na zaslonu osigurava trenutnu analizu kvalitete ispitivanja, a TIV metoda automatski procjenjuje duljine dijagonala otiska. Prikaz rubova dijamanta na zaslonu omogućuje provjeru stanja indentora. Ispitivanja tvrdoće postaju neovisna o položaju, smjeru, materijalu, masi ili geometriji ispitnog uzorka.





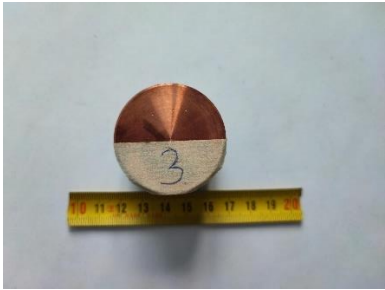
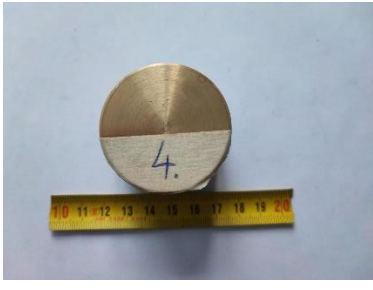
## 4. ISPITIVANJE TVRDOĆE METALNIH MATERIJALA U LABORATORIJU

U stvarnosti, okolišni uvjeti značajno utječu na rezultate mjerenja tvrdoće stoga oni često mogu odstupati od stvarne vrijednosti mjerne veličine. Pravilna konstrukcija, pažljivo sastavljanje i održavanje uređaja, te odgovarajući okolišni uvjeti igraju ključnu ulogu u osiguranju pouzdanih rezultata prilikom ispitivanja tvrdoće materijala.

Eksperimentalni dio ispitivanja tvrdoće proveden je na različitim metalima u laboratoriju za mjerenje na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Obavljeno je ispitivanje tvrdoće na stacionarnom uređaju ISH-R150 i na prijenosnom ispitnom uređaju dynaROCK II po metodi odskoka. Nakon ispitivanja obrađeni su rezultati i provedena je njihova usporedba. Ispitivanje stacionarnim uređajem provedeno po tri ispitivanja pod različitim opterećenjima u ovisnosti jesu li obojeni metali ili čelici. Ispitivanje mobilnim uređajem provedeno je na sedam različitih materijala po tri ponavljanja.



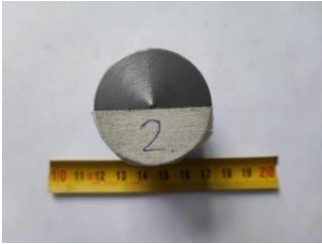
Uzorci obojenih metala korištenih za ispitivanje navedeni su u tablici 4.1.

Tab.4.1.Uzorci obojenih metala za ispitivanje

	
CuSn7(kositrena bronca)	Aluminij
	
Bakar	Mesing

Ispitni uzorci čelika navedeni su u tablici 4.2.

Tab.4.2.Uzorci čelika za ispitivanje

	
Č.0361	Č.4732.4
	
Č.1530	

#### 4.1. Ispitivanje tvrdoće materijala stacionarnim uređajem ISH-R150

ISH-R150 Hardness Tester je univerzalni uređaj za određivanje tvrdoće koji se može koristiti za različite materijale. Radi se o stacionarnom uređaju koji koristi konusni dijamentni indenter ili kuglični indenter određenog promjera za utiskivanje u uzorak. To je analogni uređaji sa mjernim kazaljka, vrijednosti se mogu izravno pročitati s brojača [9].

Uređaj ima dvije skale, jednu za dijamentne i drugu za kuglične indentore, što ga čini prikladnim za ispitivanje uzoraka različitih veličina, uključujući male i srednje velike uzorke. Rukovanje uređajem je jednostavno, a rezultati ispitivanja su pouzdani, što omogućuje njegovu široku primjenu. Slika 4.1. prikazuje ispitni uređaj u laboratoriju.



