

Utjecaj sustava za opterećivanje na mjernu sposobnost tvrdomjera po metodi Rockwell

Tahiri, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:169901>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dominik Tahiri

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Alar

Student:

Dominik Tahiri

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru na uloženom vremenu, prenesenom znanju i pomoći tijekom izrade rada te asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing. Za pomoć pri izradi eksperimentalnog dijela rada zahvaljujem tehničaru Romanu Divjaku. Velika zahvala mojoj obitelji na podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Dominik Tahiri

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Tahiri**

JMBAG: 0035217280

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj sustava za opterećivanje na mjernu sposobnost tvrdomjera po metodi Rockwell**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the loading system on measurement capability of the Rockwell hardness tester**

Opis zadatka:

Umjeravanje tvrdomjera po metodi Rockwell definirano je normom te sadrži niz određenih radnji kako bi se osigurala pouzdanost uređaja. Jedna od tih radnji je provjera sustava za opterećivanje koji je od ključne važnosti kako bi se tijekom ispitivanja tvrdoće osigurale točno definirane sile predopterećenja te glavnog opterećenja.

U radu je potrebno:

1. opisati mjerenje tvrdoće po metodi Rockwell te vrste sustava opterećivanja
2. opisati značaj i svrhu etalonskih mjerila tvrdoće po metodi Rockwell te osiguranje njihove sljedivosti
3. provesti eksperimentalno provjeru sila opterećivanja na tvrdomjerima po metodi Rockwell s različitim sustavima opterećenja.
4. analizirati dobivene rezultate i dati određene zaključke.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Alar

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. TVRDOĆA	3
2.1. Povijest mjerenja tvrdoće	3
2.2. Ispitivanje tvrdoće	5
2.3. Metode mjerenja tvrdoće	6
2.3.1. Brinell-ova metoda	7
2.3.2. Vickers-ova metoda	9
2.3.3. Rockwell-ova metoda	10
3. ROCKWELL METODA ZA ISPITIVANJE TVRDOĆE	11
3.1. Varijante Rockwell-ove metode	11
3.2. Postupak izvođenja Rockwell metode	13
3.3. Prednosti i nedostaci Rockwell metode	16
3.4. Oprema za mjerenje tvrdoće Rockwell metodom	16
3.4.1. Sustavi za opterećivanje	17
3.4.2. Postolja za ispitni uzorak i indentori kod Rockwell metode	19
4. SLJEDIVOST MJERENJA TVRDOĆE, ETALONI I NORME	21
4.1. Sljedivost mjerenja tvrdoće	21
4.2. Mjerni etaloni	23
4.3. Norma za definiranje tvrdoće po Rockwellu	25
5. EKSPERIMENTALNI DIO	26
5.1. Oprema za provođenje ispitivanja	26
5.2. Metoda direktnog umjeravanja tvrdomjera po Rockwell HRB i HRC metodi	31
5.3. Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera po Rockwell HRB i HRC metodi	32
6. ANALIZA REZULTATA MJERENJA	35
6.1. Analiza rezultata provjera sila	35
6.2. Analiza rezultata provjere referentnih pločica	39
6.3. Analiza odstupanja sila	43
7. ZAKLJUČAK	48
LITERATURA	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Djelovanje sile pri ispitivanju tvrdoće statičkom metodom	6
Slika 2. Podjela metoda tvrdoće na statičke i dinamičke.....	7
Slika 3. Brinell-ova metoda mjerenja tvrdoće	8
Slika 4. Vickers metoda mjerenja tvrdoće	9
Slika 5. Mjerna skala i položaj indentora kod HRC	14
Slika 6. Faze kod Rockwell metode	14
Slika 7. Mjerna skala i položaj indentora kod HRB	15
Slika 8. Tvrdomjer za Rockwell metodu	17
Slika 9. Senzor sile instaliran iznad indentora	18
Slika 10. Vrste postolja za ispitne uzorke.....	19
Slika 11. Indentori za Rockwell metodu	20
Slika 12. Četveroslojna struktura metrološkog niza.....	22
Slika 13. Primarni nacionalni etalon sile u PTB-u, Njemačka	24
Slika 14. Referentni etalon sile u LIMS-u, FSB, Hrvatska.....	24
Slika 15. Tvrdomjer Indentec.....	27
Slika 16. Digitalni pokazivač tvrdomjera	28
Slika 17. Prijenosni etalon sile KTN-D-Z 5 kN.....	29
Slika 18. Mjerno pojačalo	29
Slika 19. Certifikat za prijenosni etalon sile	30
Slika 20. Etalonska pločica 62,31 HRC.....	34
Slika 21. Mjerenje tvrdoće na tvrdomjeru	34
Slika 22. Dijagramski prikaz sila predopterećenja HRB	35
Slika 23. Dijagramski prikaz sila glavnog opterećenja HRB	36
Slika 24. Dijagramski prikaz sila nakon povratka na silu predopterećenja HRB	37
Slika 25. Dijagramski prikaz sila predopterećenja HRC	38
Slika 26. Dijagramski prikaz sila glavnog opterećenja HRC	38
Slika 27. Dijagramski prikaz sila nakon povratka na silu predopterećenja HRC	39
Slika 28. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 23,62 HRB	40
Slika 29. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 61,67 HRB	40
Slika 30. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 93,7 HRB	41
Slika 31. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 24,55 HRC	41
Slika 32. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 39,38 HRC	42

Slika 33. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 62,31 HRC	42
Slika 34. Srednje vrijednosti sila predopterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB	43
Slika 35. Srednje vrijednosti sila glavnog opterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB	44
Slika 36. Srednje vrijednosti sila rasterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB	44
Slika 37. Srednje vrijednosti sila predopterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC	45
Slika 38. Srednje vrijednosti sila glavnog opterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC	45
Slika 39. Srednje vrijednosti sila rasterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC	45
Slika 40. Dijagramski prikaz maksimalnog odstupanja sila za HRB	46
Slika 41. Dijagramski prikaz maksimalnog odstupanja sila za HRC	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razvoj metoda mjerenja tvrdoće kroz povijest.....	4
Tablica 2. Mohs-ova skala tvrdoće.....	5
Tablica 3. Varijante Rockwell metode	12
Tablica 4. Izmjerene vrijednosti sile HRB metodom	31
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti sile HRC metodom	32
Tablica 6. Vrijeme trajanja ispitivanja	32
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće HRB.....	33
Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće HRC.....	33
Tablica 9. Dopusštena odstupanja	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	Promjer kuglice
d	mm	Promjer otiska
F	N	Sila
HR	/	Tvrdoća po Rockwellu
N	/	Konstanta pune skale
h	mm	Izmjerena dubina utiskivanja
S	mm	Konstanta skaliranja
HRC	/	Tvrdoća po Rockwellu C
HRB	/	Tvrdoća po Rockwellu B
ΔF_{rel}	%	Relativno odstupanje sile
F_{sr}	N	Srednja vrijednost sile
U_F	%	Proširena mjerna nesigurnost sustava za opterećivanje
ΔF_{max}	%	Maksimalno odstupanje sile
F_{norm}	N	Normom definirana vrijednost sile

SAŽETAK

Tvrdoća materijala je jedno od najispitivanijih mehaničkih svojstava materijala, a može se ispitati pomoću raznih metoda (Brinell, Vickers, Rockwell i dr.). U teorijskom dijelu rada opisan je pojam tvrdoće, pojedine metode mjerenja tvrdoće te posebno Rockwell metoda. Važno je naglasiti da se postupak mjerenja te umjeravanje tvrdomjera po Rockwell metodi izvodi po strogo definiranoj normi HRN EN ISO 6508:2015 kako bi se održala sljedivost mjerenja tvrdoće i točnost podataka.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je provjera sila opterećenja na tvrdomjeru po metodi Rockwell s različitim sustavima opterećenja. Provjera sustava za opterećivanje je od velike važnosti kako bi se tijekom ispitivanja tvrdoće osigurale točno definirane sile predopterećenja i glavnog opterećenja.

Ključne riječi: Tvrdoća, Rockwell metoda, sljedivost mjerenja, opterećenje, norma.

SUMMARY

Material hardness is one of the most tested mechanical properties of materials and it can be tested using various methods (Brinell, Vickers, Rockwell, etc.). The theoretical part of the paper describes the concept of hardness, certain methods of hardness measurement and especially the Rockwell method. It is important to emphasize that the measurement procedure and the calibration of the hardness tester according to the Rockwell method are performed according to the strictly defined standard HRN EN ISO 6508:2015 in order to maintain the traceability of the hardness measurement and the accuracy of the data.

In the experimental part of the work, the load forces were checked on hardness tester according to the Rockwell method with different load systems. Verification of the loading system is of great importance to ensure precisely defined preload and main load forces during hardness testing.

Key words: Hardness, Rockwell method, measurement traceability, load, standard.

1. UVOD

Od davnina je postojala potreba za mjerenjem, pa se tako u početku za mjerenje dužine koristio lakat kao i drugi dijelovi tijela kao što su palac, ruka, stopa i dr.

Na takav način ljudi su u prošlosti uglavnom mjerili kratke udaljenosti. Prema znanstvenim istraživanjima prvi jedinstveni sustav mjera pronađen je u Babilonu te je bio propisan od strane vladara.

Pretpostavlja se da pramjerilo duljine datira iz vremena oko 2000 godina prije Krista, te da su u Babilonu osim pramjerila imali i normirane utege. Stari Grci su većinu svojih mjera preuzeli od Egipćana, ali su razvili i svoje kao što je atička stopa.

Daljnijim razvojem znanosti javlja se potreba uvođenja jedinstvenog sustava za mjere u mnogim zemljama. Iz tog razloga je Međunarodna komisija za metar 1870. godine definirala mjerne jedinice koje su zajedničke svim zemljama Europe.

Temelji mjeriteljstva u svijetu postignuti su potpisivanjem Dogovora o metru koji je potpisan u Parizu 1875. godine, te je stvoren Međunarodni sustav jedinica (SI) kakav danas znamo [1]. Stare civilizacije kao što su Egipćani, Grci i dr. spominju temeljna mehanička svojstva materijala kao što su tvrdoća i čvrstoća. Prvi pisani zapis o mehaničkom ispitivanju materijala datira iz 15. stoljeća. Leonardo da Vinci je tada izradio studiju o opterećenju savijanjem, gdje objašnjava savijanje užeta preko kolotura, dok sto godina kasnije Galileo Galilei pomoću jednostrano učvršćenog užeta za zid ispituje nosivost grede. Nakon pokusa s čeličnim oprugama, R. Hook 1678. godine otkriva zakon proporcionalnosti između sile i promjene oblika.

Od 16. stoljeća do danas radi se na usavršavanju raznih metoda ispitivanja materijala [2].

Tvrdoća kao jedno od temeljnih svojstava materijala je mehaničko svojstvo i najčešće se ispituje. Za ispitivanje, tj. mjerenje tvrdoće koriste se brojne metode mjerenja kao što su Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop i dr. Mjerenje tvrdoće može se provoditi u različitim fazama proizvodnog procesa prema točno propisanim uvjetima, te se može obavljati u laboratorijima ili na terenu.

Za postizanje vjerodostojnih rezultata ključna je sljedivost mjerenja i norme kojima se točno opisuje i definira način na koji se provodi mjerenje tvrdoće.

U prvom dijelu diplomskog rada opisati će se pojam tvrdoće, njegova povijest, te metode mjerenja tvrdoće. U posebnom poglavlju biti će detaljno opisana Rockwell metoda mjerenja tvrdoće, postupak izvođenja metode, njezine prednosti i nedostaci, te oprema potrebna za

izvođenje postupka. Također će u teorijskom dijelu rada biti naznačena važnost mjerne sljedivosti mjerenja tvrdoće, te norme koje definiraju Rockwell metodu.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti će se provjera sila opterećivanja na tvrdomjeru po Rockwell metodi s različitim sustavima opterećenja i mjerenje tvrdoće na referentnim etalonskim pločicama, te analizirati dobiveni rezultati.

2. TVRDOĆA

Jedno od temeljnih mehaničkih svojstava materijala je tvrdoća koja se definira kao otpornost materijala prodiranju stranog, znatno tvrđeg tijela u njegovu strukturu ili površinu. Isto tako tvrdoća se može definirati i kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji. Samo tvrdi materijal može se utisnuti u površinu mekšeg materijala. Svojstvo tvrdoće odnosi se samo na krutine jer plinovi i tekućine ne posjeduju tvrdoću. To je svojstvo materijala, koje ovisi o sastavu i strukturi materijala, temperaturi tijela, brzini prodiranja i dr.

Tvrdoća ne predstavlja fizikalno definirano mehaničko svojstvo, tj. nema mjernu jedinicu već se rezultati mjerenja predstavljaju oznakom prema metodi kojom je izvršeno mjerenje [2].

Na području strojarstva, mjerenje tvrdoće je vrlo bitno svojstvo kod ispitivanja materijala, jer se može povezati s drugim svojstvima kao što je npr. vlačna čvrstoća. Osim toga, izvođenje mjerenja je vrlo jednostavno i nisu potrebni posebno izrađeni uzorci [3].

Vrijednost tvrdoće je rezultat mjerenja provedenog na ispitnom uzorku pod uvjetima koji su standardizirani. Određivanje tvrdoće obavlja se u dva koraka, prema [2]:

- 1) utiskivanjem indentora u ispitni uzorak pod određenim uvjetima koji su točno propisani
- 2) određivanjem karakterističnih dimenzija otiska (srednja vrijednost promjera, dijagonale ili dubina otiska).

2.1. Povijest mjerenja tvrdoće

Mjerenje tvrdoće kao postupak počeo se primjenjivati još u 17. stoljeću, a tijekom vremena razvile su se nove metode koje su jednostavnije za korištenje. U tablici 1. prikazan je povijesni razvoja raznih metoda za mjerenje tvrdoće [2].

Tablica 1. Razvoj metoda mjerenja tvrdoće kroz povijest [2]

Godina	Opis
1640	Barba: ocjenjivanje tvrdoće čelika pomoću turpije
1722	Reaumur: određivanje tvrdoće čelika kroz pravljenje ureza pomoću različitih minerala
1801	Hauy: Sistem tvrdoće pomoću riseva sa skalom od četiri stupnja
1820	Mohs postavlja risnu skalu tvrdoće s 10 stupnjeva
1874	Uchatius: ocjenjuje tvrdoću bronce s 25 centimetara visokim padajućim dlijetom (dinamička metoda mjerenja tvrdoće)
1900	Brinell: otkriva metodu gdje je indenter kuglica, po njemu je ova metoda i dobila ime
ca. 1905	Martens: otkriva princip penetracije indentora u ispitni uzorak s istovremenim mjerenjem sile i dubine prodiranja indentora
1907	Shore: odskočni postupak za čelike
1920	Rockwell: Postupak mjerenja tvrdoće s uporabom predopterećenja i mjerenja dubine prodiranja indentora
1925	Smith i Sandland otkrivaju Vickers metodu mjerenja tvrdoće
1939	Knoop
1950	Berkovich: trokutna piramida

Od svojih ranih početaka u testiranju ogrebotina, oko 1722. godine, razvoj ispitivanja tvrdoće bio je u skladu s razvojem tehnologije toga doba.

Neki od prvih tipova ispitivanja tvrdoće potječu od šipki čija je tvrdoća varirala od kraja do kraja. Koncentracija sile pri kojoj bi materijal koji se testira mogao stvoriti ogrebotinu na šipki bila je odlučujući faktor u tvrdoći uzorka. Ovi grubi oblici davali su relativnu i često usporednu indikaciju materijalne otpornosti i bili su primjereni za to vrijeme. Smatra se da je prvu metodu za mjerenje tvrdoće 1822. godine razvio njemački geolog i mineralog Friedrich Mohs. U onome što je na kraju postalo poznato kao Mohsov test tvrdoće, nepoznati uzorak bi se izgrebao materijalom poznate tvrdoće. Kasnije je ovaj test poboljšan na standardiziraniji format i uključivao je grebanje površine materijala dijamantom i mjerenje širine rezultirajuće linije. Mohs je odabrao dijamant na temelju njegovog svojstva kao najtvrdje poznate prirodne tvari i činjenice da dijamant može proizvesti ogrebotinu na gotovo svim drugim tvarima. Ovaj test koristi skalu od 1-10, što je veća vrijednost, to je tvrdi materijal, tablica 2. Mohsova metoda, tj. skala primjenjuje se samo za minerale, a ne tehničke materijale. U nekim procesima Mohsova metoda se i danas koristi. Niti jedan oblik testiranja grebanjem tijekom sljedećih 100-tinjak godina nije zadobio značaj u testiranju materijala na način na koji je to učinio Mohsov test [4].

