

Umjeravanje referentnog etalona tvrdoće po metodi Rockwell

Čondrić, Ela

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:458313>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ela Čondrić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof

Student:

Ela Čondrić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Alaru, asistentu Danielu Pustičkom te tehničaru Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Romanu Divjaku za pomoć pruženu prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada. Najveće zahvale mojoj obitelji, roditeljima Berislavu i Neli te sestrama Ivi i Anji na bezuvjetnoj potpori tijekom cijelog studija te Anti na strpljenju.

Ela Čondrić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ela Čondrić** JMBAG: 0035216402

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje referentnog etalona tvrdoće po metodi Rockwell**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of the hardness reference standard by the Rockwell method**

Opis zadatka:

Umjeravanje referentnih etalona tvrdoće provodi se u svrhu utvrđivanja njihove mjerne sposobnosti te osiguravanja mjerne sljedivosti.

U radu je potrebno:

1. Opisati način ostvarivanja mjerne sljedivosti za veličinu tvrdoća.
2. Opisati značaj i svrhu referentnih etalona tvrdoće po metodi Rockwell.
3. Provesti eksperimentalno umjeravanja referentnog etalona tvrdoće po metodi Rockwell.
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
 3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.
 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
 3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof. dr. sc. Željko Alar

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. UVOD	13
2. TVRDOĆA	14
2.1. Metode ispitivanja tvrdoće	15
2.1.1. Brinellova metoda	16
2.1.2. Vickersova metoda	18
2.1.3. Rockwellova metoda	19
3. MJERENJE TVRDOĆE ROCKWELLOVOM METODOM	21
3.1. Povijest	21
3.2. Način rada	21
3.3. Različite varijante Rockwellove metode	23
4. PROVJERAVANJE I UMJERAVANJE ISPITNIH UREĐAJA, UTISKIVAČA I REFERENTNIH PLOČICA	25
4.1. Sljedivost mjerenja tvrdoće	25
4.2. Umjeravanje etalonskog tvrdomjera	27
4.2.1. Provjeravanje i umjeravanje sile opterećivanja	27
4.2.2. Provjeravanje i umjeravanje trajanja ciklusa	27
4.2.3. Ispitivanje histereze	28
4.3. Umjeravanje referentnih pločica	28
4.3.1. Proizvodnja referentnih pločica	28
4.3.3. Broj utiskivanja	29
4.3.4. Jednolikost/ravnomjernost tvrdoće	29
4.3.5. Oznake na pločici	31
5. EKSPERIMENTALNI DIO	32
5.1. Plan ispitivanja	33
5.2. Oprema korištena za ispitivanje	33
5.3. Direktna metoda	34
5.3.1. Umjeravanje sile	34
5.3.2. Provjera indentora	36
5.3.3. Vrijeme trajanja	37
5.3.4. Mjerni sustav dubine i histereza	37
5.4. Indirektna metoda	38
5.4.1. Mjerenje tvrdoće	38
5.5. Mjerna nesigurnost	40
6. ANALIZA	43

7. ZAKLJUČAK	50
LITERATURA	51
PRILOZI	52

POPIS SLIKA

Slika 1. Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala [4].....	15
Slika 2. Metode za ispitivanje tvrdoće elastomera i ostalih polimera [4]	16
Slika 3. Mjerenje tvrdoće po Brinellu [4]	16
Slika 4. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [6].....	18
Slika 5. Mjerenje tvrdoće po Rockwellu (HRC) [7]	19
Slika 6. Prodiranje dijamantnog indentora u uzorak [7].....	22
Slika 7. Metrološki niz [4]	26
Slika 8. Dopuštene vrijednosti neujednačenosti tvrdoće za Rockwell varijante [11]	31
Slika 9. Tvrdomjer INDENTEC	32
Slika 10. Dinamometar 116/KTN-5Kn	34
Slika 11. Mjerno pojačalo Hottinger Baldwin Messtechnik	35
Slika 12. Kuglični indentor	36
Slika 13. Povećanje indentora	37
Slika 14. Analogni tvrdomjer	38
Slika 15. Proces mjerenja tvrdoće.....	39
Slika 16. Dijagram sila predopterećenja (HRB).....	43
Slika 17. Dijagram sila opterećenja (HRB).....	44
Slika 18. Dijagram sile nakon rasterećivanja sile opterećenja (HRB).....	44
Slika 19. Dijagram sila predopterećenja (HRC).....	45
Slika 20. Dijagram sila opterećenja (HRC).....	45
Slika 21. Dijagram sile nakon rasterećivanja sile opterećenja (HRC)	46
Slika 22. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 23,62 HRB	47
Slika 23. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 61,67 HRB	47
Slika 24. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 93,70 HRB	47
Slika 25. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 24,55 HRC	48
Slika 26. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 39,38 HRC	48
Slika 27. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 62,31 HRC.....	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci Brinellove metode [5] -----	17
Tablica 2. Prednosti i nedostaci Vickersove metode -----	19
Tablica 3. Prednosti i nedostaci Rockwellove metode [5] -----	20
Tablica 4. Različite varijante Rockwell metode [9] -----	24
Tablica 5. Najveći dopušteni iznos neujednačenosti [11] -----	30
Tablica 6. Podaci o tvrdomjeru -----	33
Tablica 7. Rezultati mjerenja sile HRB metodom -----	35
Tablica 8. Rezultati mjerenja sile HRC metodom -----	36
Tablica 9. Vrijeme trajanja ispitivanja -----	37
Tablica 10. Mjerenje tvrdoće HRB -----	39
Tablica 11. Mjerenje tvrdoće HRC -----	40
Tablica 12. Mjerna nesigurnost tvrdomjera za HRB metodu -----	42
Tablica 13. Mjerna nesigurnost tvrdomjera za HRC metodu -----	42
Tablica 14. Dopuštena odstupanja -----	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	sila
D	mm	promjer kuglice
d	mm	promjer otiska
HRC		tvrdća po Rockwellu
N		konstanta pune skale, drugačija za svaku varijantu Rockwell tvrdće
h	mm	izmjerena dubina utiskivanja
S	mm	konstanta skaliranja, drugačija za svaku varijantu Rockwell tvrdće
d	mm	srednja vrijednost dijagonala baze piramide
T_p	s	vrijeme djelovanja sile predopterećenja
T_a	s	vrijeme potrebno da se postigne sila predopterećenja
T_{pm}	s	vrijeme od početka primjene sile predopterećenja do mjerenja dubine utiskivanja indentora.
\bar{h}		srednja vrijednost tvrdće
U_{rel}	%	postotak neujednačenosti tvrdće
u_F	%	mjerna nesigurnost umjeravanja sile
u_{FRS}	%	relativna mjerna nesigurnost prienosnog etalona sile (iz karakteristike)
U_{FRS}	%	proširena mjerna nesigurnost prienosnog etalona sile (iz karakteristike)
u_{HTM}	%	relativna mjerna nesigurnost sile ispitivanja koju daje tvrdomjer
$S_{F,i}$		standardna devijacija sile ispitivanja (max)
F_{Sr}	N	srednja vrijednost sile (max)
u_{ms}	%	relativna mjerna nesigurnost rezolucije mjernog sustava
F_{RS}	N	nazivna sila ispitivanja
δ_{ms}	N	rezolucija pojačala
ΔF_{rel}	%	odstupanje od nazivne vrijednosti sile
ΔF_{max}	%	ukupna relativna devijacija sile i proširene mjerne nesigurnosti sile
u_{HTM}	%	mjerna nesigurnost ispitnog uređaja
b		razlika izmjerene tvrdće i tvrdće referentne pločice po certifikatu

\bar{H}		aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća
H_{CRM}		tvrdoća pločice iz certifikata
u_{CRM}	%	mjerna nesigurnost referentnih pločica tvrdoće (iz certifikata)
u_{HCRM}	%	mjerna nesigurnost referentnih pločica
s_H		standardna devijacija
δ_{ms}	HRC	rezolucija sustava
ΔH_{HTMmax}	HRC	maksimalno odstupanje ispitnog uređaja

SAŽETAK

Mehanička svojstva materijala te razvitak istih ključni su u napretku tehnologije i industrije. Tvrdoća, kao jedno od glavnih mehaničkih svojstava, ispituje se pomoću raznih metoda. Široko zastupljena metoda je metoda Rockwell koja definira tvrdoću materijala mjerenjem dubine prodiranja utiskivača u materijal. U teorijskom dijelu rada opisane su glavne metode mjerenja tvrdoće, a naglasak je na mjerenju Rockwell metodom. Opisan je postupak umjeravanja referentnog tvrdomjera pomoću direktne i indirektne metode prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015. Prikazana je važnost mjerne sljedivosti rezultata pri mjerenju tvrdoće. Eksperimentalni dio prikazao je umjeravanje referentnog etalona (tvrdomjera) INDENTEC ZHR 8150 TKT pomoću direktne i indirektne metode. Nakon ispitivanja, rezultati su analizirani i dobiven je zaključak.

Ključne riječi: Rockwell, referentni etalon, tvrdoća, sljedivost

SUMMARY

The mechanical properties of materials and their development are very important for the progress of technology and the industry. Hardness, as one of the main mechanical properties, is tested using various methods. A widely used method is the Rockwell method, which measures the depth of penetration of the indenter into the material. The theoretical part of this paper describes the main methods of measuring hardness, and the emphasis is on measuring using the Rockwell method. The procedure of calibration of a reference hardness testing machine using direct and indirect methods is described. The importance of measurement traceability of results in hardness measurement is presented. The experimental part showed the calibration of the reference hardness testing machine INDENTEC ZHR 8150 TKT using direct and indirect methods. After testing, the results were analyzed, and a conclusion was made.

Keywords: Rockwell, reference standard, hardness, traceability

1. UVOD

Kako vrijeme prolazi, tehnologija, uređaji, proizvodni procesi, automatizacija tih procesa, itd. razvijaju se nevjerojatnom brzinom. Samim time, svakodnevno se radi na razvoju materijala korištenih u te svrhe. Poznato je da se teži što izdržljivijim, a cjenovno dostupnijim materijalima. Svojstva materijala koji su traženi u strojarstvu su vrlo bitna. Svojstva materijala dijele se na fizikalna (gustoća, električna i toplinska vodljivost), kemijska (otpornost na koroziju, vatrootpornost, ...), mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća, žilavost, ...) i tehnološka svojstva (obradivost česticama, deformiranjem, zavarljivost...).

Mehanička svojstva materijala vrlo su bitna jer iskazuju ponašanje materijala pod nekim opterećenjem te u određenom okolišu. Na temelju mehaničkih svojstava, dimenzioniraju se dijelovi strojeva i elementi raznih konstrukcija. Naravno, treba uzeti u obzir hoće li opterećenje u kojem će se strojni dio naći biti dinamičko ili statičko, kakvi će biti uvjeti okoliša u kojem će se nalaziti, koliko će dugo dio biti pod opterećenjem te ostale uvjete eksploatacije. Svrha mehaničke otpornosti materijala je da se ne pojavi lom, pukotina niti bilo kakva trajna (plastična) deformacija na strojnom dijelu tijekom njegovog rada.

Zbog velike važnosti mehaničkih svojstava, na dijelovima se provode laboratorijska ispitivanja. Mehanička su svojstva povezana sa strukturom materijala te ovise o njoj, pa će i deformacije i nepravilnosti u strukturi, mijenjati mehanička svojstva. Kako bi ispitivanja bila što preciznija i što točnija, danas postoji razvijena oprema i uređaji korišteni u svrhu ispitivanja mehaničkih svojstava.

Tvrdoća je jedno od mehaničkih svojstava materijala. Govori o otporu predmeta na prodiranje nekog drugog predmeta, odnosno materijala koji je tvrdi od njega. Ispitivanje tvrdoće jednostavno je i brzo te je zato uvelike rašireno danas.

Kao i sva ispitivanja, izuzetno je važno imati odgovarajuću mjernu opremu koja je prikladno umjeravana. Sljedivost mjerenja tvrdoće i umjeravanje mjerne opreme ključni su u postizanju vjerodostojnih rezultata. Norme opisuju i definiraju način mjerenja tvrdoće, ali i način provjeravanja i umjeravanja ispitnih uređaja i utiskivača te referentnih etalonskih pločica.

U radu su prikazane norme 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) za Rockwell metodu ispitivanja tvrdoće.

2. TVRDOĆA

Tvrdoća je svakome poznat pojam. Svaki dan ljudi taktilnim osjetilima ispipavaju tvrdoću raznih materijala. Stoga, tvrdoća predstavlja svojstvo materijala koje govori o otpornosti tog materijala prema prodiranju nekog drugog tijela u strukturu tog materijala. Drugo tijelo obično je znatno tvrđe od prvog. Ispitivanje tvrdoće materijala vrlo je bitno jer se primjenom u industriji materijal često susreće s drugim, tvrdim materijalom, koji mu može promijeniti strukturu, odnosno oštetiti ga. Budući da je mjerenje tvrdoće vrlo bitno ispitivanje, razvile su se razne tehnike i metode o čijoj ćemo podijeli govoriti kasnije. Metode mjerenja tvrdoće temelje se na utiskivanju tijela koje se naziva utiskivač ili indentor. Ovisno o uloženoj sili, indentor ostavlja otisak u materijalu te se mjeri nastala veličina ili dubina. Kao što je rečeno, veliku ulogu igra i sila kojom se djeluje na sami indentor prilikom mjerenja tvrdoće pa je bitno napomenuti da postupke možemo podijeliti na one gdje se djeluje statički i polaganim opterećenjem i na one gdje se djeluje dinamički i naglim opterećenjem. Ipak, postoji podjela koja je češće korištena te govori o obliku indentora, a metode u podjeli nazvane su po autorima koji su ih prvi koristili. Ako se mjeri veličina oblika koji je indentor ostavio na materijalu, koriste se Brinellova i Vickersova metoda. Nadalje, mjerenjem dubine indentora utisnutog u materijal koristi se Rockwell metoda. Kao što je već spomenuto, materijal koji se koristi u metodama za mjerenje tvrdoće mora svakako biti tvrdi od materijala u koji prodire. Stoga, indentor je većinom izrađenog od kaljenog čelika, tvrdog metala (WIDIA) ili dijamanta [1].

