

# Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC

---

Šojat, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:048627>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Antonio Šojat**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof

Student:

Antonio Šojat

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Prvenstveno se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru na pomoći i savjetima prilikom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se tehničarima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Romanu Divjaku i Ivanu Martinku radi pomoći prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela rada, te asistentu Danielu Pustičkom na pomoći oko izrade rada. Također, zahvaljujem se obitelji na podršci tijekom studiranja.

Antonio Šojat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602 - 04 / 20 - 6 / 3
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTONIO ŠOJAT** Mat. br.: 0035207417

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of reference blocks for Rockwell HRC hardness test**

Opis zadatka:

Referentne etalonske pločice tvrdoće za metodu Rockwell HRC se upotrebljavaju za održavanje mjerne sljedivosti mjerenja tvrdoće kroz indirektno umjeravanje tvrdomjera. Umjeravanje etalonskih pločica se provodi sukladno normi HRN EN ISO 6508-3:2015.

U radu je potrebno sljedeće:

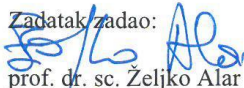
1. Opisati uspostavu mjerne sljedivosti mjerenja tvrdoće po metodi Rockwell.
2. Opisati provedbu umjeravanja etalonskih pločica tvrdoće sukladno normi HRN EN ISO 6508-3:2015.
3. Opisati zahtjeve na referentne materijale za izradu etalonskih pločica tvrdoće te postupke njihovog dobivanja. Prema literaturnim izvorima analizirati utjecaj doprinosa nesigurnosti etalonskih pločica na ukupnu nesigurnost mjerenja tvrdoće po metodi Rockwell HRC.
4. Eksperimentalno provesti umjeravanje etalonskih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC te provesti procjenu mjerne nesigurnosti umjeravanja.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

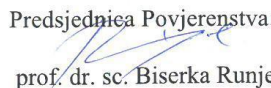
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:  
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:  
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O TVRDOĆI.....	3
2.1. Metode mjerenja tvrdoće.....	4
2.2. Utjecajni faktori na ispitivanje tvrdoće.....	5
2.3. Odabir metode ispitivanja tvrdoće.....	6
3. ROCKWELLOVA TVRDOĆA.....	9
3.1. Princip rada.....	9
3.1.1. Razmak između mjesta utiskivanja.....	11
3.1.2. Prednosti i nedostaci.....	12
3.2. Različite varijante Rockwellove tvrdoće.....	12
3.2.1. Zapisivanje i tumačenje rezultata mjerenja.....	14
3.3. Oprema potrebna za mjerenje Rockwell tvrdoće.....	14
3.4. Ispitni uzorak.....	16
3.4.1. Minimalna debljina ispitnog uzorka u odnosu na varijantu Rockwell testa.....	18
4. PROVJERAVANJE I UMJERAVANJE ISPITNIH UREĐAJA I REFERENTNIH PLOČICA.....	21
4.1. Važnost sljedivosti umjeravanja.....	21
4.2. Umjeravanje ispitnog uređaja (tvrdomjera).....	23
4.3. Umjeravanje referentnih pločica.....	24
4.3.1. Zahjevi, važnost i proizvodnja referentnih pločica.....	24
4.3.2. Postupak umjeravanja.....	26
4.3.2.1. Ujednačenost tvrdoće.....	27
4.3.3. Mjerna nesigurnost.....	28
4.3.4. Označavanje referentnih pločica.....	29
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
5.1. Plan ispitivanja.....	30

5.2. Pregled opreme korištene prilikom ispitivanja.....	31
5.3. Ispitivanja i provjera referentnog tvrdomjera.....	37
6. ANALIZA REZULTATA.....	45
6.1. Histogrami za analizu rezultata.....	50
7. ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA.....	55
PRILOZI.....	56

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala [2].....	4
Slika 2.2. Metode za ispitivanje tvrdoće polimera [2].....	5
Slika 2.3. Utjecajni faktori pri ispitivanju tvrdoće [3].....	6
Slika 3.1. Postupak ispitivanja Rockwell tvrdoće [5].....	11
Slika 3.2. Varijante Rockwellove tvrdoće i njihove razlike [6].....	13
Slika 3.3. Rockwell tvrdomjer [7].....	15
Slika 3.4. Mjerilo Rockwell tvrdomjera [8].....	16
Slika 3.5. Varijante postolja za ispitne uzorke [9].....	17
Slika 3.6. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante A,C,D) [5].....	18
Slika 3.7. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante B, E, F, G, H, K) [5].....	19
Slika 3.8. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante N, T) [5].....	20
Slika 4.1. Mjerna sljedivost za mjernu veličinu tvrdoća [2].....	22
Slika 4.2. Maksimalna dopuštena ne-ujednačenost tvrdoće [11].....	28
Slika 5.1. Tvrdomjer Indentec ZHR 8150 TKS.....	32
Slika 5.2. Digitalni pokazivač tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS.....	33
Slika 5.3. Cerifikat o umjeravanju dijamantnog stošca.....	34
Slika 5.4. Izmjerene sile ispitivanja tvrdomjera.....	35
Slika 5.5. Dobivene vrijednosti tvrdoće na primarnim etalonima.....	36
Slika 5.6. Označena točka s poznatim podacima o Laboratoriju.....	38
Slika 5.7. Graf ovisnosti djelovanja i postizanja sila ispitivanja o vremenu.....	39
Slika 5.8. Mjerno pojačalo i dinamometar.....	40
Slika 5.9. Trenutak utiskivanja indentora u pločicu prilikom umjeravanja.....	44
Slika 6.1. Graf usporedbe vremena ispitivanja s onima u normi.....	45
Slika 6.2. Usporedba sila predopterećenja.....	46
Slika 6.3. Usporedba sila opterećenja.....	47
Slika 6.4. Usporedba sila nakon povratka na silu predopterećenja.....	47
Slika 6.5. Histogram ne-ujednačenosti tvrdoće referentnih pločica.....	50
Slika 6.6. Histogram doprinosa mjernoj nesigurnosti uzrokovanoj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice.....	51
Slika 6.7. Histogram mjerne nesigurnosti za referentne pločice.....	52



Slika 6.8. Vrijednost tvrdoće etalonskih pločica s vrijednostima mjerne nesigurnosti uzorkovanih pločica.....53

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci najčešće korištenih metoda za ispitivanje tvrdoće [4].....	7
Tablica 3.1. Prednosti i nedostaci ispitivanja tvrdoće po Rockwellu.....	12
Tablica 5.1. Provjera sila ispitivanja kod pločice 1.....	41
Tablica 5.2. Provjera sila ispitivanja kod pločice 2.....	42
Tablica 5.3. Provjera sila ispitivanja kod pločice 3.....	42
Tablica 5.4. Rezultati mjerenja na referentnim pločicama.....	43
Tablica 6.1. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 1.....	49
Tablica 6.2. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 2.....	49
Tablica 6.3. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 3.....	49

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$b_{\text{HCM}}$	HRC	vrijednost odstupanja ispitnog uređaja
$F_0$	N	sila predopterećenja
$F_1$	N	sila opterećenja
$F$	N	ukupna sila ispitivanja
$\bar{H}_{\text{CRM}}$	HRC	aritmetička sredina mjerenja
$HRC$	HRC	tvrdoća po Rockwellu metoda C
$g$	$\text{ms}^{-2}$	gravitacijsko ubrzanje
$h$	mm	konstantna dubina utiskivanja
$k$	/	faktor pokrivanja
$N$	/	konstanta potpune skale
$R$	HRC	ne-ujednačenost tvrdoće referentne pločice
$R_a$	$\mu\text{m}$	površinska hrapavost
$S$	/	konstanta skaliranja
$S_{\text{HCRM}}$	HRC	standardna devijacija mjerenja
$T_a$	s	vrijeme postizanja sile predopterećenja
$T_p$	s	vrijeme djelovanja sile predopterećenja
$T_{\text{pm}}$	s	vrijeme proteklo od početka primjene sile predopterećenja neposredno do mjerenja inicijalne dubine utiskivanja
$u_{\text{CRM}}$	HRC	mjerna nesigurnost referentne pločice tvrdoće u tolerancijskom polju $\bar{H} \pm$

		$u_{CRM}$
$u_{HCM}$	HRC	nesigurnost odstupanja
$u_{HCRM}$	HRC	doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovanoj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i neujednačenosti referentne pločice
$u_{ms}$	HRC	doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovan rezolucijom ispitnog uređaja
$\delta_{ms}$	HRC	rezolucija ispitnog uređaja
$x$	mV/V	iznos osjetljivosti dinamometra
$u$	°C	temperatura

## **SAŽETAK**

U diplomskom radu obrađena je metoda ispitivanja tvrdoće po Rockwellu sukladno s normom HRN EN ISO 6508-1:2016. Njom se definiraju svi zahtjevi na tvrdoću po Rockwellu. Objasnjena je uspostava mjerne sljedivosti za mjernu veličinu tvrdoća. Kroz eksperimentalni dio rada dan je pregled opreme potrebne za ispitivanja tvrdoće po metodi Rockwell, te za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće po metodi Rockwell HRC. Također eksperimentalni dio rada sastoji se od umjeravanja referentnih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC i procjenu mjerne nesigurnosti umjeravanja sukladno normi HRN EN ISO 6508-3:2015.

Ključne riječi: tvrdoća po Rockwellu, referentne pločice tvrdoće, umjeravanje

## **SUMMARY**

This work deals with hardness testing for Rockwell HRC method according to HRN EN ISO 6508-1:2016. That standard defines all requests on Rockwell hardness. This work also describes establishment of measurement traceability for the measured quantity of hardness. Through the experimental part of the work, an overview of the equipment needed for Rockwell hardness tests and for calibration of Rockwell HRC hardness reference blocks is given. Also, the experimental part of the work consists of calibration of hardness reference blocks for the Rockwell HRC method and estimation of measurement uncertainty of calibration in accordance with the standard HRN EN ISO 6508-3: 2015.

Keywords: Rockwell hardness, hardness reference blocks, calibration

## 1.UVOD

Uz ubrzan razvoj strojarskih konstrukcija, proizvodnje, energetike, automatizacije, itd. vrlo usko je povezan i razvoj strojarskih materijala. Razvojem postoji težnja za poboljšanjem svojstava tih materijala. Ta svojstva možemo podijeliti na mehanička (čvrstoća, tvrdoća, žilavost, dinamička izdržljivost, itd.), tehnološka (livljivost, kovkost, rezljivost, zavarljivost, itd.), fizikalna (boja, toplinska vodljivost, električna vodljivost, itd.)

Bitna svojstva za izdvojiti su dakako mehanička svojstva materijala. Sukladno tim svojstvima materijala i strojarskih dijelova dimenzioniraju se i prilagođavaju razne strojarske konstrukcije. Sa sigurnošću možemo reći kako je otpornost materijala definirana njegovim mehaničkim svojstvima. Stoga ispitivanje i analiziranje mehaničkih svojstava materijala temelj je unaprjeđenja postojećih proizvodnih tehnologija i razvoja strojarskih konstrukcija. Uz ispitivanje i analiziranje mehaničkih svojstava nezaobilazno je i provođenje ispitivanja. Ispitivanja moraju vjerodostojno prikazivati sva svojstva materijala, a u isto vrijeme pružati što vjerniju kopiju i prikaz eksploatacijskih uvjeta istog.

Mehanička svojstva materijala iznimno su važna skupina svojstava zbog načina na koji ih utvrđujemo. Kako bi se izbjegla nesreća ili lom strojnog dijela pa čak i konstrukcije potrebno je provoditi laboratorijska ispitivanja radi utvrđivanja mehaničkih svojstava. Prisutnost mnogih nepravilnosti unutar strukture materijala onemogućavaju njegov točan proračun tj. on će vrijediti samo u slučaju idealne tvari. U svrhu različitih mehaničkih svojstava razvijen je i velik broj laboratorijske opreme kako bi se ona odredila.

Jedno od najbitnijih mehaničkih svojstava je tvrdoća, jednostavno se može objasniti kao otpor koji pruža određeni materijal prilikom prodiranja znatno tvrđeg tijela u njega. Tvrdoća nije fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo. Ta činjenica tvrdoću materijala posebno ističe iz skupine mehaničkih svojstava. Također ta činjenica pridaje tvrdoći veliku važnost i omogućuje joj „titulu“ jednog od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Tvrdoću uz sve navedeno na pijedestal postavlja njena korelacija s drugim mehaničkim svojstvima (npr. vlačna čvrstoća, žilavost) pa se sve više teži numeričkom povezivanju drugih mehaničkih svojstava materijala mjerenjem isključivo tvrdoće. Naravno, te brzina i jednostavnost ispitivanja u odnosu na druga mehanička svojstva.

Prilikom svih ispitivanja, mjerenja i analiziranja veličina bitno je i spomenuti važnost sljedivosti mjerenja i umjeravanja mjerne opreme radi dobivanja kvalitetnih i upotrebljivih vrijednosti veličina. Mjerenje tvrdoće striktno je definirano hrvatskim normama. One ne definiraju samo postupak određivanja tvrdoće materijala tj. metodu ispitivanja nego i provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja i indentora, te umjeravanje referentnih pločica tvrdoće.

Metoda mjerenja tvrdoće koja će se opisivati u radu i po kojoj će se odvijati eksperimentalni dio je Rockwellova metoda. Norme koje ju definiraju su HRN EN ISO 6508-1:2016 (Metoda ispitivanja), HRN EN ISO 6508-2:2015 (Provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja i utiskivača), HRN EN ISO 6508-3:2015 (Umjeravanje referentnih pločica).



## 2. OPĆENITO O TVRDOĆI

Tvrdoća kao što je već navedeno predstavlja otpor materijala kao odgovor na prodiranje znatno tvrđeg materijala u njega. Svrha ispitivanja tvrdoće je utvrđivanje svojstava materijala za primjenu u eksploataciji. Točnije, da li materijal zadovoljava vrijednosti i parametre za primjenu u realnim uvjetima.

Ispitivanje tvrdoće provodi se utiskivanjem specijalno i točno definiranim predmetom (tzv. indentor) u površinu materijala koji se ispituje. O iznosima i vrijednostima tvrdoće zaključuje se mjereći dubinu penetracije indentora ili mjereći veličinu otiska na površini koju je napravio indentor pri određenoj sili utiskivanja. Metode ispitivanja tvrdoće koje mjere dubinu utiskivanja indentora su: Rockwellova metoda, instrumentirano indentacijsko ispitivanje i tvrdoća utiskivanjem kuglice. Metode ispitivanja tvrdoće kod kojih se mjeri veličina otiska na površini materijala koji se ispituje su: Vickersova metoda, Knoopova metoda i Brinellova metoda. Ovisno o metodama ispitivanja razlikuju se dimenzije, veličine, oblici i materijali indentora. No, bitno za napomenuti je da su svi indentori izrađeni od izrazito tvrdih materijala (kaljeni čelik, tvrdi metal, dijamant).

Prilikom mjerenja tvrdoće za razliku od većine ispitivanja mehaničkih svojstava nije potrebna posebna izrada uzoraka. Mjerenje je moguće na gotovim proizvodima, pa čak i poluproizvodima. Ovisno o metodi jedino je potrebna određena priprema površine na kojoj će se vršiti ispitivanje koje se ogleda u brušenju, te eventualno poliranju.

Iako samo utiskivanje tvrđeg materijala u ispitni materijal predstavlja uništavanje tog materijala tj. njegovo razaranje, ispitivanje tvrdoće možemo svrstati u kategoriju nerazornih metoda ispitivanja. Razlog tome je jako malo i nezamjetno oštećenje nastalo na materijalu, a najbitnije je da ne ugrožava njegov integritet.

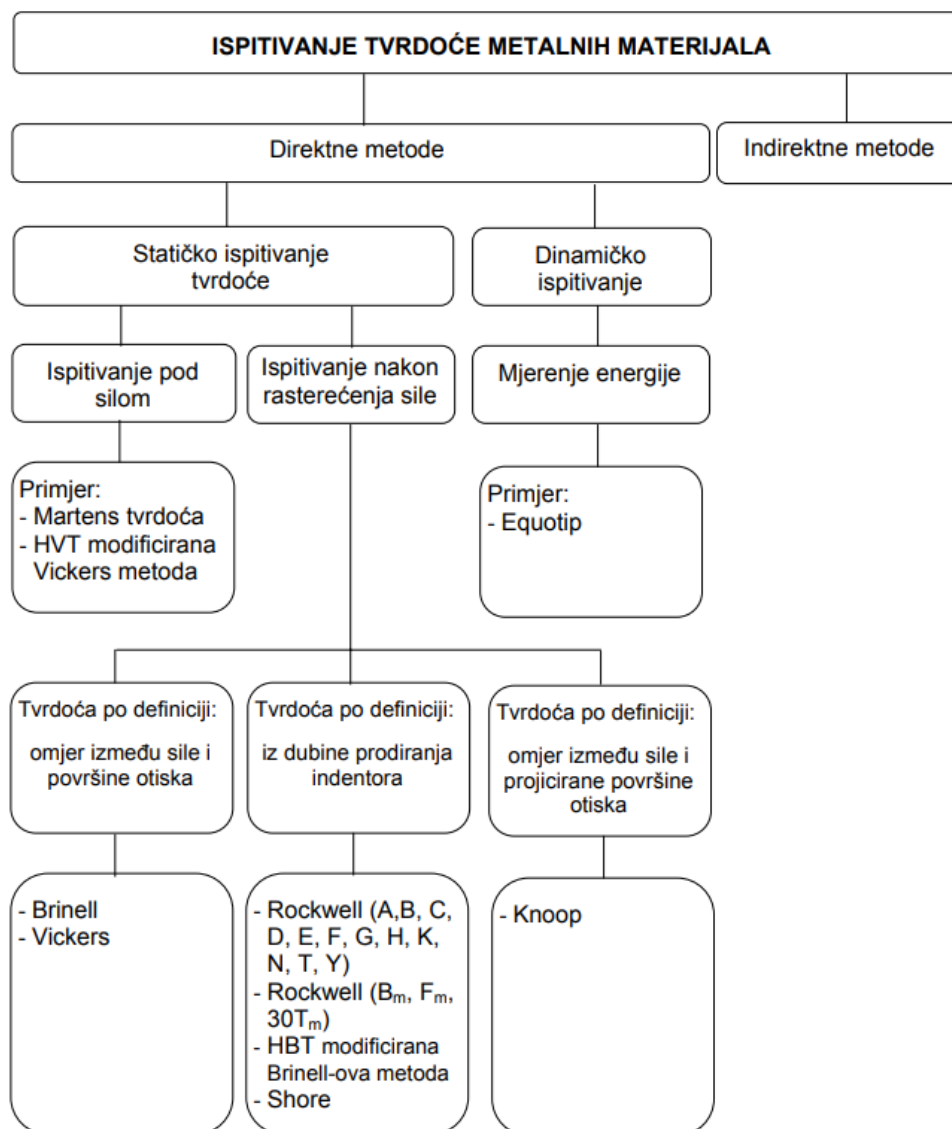
Tvrdoća je primjer fizikalnog pojma koji se ne može kvantificirati bez referentne ljestvice za mjernu metodu odnosno ona nema određenu jedinicu koja je neovisna o metodi ispitivanja. Stoga se veličina "tvrdoća" razlikuje od klasičnih mjerljivih veličina (poput mase, duljine, itd.) po tome što se ne može uvrštavati u jednadžbe za određivanje drugih mjerljivih veličina (iako se katkad upotrebljava u iskustvenim jednadžbama). Iskazana vrijednost tvrdoće je najčešće funkcija (ovisno o referentnoj ljestvici) dimenzije otiska indentora. [1]

