

Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće

Majcen, Zoran

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:809072>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





SVEUČILIŠTE SJEVER

Diplomski rad br. 015/STR /2020

**POUZDANOST PRIJENOSNIH METODA
ISPITIVANJA TVRDOĆE**

ZORAN MAJCEN

0798/336D

Varaždin , rujan 2020.



SVEUČILIŠTE SJEVER
DIPOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

Diplomski rad br. 015/STR/2020

POUZDANOST PRIJENOSNIH METODA
ISPITIVANJA TVRDOĆE

STUDENT:

ZORAN MAJCEN

0798/336D

MENTOR:

Izv. prof. dr.sc. SANJA ŠOLIĆ, dipl.ing

Varaždin , rujan 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić na ukazanom povjerenju, pomoći pri ispitivanju te konstruktivnim prijedlozima i dobronamjernim komentarima i savjetima pruženim tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zoran Majcen

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarsstvo

PRISTUPNIK Zoran Majcen

MATIČNI BROJ 0798/336D

DATUM 22.09.2020.

KOLEGIJ Metode ispitivanja materijala i konstrukcija

NASLOV RADA Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Reliability of portable hardness testing methods

MENTOR dr.sc.Sanja Šolić, dipl.ing.stroj.

ZVANJE izvanredna profesorica

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Matija Bušić - predsjednik povjerenstva
2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić - mentor
3. doc.dr.sc. Zlatko Botak - član
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki - rezervni član
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 015/STR/2020

OPIS

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je ispitati pouzdanost prijenosnih uređaja za ispitivanje tvrdoće u odnosu na klasično laboratorijsko ispitivanje na umjerenim statičkim tvrdomjerima. U teorijskom dijelu rada potrebno je dati prikaz razvoja postupaka ispitivanja tvrdoće te opisati najčešće korištene metode mjerenja tvrdoće tehničkih materijala. Također, potrebno je dati prikaz dostupnih prijenosnih metoda za mjerenje tvrdoće. U praktičnom dijelu rada na tri ispitna uzorka od tri različita metalna materijala (sivi lijev SL10, austenitni čelik 316L, alatni čelik C85W) potrebno je tvrdoću mjeriti standardnom Vickersovom metodom te dobivene rezultate usporediti s rezultatima mjerenja tvrdoće metodom odskoka (Leeb) na prijenosnom tvrdomjeru. Na oba tvrdomjera potrebno je provesti statistički relevantan broj ispitivanja te dobivene rezultate međusobno usporediti, analizirati rasipanje rezultata, odstupanje te točnost i pouzdanost prijenosne metode u odnosu na laboratorijsko mjerenje tvrdoće.

ZADATAK URUČEN

23.09.2020.

POTPIS MENTORA

Sanja Šolić

SVEUČILIŠTE
SIEVER

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS OZNAKA	II
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	7
UVOD	1
1. Mehanička svojstva materijala	3
1.1. Ispitivanje svojstva materijala	3
2. Tvrdća materijala.....	5
2.1. Opis pojma tvrdoće.....	5
2.2. Ispitivanje tvrdoće materijala	5
3. Metode ispitivanja tvrdoće	9
3.1. Statičke metode.....	9
3.2. Dinamičke metode ispitivanja tvrdoće	9
3.3. Ispitivanje tvrdoće po Brinell-u	11
3.4. Ispitivanje tvrdoće po Rockwell-ovoj metodi	14
3.5. Ispitivanje tvrdoće po Vickers-u.....	17
3.6. Ispitivanje tvrdoće po Knoop metodi	20
3.7. Ispitivanje tvrdoće Grozdinski metodom	21
3.8. Ispitivanje tvrdoće Shore metodom.....	21
3.9. Ispitivanje tvrdoće UCI metodom	22
3.10. Ispitivanje tvrdoće Leeb metodom.....	26
3.11. Laboratorijske metode	29
3.12. Prijenosne metode.....	29
3.13. Priprema površine	33
3.14. Stezanje uzoraka	34
3.15. Opća pravila o debljini i dimenzijama uzroka	35
4. Usporedba prijenosne i laboratorijske metode ispitivanja tvrdoće	38
4.1. Prijenosni uređaj za ispitivanje tvrdoće.....	39
4.2. Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka.....	40
4.3. Rezultati ispitivanja uzoraka	42
4.4. Uspoređivanje rezultata	48
4.5. Uzrok pogreške.....	51
5. Zaključak.....	56
6. Literatura.....	58