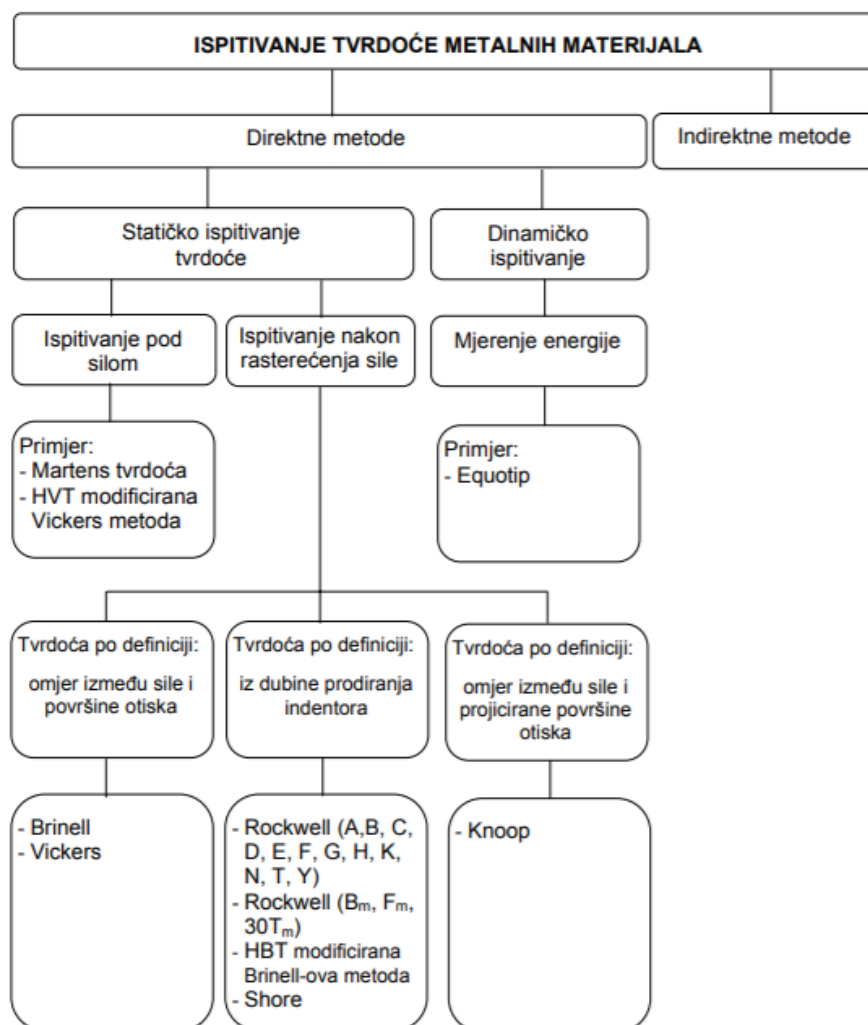
Za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci jer je mjerenje moguće izvršiti direktno na poluproizvodu ili gotovom proizvodu. Iako se na materijalu koju se ispituje pojavi plastična deformacija, ona je neznatna i ne narušava funkcionalnost proizvoda. Iz tog razloga postupak mjerenja tvrdoće možemo svrstati u nerazornu metodu ispitivanja. Navedene su razne metode ispitivanja tvrdoće materijala i svaka od tih metoda ima svoju ljestvicu po kojoj svrstava materijale od onog manje tvrdoće do onog više tvrdoće. Ne postoji standardna mjerna jedinica tvrdoće koju možemo definirati i kojom možemo raditi usporedbe. Zato se tvrdoća kao veličina razlikuje od klasičnih mjerljivih veličina (kao što su masa, duljina, itd.) i ne može se uvrstiti u jednadžbe za određivanje drugih mjerljivih veličina (iako se katkad upotrebljava u iskustvenim jednadžbama) [1- 3].

2.1. Metode ispitivanja tvrdoće

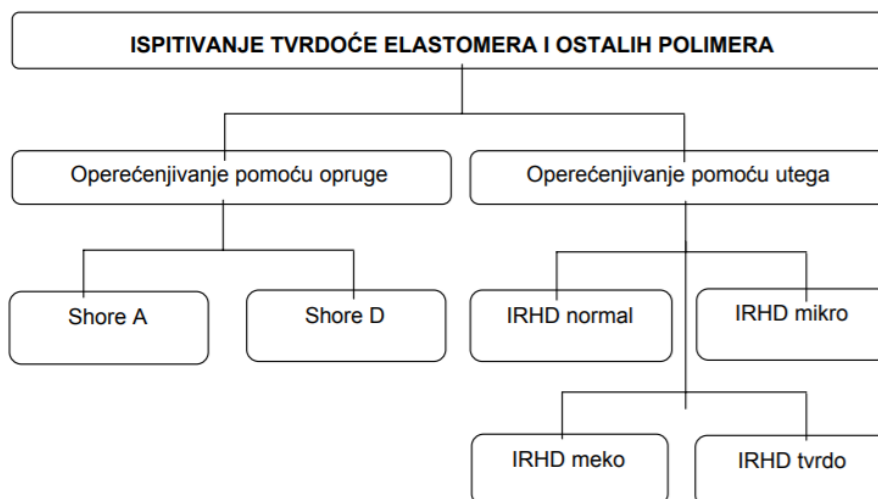
Budući da je tvrdoća izrazito bitno svojstvo jer je povezana s drugim svojstvima poput vlačne čvrstoće i otpornosti na abraziju, ispitivanja su kroz povijest napredovala. Razvitkom ispitivanja tvrdoće, pojavile su se razne podjele. Za početak, mjerenje tvrdoće možemo svrstati u dvije velike skupine ovisno o materijalu koji se ispituje [4]:

- a) Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala
- b) Metode za ispitivanje tvrdoće elastomera i ostalih polimera.

Slika 1. prikazuje detaljnu podjelu metoda za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala, a na slici 2. prikazana je podjela metoda za ispitivanje tvrdoće elastomera i ostalih polimera.



Slika 1. Metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala [4]

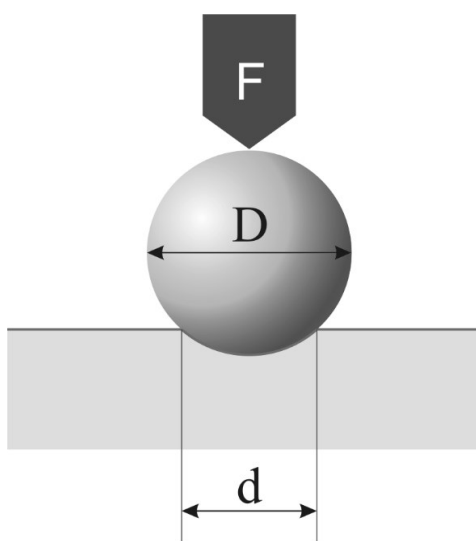


Slika 2. Metode za ispitivanje tvrdoće elastomera i ostalih polimera [4]

Iako se ispitivanje tvrdoće može provesti raznim metodama, u praksi su najčešće korištene metode po Brinellu, Vickersu i Rockwellu.

2.1.1. Brinellova metoda

Kao što je prikazano na slici 3. , Brinellova metoda koristi se za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala stoga indenter mora biti visoke tvrdoće te je on često od kaljenog čelika ili čak tvrdog metala. Na kuglicu se djeluje određenom silom te ona ostavlja otisak na površini ispitivanog materijala. Slika 3. prikazuje postupak utiskivanja kuglice u materijal mjerenjem tvrdoće Brinellovom metodom.



Slika 3. Mjerenje tvrdoće po Brinellu [4]

Pomoću mjernog povećala mjeri se promjer baze kugline kalote (d) i tvrdoća se određuje pomoću izraza (1):

$$HB = \frac{0,204 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [5] \quad (1)$$

gdje je:

F – sila izražena u N

D – promjer kuglice izražen u mm

d – promjer otiska izražen u mm

Promjer čelične kuglice smije biti u intervalu od 1 do 10 mm, a sila kojom pritišće kuglicu takva da veličina d na otisku bude u omjeru s promjerom kuglice prema izrazu (2):

$$d = (0,24 - 0,6)D \quad [5] \quad (2)$$

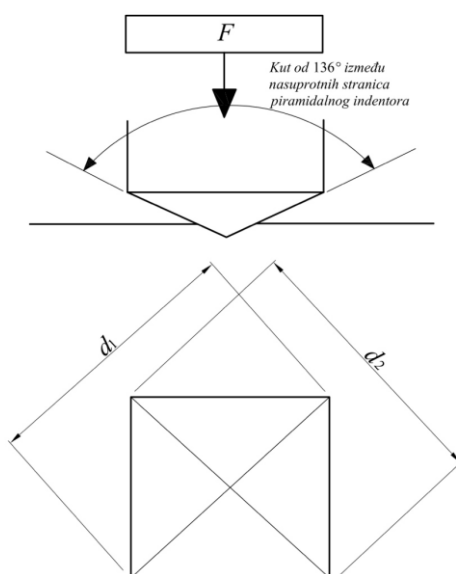
Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostatke ove metode kako bi bila lakše usporediva s ostalim metodama.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci Brinellove metode [5]

Prednosti	Nedostaci
-lako mjerenje veličine otiska, dovoljno je mjerno povećalo	-ne mogu se ispitivati materijali visoke tvrdoće
-selektivna metoda – mjerno područje od 0 do 450 jedinica za čeličnu kuglicu	-tvrdoća je ovisna o opterećenju pa prema “stupnju opterećenja (X)” treba izabrati odgovarajuću silu
-jednostavna priprema površine – dovoljno je grubo brušenje	-otisak je relativno velik pa funkcionalno ili estetski nagrđuje površinu (ako se tvrdoća mjeri na proizvodu, a ne na uzorku)

2.1.2. Vickersova metoda

Metoda ispitivanja tvrdoće po Vickersu prigodna je i za najtvrdje materijale zbog penetratora koji je od dijamanta. Tako je uklonjen najveći nedostatak prethodno navedene Brinellove metode. Dijamantni penetrator, osim što je drukčijeg materijala, više nije kuglica, već četverostrana piramida. Sukladno tome, u ispitivanom uzorku ostaje oblik piramide prilikom utiskivanja. Bitno je naglasiti da je odabran kut od 136° kako bi tvrdoća bila neovisna o sili utiskivanja. Na slici 4. prikazan je penetrator i otisak metode po Vickersu.



Slika 4. Mjerenje tvrdoće po Vickersu [6]

Na slici 4. prikazan je otisak koji ostane na površini uzorka. Pomoću mjernog mikroskopa izmjere se dijagonale d_1 i d_2 te se izračuna njihova srednja vrijednost prema izrazu:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (3)$$

Tvrdoća po Vickersu računa se prema sljedećem izrazu:

$$HV = \frac{0,189 * F}{d^2} \quad [5] \quad (4)$$

gdje je:

F – primijenjena sila izražena u N

d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm

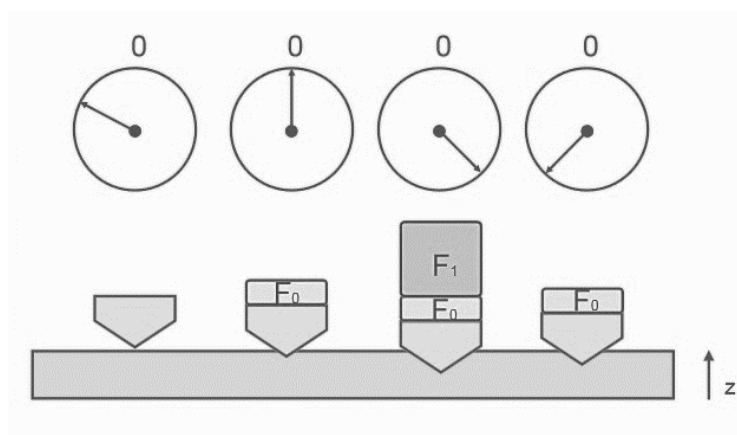
Iako je Vickers ispravio Brinellove nedostatke i ova metoda ima nesavršenosti. U tablici 2. su navedene prednosti i nedostaci metode po Vickersu.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci Vickersove metode

Prednosti	Nedostaci
-tvrdoća je neovisna o primijenjenoj sili	-potrebna brižljiva priprema površine uzorka na kojoj se obavlja mjerenje
-moguće mjerenje tvrdoće i najtvrdih materijala, ali i vrlo tankih uzoraka te čak tvrdoće pojedinih zrna (kristala)	-za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop
-Vickersova metoda jedina je od tri navedene primjenjiva u znanstveno istraživačkom radu na području materijala	
-otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu (važno pri mjerenju tvrdoće gotovih proizvoda)	

2.1.3. Rockwellova metoda

Metoda ispitivanja tvrdoće po Rockwellu koristi dijamantni stožac (HRC) ili čeličnu kuglicu (HRB) kao penetrator. Za razliku od navedenih metoda, Rockwell metoda ne mjeri veličinu otiska, već dubinu prodiranja penetratora. Na slici 5. prikazan je shematski prikaz mjerenja tvrdoće po HRC metodi.