## 2.1. Metode mjerenja tvrdoće

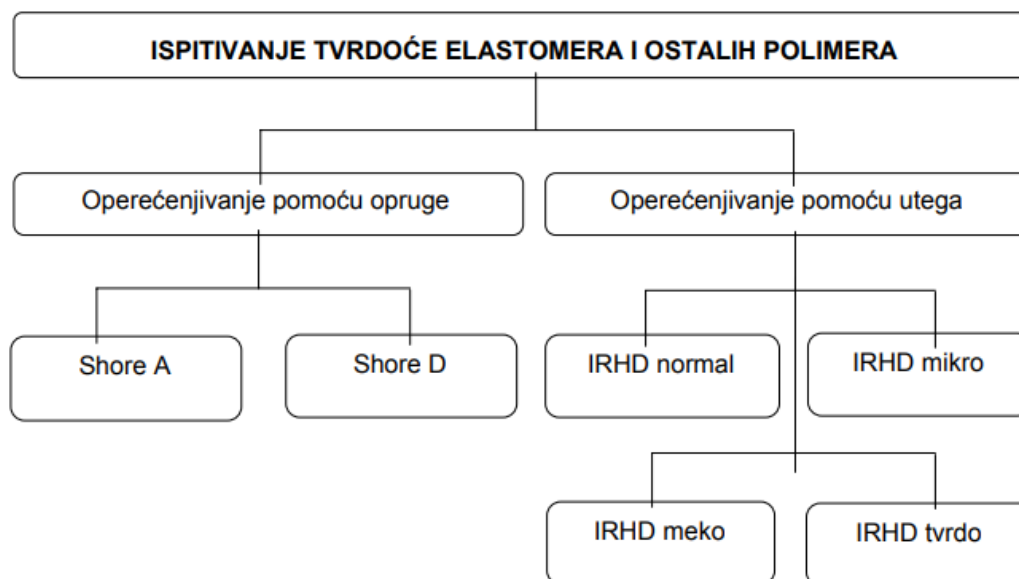
Razvojem ispitivanja tvrdoće kroz povijest razvio se i velik broj različitih metoda ispitivanja. Svaka metoda je unikatna i posjeduje opremu koja je namijenjena isključivo za ispitivanje tvrdoće tom metodom. Velik izbor metoda zahtjeva njihovu organizaciju unutar većih skupina pa tako postoje dvije velike skupine:

1. Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala
2. Metode za ispitivanje tvrdoće polimera

Slika 2.1. prikazuje detaljnu podjelu metoda za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala, dok slika 2.2. prikazuje detaljnu podjelu metoda za ispitivanje tvrdoće polimera.



Slika 2.1. Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala [2]



Slika 2.2. Metode za ispitivanje tvrdoće polimera [2]

Uz navedenu podjelu veoma je bitno navesti da se u trenutnoj praksi koristi još jedna podjela ispitivanja tvrdoće. Također dvije skupine, a to su:

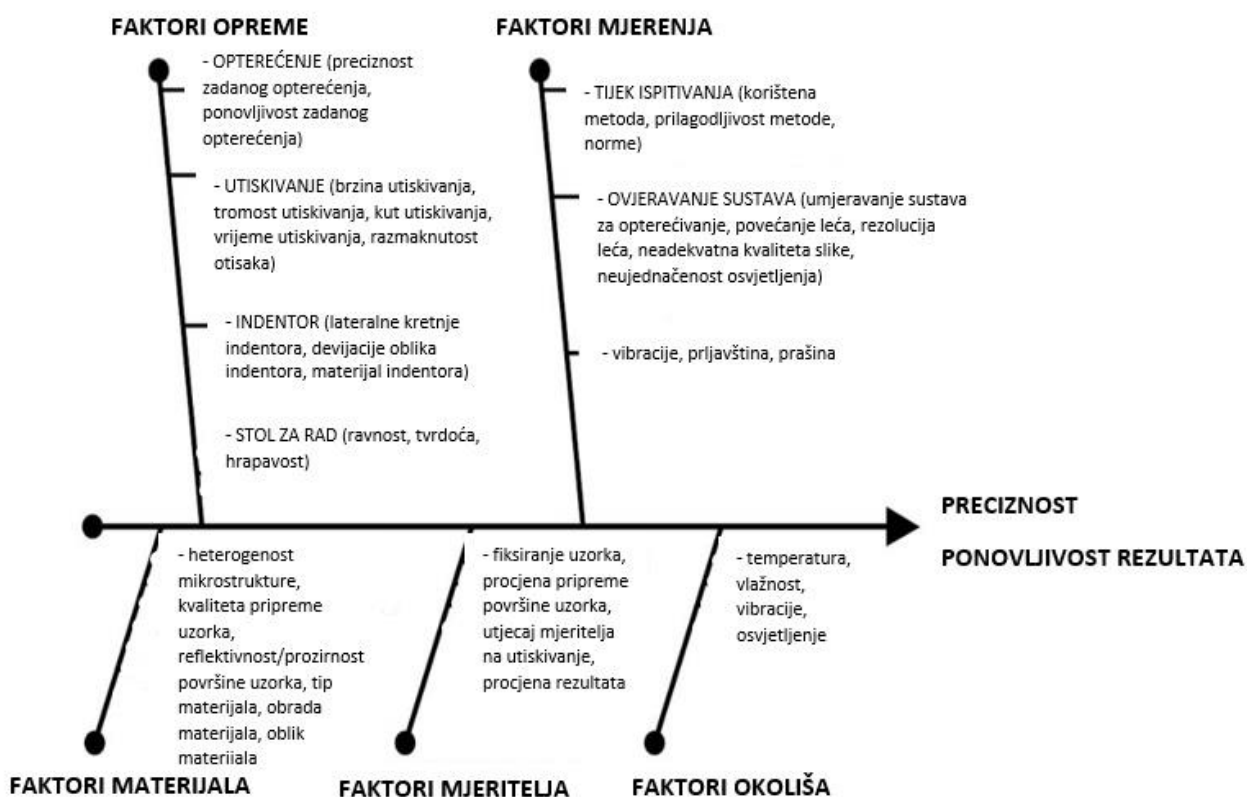
1. Makrotvrdoća – Ona se referira na ispitivanje tvrdoće s narintim naprezanjem na indenter od minimalno 1 kg. Koriste se za ispitivanje alata, raznih konstrukcija, većih proizvoda, robusnih dijelova,... Neke metode makrotvrdoće su: Rockwell, Brinell, Vickers
2. Mikrotvrdoća – Pri ispitivanju mikrotvrdoće sila kojom se opterećuje indenter je maksimalno 1 kg, a materijal koji se ispituje je vrlo tanak. Koriste se za vrlo male dijelove, prevučene površine, kaljene površine, pa čak i za određivanje tvrdoće pojedinih konstituenata materijala. Neke od metoda su: Knoop, Vickers

U strojarstvu danas uz sve poznate metode najčešće korištene su Brinell, Vickers i Rockwell koja će se detaljnije obraditi u radu. Sve te metode koje se najčešće koriste primjenjuju statičko djelovanje sile.

## 2.2. Utjecajni faktori na ispitivanje tvrdoće

Postoji puno utjecajnih faktora na ispitivanje tvrdoće, pa se to odražava i na vrijednost tvrdoće materijala. Opće pravilo ispitivanja tvrdoće bilo bi: što je manje opterećenje koje se koristi prilikom ispitivanja tvrdoće veći je broj utjecajnih faktora koje je potrebno kontrolirati kako bi se osigurala konzistentnost i preciznost ispitivanja i rezultata.

Skupine utjecajnih faktora bile bi utjecajni faktori opreme, mjerenja, materijala, mjeritelja, okoliša. Na slici 2.3. detaljnije su opisani utjecajni faktori pri ispitivanju tvrdoće.



Slika 2.3. Utjecajni faktori pri ispitivanju tvrdoće [3]

### 2.3. Odabir metode ispitivanja tvrdoće

S obzirom na iznimno velik broj metoda i mogućnosti ispitivanja tvrdoće od velik je važnosti pravilno odabrati metodu određivanja tvrdoće. Prije izbora metode ispitivanja tvrdoće potrebno je napomenuti kako materijal koji se ispituje odnosno uzorak mora biti reprezentativan. On mora vjerodostojno prikazivati cijeli dio koji se eksploatira. Također mora predstavljati mikrostrukturu traženog materijala u cijelosti, osim ako to nije drugačije navedeno.

Najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće su kao što je već navedeno Brinell, Vickers i Rockwell. Svaka od tih navedenih metoda definirana je normama gdje se detaljno i točno objašnjava postupak mjerenja tvrdoće. Svaka od tih metode ima svoje prednosti i nedostatke. Vrlo je važno dobro i pažljivo odabrati metodu mjerenje tvrdoće kako bi rezultati imali smisla i bili precizni.

Širok je spektar raznih čimbenika za odabir metode, no neki od glavnih su:

- Vrsta materijala koja se podvrgava ispitivanju
- Kompatibilnost materijala sa zahtjevima normi
- Procjena očekivane tvrdoće materijala
- Homogenost/heterogenost materijala
- Veličina strojnog dijela ili uzorka
- Potreba za fiksiranjem uzorka
- Broj uzoraka koji se moraju testirati
- Potrebna preciznost rezultata mjerenja

Uz općenite čimbenike za odabir metode ispitivanja, svaka metoda zahtjeva svoje određene dodatne čimbenike ili pak zanemaruje neke od općenitih.

Kako bi dobili što bolji uvid u raznolikost metoda ispitivanja i njihove mogućnosti tablica 2.1. prikazuje prednosti i nedostatke najčešće korištenih metoda (Brinell, Vickers, Rockwell).

**Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci najčešće korištenih metoda za ispitivanje tvrdoće [4]**

	<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<b>Brinell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lako mjerenje veličine otiska, dovoljno je mjerno povećalo</li> <li>- metoda je selektivna – mjerno područja od 0-450 jedinica za čeličnu kuglicu</li> <li>- jednostavna priprema površine – dovoljno je i grubo brušenje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ne mogu se ispitivati materijali visoke tvrdoće</li> <li>- tvrdoća je ovisna o opterećenju, pa prema „stupnju opterećenja (X)“ treba izabrati odgovarajuću silu</li> <li>- otisak je relativno velik, pa funkcionalno ili estetski nagrđuje površinu (ukoliko se tvrdoća mjeri na proizvodu, a ne na uzorku)</li> </ul>
<b>Vickers</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tvrdoća je neovisna primjenjenoj sili</li> <li>- moguće mjerenje tvrdoće i najtvrdih materijala</li> <li>- moguće je mjerenje tvrdoće vrlo tankih uzoraka te čak tvrdoće pojedinih zrna (kristala)</li> <li>- Vickersova metoda jedina je od tri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- potrebna brižljiva priprema površine uzorka na kojoj se obavlja mjerenje</li> <li>- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop</li> </ul>

	<p>navedene primjenjiva u znanstveno istraživačkom radu na području materijala</p> <p>- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu (važno pri mjerenju tvrdoće gotovih proizvoda)</p>	
<b>Rockwell</b>	<p>- mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera</p> <p>- nije potrebna brižljiva priprema mjerne površine</p>	<p>- slaba selektivnost metode. Npr. čitavo mjerno područje od 0-100 HRC (teoretski), praktički od 20-70 HRC. Stoga se ova metoda koristi najčešće u pogonima, gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima</p> <p>-nepreciznost: <math>\pm 2</math> HRC</p>

### 3. TVRDOĆA PO ROCKWELLU

Tvrdoća po Rockwellu ime je dobila po svojim izumiteljima, Hugh M. Rockwell i Stanley P. Rockwell. Braća Rockwell po zanimanju su bili metalurzi koji su radili u tvornici kugličnih ležajeva u Connecticut-u početkom 20.st. Ideja za smišljanjem novog načina mjerenja tvrdoće ležajeva došla im je iz potrebe za preciznijim i bržim ispitivanjem.

Rockwell metodu za ispitivanje tvrdoće patentirao je Stanley Rockwell 1914.god., dok je 1919. god. u patent dodao i varijante Rockwell tvrdoće. Iako uglavnom veliku većinu Rockwell testiranja predstavlja varijanta Rockwell C, uz nju postoji još 14 varijanti koje će se spomenuti kroz rad.

Zbog jednostavnosti i brze primjene ispitivanja u pogonu, Rockwell metoda počela je zamjenjivati starije metode poput Vickersove metode koja dugo traje i Brinellove metode koja je dosta razorna posebno za manje dijelove. Neke od smjernica koje su vodile braću Rockwell prilikom stvaranja nove metode ispitivanja tvrdoće su:

- Ispitivanje bi trebalo biti jednostavno i jeftino za primjenu i održavanje
- Ispitivanje mora biti što je manje moguće razarajuće po uzorak
- Potrebna je jednostavna upotreba ispitne opreme
- Provođenje ispitivanja treba biti intuitivno i lako se naučiti
- Upute za rad moraju biti što jednostavnije i razumljivije
- Rezultati ispitivanja moraju pružati kvalitetnu informaciju o tvrdoći uzorka

Kroz 106 godina primjene metode pokazala je da je ispunila sve navedene smjernice, te da će se koristiti i razvijati i dalje u budućnosti.

#### 3.1. Princip rada

Tvrdoća po Rockwellu sukladno normi HRN EN ISO 6508-1:2016 ispituje se na sobnim temperaturama. Sobne temperature nalaze se između 10°C i 35°C. Rezultati ispitivanja valjani su u tom temperaturnom gradijentu, a ukoliko dođe do bilo kakvih temperaturnih oscilacija ili se temperatura nalazi van normiranog područja obavezno je to posebno navesti u izvještaju s rezultatima.

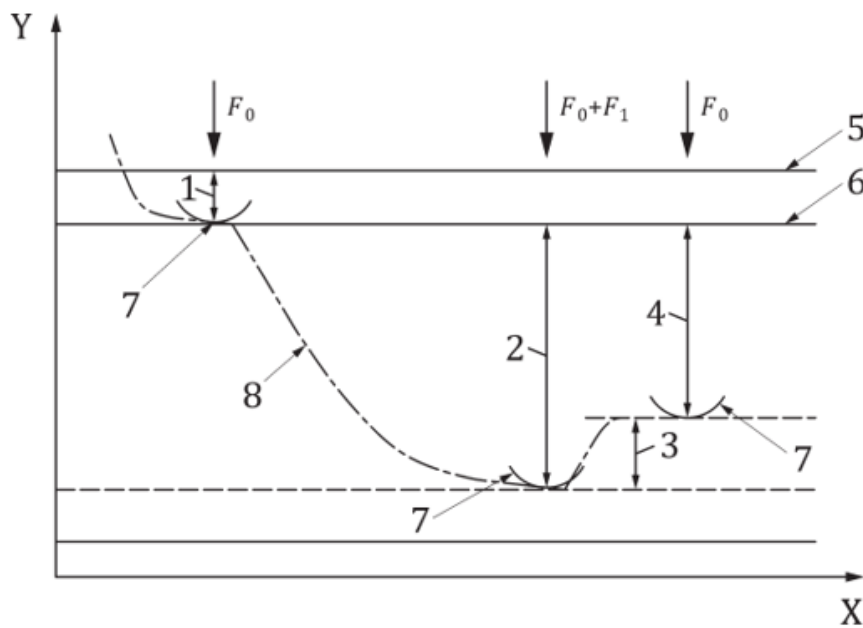
Ispitivanje započinje odabirom i postavljanjem ispitnog uzorka na ispitni uređaj (tvrdomjer). Ispitni uzorak je potrebno vrlo dobro fiksirati i pripremiti za utiskivanje indentora. Smjer utiskivanja indentora i ispitne površine potrebno je postaviti okomito.

Različiti oblici ispitnih uzoraka zahtijevaju različite površine na koje se postavljaju. Detaljnije će se opisati u poglavlju 3.4. ovog rada.

Ispitivanje se nastavlja dovođenjem indentora u kontakt s ispitnom površinom. Zatim se uzorak opterećuje silom predopterećenja ( $F_0$ ) uz oprez da tijekom cijelog ispitivanja nebi došlo do šokova, vibracija, oscilacija, te preopterećenja. Vrijeme dok se ne postigne sila predopterećenja ( $F_0$ ) ne smije preći 2s. Sukladno normi HRN EN ISO 6508-1:2016 vrijeme trajanja sile predopterećenja iznosi  $3_{-2}^{+1}$  s. 3s predstavlja idealno trajanje, a +1 i -2 gornju i donju toleranciju trajanja. U tom trenutku mjeri se dubina prodiranja indentora. Na mnogim tvrdomjerima to je potrebno napraviti od strane operatera, a na automatskim tj. digitalnim tvrdomjerima to se napravi automatski. Zatim se uzorak dodatno opterećuje silom opterećenja ( $F_1$ ) također pazeći da pritom ne dođe do vibracija, itd. Vrijeme potrebno da se uzorak optereti silom opterećenja ( $F_1$ ) ne smije biti manje od 1s niti duže od 8s. Normom definirana ukupna sila ispitivanja ( $F$ ) predstavlja zbroj sile predopterećenja ( $F_0$ ) i sile opterećenja ( $F_1$ ) mora opterećivati uzorak  $5_{-3}^{+1}$  s. Nakon definiranog vremenskog perioda rasterećuje se sila opterećenja ( $F_1$ ) s uzorka, te dok je uzorak i dalje opterećen silom predopterećenja ( $F_0$ ) nakon  $4_{-3}^{+1}$  s očitava se rezultat tvrdoće uzorka.

Slika 3.1. prikazuje postupak ispitivanja Rockwell tvrdoće po objašnjenim koracima u gornjem dijelu teksta.





X – vrijeme

Y – pozicija indentora

1 – dubina utiskivanja sa silom predopterećenja ( $F_0$ )

2 – dubina utiskivanja sa silom opterećenja ( $F_1$ )

3 – elastičan oporavak neposredno nakon rasterećenja sile opterećenja ( $F_1$ )

4 – konstantna dubina utiskivanja ( $h$ )

5 – površina uzorka

6 – referentna ravnina za mjerenje

7 – pozicija indentora

8 – krivulja dubine utiskivanja i vremena

Slika 3.1. Postupak ispitivanja Rockwell tvrdoće [5]

### 3.1.1. Razmak između mjesta utiskivanja

Razmak potreban na uzorku između mjesta utiskivanja treba iznositi tri puta promjer utiskivanja, dok razmak između centra utiskivanja i ruba uzorka treba iznositi minimalno dva i pol puta promjer utiskivanja.