Tablica 2. Mohs-ova skala tvrdoće [2]

Tvrdoća	Mineral	Primjeri materijala odgovarajuće tvrdoće iz svakodnevne primjene
1	Talk ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	Milovka
2	Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Nokat na prstu
3	Kalcit (CaCO_3)	Brončana kovanica
4	Fluorit (CaF_2)	Čelični čavao
5	Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$)	Staklo
6	Ortoklas/Feldspat (KAlSi_3O_8)	Oštrica džepnog nožića
7	Kvarc (SiO_2)	Čelični nož
8	Topaz ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$)	Brusni papir
9	Korund (Al_2O_3)	Rubin
10	Dijamant (C)	Sintetički dijamant

Nakon Mohs-ove skale, prvo široko prihvaćeno i standardizirano mjerenje tvrdoće utiskivanjem predložio je 1900. godine J. A. Brinell. Razvio je metodu kod koje se u ispitni uzorak utiskuje metalna kuglica i mjeri otisak. Nadalje, Rockwell 1920. godine u svojoj metodi uvodi predopterećenja i mjerenje dubine prodiranja indentora. Vickers-ova metoda 1925. godine uvodi četverostranu dijamantnu piramidu kao indentor. Radi potrebe mjerenja tvrdoće kod tankih uzoraka i slojeva, 1939. godine Knoop razvija novu metodu mjerenja, te mijenja oblik indentora. Danas je u upotrebi niz metoda za ispitivanje tvrdoće jer ni jedna se metoda nemože primijeniti na sve materijale [5].

2.2. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće je zbog svoje povezanosti s drugim mehaničkim svojstvima materijala vrlo važno. Ono se smatra nerazornim ispitivanjem jer vrlo malo oštećuje površinu ispitivanog uzorka. Prije početka ispitivanja potrebno je pripremiti ispitni uzorak, dok se za utiskivanje u ispitni uzorak koristi posebno izrađen indentor odabranih dimenzija. Tvrdomjeri su uređaji za mjerenje tvrdoće koji su jednostavniji od drugih uređaja koji se koriste za ispitivanje mehaničkih svojstava. Posebno je važno izabrati odgovarajuću metodu mjerenja tvrdoće koja daje pouzdane rezultate koji zadovoljavaju zahtjeve za daljnju primjenu materijala. Ispitivanje tvrdoće provodi se tako da se indentor utiskuje u uzorak kroz standardizirano vrijeme i uz određeno opterećenje neke sile. Kada se indentor utisne u materijal, on deformira površinu

materijala, te se ta deformacija zatim mjeri, a mjerenje se koristi za dodjelu vrijednosti tvrdoće materijala prema specifičnoj skali testa. Utiskivanje pri ispitivanju tvrdoće znači trajnu deformaciju na površini materijala uzorka.

Postoje dvije osnovne skupine metoda za ispitivanje tvrdoće, prema [2]:

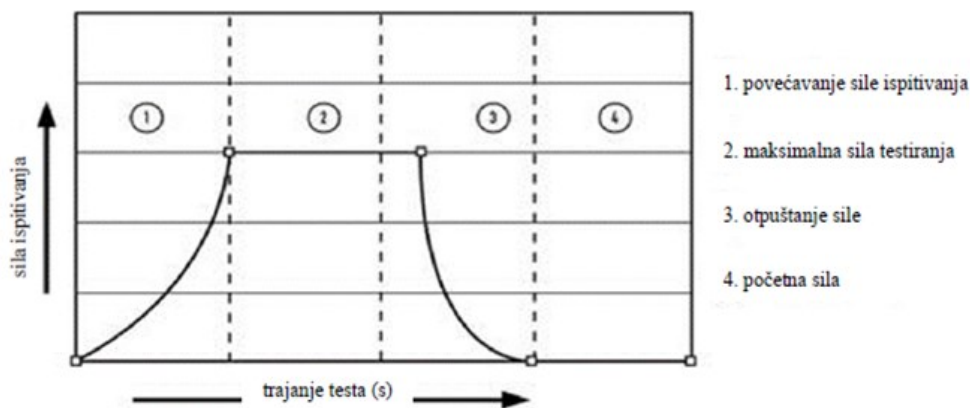
- a) metode za metalne materijale
- b) metode za elastomere i ostale polimere.

Ispitivanje tvrdoće koristi se u različitim dijelovima inženjerstva za usporedbu i pravilan odabir materijala, kao i za kontrolu kvalitete procesa proizvodnje.

2.3. Metode mjerenja tvrdoće

Zbog velikog broja različitih metoda za ispitivanje tvrdoće, naročito je važno odabrati ispravnu metodu određivanja tvrdoće. Metode za ispitivanja tvrdoće mogu se prema načinu djelovanja ispitnih sila podijeliti na statičke i dinamičke metode.

Statičko ispitivanje tvrdoće koristi indenter koji se utiskuje nekom određenom silom i drži na površini ispitnog uzorka određeno vrijeme (10-15 sekundi), slika 1. Djelovanje sile cijelo vrijeme mora biti u smjeru normale u odnosu na podlogu na kojoj se nalazi uzorak. Indenter je veći dio ispitivanja statičan i uzrokuje trajnu deformaciju površine materijala [6].

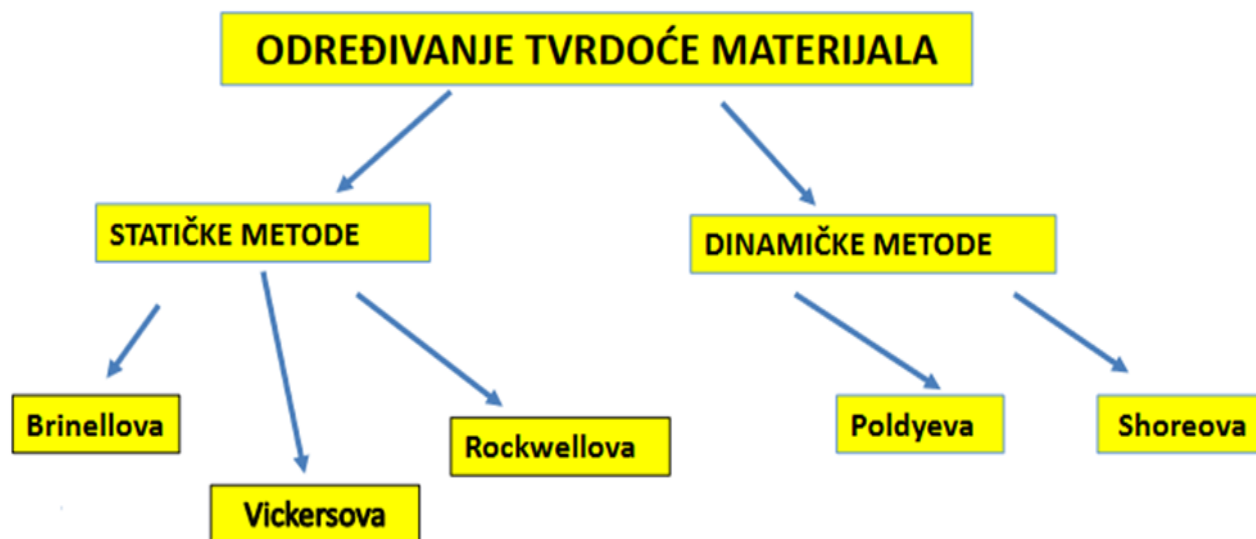


Slika 1. Djelovanje sile pri ispitivanju tvrdoće statičkom metodom [7]

Dobiveni iznos vrijednosti tvrdoće nema jedinicu već je ta vrijednost na ljestvici povezana s određenom metodom. Na primjer, HR je Rockwellova tvrdoća, HB je Brinellova tvrdoća, HV je Vickersova tvrdoća itd.

Dinamičko ispitivanje tvrdoće mjeri brzinu odskoka pokretnog indentora kada udari u uzorak materijala i odskoči. Dobivena vrijednost tvrdoće određena je iz udaljenosti odskoka ili brzine

odskoka. Obično se primjenjuje u slučajevima u kojima statičko ispitivanje tvrdoće možda nije praktično, kao na primjer na terenu ili kada su uključeni veliki uzorci. Dinamičko ispitivanje tvrdoće obično nije tako precizno kao statičko ispitivanje tvrdoće [6]. Neke od dinamičkih metoda su Poldyeva i Shoreova metoda mjerenja tvrdoće.

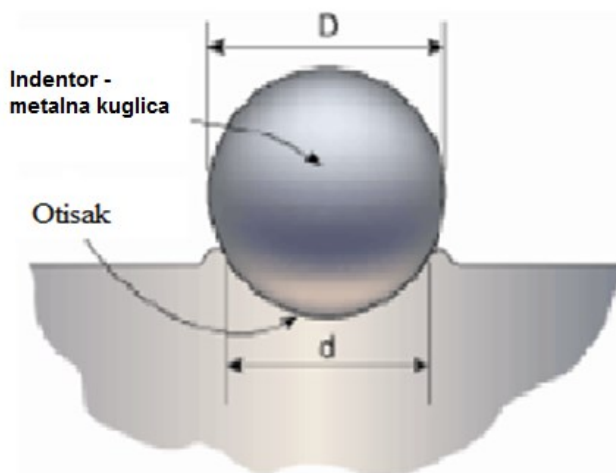


Slika 2. Podjela metoda tvrdoće na statičke i dinamičke [8]

Danas se najčešće koriste Brinell, Vickers i Rockwell metode koje spadaju u statičke metode.

2.3.1. Brinell-ova metoda

Prvo široko prihvaćeno i standardizirano ispitivanje tvrdoće utiskivanjem predložio je J. A. Brinell 1900. godine. Njegov je cilj bio pronaći dosljedan i brz način određivanja tvrdoće materijala. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu, koje se i danas široko koristi, sastoji se od utiskivanja metalne površine kuglicom promjera 1 do 10 mm pri velikim opterećenjima. Rezultirajući kružni otisak je u to vrijeme mjeren ručnim mikroskopom. Promjer otiska je zatim matematički izračunat do vrijednosti tvrdoće, slika 3. Brinell je ovom metodom u biti uveo proizvodnu fazu ispitivanja tvrdoće utiskivanjem i otvorio put za dodatna ispitivanja utiskivanjem koja su bila relevantnija za različite vrste materijala. Danas se Brinellova metoda i dalje koristi u ispitivanju aluminijskih i bakrenih legura, te čelika i lijevanog željeza pri većim rasponima sila. Metoda ispitivanja posebno je korisna u određenim završnim obradama materijala jer je tolerantnija na površinske uvjete zbog veličine utiska i velike primijenjene sile [4].



Slika 3. Brinell-ova metoda mjerenja tvrdoće [8]

Iako se Brinellov test pokazao učinkovitim i produktivnim sredstvom za ispitivanje materijala, te je zasigurno pridonio uvođenju nove standardizirane ere u ispitivanju tvrdoće, imao je ograničenja.

Prednosti Brinell-ove metode su:

- priprema ispitnog uzorka je jednostavna
- promjer otiska je lako mjerljiv
- jeftinija je od drugih metoda
- zbog primjene velikih sila metoda je najmanje osjetljiva na hrapavost površine [9].

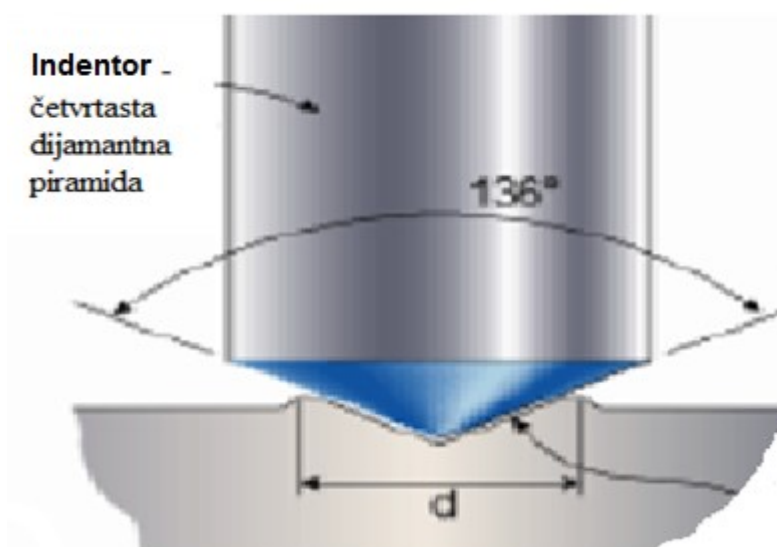
Nedostatci su:

- ograničeno mjereno područje je do 650 HBW
- tvrdoća je ovisna o sili koja se primjenjuje
- po završetku mjerenja ostaje veliki otisak [9].

2.3.2. Vickers-ova metoda

Vickers-ova metoda je razvijena u Ujedinjenom Kraljevstvu 1924. godine i koristi isti princip kao Brinell, onaj reguliranog otiska, ali koristi indenter od dijamanta u obliku piramide, a ne Brinellov kuglični indenter. Rezultirajući otisak ili neobrađeno područje mjeri se pomoću mikroskopa u kombinaciji s mjernim okularima [4].

Nedostatke Brinell-ove metode Vickers je uklonio promjenom indentora, umjesto metalne kuglice koristi dijamantnu piramidu, a zbog geometrije indentora ovdje tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili.



Slika 4. Vickers metoda mjerenja tvrdoće [8]

Kod Vickersa je indenter istostrana četverostrana piramida s kutom između nasuprotnih stranica od 136° , slika 4. Ovakav kut je odabran zbog toga što se na taj način dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili. To je važno jer se tako tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile, a isto tako tvrdoća istog materijala može se mjeriti s različitim opterećenjima [9].

Glavni nedostatci metode su potreba za posebnom pripremom ispitne površine, zatim za očitavanje dijagonala otiska potrebno je imati mjerni mikroskop, a također postoji i mogućnost loma dijamantnog indentora.

2.3.3. Rockwell-ova metoda

Za razliku od Brinella i Vickersa koji mjere veličinu otiska, Rockwell metoda mjeri dubinu prodiranja indentora. Kod ove metode kao indentor se koristi dijamantni stožac ili kuglicu od tvrdog metala.

Temelji se na mjerenju dubine prodiranja indentora u materijal pod određenim opterećenjem. Ispitivanje koristi standardno opterećenje za svaku ljestvicu, a tvrdoća se određuje dubinom prodiranja nakon uklanjanja opterećenja. Na mjerenje tvrdoće mogu utjecati vrsta materijala, veličina i oblik indentora i opterećenje primijenjeno na indentor. Rezultat se izražava kao broj na Rockwellovoj skali tvrdoće. Metoda nije destruktivna i može se koristiti na malim i na velikim uzorcima. Završna obrada površine, te veličina i geometrija uzorka mogu utjecati na točnost rezultata mjerenja [10].

U 3. poglavlju biti će detaljnije opisana Rockwellova metoda mjerenja tvrdoće.

3. ROCKWELL METODA ZA ISPITIVANJE TVRDOĆE

Metalurzi Hugh M. Rockwell i Stanley P. Rockwell radeći u tvornici kugličnih ležajeva u Connecticut-u početkom 20. stoljeća uočili su potrebu za točnim i brzim ispitivanjem tvrdoće metala u nosačima ležajeva. Shvatili su da moraju pronaći standardiziranu metodu za mjerenje učinaka toplinske obrade na čelične ležajeve. Dvojica izumitelja krenula su u stvaranje metode ispitivanja koja nije destruktivna, ali je isplativa i laka za implementaciju.

Stanley Rockwell patentirao je Rockwellovu metodu 1914. godine, a 1919. godine izmijenio je patent kako bi uključio Rockwellovu ljestvicu raznih varijanti te metode.

Rockwell-ova metoda zamijenila je ranije metode ispitivanja tvrdoće metala, kao što su Vickers-ova metoda koja je oduzimala previše vremena, te Brinell-ova metoda koja je bila previše destruktivna. Kako bi dizajnirao učinkovitu metodu testiranja, Stanley Rockwell uzeo je u obzir neke smjernice kao što su:

- Metoda je trebala biti jeftina za primjenu i održavanje.
- Sva ispitna oprema mora biti što je moguće nerazornija.
- Oprema za ispitivanje morala je biti što jednostavnija za implementaciju.
- Metoda mora omogućiti jednostavnu obuku i nadzor operatera.
- Radne upute moraju biti razumljive i jednostavne.
- Rezultati testa moraju sadržavati informacije koje su potrebne korisnicima.

Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće ispunila je sve zahtjeve i nakon 100 godina korištenja smatra se najboljom metodom za mjerenje tvrdoće [11].

3.1. Varijante Rockwell-ove metode

Postoje različite varijante Rockwell-ove metode kako bi sama metoda bila korisna u raznim primjenama. Da bi se varijante razlikovale označavaju se dodatnim slovima nakon oznake za Rockwell-ovu tvrdoću - HR, kao što su npr. HRA, HRB, HRC, itd.

Sve varijante Rockwell-ove tvrdoće razlikuju se po:

- vrsti indentora – materijal, oblik i veličina
- silama opterećenja – sila predopterećenja i opterećenja

U tablici 3. prikazane su različite varijante tvrdoće po Rockwell metodi.