Slika 5. Mjerenje tvrdoće po Rockwellu (HRC) [7]

Mjerenje je u Rockwellovoj metodi puno brže, nego kod Brinella i Vickersa, ali je selektivnost metode slabija. Slijedi tablica 3. koja prikazuje prednosti i nedostatke ove metode.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci Rockwellove metode [5]

Prednosti	Nedostaci
-mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera	-slaba selektivnost metode; čitavo mjerno područje od 0 do 100 HRC (teoretski), praktički 20-70 HRC. Stoga se ova metoda koristi najčešće u pogonima, gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima
-nije potrebna brižljiva priprema mjerne površine	-nepreciznost: ± 2 HRC

Rockwellova metoda bit će razrađena detaljnije u poglavlju koje slijedi.

3. MJERENJE TVRDOĆE ROCKWELLOVOM METODOM

3.1. Povijest

Početak 20. stoljeća, auto industrija počela je rapidno napredovati. Tvrtka New Departure Bell iz Bristol izrađivala je čelične ležajeve koju su bili od izrazite važnosti za konstruiranje automobila. Dvojica zaposlenika istog prezimena, Hugh Rockwell, sin vlasnika tvrtke i Stanley Rockwell, metalurg, nastojali su razviti stroj koji će na brz i efikasan način otkriti utjecaje povišene temperature na kuglične ležajeve. Naravno, i tad je u cilju bilo da se pri ispitivanju tih utjecaja, površina proizvoda što manje promijeni odnosno ošteti. Zaposlenici Rockwell su mjerili tvrdoću pritišćući oštre indentore u materijal ležajeva i pritom povećavali iznose sile na indenter. Indentor je, za razliku od dotadašnjih metoda ispitivanja tvrdoće, bio dijamantni stožac čija se dubina utora mjerila te se tako određivala tvrdoća samog materijala.

1919. godine, ovaj je princip mjerenja tvrdoće patentiran, a Stanley Rockwell je napustio tvrtku te poboljšao izum dodavajući razne varijante ispitivanja.

Ispitivanje po metodi Rockwell uklonilo je nedostatke Brinellove i Vickersove metode. Naglasak je bio na tome da ispitivanje bude što jednostavnije, a da se površina predmeta ispitivanja što manje ošteti.

Novi način mjerenja tvrdoće pokazao se djelotvoran te se uvelike koristi i u današnjim ispitivanjima.

3.2. Način rada

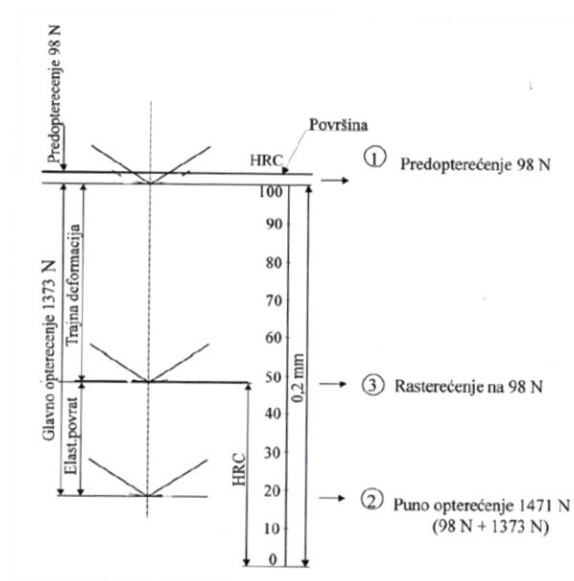
Sukladno normi HRN EN ISO 6508 – 1:2016, ispitivanje se obavlja na ispitnom uređaju (tvrdomjeru) na temperaturama između 10°C i 35°C. Ako postoji bilo kakvo odstupanje od navedenog intervala, potrebno je to navesti u izvještaju ispitivanja.

Kao što je prethodno navedeno, indenter može biti dijamantni i u obliku stošca s kutom od 120°. Ako je indenter u obliku kuglice, tad je materijal kuglice tvrdi metal odnosno volfram karbid (WC).

Važno je pripremiti površinu uzorka te eliminirati okside, nečistoće i maziva, ako nije drugačije naglašeno [7]. Uzorak na kojem se ispituje mora imati čvrsto uporište bez mogućnosti pomaka. Tvrdomjer i indenter stoje okomito na uzorak. Ako to nije tako, postoji mogućnost pogrešnih rezultata.

Postupak počinje kad indentor dotakne površinu uzorka. Na uzorak djeluje predopterećenje F_0 u iznosu od 98 N te vremenu od $3 \pm \frac{1}{2}$ s. Ova oznaka znači da je idealno vrijeme trajanja 3 sekunde, ali je donja granica 1 s, a gornja granica 4 s. Treba biti posebno oprezan oko vibracija, oscilacija i preopterećenja prilikom ovog koraka. Sad se mjeri dubina prodiranja indentora. Na manualnim tvrdomjerima je potrebno da operater izvodi radnju mjerenja, a digitalni tvrdomjeri, kao onaj korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada, radnju mjerenja izvode sami. Nadalje, sila se povećava za iznos sile opterećenja F_1 također s posebnim oprezom na oscilacije, vibracije i preopterećenje. Sila F_1 treba se primijeniti u trajanju od 1 s do 8 s. U konačnici, djeluje puno opterećenje F koje je zbroj sile predopterećenja (F_0) i sile opterećenja (F_1). Puno opterećenje na uzorak djeluje u vremenu $5 \pm \frac{1}{3}$ s. Na uzorku se ostvaruje trajna deformacija te elastični povrat. Nakon toga, prestaje se djelovati silom F_1 , a na uzorak djeluje samo sila predopterećenja F_0 u trajanju od $4 \pm \frac{1}{3}$ s te indentor ostaje na dubini trajne deformacije uzorka. Sad se očitava iznos tvrdoće. [8]

Na prikazanoj slici 6. možemo vidjeti korake prodiranja indentora u površinu uzorka.



Slika 6. Prodiranje dijamantnog indentora u uzorak [7]

Tvrdoća po Rockwellu se računa iz dubine h koja je izmjerena. Izraz za formulu po kojoj se računa tvrdoća po Rockwellu slijedi:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad [8] \quad (5)$$

gdje je:

HR – tvrdoća po Rockwellu

N – konstanta pune skale, drugačija za svaku varijantu Rockwell tvrdoće

h – izmjerena dubina utiskivanja, izražena u mm

S – konstanta skaliranja, drugačija za svaku varijantu Rockwell tvrdoće, izražena u mm

3.3. Različite varijante Rockwellove metode

Kako bi ova metoda bila korisna u raznim primjenama, postoje različite varijante Rockwellove metode. Varijante se razlikuju po konstanti pune skale (N), konstanti skaliranja (S), vrsti indentora te iznosu predopterećenja i opterećenja. Konstanta pune skale (N) definirana je tako da se rezultati ispitivanja mogu jednostavno izračunati, a konstanta skaliranja (S) daje točnost rezultata.

Oznake varijanta se razlikuju po dodatnom velikom slovu koje slijedi iza uobičajene oznake za tvrdoću po Rockwellu HR (npr. HRA , HRB , HRC , itd.).

U tablici 4. prikazane su različite varijante tvrdoće po Rockwellu, razlike u konstantama N i S , oznake koje im pripadaju, vrste indentora koji se koriste, sile predopterećenja i sile opterećenja, praktična mjerna područja te različite primjene.

Tablica 4. Različite varijante Rockwell metode [9]

Formula za iznos tvrdoće	Varijanta	Oznaka varijante	Vrsta indentora	Sila predopterećenja, F_0	Sila opterećenja, F_1	Praktično mjerno područje	Primjena (materijal)
$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$	A	<i>HRA</i>	Dijamantni stožac	98.07 N	490.3 N	20 HRA do 88 HRA	Tvrdo sinterirani metal. Kao HRC metoda za tanje uzorke
$HRB = 130 - \frac{h}{0.002}$	B	<i>HRB</i>	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	882.6 N	20 HRB do 100 HRB	Čelik, mjed, legure bronce i aluminija
$HRC = 100 - \frac{h}{0.002}$	C	<i>HRC</i>	Dijamantni stožac	98.07 N	1.373 kN	20 HRC do 70 HRC	Očvrsnuti čelik, tvrdo lijevano željezo
$HRD = 100 - \frac{h}{0.002}$	D	<i>HRD</i>	Dijamantni stožac	98.07 N	882.6 N	40 HRD do 77 HRD	Čelik
$HRE = 130 - \frac{h}{0.002}$	E	<i>HRE</i>	Kugla 3.175 mm	98.07 N	882.6 N	70 HRE do 100 HRE	Lijevano željezo, aluminij, legure magnezija, metali za ležajeve
$HRF = 130 - \frac{h}{0.002}$	F	<i>HRF</i>	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	490.3 N	60 HRF do 100 HRF	Legure bakra, tanki limovi
$HRG = 130 - \frac{h}{0.002}$	G	<i>HRG</i>	Kugla 1.5875 mm	98.07 N	1.373 kN	30 HRG do 94 HRG	Fosforova bronca, berilijeva bronca, žareno lijevano željezo
$HRH = 130 - \frac{h}{0.002}$	H	<i>HRH</i>	Kugla 3.175 mm	98.07 N	490.3 N	80 HRH do 100 HRH	Aluminij, cink, olovo
$HRK = 100 - \frac{h}{0.002}$	K	<i>HRK</i>	Kugla 3.175 mm	98.07 N	1.373 kN	40 HRK do 100 HRK	Metali za ležajeve i metali niske tvrdoće
$HR15N = 100 - \frac{h}{0.001}$	15N	<i>HR15N</i>	Dijamantni stožac	29.42 N	117.7 N	70 HR15N do 94 HR15N	poput HRC ili HRA za tanje i manje uzorke
$HR30N = 100 - \frac{h}{0.001}$	30N	<i>HR30N</i>	Dijamantni stožac	29.42 N	264.8 N	42 HR30N do 86 HR30N	
$HR45N = 100 - \frac{h}{0.001}$	45N	<i>HR45N</i>	Dijamantni stožac	29.42 N	411.9 N	20 HR45N do 77 HR45N	
$HR15T = 100 - \frac{h}{0.001}$	15T	<i>HR15T</i>	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	117.7 N	67 HR15T do 93 HR15T	poput HRB ili HRF za tanje i manje uzorke
$HR30T = 100 - \frac{h}{0.001}$	30T	<i>HR30T</i>	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	264.8 N	29 HR30T do 82 HR30T	
$HR45T = 100 - \frac{h}{0.001}$	45T	<i>HR45T</i>	Kugla 1.5875 mm	29.42 N	411.9 N	10 HR45T do 72 HR45T	

4. PROVJERAVANJE I UMJERAVANJE ISPITNIH UREĐAJA, UTISKIVAČA I REFERENTNIH PLOČICA

Točna i precizna mjerenja su nužna u svim područjima ljudskog rada. Strojarsstvo, kao djelatnost koja se brzo razvija i uvijek ide u toku sa suvremenom tehnologijom, zahtijeva posebnu pozornost pri uporabi kvalitetnih uređaja i alata. Uređaji i alati za mjerenje raznih veličina su podložni greškama i odstupanjima pa je od velike važnosti često ih provjeravati, kontrolirati i ispravljati. Uz precizan rad uređaja bitno je i kritičko mišljenje inženjera koji podatke iz uređaja nadziru i kontroliraju.

Umjeravanje predstavlja postupke kojima se u točno određenim uvjetima uspoređuje odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje ispitni uređaj s vrijednostima veličina koje pokazuje neki drugi ispitni uređaj koji je već umjeren odnosno podešen na neki skup parametara prema prethodno dogovorenim pravilima tj. normama.

Etalon predstavlja referentnu tvar namijenjenu za određivanje vrijednosti neke veličine. Ako je mjerni rezultat uspoređen s referentnim etalonima, govori se o sljedivosti mjernog rezultata. Mjerni rezultat uvijek ima neka odstupanja odnosno rasipanja vrijednosti te se to naziva mjerna nesigurnost. U cilju smanjenja mjerne nesigurnosti, uređaji se moraju umjeravati nakon određenog perioda rada. Duljina perioda između umjeravanja ovisi o ispitnom uređaju, načinu rada, frekvenciji korištenja, okolišnim uvjetima.

Provjeravanje ispitnih uređaja za mjerenje tvrdoće po Rockwellu dijeli se na direktno i indirektno provjeravanje. Direktno provjeravanje kontrolira upadaju li glavni parametri poput korištene sile, mjerenja dubine prodiranja indentora i vremena trajanja procesa u određeni zadani interval.