### 3.1.2. Prednosti i nedostatci

Tablica 3.1. prikazuje prednosti i nedostatke ispitivanja tvrdoće po Rockwellu

**Tablica 3.1. Prednosti i nedostatci ispitivanja tvrdoće po Rockwellu**

Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> <li>- nije potrebna posebna priprema površine uzorka</li> <li>- rezultat se očitava direktno na skali, nije potrebna optička analiza</li> <li>- brzo mjerenje</li> <li>- jeftino ispitivanje i relativno jeftina oprema</li> <li>- nerazorno ispitivanje, pa se uzorak može koristiti u druge svrhe</li> <li>- proces je moguće automatizirati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- slaba selektivnost metode</li> <li>- lokacija ispitivanja mora biti bez raznih utjecaja (šokovi, vibracije, prisutnost ulja, itd.)</li> <li>- oštećenost indentora utječe na rezultate ispitivanja</li> <li>- slaba razlika između materijala s povećanim vrijednostima tvrdoće</li> </ul>

### 3.2. Različite varijante Rockwellove tvrdoće

Iznos tvrdoće po Rockwellu računa se pomoću konstantne dubine utiskivanja ( $h$ ) koristeći formulu (1)

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (1)$$

HR – tvrdoća po Rockwellu

$N$  – konstanta potpune skale, zasebna za pojedinu varijantu

$S$  – konstanta skaliranja, zasebna za pojedinu varijantu

$h$  – dubina utiskivanja

Iako kao što je u radu već napomenuto, u pravilu uvijek se rezultat tvrdoće dobiva direktno sa skale uređaja tj. sam uređaj definira vrijednost tvrdoće koja se može dobiti i po formuli (1).

Tvrdoća po Rockwellu je dogovorena, odnosno njene skale i iz tog razloga ona predstavlja isključivu karakteristiku pojedinog materijala. Vrijednost konstante potpune skale ( $N$ ) formulirana je tako da se rezultat tvrdoće lako računa. Vrijednost konstante skaliranja ( $S$ ) formulirana je tako da se dobije određena točnost rezultata tvrdoće. Kako bi tvrdoća po Rockwellu bila primjenjiva na široj skali tvrdoća postoje tj. osmišljeno je više varijanti

Rockwellove tvrdoće koje se označavaju dodatnim slovom nakon oznake za Rockwellovu tvrdoću (HR) (npr. HRA, HRB, HRC, itd.). Varijante Rockwellove tvrdoće razlikuju se po:

- Indentoru
- Silama opterećivanja
- Konstanti potpune skale
- Konstanti skaliranja

Na slici 3.2. prikazane su varijante Rockwellove tvrdoće, njihove razlike u formulama i konstantama  $N$  i  $S$ , vrsti indentora, sili predopterećenja, sili opterećenja, praktičnom mjernom području i primjeni za određene vrste materijala.

Formulacija tvrdoće	Varijanta	Oznaka	Vrsta indentora	Sila predopterećenja ( $F_0$ )	Sila opterećenja ( $F_1$ )	Praktično mjerno područje	Primjena
$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$	A	HRA	Dijamantni stožac	98.07 N	490.3 N	20 HRA to 88 HRA	Tvrdo sinterirani metali. Predstavlja HRC metodu za tanje uzorke.
$HRB = 130 - \frac{h}{0.002}$	B	HRB	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	882.6 N	20 HRB to 100 HRB	Celik, mjed, legure aluminija i bronce
$HRC = 100 - \frac{h}{0.002}$	C	HRC	Dijamantni stožac	98.07 N	1.373 kN	20 HRC to 70 HRC	Očvrnuti čelik, tvrdo lijevano željezo
$HRD = 100 - \frac{h}{0.002}$	D	HRD	Dijamantni stožac	98.07 N	882.6 N	40 HRD to 77 HRD	Celik
$HRE = 130 - \frac{h}{0.002}$	E	HRE	Kugla 3.175 mm	98.07 N	882.6 N	70 HRE to 100 HRE	Lijevano željezo, aluminij, magnezijevе legure, metali za ležajevе
$HRF = 130 - \frac{h}{0.002}$	F	HRF	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	490.3 N	60 HRF to 100 HRF	Bakrove legure, tanki limovi
$HRG = 130 - \frac{h}{0.002}$	G	HRG	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	1.373 kN	30 HRG to 94 HRG	Fosforova bronca, berilijeva bronca
$HRH = 130 - \frac{h}{0.002}$	H	HRH	Kugla 3.175 mm	98.07 N	490.3 N	80 HRH to 100 HRH	Aluminij, cink, olovo
$HRK = 130 - \frac{h}{0.002}$	K	HRK	Kugla 3.175 mm	98.07 N	1.373 kN	40 HRK to 100 HRK	Metali za ležajevе, metali niske tvrdoće
$HR15N = 100 - \frac{h}{0.001}$	15N	HR15N	Dijamantni stožac	29.42 N	117.7 N	70 HR15N to 94 HR15N	Tanji i manji uzorci od HRA
$HR30N = 100 - \frac{h}{0.001}$	30N	HR30N	Dijamantni stožac	29.42 N	264.8 N	42 HR30N to 86 HR30N	
$HR45N = 100 - \frac{h}{0.001}$	45N	HR45N	Dijamantni stožac	29.42 N	411.9 N	20 HR45N to 77 HR45N	
$HR15T = 100 - \frac{h}{0.001}$	15T	HR15T	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	117.7 N	67 HR15T to 93 HR15T	Tanji i manji uzorci od HRF
$HR30T = 100 - \frac{h}{0.001}$	30T	HR30T	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	264.8 N	29 HR30T to 82 HR30T	
$HR45T = 100 - \frac{h}{0.001}$	45T	HR45T	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	411.9 N	10 HR45T to 72 HR45T	

Slika 3.2. Varijante Rockwellove tvrdoće i njihove razlike [6]

Na slici 3.2. vrijednosti sila iskazane su u njutnima [N], no bitno je za napomenuti da se u praksi također koristi i jedinica kilopond [kp]. Kilopond je stara mjerna jedinica za silu točnije objašnjeno 1 kp predstavlja 1 kg pomnožen s gravitacijskim ubrzanjem, stoga 1 kp iznosi 9,807 N. S obzirom na to da vrijednosti sila na slici 3.2. izgledaju dosta nepraktično, one preračunate u kiloponde [kp] su okrugli brojevi.

### **3.2.1. Zapisivanje i tumačenje rezultata mjerenja**

Rezultati mjerenja Rockwell tvrdoće zapisuju se tako da se prvo stavi vrijednost tvrdoće, zatim simbol Rockwell tvrdoće i njegove varijante po kojoj se provodilo ispitivanje. Slijedi par primjera zapisivanja i tumačenja rezultata Rockwell tvrdoće.

65 HRC – tvrdoća po Rockwellu, varijanta C u iznosu 65

Napomena: detaljne informacije o pojedinim varijantama dane su na slici 3.2.

90 HRH – tvrdoća po Rockwellu, varijanta H u iznosu 90

50 HR30N – tvrdoća po Rockwellu varijanta 30N u iznosu 50

### **3.3. Oprema potrebna za mjerenje Rockwell tvrdoće**

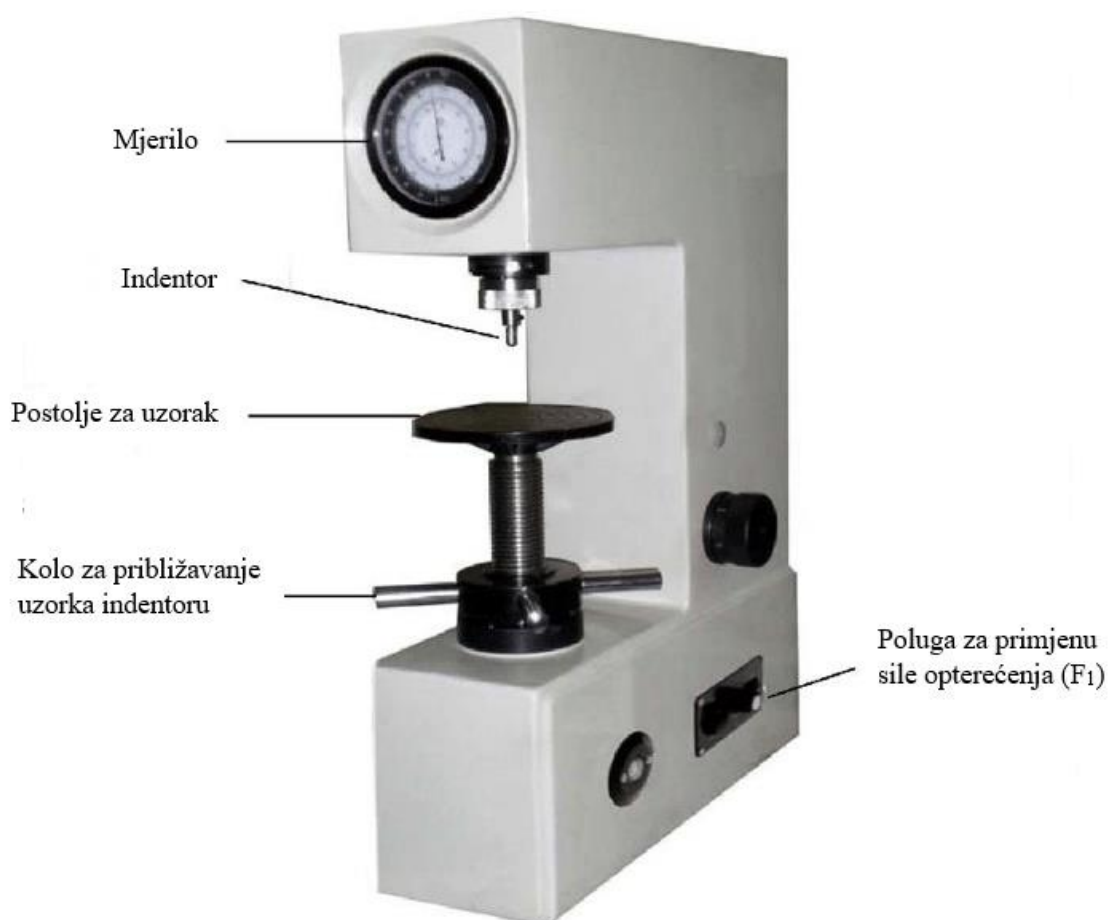
Osnovne komponente svakog tvrdomjera su mehanizam za ostvarivanje odgovarajuće sile opterećivanja i dio za mjerenje duljine otiska ili dubine prodiranja indentora u ispitni uzorak. Prema ovomu, u daljnjem tekstu kao osnovne komponente tvrdomjera smatrat će se sustav za opterećivanje i sustav za mjerenje koji su najčešće povezani u jedan sklop (tvrdomjer). [2]

Konstrukcija, funkcioniranje dijelova kao sklop i stanje u kojem se nalazi tvrdomjer od najveće su važnosti za dobivanje preciznih rezultata. Svi problemi koje može sadržavati tvrdomjer dodatno su naglašeni kod Rockwell metode ispitivanja. Neki od problema svih tvrdomjera neovisno o metodi su trenje (povećano trenje kod primjene sile ili između indentora i uzorka), zračnosti u dosjedima, neokomitost indentora i uzorka, svojstva indentora, uležištenje indentora, točnost sustava mjerenja.

Rockwell tvrdomjer mora biti u mogućnosti primjenjivati sile opterećivanja barem po jednoj varijanti ili pak više njih. Također Rockwell tvrdomjer mora biti sukladan normi HRN EN ISO 6508-2:2015.

Svi navedeni problemi tvrdomjera kod ispitivanja tvrdoće kod metode po Rockwellu oni su dodatno naglašeni. Točnost sustava mjerenja kod Rockwell metode je iznimno bitan jer jedna jedinica na Rockwell skali iznosi pomak indentora od  $2\ \mu\text{m}$ , dok kod površinskih mjerenja  $1\ \mu\text{m}$ . Svi ostali problemi izraženiji su iz razloga vremenskog ograničenja opterećivanja silama. Također kod Rockwell varijanti ispitivanja s dijamantnim stošcem kao indentorom vrlo je bitna njegova točna izrada zbog varijacija u rezultatu.

Slika 3.3. prikazuje tipičan izgled tvrdomjera za ispitivanje Rockwellove tvrdoće s označenim dijelovima uređaja, dok slika 3.4. prikazuje mjerilo na Rockwell tvrdomjerima za B i C varijantu ispitivanja. Danas uz analogne postoje i digitalni tvrdomjeri.



Slika 3.3. Rockwell tvrdomjer [7]



Slika 3.4. Mjerilo Rockwell tvrdomjera [8]

Indentori kod Rockwell ispitivanja su kuglica tvrdog metala određenog promjera (1,5875 mm ili 3,175 mm) u skladu s normom HRN EN ISO 6508-2:2015. Uz kuglicu češće korišten indentor je i dijamantni stožac. Dijamantni stožac također podliježe normi HRN EN ISO 6508-2:2015. Kut stošca mora biti  $120^\circ \pm 0,17^\circ$ , dok radijus srha mora iznositi 0,2 mm. Oblik i dimenzije indentora bitno je točno definirati jer geometrijska i negeometrijska svojstva indentora utječu na njegovu tvrdoću i prodornost.

### 3.4. Ispitni uzorak

Ispitivanje tvrdoće materijala važno je dobro provesti naravno ne samo radi određivanja tvrdoće nego i drugih napomenutih svojstava iz nje. Iz tog razloga veoma je bitno dobro odabrati ispitni uzorak i konkretno mjesto mjerenja tvrdoće. Ispitni uzorak mora biti reprezentativan i dostojan predstavnik materijala ili strojnog dijela za koji se ispituje tvrdoća.

Važnost i velika prednost Rockwell ispitivanja je gotovo ne uništavanje proizvoda, pa kao što je u radu već navedeno ono se može provoditi na poluproizvodima ili čak gotovim proizvodima.

Naravno kao i puno različitih faktora jedan od velikih je i ispitni uzorak. Na ispitivanje utječe prvenstveno njegova debljina (za dublje utiskivanje potreban je deblji uzorak), tanji uzorci

skloni su pucanju prilikom rukovanja njima, kvaliteta površine također ima veliki utjecaj. U pravilu propisana debljina ispitnog uzorka sukladno normi HRN EN ISO 6508-1:2016 mora biti minimalno 10 puta dubina utiskivanja s dijamantrnim indentorom i 15 puta dubina utiskivanja s kugličnim indentorom. Minimalne debljine uzorka dane su u 3.4.1. poglavlju ovog rada.

Iako za Rockwell test nije potrebna posebna priprema površine uzorka ona zahtjeva određene uvjete. Površina uzorka mora biti glatka i ravna; bez oksida, stranih materijala, lubrikanata, itd.

Za mjerenje tvrdoće koriste se razni oblici i dimenzije uzorka pa se sukladno tome razvio veliki broj različitih vrsti postolja za njihovo fiksiranje prilikom ispitivanja. Neke varijante postolja prikazane su na slici 3.5.

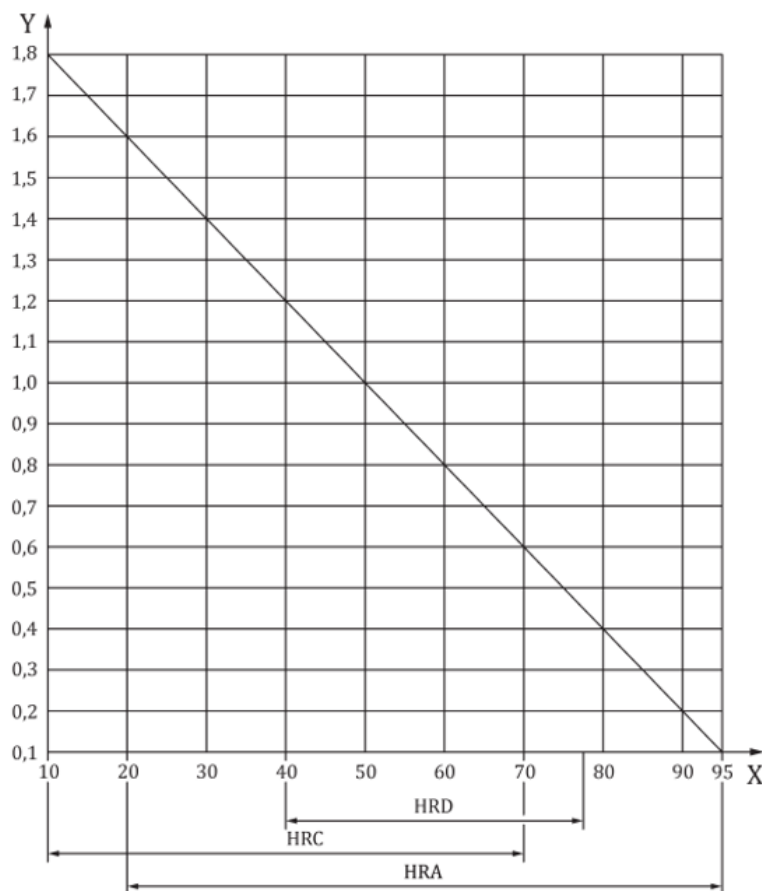


Slika 3.5. Varijante postolja za ispitne uzorke [9]

### 3.4.1. Minimalna debljina ispitnog uzorka u odnosu na varijantu Rockwell testa

Iako postoji glavno načelo debljine uzorka već napomenuto u 3.4. poglavlju ovog rada svaka varijanta Rockwell ispitivanja postavlja određene vrijednosti debljine ispitnih uzoraka. Naravno govori se o debljini ispitnog uzorka, a ukoliko je riječ o gotovom proizvodu ili poluproizvodu to se odnosi na debljinu ispod utiskivanja.

Slika 3.6. prikazuje minimalnu debljinu uzorka s dijamantrnim indenterom za varijante A,C,D.



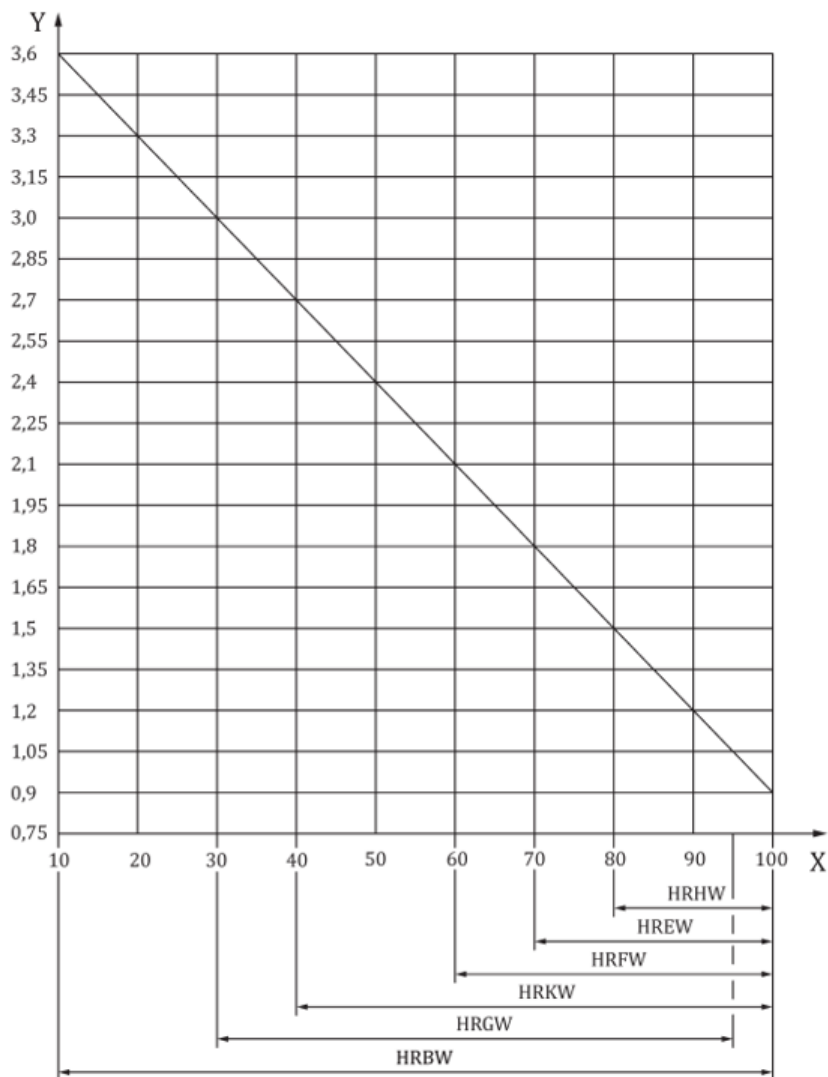
X – Rockwellova tvrdoća

Y – minimalna debljina ispitnog uzorka, mm

Slika 3.6. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante A,C,D) [5]

Slika 3.7. prikazuje minimalnu debljinu uzorka s kugličnim indenterom za varijante B, E, F, G, H, K.