Tablica 3. Varijante Rockwell metode [12]

Varijanta	Oznaka varijante	Vrsta indentora	Sila predopterećenja, F_0	Sila opterećenja, F_1	Praktično mjerno područje	Primjena
A	HRA	Dijamantni stožac	98,07 N	490,3 N	20 HRA do 88 HRA	Tvrdo sinterirani metal
B	HRB	Kugla 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	20 HRB do 100 HRB	Čelik, mjed, te legure bronce i aluminija
C	HRC	Dijamantni stožac	98,07 N	1,373 kN	20 HRC do 70 HRC	Očvrsnuti čelik i tvrdo lijevano željezo
D	HRD	Dijamantni stožac	98,07 N	882,6 N	40 HRD do 77 HRD	Čelik
E	HRE	Kugla 3,175 mm	98,07 N	882,6 N	70 HRE do 100 HRE	Aluminij, legure magnezija, metali za ležajeve
F	HRF	Kugla 1,5875 mm	98,07 N	490,3 N	60 HRF do 100 HRF	Legure bakra i tanki limovi
G	HRG	Kugla 1,5875 mm	98,07 N	1,373 kN	30 HRG do 94 HRG	Fosforova i berilijeva bronca, žareno lijevano željezo
H	HRH	Kugla 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	80 HRH do 100 HRH	Aluminij, cink i olovo
K	HRK	Kugla 3,175 mm	98,07 N	1,373 kN	40 HRK do 100 HRK	Metali za ležajeve i metali niske tvrdoće
15N	HR15N	Dijamantni stožac	29,42 N	117,7 N	70 HR15N do 94 HR15N	Kao HRA ili HRC za tanje i manje uzorke
30N	HR30N	Dijamantni stožac	29,42 N	264,8 N	42 HR30N do 86 HR30N	
45N	HR45N	Dijamantni stožac	29,42 N	411,9 N	20 HR45N do 77 HR45N	
15T	HR15T	Kugla 1,5875 mm	29,42 N	117,7 N	67 HR15T do 93 HR15T	Kao HRB ili HRF za tanje i manje uzorke
30T	HR30T	Kugla 1,5875 mm	29,42 N	264,8 N	29 HR30T do 82 HR30T	
45T	HR45T	Kugla 1,5875 mm	29,42 N	411,9 N	10 HR45T do 72 HR45T	

Na primjer, Rockwell C ljestvica koristi indentor u obliku dijamantnog stošca, a B ljestvica u obliku metalne kugle s manjim opterećenjem. Ljestvice se skraćeno označavaju sa HRB, što znači tvrdoća Rockwell B (eng. *Hardness Rockwell B*), ili C ljestvica koja se označava sa HRC (eng. *Hardness Rockwell C*).

Općenito je pravilo da što je veći broj, to je materijal tvrdi – međutim, bitno je zapamtiti da su vrijednosti tvrdoće relativne prema ljestvici koja se koristi pri ispitivanju. Na primjer, meki čelik može imati tvrdoću od 70 HRB, dok tvrdi čelik može imati vrijednost tvrdoće od 64 HRC. Glavni čimbenici koje treba uzeti u obzir za odabir Rockwellove ljestvice su prema [13]:

- vrsta materijala za ispitivanje tvrdoće
- debljina ispitnog materijala
- površina ili širina ispitnog materijala
- ograničenja svake Rockwellove ljestvice tvrdoće
- homogenost ispitnog materijala.

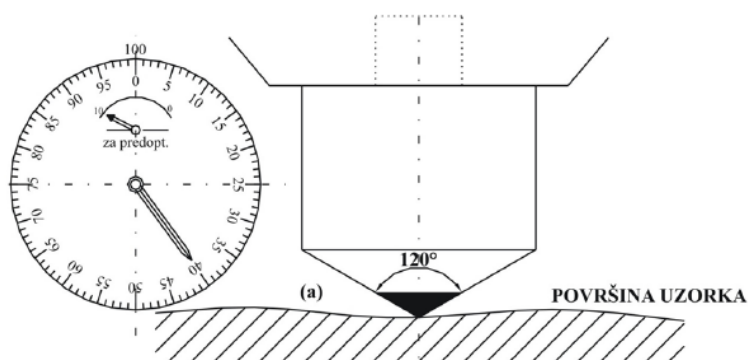
3.2. Postupak izvođenja Rockwell metode

Ispitivanje tvrdoće po Rockwell metodi provodi se na ispitnom uređaju koji se zove tvrdomjer i to na propisanim temperaturama u rasponu od 10°C do 35°C sukladno normi HRN EN ISO 6508 – 1:2015.

Na početku ispitivanja važno je dobro pripremiti ispitni uzorak, tj eliminirati sve nečistoće. Zatim se uzorak postavlja na ispitni uređaj tvrdomjer na kojem mora biti dobro fiksiran bez mogućnosti pomaka i pripremiti za utiskivanje indentora.

Kod Rockwellove metode ispitivanja tvrdoće određuje se dubina prodiranja indentora pod određenim uvjetima ispitivanja. Indentor može biti kuglica od metala ili dijamantni stožac. Dijamantni stožac mora imati vršni kut od 120° te radijus zaobljenja od 0,2 mm. Metalna kuglica mora imati promjer od 1,5875 mm ili 3,175 mm. Vrsta indentora i ispitno opterećenje određuju ljestvicu tvrdoće (npr. A, B, C, itd.).

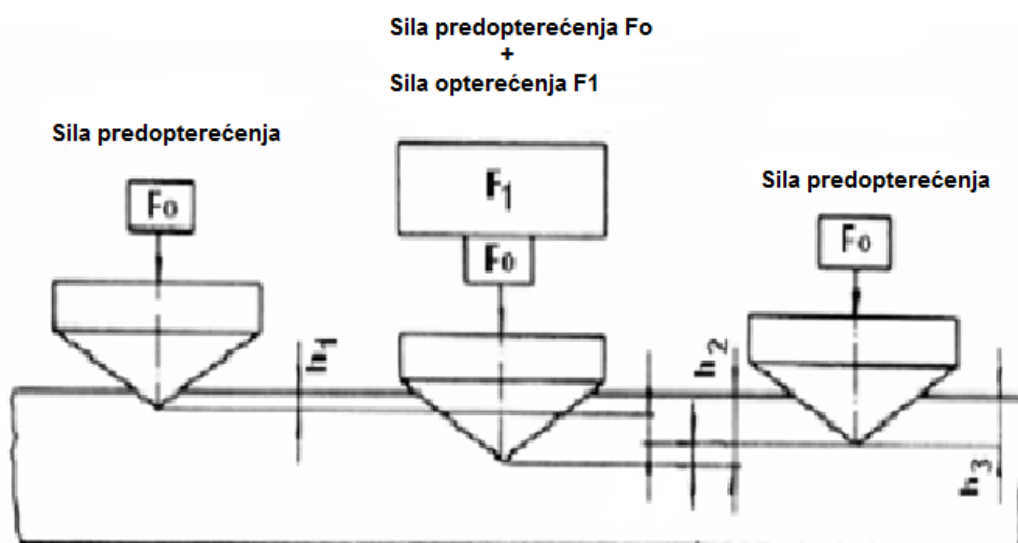
Postupak ispitivanja tvrdoće Rockwell C metodom (HRC) prolazi kroz tri koraka. Ispitivanje započinje utiskivanjem indentora u ispitni uzorak. Uzorak se opterećuje silom predopterećenja F_0 od 98,1 N maksimalno 2 sekunde pazeći da za vrijeme ispitivanja ne dođe do vibracija koje bi mogle utjecati na rezultate ispitivanja. Vrijeme trajanja sile predopterećenja iznosi 3 sekunde sukladno HRN EN ISO 6508-1:2015 normi. Nakon izvršenog predopterećenja mjerna skala na instrumentu se podešava na oznaku nula. Mjerna skala je duljine 0,2 mm podijeljena na 100 dijelova, slika 5 [14].



Slika 5. Mjerna skala i položaj indentora kod HRC [14]

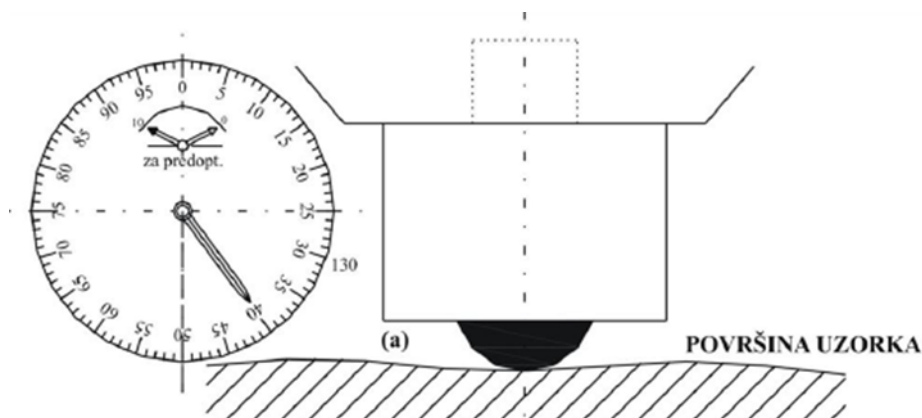
Slijedi opterećenje dodatnom silom opterećenja F_1 koja iznosi 1373,4 N, pri čemu indenter prodire u uzorak do najveće dubine prodiranja. Vrijeme opterećivanja uzorka silom opterećenja F_1 ne smije biti manje od 1 sekunde niti duže od 8 sekundi. Ukupna ispitna sila F postiže se zbrojem sile predopterećenja F_0 i dodatne sile opterećenja F_1 ($F_0 + F_1$), te mora opterećivati uzorak u rasponu od 2 do 6 sekundi radi ostvarivanja trajne deformacije uzorka. Nakon rasterećenja indentora elastični povrat vraća indenter i prestaje djelovanje sile opterećenja F_1 , dok na uzorak djeluje samo sila predopterećenja F_0 u trajanju od 1 do 5 sekundi, slika 6. Sada se očitava krajnja vrijednost tvrdoće po Rockwell-u na skali.

Metoda je pogodna za ispitivanje kaljenih čelika, a područje primjena je za metale čija je tvrdoća od 20 do 70 HRC. Preciznost mjerenja iznosi $\pm 1,5$ HRC [14].



Slika 6. Faze kod Rockwell metode [15]

Mjerenje tvrdoće po Rockwell B metodi (HRB) provodi se na isti način, a razlika je u indentoru, a to je ovdje kuglica od tvrdog metala promjera 1,5875 mm ili 3,175 mm. Sila predopterećenja F_0 je ista kao i kod C metode i iznosi 98,1 N, dok glavno opterećenje sila F_1 iznosi 882,9 N. Mjerna skala je duljine 0,26 mm i podjeljena je na 130 dijelova, slika 7.



Slika 7. Mjerna skala i položaj indentora kod HRB [14]

Rockwell B metoda se koristi za sve srednje tvrde metale čija je tvrdoća od 35 do 130 HRB, a preciznost mjerenja iznosi ± 2 HRB.

Vrijednost tvrdoće može se dobiti i po formuli, ali u pravilu dobiva se direktno sa skale uređaja. Uz pomoć trajne dubine udubljenja h , tvrdoća po Rockwellu (HR) se može izračunati prema formuli definiranoj u standardu HRN EN ISO 6508-1:2015 s obzirom na primijenjenu Rockwell ljestvicu. Formulu po kojoj se računa tvrdoća po Rockwellu [13]:

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

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

Primjer oznake Rockwellove tvrdoće: 50 HRC gdje je 50 iznos Rockwellove tvrdoće, HR simbol Rockwellove tvrdoće, C varijanta Rockwellove tvrdoće, isto tako kod 70 HRB – 70 je iznos tvrdoće, HR je simbol za Rockwell tvrdoću, a B označava varijantu Rockwell tvrdoće.

3.3. Prednosti i nedostaci Rockwell metode

Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu u odnosu na druge metode (npr. Brinell ili Vickers) daje značajne prednosti iako ima i neka ograničenja.

Prednosti Rockwell metode prema [16]:

- nije potrebna posebna priprema uzorka (rezanje, brušenje, umetanje)
- nije potrebna optička procjena već se rezultat očitava izravno na skali tvrdomjera
- brza i ekonomična metoda
- metoda je nedestruktivna i ne oštećuje uzorak te se on može ponovno upotrijebiti
- ispitivanje se može provesti na malim i velikim uzorcima.

Nedostaci Rockwell metode prema [16]:

- nije uvijek najtočnija metoda – nepreciznost je $\pm 1,5$ HRC
- slaba selektivnost zbog čega se koristi samo u pogonima
- mjesto ispitivanja mora biti bez ikakve prljavštine (npr. kamenca, stranih tijela ili ulja)
- oštećeni ili istrošeni indenter utječe na rezultate ispitivanja
- materijali s povećanim vrijednostima tvrdoće se teže razlikuju.

3.4. Oprema za mjerenje tvrdoće Rockwell metodom

Ispitivanje tvrdoće provodi se na ispitnom uređaju – tvrdomjeru. Glavni dijelovi tvrdomjera su mehanizam za ostvarivanje odgovarajuće sile opterećivanja - sustav za opterećivanje, te dio za mjerenje dubine prodiranja indentora u ispitni uzorak - sustav za mjerenje.

Za dobivanje preciznih rezultata kod mjerenja tvrdoće vrlo su bitni sama konstrukcija, funkcioniranje dijelova kao sklopa i samo stanje tvrdomjera. Neki od problema koji mogu bitno utjecati na rezultate mjerenja su trenje (npr. između indentora i uzorka ili kod primjene sile), neokomitost indentora i uzorka, svojstva indentora, te točnost sustava mjerenja.

Tvrdomjer za mjerenje tvrdoće po Rockwell metodi, slika 8, mora biti sukladan normi HRN EN ISO 6508-2:2015.



Slika 8. Tvrdomjer za Rockwell metodu [13]

3.4.1. Sustavi za opterećivanje

Sustavi za opterećenje imaju zadatak da prilikom mjerenja tvrdoće primjenjuju točno određenu silu na ispitni uzorak. Ta primjenjena sila mora biti u toleranciji od $\pm 1\%$ nazivne sile za tvrdomjere. Kod djelovanja opterećenja zahtjeva se postizanje određene brzine i vremena trajanja opterećenja.

Rockwell tvrdomjeri za ispitivanje tvrdoće generiraju potrebno opterećenje udubljenja kroz niz vlastitih utega i mehanizama poluge. Obično tvrdomjeri imaju hidrauličku kočnicu kojom se regulira brzina opterećivanja. Takvi sustavi opterećivanja nazivaju se sustavima otvorene petlje (eng. *open loop*) [17].

Međutim, problem vlastitih utega je taj što se sila mora primijeniti na ispitni uzorak kroz strukturu poluge, s velikim brojem pokretnih dijelova, do konačnog malog indentora. Prijenos sile vlastite težine na vrh malog dijamantnog ili kugličnog indentora, teško je postići. Poluge

zahtijevaju osovine, vodilice, ležajeve i druge dijelove koji stvaraju trenje i nestabilnost primjene sile. Iako je moguće kontrolirati ove izvore pogreške, bilo koja točka trenja u sustavu na kraju će imati negativan učinak koji se polako povećava tijekom vijeka trajanja uređaja [18]. Sustavi otvorene petlje imaju puno više nedostataka nego prednosti.

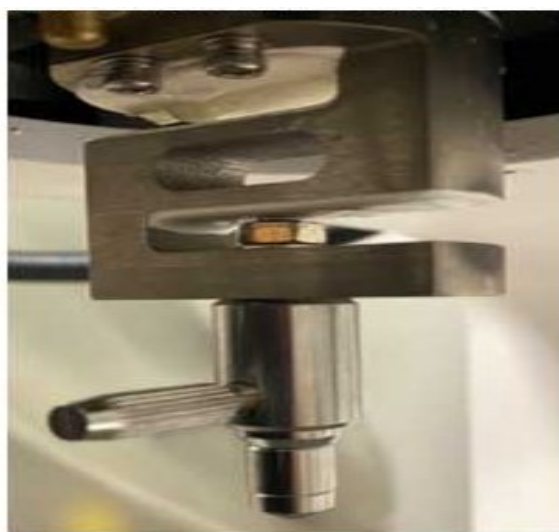
Prednosti sustava otvorene petlje su prema [18]:

- Relativno jeftini i jednostavni za proizvodnju
- Ne zahtijevaju električni priključak.

Nedostatci sustava otvorene petlje su prema [18]:

- Nema povratne informacije o stvarnoj isporučenoj ispitnoj sili
- Osjetljivost na temperaturu i okoliš
- Niska izvedba ponovljivosti i obnovljivosti mjerača
- Dugotrajno trošenje i habanje mehanike
- Relativno visoki troškovi održavanja.

Kako bi se umanjili problemi koji donose sustavi otvorene petlje i povećala preciznost mjerenja koriste se sustavi zatvorene petlje (eng. *closed loop*). Noviji tvrdomjeri primjenjuju sustave opterećenja preko istosmjernog elektromotora, a zatim to opterećenje mjere elektroničkim senzorom sile. Senzor sile zatim "zatvara petlju" priopćavajući očitavanje stvarnog opterećenja natrag istosmjernom motoru kako bi on mogao izvršiti potrebne prilagodbe prije početka ispitivanja [17]. Senzor sile je pretvarač koji mjeri silu i šalje tu silu kao električni signal, slika 9.



Slika 9. Senzor sile instaliran iznad indentora [18]

Kako bi se uklonio učinak mehaničke nesavršenosti, mehaničkog pomicanja ili drugog poremećaja koji bi mogao utjecati na ispitnu silu, senzor sile treba postaviti što bliže utisku. To čini sustav zatvorene petlje stabilnijim i smanjuje rizik od mehaničkih nesavršenosti, neplaniranih pokreta i drugih smetnji. Samo na taj način stvarna prednost sustava zatvorene petlje zasnovanih na senzorima sile dolazi do njihove maksimalne točnosti sile. Senzori sile smješteni na drugim mjestima u mehaničkom pokretaču sile uređaja za mjerenje tvrdoće brzo gube većinu svojih prednosti u odnosu na tradicionalne sustave.