Indirektno metode koriste referentne pločice kako bi se provjerilo mjerenje već poznate tvrdoće.

4.1. Sljedivost mjerenja tvrdoće

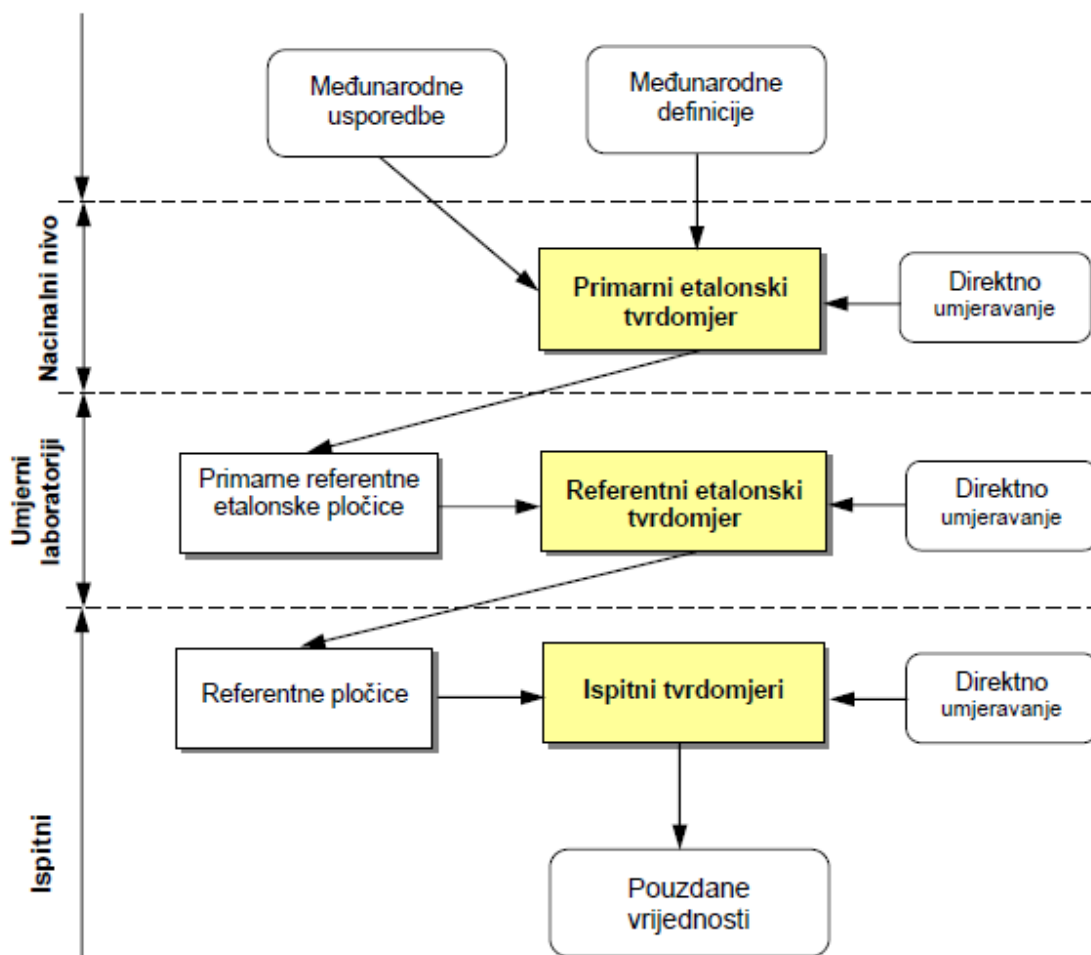
Sljedivost mjernog rezultata nosi određenu mjernu pogrešku čijem se smanjenju doprinosi umjeravanjem ispitnih uređaja. Područje skale tvrdoće je zasnovano na tri osnovna elementa [4]:

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 - umjeravanih putem primarnih etalona i koje se koriste kada je zahtijevana najveća točnost, npr. za verifikaciju i umjeravanje referentnih etalona tvrdoće i referentnih pločica za tvrdoću - namijenjenih pretežno za verificiranje i umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera.

Za utvrđivanje opsega skale tvrdoće potrebna nam je struktura koja povezuje mjerenje i umjeravanje odnosno prikazuje mjernu sljedivost koja je prikazana na slici 7. [4].



Slika 7. Metrološki niz [4]

Na slici 7. je prikazan metrološki niz koji kreće od nacionalnog nivoa gdje se koriste međunarodne definicije i usporedbe skale tvrdoće. Budući da je broj primarnih etalona malen,

jedini način očuvanja skale tvrdoće je kroz međunarodne usporedbe. Provjeravanje i umjeravanje ovih uređaja zahtjeva najveću preciznost i točnost. Na razini umjernih laboratorija nalaze se primarne etalonske pločice koje služe za umjeravanje referentnih etalonskih tvrdomjera pomoći direktnih i indirektnih metoda. Referentni etalonski tvrdomjeri koriste se za umjeravanje referentnih pločica za korisnike koji umjeravaju industrijske ispitne tvrdomjere. Prijelaz rezultata s najvišeg nivo prema nižem, povećava mjernu nesigurnost. Referentne pločice tijekom vremena zahtijevaju stabilnost te jednoobraznost ispitne površine pločice [4].

4.2. Umjeravanje etalonskog tvrdomjera

Prije provjere ispitnog uređaja za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu, treba provjeriti je li uređaj postavljen prema točnim uputama proizvođača. Korištena sila pri ispitivanju ne smije uzrokovati nikakve vibracije niti preopterećenja tijekom procesa. Postoje dvije metode umjeravanja ispitnog uređaja; direktna i indirektna.

Direktno provjera izvodi se na 23 ± 5 °C. Ako temperatura odstupa od ovog raspona, to valja naglasiti u izvještaju. Alat za umjeravanje treba biti sukladan standardu.

Direktna provjera tvrdomjera zahtjeva provjeravanje [10]:

- a) sile opterećivanja
- b) sustava za mjerenje dubine otiska
- c) trajanja ciklusa
- d) histereze

4.2.1. Provjeravanje i umjeravanje sile opterećivanja

Predopterećenje F_0 treba djelovati najmanje 2 sekunde. Tolerancija za svaku izmjerenu silu predopterećenja treba biti $\pm 2,0$ %. Raspon svih sila (razlika između najveće i najmanje vrijednosti) treba biti $\leq 1,5\%$ F_0 . Tolerancija za svaku izmjerenu silu punog opterećenja F , treba biti $\pm 1,0$ %. Raspon svih sila punog opterećenja mora biti $\leq 0,75\%$ F . [10]

4.2.2. Provjeravanje i umjeravanje trajanja ciklusa

Proizvođač umjerava trajanje ciklusa pri proizvodnji ispitnog uređaja i kad uređaj zahtjeva popravak koji je mogao utjecati na trajanje ciklusa. U drugim slučajevima direktnog ispitivanja tvrdomjera, provjeravanje i umjeravanje trajanja ciklusa nije obavezno. Za tvrdomjere koji automatski vrše kontrolu ciklusa, kao što je tvrdomjer korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada, mjerna nesigurnost instrumenta koji mjeri vrijeme ne smije iznositi više od 0,2 s.

Ograničenja izmjerenih vremena pri umjeravanju nalaze se u HRN EN ISO 6508-1:2016. U slučaju analognog tvrdomjera, ispitni uređaj mora moći postići definirano trajanje ciklusa [10].

4.2.3. Ispitivanje histereze

Dijelovi tvrdomjera nikako ne smiju utjecati na očitavanje rezultata. Provjera moguće histereze na analognom tvrdomjeru vrši se ponavljanjem mjerenja tvrdoće koristeći kuglični indentor čiji promjer iznosi minimalno 10 mm. Bitno je da se utiskivač nalazi nasuprot držača uzorka kako ne bi došlo do trajne deformacije. Tvrdoća utiskivača treba biti najmanje 60 *HRC*. Koristi se najveća moguća sila punog opterećenja. Potrebno je barem 10 mjerenja, a uzima se prosjek posljednja tri mjerenja. Za varijante Rockwell tvrdoće *HRB*, prosjek tvrdoće mora iznositi $130 \pm 1,0$ *HRB*. Za varijantu *HRC*, prosjek tvrdoće treba biti unutar raspona $100 \pm 1,0$ *HRC* [10].

4.3. Umjeravanje referentnih pločica

HRN EN ISO 6508 – 3:2015 specificira umjeravanje referentnih pločica koje se koriste za indirektno ispitivanje tvrdomjera za Rockwell tvrdoću te se odnosi na varijante A, B, C, D, E, F, G, H, K, N i T.

4.3.1. Proizvodnja referentnih pločica

Referentne pločice podilaze mnogim zahtjevima kako bi bile primjerene za primjenu pri ispitivanjima. Nužna je homogenost i stabilnost mikrostrukture, ujednačenost tvrdoće po cijeloj površini te kvaliteta površine.

Budući da su referentne pločice iznimno važne, propisani su točni uvjeti proizvodnje pločice [11]:

1. Debljina pločice mora iznositi 6-16 mm. Porastom broja utiskivanja, mijenja se tvrdoća te se zato treba koristiti što deblja pločica. Ako je čelik u pitanju, debljina pločice mora biti minimalno 12 mm.
2. Referentna pločica ne smije biti feromagnetična. Ako je pločica čelična, proizvođač mora demagnetizirati pločicu nakon proizvodnje, odnosno prije umjeravanja referentne pločice.
3. Odstupanje od ravnosti površine referentne pločice ne smije biti veće od 0,01 mm. Donja strana pločice ne smije biti konveksna. Odstupanje od paralelnosti površine ne smije biti veće od 0,02 mm na 50 mm duljine.
4. Nisu dopuštena bilo kakva oštećenja, ogrebotine ili oksidni slojevi površine koji mogu uzrokovati pogrešku pri mjerenju. Površinska hrapavost R_a ne smije biti viša od 0,0003

mm za površinu na kojoj se vrši ispitivanje, te 0,0008 mm za donju površinu. Duljina provjere hrapavosti iznosi $l = 0,8$ mm.

4.3.2. Umjeravanje pločice

Temperatura tijekom ispitivanja, kao što je već spomenuto, mora iznositi 23 ± 5 °C. Brzina indentora kad dotakne površinu referentne pločice, ne smije biti veća od 1 mm/s. Indentor dotiče površinu i primjenjuje se sila predopterećenja F_0 bez vibracija ili oscilacija. Ta sila djeluje najviše 2 s. Sila preopterećenja se povećava za iznos sile opterećenja F_1 također s posebnim oprezom na oscilacije, vibracije i preopterećenje. Sila F_1 primjenjuje se u vremenskom intervalu od 1 s do 8 s. Nadalje, djeluje puno opterećenje F koje je zbroj sile predopterećenja (F_0) i sile opterećenja (F_1). Puno opterećenje na uzorak djeluje u vremenu 4_{-2}^{+2} s.

Formula koja slijedi opisuje vremena izvođenja ispitivanja:

$$T_p = \frac{T_a}{2} + T_{pm} \leq 3 \text{ s.} \quad [11] \quad (6)$$

T_p - vrijeme djelovanja sile predopterećenja

T_a - vrijeme potrebno da se postigne sila predopterećenja

T_{pm} - vrijeme od početka primjene sile predopterećenja do mjerenja dubine utiskivanja indentora.

Tvrdoća se treba očitati 3 – 5 s nakon prestanka djelovanja sile opterećenja F_1 .

4.3.3. Broj utiskivanja

Na referentnoj pločici treba jednoliko rasporediti pet utisaka indentora. Aritmetička sredina tih pet tvrdoća iznosi tvrdoću te pločice. Poželjno je napraviti više od 5 utisaka indentora kako bi se smanjila mjerna nesigurnost. [11]

4.3.4. Jednolikost/ravnomjernost tvrdoće

Ujednačenost tvrdoće po cijeloj površini referentne pločice nešto je čemu se svakako teži pri izradi pločica. Norma EN ISO 6508-3:2015 dopušta odstupanje od ujednačenosti tvrdoće, odnosno dopušta neujednačenost tvrdoće po sljedećoj formuli:

$$U = h_5 - h_1 \quad [11] \quad (7)$$

gdje bi h_5 označavao najveću izmjerenu tvrdoću ($n=5$ u slučaju 5 mjerenja, poželjno je i više mjerenja za smanjenje mjerne nesigurnosti), a h_1 označava najmanju izmjerenu tvrdoću na referentnim pločicama.