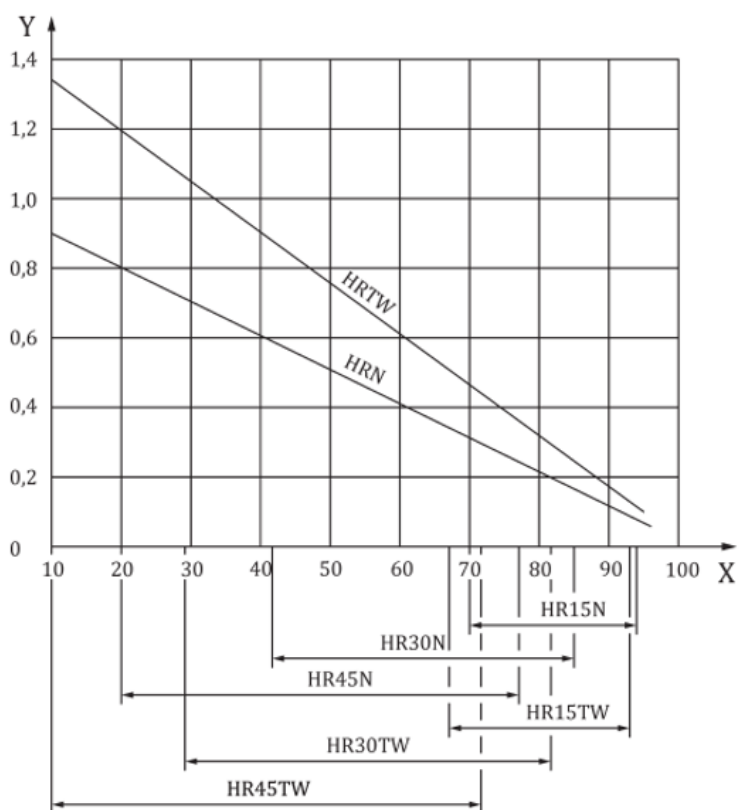
X – Rockwellova tvrdoća

Y – minimalna debljina ispitnog uzorka, mm

W – oznaka za kuglicu od volfram karbida

Slika 3.7. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante B, E, F, G, H, K) [5]

Slika 3.8. prikazuje minimalnu debljinu uzorka za varijante N i T.



X – Rockwellova tvrdoća

Y – minimalna debljina ispitnog uzorka, mm

W – oznaka za kuglicu od volfram karbida

Slika 3.8. Minimalna debljina ispitnog uzorka (varijante N, T) [5]

## 4. PROVJERAVANJE I UMJERAVANJE ISPITNIH UREĐAJA I REFERENTNIH PLOČICA

Provjeravanje i umjeravanje od ključne su važnosti gdje god postoje mjerenja. U strojarskoj praksi provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja provodi se oduvijek. Ono omogućava točan, precizan rad uređaja i dobivanje rezultata na koje se inženjeri mogu osloniti. Daje povjerenje korisnicima i poduzećima u rezultate koje nadziru, zapisuju i kontroliraju.

Umjeravanje predstavlja proces usporedbe očitavanja određenog ispitnog uređaja s drugim ispitnim uređajem ili opremom koja je već umjerena ili podešena na određeni set parametara. Umjeravani uređaj tj. oprema mora biti mjerno slijediva normi i dogovorenoj referenci.

Točnost i kvaliteta mjerenih vrijednosti definirane su umjeravanjem opreme. S vremenom točnost i preciznost rezultata mjerenja skloni su „odlutati“. Iz svih navedenih razloga postoji izrazito bitna potreba za održavanjem i provjeravanjem opreme, a ujedno i umjeravanje kroz radni vijek. Primarni cilj umjeravanja je smanjenje mjerne nesigurnosti kroz kvantificiranje i kontrolu pogrešaka ili nesigurnosti u procesu mjerenja do prihvatljive razine.

Ponovljivost umjeravanja dogovara se i definira normama. Duljina trajanja intervala do ponovnog umjeravanja ovisi o velikom broju čimbenika. No, neki od najvažnijih su mjerna nesigurnost, frekvencija korištenja, način korištenja, okolišni uvjeti, te stabilnost opreme. Zaključno, troškove i vrijeme umjeravanja opreme treba shvatiti kao dobro ulaganje kako u budućnosti potencijalno loši rezultati ne bi doveli poduzeće do ogromnih troškova ili havarije.

### 4.1. Važnost sljedivosti umjeravanja

Sljedivost umjeravanja i mjerenja tvrdoće važno je kao i sva druga mjerenja u strojarstvu. Sva mjerenja i umjeravanja se razlikuju, no svi dijele istu stvar. Ono što je svima isto i najbitnije je povezanost i postupna evaluacija kroz više njih sve do primarnog etalona za određenu namjenu.

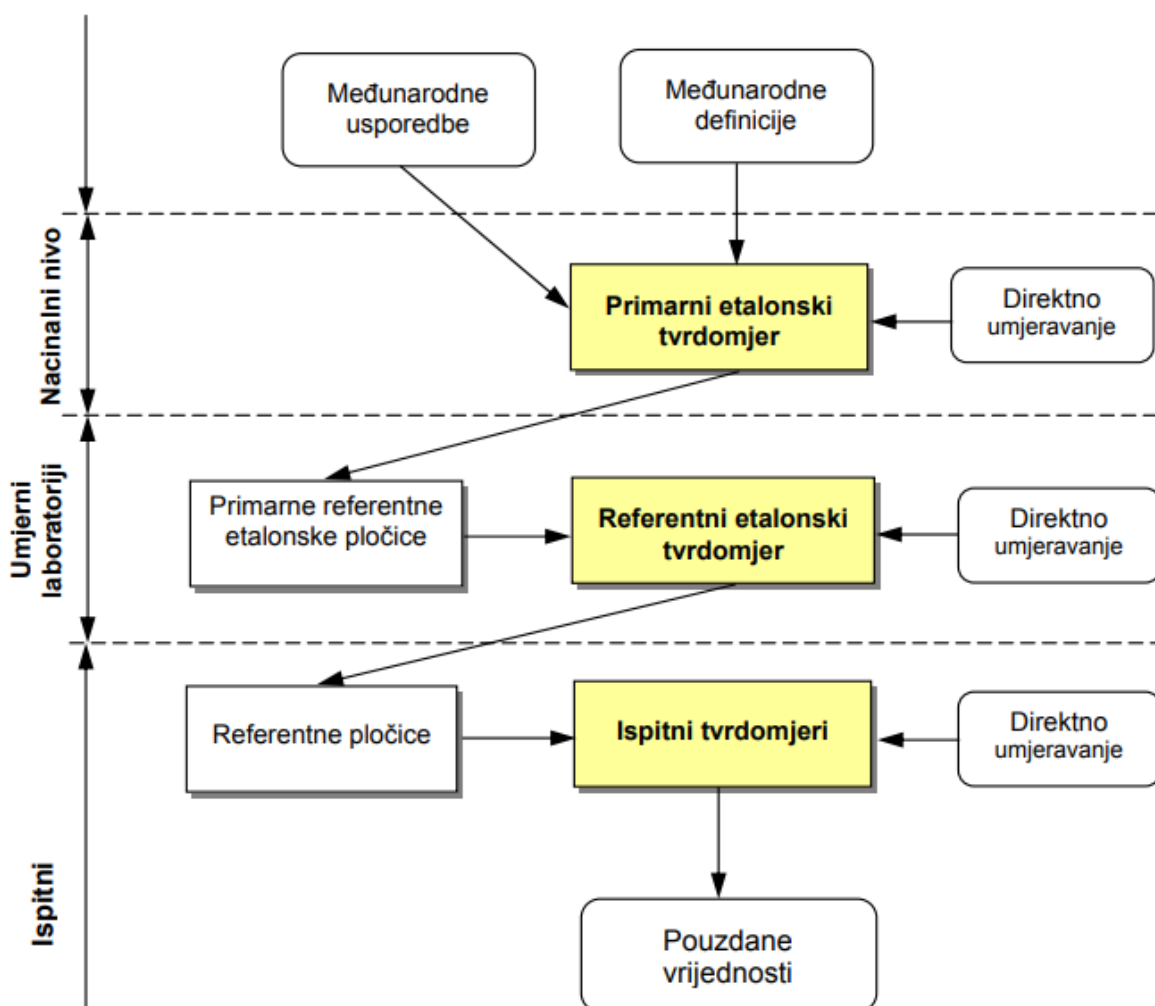
Područje skala tvrdoće zasnovano je na tri osnovna elementa [2]:

- a) **Definicija skale tvrdoće:** Opis mjerne metode, odgovarajuće tolerancije veličina koje su uključene i ograničavajući uvjeti okoline.
- b) **Referentni uređaj za mjerenje tvrdoće:** Metrološki uređaji, koji materijaliziraju definiciju skale tvrdoće. Treba razlikovati primarne etalone tvrdoće, koji utvrđuju

najbolju moguću realizaciju definicije skale tvrdoće i referentne etalone tvrdoće, koji se koriste pri proizvodnji referentnih pločica tvrdoće.

- c) **Referentna pločica tvrdoće:** Može se razlikovati između primarnih etalonskih pločica za tvrdoću - umjeranih putem primarnih etalona i koje se koriste kada je zahtijevana najveća točnost, napr. za verifikaciju i umjeravanje referentnih etalona tvrdoće i referentnih pločica za tvrdoću - namijenjenih pretežno za verificiranje i umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera.

Povezanost mjerenja i umjeravanja naziva se metrološki niz ili mjerna sljedivost. Strukturu metrološkog niza bitnu za definiranje skale tvrdoće vidimo na slici 4.1.



Slika 4.1. Mjerna sljedivost za mjernu veličinu tvrdoća [2]

Metrološki niz započinje na međunarodnoj razini s definicijom tvrdoće po raznim metodama i varijantama. Na nacionalnom nivou on se nastavlja kroz seriju standardiziranih uređaja odnosno primarni etalonski tvrdomjer. Uz standardizirane ispitne uređaje postoje i standardizirane referentne pločice tvrdoće koje se koriste za umjerne laboratorije. Umjerni laboratoriji vrše umjeravanje i kontrolu ispitnih laboratorija i uređaja, te na kraju se dobivaju pouzdane vrijednosti ispitivanih tvrdoća. Preciznost svih standardiziranih uređaja tj. tvrdomjera na svim metrološkim nivoima postiže se direktnim umjeravanjem na najvišem nivou i usporedbama mjerenja na nacionalnom nivou. Svaki prijenos rezultata s jednog nivoa na drugi povećava mjernu nesigurnost. Zato se kod tvrdoće metrološki niz najviše oslanja na referentne pločice iz nivoa umjernih laboratorija. Iz tog razloga glavni zahtjevi koji proizlaze za referentne pločice su stabilnost tijekom vremena i jednoobraznost ispitne površine pločice.

Razne organizacije provode umjeravanja sukladno metrološkom nizu. Npr. nacionalni metrološki institut, akreditirani mjerni laboratoriji, „in-house“ umjerni laboratoriji. U svakom koraku metrološkog nivoa standardi mjerenja koriste se za umjeravanje ispitnih uređaja sljedećeg koraka.

Mjerna sljedivost točnije struktura i organizacija metrološkog niza za mjernu veličinu tvrdoća odnosi se na sve metode i varijante ispitivanja tvrdoće i veoma je važno pridržavati se dogovorenog niza.

#### **4.2. Umjeravanje ispitnog uređaja (tvrdomjera)**

Kao što je već napomenuta važnost umjeravanja radi kvalitetnih rezultata, ono kod tvrdomjera omogućuje odgonetavanje njegove mjerne devijacije. U slučaju tvrdomjera utvrđuje se i relacija kvantitativnih vrijednosti standardiziranih mjerenih rezultata i onih mjernih rezultata dobivenih od strane tvrdomjera. Pod umjeravanje tvrdomjera također se podrazumijeva i definiranje mjerne nesigurnosti uređaja prilikom prikazivanja rezultata.

Umjeravanje i provjeravanje ispitnog uređaja sukladno normi HRN EN ISO 6508-2:2015 vrlo je važno za daljnje kvalitetno razmatranje umjeravanja referentnih pločica. Zbog položaja umjeravanja referentnih pločica u metrološkom nizu ispod umjeravanja ispitnog uređaja potrebno je osigurati točan i precizan rad ispitnog uređaja.

Uz sve tehničke i legalne razloge umjeravanja tvrdomjera postoji i pet osnovnih razloga, a to su:

1. Postizanje i prikazivanje metrološkog niza
2. Osiguranje konzistentnih rezultata mjerenja s drugim vrstama mjerenja
3. Određivanje točnosti i preciznosti mjerenja
4. Utvrđivanje pouzdanosti u uređaj i rezultate mjerenja
5. Točno i precizno umjeravanje referentnih pločica za korištenje u praksi sa što manjom mjernom nesigurnošću.

Od osnovne je važnosti osigurati razlog pod rednim brojem 1. čija je važnost i struktura objašnjena u poglavlju 4.1. ovog rada. Razlog pod rednim brojem 1. povlači za sobom važnost razloga pod rednim brojem 5. koji je bitan u praksi, a ujedno i vrlo bitan za ovaj rad.

Postupak umjeravanja tvrdomjera i stabilnost skale tvrdoće se u osnovi potvrđuje ovim postupkom za umjeravanje i to u dva koraka sukladno normi HRN EN ISO 6508-2:2015:

- a) Direktna metoda umjeravanja - osigurava da tvrdomjeri funkcioniraju pravilno, shodno definiciji tvrdoće i uzimajući u obzir odgovarajuće parametre. [2]
- b) Indirektna metoda umjeravanja s etalonskim pločicama tvrdoće - obuhvaća provjeru karakteristika tvrdomjera kao cjeline. [2]

### **4.3. Umjeravanje referentnih pločica**

Referentne etalonske pločice za metodu Rockwell koriste se za više raznih stvari. Neke od njih su godišnja provjera i umjeravanje tvrdomjera, povremeno provjeravanje kvalitete rada tvrdomjera, referentni početni položaj za umjeravanje prijenosnih tvrdomjera za potrebe terenskog ispitivanja, prijenos normom određenih vrijednosti iz umjernih laboratorija na sljedeći nivo metrološkog niza. Zbog njihove spomenute važnosti koju imaju za smanjivanje mjerne nesigurnosti u metrološkom nizu kao što je već napomenuto u 4.1. poglavlju ovog rada referentnim pločicama se pridaje velik zadatak i imaju veliku važnost.

#### **4.3.1. *Zahjevi, važnost i proizvodnja referentnih pločica***

Važnost i zadatak referentnih pločica stavlja na njih puno zahtjeva kako za materijal od kojih su načinjeni tako i za proizvodnju adekvatnih primjeraka istih.

Zahtjevi na kvalitetu referentnih pločica odnose se naravno na nužnu homogenost, stabilnost mikrostrukture, površinsku kvalitetu i najbitnije ujednačenost vrijednosti tvrdoće po cijeloj površini pločice. Svi zahtjevi i način proizvodnje definirani su normom HRN EN ISO 6508-3:2015.

Normom nije definirana konkretna metoda proizvodnje referentnih pločica, no napomenuto je da se obavezno koristi proces koji će omogućiti sve zahtjeve koji se odnose na njihovu proizvodnju. Ti zahtjevi su naravno već i spomenuti:

- Homogenost
- Stabilnost strukture
- Određena površinska kvaliteta
- Ujednačenost tvrdoće na površini i cijeloj referentnoj pločici

S obzirom na važnost koju referentne pločice imaju moraju se proizvoditi, koristiti i služiti isključivo u svrhu zadatka referentne pločice za tvrdoću po metodi Rockwell. Norma HRN EN ISO 6508-3:2015 propisuje točan izgled referentnih pločica tj. uvjete koje one moraju zadovoljavati. Oni su:

1. Svaka referentna pločica tvrdoće mora biti deblja od 6 mm. Za smanjenje efekta promjene tvrdoće s većim brojem utiskivanja, trebaju se koristiti deblje pločice. [11]
2. Referentna pločica ne smije biti feromagnetična. Preporučeno je da proizvođač osigura da pločice koje su napravljene od čelika budu demagnetizirane na kraju procesa proizvodnje (prije umjeravanja). [11]
3. Odstupanje od površinske ravnosti gornje i donje površine referentne pločice mora biti  $\leq 0,01$  mm. Donja površina pločice ne smije biti konveksna. Odstupanje od paralelnosti gornje i donje površine mora biti  $\leq 0,02$  mm na 50 mm dužine. [11]
4. Ispitna površina i donja površina moraju biti bez oštećenja kao npr. udubljenja, ogrebotina, oksidnih slojeva, itd. Ona mogu utjecati na rezultate utiskivanja. Površinska hrapavost ( $R_a$ ), ne smije prijeći 0,0003 mm za ispitnu površinu i 0,0008 mm za donju površinu. Duljina provjere hrapavosti iznosi  $l=0,8$  mm. [11]

### 4.3.2. Postupak umjeravanja

Umjeravanje referentnih pločica tvrdoće za metodu Rockwell definirano je normom HRN EN ISO 6508-3:2015. Za sve varijante Rockwell tvrdoće ista je provedba umjeravanja referentnih pločica, dok za varijante HRN i HRTW postoje dodatni zahtjevi navedeni u normi.

Prvenstveno je važno reći da umjeravanje referentnih pločica tvrdoće ne može biti valjano bez prethodnog kvalitetnog umjeravanja ispitnog uređaja sukladno normi HRN EN ISO 6508-2:2015.

Par uvjeta mora biti ispunjeno prije početka umjeravanja. Temperatura u laboratoriju prilikom ispitivanja mora biti unutar tolerancije ( $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ), a da pritom ne postoje njene nagle oscilacije koje bi prelazile  $1\text{ °C}$ . Brzina indentora kada dolazi u kontakt s površinom referentne pločice ne smije prelaziti  $1\text{ mm/s}$ , te brzina indentora kada dođe u kontakt s površinom indentora ne smije prelaziti  $0,3\text{ mm/s}$ .