Sl.4.1 Rockwellov uređaj za ispitivanje tvrdoće [10]

Optimalni uvjeti za mjerenje ISH-R150 Rockwell Hardness Testerom

- Relativna vlažnost u prostoriji za ispitivanje ne smije biti veća od 65%
- Na temperaturi okoline, tj. između 10-30 °C
- U okruženju bez vibracija
- Nema korozivnog medija u okruženju

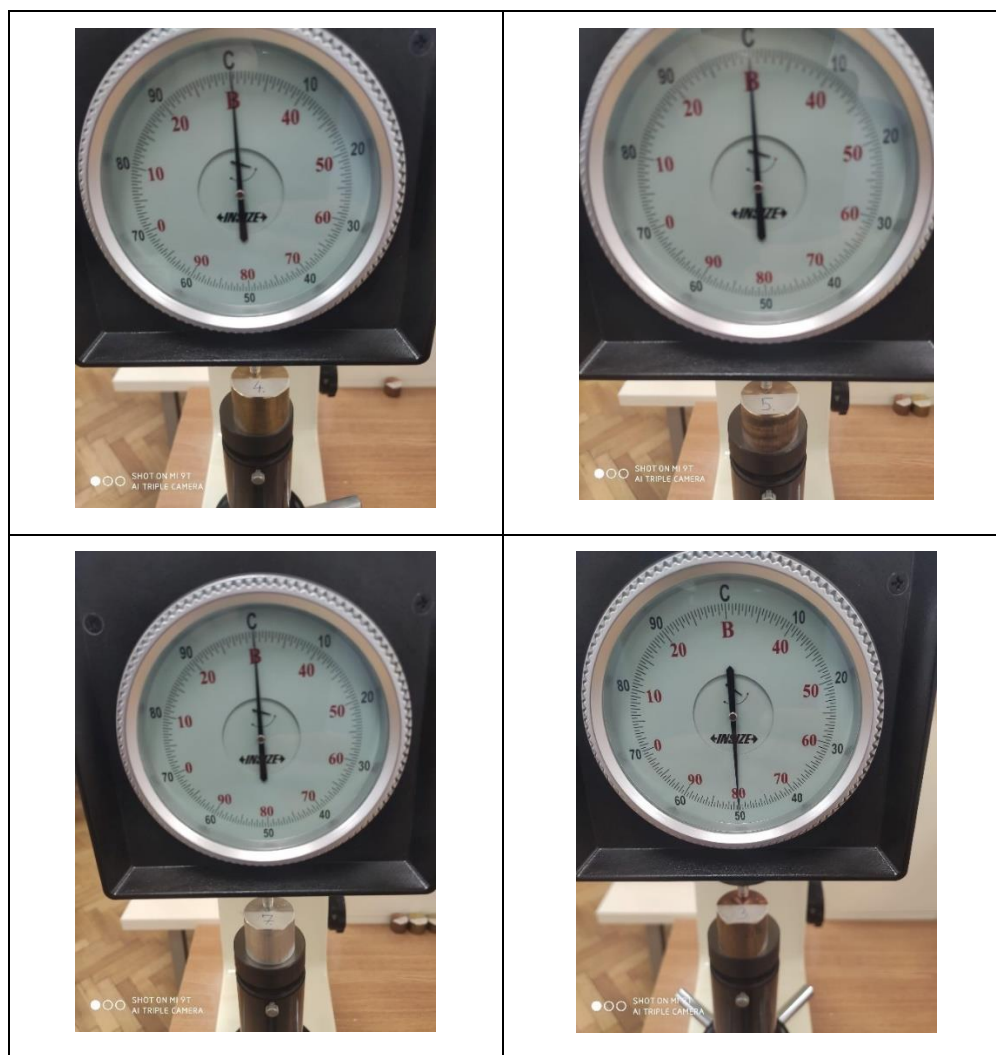
Priprema materijala prije mjerenja zahtjeva da površina ispitnog uzorka mora biti ravna i bez nepravilnosti ili značajnih tragova nastalih strojnom obradom. Minimalna debljina uzorka mora biti veća od 10 puta dubine udubljenja. Na stražnjoj strani uzorka nakon ispitivanja tvrdoće ne smije se vidjeti nikakva očita deformacija. Ispitni tlak mora djelovati okomito na uzorak. U slučaju da se ispituje uzorak cilindričnog oblika, koristi se ispitni element tipa V.

Postupak ispitivanja: na osnovu očekivane tvrdoće ispitnog materijala odabire se indenter i opterećenje pomoću kotačića za odabir opterećenja. Površina ispitnog uzorka okretanjem navojnog vretena dovodi se u početni položaj ispitivanja odnosno dolazi do kontakta između indentora i površine ispitnog uzorka.