Srednja vrijednost tvrdoće računa se prema formuli:

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5}{5} \quad [11] \quad (8)$$

a postotak neujednačenosti tvrdoće oznake U_{rel} računa se po formuli:

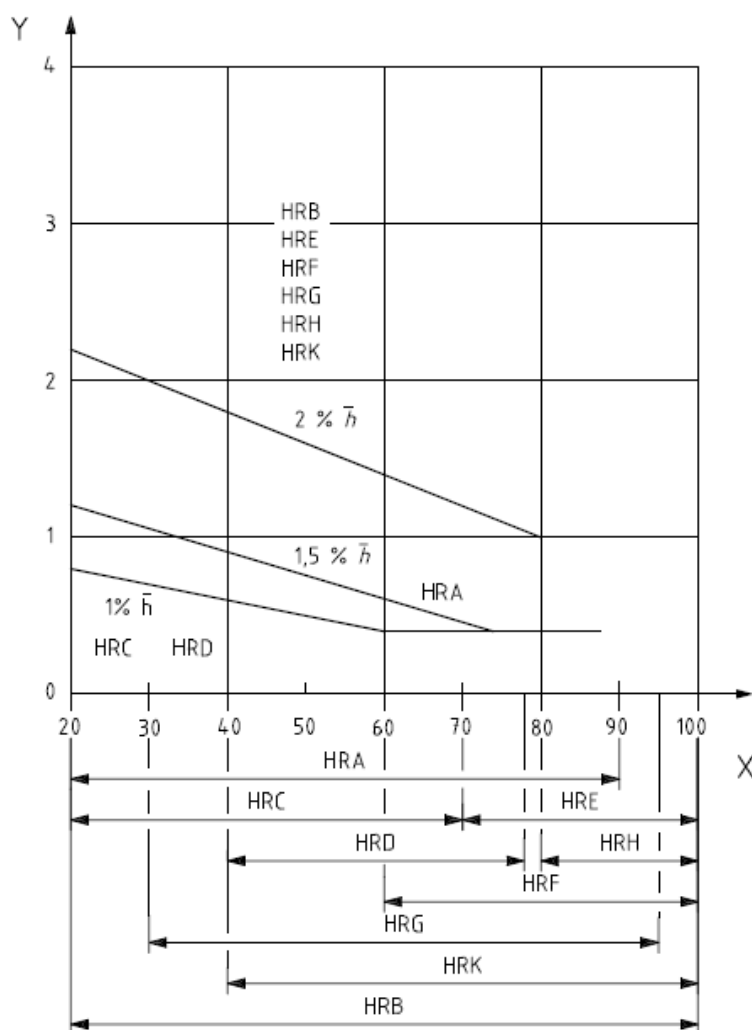
$$U_{rel} = \frac{100 (h_5 - h_1)}{\bar{h}} \quad [11] \quad (9)$$

Dakako, neujednačenost tvrdoće nije dopuštena u bilo kojem postotku već je propisana za pojedine varijante Rockwell tvrdoće te slijedi u tablici 5.:

Tablica 5. Najveći dopušteni iznos neujednačenosti [11]

Postupak Rockwell tvrdoće	Najveći dopušteni iznos neujednačenosti U_{rel}^a , %
A	1,5 ili 0,4 HRA
B	2,0 ili 1,0 HRB
C	1,0 ili 0,4 HRC
D	1,0 ili 0,4 HRD
E	2,0 ili 1,0 HRE
F	2,0 ili 1,0 HRF
G	2,0 ili 1,0 HRG
H	2,0 ili 1,0 HRH
K	2,0 ili 1,0 HRK
N	2,0 ili 0,6 HRN
T	3,0 ili 1,2 HRT
a Uzima se veća vrijednost	

U dijagramu na slici 8. prikazane su najveće dopuštene vrijednosti neujednačenosti tvrdoće za postupke Rockwell A, B, C, D, E, F, G, H i K.



Slika 8. Dopuštene vrijednosti neujednačenosti tvrdoće za Rockwell varijante [11]

gdje su oznake

X – Rockwell tvrdoća

Y – neujednačenost tvrdoće

4.3.5. Oznake na pločici

Sve referentne pločice moraju biti označene sljedećim oznakama [11]:

- aritmetička sredina vrijednosti tvrdoće iz postupka umjeravanja
- ime ili oznaka proizvođača ili dobavljača
- serijski broj
- ime ili oznaka umjernog laboratorija
- debljina pločice ili identifikacijska oznaka na površini koja se ispituje
- godina umjeravanja (ako nije navedena serijskim brojem)

5. EKSPERIMENTALNI DIO

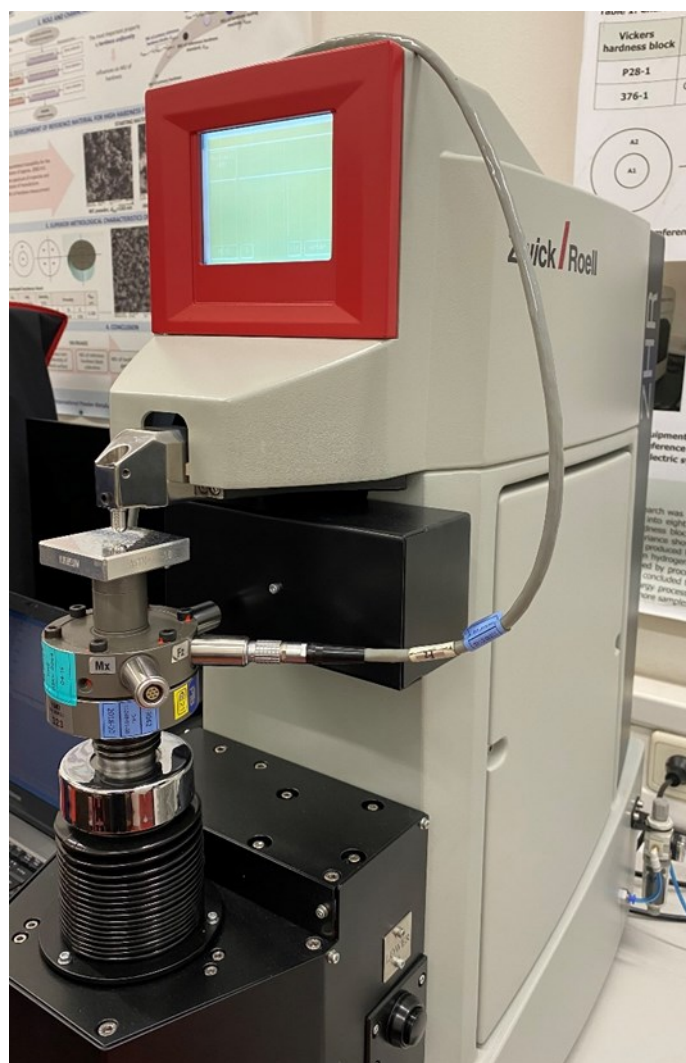
Nakon gore navedene teorije, slijedi eksperimentalni dio proveden u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje se vršilo u cilju umjeravanja referentnog etalona tvrdoće po metodi Rockwell za varijante *HRB* i *HRC*.

U trenutku mjerenja, okolišni uvjeti sukladni normi HRN EN ISO 6508-1:2016 iznosili su:

temperatura = 23,6 °C

vlaga = 31,3 %

$p = 1036,6$ hPa



Slika 9. Tvrdomjer INDENTEC

5.1. Plan ispitivanja

Eksperimentalni dio zahtijevao je direktnu i indirektnu provjeru uređaja za mjerenje tvrdoće. Direktnom provjerom uređaja treba potvrditi da svi parametri uređaja funkcioniraju na pravilan način te im vrijednosti ulaze u dopuštene intervale. Dinamometrom su mjerene vrijednosti sila predopterećenja, opterećenja te rasterećenja. Nakon toga provjeren je indenter za HRC metodu kako bi se eliminirala pogreška zbog eventualnih oštećenja. Nadalje, mjerena su vremena postizanja sile i trajanje sile opterećenja te provjereno je ulaze li u intervale dane normom HRN EN ISO 6508-2:2015. Mjerni sustav dubine i histerezu nije bilo moguće izmjeriti budući da je provjera vršena na digitalnom tvrdomjeru. Indirektna provjera uključivala je umjeravanje referentnih pločica. Nakon toga slijedi analiza svih dobivenih rezultata, procjena mjerne nesigurnosti umjeravanja referentnih pločica i zaključak.

5.2. Oprema korištena za ispitivanje

Tijekom ispitivanja korištena je oprema Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Prije korištenja tvrdomjera, očitana je vlaga na higrometru te temperatura prostorije na termometru.

Električno mjerenje sile izvodilo se pomoću dinamometra 116/KTN-5kN i mjernog pojačala proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik za direktnu metodu ispitivanja.

Podaci o tvrdomjeru prikazanom na slici 9. nalaze se u tablici 6.:

Tablica 6. Podaci o tvrdomjeru

Proizvođač:	INDENTEC, UK
Vrsta:	ZHR 8150 TKT
Serijski broj:	206057
Rezolucija:	0,01 HRC, HRB
Vrsta pokazivača:	digitalni
Vrsta pogona za podizanje i spuštanje	pneumatika
Masa uređaja:	102 kg
Godina proizvodnje:	2020
Država proizvodnje:	Ujedinjeno Kraljevstvo
Certifikat o umjerenosti uređaja izdao:	UKAS, UK

Na tvrdomjeru je korišten dijamantni indentor za HRC metodu te sferični indentor za HRB metodu čiji se certifikati nalaze u Prilozima 1 i 2.

5.3. Direktna metoda

5.3.1. Umjeravanje sile

Direktna provjera započela je provjerom sile predopterećenja (F_0), sile opterećenja (F_1) te sile rasterećenja (F_2). Svaka sila izmjerena je tri puta za svaku od tri referentne pločice poznate tvrdoće. Dinamometar je osjetljiv na silu zbog čijeg se djelovanja stvara električni otpor prikazan na mjernom pojačalu te se očituje u mjernoj jedinici mV/V. Idealna vrijednost sile predopterećenja za metodu HRB iznosi 98,1 N (10 kp), a sile opterećenja za metodu HRB iznosi 980,7 N (100 kp). Pločice na kojima je izvedena provjera sila bile su sljedećih tvrdoća: 44,70 HRB, 74,19 HRB i 90,03 HRB.



Slika 10. Dinamometar 116/KTN-5Kn



Slika 11. Mjerno pojačalo Hottinger Baldwin Messtechnik

Tablica 7. prikazuje rezultate nakon provjere sila ispitivanja za sve tri pločice tvrdoće HRB.

Tablica 7. Rezultati mjerenja sile HRB metodom

H pločice	F, N	F ₀ , N	ΔF ₀ rel, %	F ₁ , N	ΔF ₁ rel, %	F ₂ , N	ΔF ₂ rel, %	F _{sr} , N	U _F , %	ΔF _{max} , %
	98,07	98,03	-0,04	98,08	0,01	97,95	-0,12	98,02	0,22	0,34
44,70	980,67	981,68	0,10	980,58	-0,01	981,23	0,06	981,16	0,19	0,29
	98,07	98,03	-0,04	98,13	0,06	97,95	-0,12	98,04	0,27	0,39
	98,07	97,98	-0,09	98,05	-0,02	97,93	-0,15	97,99	0,22	0,36
74,19	980,67	980,50	-0,02	980,75	0,01	981,08	0,04	980,78	0,14	0,18
	98,07	97,93	-0,15	97,93	-0,15	97,90	-0,17	97,92	0,14	0,31
	98,07	98,00	-0,07	97,93	-0,15	97,93	-0,15	97,95	0,18	0,32
90,03	980,67	980,43	-0,02	979,88	-0,08	979,40	-0,13	979,90	0,18	0,31
	98,07	97,93	-0,15	97,90	-0,17	97,95	-0,12	97,93	0,15	0,32

Isti postupak slijedio je i za varijantu HRC. Idealna vrijednost sile predopterećenja za metodu HRC iznosi 98,1 N (10 kp), a sile opterećenja za metodu HRC iznosi 1471 N (150 kp). Pločice na kojima je izvedena provjera sila bile su sljedećih tvrdoća: 55 HRC, 28,5 HRC i 46HRC. Rezultati nakon provjere sila ispitivanja za HRC metodu nalaze se u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati mjerenja sile HRC metodom

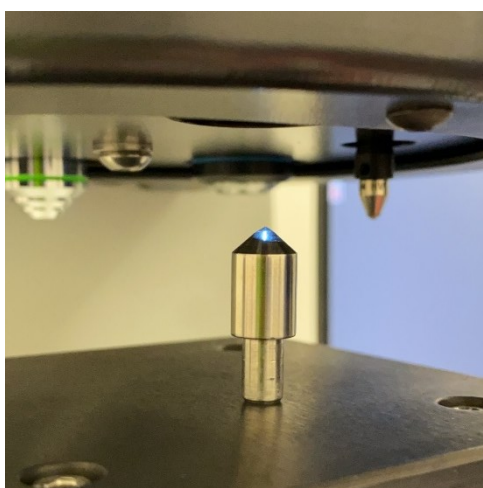
H pločice	F, N	F ₀ , N	ΔF ₀ rel, %	F ₁ , N	ΔF ₁ rel, %	F ₂ , N	ΔF ₂ rel, %	F _{sr} , N	U _F , %	ΔF _{max} , %
	98,07	0,09788	-0,20	97,90	-0,17	98,08	0,01	97,95	0,32	0,52
55,0	1471,0	1,47087	-0,01	1468,55	-0,17	1470,02	-0,07	1469,81	0,24	0,41
	98,07	0,09780	-0,27	97,80	-0,27	97,90	-0,17	97,84	0,21	0,48
	98,07	0,09805	-0,02	98,05	-0,02	98,03	-0,04	98,04	0,14	0,18
28,5	1471,0	1,47065	-0,02	1470,50	-0,03	1470,12	-0,06	1470,42	0,13	0,19
	98,07	0,09800	-0,07	97,95	-0,12	97,95	-0,12	97,97	0,15	0,27
	98,07	0,09795	-0,12	98,05	-0,02	97,98	-0,09	97,99	0,19	0,31
46	1471,0	1,46970	-0,09	1468,97	-0,14	1472,32	0,09	1470,33	0,34	0,48
	98,07	0,09790	-0,17	98,00	-0,07	97,93	-0,15	97,94	0,19	0,36

Pločice za obje varijante zadovoljavaju kriterije budući da je odstupanje od aritmetičke sredine vrlo malo.