POPIS OZNAKA

oznaka	Mjerna jedinca	opis
<i>E</i>	N/mm ²	modul elastičnosti
<i>R_m</i>	N/mm ²	vlačna čvrstoća
HB		tvrdoća po Brinell-u
H		tvrdoća po Meyer-u
HV		tvrdoća po Vickers-u
HR		tvrdoća po Rockwell-u
HK		tvrdoća po Knoop-u
HL		tvrdoća po Leeb-u
Shore		tvrdoća po Shore-u
<i>F</i>	N	sila, izražena u jedinici Newton
<i>F</i>	Kp	sila, izražena u jedinici kilopond
<i>D</i>	mm	promjer kuglice indentora
<i>d</i>	mm	dijagonala otiska, promjer otiska
<i>t</i>	s	vrijeme
<i>A</i>	mm ²	površina otiska
<i>h</i>	mm	dubina otiska
<i>f</i>	Hz	frekvencija indentora
<i>v_a</i>	m/s	brzina indentora prije udara u površinu
<i>v_b</i>	m/s	brzina indentora nakon udara u površinu

POPIS SLIKA

Slika 1. Ispitne igle za ispitivanje tvrdoće po Mohs-ov skali [3].....	2
Slika 2. Podjela i prikaz skupina svojstava [1].....	4
Slika 3. Pregled razvoja metoda ispitivanja tvrdoće kroz povijest [7].....	6
Slika 4. Dijagram djelovanja sile pri ispitivanju tvrdoće statičkim metodama [10].....	9
Slika 5. Shema postupka ispitivanja tvrdoće metodom odskoka [2].....	10
Slika 6. Shematski prikaz ispitivanja po Brinell-u [5].....	11
Slika 7. Način mjerenja promjera otiska u dva smjera kod ispitivanja Brinell metodom [7]..	11
Slika 8. Indentori kuglice različitih veličina za ispitivanje po Brinell-u [5].....	12
Slika 9. Zahtjevi za minimalnim razmacima između otisaka i udaljenosti od ruba na uzorku pri ispitivanju Brinell metodom [7].....	13
Slika 10. Shematski prikaz postupka ispitivanja tvrdoće Rockwell metodom.....	14
Slika 11. Indentori za standardnu Rockwell metodu, a) konični indentor, b) držač kuglica, c) karbidne kuglice [7].....	16
Slika 12. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od 136° b) shema geometrije indentora [9].....	17
Slika 13. Način mjerenja otiska kod Vickers metode [10].....	18
Slika 14. Geometrijski parametri indentora za metodu ispitivanja po Knoop-u [7].....	20
Slika 15. Prikaz otiska (a) i indentora (b) za ispitivanje tvrdoće po Grozdinskom [9].....	21
Slika 16. Nekoliko veličina sonde za UCI metodu, razlikuju se ispitnom silom [2].....	22
Slika 17. Shematski prikaz sonde za mjerenje UCI metodom [2].....	22
Slika 18. Pomak frekvencije u odnosu na tvrdoću ispitivanog materijala [2].....	23
Slika 19. Ispitivanje UCI metodom na poliranim površinama [2].....	24
Slika 20. Ispitivanje tvrdoće tankih limova UCI metodom [11].....	24
Slika 21. Princip ispitivanja tvrdoće po Leeb-u, dijagram brzina [2].....	26
Slika 22. Prikaz ispitne sonde za metodu odskoka [2].....	26
Slika 23. Kombinirani uređaj Proceq Equotip 550 sa različitim sondama [12].....	28
Slika 24. Uređaji za laboratorijska ispitivanje tvrdoće [13].....	29
Slika 25. Uređaj za ispitivanje tvrdoće MIC20 metodom odskoka i UCI [2].....	30
Slika 26. Specijalni uređaj za ispitivanje po Vickers-u, prijenosni ali vrlo velike mase [13]..	31
Slika 27. Prijenosni ručni uređaji za ispitivanje tvrdoće po Rockwell-u [14].....	31
Slika 28. Uređaj za ispitivanje tvrdoće TIV metodom [2].....	32
Slika 29. Utjecaj pripreme površine na očitavanje otiska: a) dovoljna priprema, b) nedovoljna priprema [15].....	34
Slika 30. Specijalni držači uzoraka za ispitivanje tvrdoće [15].....	34
Slika 31. Minimalni razmak između dva otiska za metode: a) Brinell, b) Knoop, c) Vickers [7].....	35
Slika 32. Upotreba potpornja pri ispitivanju tvrdoće kod male mase uzorka [15].....	35