Prednosti sustava zatvorene petlje su prema [19]:

- Povratna informacija o sili osigurava da se primjenjuje ispravna sila
- Ispitne sile su visoke preciznosti
- Pouzdaniji sustav mjerenja tvrdoće
- Manje mehaničkih dijelova u odnosu na sustav otvorene petlje
- Jednostavna elektronička procedura kalibracije.

Nedostatci sustava zatvorene petlje su [19]:

- Skuplji od sustava otvorene petlje
- Zahtjeva električnu energiju.

3.4.2. Postolja za ispitni uzorak i indentori kod Rockwell metode

Kako se kod mjerenja tvrdoće koriste različiti oblici i dimenzije uzoraka važno je izabrati adekvatno postolje na koje će se fiksirati prilikom ispitivanja. Sukladno tome postoji čitav niz različitih vrsta postolja, a neka od njih prikazana su na slici 10.



Slika 10. Vrste postolja za ispitne uzorke [20]

Indentor je vrlo važan dio tvrdomjera jer je odgovoran za stvaranje udubljenja na površini ispitnog uzorka. Tu je posebno važan oblik i dimenzija indentora, jer njegova geometrijska i negeometrijska svojstva utječu na njegovu tvrdoću i prodornost. Kod Rockwell metode koriste se indentori u obliku dijamantnog stošca čiji kut mora biti $120^\circ \pm 0,17^\circ$, a radijus vrha mora iznositi 0,2 mm. Sve plohe dijamantnog indentora moraju biti glatke, ispolirane i bez oštećenja. Također se još koristi i kuglica od tvrdog metala (npr. volfram karbida) koja mora biti određenog promjera (1,5875 mm ili 3,175 mm). Stožac i kuglice podliježu normi HRN EN ISO 6508-2:2015 [21]. Na slici 11. prikazani su indentori za Rockwell metodu mjerenja tvrdoće.



Slika 11. Indentori za Rockwell metodu [20]

4. SLJEDIVOST MJERENJA TVRDOĆE, ETALONI I NORME

Tvrdoća je veličina koja se dobije ispitivanjem na uzorku, kod takvog ispitivanja moraju se koristiti stroge smjernice i upute propisane normama. Povjerenje u sam rezultat mjerenja tvrdoće postiže se isključivo ostvarivanjem sljedivosti mjerenja sve do primarnog etalona.

4.1. Sljedivost mjerenja tvrdoće

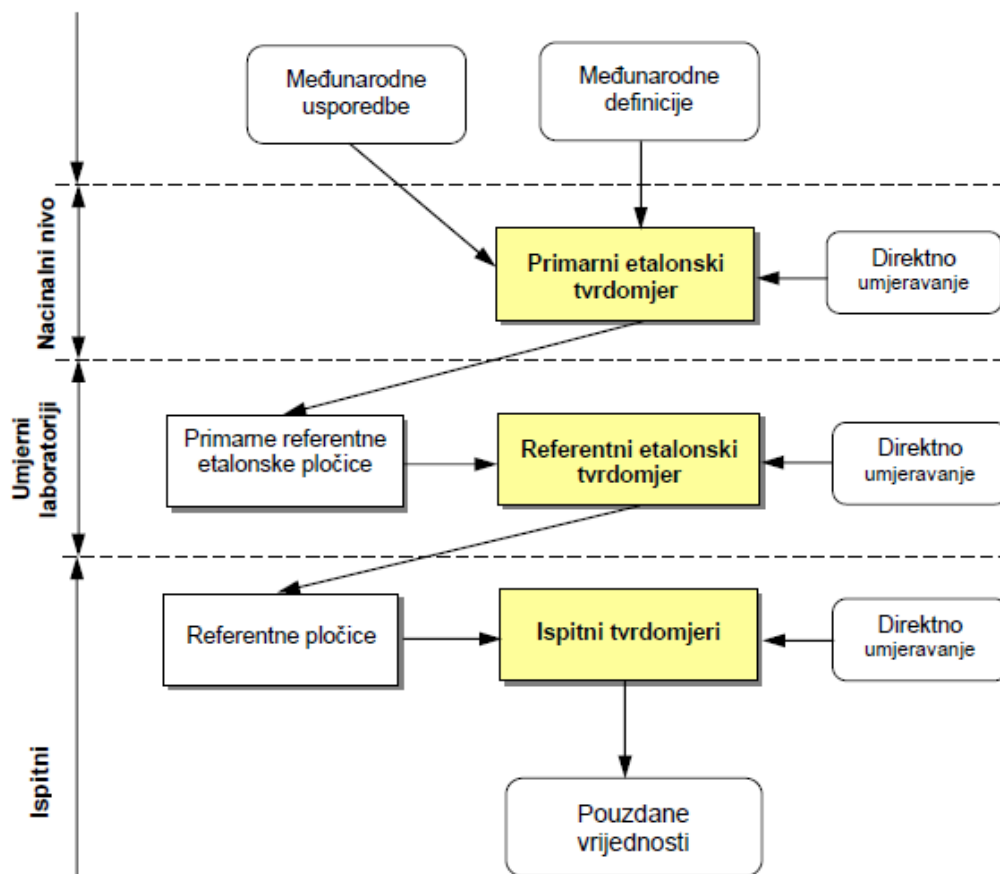
Sljedivost u mjerenju tvrdoće odnosi se na mogućnost povezivanja mjerenja tvrdoće s priznatim nacionalnim ili međunarodnim mjernim standardima. Osigurava da se vrijednosti tvrdoće dobivene tijekom ispitivanja mogu pratiti do poznate i pouzdane reference, pružajući povjerenje u točnost i usporedivost rezultata.

Smanjenju mjernih pogrešaka doprinosi redovito umjeravanje ispitnih uređaja koje mora biti u skladu s nacionalnim mjeriteljskim normama.

Postoje tri karakteristične skupine prema kojima je zasnovano područje skala tvrdoće, prema [2]:

- a) **Definicija mjerne skale tvrdoće** – daje opis mjerne metode, uključene odgovarajuće tolerancije veličina i ograničavajuće uvjete okoline.
- b) **Referentni uređaj za mjerenje tvrdoće** – to su mjerni uređaji koji ostvaruju definiciju skale tvrdoće. Razlikujemo primarne etalone tvrdoće, koji stvaraju najbolju moguću realizaciju definicije skale tvrdoće, i referentne etalone tvrdoće, koji su primarno namijenjeni za proizvodnju referentnih pločica tvrdoće.
- c) **Referentna pločica tvrdoće** – razlikuju se primarne etalonske pločice za tvrdoću koje su umjeravane pomoću primarnih etalona te se koriste kada je zahtijevana najveća točnost, npr. za umjeravanje referentnih etalona tvrdoće, zatim razlikujemo referentne pločice za tvrdoću koje su namijenjene za verificiranje i umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera.

Struktura koja povezuje mjerenje i umjeravanje naziva se metrološki niz ili mjerna sljedivost. Četveroslojna struktura metrološkog niza bitna za definiranje skale tvrdoće prikazana je na slici 12.



Slika 12. Četveroslojna struktura metrološkog niza [2]

Metrološki niz prikazan na slici 12. počinje na međunarodnoj razini te koristi međunarodne definicije i usporedbe skala tvrdoće. Niz se nastavlja na nacionalnoj razini gdje je očuvanje skale tvrdoće moguće jedino kroz međunarodne usporedbe zbog malog broja primarnih etalona tvrdoće. Sljedeća razina je razina umjernih laboratorija gdje se pomoću primarnih etalonskih pločica umjeravaju referentni etalonski tvrdomjeri direktnim umjeravanjem. Zatim se ti referentni etalonski tvrdomjeri koriste za umjeravanje referentnih pločica na razini korisnika koji ih koriste za umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera. Mjerna nesigurnost se povećava prijenosom rezultata s jedne razine na drugu. Zbog toga su stabilnost tijekom vremena i jednoobraznost ispitne površine pločica glavni zahtjevi za etalonske pločice [2].

Važnost pridržavanja dogovorenog niza je vrlo bitna jer se struktura metrološkog niza odnosi na sve metode i varijante ispitivanja tvrdoće.

4.2. Mjerni etaloni

Mjerno jedinstvo izražavamo danas prema Međunarodnom definicijskom mjeriteljskom rječniku kao sljedivost (eng. *traceability*). To je svojstvo mjernog rezultata da se slijedom neprekinutog lanca usporedbi oslanja na odgovarajući etalon. Općenito se etalon može definirati kao mjerilo, usporedbena tvar ili mjerni sustav koji su dogovorom ili nekom normom utvrđeni kao utjelovljenje neke mjerne jedinice ili određene vrijednosti neke fizikalne veličine [22].

Etalon koji je predviđen za reproduciranje jedinice s najvećom mogućom točnošću u pojedinoj zemlji je primarni etalon, slika 13. Drugim riječima, primarni etalon je etalon koji je izabran ili za koji je opće potvrđeno da ima najveću mjeriteljsku kvalitetu, a čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine. On je zapravo etalon najviše mjeriteljske kakvoće, te zbog toga mjerna sljedivost sustava za mjerenje sile i njihovih rezultata kreće od njega. Ne koristi se za izravna mjerenja već samo za usporedbe s referentnim etalom. Njegove vrijednosti se prihvataju bez pozivanja na ostale etalone iste kakvoće. Kako je jedinica za silu Newton izvedena jedinica prema SI sustavu, iz toga proizlazi da ne postoji međunarodni primarni etalon, već postoje primarni nacionalni etaloni sile za određenu državu ili mjeriteljsko područje [23].

Oni su na najvišoj razini piramide sljedivosti, te predstavljaju osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona. Zbog toga se ne mogu sami umjeriti u nekom drugom etalonu, već se njihova mjeriteljska kakvoća provjerava u programima međulaboratorijskih usporednih ispitivanja [2].

Za primarne etalone tvrdoće primjenjuju se sistemi koji opterećenje ostvaruju direktnim djelovanjem utega, a ne polugama i sličnim elementima, dok je masa utega određena preko referentnih etalona. Posljedica toga je relativna nesigurnost mjerenja manja ili jednaka 2×10^{-5} .



Slika 13. Primarni nacionalni etalon sile u PTB-u, Njemačka [2]

Ostali etaloni, sekundarni odnosno referentni etaloni podređeni su primarnom etalonu. Sekundarnom etalonu vrijednost je određena usporedbom s primarnim identične veličine. Referentni etaloni su etaloni najviše mjeriteljske kakvoće na danom području, od kojih se provode daljnja mjerenja na danom području, slika 14. Oni su u piramidi sljedivosti odmah ispod nacionalnih etalona i nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima. Najveće mjerne sposobnosti mjerenja kod referentnih etalona sile ovise o tipu realizacije sile odnosno mehanizmu opterećivanja. Sekundarni i referentni etaloni, prema tomu, služe za prenošenje jedinice na referentna sredstva mjerenja nižih stupnjeva [22].



Slika 14. Referentni etalon sile u LIMS-u, FSB, Hrvatska

4.3. Norma za definiranje tvrdoće po Rockwellu

Kako bi rezultati mjerenja tvrdoće bili što precizniji i točniji potrebno je slijediti propisane norme koje su strogo definirane za svaku metodu mjerenja tvrdoće. One opisuju i definiraju sam postupak mjerenja, ali i način provjeravanja i umjeravanja ispitnih uređaja, indentora i referentnih pločica tvrdoće.

Norme koje definiraju Rockwell-ovu metodu mjerenja tvrdoće su:

- HRN EN ISO 6508-1:2015 – Metoda ispitivanja
- HRN EN ISO 6508-2:2015 – Provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja i indentora
- HRN EN ISO 6508-3:2015 – Umjeravanje referentnih pločica

Norma HRN EN ISO 6508-1:2015 definira sam postupak izvođenja mjerenja tvrdoće, zatim parametre okolišnih uvjeta (npr. temperatura laboratorija, vlaga, tlak i dr.), te provjeru ispitnog uzorka (npr. površina uzorka mora biti ravna i glatka, debljina mora biti minimalno 10 puta veća od trajne dubine utiskivanja za dijamantne indentore i 15 puta veća od dubine utiskivanja za kuglični indenter) [24].

Norma HRN EN ISO 6508-2:2015 definira dvije metode provjere ispitnih uređaja, a to su:

- Metoda direktne provjere - koristi se za utvrđivanje jesu li glavni parametri povezani s funkcijom tvrdomjera, kao što su primijenjena sila, mjerenje dubine i vrijeme ciklusa ispitivanja, unutar navedenih tolerancija.
- Metoda indirektna provjere - koristi niz umjerenih referentnih etalonskih pločica tvrdoće za određivanje koliko dobro tvrdomjer može mjeriti materijal poznate tvrdoće.

Ovom normom se također definira provjera i umjeravanje indentora (npr. provjera oblika može se izvršiti izravnim mjerenjem ili optički) [25].

Norma HRN EN ISO 6508-3:2015 definira umjeravanje referentnih pločica tvrdoće. Propisuje točan izgled referentnih pločica tj. uvjete koje one moraju zadovoljiti (npr. moraju bit debljine najmanje 6 mm, moraju bit označene po točno određenim pravilima i sl.) [26].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U praktičnom dijelu rada provedeno je umjeravanje tvrdomjera po metodi Rockwell HRB i HRC. Ispitivanja su obavljena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na početku rada u laboratoriju provjereni su i određeni okolišni uvjeti – temperatura je 17,5 °C, vlaga je 68,36%, a tlak iznosi 1035,2 hPa, te je ustanovljeno da su svi uvjeti u skladu s normom HRN EN ISO 6508-1:2015.

Nadalje je bilo potrebno provjeriti sve parametre uređaja direktnom provjerom kako bi bili sigurni da uređaj funkcionira na pravilan način. Pomoću dinamometra su mjerene vrijednosti sila radi provjere istih, kako bi se provjerilo da zadovoljavaju zadane intervale propisane normom HRN EN ISO 6508-2:2015. Također su mjerena vremena postizanja sile i trajanje opterećenja. Kako je tvrdomjer digitalni nije bilo moguće izmjeriti histerezu i mjerni sustav dubine.

Da bi mjerenja bila uspješna potrebno je provjeriti i indentore, u ovom slučaju to su dijamantni stožac i metalna kuglica, kako nebi došlo do pogreške pri mjerenju radi mogućih oštećenja indentora.

Indirektnom provjerom izvršeno je mjerenje tvrdoće referentnih etalonskih pločica i to prema normi HRN EN ISO 6508-3:2015.

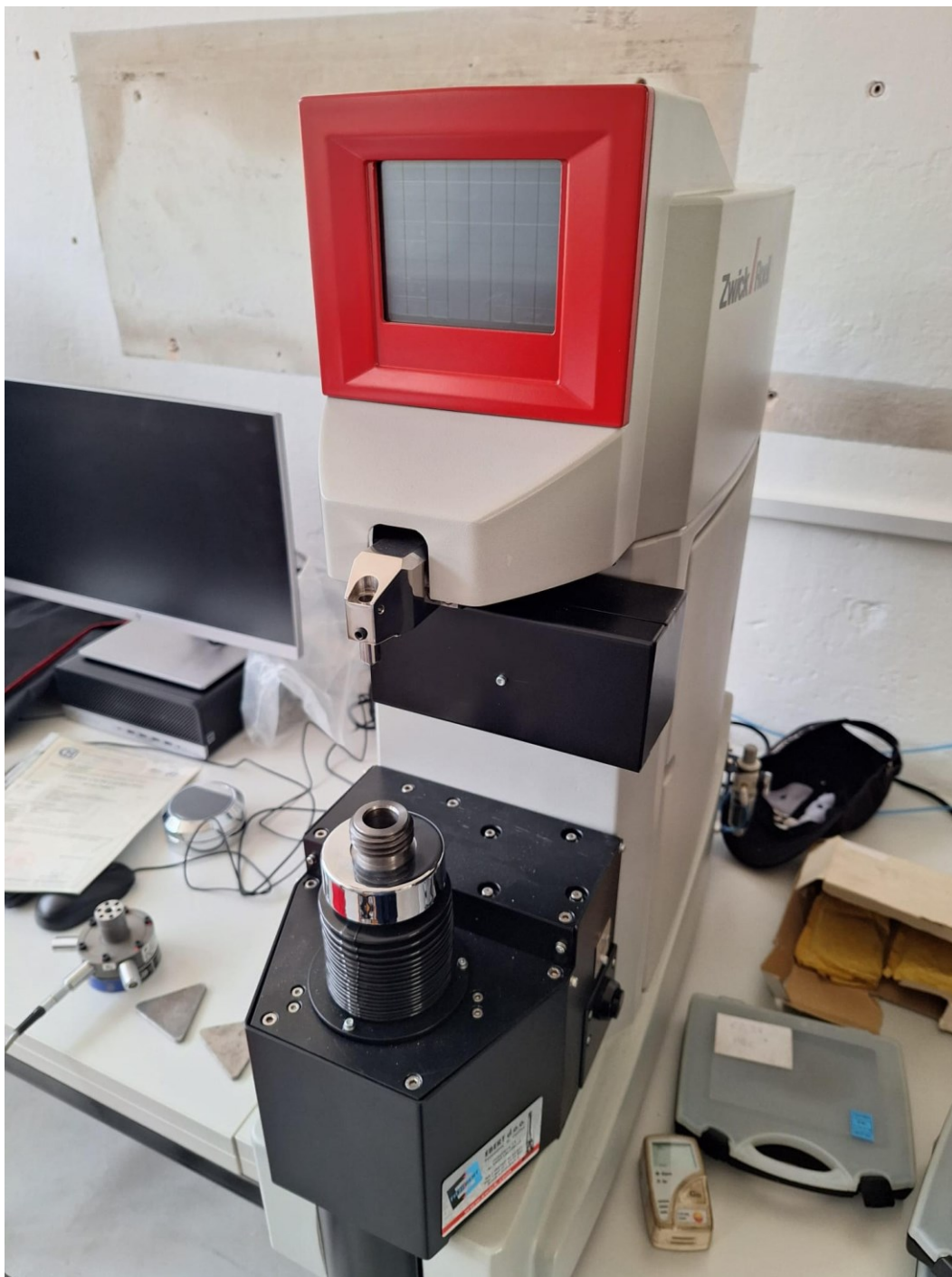
Na kraju je dana analiza dobivenih rezultata iz tablica i zaključak.