Nakon toga potrebno je izvršiti pred opterećenje okretanjem kotačića u smjeru kazaljke na satu puna tri kruga kako bi se postiglo početno ispitno opterećenje od 98,7 N.

Da bi se provelo ispitivanje potrebno je povući ručicu za primjenu pritiska polako unazad i osigurati da se glavno opterećenje u potpunosti provede u trajanju od 4 do 6 sekundi. Nakon toga potrebno je ručicu postaviti u početni položaj kako bi se uklonilo glavno opterećenje te oslobodilo ispitni uzorak. U tom postupku kazaljka ispitnog uređaja pokazuje tvrdoću ispitivanog materijala što je prikazano na slikama u tablici 4.3.

Tab.4.3.postupak ispitivanja stacionarnim uređajem



Ispitivanje tvrdoće stacionarnim uređajem Brinellovom metodom provedeno je pri opterećenju od 1471 N za čelike te 588,4 N za obojene metale.

Rezultati ispitivanja za obojene metale prikazani su u tablici 4.4., a rezultati ispitivanja za čelike prikazani su u tablici 4.5.

Tablica 4.4. Mjerenje Brinell tvrdoće (HB) na uzorcima obojenih metala pri opterećenju od 588,4 N

<b>NAZIV UZORKA/MJERENJE</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Bakar	80 HB	79 HB	80 HB
Mesing	95 HB	94 HB	94 HB
CuSn7(kositrena bronca)	77 HB	76 HB	77 HB
Aluminij	86 HB	86 HB	87 HB

Tablica 4.5. Mjerenje Brinell tvrdoće (HB) na čeličnim uzorcima pri opterećenju od 1471 N

<b>NAZIV UZORKA/MJERENJE</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Č.0361	170 HB	174 HB	173 HB
Č.1530	146 HB	155 HB	154 HB
Č.4732.4	295 HB	292 HB	292 HB

## 4.2. Ispitivanje tvrdoće materijala prijenosnim uređajem dynaROCK II

Prijenosni uređaj dynaROCK II koristi se za ispitivanje tvrdoće materijala prema Leeb metodi. Tvrdoća se prikazuje izravno u ljestvicama tvrdoće HRB, HRC, HV, HB, HS ili vlačna čvrstoća (MPa; mjerljivo samo s udarnim uređajima tipa D, DC i G).

Uređaj dynaROCK II opremljen je memorijom u kojoj može biti pohranjeno do 500000 izmjerenih vrijednosti, s datumom, vremenom i mjernim parametrima, a prikazan je na slici 4.2. [11].