Slika 33. Pripremljeni uzorci za ispitivanje tvrdoće: a) alatni čelik, b) sivi lijev, c) austenitni čelik	38
Slika 34. Prijenosni uređaj za ispitivanje tvrdoće BAQ dynaROCK II [16].....	39
Slika 35. a) osnovna oprema uređaja BAQ dynaROCK II, b) postupak umjeravanja pomoću etalona	40
Slika 36. Udubljenja nakon ispitivanja tvrdoće metodom odskoka: a) pogled stereo mikroskopom, b) otisci vidljivi bez povećala	41
Slika 37. Uzorak od sivog lijeva pripremljen za ispitivanje tvrdoće	42
Slika 38. Grafikon usporednih rezultata ispitivanja za uzorak 1.....	43
Slika 39. Uzorak austenitnog čelika 316L : a) udubljenja nakon ispitivanja metodom odskoka, b) uzorak pripremljen za ispitivanje.....	44
Slika 40. Grafikon usporednih rezultata za uzorak 2	45
Slika 41. Grafikon usporednih rezultata ispitivanja za uzorak 3.....	47
Slika 42. Grafikon usporednih rezultata ispitivanja za sve uzorke i metode	48
Slika 43. Prikaz rezultata na uređaju (kod umjeravanja)	50
Slika 44. Greške prilikom ispitivanja tvrdoće: a) otisak je preblizu ruba uzorka, b) razmak između otisaka je premali.....	51
Slika 45. Veličina sonde u odnosu na uzorak.....	52
Slika 46. Pregled uzoraka stereo mikroskopom	52
Slika 47. Ispitivanje uzorka kada je sonda nagnuta	53
Slika 48. Prijava greške na zaslonu uređaja	53
Slika 49. Opis sonde tipa D i nužnih uvjeta ispitivanja [16].....	54
Slika 50. Prikaz greške pri odabiru skale tvrdoće	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine ispitivanja tvrdoće	7
Tablica 2. Popis oznaka, sila i indentora pri ispitivanju standardnim Rockwell metodama [10]	15
Tablica 3. Skale tvrdoće za površinsku Rockwell metodu [10].....	16
Tablica 4. Prikaz područja ispitivanja Vickers-ovom metodom [7]	19
Tablica 5. Dimenzije indentora, brzine i materijali za ispitivanje tvrdoće po Leeb-u [7]	27
Tablica 6. Zahtjevi za minimalnom obradom u odnosu na metodu ispitivanja [2,4,10,12,15]	33
Tablica 7. Usporedna tablica vrijednosti tvrdoće za nekoliko metoda ispitivanja [9]	36
Tablica 8. Norme prema standardima ISO i ASTM za neke najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće [2,7].....	37
Tablica 9. Materijali uzoraka i pripadajuće oznake	40
Tablica 10. rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 1-A.....	42
Tablica 11. Rezultati ispitivanja Vickers metodom – uzorak 1-B [17].....	43
Tablica 12. rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 2-A.....	44
Tablica 13. Rezultati ispitivanja Vickers metodom - uzorak 2-B [17]	45
Tablica 14. Rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 3-A	46
Tablica 15. Rezultati ispitivanja Vickers metodom - uzorak 3-B [17]	46
Tablica 16. Statistička obrada dobivenih rezultata.....	49
Tablica 17. Rezultati ispitivanja pri umjeravanju etalomom za metodu odskoka.....	49

SAŽETAK

U strojarskoj praksi nužno je dobro poznavanje mehaničkih svojstava materijala. Jedno od vrlo bitnih svojstva u procesima obrade i eksploatacije materijala je njegova tvrdoća. Zbog potrebe provođenja ispitivanja tvrdoće na gotovim konstrukcijama i u proizvodnim pogonima, razvijaju se prijenosni uređaji za tu namjenu. U radu se obradila pouzdanost rezultata dobivenih pomoću uređaja za terensko ispitivanje tvrdoće.