5.1. Oprema za provođenje ispitivanja

Oprema koja je korištena pri provođenju ispitivanja nalazi se u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na FSB-u. Sva potrebna mjerenja provedena su na tvrdomjeru Indentec, čiji tehnički podaci slijede u nastavku:

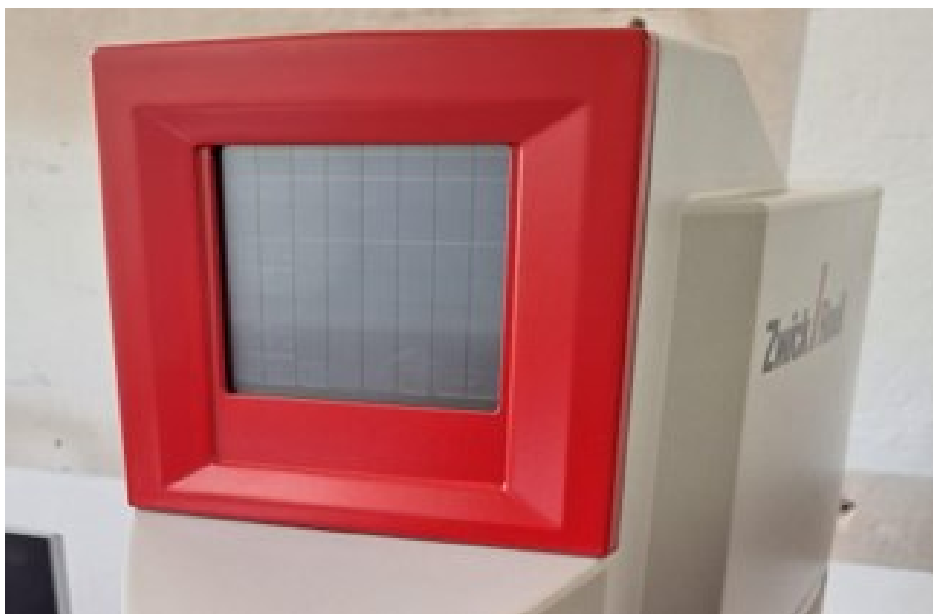
- Proizvođač: Indentec, UK
- Vrsta: ZHR 8150 TKT
- Serijski broj: 206057
- Praktično mjerno područje: (20-70) HRC
- Rezolucija: 0,01 HRC
- Vrsta pokazivača: digitalni
- Vrsta pogona za podizanje i spuštanje postolja: pneumatika
- Masa uređaja: 102 kg

- Godina proizvodnje: 2020
- Država proizvodnje: Ujedinjeno Kraljevstvo
- Certifikat o umjerenosti uređaja izdao: UKAS, UK



Slika 15. Tvrdomjer Indentec

Na slici 15. prikazan je tvrdomjer na kojem su provedena ispitivanja u laboratoriju, a na slici 16. prikazan je digitalni pokazivač tvrdomjera .



Slika 16. Digitalni pokazivač tvrdomjera

Na tvrdomjeru su za metodu HRC korišteni dijamantni indenter, a za HRB metodu korišten je kuglični indenter. Sljedeći podaci odnose se na kuglični indenter:

- Datum umjeravanja: 19.03.2020.
- Oznaka umjeravanja: 37313/37314
- Serijski broj: M-10289/A6205

Uz tvrdomjer kao dio opreme korišten je i prijenosni etalon sile za provjeru sile. Uz prijenosni etalon sile za prikupljanje podataka tj. signala dobivenih prijenosnim etalom sile koristilo se mjerno pojačalo proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

Na slici 17. prikazan je prijenosni etalon sile KTN-D-Z 5 kN, a na slici 18. mjerno pojačalo.



Slika 17. Prijenosni etalon sile KTN-D-Z 5 kN



Slika 18. Mjerno pojačalo

Na slici 19. prikazan je certifikat za umjeravanje prijenosnog etalona sile koji je izdan od ovlaštene institucije.

	Czech Metrology Institute Okružní 31, 638 00 Brno, Czech Republic phone +420 545 555 111 www.cmi.cz		
---	---	---	---

Calibration laboratory No. 2202 accredited by the Czech Accreditation Institute according to ISO/IEC 17025:2017

Laboratory: Laboratories of fundamental metrology Praha, V Botanice 4, 150 72 Praha 5
Department of force and torque, tel. +420 257 288 309, fax +420 257 288 077

CERTIFICATE OF CALIBRATION

8011-KL-F0099-23

Date of issue: August 10, 2023 Page 1 of 8

Customer: Laboratory for Testing Mechanical Properties
Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
University of Zagreb
Ivana Lučića 5
10000 Zagreb Croatia

Measuring instrument: Force transducer

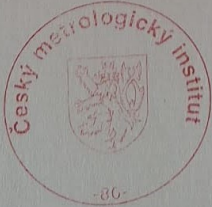
Manufacturer: Gassmann Theis Messtechnik
Type: KTN-D-Z
Serial number: 48633
Id. number: 323
Nominal force: 5 kN
Impact direction: Tension, compression
Output indicator: Measuring amplifier MGCplus ML38, s.n. 817167
Indicator manufact.: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

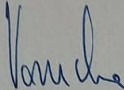
The results of the calibration have been obtained following the procedures reported in this Certificate and are related only to the calibrated measuring instrument, the date, place and conditions of the calibration.

Date of calibration: 09.8.2023 and 10.8.2023

Calibrated by:	Head of the Department:
-----------------------	--------------------------------


Jiří Vondříček




Ing. Lukáš Vavrečka, PhD.

This document may only be reproduced in full, except with the prior written permission by the issuing laboratory.

Slika 19. Certifikat za prijenosni etalon sile

5.2. Metoda direktnog umjeravanja tvrdomjera po Rockwell HRB i HRC metodi

Direktna metoda umjeravanja sastoji se od provjere sile predopterećenja tj. sile koja predstavlja idealnu silu, koja za HRB iznosi 98,07 N (10kp), zatim ukupne sile opterećenja koja iznosi 980,7 N (100 kp), te povratak na silu predopterećenja, nakon rasterećenja sile opterećenja.

Za provjeru sila koristile su se tri pločice sljedećih tvrdoća: 38,80 HRB; 74,19 HRB i 93,8 HRB. Svaka navedena sila je mjerena tri puta na svakoj pločici. Kod direktne metode umjeravanja tvrdomjera vrši se provjera sila pomoću prijenosnog etalona sile. Sile koje se provjeravaju su sila predopterećenja, sila opterećenja i sila rasterećenja.

U tablicama 4. i 5. su prikazana relativna odstupanja sile ΔF_{rel} , srednje vrijednosti sila za sva mjerenja na svim pločicama, te maksimalno odstupanje sile ΔF_{max} .

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti sile HRB metodom

H pločice	F , N	F_1 , N	ΔF_{1rel} , %	F_2 , N	ΔF_{2rel} , %	F_3 , N	ΔF_{3rel} , %	F_{sr} , N	U_F , %	ΔF_{max} , %
	98,07	97,40	- 0,68	97,45	-0,63	97,48	-0,61	97,44	0,17	0,85
38,80	980,67	98,49	0,43	984,91	0,43	984,56	0,40	984,74	0,13	0,56
	98,07	97,53	-0,55	97,50	-0,58	97,48	-0,61	97,50	0,15	0,76
	98,07	97,43	-0,66	97,50	-0,58	97,58	-0,50	97,50	0,24	0,90
74,19	980,67	98,55	0,49	985,41	0,48	985,41	0,48	985,44	0,12	0,61
	98,07	97,45	-0,63	97,48	-0,61	97,48	-0,61	97,47	0,14	0,77
	98,07	97,48	-0,61	97,50	-0,58	97,38	-0,71	97,45	0,22	0,93
93,8	980,67	98,52	0,46	985,29	0,47	985,24	0,47	985,25	0,12	0,59
	98,07	97,45	-0,63	97,43	-0,66	97,35	-0,73	97,41	0,19	0,93

Isti postupak umjeravanja je proveden i HRC metodom. Kod ove metode sila predopterećenja iznosi 98.07 N ili 10 kp, dok sila glavnog opterećenja iznosi 1471 N ili 150 kp. Provedena su tri mjerenja na tri pločice različite tvrdoće: 28,5 HRC; 46 HRC i 60 HRC.

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti sile HRC metodom

H Pločice	F , N	F_1 , N	ΔF_{1rel} , %	F_2 , N	ΔF_{2rel} , %	F_3 , N	ΔF_{3rel} , %	F_{sr} , N	U_F , %	ΔF_{max} , %
	98,07	97,48	-0,61	97,53	-0,55	97,48	-0,61	97,49	0,15	0,76
28,50	1471,0	1472,65	0,11	1472,77	0,12	1472,70	0,12	1472,71	0,12	0,24
	98,07	97,40	-0,68	97,33	-0,76	97,38	-0,71	97,37	0,17	0,93
	98,07	97,45	-0,63	97,40	-0,68	97,50	-0,58	97,45	0,19	0,87
40	1471,0	1472,42	0,10	1472,35	0,09	1472,80	0,12	1472,52	0,13	0,25
	98,07	97,43	-0,66	97,38	-0,71	97,45	-0,63	97,42	0,17	0,88
	98,07	97,48	-0,61	97,48	-0,61	97,50	-0,58	97,48	0,14	0,74
60	1471,0	1472,97	0,13	1473,35	0,16	1473,27	0,15	1473,20	0,13	0,28
	98,07	97,40	-0,68	97,40	-0,68	97,38	-0,71	97,39	0,14	0,85

Također je izmjerena i proširena mjerna nesigurnost sustava za opterećivanje U_F za obje metode. Ustanovljeno je da izmjerene vrijednosti za sve tri pločice kod obje metode zadovoljavaju kriterije prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015.

Tijekom mjerenja vrijednosti sila mjereno je i vrijeme trajanja postizanja zadane sile i vrijeme djelovanja ispitne sile.

Tablica 6. Vrijeme trajanja ispitivanja

Ispitna metoda	Trajanje postizanja zadane sile, s		Trajanje djelovanja ispitne sile, s	
	zahtijevano	izmjereno	zahtijevano	izmjereno
HRC	1 - 8	5,15 s	4 ± 2	5,87 s

Vremena dobivena mjerenjem odgovaraju normi HRN EN ISO 6508 – 1:2015.

5.3. Indirektna metoda umjeravanja tvrdomjera po Rockwell HRB i HRC metodi

Indirektnom metodom umjeravanja provodi se mjerenje tvrdoće pomoću umjerenih referentnih etalonskih pločica tvrdoće na pet mjernih mjesta koja su ravnomjerno raspoređena preko cijele ispitne površine pločica. Sve referentne pločice koje su korištene u ispitivanju proizvedene su u MPA NRW, Njemačka i zadovoljavaju sve zahtjeve propisane normom HRN EN ISO 6508-3:2015. Korištene su po tri pločice za HRB metodu kao i za HRC. Svaka pločica je različite

vrijednosti tvrdoće unutar mjernog područja tvrdoće za HRB i HRC. U tablici 7. prikazane su vrijednosti mjerenja tvrdoće za HRB.

Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće HRB

	Referentna vrijednost tvdoće	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	Srednja vrijednost
1. pločica	23,62	23,82	23,43	24,84	23,51	24,41	24,0
2. pločica	61,67	61,16	61,46	61,16	61,22	61,39	61,3
3. pločica	93,7	93,24	93,18	93,23	93,25	93,03	93,2

U tablici 8. prikazane su vrijednosti pet mjerenja tvrdoće HRC isto na tri pločice različite referentne vrijednosti tvrdoće.

Tablica 8. Rezultati mjerenja tvrdoće HRC

	Referentna vrijednost tvdoće	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	Srednja vrijednost
1. pločica	24,55	24,98	25,74	25,50	25,40	25,30	25,40
2. pločica	39,38	39,99	40,09	39,67	39,69	39,65	39,82
3. pločica	62,31	62,21	62,10	62,14	62,09	62,01	62,11

Na slici 20. prikazana je referentna pločica za HRC čija vrijednost tvrdoće iznosi 62,31.



Slika 20. Etalonska pločica 62,31 HRC

Slika 21. prikazuje trenutak utiskivanja dijamantnog indentora u referentnu pločicu tvrdoće od 24,55 HRC.



Slika 21. Mjerenje tvrdoće na tvrdomjeru

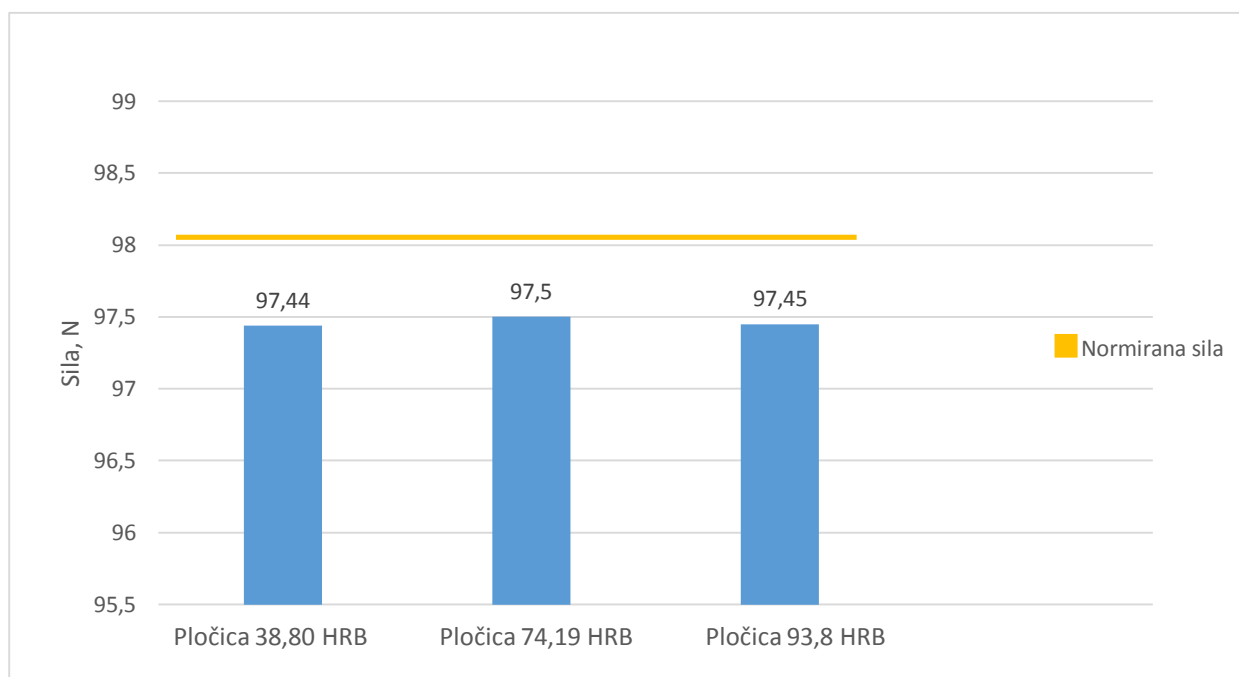
6. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Analiza rezultata mjerenja odnosi se na umjeravanje tvrdomjera prema direktnoj i indirektnoj metodi pri čemu se koristila Rockwellova HRB i HRC metoda.