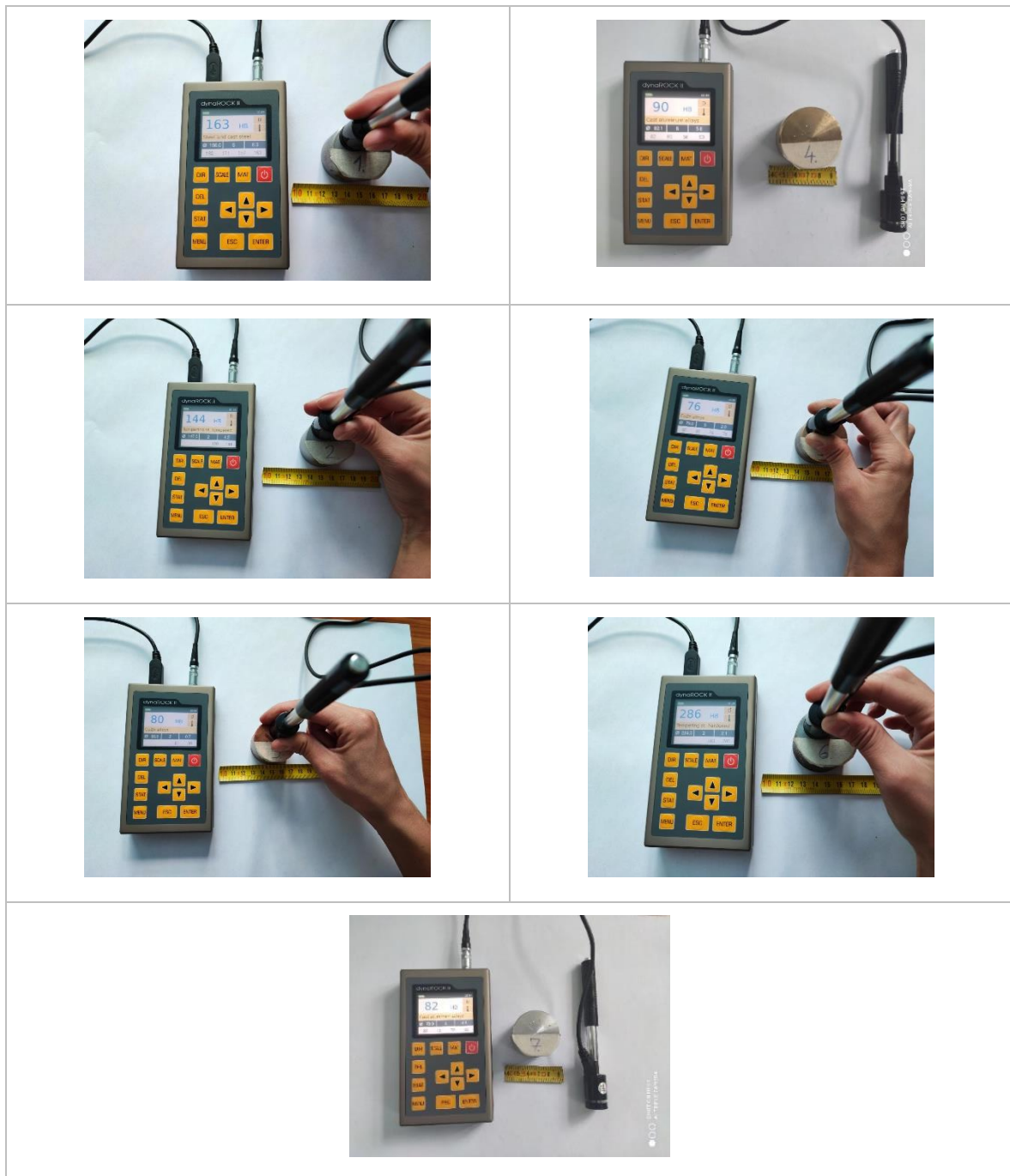
Sl 4.2. dynaROCK II uređaj

Potrebni mjerni parametri moraju biti postavljeni prema zahtjevima ispitivanja. To uključuje sljedeće: materijal, skala tvrdoće, smjer udara, granice tolerancije, statistika, trenutačni ispis.

Postupak ispitivanja: držač udarnog tijela naslanja se na površinu ispitnog uzorka, zatim se pritiskanjem opruge udarno tijelo (volframova kuglica) postavlja u položaj za ispitivanje. Nakon toga se pritišće gumb za otpuštanje udarnog tijela koje udara o površinu ispitnog uzorka čime je provedeno ispitivanje.

Postupak ispitivanja na različitim ispitnim uzorcima prikazan je u tablici 4.6. Svaki uzorak ispitan je tri puta. Na slikama unutar tablice vidljive su vrijednosti za svaki materijal te način na koji je ispitivanje provedeno.

Tab.4.6.Postupak ispitivanja stacionarnim uređajem



Rezultati ispitivanja za obojene metale prikazani su u tablici 4.7., a rezultati ispitivanja za čelike prikazani su u tablici 4.8.

Tab.4.7. Mjerenje Brinell tvrdoće (HB) na uzorcima obojenih metala

<b>NAZIV UZORKA/MJERENJE</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Bakar	81 HB	80 HB	80 HB
Mesing	90 HB	91 HB	90 HB
CuSn7(kositrena bronca)	78 HB	76 HB	77 HB
Aluminij	82 HB	80 HB	82 HB

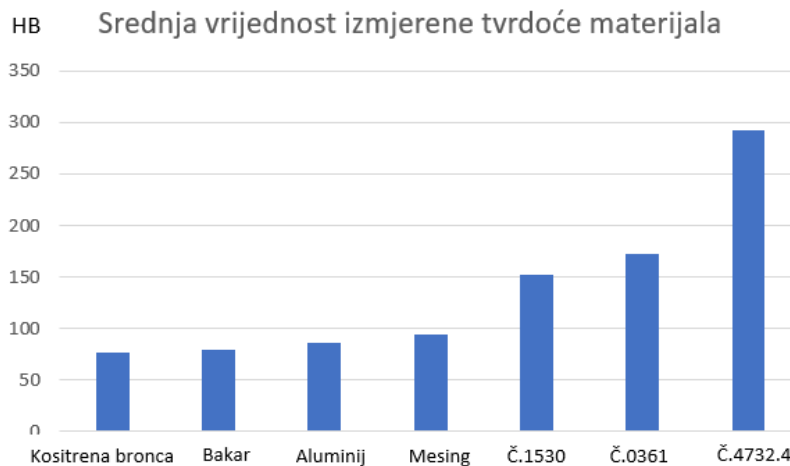
Tab. 4.8. Mjerenje Brinell tvrdoće (HB) na uzorcima čelika