Ispitivanja provedena u svrhu ovog diplomskog rada obuhvatila su ispitivanje tvrdoće na tri uzorka (sivi lijev SL10, austenitni čelik 316L i alatni čelik C85W). Rezultati dobiveni prijenosnim uređajem za ispitivanje tvrdoće metodom odskoka (Leeb metodom) su uspoređeni sa rezultatima ispitivanja Vickers-ovom metodom provedenom u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanja su provedena prema važećim normama za pojedinu metodu.

Ključne riječi: tvrdoća, metode ispitivanja tvrdoće, prijenosni uređaji, metoda odskoka

SUMMARY

In mechanical practice, a good knowledge of the mechanical properties of materials is mandatory. One of the most important properties in the actions of processing and exploitation of the material is the hardness. Due to the necessity of conducting the hardness tests on finished structures and production plants, portable devices are being developed for this purpose. The paper deals with the reliability of the results obtained using portable hardness testing devices.

Tests conducted for the purpose of this thesis included hardness testing on three samples (grey cast iron SL10, austenitic steel 316L and tool steel C85W). The results obtained with a portable device for hardness testing by the rebound method (Leeb method) were compared with the results of testing by the Vickers method conducted in the Laboratory for Testing Mechanical Properties of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. The tests were performed according to the applicable standards for each method.

Key words: hardness, hardness test, portable devices, rebound method

UVOD

Postizanje najboljih rezultata u proizvodnji moguće je uz ispunjenje nekoliko uvjeta. Jedan od najvažnijih uvjeta je odabir materijala. Uz sva povoljna mehanička svojstva, materijal mora imati i povoljna tehnološka svojstva, a uz to bitni su faktori ekonomičnost, ekološka komponenta, dobavlјivost, dostupnost, estetika itd.

Pravilnim odabirom materijala posljedično se utječe i na tehničke karakteristike konstrukcije, proizvodne i servisne troškove. Sve ovo odražava se na konkurentnost proizvoda. Odabir materijala na ovaj je način povezan s cijelim životnim ciklusom proizvoda: projektiranjem, konstruiranjem, proizvodnjom, uporabom, zbrinjavanjem. Najvažnije odluke donose se u fazi konstruiranja, jer je teško raditi promjene u kasnijoj fazi. Zbog toga je u pri odabiru materijala vrlo važno dobro poznavati sva njegova svojstva [1].

Pojedina mehanička svojstva su u međusobnoj ovisnosti. Zbog toga nije uvijek potrebno ispitivanje svih svojstava materijala, već je dovoljno odrediti neka osnovna svojstva uz specifična za pojedinu namjenu. Jedno od temeljnih svojstava tehničkih materijala je njegova tvrdoća, a koje se očituje kao otpor prodiranju stranog tijela u površinu materijala. Tvrdoća materijala je mehaničko svojstvo koje se najčešće ispituje u praksi. Postoje brojne metode ispitivanja tvrdoće, a u uporabi je nekoliko skala tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće materijala se primjenjuje u mnogim fazama proizvodnog procesa– ulazna kontrola materijala, kontrola procesa toplinske obrade materijala, ispitivanje zavarenih spojeva, ispitivanje odljevaka, međufazna kontrola pri obradi materijala deformacijom i sl. Uz poznatu tvrdoću, mogu se, računski ili putem određenih dijagrama, odrediti vrijednosti vlačne čvrstoće, modula elastičnosti, žilavosti, duktilnosti. Posredno određivanje svojstava smanjuje troškove ispitivanja i ubrzava sam proces.