6.1. Analiza rezultata provjera sila

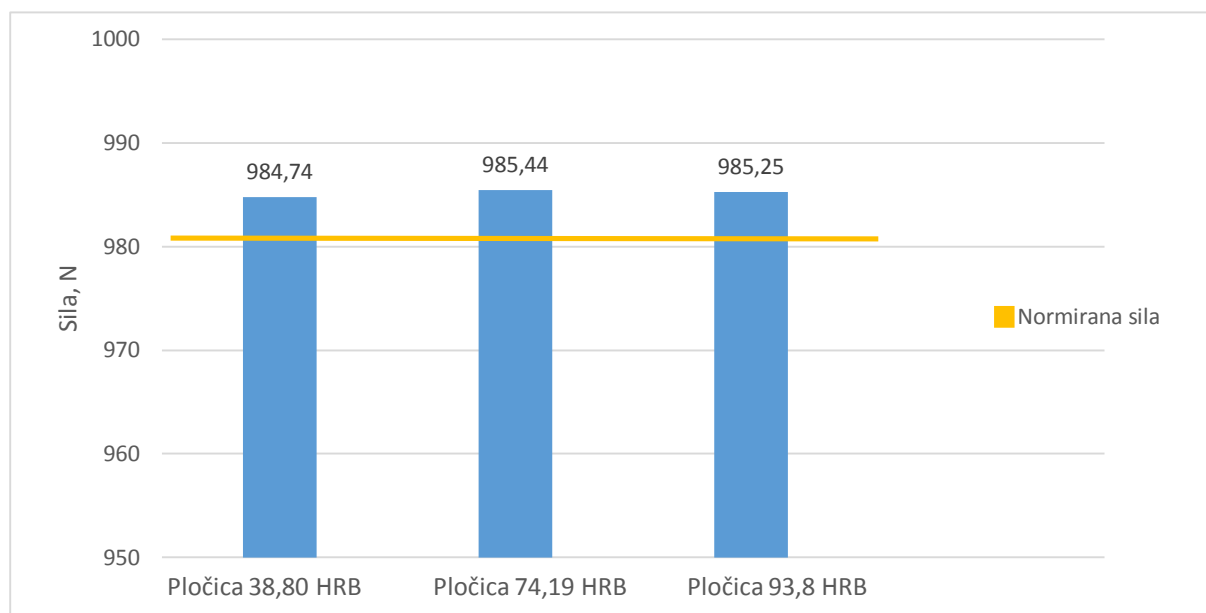
Kod direktne metode mjerene su sile predopterećenja, glavnog opterećenja i sile nakon rasterećenja, tj. povratak na silu predopterećenja za tri referentne pločice različitih tvrdoća. Sva mjerenja su obavljena u skladu sa normom HRN EN ISO 6508-2:2015.

Slike 22., 23. i 24. prikazuju izmjerene vrijednosti za sile koje su mjerene po HRB metodi. Normirana vrijednost sile predopterećenja za HRB metodu iznosi 98,07 N i na dijagramu je označena linijom narančaste boje, a dopušteno odstupanje za silu predopterećenja prema normi iznosi $\pm 2\%$, te izmjerena vrijednost ulazi u dopušteni interval.



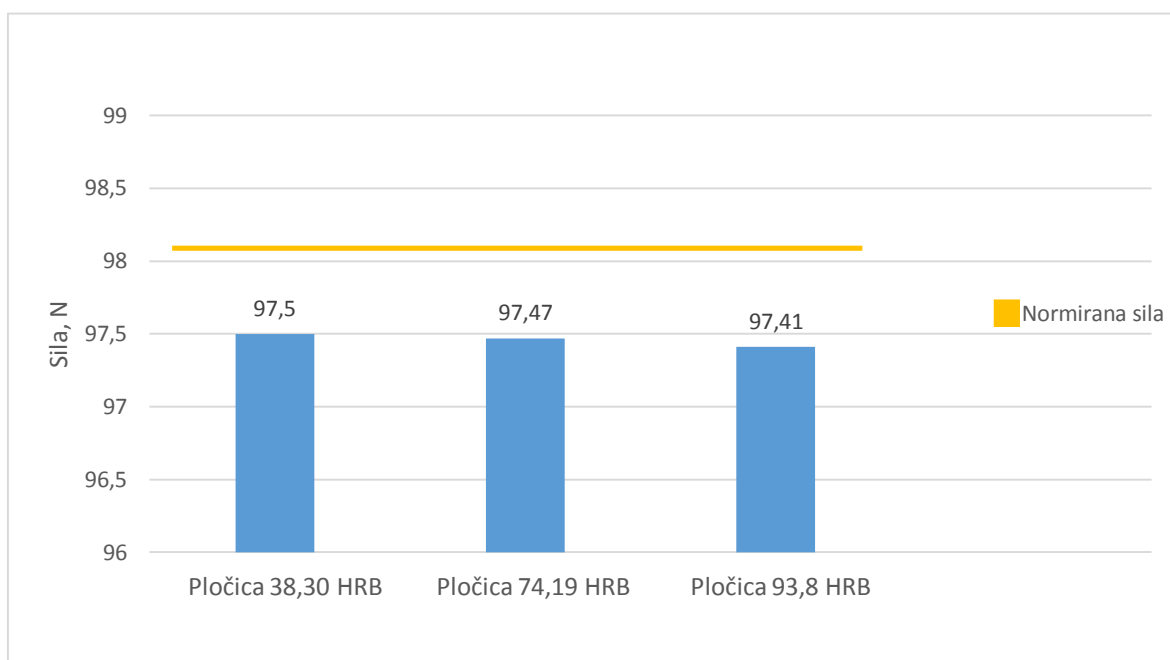
Slika 22. Dijagramski prikaz sila predopterećenja HRB

Normirana vrijednost sile glavnog opterećenja iznosi 980,67 N, te se iz prikazanog na slici 23. vidi da izmjerene vrijednosti sila ulaze u toleranciju od $\pm 1\%$ koja je propisana normom.



Slika 23. Dijagramski prikaz sila glavnog opterećenja HRB

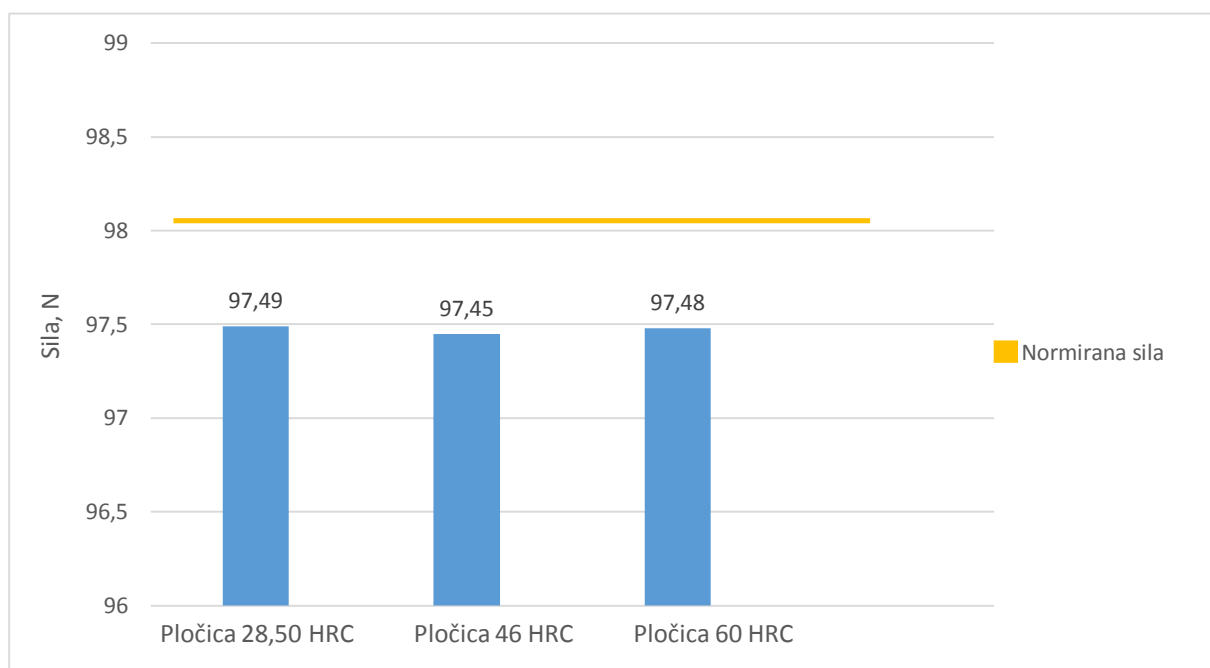
Na slici 24. prikazane su vrijednosti sila predopterećenja nakon rasterećenja djelovanja sile opterećenja za sve tri pločice. Normirana vrijednost sile iznosi 98,07 N. Sve tri izmjerene vrijednosti ulaze u propisani interval prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015.



Slika 24. Dijagramski prikaz sila nakon povratka na silu predopterećenja HRB

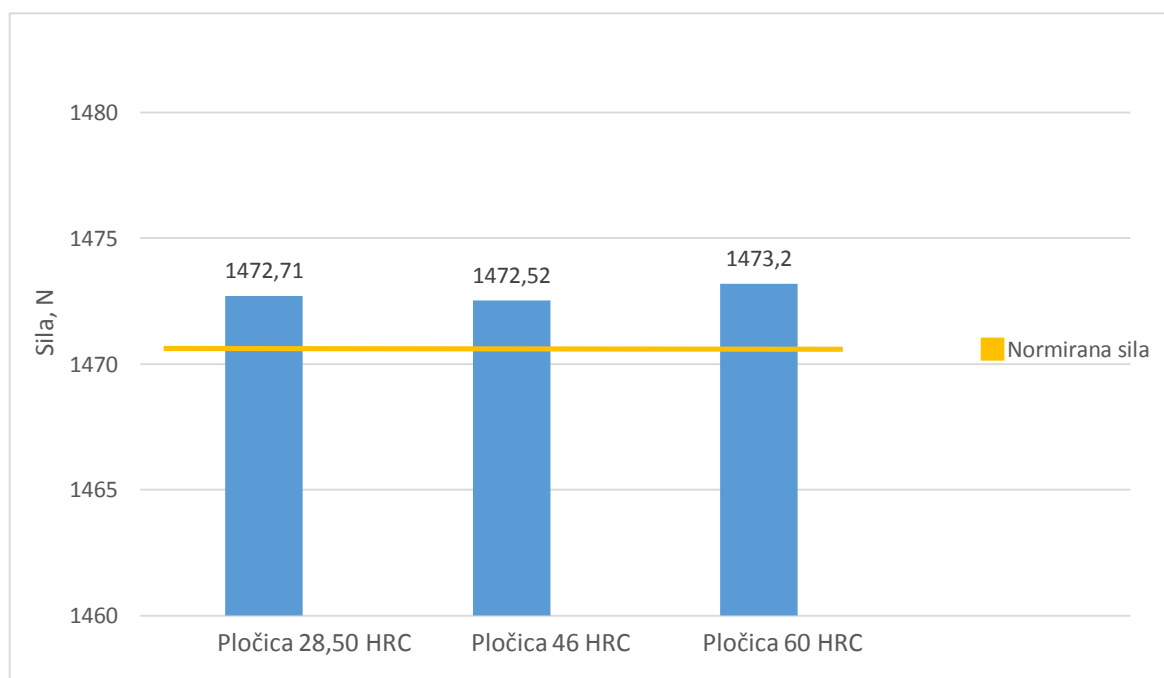
Isto mjerenje izvršeno je na tri pločice za HRC metodu. Slike 25., 26. i 27. prikazuju izmjerene sile predopterećenja, glavnog opterećenje, te ponovno predopterećenja nakon rasterećenja.

Za HRC normirana vrijednost sile predopterećenja iznosi kao i kod HRB 98,07 N. Normirana vrijednost kao i kod HRB metode prikazana je linijom narančaste boje. Iz prikazanog na slici 25. sve izmjerene vrijednosti sile predopterećenja ulaze u dopušteno odstupanje od $\pm 2\%$ prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015.



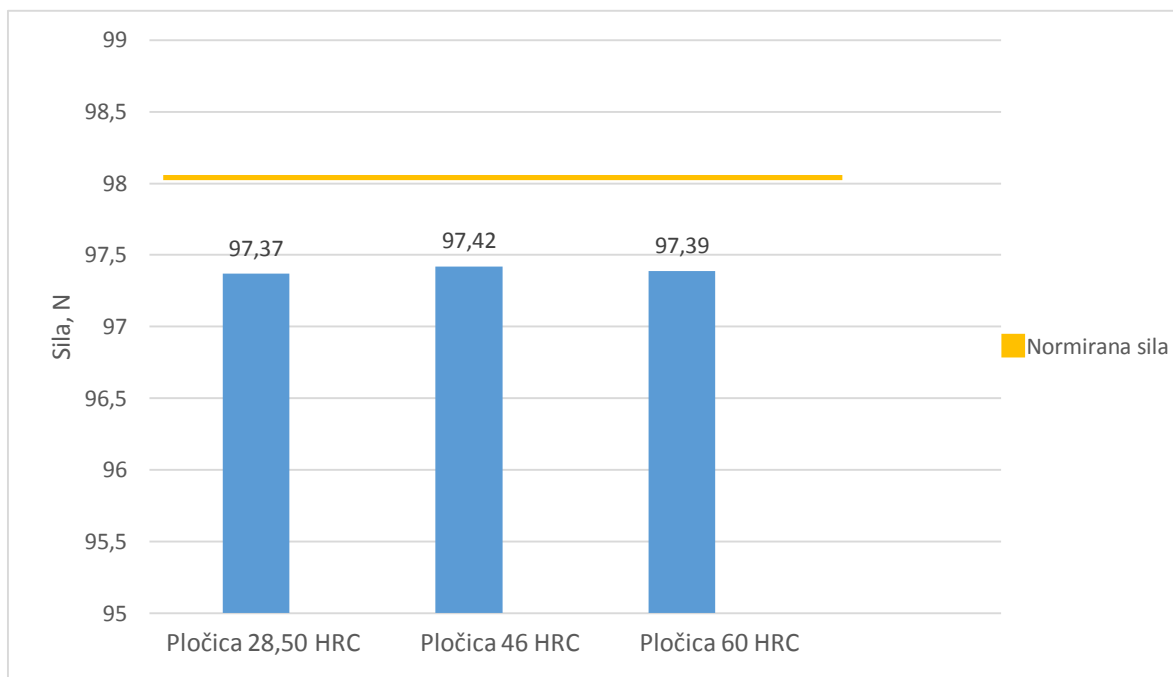
Slika 25. Dijagramski prikaz sila predopterećenja HRC

Normirana sila glavnog opterećenja za HRC metodu iznosi 1471 N, a odstupanje koje je definirano normom HRN EN ISO 6508-2:2015 može biti $\pm 1\%$. Izmjerene sile za sve tri pločice pokazuju da njihove vrijednosti ulaze u propisani interval.



Slika 26. Dijagramski prikaz sila glavnog opterećenja HRC

Na slici 27. vidljivo je da izmjerene vrijednosti sila nakon rasterećenja odgovaraju propisanom odstupanju prema normi.



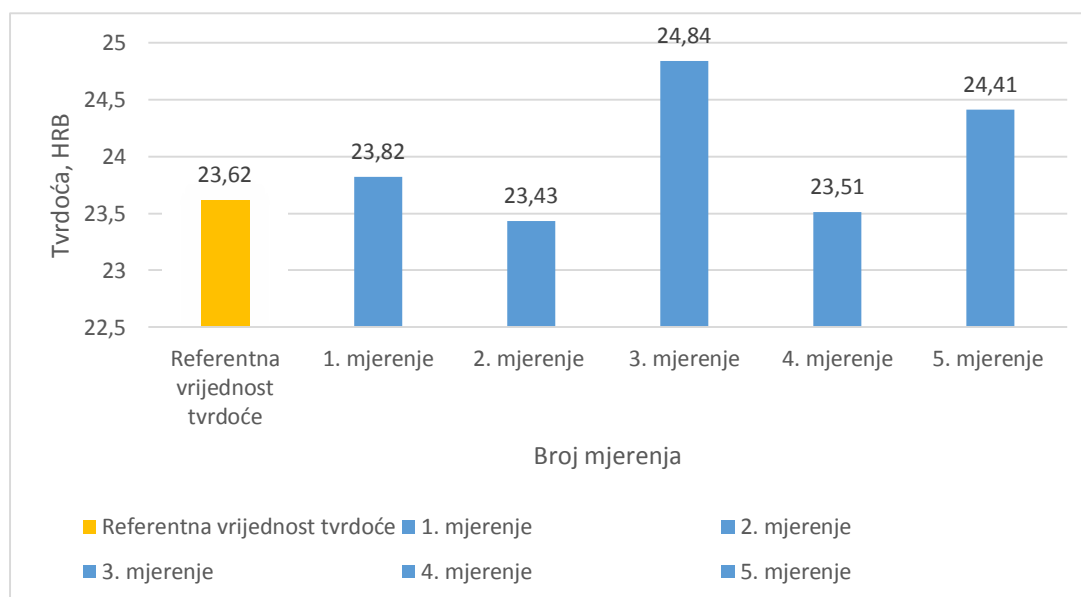
Slika 27. Dijagramski prikaz sila nakon povratka na silu predopterećenja HRC

6.2. Analiza rezultata provjere referentnih pločica

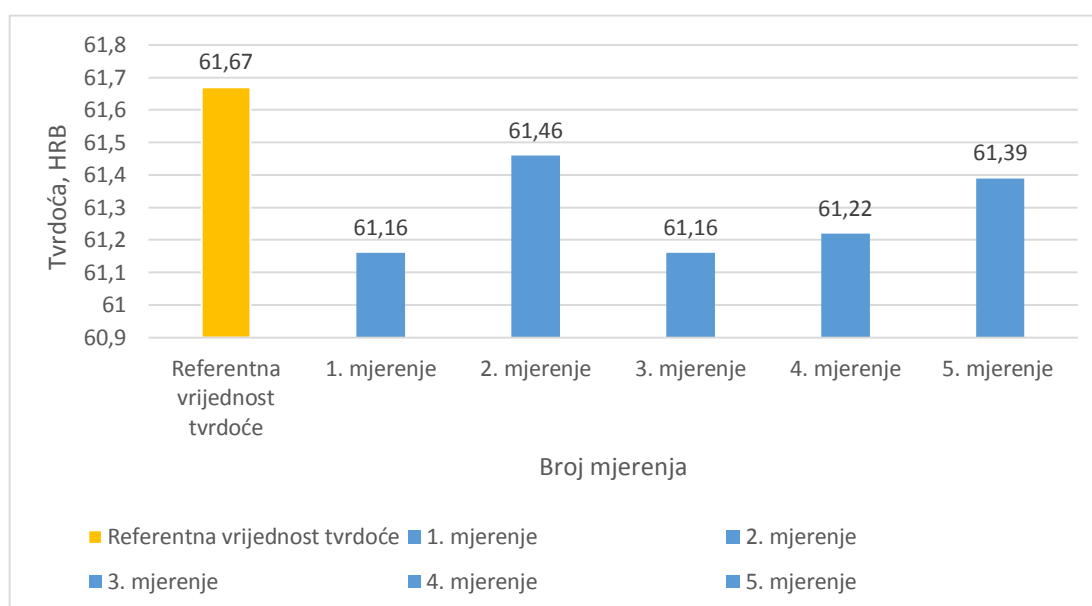
Kod indirektna metode provedena su mjerenja na tri referentne pločice različitih tvrdoća i to na pet mjernih mjesta.