<b>NAZIV UZORKA/MJERENJE</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Č.0361	151 HB	163 HB	168 HB
Č.1530	150 HB	144 HB	149 HB
Č.4732.4	283 HB	286 HB	293 HB

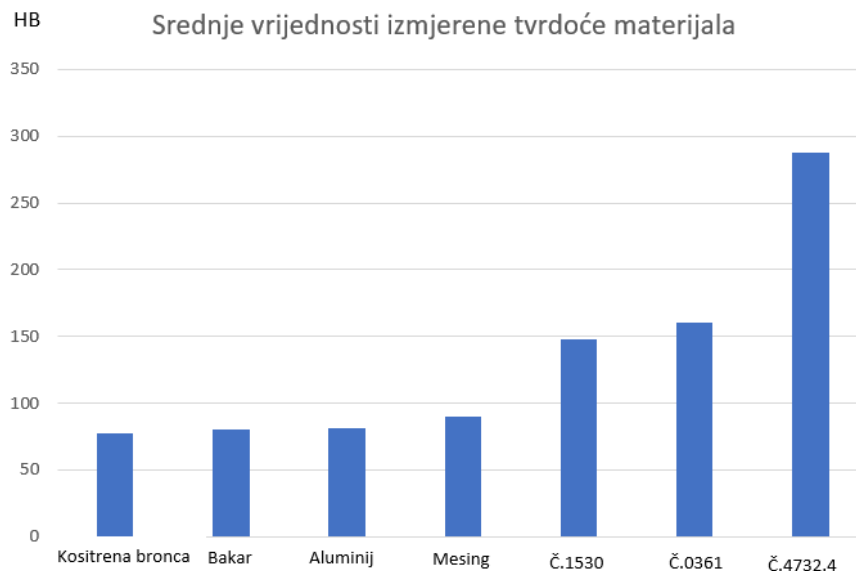


### 4.3. Analiza ispitnih rezultata

Nakon provedenog ispitivanja izračunata je srednja vrijednost izmjerenih tvrdoća materijala kako bi vrijednost tvrdoće bila što bliža stvarnoj vrijednosti. Na slici 4.3. i 4.4 prikazani su grafovi srednjih vrijednosti izmjerenih veličina stacionarnim i prijenosnim tvrdomjerom. Na njima je vidljivo da obojeni metali imaju znatno manju tvrdoću u usporedbi s čelicima. Od obojenih metala najmekša je kositrena bronca dok je najtvrdi mesing. Čeliku se toplinskom obradom i legiranjem poboljšava tvrdoća.



Sl.4.3.Graf srednjih vrijednosti izmjerene tvrdoće materijala stacionarnim tvrdomjerom



Sl.4.4.Graf srednjih vrijednosti izmjerene tvrdoće materijala prijenosnim tvrdomjerom

Prijenosni uređaj i stacionarni uređaj daju vrlo slične rezultate za obojene metale, što ukazuje na dosljednost između uređaja za ovu vrstu materijala. Razlike su minimalne i obično ne prelaze 1 HB, što se smatra normalnom varijacijom u ispitivanju tvrdoće. Od obojenih metala, rezultati ispitivanja aluminija pokazuju odstupanja u vrijednostima. Vrijednosti tvrdoće izmjerene na stacionarnom uređaju su nešto veće od onih izmjerenih na prijenosnom uređaju. Stacionarni uređaj je izmjerio prosječnu vrijednost tvrdoće od oko 86,3 HB, dok je prijenosni uređaj izmjerio prosječnu vrijednost od oko 81,3 HB.