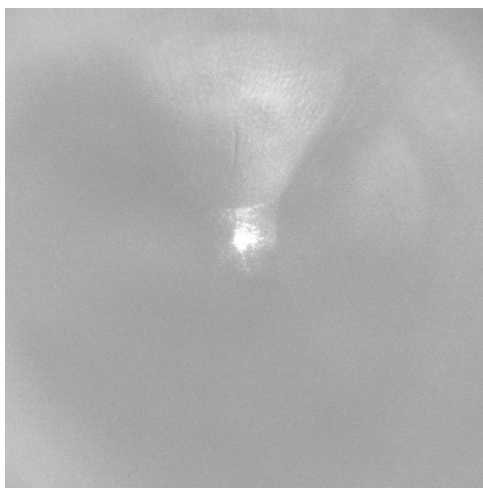
5.3.2. Provjera indentora

Kuglični indentor 1/16" korišten za HRB metodu provjeren je golim okom budući da nije bilo moguće mjeriti njegov promjer.

Indentor od industrijskog dijamanta korišten za HRC metodu vizualno je provjeren povećanjem 50x. Prikazane su fotografije procesa vizualne provjere HRC indentora i fotografija nakon povećanja na mikroskopu.



Slika 12. Kuglični indentor



Slika 13. Povećanje indentora

Vizualnom provjerom oba indentora uočeno je da odgovaraju standardu te se ispitivanje može nastaviti.

5.3.3. Vrijeme trajanja

Provjereno je vrijeme trajanja postizanja sile te trajanje sile opterećenja te provjereno je ulaze li te vrijednosti u interval sukladan normi HRN EN ISO 6508 – 1:2016. U tablici 9. je prikazana usporedba stvarnih vremena s intervalima iz norme.

Tablica 9. Vrijeme trajanja ispitivanja

	Izmjerena vrijednost	Interval iz HRN EN ISO 6508-1:2016
Postizanje sile opterećenja	4,92 s	1 - 8 s
Trajanje sile	5,82 s	$5 \pm \frac{1}{3}$ s

Vremena odgovaraju normi HRN EN ISO 6508 – 1:2016 te je ispitivanje nastavljeno.

5.3.4. Mjerni sustav dubine i histereza

Parametri poput mjernog sustava dubine i histereze nisu bili ispitivani budući da je tvrdomjer digitalan i automatski, a ovi se parametri provjeravaju u slučaju analogne skale. Na slici 14. prikazan je tvrdomjer analogne skale na kojem se može ispitivati gore navedeno.



Slika 14. Analogni tvrdomjer

5.4. Indirektna metoda

5.4.1. Mjerenje tvrdoće

U indirektnu metodu umjeravanja tvrdomjera ubraja se mjerenje tvrdoće na referentnim etalonskim pločicama. Umjeravanje se provodilo na tri pločice za svaku varijantu, HRB i HRC. Sve pločice koje su korištene u ovom ispitivanju su naručene od MPA NRW (*Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen*) te su izrađene u skladu s normom HRN EN ISO 6508-3:2015. Certifikati svake pločice nalaze se u Prilozima 3-8.

Referentne etalonske pločice su za svaku varijantu sadržavale tri različite tvrdoće, a vrijednosti tih tvrdoća su različite kako bi se što bolje pokrio cijeli raspon tvrdoća HRB, odnosno HRC metode. Na svakoj pločici izvršeno je pet mjerenja u skladu s normom HRN EN ISO 6508 - 3:2015. Rezultati izmjerenih vrijednosti tvrdoće HRB na tvrdomjeru ZHR 8150 TKT dani su u tablici 10.

Tablica 10. Mjerenje tvrdoće HRB

	Referentna vrijednost tvrdoće	1. mjerenje,	2. mjerenje,	3. mjerenje,	4. mjerenje,	5. mjerenje,	srednja vrijednost
1. pločica	23,62	22,80	23,12	22,36	22,82	23,99	23,0
2. pločica	61,67	60,81	60,77	60,89	61,15	61,07	60,9
3. pločica	93,70	92,96	93,9	93,04	93,14	93,12	93,1

Na slici 15. vidi se proces prodiranja kugličnog indentora u pločicu tvrdoće 93,70 HRB, kao i izmjerena tvrdoća na ekranu.



Slika 15. Proces mjerenja tvrdoće

Usljedilo je pet mjerenja tvrdoće HRC u skladu s normom HRN EN ISO 6508 - 3:2015. Rezultati izmjerenih vrijednosti tvrdoće HRC na tvrdomjeru ZHR 8150 TKT dani su u tablici 11.

Tablica 11. Mjerenje tvrdoće HRC

	Referentna vrijednost tvrdoće	1. mjerjenje,	2. mjerjenje,	3. mjerjenje,	4. mjerjenje,	5. mjerjenje,	srednja vrijednost
1. pločica	24,55	24,42	24,88	25, 10	24, 44	24, 51	24,67
2. pločica	39,38	39,43	39,70	39,78	39,73	39,41	39,61
3. pločica	62,31	61,87	62,02	61,96	62,01	62,02	61,98

5.5. Mjerna nesigurnost

Indirektnom metodom provjeravanja i umjeravanja referentnih pločica treba utvrditi odstupanja izmjerene tvrdoće, ponovljivost rezultata te sveukupnu pogrešku uređaja.

Mjerna nesigurnost umjeravanja sile na etalonskom tvrdomjeru računa se prema formuli:

$$u_F = \sqrt{u_{FRS}^2 + u_{FHTM}^2 + u_{ms}^2} [10] \quad (10)$$

gdje je:

u_F – mjerna nesigurnost umjeravanja sile

u_{FRS} – relativna mjerna nesigurnost prijenosnog etalona sile (iz karakteristike)

U_{FRS} – proširena mjerna nesigurnost prijenosnog etalona sile (iz karakteristike)

$$u_{FRS} = \frac{U_{FRS}}{2} = 0,06 [10] \quad (11)$$

u_{FHTM} – relativna mjerna nesigurnost sile ispitivanja koju daje tvrdomjer

$$u_{FHTM} = 100 * \frac{S_{Fi}}{F_{Sr}} * t [10] \quad (12)$$

S_{Fi} – standardna devijacija sile ispitivanja (max)

F_{Sr} – srednja vrijednost sile (max)

$t=1,32$

u_{ms} – relativna mjerna nesigurnost rezolucije mjernog sustava

$$u_{ms} = 100 * \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} * \frac{1}{F_{RS}} [10] \quad (13)$$

F_{RS} – nazivna sila ispitivanja

$F_{RS} = 980,7$ N za HRB

$F_{RS} = 1471$ N za HRC

δ_{ms} – rezolucija pojačala = 0,1N

ΔF_{rel} – odstupanje od nazivne vrijednosti sile

$$\Delta F_{rel} = 100 * \frac{F_{sr} - F_{RS}}{F_{RS}} [10] \quad (14)$$

ΔF_{max} – ukupna relativna devijacija sile i proširene mjerne nesigurnosti sile

$$\Delta F_{max} = |\Delta F_{rel}| + U_F [10] \quad (15)$$

H pločice	F1, N	F2, N	F3, N	Fsr, N	b, %	sF,i, N	u _{ms} , %	u_FRS, %	u_FHTM, %	u _F , %	U _F , %	ΔFmax, %
44,70	981,68	980,58	981,23	981,16	0,11	0,6	0,003	0,06	0,07	0,10	0,19	0,29
74,19	980,50	980,75	981,08	980,78	0,06	0,3	0,003	0,06	0,04	0,07	0,14	0,18
90,03	980,43	979,88	979,40	979,90	0,10	0,5	0,003	0,06	0,07	0,09	0,18	0,31

H pločice	F1, N	F2, N	F3, N	Fsr, N	b, %	sF,i, N	u _{ms} , %	u_FRS, %	u_FHTM, %	u _F , %	U _F , %	ΔFmax, %
55,00	1470,87	1468,55	1470,02	1469,81	0,16	1,2	0,002	0,06	0,11	0,12	0,24	0,41
28,5	1470,65	1470,497	1470,122	1470,42	0,04	0,3	0,002	0,06	0,02	0,06	0,13	0,19
46	1469,70	1468,973	1472,3204	1470,33	0,23	1,8	0,002	0,06	0,16	0,17	0,34	0,48

Mjerna nesigurnost ispitnog uređaja računa se prema formuli:

$$u_{HTM} = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{HCRM}^2 + u_{ms}^2} [10] \quad (16)$$

$$b = \bar{H} - H_{CRM} [10] \quad (17)$$

u_{HTM} – mjerna nesigurnost ispitnog uređaja

b – razlika izmjerene tvrdoće i tvrdoće referentne pločice po certifikatu

\bar{H} – aritmetička sredina izmjerenih tvrdoća

H_{CRM} – tvrdoća pločice iz certifikata

u_{CRM} – mjerna nesigurnost referentnih pločica tvrdoće (iz certifikata)

u_{HCRM} – mjerna nesigurnost referentnih pločica

$$u_{HCRM} = t * \frac{s_H}{\sqrt{n}} [10] \quad (18)$$

$$t = 1,14$$

s_H – standardna devijacija

n – broj ponavljanja ($n=5$)

$$u_{ms} = \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}} [10] \quad (19)$$

δ_{ms} - rezolucija sustava = 0,01

$$u_{HTM} = \frac{U_{HTM}}{2} [10] \quad (20)$$

ΔH_{HTMmax} – maksimalno odstupanje ispitnog uređaja

$$\Delta H_{HTMmax} = |b| + U_{HTM} [10] \quad (21)$$

U tablicama 12. i 13. slijede rezultati mjerne nesigurnosti ispitnog uređaja.

Tablica 12. Mjerna nesigurnost tvrdomjera za HRB metodu

HCRM	HRBsr.	uBRM	u _{ms}	uHCRM,	uHTM,	UHTM,	ΔH _{HTMmax}
23,62	23,0	0,94	0,01	0,310	0,99	1,98	2,58
61,67	60,9	0,53	0,01	0,084	0,54	1,07	1,81
93,70	93,1	0,51	0,01	0,037	0,51	1,02	1,65

Tablica 13. Mjerna nesigurnost tvrdomjera za HRC metodu

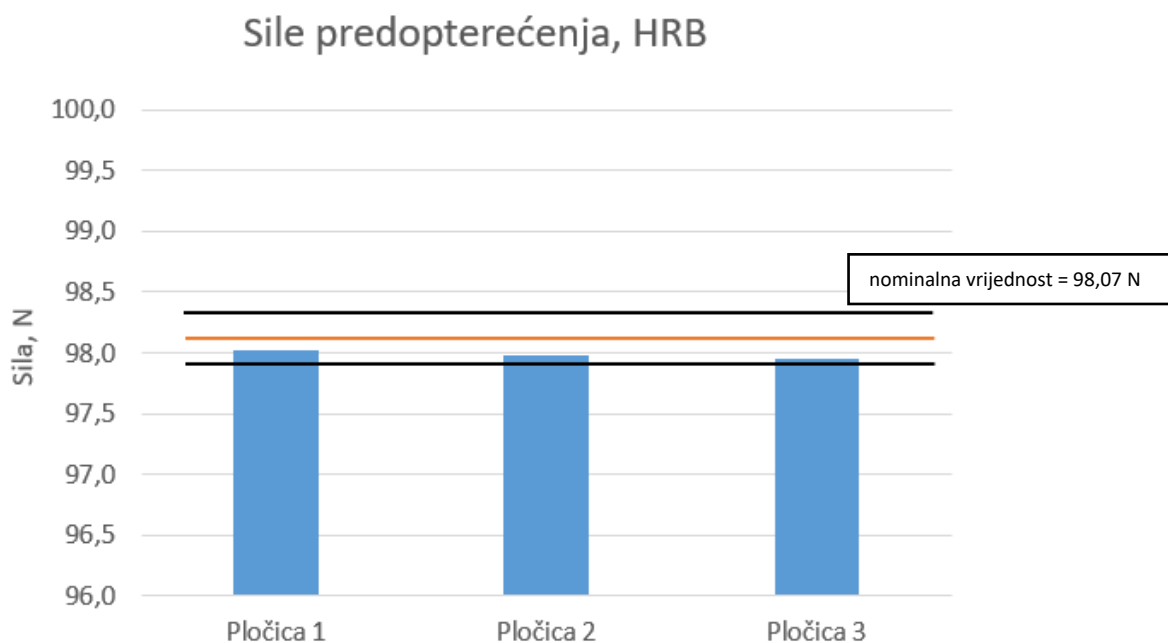
HCRM	HRCsr.	uCRM	u _{ms}	uH	uHTM	UHTM	ΔH _{HTMmax}
25,10	24,67	0,31	0,01	0,155	0,35	0,69	0,81
39,78	39,61	0,33	0,01	0,090	0,34	0,68	0,91
61,96	61,98	0,31	0,01	0,033	0,31	0,62	0,96