Prvi stupac (narančaste boje) prikazuje referentnu vrijednost tvrdoće pojedine pločice, dok ostali stupci prikazuju izmjerene vrijednosti tvrdoće koja je mjerena na pet mjesta na svakoj pločici.

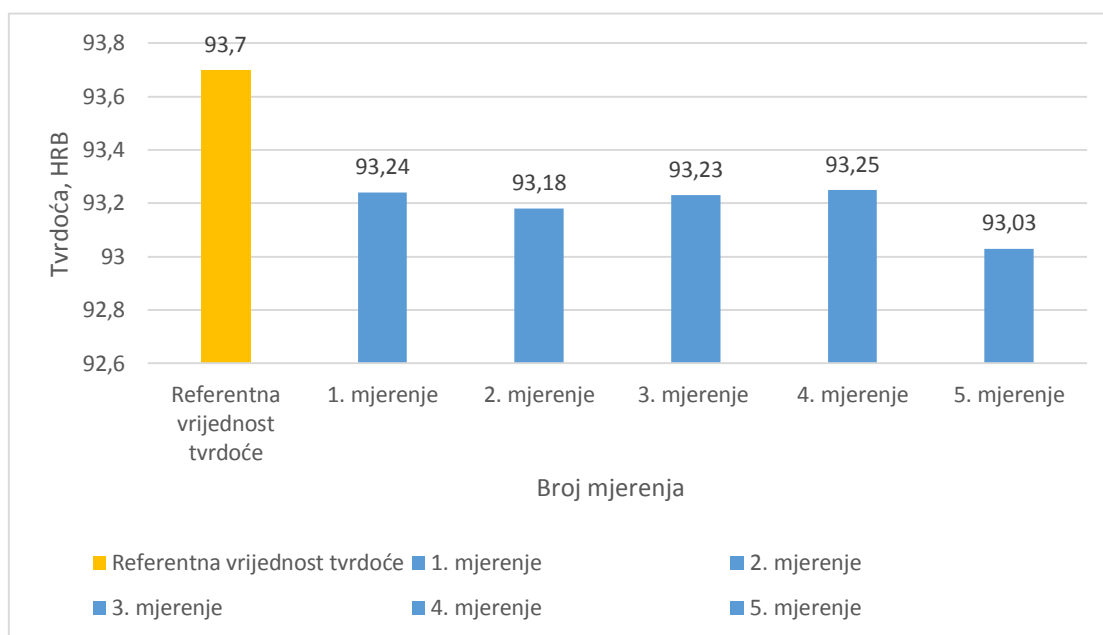
Slike 28., 29. i 30. prikazuju izmjerene vrijednosti tvrdoće za svaku pločicu zajedno sa referentnom vrijednosti pojedine pločice po HRB metodi.



Slika 28. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 23,62 HRB

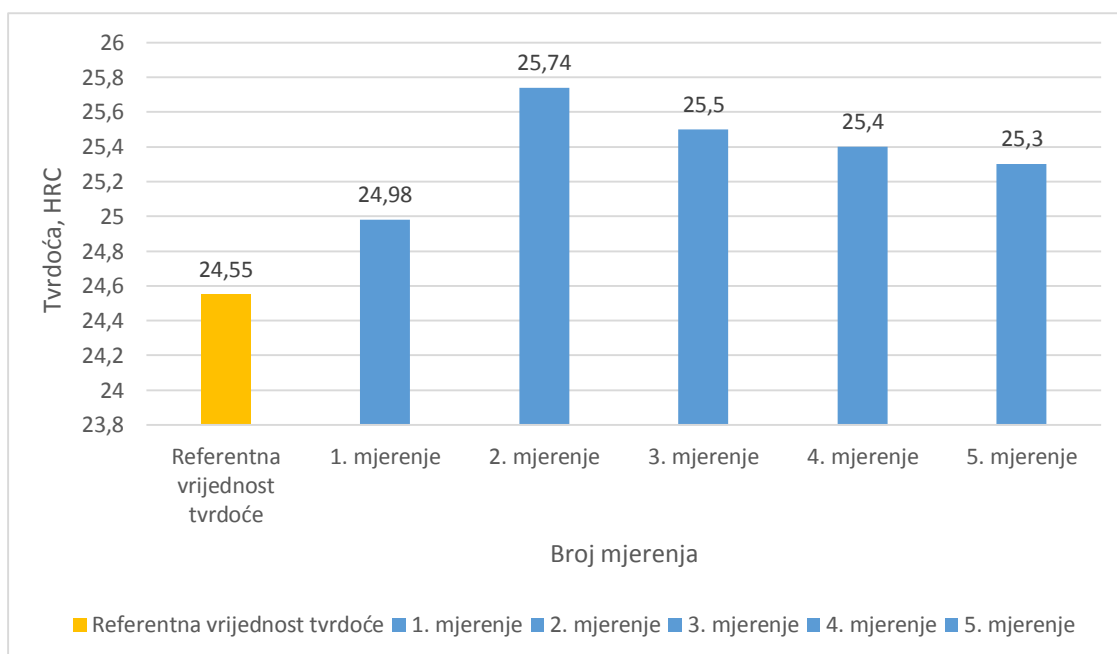


Slika 29. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 61,67 HRB

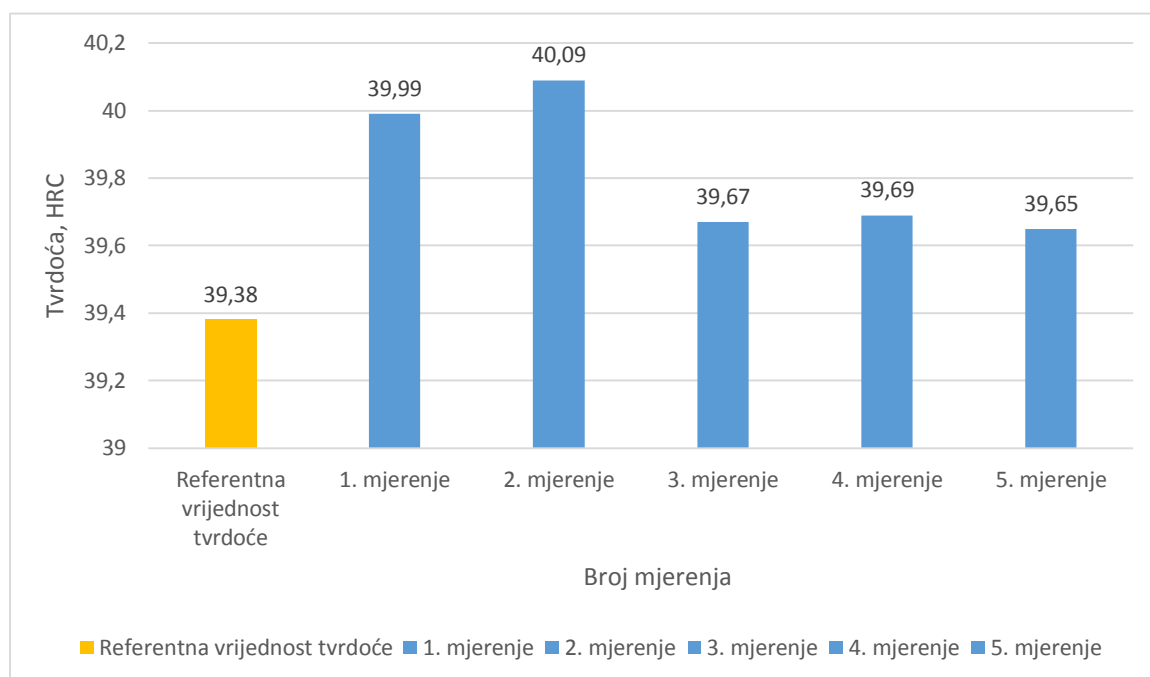


Slika 30. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 93,7 HRB

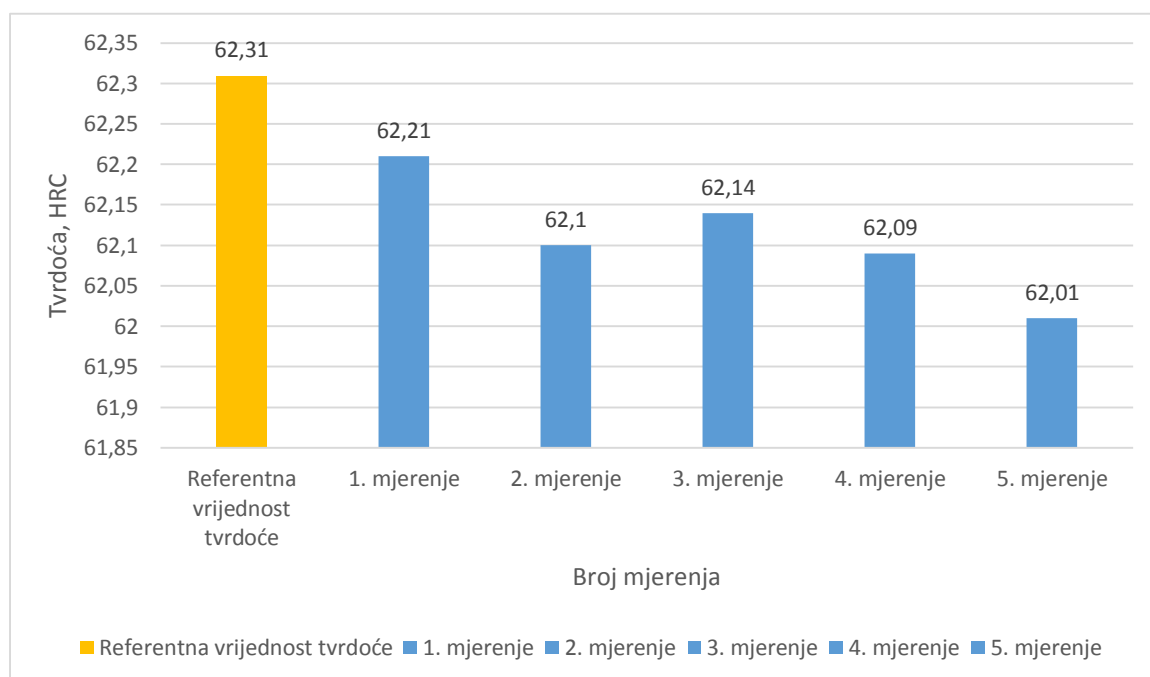
Na slikama 31., 32. i 33. prikazane su izmjerene tvrdoće po HRC metodi za sve tri pločice različitih tvrdoća.



Slika 31. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 24,55 HRC



Slika 32. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 39,38 HRC



Slika 33. Izmjerene vrijednosti tvrdoće pločice 62,31 HRC

U tablici 9. nalaze se dopuštena odstupanja za HRB i HRC metodu.

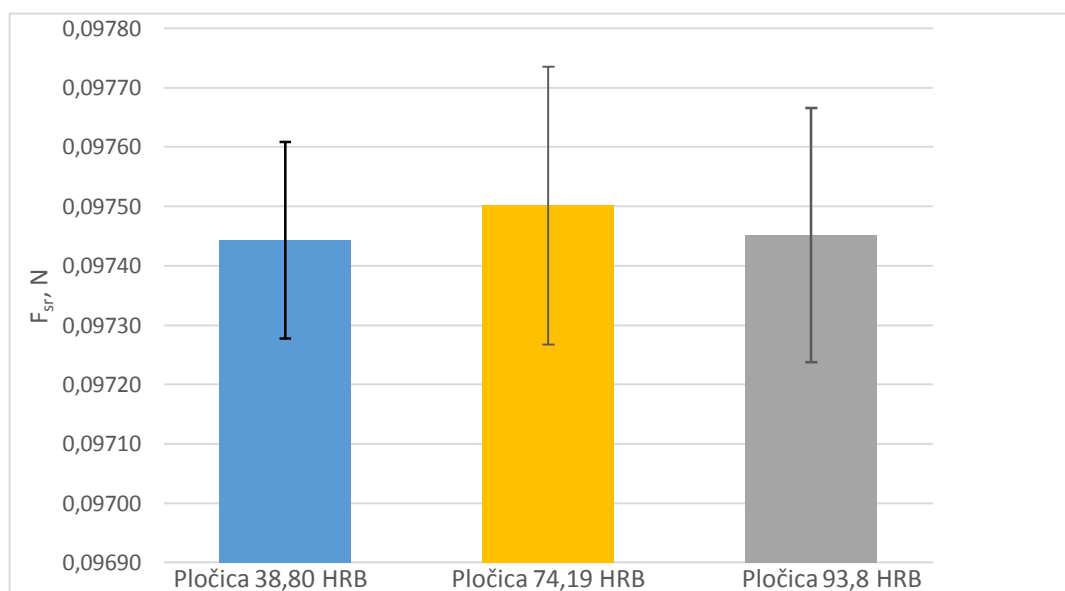
Tablica 9. Dopuštena odstupanja

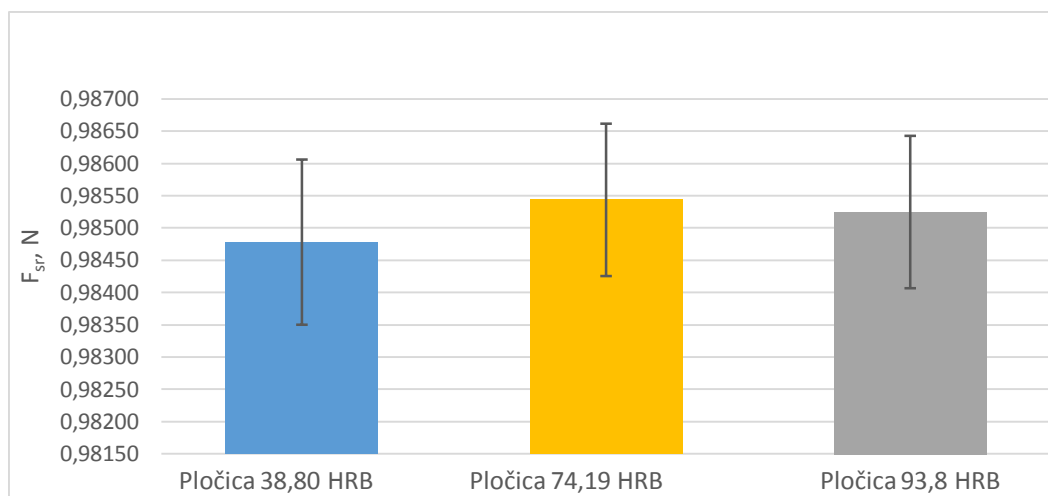
HRC	E, HRC	r
20-70	$\pm 1,5$	$\leq 0,02 (100 - H_{sr})$ ili 0.8 HRC
HRB	E, HRB	r
20 - ≤ 45	± 4	$\leq 0,04 (130 - H_{sr})$ ili 1,2 HRB
$> 45 - \leq 80$	± 3	
$> 80 - \leq 100$	± 2	

Iz izmjerenih vrijednosti na svim pločicama za HRB i HRC metodu vidljivo je da te vrijednosti ulaze u dopuštene intervale koji su propisani normom HRN EN ISO 6508 – 3:2015, a prikazane su u tablici 9.