Početak umjeravanja vrši se dovođenjem indentora u kontakt s ispitnom površinom referentne pločice i primjenjivanja sile predopterećenja ( $F_0$ ) (napomena: bez oscilacija, vibracija, šokova, itd.). Vrijeme postizanja sile predopterećenja ( $T_a$ ) ne smije biti dulje od  $2\text{ s}$ . Zatim se primjenjuje sila opterećenja ( $F_1$ ) u vremenskom intervalu  $7_{-6}^{+1}\text{ s}$ . Vrijeme trajanja ukupne sile ispitivanja mora se nalaziti u vremenskom intervalu  $(5 \pm 1)\text{ s}$ . Konačno, očitavanje vrijednosti tvrdoće referentne pločice provodi se nakon rasterećenja sile opterećenja ( $F_1$ ) u vremenskom intervalu od  $(4 \pm 1)\text{ s}$ .

Vremena izvođenja objašnjene operacije definirana su formulom (2):

$$T_p = T_a / 2 + T_{pm} = (3 \pm 1)\text{ s} \quad [11] \quad (2)$$

$T_p$  – vrijeme djelovanja sile predopterećenja

$T_a$  – vrijeme postizanja sile predopterećenja

$T_{pm}$  – vrijeme proteklo od početka primjene sile predopterećenja neposredno do mjerenja inicijalne dubine utiskivanja. [11]

Vrijeme djelovanja sile predopterećenja je vrijeme trajanja sile predopterećenja nakon njene uspostave. Dok vrijeme postizanja sile predopterećenja predstavlja vrijeme potrebno da se postigne sila predopterećenja nakon što ju se počelo primjenjivati.



Ukoliko je vrijeme  $T_a$  unutar 1 s može se smatrati jednakim vremenom  $T_{pm}$ . [11]

Na svakoj referentnoj pločici potrebno je napraviti minimalno pet utiskivanja, ujednačeno raspoređena po ispitnoj površini. Aritmetička sredina vrijednosti tvrdoća karakterizira tvrdoću referentne pločice. Za smanjenje mjerne nesigurnosti potrebno je provesti više od pet utiskivanja. [11]

#### 4.3.2.1. Ujednačenost tvrdoće

Ujednačenost tvrdoće za referentne pločice veoma je bitna. Zato što vrijednosti tvrdoće referentnih pločica moraju biti ujednačene kako bi sačuvale važnost metrološkog niza.

Normom se definira dozvoljena ne-ujednačenost tvrdoće referentnih pločica koju one ne smiju prijeći. Kao što je već napomenuto aritmetička sredina pet ili više utiskivanja predstavlja vrijednost tvrdoće referentne pločice. Dok je ne-ujednačenost pojedine referentne pločice definirana formulom (3):

$$R = H_n - H_l \quad [11] \quad (3)$$

$R$  – ne-ujednačenost tvrdoće referentne pločice

$H_n$  – najveća vrijednost tvrdoće od svih utiskivanja (u pravilu  $H_5$  zbog petog utiskivanja)

$H_l$  – najmanja vrijednost tvrdoće od svih utiskivanja

Maksimalna dopuštena ne-ujednačenost tvrdoće za pojedinu varijantu Rockwell tvrdoće prikazana je slikom 4.2.

Rockwell tvrdoća	Maksimalna dopuštena vrijednost ne-ujednačenosti tvrdoće, R
A	0,015 (100 - $\bar{H}$ ) or 0,4 HRA Rockwell jedinice
B	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HRBW Rockwell jedinice
C	0,010 (100 - $\bar{H}$ ) or 0,4 HRC Rockwell jedinice
D	0,010 (100 - $\bar{H}$ ) or 0,4 HRD Rockwell jedinice
E	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HREW Rockwell jedinice
F	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HRFW Rockwell jedinice
G	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HRGW Rockwell jedinice
H	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HRHW Rockwell jedinice
K	0,020 (130 - $\bar{H}$ ) or 1,0 HRKW Rockwell jedinice
15N, 30N, 45N	0,020 (100 - $\bar{H}$ ) or 0,6 HR-N Rockwell jedinice
15T, 30T, 45T	0,030 (100 - $\bar{H}$ ) or 1,2 HR-TW Rockwell jedinice

Slika 4.2. Maksimalna dopuštena ne-ujednačenost tvrdoće [11]

#### 4.3.3. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost referentnih pločica tvrdoće računa se i definira nakon provedbe svih potrebnih ispitivanja vezana za njihovo umjeravanje.

Nakon pet utiskivanja i mjerenja tvrdoće na referentnoj pločici potrebno je napraviti sljedeće:

1. Izračunati aritmetičku sredinu mjerenja ( $\bar{H}_{CRM}$ )\*
2. Izračunati standardnu devijaciju mjerenja ( $S_{HCRM}$ )
3. Izračunati doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovanj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice ( $u_{HCRM}$ ) po formuli (4):

$$u_{HCRM} = \frac{t^* S_{HCRM}}{\sqrt{n}} \quad [11] \quad (4)$$

gdje n predstavlja broj utiskivanja (najčešće 5) i t koeficijent sukladan normi ISO/IEC Guide 98-3:2008 i iznosi 1,14.

4. Izračunati doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovan rezolucijom ispitnog uređaja ( $u_{ms}$ ) po formuli (5):

\* CRM označava „certified reference material“ u izrazima

$$u_{ms} = \frac{1}{2\sqrt{3}} * \delta_{ms} \quad [11] \quad (5)$$

gdje  $\delta_{ms}$  predstavlja rezoluciju ispitnog uređaja.

5. Potrebno je imati vrijednost odstupanja ispitnog uređaja ( $b_{HCM}$ ) i nesigurnost odstupanja ( $u_{HCM}$ ) definiranu i izračunatu kroz proces indirektnog umjeravanja ispitnog uređaja.
6. Pomoću formule (6) određuje se mjerna nesigurnost referentne pločice tvrdoće

$$u_{CRM} = k * \sqrt{u_{HCM}^2 * u_{ms}^2 * u_{HCM}^2} \quad [11] \quad (6)$$

$u_{CRM}$  – mjerna nesigurnost referentne pločice tvrdoće u tolerancijskom polju  $\bar{H} \pm u_{CRM}$

$\bar{H}$  – aritmetička sredina mjerenja

$k$  – faktor pokrivanja ( $k=1$ ; standardna mjerna nesigurnost), ( $k=2$ ; proširena mjerna nesigurnost)

#### 4.3.4. Označavanje referentnih pločica

Svaka referentna pločica tvrdoće treba sadržavati [11]:

- a) Aritmetičku sredinu vrijednosti tvrdoće dobivene umjeravanjem. Npr. 66,3 HRC
- b) Ime ili oznaku dobavljača ili proizvođača
- c) Serijski broj
- d) Ime ili oznaku umjernog laboratorija
- e) Debljinu pločice, ili identifikacijsku oznaku na ispitnoj površini
- f) Godina umjeravanja, ukoliko nije navedena serijskim brojem

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio sastoji se od umjeravanja referentnih pločica tvrdoće po metodi HRC, provedbe svih potrebnih prethodnih ispitivanja, te analize rezultata i sposobnosti tvrdomjera za umjeravanje referentnih pločica. Sav eksperimentalni dio provodio se po HRC metodi mjerenja tvrdoće.

### 5.1. Plan ispitivanja

Eksperimentalni dio rada uključuje više koraka provedbe. Neki koraci odnose se na pripremu umjeravanja referentnih pločica, dok se dio odnosi direktno na umjeravanje referentnih pločica. Naravno u konačnici veoma je važno dati valjanu analizu rada, te konkretne zaključke.

Plan ispitivanja sastoji se od par koraka:

1. Određivanje uvjeta prilikom ispitivanja i karakterističnog vremena ispitivanja
2. Provjera sila ispitivanja
3. Umjeravanje referentnih pločica
4. Analiza rezultata

Prvi dio ispitivanja sastojao se od određivanja parametara okoline potrebnih za ispitivanje sukladno normi HRN EN ISO 6508-1:2016 kao npr. temperatura, gravitacijsko ubrzanje, nadmorska visina laboratorija. Uz parametre okoline kroz provedbu par inicijalnih ispitivanja utvrđivano je vrijeme trajanja pojedinih opterećenja po HRC metodi.

Nakon čega se uz pomoć dinamometra mjerila sila ispitivanja radi provjere istih te važnosti za sljedeći korak ispitivanja. Ostale provjere na uređaju nisu provedene jer je uređaj nov i za njega su dani certifikati.

Umjeravanje referentnih pločica bio je preposljednji dio ispitivanja pred analizu rezultata. Provodilo se sukladno normi HRN EN ISO 6508-3:2015 na tri pločice.

Posljednji dio eksperimenta predstavlja analizu rezultata dobivenih u prethodnim koracima, određivanja tj. procjene mjerne nesigurnosti umjeravanja referentnih pločica i definiranja parametara koji prikazuju sposobnost tvrdomjera za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće.

## 5.2. Pregled opreme korištene prilikom ispitivanja

Sva oprema korištena tijekom ispitivanja je inventar Fakulteta strojarstva i brodogradnje te se nalazi u Laboratoriju za mehanička ispitivanja svojstava. Oprema za prvi dio ispitivanja koje uključuje mjerenje temperature i vremena opterećivanja pojedinim silama su termometar i štoperica. Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava ima ugrađen termometar na kojem se očitava vrijednost temperature.

Najvažniji dio opreme za provedena ispitivanja je dakako tvrdomjer. Sva mjerenja provedena su na njemu s dijamantnim indentorom po metodi HRC.

Podatci o tvrdomjeru prikazanom na slici 5.1.:

- Proizvođač: Indentec, UK
- Vrsta: ZHR 8150 TKS
- Serijski broj: 206057
- Praktično mjerno područje: (20-70) HRC
- Rezolucija: 0,01 HRC
- Vrsta pokazivača: digitalni
- Vrsta pogona za podizanje i spuštanje postolja: pneumatika
- Masa uređaja: 102 kg
- Godina proizvodnje: 2020
- Država proizvodnje: Ujedinjeno Kraljevstvo
- Certifikat o umjerenosti uređaja izdao: UKAS, UK



Slika 5.1. Tvrdomjer Indentec ZHR 8150 TKS

Slika 5.2. prikazuje digitalni pokazivač na tvrdomjeru Indentec ZHR 8150 TKS.




Slika 5.2. Digitalni pokazivač tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS

Prije početka govora o radu tvrdomjera bitno je za napomenuti kako njegov softver sam vrši inicijalna ispitivanja. Inicijalno ispitivanje provodi nakon svakog mijenjanja uzorka u postolju radi provjere materijala i samoprovjere funkcioniranja.

Na tvrdomjeru se nalazio pričvršćen dijamantni indentor sljedećih podataka:

- Umjerni laboratorij: UKAS, UK
- Oznaka umjeravanja: 35442
- Serijski broj: 20233
- Datum prve ugradnje: 10.06.2020.

Na sljedećim slikama prikazani su certifikati vezani za indentor, sile i pločice. Slika 5.3. prikazuje certifikat o umjeravanju dijamantnog stošca gdje su vidljiva odstupanja vršnog kuta i radijusa. Slika 5.4. prikazuje izmjerene sile ispitivanja tvrdomjera. Slika 5.5. prikazuje dobivene vrijednosti tvrdoće na primarnim etalonima.

CERTIFICATE OF CALIBRATION																																																			
ISSUED BY : <b>STAR INDUSTRIAL TOOLS LIMITED</b>		MECHANICAL MEASUREMENTS LABORATORY																																																	
ISSUE DATE : 10 June 2020	SERIAL NUMBER : 35442																																																		
		<b>Star Industrial Tools Ltd.</b> 42 Westfield Road Kings Heath Birmingham B14 7ST																																																	
		Page 1 of 1 <b>APPROVED SIGNATORY</b> JW CHANDLER JJ SHEPPARD PD SHEPPARD																																																	
Telephone : 0121 444 4354	Fax : 0121 441 1838	email : sales@starindustrialtools.co.uk																																																	
<b>CUSTOMER :</b>		<b>INDENTEC HARDNESS TESTING M/C LTD.</b> UNIT 30 NAVIGATION DRIVE HURST BUSINESS PARK, BRIERLEY HILL WEST MIDS, DY9 1UT																																																	
<b>ON BEHALF OF :</b>																																																			
<b>IDENTIFICATION :</b>		20233																																																	
<b>DATE OF CALIBRATION :</b>		10/06/2020																																																	
<b>CALIBRATION METHOD :</b>		The above diamond indenter has been directly and indirectly verified (using reference blocks) in the Star Industrial Tools Ltd. laboratory to the standards defined in BS EN ISO 6508-3:2015, clause 6.2, and meets all of the geometrical and performance requirements for a Class A indenter, complying with ASTM E18-19, clause A.3.5. It is certified for use for both the regular and superficial Rockwell diamond scales. The tolerances should not be reduced by the uncertainty (BS EN ISO 6508-3:2015, A.1 Annex A) and as the instruments used meet the accuracies in ASTM E18-19, Table A3.5, results within the tolerances stated are acceptable (ASTM E18-19 A3.6.4.1).																																																	
<b>DIRECT VERIFICATION :</b>																																																			
<table border="1"> <tr><td>RADIUS 1</td><td>0.1992 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 2</td><td>0.1945 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 3</td><td>0.1951 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 4</td><td>0.2008 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 5</td><td>0.1982 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 6</td><td>0.1934 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 7</td><td>0.1956 mm</td></tr> <tr><td>RADIUS 8</td><td>0.2065 mm</td></tr> </table>	RADIUS 1	0.1992 mm	RADIUS 2	0.1945 mm	RADIUS 3	0.1951 mm	RADIUS 4	0.2008 mm	RADIUS 5	0.1982 mm	RADIUS 6	0.1934 mm	RADIUS 7	0.1956 mm	RADIUS 8	0.2065 mm	<table border="1"> <tr><td>ANGLE 1</td><td>119.875°</td></tr> <tr><td>ANGLE 2</td><td>119.92°</td></tr> <tr><td>ANGLE 3</td><td>119.989°</td></tr> <tr><td>ANGLE 4</td><td>119.902°</td></tr> <tr><td>ANGLE 5</td><td>119.903°</td></tr> <tr><td>ANGLE 6</td><td>119.831°</td></tr> <tr><td>ANGLE 7</td><td>119.947°</td></tr> <tr><td>ANGLE 8</td><td>119.899°</td></tr> </table>	ANGLE 1	119.875°	ANGLE 2	119.92°	ANGLE 3	119.989°	ANGLE 4	119.902°	ANGLE 5	119.903°	ANGLE 6	119.831°	ANGLE 7	119.947°	ANGLE 8	119.899°	<table border="1"> <tr><td>RAD MIN</td><td>0.1934 mm</td></tr> <tr><td>RAD MAX</td><td>0.2065 mm</td></tr> <tr><td>RAD MEAN</td><td>0.1979 mm (see * below)</td></tr> <tr><td>POLISH</td><td>0.8 mm (&gt;0.3 mm) see ##</td></tr> <tr><td>STRAIGHTNESS</td><td>0.5 µm (&lt;0.5 µm) see #</td></tr> <tr><td>FLANK LENGTH</td><td>0.8 mm (&gt;0.4 mm) see ##</td></tr> <tr><td>ANGLE MEAN</td><td>119.908° (120° ± 0.1°)</td></tr> <tr><td>CONE AXIS</td><td>0.24° (&lt;0.3°)</td></tr> </table>	RAD MIN	0.1934 mm	RAD MAX	0.2065 mm	RAD MEAN	0.1979 mm (see * below)	POLISH	0.8 mm (>0.3 mm) see ##	STRAIGHTNESS	0.5 µm (<0.5 µm) see #	FLANK LENGTH	0.8 mm (>0.4 mm) see ##	ANGLE MEAN	119.908° (120° ± 0.1°)	CONE AXIS	0.24° (<0.3°)	
RADIUS 1	0.1992 mm																																																		
RADIUS 2	0.1945 mm																																																		
RADIUS 3	0.1951 mm																																																		
RADIUS 4	0.2008 mm																																																		
RADIUS 5	0.1982 mm																																																		
RADIUS 6	0.1934 mm																																																		
RADIUS 7	0.1956 mm																																																		
RADIUS 8	0.2065 mm																																																		
ANGLE 1	119.875°																																																		
ANGLE 2	119.92°																																																		
ANGLE 3	119.989°																																																		
ANGLE 4	119.902°																																																		
ANGLE 5	119.903°																																																		
ANGLE 6	119.831°																																																		
ANGLE 7	119.947°																																																		
ANGLE 8	119.899°																																																		
RAD MIN	0.1934 mm																																																		
RAD MAX	0.2065 mm																																																		
RAD MEAN	0.1979 mm (see * below)																																																		
POLISH	0.8 mm (>0.3 mm) see ##																																																		
STRAIGHTNESS	0.5 µm (<0.5 µm) see #																																																		
FLANK LENGTH	0.8 mm (>0.4 mm) see ##																																																		
ANGLE MEAN	119.908° (120° ± 0.1°)																																																		
CONE AXIS	0.24° (<0.3°)																																																		
Tolerance = 0.193 to 0.207mm, uncertainty = 0.004mm		Tolerance = 120° ± 0.17°, uncertainty = 0.05°																																																	
<b>INDIRECT VERIFICATION :</b>		Rad uncertainty = 0.004mm, * uncertainty = 0.05°																																																	
		# uncertainty = 0.26 µm ## uncertainty = 10 µm																																																	
		* Mean Radius tolerance = 0.2mm ± 0.0005mm																																																	
<table border="1"> <tr><td colspan="2"><b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b></td></tr> <tr><td>HRC 22-26</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>HRC 52-58</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>HRC 60-65</td><td>0.3</td></tr> </table>	<b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b>		HRC 22-26	0.4	HRC 52-58	N/A	HRC 60-65	0.3	<table border="1"> <tr><td colspan="2"><b>UNCERTAINTY (TOLERANCE)</b></td></tr> <tr><td>± 0.37 (0.4)</td><td>± 0.18 (0.3)</td></tr> <tr><td>N/A</td><td>± 0.27 (0.3)</td></tr> <tr><td>± 0.31 (0.3)</td><td>N/A</td></tr> </table>	<b>UNCERTAINTY (TOLERANCE)</b>		± 0.37 (0.4)	± 0.18 (0.3)	N/A	± 0.27 (0.3)	± 0.31 (0.3)	N/A	<table border="1"> <tr><td colspan="2"><b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b></td></tr> <tr><td>HR15N 88-94</td><td>-0.3</td></tr> <tr><td>HR30N 60-69</td><td>-0.2</td></tr> <tr><td>HR45N 40-46</td><td>N/A</td></tr> </table>	<b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b>		HR15N 88-94	-0.3	HR30N 60-69	-0.2	HR45N 40-46	N/A																									
<b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b>																																																			
HRC 22-26	0.4																																																		
HRC 52-58	N/A																																																		
HRC 60-65	0.3																																																		
<b>UNCERTAINTY (TOLERANCE)</b>																																																			
± 0.37 (0.4)	± 0.18 (0.3)																																																		
N/A	± 0.27 (0.3)																																																		
± 0.31 (0.3)	N/A																																																		
<b>DIFFERENCE FROM MASTER :</b>																																																			
HR15N 88-94	-0.3																																																		
HR30N 60-69	-0.2																																																		
HR45N 40-46	N/A																																																		
The expanded uncertainty was carried out in accordance with UKAS requirements and based on a standard uncertainty multiplied by K=2 (95% coverage). Approved Signatory : <i>PD Sheppard</i> Calibrations made at : 23°C +/- 5°C BS EN ISO 6508-3:2015 clause 4, recommends that this indenter's performance should be verified within 12 months.																																																			
This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to the SI system of units and/or to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national metrology institutions. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.																																																			

Slika 5.3. Certifikat o umjeravanju dijamentnog stošca



# CERTIFICATE OF CALIBRATION

ISSUED BY: INDENTEC HARDNESS TESTING MACHINES LTD

DATE OF ISSUE: 22-June-2020 CERTIFICATE No: 37415 DR



0232

**Zwick / Roell**  
**Indentec**

Unit 30, Navigation Drive,  
Hurst Business Park  
Brierley Hill, West Midlands.  
England, DY5 1UT  
tel: +44 (0)1384 484070 fax: (0)1384 481074  
http://www.indentec.com  
sales@indentec.com

PAGE 1 OF 2 PAGES

APPROVED SIGNATORY

Name: **Mark Troman**

Signature:

Manufacturer:	<b>Indentec Ltd.</b>	Type:	<b>8150TKT</b>	Customer:	<b>Ebert doo.</b>
Description:	<b>Rockwell Hardness Tester</b>	Serial Number	<b>206057</b>	Address:	<b>Dimičeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija.</b>
Date of Calibration:	<b>22 June 2020</b>	Year of Manufacture:	<b>2020</b>	Calibrated At Indentec.*	

The above referenced Rockwell hardness testing machine has been directly verified to the requirements of BS EN ISO 6508-3:2015 and ASTM E18:19.