6. ANALIZA

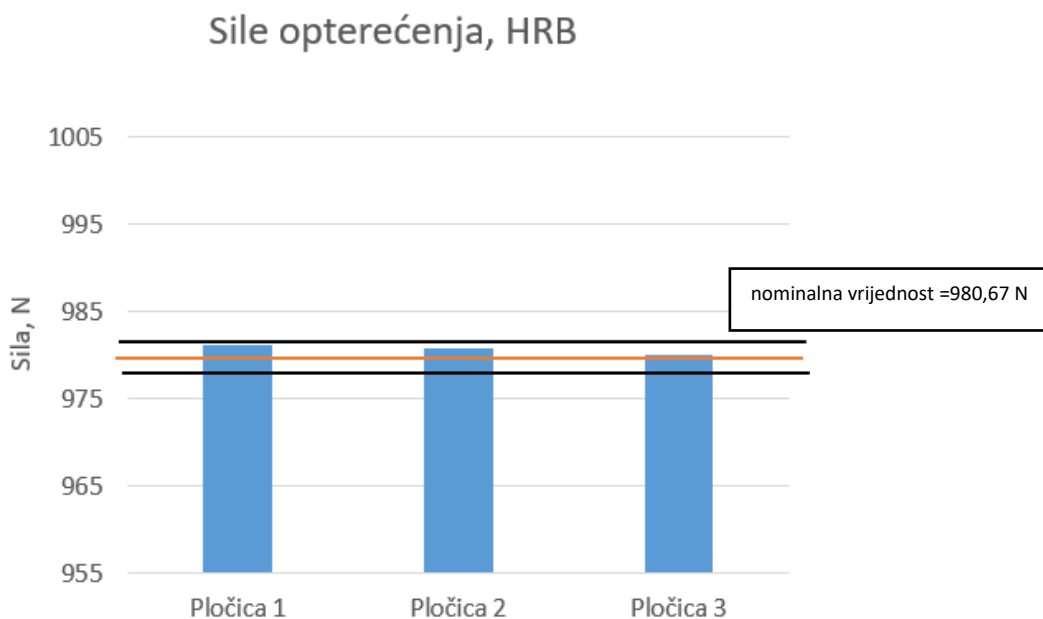
6.1. Analiza sila

Prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015, izmjerene su sile predopterećenja, opterećenja te sile nakon rasterećivanja sile opterećenja (povratak na silu predopterećenja).

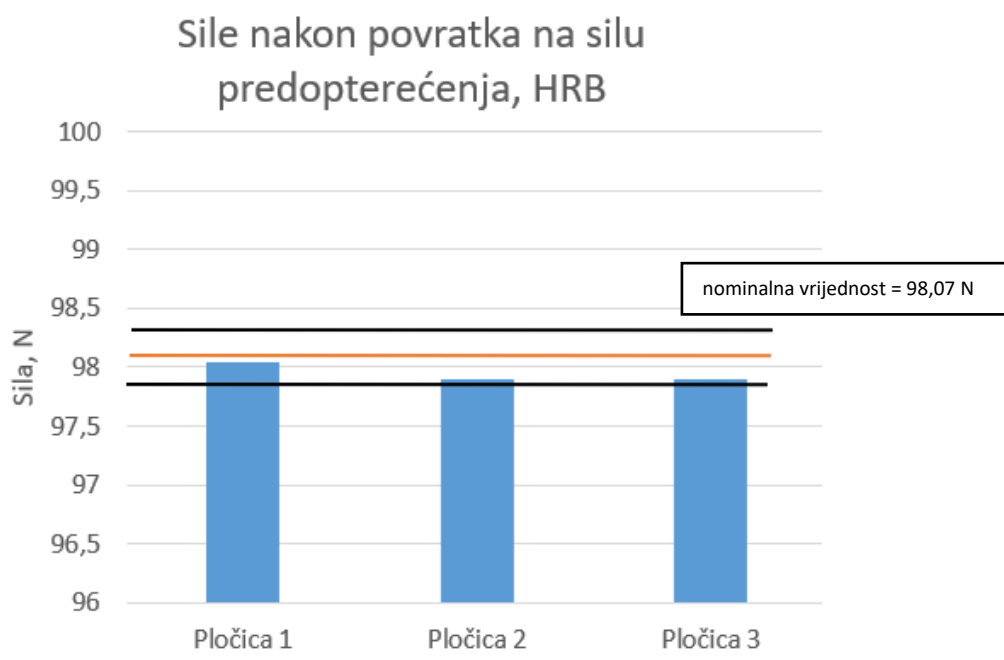
Na slikama 16., 17. i 18. nalaze se dijagrami sila izmjerenih na tri pločice različite tvrdoće. Nominalna vrijednost sile predopterećenja (i sile nakon rasterećivanja sile opterećenja) za HRB metodu iznosi 98,07 N što je i prikazano linijom narančaste boje. Dopušteno je odstupanje od $\pm 0,2\%$, a sve se izmjerene vrijednosti nalaze u tom intervalu (linije crne boje). Nominalna vrijednost sile opterećenja iznosi 980,67 N i smije odstupati $\pm 0,1\%$. Sve izmjerene vrijednosti sila nalaze se u dopuštenim granicama.



Slika 16. Dijagram sila predopterećenja (HRB)



Slika 17. Dijagram sila opterećenja (HRB)

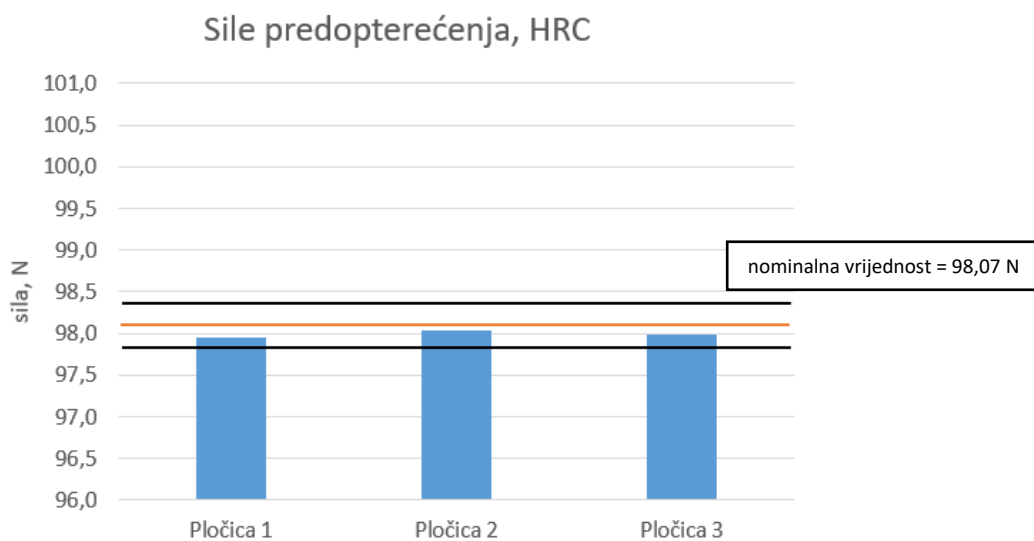


Slika 18. Dijagram sile nakon rasterećivanja sile opterećenja (HRB)

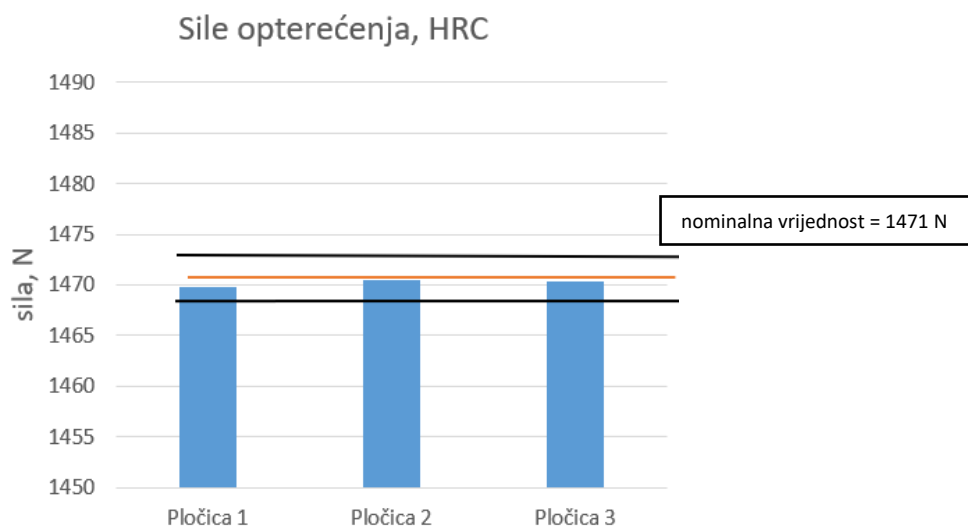
Vrlo slična stvar događa se i kod HRC metode.

Slike 19., 20. i 21. prikazuju dijagrame sila za HRC metodu. Sve izmjerene sile nalaze se u dopuštenim granicama. Kao i kod HRB metode, nominalna vrijednost sile predopterećenja (i sile nakon rasterećivanja sile opterećenja) za HRC metodu iznosi 98,07 N što je i prikazano linijom narančaste boje. Dopušteno je odstupanje od $\pm 0,2\%$, a sve se mjerene vrijednosti sile nalaze u dopuštenim granicama. Nominalna vrijednost sile opterećenja za HRC metodu iznosi

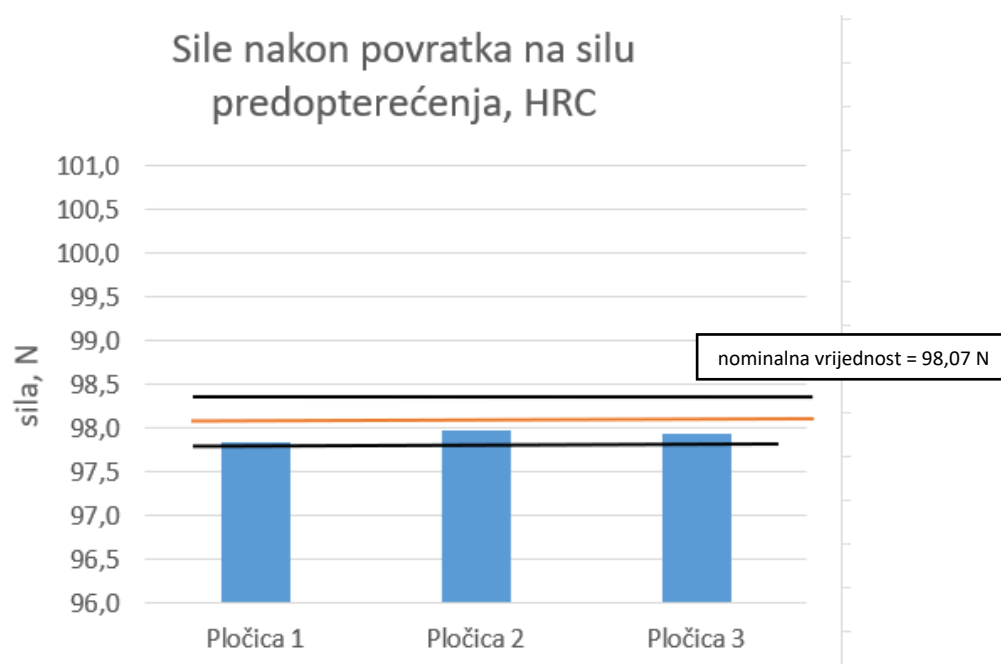
1471 N te smije odstupati $\pm 0,1\%$. Izmjerene sile opterećenja za HRC metodu na tri pločice različite tvrdoće također ulaze u dopušteni interval.