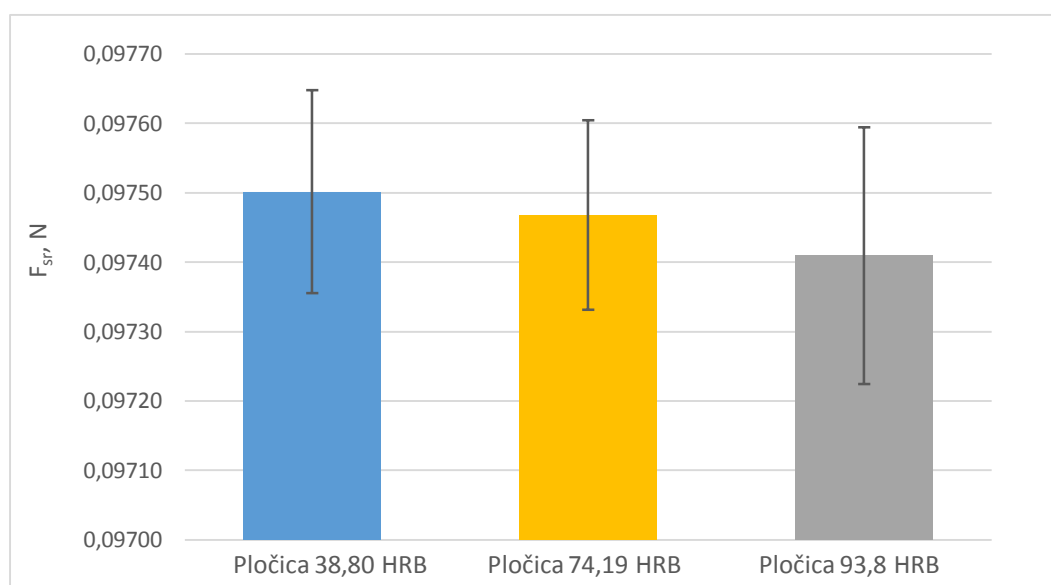
6.3. Analiza odstupanja sila

Na slikama 34., 35. i 36. prikazane su srednje vrijednosti mjerenih sila uz dodanu informaciju o proširenoj mjernoj nesigurnosti pri provođenju mjerenja tvrdoće na tri referentne etalonske pločice za HRB metodu.

**Slika 34. Srednje vrijednosti sila predopterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB**



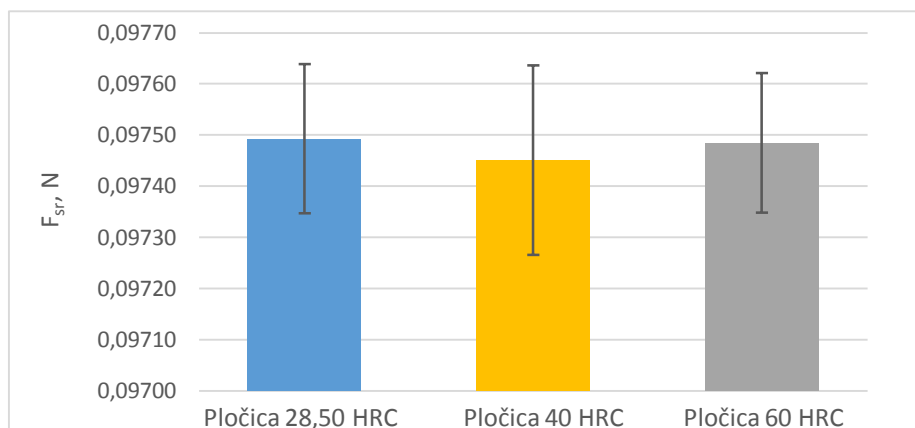
Slika 35. Srednje vrijednosti sila glavnog opterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB



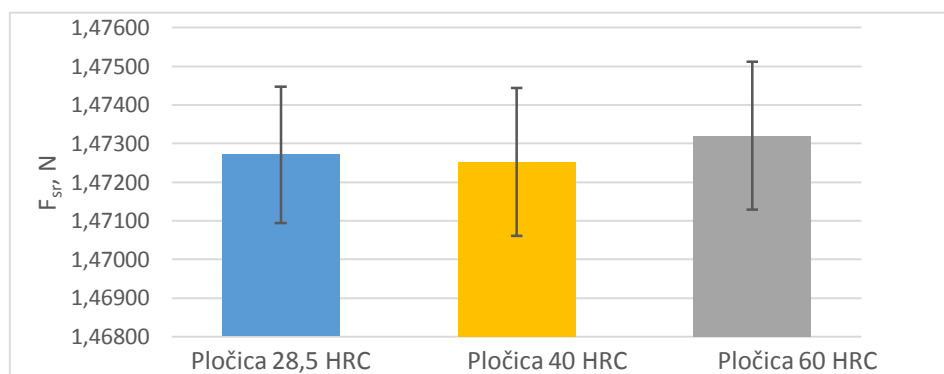
Slika 36. Srednje vrijednosti sila rasterećenja s mjernom nesigurnošću za HRB

Iz prikazanih dijagrama može se zapaziti da se mjerne nesigurnosti izmjerenih sila razlikuju za pojedine referentne pločice kao i za pojedinu silu opterećivanja. Mjerna nesigurnost sile predopterećenja nakon djelovanja glavnog opterećenja je nešto veća u odnosu na silu predopterećenja prije djelovanja glavnog opterećenja. No ta razlika nije veća od 1,5%. Pored ovoga vidljivo je da pogreška sila nije veća od 1% što je sukladno normi HRN EN ISO 6508-2:2015.

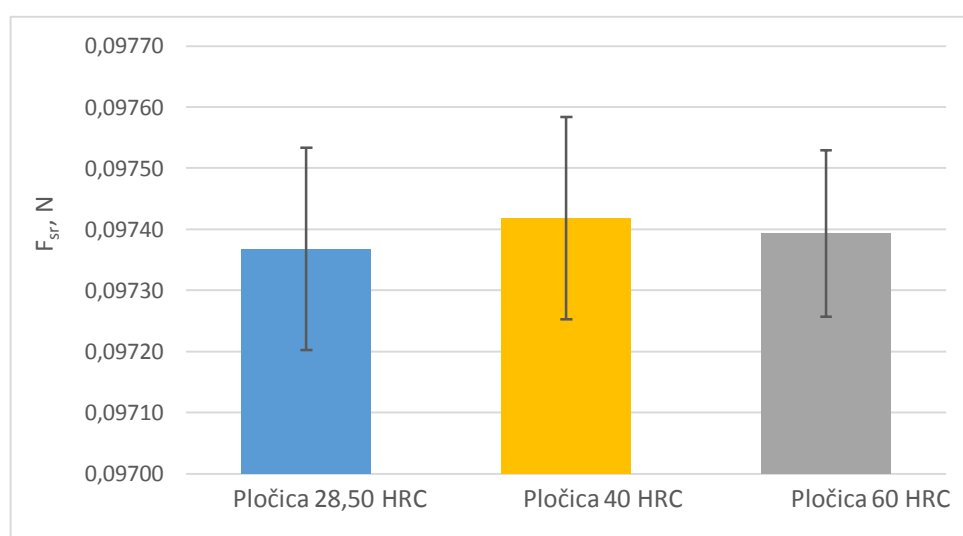
Za HRC metodu, na slikama 37., 38. i 39. su također prikazane srednje vrijednosti sila s informacijom o mjernoj nesigurnosti za sve 3 referentne pločice.



Slika 37. Srednje vrijednosti sila predopterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC



Slika 38. Srednje vrijednosti sila glavnog opterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC

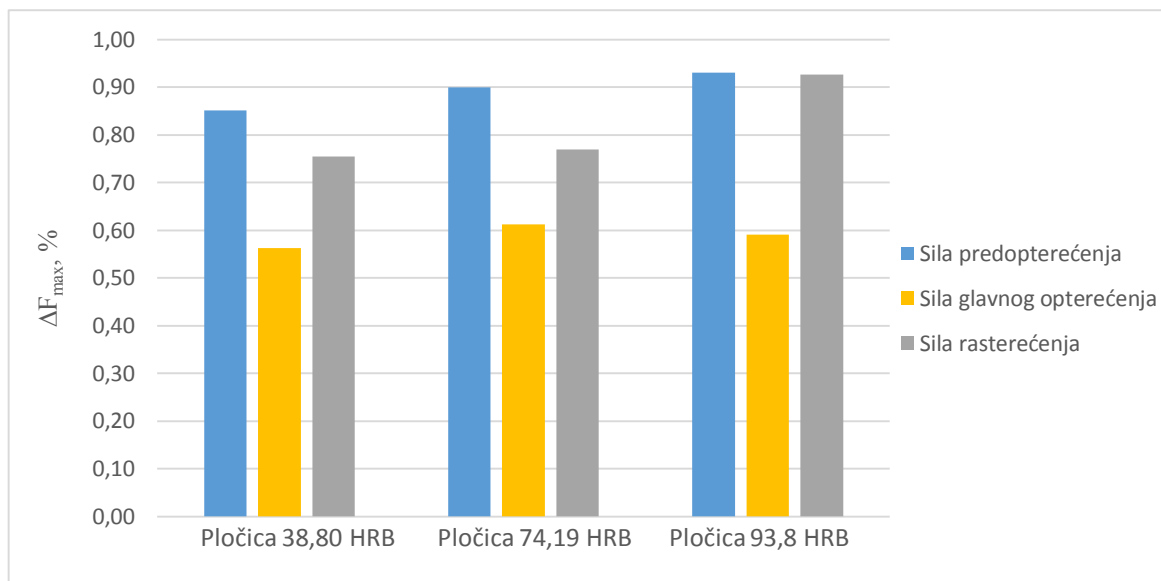


Slika 39. Srednje vrijednosti sila rasterećenja s mjernom nesigurnošću za HRC

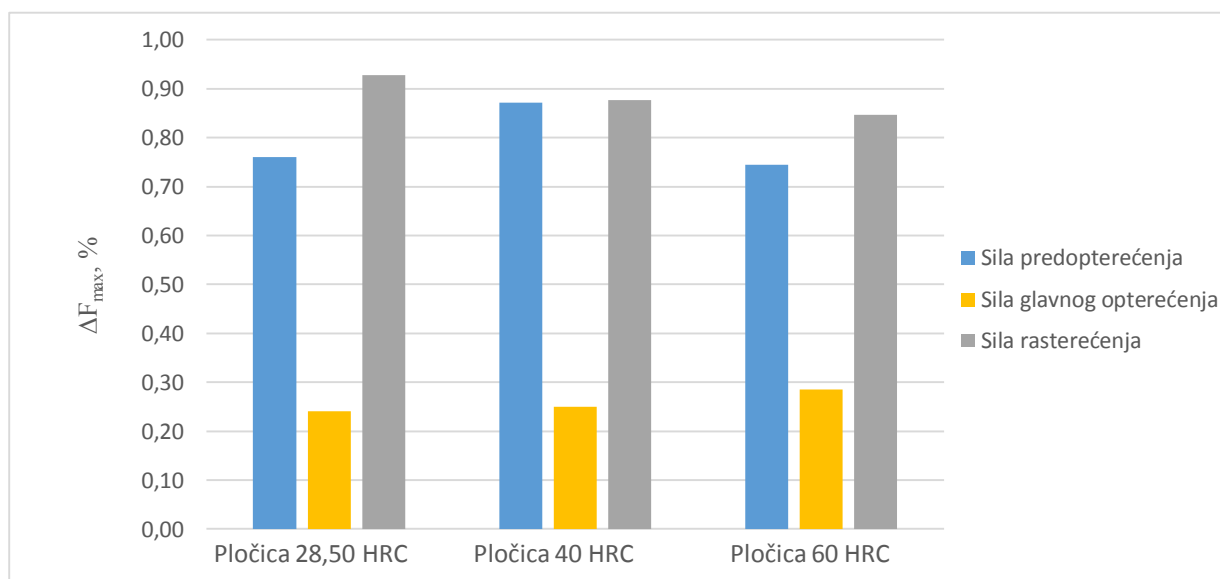
Kod HRC metode je zamijećeno da su mjerne nesigurnosti sile glavnog opterećenja nešto veće po apsolutnom iznosu, ali u relativnom iznosu su slične kao i kod HRB metode. Iz dijagrama je vidljivo da su kod HRC metode ujednačenije nesigurnosti mjerenja nego kod HRB metode što se može pripisati utjecaju oblika samog indentora.

Na slikama 40. i 41. prikazano je maksimalno odstupanje sile za HRB i HRC metodu.

Plava boja označava vrijednosti predopterećenja, narančasta glavnog opterećenja, dok siva označava vrijednost rasterećenja (povratak na silu predopterećenja).



Slika 40. Dijagramski prikaz maksimalnog odstupanja sila za HRB



Slika 41. Dijagramski prikaz maksimalnog odstupanja sila za HRC

Iz dijagrama je vidljivo da su maksimalna odstupanja sile glavnog opterećenja značajno veća kod metode HRB nego kod HRC metode. Kod sila predopterećenja nema neke značajne razlike.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je provjera sustava za opterećivanje u svrhu umjeravanja tvrdomjera kako bi se tijekom ispitivanja tvrdoće osigurale točno definirane sile predopterećenja i glavnog opterećenja.

Nakon provedenog ispitivanja na tvrdomjeru Indentec ZHR 8150 TKT koje je provedeno na dvije različite metode po Rockwellu, doneseni su sljedeći zaključci:

- Direktnom metodom umjeravanja provedena je provjera sila predopterećenja prije i poslije djelovanja glavne sile opterećenja te je ustanovljeno da su maksimalna odstupanja sile ispod dozvoljene granice koja iznosi ± 1 % prema normi HRN EN ISO 6508-2:2015. Također razlika sila predopterećenja prije i poslije djelovanja glavne sile je znatno manja od vrijednosti koja je definirana normom.
- Provjerom sila glavnog opterećenja utvrđeno je da su njihove vrijednosti ispod granice od ± 1 % koja je propisana normom. Uočena je razlika između odstupanja glavnih sila opterećivanja za pojedinu metodu iako se radilo na istom sustavu opterećivanja. Razlog ovoj pojavi je utjecaj samog oblika indentora.
- Analizom sila vidljivo je da su sve sile predopterećenja nešto niže od normirane vrijednosti dok je sila glavnog opterećenja nešto viša u odnosu na normiranu vrijednost za obje metode. U cilju poboljšanja moglo bi se provesti podešavanje polužnog sustava i rekalkibracija utega s obzirom na vrijednost zemljine sile teže na lokaciji tvrdomjera.
- S obzirom da je primijenjen isti sustav opterećivanja u radu dokazano je da ovisno o metodi postoji razlika u odstupanju sila opterećivanja što nas odmah upućuje da je potrebno za svaku metodu provesti provjeru sila opterećivanja.

LITERATURA

- [1] Runje, B.: Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, 2013., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2] Alar, Ž.: Analiza utjecajnih fratora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, Doktorska disertacija, 2008, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [3] Majcen, A.: Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće, Diplomski rad, 2023, Sveučilište Sjever, Varaždin
- [4] The evolution of hardness testing: <https://www.qualitymag.com/articles/90012-the-evolution-of-hardness-testing> , Pristupio: 08.10.2023.
- [5] The world of hardness testing: <https://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/> , Pristupio: 08.10.2023.
- [6] Hardness testing: <https://www.xometry.com/resources/materials/hardness-testing/> , Pristupio: 08.10.2023.
- [7] Hardness testing and hardness testing methods: <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/hardness-testing/> , Pristupio: 12.10.2023.
- [8] Ispitivanje tvrdoće: [https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr > content](https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/content) , Pristupio: 12.10.2023.
- [9] Postupci mjerenja tvrdoće: https://web.archive.org/web/20120817221850/http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html , Pristupio: 15.10.2023.
- [10] What is the Rockwell hardness test: <https://noblief.eu/rockwell-hardness-test-for-knives/> , Pristupio: 15.10.2023.
- [11] Guide to Rockwell hardness: <https://www.yorksaw.com/rockwell-hardness/> , Pristupio: 20.10.2023.
- [12] Hermann K.: Hardness testing-principles and applications, 2011, ASM International, USA
- [13] Rockwell hardness scale for hardness test: <https://whatispiping.com/rockwell-hardness-scale/> , Pristupio: 20.10.2023.
- [14] Gabrić, I.: Materijali 1, Laboratorijske vježbe, 2022., Sveučilište u Splitu, Split
- [15] Ispitivanje materijala: <https://arhiva.simet.hr/hr/nastava/predavanja/preddiplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-preddiplomskog/web1.pdf> , Pristupio: 20.10.2023.

- [16] Metoda određivanja tvrdoće-Rockwell metoda: <https://nsokote.com/formacija/207045-koja-je-rockwellova-metoda-metoda-odre%C4%91ivanja.html>, Pristupio: 05.11.2023.
- [17] Best practices in Rockwell hardness testing: <https://themanufacturingacademy.com/best-practices-in-rockwell-hardness-testing/>, Pristupio: 05.11.2023.
- [18] Dead weight system: <https://www.innovatest-europe.com/technology/dead-weight-systems/>, Pristupio: 05.11.2023.
- [19] Why load cell based closed loop hardness testers are better than dead weight hardness tester: <https://www.bluestar-ee.com/why-load-cell-based-closed-loop-hardness-testers-are-better-than-dead-weight-hardness-testers/>, Pristupio: 10.11.2023.
- [20] Hardness testing accessories: <https://www.struers.com/en/Products/Hardness-testing/Hardness-testing-accessories#>, Pristupio: 10.11.2023.
- [21] Šojat, A.: Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Rockwell HRC, Diplomski rad, 2023, FSB, Zagreb
- [22] Mjerni etaloni: <https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/548-mjerni-etaloni>, Pristupio: 10.11.2023.
- [23] Benčić, D., Solarić, N., Lasić, Z.: Značenje metrološke djelatnosti i njen razvoj u republici Hrvatskoj, Geod. List, 1993., str.293-304.
- [24] HRN EN ISO 6508-1:2015 – Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu, Prvi dio: Metoda ispitivanja
- [25] HRN EN ISO 6508-2:2015 – Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu, Drugi dio: Provjeravanje i umjeravanje ispitnih uređaja i indentora
- [26] HRN EN ISO 6508-3:2015 – Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu, Treći dio: Umjeravanje referentnih pločica