Vrijednosti tvrdoće Č.1530 izmjerene stacionarnim uređajem nešto su veće od onih izmjerenih prijenosnim uređajem za svaki od tri provedena mjerenja. Stacionarni uređaj pokazuje veću tvrdoću čelika u usporedbi s prijenosnim uređajem. Također je vidljivo da postoje manje varijacije u rezultatima ispitivanja stacionarnim uređajem, jer su sva tri ispitivanja vrlo bliska jedno drugome (od 154 do 155 HB), dok su rezultati ispitivanja prijenosnim uređajem varirali nešto više (od 144 do 150 HB).

Usporedba rezultata tvrdoće Č.0361 pokazuje da su ispitivanja tvrdoće za čelik na prijenosnom uređaju značajno niža od onih na stacionarnom uređaju. Razlike su u ovom slučaju značajne, s razlikom od približno 20 HB između ispitivanih uređaja. Razlike variraju za svako mjerenje, ali sveukupno, rezultati prijenosnog uređaja su niži od rezultata stacionarnog uređaja za ovaj materijal.

Rezultati ispitivanja stacionarnim uređajem za Č.4732.4 imaju prosječnu vrijednost tvrdoće od oko 293 HB, dok prijenosnim uređaj imaju vrijednost od oko 287 HB. Stacionarni uređaj pokazuje nešto veće vrijednosti tvrdoće. Također, treba napomenuti da su rezultati ispitivanja na stacionarnom uređaju međusobno vrlo bliski (292 HB i 295 HB), dok rezultati ispitivanja na prijenosnom uređaju pokazuju veću varijabilnost (283 HB, 286 HB i 293 HB).

Na osnovu rezultata provedenog ispitivanja vidljivo je da su rasipanja rezultata puno veća kod prijenosnog uređaja te da je njihova preciznost nešto niža nego kod stacionarnog uređaja. Stacionarni laboratorijski uređaj ima značajno manja odstupanja u rezultatima te je zbog toga pouzdaniji za primjenu u istraživanjima.

Razlike u tvrdoći od nekoliko HB mogu biti značajne, posebno u kontekstu inženjerskih razmatranja gdje preciznost u mjerenjima može biti ključna za osiguranje kvalitete i otpornosti materijala.

## 5. ZAKLJUČAK

U završnom radu ukazano je na važnost ispitivanja tvrdoće inženjerskih materijala te kako se različite metode ispitivanja mogu primijeniti za karakterizaciju materijala u različitim okolnostima.

Ispitivanjem tvrdoće materijala različitim metodama, omogućuje inženjerima da za određene primjene mogu odabrati odgovarajući materijal, koji će biti pouzdan i funkcionalan. Ispitivanje tvrdoće ima široku primjenu u različitim industrijama, uključujući metalurgiju, automobilsku industriju i medicinsku industriju, kako bi se osigurala kvaliteta i trajnost proizvoda.

Stacionarni laboratorijski uređaji svakako pružaju veću točnost i preciznost u mjerenju tvrdoće. Ovo je posebno važno u situacijama gdje su potrebne vrlo precizne vrijednosti tvrdoće, u svrhu provedbe istraživanja materijala ili kontrole proizvoda u proizvodnom procesu. Također su prikladniji za dugotrajnu upotrebu, što ih čini idealnim za laboratorijske postavke i situacije gdje se tvrdoća mora sustavno pratiti tijekom vremena.

Prijenosni uređaji su kompaktni i mogu se lako prenositi na teren ili na mjesto gdje se izvodi ispitivanje tvrdoće. To je posebno korisno u situacijama gdje je potrebno brzo i mobilno ispitivanje tvrdoće. Obično su jednostavni za upotrebu i ne zahtijevaju složene postavke ili kalibraciju što omogućava širem rasponu korisnika da izvodi mjerenja tvrdoće. Najveći nedostatak prijenosnih uređaja je što imaju manju preciznost u usporedbi sa stacionarnim uređajima.

Na osnovu provedenog istraživanja, može se zaključiti da tvrdoća materijala igra ključnu ulogu u odabiru materijala za specifične inženjerske primjene. Razvoj naprednih tehnika ispitivanja tvrdoće omogućuje preciznija i pouzdanija mjerenja. Primjerice, razvoj novih metoda za automatsko praćenje opterećenja i mjerenja omogućuje bolju kontrolu i preciznost mjerenja tvrdoće. Razvoj mikroskopskih tehnika omogućuje mjerenje lokalizirane tvrdoće na mikroskopskoj razini. To je posebno važno u istraživanju materijala i u industriji gdje su detaljni uvidi u mikrostrukturu ispitivanog materijala ključni. Primjena napredne analize podataka, uključujući strojno učenje i umjetnu inteligenciju, može poboljšati interpretaciju rezultata ispitivanja tvrdoće i identifikaciju uzoraka.