This direct verification has been carried out using calibrated force and depth measuring systems together with a calibrated stopwatch and thermometer.

### Results of Force Verification: Newtons

Force (Kg)	Force	1	2	3	Mean (N)	Mean (Kg)	Error (N)	Tolerance +/-	Unc	Unc (%)
10	98.07	98.14	98.16	98.11	98.13	10.007	+0.07	0.20	0.21	0.22
60	588.40	588.14	588.26	588.24	588.21	59.981	-0.19	0.59	1.28	0.22
10	98.07	98.14	98.18	98.12	98.15	10.008	+0.08	0.20	0.22	0.22
10	98.07	98.10	98.14	98.15	98.13	10.007	+0.06	0.20	0.22	0.22
100	980.67	981.08	979.81	981.08	980.66	100.000	-0.01	0.98	2.29	0.23
10	98.07	98.08	98.16	98.17	98.14	10.007	+0.07	0.20	0.22	0.22
10	98.07	98.14	98.07	98.17	98.13	10.006	+0.06	0.20	0.22	0.22
150	1471.00	1471.24	1471.36	1471.36	1471.32	150.033	+0.32	1.47	3.19	0.22
10	98.07	98.17	98.09	98.19	98.15	10.008	+0.08	0.20	0.22	0.22
Superficial										
3	29.42	29.43	29.44	29.44	29.44	3.002	+0.02	0.06	0.06	0.22
15	147.10	147.11	147.13	147.13	147.12	15.003	+0.02	0.15	0.32	0.22
3	29.42	29.44	29.44	29.45	29.45	3.003	+0.03	0.06	0.06	0.22
3	29.42	29.43	29.44	29.45	29.44	3.002	+0.02	0.06	0.06	0.22
30	294.20	294.17	294.19	294.16	294.17	29.997	-0.03	0.29	0.64	0.22
3	29.42	29.44	29.44	29.45	29.45	3.003	+0.03	0.06	0.06	0.22
3	29.42	29.42	29.43	29.44	29.43	3.001	+0.01	0.06	0.07	0.22
45	441.30	441.07	441.10	441.09	441.09	44.978	-0.21	0.44	0.96	0.22
3	29.42	29.44	29.44	29.45	29.44	3.002	+0.02	0.06	0.06	0.22
Load Cell										
500N	E48331	2003014	2003014A	10/03/2020	0157					
2000N	D13986	2003015	2003015A	09/03/2020	0157					

Temperature at time of Calibration: 23 °C

\* Note: If the machine is moved, the machine is to be recalibrated.

The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a calculated coverage factor  $k$ , providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty valuation has been carried out in the accordance with UKAS requirements.

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to the SI system of units and/or to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national metrology institutes. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

TMF01F

Slika 5.4. Izmjerene sile ispitivanja tvrdomjera

# CERTIFICATE OF CALIBRATION

ISSUED BY: INDENTEC HARDNESS TESTING MACHINES LTD

DATE OF ISSUE: 22-June-2020 CERTIFICATE No: 37415 IR



**Zwick / Roell**  
**Indentec**

Unit 30, Navigation Drive,  
Hurst Business Park  
Brierley Hill, West Midlands.  
England, DY5 1UT  
tel: +44 (0)1384 484070 fax: (0)1384 481074  
http://www.indentec.com  
sales@indentec.com

PAGE 1 OF 1 PAGES

APPROVED SIGNATORY

Name: **Mark Trojan**

Signature:

Manufacturer:	<b>Indentec Ltd.</b>	Type:	<b>8150TKT</b>	Customer:	<b>Ebert doo.</b>
Description:	<b>Rockwell Hardness Tester</b>	Serial Number	<b>206057</b>	Address:	
Date of Calibration:	<b>22 June 2020</b>	Year of Manufacture:	<b>2020</b>	Calibrated At Indentec.*	<b>Dimičeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija.</b>

The above Rockwell testing machine has been indirectly verified to the requirements of BS EN ISO 6509-2:2015 and ASTM E18:19.

#### Associated UKAS indenters.

	Serial No	Lab No	Certificate No	Date Of Calibration	Angle	Angle Unc	Radius(mm)	Radius Unc (mm)
Diamond Indenter	20233	0131	35442	10 June 2020	119.908	0.1	0.1979	0.003
1/16" Ball	M-01289	0232	37313	19 March 2020	N/A	N/A	0.15875 +/- .001	0.00065
1/16" Ball Holder	A6205	0232	37314	19 March 2020	N/A	N/A	N/A	N/A
1/8" Ball								
1/8" Ball Holder								

The indirect results for the above testing machine for REPEATABILITY and ERROR are reported in the table below:

The verification was made using UKAS certified hardness blocks and UKAS certified indenters, or other blocks recognised by UKAS.

Hardness Scale	Block Serial Number	Specified Hardness	As Found	Results					Mean Reading	ERROR	Repeatability	Uncertainty HR	K=
				1	2	3	4	5					
HRC	Z80520D	61.6		61.15	61.18	61.12	61.14	61.21	61.16	-0.5	0.1	0.31	2.25
HRC	Z45937F	46.6		46.55	46.53	46.55	46.63	46.41	46.53	-0.1	0.2	0.32	2.20
HRC	Z25644F	26.0		26.38	26.32	26.39	26.25	26.21	26.31	+0.3	0.2	0.37	2.21
HRBW	AZ90283C	91.2		91.19	91.19	91.30	91.40	91.21	91.26	+0.1	0.2	0.50	2.28
HRBW	1774742	70.4		70.59	70.46	70.89	71.05	70.91	70.78	+0.3	0.6	0.87	2.32
HRBW	1776866	39.9		40.16	40.56	40.03	40.40	40.66	40.36	+0.4	0.6	1.36	2.28
HR30N	Z80502D	78.5		78.58	78.55	78.76	78.58	78.75	78.64	+0.2	0.2	0.40	2.20
HR30N	Z45789B	64.4		64.41	64.41	64.34	64.18	63.94	64.20	-0.2	0.5	0.40	2.20
HR30N	Z25167D	46.9		46.52	46.60	46.76	46.52	46.36	46.55	-0.4	0.4	0.55	2.21
HR30TW	AZ90348C	76.5		76.14	76.41	76.04	76.33	76.25	76.23	-0.3	0.4	0.80	2.25
HR30TW	1241958	64.6		64.62	64.02	64.48	64.36	64.04	64.30	-0.3	0.6	0.80	2.43
HR30TW	1532063	46.5		46.34	46.49	46.35	46.48	46.06	46.34	-0.1	0.4	0.90	2.21

Reported values do not take into account the direct verification values from the hardness machine.

Temperature at time of Calibration: 23 °C

This indirect verification of the testing machine becomes invalid if an indenter that does not have a UKAS certificate of calibration is subsequently used in the machine.

The direct verification certificate for the above referenced hardness testing machine is:

Serial No: 37415 DR Date of Issue: 22 June 2020

\* Note: If the machine is moved, the machine is to be recalibrated.

In accordance with the requirements of ISO 17025:2017 sections 7.1.3 and 7.6.6 (decision rules),

the pass/fail criteria are the tolerances specified in the relevant standard and do not include uncertainty contributions.

The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a calculated coverage factor k, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty valuation has been carried out in the accordance with UKAS requirements.

End of report.

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to the SI system of units and/or to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national metrology institutes. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

TMF01F

Slika 5.5. Dobivene vrijednosti tvrdoće na primarnim etalonima

### 5.3. Ispitivanja i provjera referentnog tvrdomjera

Za valjano umjeravanje referentnih pločica tvrdoće po metodi HRC potrebno je napraviti više koraka. Uz potrebne korake potrebno je i utvrditi i zapisati uvjete okoline tj. uvjete unutar laboratorija. Sva ispitivanja kao što je već navedeno provodila su se u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

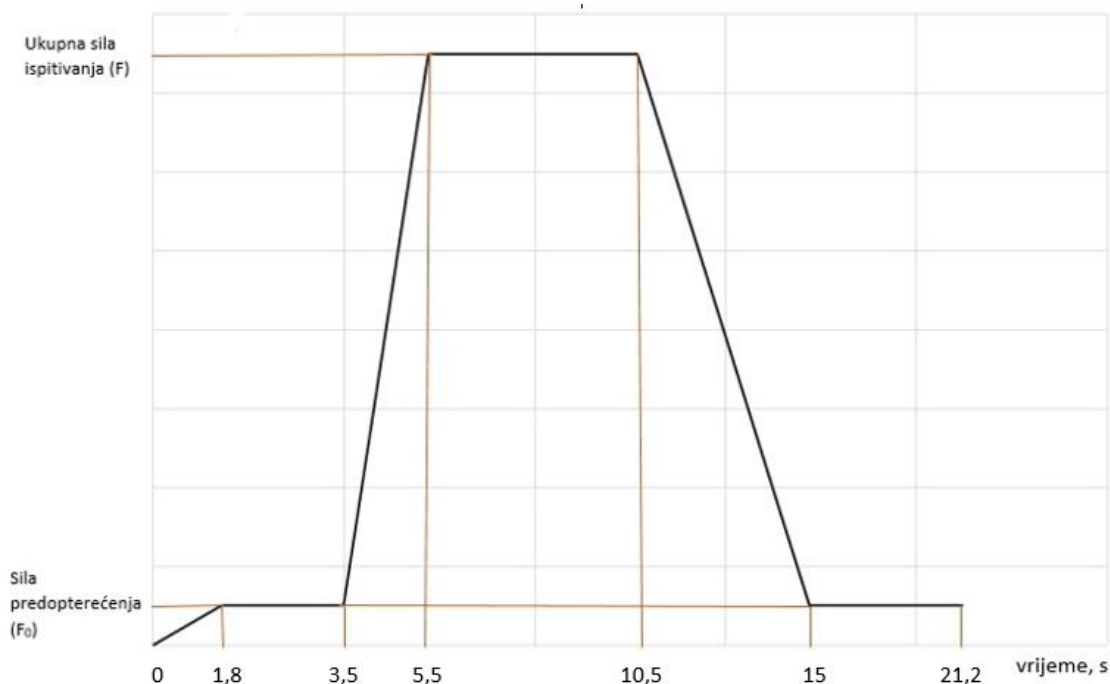
Uvodno je potrebno utvrditi nadmorsku visinu, gravitacijsko ubrzanje i temperaturu Laboratorija. Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava već ima definirane te vrijednosti. Na slici 5.6. strelicom je označena mjedena točka koja se nalazi na sredini sobe za ispitivanje, a iza nje ujedno vidimo i tvrdomjer na kojem su provedena ispitivanja. Točno u njoj podatci bitni za ispitivanja i od prije definirani od strane osoblja Laboratorija i Fakulteta su:

- $h = 114,267$  m (nadmorska visina Laboratorija)
- $g = 9,80663337$  ms<sup>-2</sup> (gravitacijsko ubrzanje Laboratorija)
- $v = 23,3$  °C (temperatura u Laboratoriju)



Slika 5.6. Označena točka s poznatim podacima o Laboratoriju

Nakon definiranja podataka o Laboratoriju sljedeći korak pripreme za umjeravanje sastojao se od određivanja vremenskog intervala djelovanja sila prilikom ispitivanja. Za valjani prikaz vremenskog intervala izvršena su tri ispitivanja na pločici prilikom čega su se pratila vremena opterećivanja. Dobivena ovisnost djelovanja i postizanja sila ispitivanja o vremenu prikazana su grafom na slici 5.7.

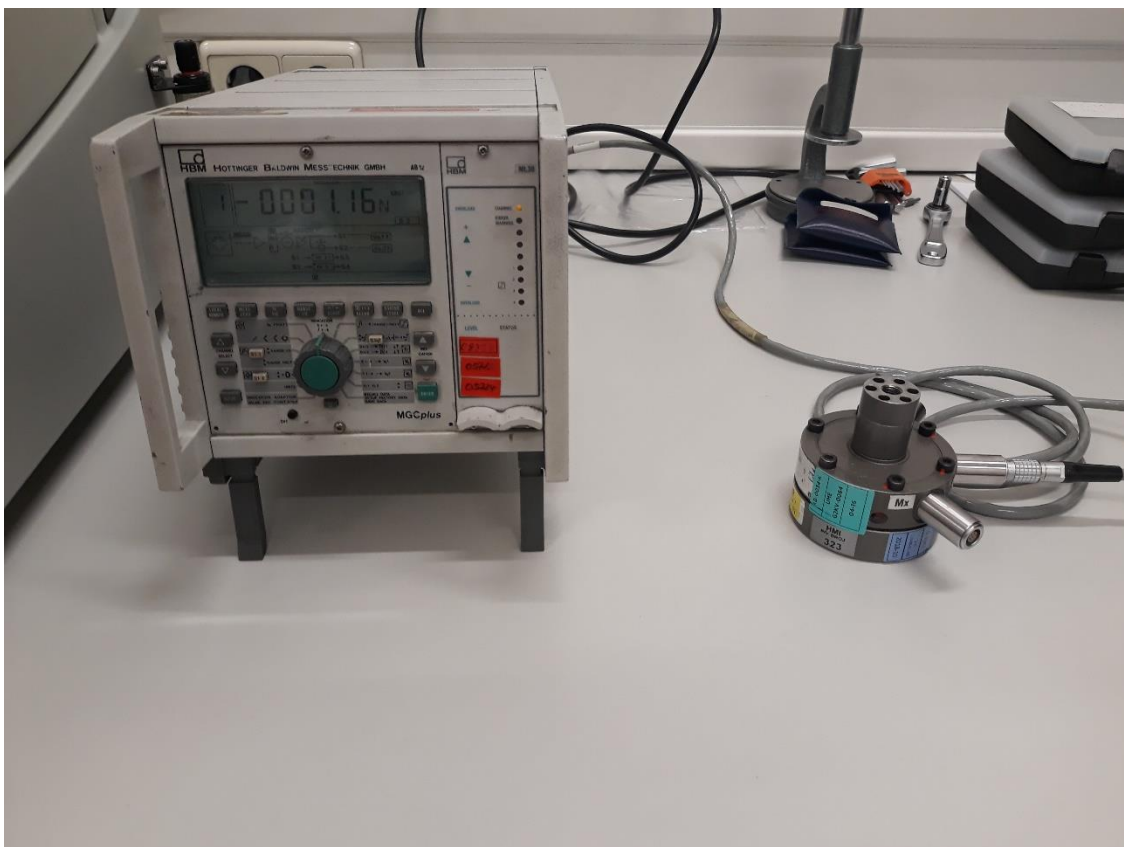


Slika 5.7. Graf ovisnosti djelovanja i postizanja sila ispitivanja o vremenu

Vremena koja su bitna i koja su se pratila, a možemo ih iščitati iz grafa na slici 5.7. su:

- vrijeme postizanja sile predopterećenja ( $F_0$ ) – iznosi 1,8 s
- vrijeme djelovanja sile predopterećenja ( $F_0$ ) – iznosi 1,7 s
- vrijeme postizanja ukupne sile ispitivanja ( $F$ ) tj. nadodavanje sile opterećenja ( $F_1$ ) – iznosi 2 s
- vrijeme djelovanja ukupne sile ispitivanja ( $F$ ) – iznosi 5 s
- vrijeme rasterećenja sile opterećenja ( $F_1$ ) – iznosi 4,5 s
- vrijeme provedeno do izbacivanja rezultata mjerenja na display-u uređaja – iznosi 6,2s

Uz tvrdomjer kao najvažniji dio opreme korišten je i dinamometar za provjeru sila u drugom dijelu ispitivanja. Uz dinamometar za prikupljanje podataka tj. signala dobivenih dinamometrom koristilo se mjesto pojačalo proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; model MGCplus AB12. Mjesto pojačalo i dinamometar prikazani su slikom 5.8.



Slika 5.8. Mjerno pojačalo i dinamometar

Prije ispitivanja sila provedeno je pet mjerenja na tri različite pločice iz početnog, srednjeg i krajnjeg praktičnog mjernog područja. Od svih pločica su izračunate srednje vrijednosti kao referenca. Na svakoj od pločica provedena su tri ispitivanja tj. provjere sila ispitivanja pomoću dinamometra i mjernog pojačala prikazanih na slici 5.8.

Dinamometar korišten za ispitivanje sila sastoji se od ćelija osjetljivih na tlak. Pritiskanjem ćelija određenom silom čelično tijelo dinamometra deformira se elastično. Takva njegova elastična deformacija utječe na električni sklop unutar dinamometra stvarajući minijaturan električni otpor. Takav otpor registrira mjerno pojačalo i prikazuje ga kao osjetljivost u jedinici mV/V nakon čega se takav podatak pomoću formule (7) pretvara u njegovu ekvivalentnu vrijednost izraženu u N.

$$F = 2498,509 * x + 1,085 * x^2 - 1,4316 * x^3 \quad (7)$$

$x$  – iznos osjetljivosti dinamometra [mV/V]

$F$  – sila [kN]

Sile koje su se provjeravale su sila predopterećenja ( $F_0$ ) koja idealno tj. teorijski iznosi 98,07 N (10 kp), zatim ukupna sila ispitivanja ( $F$ ) koja iznosi 1471,00 N (150 kp), te povratak na silu predopterećenja ( $F_0$ ) nakon rasterećenja sile opterećenja ( $F_1$ ) u iznosu od 1373,00 N (140 kp).