Ispitivanja tvrdoće provode se prema određenim standardima koji točno propisuju način, uvjete i dozvoljena odstupanja. Ispitivanja tvrdoće se provode u ispitnim laboratorijima ili kao terenska ispitivanja na konstrukcijama. U laboratorijima moguće je osigurati optimalne uvjete propisane normama, te uz preciznost i točnost očitavanja postići ponovljivost rezultata. Za provođenje ispitivanja u laboratorijima potrebno je, uz osiguranje zahtijevanih uvjeta, prikupiti uzorke, osigurati edukaciju mjeritelja te adekvatnu opremu. Prikupljanje uzoraka i njihovo dostavljanje nije jednostavno pa čak je i nemoguće u slučaju da se radi o gotovim proizvodima ili konstrukcijama.

Prijenosni uređaji za ispitivanje tvrdoće omogućuju brze terenske kontrole kvalitete, a koje se mogu provoditi kao međufazna ili pak kontrola gotovih konstrukcija. Uz mogućnost primjene na teško dostupnim mjestima, bez potrebe izuzimanja uzoraka te jednostavnost primjene, prienosni uređaji imaju i prednost trenutnog očitavanja vrijednosti izmjerene tvrdoće čime je omogućeno provođenje ispitivanja direktno na proizvodnoj liniji, te postoji mogućnost automatizacije, no istodobno je teško uvijek osigurati minimalno zahtijevane uvjete za provedbu ispitivanja. Stoga je pouzdanost rezultata ispitivanja prienosnim metodama niža od rezultata dobivenih laboratorijskim ispitivanjima [2].

Najjednostavniji alati za ispitivanje tvrdoće jesu ispitne igle, prikazane na slici 1. Ispitne igle imaju tvrdoću prema Mohs-ovoj skali, gdje se tvrdoća određuje na osnovu usporedbe sa mineralima navedenim na toj skali.

U radu su provedena ispitivanja i usporedba dobivenih vrijednosti tvrdoće pomoću metode odskoka (metoda po Leebu) te Vickersovom metodom kako bi se utvrdila pouzdanost kod prijenosnih uređaja za ispitivanje tvrdoće. Ispitivanje metodom odskoka provedeno je prijenosnim uređajem BAQ dynaROCK II na Sveučilištu Sjever u Varaždinu, dok je Vickersovom metodom ispitivanje provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Dobiveni rezultati su potom uspoređeni te je zaključno dano mišljenje o mogućnostima usporedbe, mogućim greškama pri ispitivanju te uvjetima za ispravno provođenje ispitivanja.



Slika 1. Ispitne igle za ispitivanje tvrdoće po Mohs-ov skali [3]

1. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Mehanička svojstva materijala su posljedica njegovog mikrostrukturnog stanja. Odabirom određenog kemijskog sastava te određenog tehnološkog postupka postiže se ciljana mikrostruktura materijala, a posljedično i mehanička svojstva [4].

Sa strojarskog stajališta temeljna svojstva materijala su njegova mehanička svojstva, što obuhvaća njegovu čvrstoću, granicu razvlačenja, tvrdoću, žilavost, istezljivost, dinamičku izdržljivost [4].