## LITERATURA

- [1] I. Vitez, M. Oruč, R. Sunulahpašić, Ispitivanje metalnih materijala, Zenica, 2006.
- [2] [http://www.ktf-split.hr/glossary/hr\\_o.php?def=Mohsova%20skala](http://www.ktf-split.hr/glossary/hr_o.php?def=Mohsova%20skala) 19.06.2023.
- [3] W. Soboyejo, Mechanical Properties of Engineered Materials, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [4] M. Ohring, Engineering Materials Science, Academic Press, San Diego, 1995.
- [5] B. Kraut, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987.
- [6] D. Tabor, The hardness of metal, At the clarendon press, Oxford, 1951.
- [7] <https://www.mediotehna.hr/hr/Stolni-uredaji-za-mjerenje-tvrdoce/Stolni-uredaj-za-mjerenje-tvrdoce-IDV10-digitalni.hr> 14.07.2023.
- [8] S. Frank, Vodič za primjenu instrumenata Krautkramer
- [9] ISH-R150 Manual Rockwell Hardness Tester
- [10] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/uredaj-za-ispitivanje-tvrdoce-ish-r150> 09.08.2023.
- [11] dynaROCK II Manual: [https://www.baq.de/files/artikel/1981/en\\_dynaROCK\\_II\\_Manual.pdf](https://www.baq.de/files/artikel/1981/en_dynaROCK_II_Manual.pdf) 13.08.2023.

## SAŽETAK

Tvrdoća je ključno mehaničko svojstvo inženjerskih materijala o kojoj ovisi njihova primjena u različitim industrijama. Ispitivanjem tvrdoće može se procijeniti koliko materijal može izdržati opterećenje ili otpornost na trošenje pri određenim uvjetima kao i ispunjavaju li materijali propisane specifikacije i standarde. Poznavanje tvrdoće materijala osigurava trajnost, čvrstoću i sigurnost materijala i proizvoda te je neophodna za kontrolu kvalitete i unaprjeđivanje svojstva materijala.

U radu su istraženi osnovni koncepti i metode ispitivanja tvrdoće, s posebnim naglaskom na tri najčešće korištene metode: Brinell, Vickers i Rockwell kao i važnost odabira odgovarajuće metode ispitivanja ovisno o vrsti materijala i njegovoj očekivanoj tvrdoći. Teoretski i eksperimentalno je obrađeno ispitivanje tvrdoće prijenosnim i stacionarnim tvrdomjerima. U prvom dijelu rada prikazan je pregled osnovnih pojmova i metoda mjerenja tvrdoće (Brinell, Vickers, Rockwell). U drugom dijelu provedeno je ispitivanje na sedam različitih metalnih materijala te su uspoređeni rezultati mjerenja.

Ključne riječi: tvrdoća, ispitivanje, metode ispitivanja, opterećenje, indentor

## **ABSTRACT**

### **TESTING OF THE HARDNESS OF ENGINEERING MATERIALS**

Hardness is a crucial mechanical characteristic of engineering materials that determines their applicability in various industries. Hardness testing allows us to assess how much stress or wear resistance a material can withstand under specific conditions and whether the materials meet prescribed specifications and standards. Understanding the hardness of materials ensures their durability, strength, and safety, making it essential for quality control and material design improvement.

This work explores fundamental concepts and methods of hardness testing, with a particular emphasis on the three most commonly used techniques: Brinell, Vickers, and Rockwell. It also highlights the importance of selecting the appropriate testing method depending on the type of material and its expected hardness. Theoretical and experimental aspects of hardness testing using both portable and stationary hardness testers are addressed. The first part of the work provides an overview of basic terms and measurement methods for hardness (Brinell, Vickers, Rockwell). In the second part, testing is conducted on seven different metallic materials, and the measurement results are compared.

Keywords: hardness, testing, testing methods, load, indenter

## **ŽIVOTOPIS**

Marina Pein rođena je u Osijeku 04. 08. 2000. godine. Nakon završetka osnovne škole “Matija Gubec“ u Čemincu, obrazovanje nastavlja u Prvoj gimnaziji Osijek. Zatim 2019. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, stručni studij, smjer automatika.

---

Potpis autora