Pločice na kojima se provodila provjera sila imale su iznos tvrdoća 22,70 HRC; 47,86 HRC i 64,30 HRC.

Tablica 5.1. prikazuje rezultate provjere sila ispitivanja pločice 1 srednje vrijednosti tvrdoće 22,70 HRC.

**Tablica 5.1. Provjera sila ispitivanja kod pločice 1**

Srednja vrijednost tvrdoće pločice 1, HRC	Referentne vrijednosti sila, N	1. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	2. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	3. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	Srednja vrijednost provjerenih sila ispitivanja, N	Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine
22,70	98,07	98,17	98,14	98,12	98,14	0,073
	1471,00	1471,13	1471,18	1471,16	1471,16	0,156
	98,07	98,12	98,09	98,04	98,08	0,033

Tablica 5.2. prikazuje rezultate provjere sila ispitivanja pločice 2 srednje vrijednosti tvrdoće 47,86 HRC.

**Tablica 5.2. Provjera sila ispitivanja kod pločice 2**

Srednja vrijednost tvrdoće pločice 2, HRC	Referentne vrijednosti sila, N	1. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	2. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	3. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	Srednja vrijednost provjerenih sila ispitivanja, N	Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine
47,86	98,07	98,12	98,12	98,12	98,12	0,05
	1471,00	1471,23	1471,23	1471,43	1471,30	0,296
	98,07	98,04	98,04	98,09	98,06	0,026

Tablica 5.3. prikazuje rezultate provjere sila ispitivanja pločice 3 srednje vrijednosti tvrdoće 64,30 HRC.

**Tablica 5.3. Provjera sila ispitivanja kod pločice 3**

Srednja vrijednost tvrdoće pločice 3, HRC	Referentne vrijednosti sila, N	1. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	2. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	3. provjera vrijednosti sila ispitivanja, N	Srednja vrijednost provjerenih sila ispitivanja, N	Prosječno odstupanje od aritmetičke sredine
64,30	98,07	98,12	98,14	98,14	98,13	0,063
	1471,00	1471,43	1471,43	1471,41	1471,42	0,423
	98,07	98,09	98,07	98,07	98,08	0,007

Provjeravane sile zadovoljavaju kriterije, te se ispitivanje može nastaviti tj. započeti umjeravanje referentnih pločica tvrdoće po metodi HRC.

Umjeravanje referentnih pločica tvrdoće provodilo se na tri pločice. Pločice su nabavljene od strane MPA NRW, Njemačka. Izrađene su u skladu sa zahtjevima norme HRN EN ISO 6508-3:2015. Za umjeravanje koristile su se tri pločice s tvrdoćama koje se nalaze približno na početku, sredini i kraju praktičnog mjernog područja HRC metode radi bolje analize provedene dalje u radu. Na svakoj pločici sukladno zahtjevima norme provedeno je pet mjerenja. Rezultati mjerenja prikazani su tablicom 5.4.



**Tablica 5.4. Rezultati mjerenja na referentnim pločicama**

	1. mjerenje, HRC	2. mjerenje, HRC	3. mjerenje, HRC	4. mjerenje, HRC	5. mjerenje, HRC
Pločica 1	24,48	24,70	24,59	24,86	24,56
Pločica 2	39,52	39,40	39,30	39,45	39,52
Pločica 3	61,69	61,76	61,59	61,51	61,69

Umjeravanje referentnih pločica tvrdoće završava nakon procjene mjerne nesigurnosti u sljedećem poglavlju ovog rada.

Na slici 5.9. vidi se konkretan trenutak u kojem se provodilo utiskivanje indentora u referentnu pločicu za potrebe umjeravanja. Prilikom utiskivanja pazilo se na konstantnost uvjeta u Laboratoriju. Konstantnost uvjeta podrazumijevala je kontinuiranu provjeru temperature unutar Laboratorija, obraćanje pozornosti kako na tvrdomjer nebi utjecali razni vanjski faktori (npr. šokovi, vibracije, oscilacije,...). Uz kontinuiranu provjeru okolnih uvjeta od velike važnosti bilo je i praćenje ispitivanja točnije utiskivanja indentora kako nebi došlo do pogreške samog ispitnog uređaja. Ukoliko se pojavila bilo kakva sumnja u rezultat ili u sam proces ispitivanja rezultat bih bio zanemaren, te bi se provelo ponovno utiskivanje radi dobivanja novog valjanog rezultata.

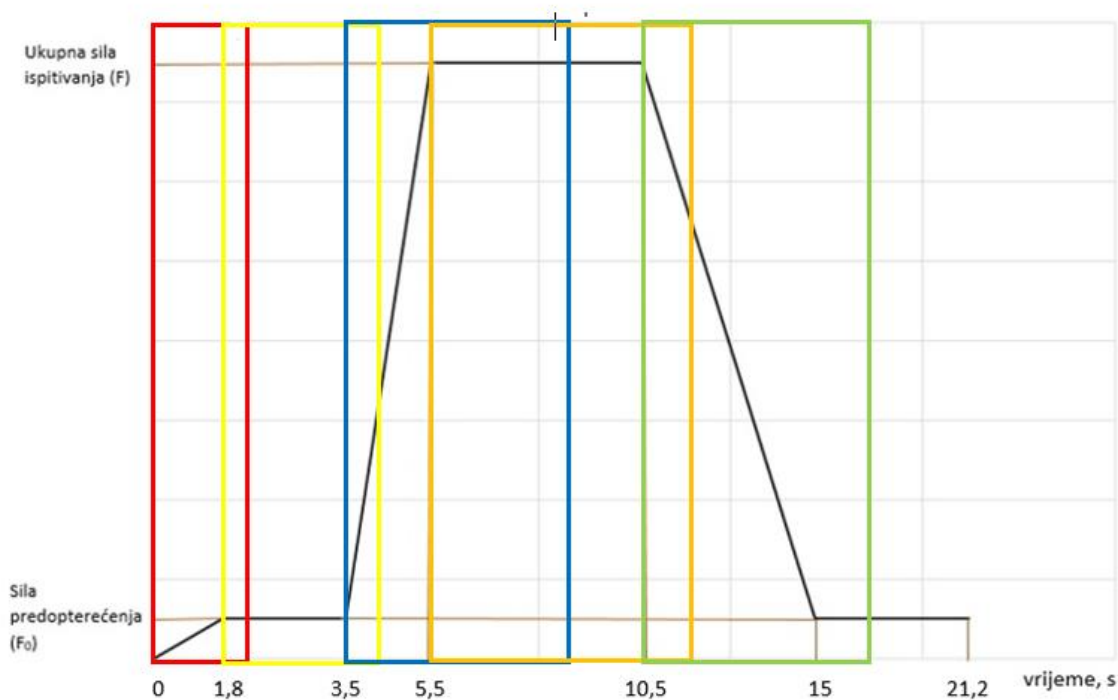


Slika 5.9. Trenutak utiskivanja indentora u pločicu prilikom umjeravanja

## 6. ANALIZA REZULTATA

Analiza rezultata ovog rada obuhvaća zaključivanje i usporedbu dobivenih podataka prilikom pripreme za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće te podrazumijeva procjenu mjerne nesigurnosti pojedine pločice. Nakon procjene mjerne nesigurnosti podatci su statistički obrađeni kako bi se donijeli zaključci o kvaliteti izrade referentnih pločica tvrdoće te o sposobnosti tvrdomjera za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće.

Početni dio pripreme za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće bio je provjera vremena ispitivanja tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS. Mjerenjem vremena i prikazivanjem rezultata grafom na slici 5.7. zaključeno je kako su sva vremena sukladna propisanim vrijednostima unutar norme HRN EN ISO 6508-3:2015.



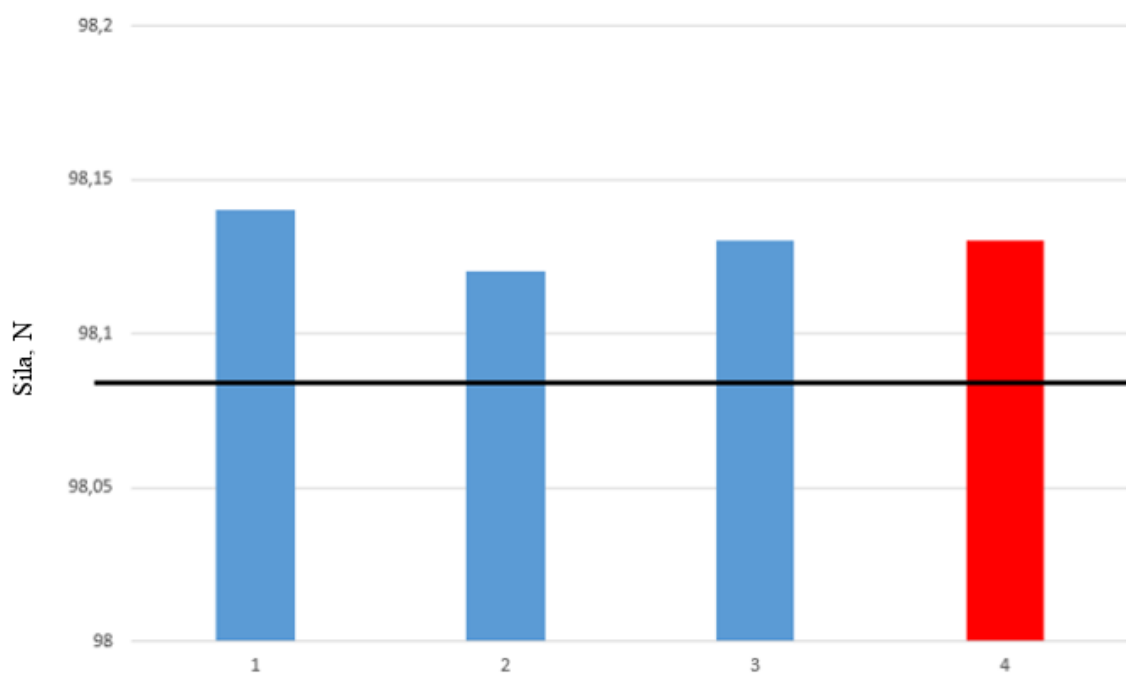
Slika 6.1. Graf usporedbe vremena ispitivanja s onima u normi

Graf na slici 6.1. predstavlja kvadrate unutar kojih se trebaju nalaziti vremena procesa utiskivanja indentora tvrdomjera. Vrijeme postizanja sile predopterećenja normom iznosi ispod 2 s što je prikazano crvenim kvadratom. Vrijeme djelovanja sile predopterećenja normom iznosi  $3 \pm \frac{1}{2}$  s što je prikazano žutim kvadratom. Vrijeme postizanja ukupne sile ispitivanja normom iznosi od 1 s do 8 s i prikazano je plavim kvadratom. Vrijeme djelovanja

ukupne sile normom iznosi  $5_{-3}^{+1}$  s i prikazano je narančastim kvadratom. Vrijeme nakon rasterećivanja i očitavanja iznosi  $4_{-3}^{+1}$  s i prikazano je zelenim kvadratom.

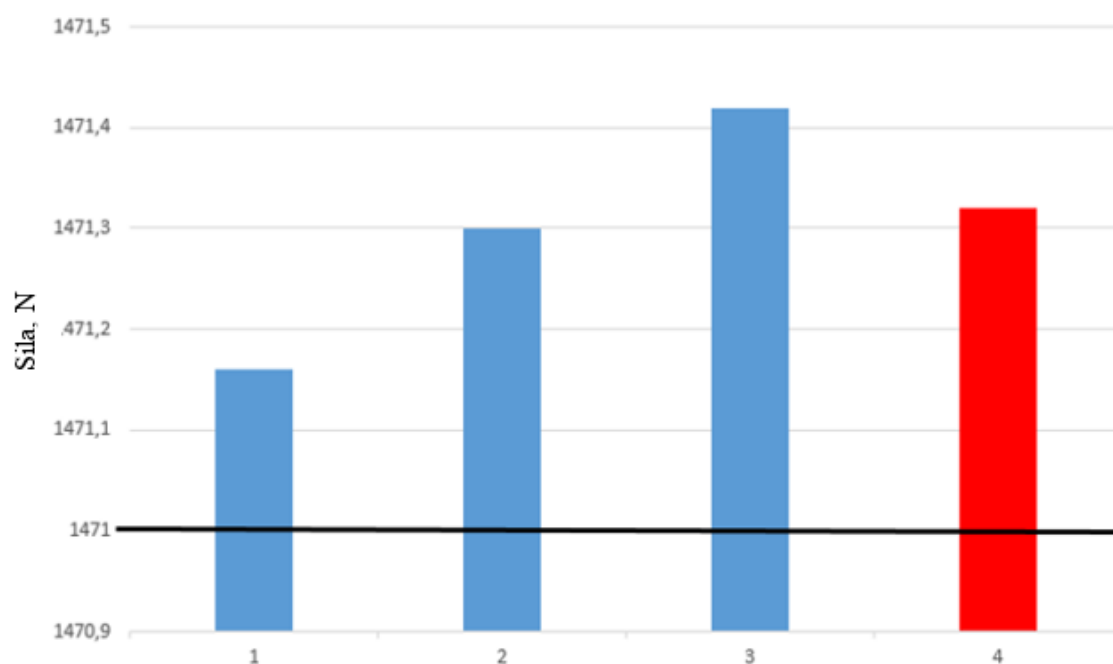
Sva vremena dobivena ispitivanjem sukladna su vrijednostima koje propisuje norma i vrijednostima prikazanim u certifikatu uređaja.

Nastavak pripreme za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće sastojao se od provjere sila ispitivanja. Sile dobivene na sve tri referentne pločice uspoređivane su sa silama danima u certifikatu od strane umjernog laboratorija. Slika 6.2. prikazuje sile predopterećenja, slika 6.3. prikazuje sile opterećenja, te slika 6.4. prikazuje ponovni povratak na silu predopterećenja.



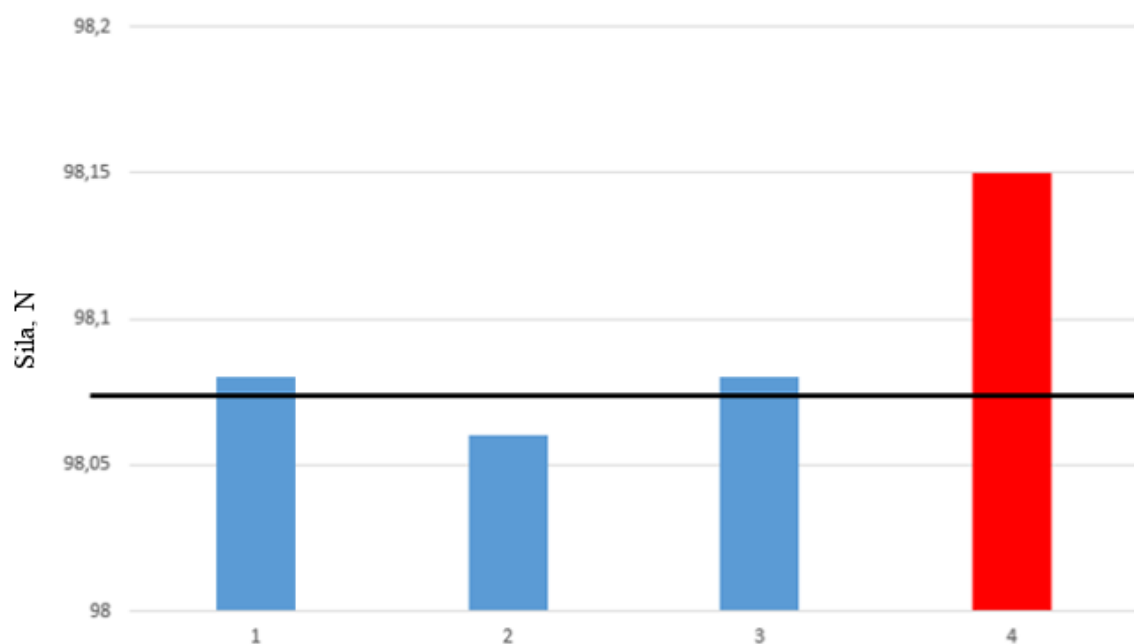
Slika 6.2. Usporedba sila predopterećenja

Na slici brojevima 1, 2, 3 prikazane su vrijednosti sila na ispitivanim referentnim pločicama, dok pod brojem 4 nalazi se rezultat dan certifikatom. Tolerancija sile predopterećenja iznosi  $98,07 \pm 0,2$  N. Linija na slici 6.2. prikazuje idealnu vrijednost dok granice tolerancije ne ulaze u područje na osi ordinata, no sve sile nalaze se unutar tog područja.



Slika 6.3. Usporedba sila opterećenja

Tolerancija sile predopterećenja iznosi  $1471,00 \pm 1,47$  N. Linija na slici 6.3. prikazuje idealnu vrijednost dok granice tolerancije ne ulaze u područje na osi ordinata, no sve sile nalaze se unutar tog područja.



Slika 6.4. Usporedba sila nakon povratka na silu predopterećenja

Tolerancija sile predopterećenja iznosi  $98,07 \pm 0,20$  N. Linija na slici 6.4. prikazuje idealnu vrijednost dok granice tolerancije ne ulaze u područje na osi ordinata, no sve sile nalaze se unutar tog područja.

Provjerom se utvrdilo da sve sile kod tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS zadovoljavaju kriterije tj. da nema znatnih odstupanja. Nakon ove provjere započelo je umjeravanje referentnih pločica tvrdoće.

U daljnjem dijelu rada provest će se procjena mjerne nesigurnosti za svaku od umjeravanih pločica po shemi objašnjenj u 4.3.3. poglavlju ovog rada. Podatci koje je potrebno izračunati su:

- $R$  – ne-ujednačenost tvrdoće [HRC]
- $\bar{H}_{CRM}$  – aritmetička sredina mjerenja [HRC]
- $S_{HCRM}$  – standardna devijacija mjerenja [HRC]
- $u_{HCRM}$  – doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovanj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice [HRC]
- $u_{ms}$  – doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovan rezolucijom ispitnog uređaja [HRC]

Nakon izračunavanja gore navedenih podataka izračunala se mjerna nesigurnost referentne pločice ( $u_{CRM}$ ), HRC.

Iz certifikata o umjeravanju tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS od strane UKAS, UK bitne vrijednosti za računanje koje su definirane su:

- $\delta_{ms} = 0,01$  HRC (rezolucija tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS)
- $u_{HCM} = 0,2$  HRC (nesigurnost odstupanja tvrdomjera Indentec ZHR 8150 TKS)

Pomoću rezolucije tvrdomjera računa se  $u_{ms}$  (doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovan rezolucijom tvrdomjera) po formuli (5) i iznosi 0,003 HRC.

Tablica 6.1. prikazuje vrijednosti potrebne za procjenu mjerne nesigurnosti referentne pločice 1.

**Tablica 6.1. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 1**

R, HRC	$\bar{H}_{CRM}$ , HRC	$s_{HCRM}$ , HRC	$u_{HCRM}$ , HRC	$u_{CRM}$ , HRC (k=1)	$u_{CRM}$ , HRC (k=2)
0,38	24,60	0,1677	0,0750	0,20	0,40

Tablica 6.2. prikazuje vrijednosti potrebne za procjenu mjerne nesigurnosti referentne pločice 2.