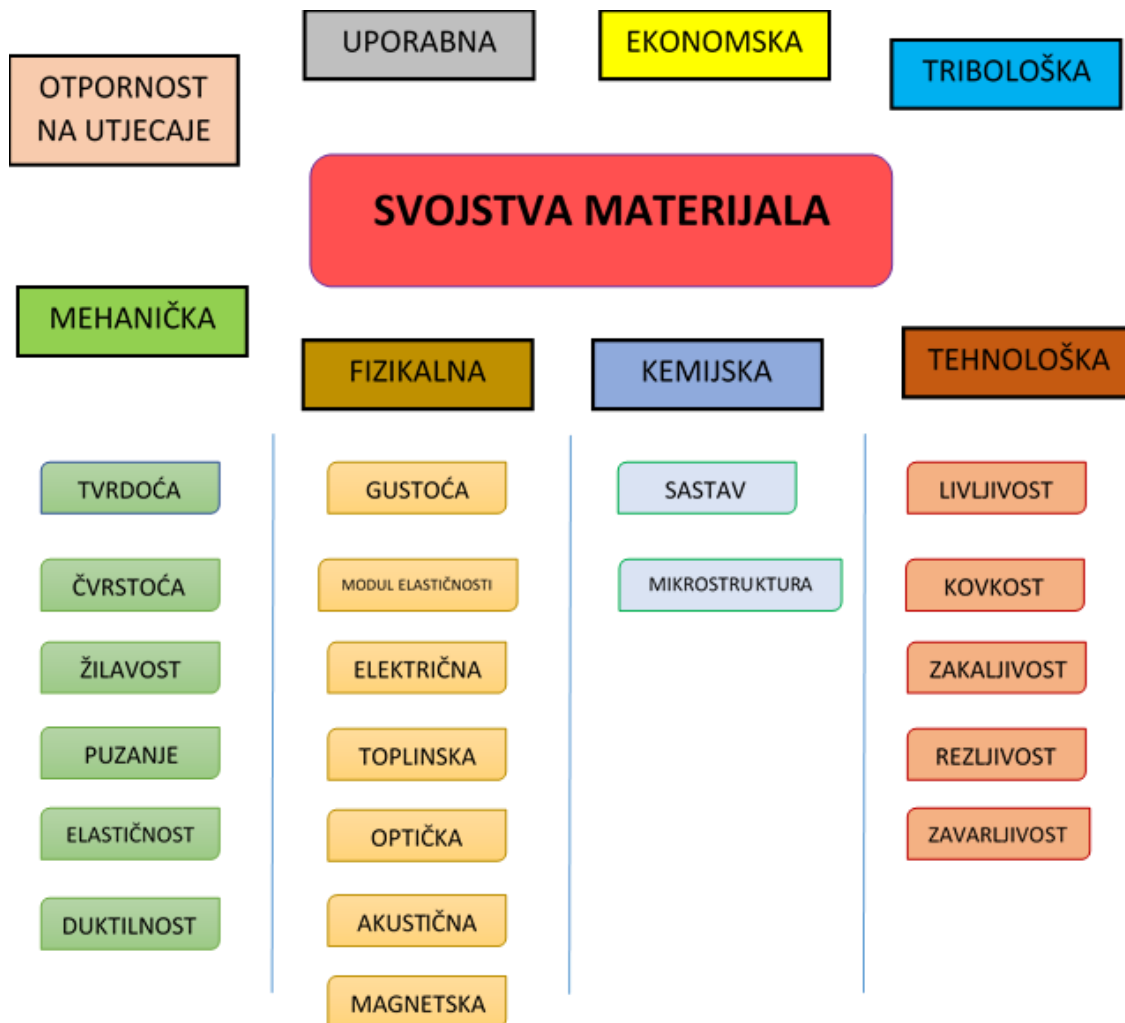
Ponašanje materijala u različitim uvjetima opterećenja i eksploatacije određeno je njegovim mehaničkim svojstvima o čemu ovise i njegova tehnološka svojstva. Poznavanje mehaničkih svojstava materijala nužno je prilikom dimenzioniranja konstrukcije. Vrlo je važno dobro utvrditi intenzitet, način i trajanje svih mehaničkih opterećenja koja se mogu pojaviti u predviđenom eksploatacijskom periodu određenog strojnog dijela ili konstrukcije. Osnovni zahtjev u eksploataciji nekog strojnog dijela je da se u predviđenom radnom periodu nekog proizvoda ne pojavi lom odnosno plastična deformacija koja bi uzrokovala disfunkciju strojnog dijela ili konstrukcije [1].

Osim mehaničkih svojstava, kod tehničkih materijala važno je poznavati i njegova tehnološka svojstva - zavarljivost, deformabilnost, livljivost, zakaljivost, rezljivost, duktilnost. Uz spomenuta mehanička i tehnološka svojstva postoji čitav niz svojstava koja utječu na konačnu odluku o odabiru nekog materijala (slika 2) [1, 4].