Slika 19. Dijagram sila predopterećenja (HRC)



Slika 20. Dijagram sila opterećenja (HRC)



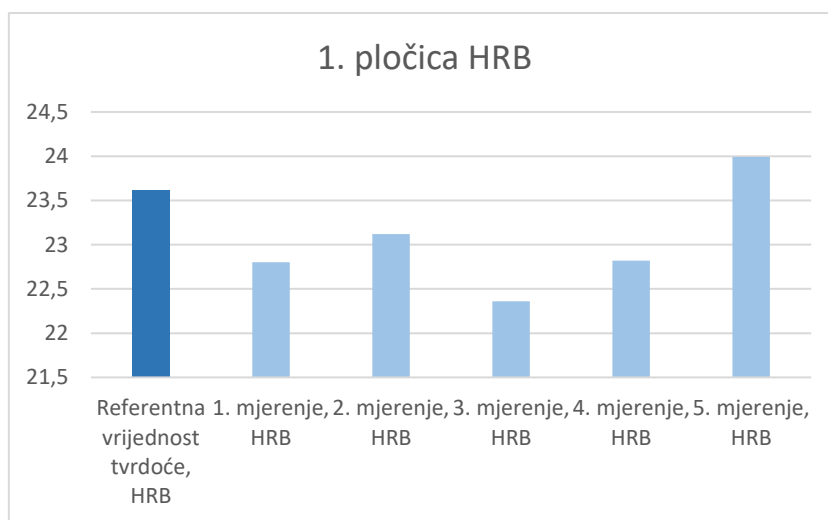
Slika 21. Dijagram sile nakon rasterećivanja sile opterećenja (HRC)

6.2. Analiza indirektne metode

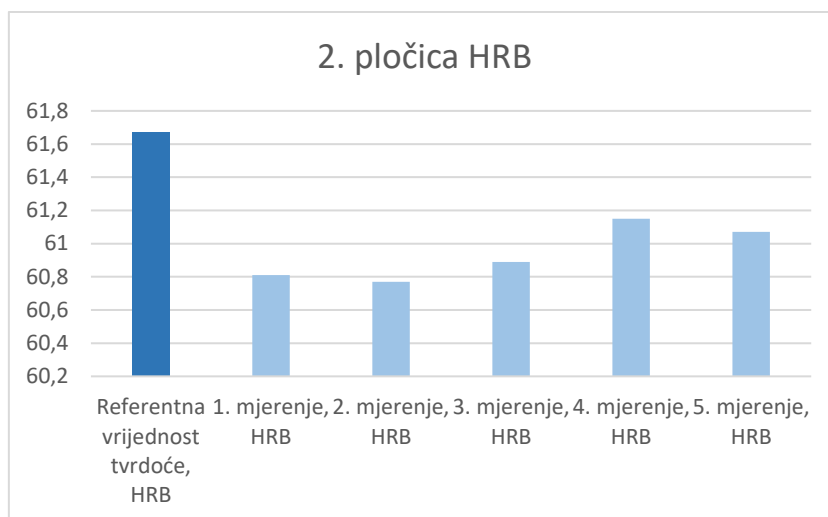
Na slikama 22, 23. i 24. nalaze se dijagrami koji prikazuju tri referentne pločice različitih tvrdoća HRB metode. Prva (tamnija) linija predstavlja vrijednost tvrdoće referentne pločice, a linije koje slijede (prikazane svjetlijom bojom) su iznosi tvrdoće mjerene tvrdomjerom pet puta na toj pločici. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće za sve tri pločice ulazi u dopušteni interval odstupanja koji je naveden u tablici 14.

Tablica 14. Dopuštena odstupanja

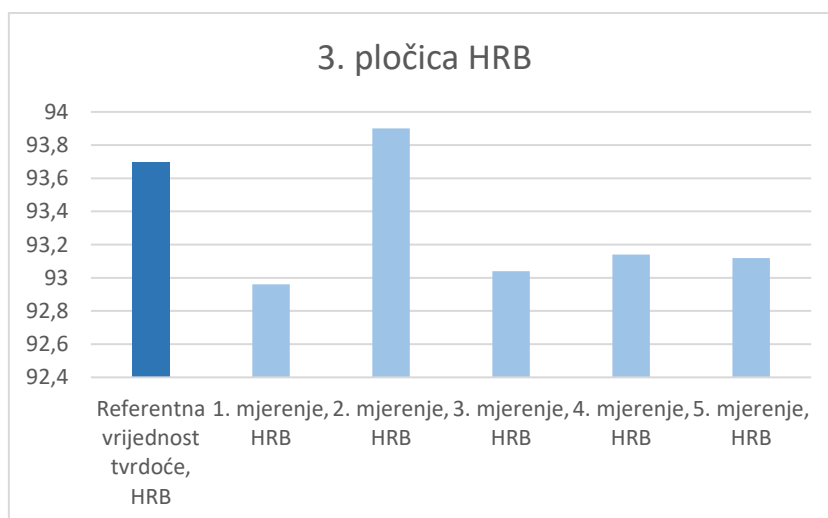
HRC	E, HRC	r
20 - 70	±1,5	≤0,02(100- Hsr) ili 0,8 HRC
HRB	E, HRB	r
20- ≤ 45	±4	≤0,04 (130 -Hsr) ili 1,2 HRB
> 45 - ≤ 80	±3	
> 80 - ≤ 100	±2	



Slika 22. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 23,62 HRB

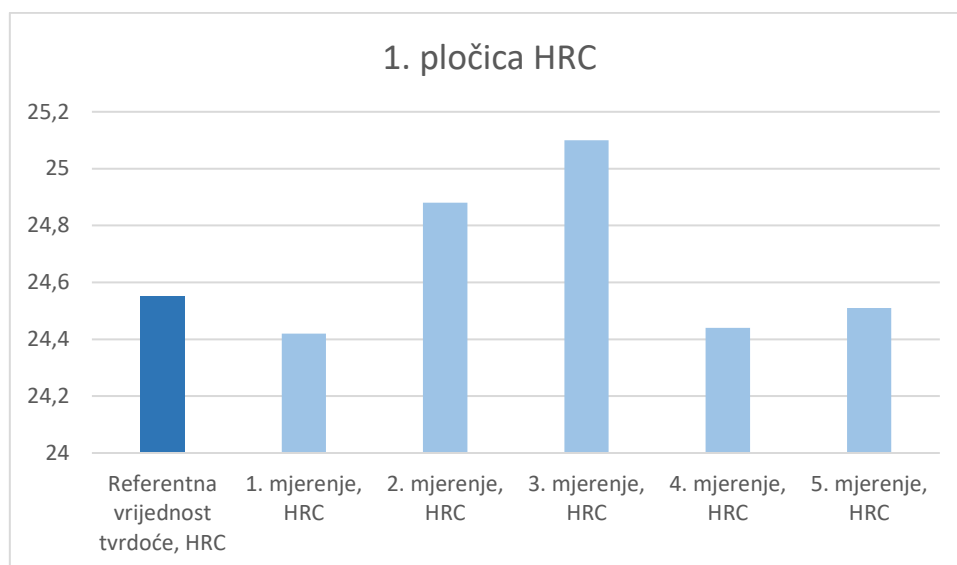


Slika 23. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 61,67 HRB

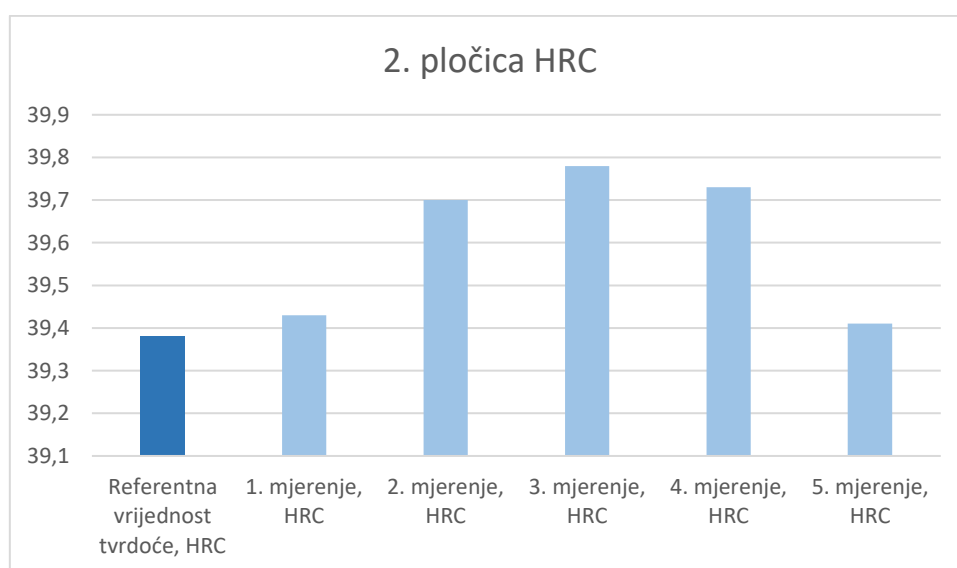


Slika 24. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 93,70 HRB

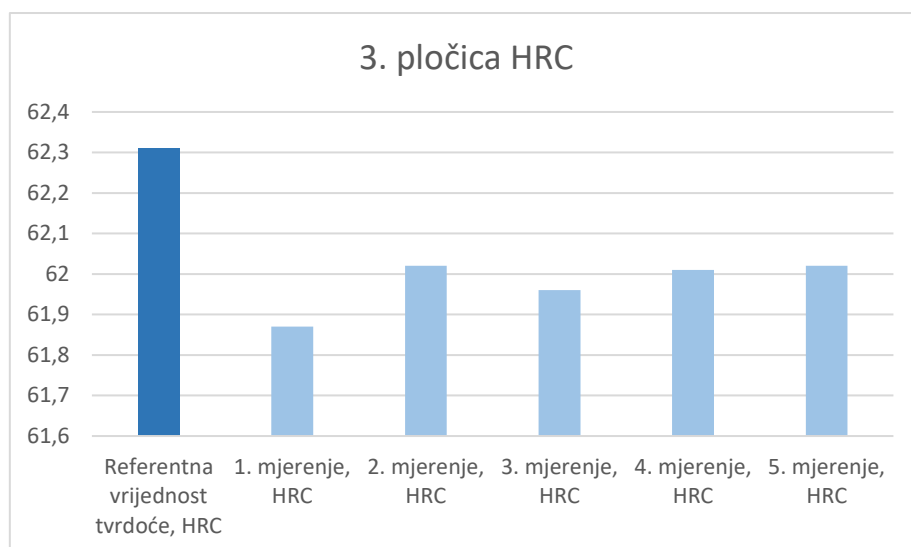
Slike 25., 26. i 27. prikazuju dijagrame mjerenja tvrdoće za 3 pločice HRC metodom. Izmjerena vrijednost tvrdoće ulazi u dopuštene intervale odstupanja prema tablici 16.



Slika 25. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 24,55 HRC



Slika 26. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 39,38 HRC



Slika 27. Dijagram mjerenja tvrdoće za pločicu 62,31 HRC

7. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja pri kojem se koristilo referentnim etalomom INDENTEC ZHR 8150 TKT, doneseni su sljedeći zaključci:

- Prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015 koja propisuje direktno umjeravanje tvrdomjera ispitane su vrijednosti sila te su sile unutar granica koje norma zahtjeva. Tolerancija sile predopterećenja (F_0) je $\pm 0,2$ %, a sile u ovom ispitivanju nalaze se u tom intervalu što je iznimno dobro. Glavna sila opterećenja (F_1) prema normi HRN EN ISO 6508 – 2:2015 smije odstupati $\pm 0,1$ %. Sile opterećenja u ovom ispitivanju nalaze se u tom intervalu. Sustav opterećenja ovog tvrdomjera je evidentno vrlo dobro izrađen te stabilno funkcionira.
- Prema normi HRN EN ISO 6508 – 1:2016 uspoređena su stvarna vremena postizanja sile te trajanja sile opterećenja. Vremena se nalaze unutar zahtijevanih intervala iz norme.
- Provjera mjernog sustava dubine i histereze nije bila moguća jer se ispitivanje odvijalo na digitalnom tvrdomjeru, a za takve uređaje potrebna je druga metoda provjere koja nije bila dostupna.
- Provjera indentora vršila se samo pomoću mikroskopa povećanja 50x te je ustanovljeno da indentori nemaju oštećenja te eventualno nalijepljenog materijala. Kako je indenter kratko vrijeme u eksploataciji, nije provedena dodatna provjera kutova koja je bila u zahtijevanim granicama prema potvrdi o umjeravanju.
- Indirektnom metodom mjerene su tvrdoće referentnih etalonskih pločica. Izvršeno je pet mjerenja radi točnijih rezultata. Sva mjerenja i odstupanja su u skladu s dopuštenim intervalima iz norme HRN EN ISO 6508:3-2015. Može se zaključiti da mjerna nesigurnost opada s porastom tvrdoće referentnih pločica.
- Obradom izmjerenih podataka, može se analizirati mjerna sposobnost referentnog etalona INDENTEC ZHR 8150 TKT te se može zaključiti da je etalon prikladan za umjeravanje referentnih pločica tvrdoće odnosno indirektnu metodu prema normama HRN EN ISO 6508 - 1:2016, HRN EN ISO 6508 - 2:2015 i HRN EN ISO 6508 - 3:2015.

LITERATURA

- [1] Šojat A. Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [2] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=62873> [pregledano 26.12.2021.]
- [3] https://fractory.com/material-hardness/#What_Is_Material_Hardness [pregledano 26.12.2021.]
- [4] Alar Ž. Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera [doktorska disertacija]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [5] Ivušić, Vinko ; Franz, Mladen ; Španiček, Đurđica ; Ćurković, Lidija (2014) Materijali I.
- [6] Martinez I. Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Vickers [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019.
- [7] Podloge za vježbe iz Materijala 1, FSB, Zagreb, 2012.
- [8] HRN EN ISO 6508 - 1:2016 – Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu - 1. dio: Metoda ispitivanja
- [9] Herrmann K.; „Hardness testing – principles and applications“, 2011, ASM International, USA
- [10] HRN EN ISO 6508 - 2:2015 – Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu – 2. dio: Provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja i utiskivača
- [11] HRN EN ISO 6508 - 3:2015 – Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu – 3. dio: Umjeravanje referentnih pločica

PRILOZI

- I Certifikat indentora HRB
- II Certifikat indentora HRC
- III Certifikat pločice tvrdoće 23,62 HRB
- IV Certifikat pločice tvrdoće 61,67 HRB
- V Certifikat pločice tvrdoće 93,7 HRB
- VI Certifikat pločice tvrdoće 24,55 HRC
- VII Certifikat pločice tvrdoće 39,38 HRC
- VIII Certifikat pločice tvrdoće 62,31 HRC