**Tablica 6.2. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 2**

R, HRC	$\bar{H}_{CRM}$ , HRC	$s_{HCRM}$ , HRC	$u_{HCRM}$ , HRC	$u_{CRM}$ , HRC (k=1)	$u_{CRM}$ , HRC (k=2)
0,22	39,40	0,0923	0,0471	0,16	0,32

Tablica 6.3. prikazuje vrijednosti potrebne za procjenu mjerne nesigurnosti referentne pločice 3.

**Tablica 6.3. Podatci o mjernoj nesigurnosti referentne pločice tvrdoće 3**

R, HRC	$\bar{H}_{CRM}$ , HRC	$s_{HCRM}$ , HRC	$u_{HCRM}$ , HRC	$u_{CRM}$ , HRC (k=1)	$u_{CRM}$ , HRC (k=2)
0,25	61,60	0,0981	0,0500	0,16	0,32

Za primjenu ovih pločica pri umjeravanju tvrdomjera koristio se faktor prikrivanja k=2 sa 95% pokrivanja.

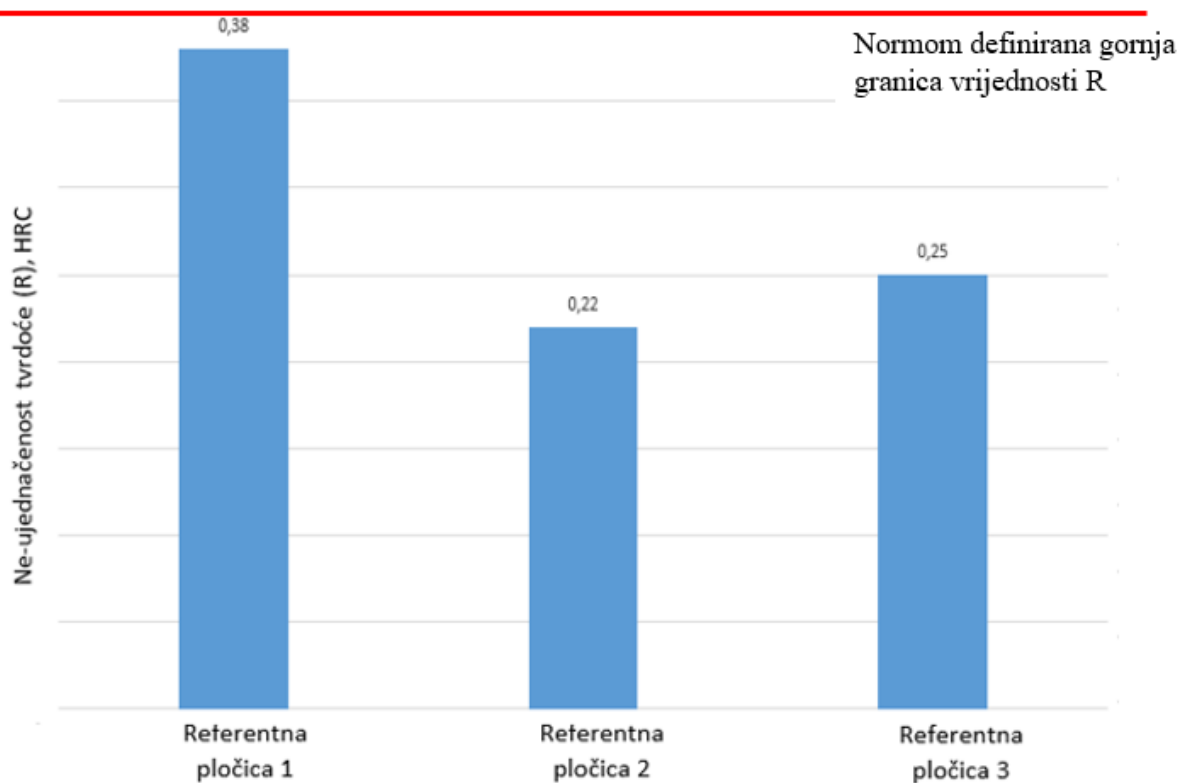
Zapis mjerne nesigurnosti tvrdoća referentnih pločica:

- Referentna pločica tvrdoće 1 – 24,60 HRC ± 0,40 HRC
- Referentna pločica tvrdoće 2 – 39,40 HRC ± 0,32 HRC
- Referentna pločica tvrdoće 3 – 61,60 HRC ± 0,32 HRC

## 6.1. Histogrami za analizu rezultata

Za najlakše razumijevanje razlika u rezultatima pločica i utjecaj tvrdomjera u radu odabrani su histogrami preko kojih će se vršiti analiza.

Prvi histogram na slici 6.5. prikazuje ne-ujednačenost tvrdoće ( $R$ ) referentnih pločica.

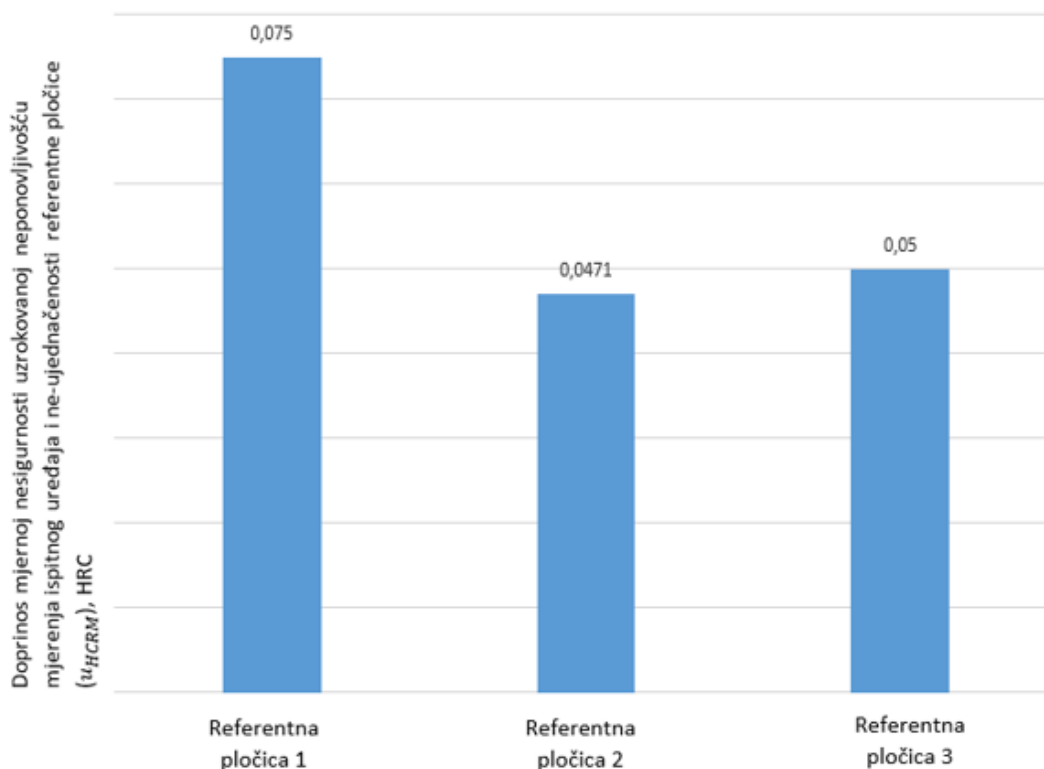


Slika 6.5. Histogram ne-ujednačenosti tvrdoće referentnih pločica

Na histogramu možemo primjetiti kako je ne-ujednačenost tvrdoće referentne pločice s tvrdoćom na početku praktičnog mjernog područja veća od onih na srednjem i krajnjem dijelu istog.

Drugi histogram prikazan slikom 6.6. prikazuje razliku u doprinosu mjernoj nesigurnosti uzrokovanoj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice za sve tri pločice tvrdoće. Taj podatak nam ne pruža isključivo informacije o referentnim pločicama nego i o tvrdomjeru na kojem su umjerene.

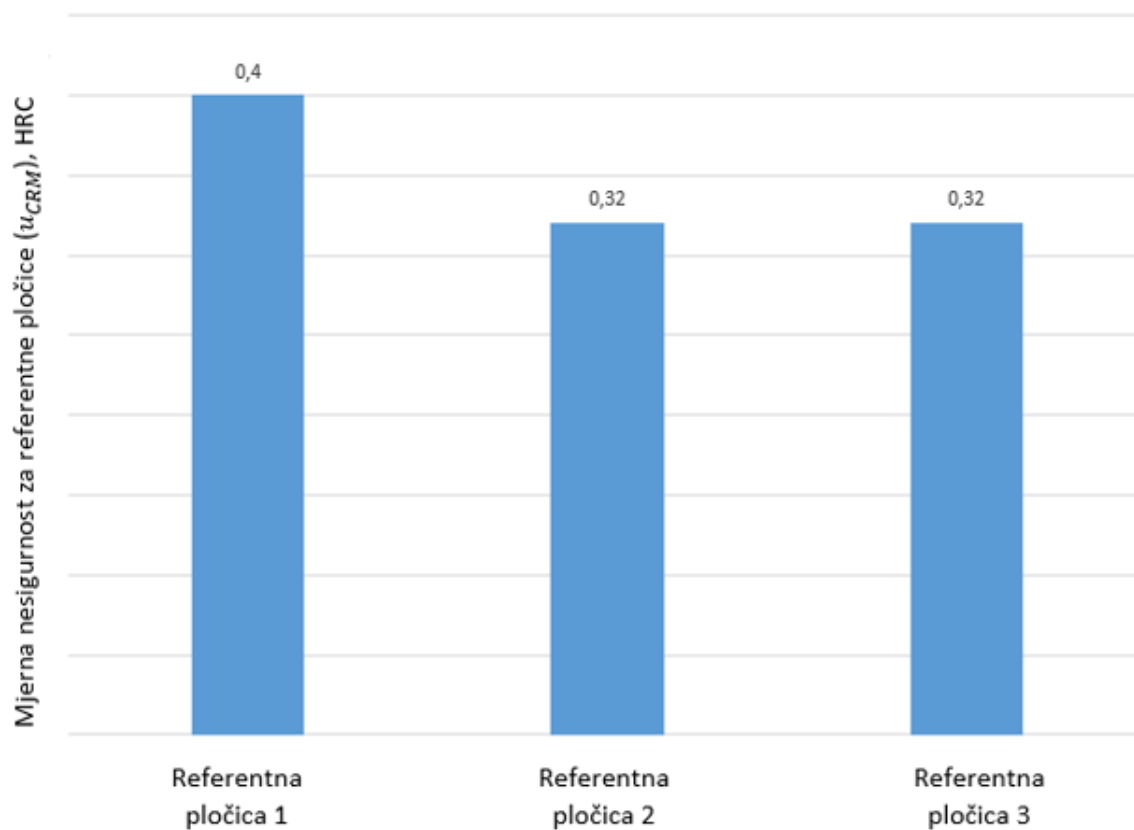




Slika 6.6. Histogram doprinosa mjernoj nesigurnosti uzrokovanoj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice

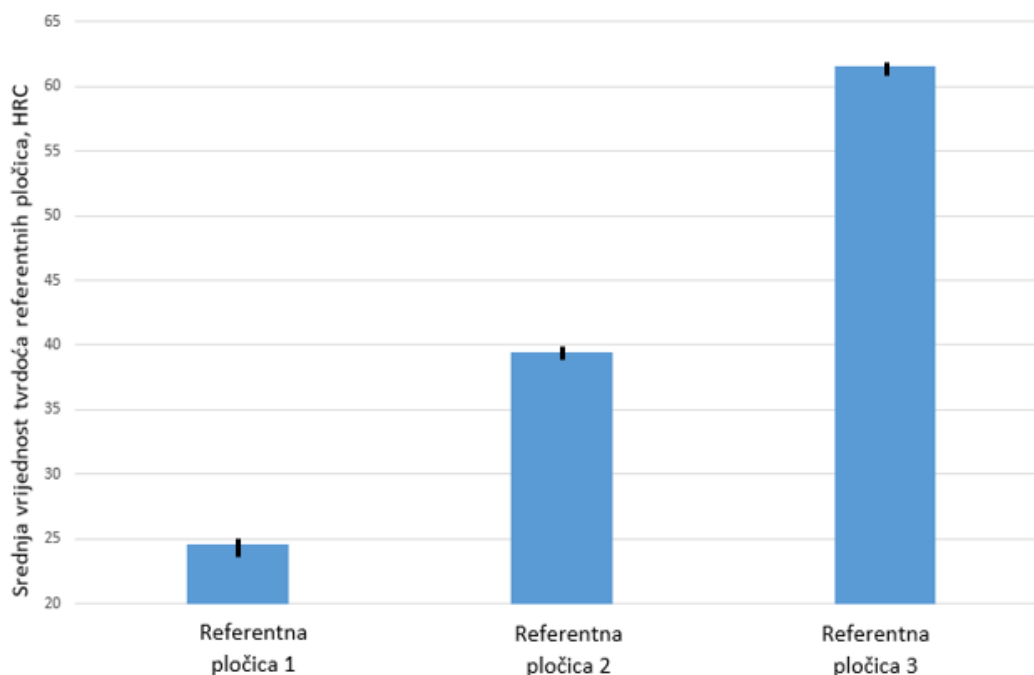
Iz histograma se može zaključiti kako je doprinos mjernoj nesigurnosti uzrokovanoj neponovljivošću mjerenja ispitnog uređaja i ne-ujednačenosti referentne pločice visok za pločice s tvrdoćom na početku praktičnog mjernog područja, dok na srednjem i krajnjem dijelu praktičnog mjernog područja nema znatne razlike.

Iz trećeg histograma na slici 6.7. vidljiva je podjednaka mjerna nesigurnost za sve umjeravane referentne pločice što dovodi do zaključka kako je umjeravanje provedeno valjano i sukladno normi.



Slika 6.7. Histogram mjerne nesigurnosti za referentne pločice

Na slici 6.8. prikazana je vrijednost tvrdoće etalonskih pločica s vrijednostima mjerne nesigurnosti uzrokovane pločicama.



Slika 6.8. Vrijednost tvrdoće etalonskih pločica s vrijednostima mjerne nesigurnosti uzorkovanih pločica

U dosadašnjoj analizi nije uračunata mjerna nesigurnost referentnog etalonskog uređaja. Za mjerno područje od 20 HRC do 70 HRC najbolja mjerna sposobnost proračunata je od strane Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava te iznosi 0,4 HRC. Ta vrijednost se dobiva na temelju umjeravanja tvrdomjera s primarnim etalonskim pločicama, rasipanje vrijednosti primarnih etalonskih pločica, te rezolucije etalonskog tvrdomjera. Kako je uređaj instaliran prije par mjeseci i nalazi se tek u probnom radu prihvaćena je prethodno navedena vrijednost.

Zapis proširene mjerne nesigurnosti referentne pločice i referentnog uređaja za sve tri pločice iznosi:

- Referentna pločica tvrdoće 1 – 24,60 HRC  $\pm$  0,57 HRC
- Referentna pločica tvrdoće 2 – 39,40 HRC  $\pm$  0,47 HRC
- Referentna pločica tvrdoće 3 – 61,60 HRC  $\pm$  0,47 HRC

## 7. ZAKLJUČAK

Umjeravanje referentnih pločica po HRC metodi provedeno u eksperimentalnom dijelu rada svoju važnost pokazuje kroz održavanje mjerne sljedivosti i daljnjeg procesa umjeravanja. Rezultat dobiven nakon umjeravanja mobilnog tvrdomjera smatrat će se valjanim zbog ispunjevanja zahtijevane mjerne sljedivosti.

Iz dobivenih rezultata, obrade predispitivanja, samog ispitivanja točnije umjeravanja referentnih pločica tvrdoće po metodi HRC doneseni su sljedeći zaključci:

- Velik broj predispitivanja tj. dobivanje raznih podataka prije nego započne umjeravanje referentnih pločica ukazuje na veliki broj izvora mjernih nesigurnosti koji mogu značajno utjecati na mjerni rezultat a time i na mjernu sljedivost mjerenja tvrdoće.
- Iako smo kroz ispitivanja imali velik utjecaj raznih vanjskih čimbenika, umjeravanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 6508-3:2015 i svi čimbenici svedeni su na minimum radi ispunjavanja zahtjeva koji se stavljaju na referentne pločice tvrdoće.
- Referentni etalonski tvrdomjer mora zadovoljavati i proći provjeravanje i umjeravanje sukladno normi HRN EN ISO 6508-2:2015. Iz rezultata ovog rada se vidi da sam etalonski tvrdomjer ima veći doprinos ukupnoj nesigurnosti nego same pločice. Pored toga potrebno je uzeti u obzir i stanje utiskivača i koliki je njegov doprinos jer kod njega dolazi do trošenja i time mijenjanja dimenzija. U slučaju eksperimentalnog dijela ovog rada to je bio dijamantni stožac.
- Iz histograma ne-ujednačenosti tvrdoće referentnih pločica na slici vidljiva je veća ne-ujednačenost kod pločice 1. Takav poremećaj pripisuje se izradi pločice. Iako su sve pločice od istog proizvođača konkretna serija pločice s početka praktičnog mjernog područja možda posjeduje veću ne-ujednačenost što je rezultiralo povećanom mjernom nesigurnošću. Ukoliko nije problem do serije postoji mogućnost da proizvođač pločica s početka praktičnog mjernog područja nema dobro razrađenu proizvodnju te zato one posjeduju veću ne-ujednačenost tvrdoće. Kako bi se razriješilo navedeno razmatranje potrebno je provoditi daljnja istraživanja.
- Konačne vrijednosti etalonskih pločica su 24,60 HRC  $\pm$  0,57 HRC, 39,40 HRC  $\pm$  0,47 HRC, 61,60 HRC  $\pm$  0,32 HRC. S obzirom na dozvoljena odstupanja tvrdomjera koja smije biti sukladno normi HRN EN ISO 6508-2  $\pm$  1,5 HRC za metodu HRC možemo reći da su ove pločice adekvatne za primjenu umjeravanja industrijskih tvrdomjera.

## LITERATURA

- [1] Makanec B.; „Međulaboratorijska usporedna mjerenja tvrdoće prema Vickersu“, Diplomski rad, 2019, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2] Alar Ž.; „Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera“, Doktorska disertacija, 2008, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [3] <https://www.struers.com/en/Knowledge/Hardness-testing#> [pregledano 7.10.2020.]
- [4] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Čurković L.; „Materijali 1“, 2014, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [5] HRN EN ISO 6508-1:2016
- [6] Herrmann K.; „Hardness testing – principles and applications“, 2011, ASM International, USA
- [7] Obianyo I.; „Laboratory manual for hardness test“, 2019, African University of Science and Technology, Abuja
- [8] [bakergauges.com/product-detail/hardness-tester-dial-gauge-2/](http://bakergauges.com/product-detail/hardness-tester-dial-gauge-2/) [pregledano 31.10.2020.]
- [9] <https://www.struers.com/en/Products/Hardness-testing/Hardness-testing-accessories#accessories> [pregledano 6.11.2020.]
- [10] HRN EN ISO 6508-2:2015
- [11] HRN EN ISO 6508-3:2015

## **PRILOZI**

[1] CD