1.1. Ispitivanje svojstava materijala

Cilj ispitivanja svojstava materijala je određivanje njegovih temeljnih i uporabnih svojstava, navedenih na slici 2. Mehanička svojstva mjere se i ispituju za sve vrste i skupine tehničkih materijala. Razlozi su nesavršenosti mikrostrukture, zbog čega se svojstva ne mogu odrediti teorijski. Svako od mehaničkih svojstava predstavlja mjerljivu veličinu materijala, a koja se može kvantitativno odrediti putem neke od normiranih metoda ispitivanja. Razvoj metoda ispitivanja materijala kreće prvim pisanim izvješćem o ispitivanju mehaničkog svojstva čvrstoće žice, a kojeg je provodio Leonardo da Vinci u 16. stoljeću. Mnogi znanstvenici su od tog vremena do današnjih dana usavršavali tehnike ispitivanja, bilo teorijski bilo praktično, uvodeći pri tome nove pojmove (npr. modul elastičnosti) [4,5].

Ispitivanje svojstava materijala provodi se zbog kontrole promjena svojstava koje nastaju pri tehnološkim postupcima kroz koje materijal prolazi, kontrole nakon određenog vremena uporabe, pronalaženje uzroka oštećenja ili lomova, razvoja novih materijala i sl. [5].



Slika 2. Podjela i prikaz skupina svojstava [1]

2. TVRDOĆA MATERIJALA

2.1. Opis pojma tvrdoće

Tvrdoća predstavlja mehaničko svojstvo krutih tvari, definirano kao otpor kojim se neko tijelo suprotstavlja prodiranju drugog tvrđeg tijela u njegovu površinu. Tvrdoća je pokazatelj kombinacije jačine veza između atoma materijala i njihovih slaganja u kristalnu rešetku pri utiskivanju nekog tvrđeg tijela. Jače veze i bolji razmještaj u kristale bez kliznih ravnina rezultirati će manjim prodiranjem stranog tijela u površinu materijala. Tijelo niže tvrdoće ne može se utisnuti u površinu tvrđeg materijala. Kao najtvrđi poznati materijal spominje se dijamant. Na tvrdoću materijala utječu kemijski sastav, mikrostruktura te prethodna tehnologija obrade [4].

U strojarstvu je svojstvo tvrdoće okarakterizirano kao jedno od najvažnijih mehaničkih svojstava, a iz podataka o tvrdoći može se procijeniti vlačna čvrstoća i modul elastičnosti, povećanjem tvrdoće materijala povećava se i otpornost na abrazijsko trošenje a utječe i na ponašanje pri deformiranju [2].

Tvrdoća nije fizikalna veličina pa stoga nema mjernu jedinicu, a kako predstavljanje rezultata mjerenja ovisi o metodi ispitivanja, zaključuje se da je tvrdoća parametar. Ako se uspoređuju dobiveni rezultati ispitivanja, kako bi se dobila upotrebljiva vrijednost tvrdoće, potrebno je dati točan opis metode [2].

2.2. Ispitivanje tvrdoće materijala

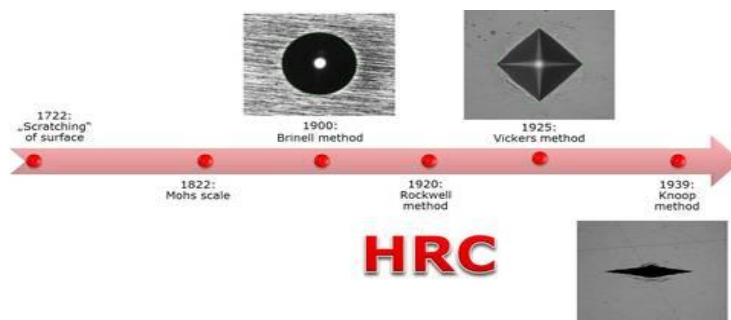
Postupci ispitivanja tvrdoće su jednostavniji i priprema uzoraka je brža i jednostavnija u odnosu na statička vlačna ispitivanja i ispitivanja žilavosti Charpy-jevim postupkom, te zbog toga spadaju u najčešće korištene metode ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. Ispitivanja tvrdoće općenito spadaju u nerazorna ispitivanja jer se prilikom provedbe postupka ispitivanja tek neznatno oštećuje površina uzorka, te se time ne narušava njegova funkcionalnost. Ovo ne vrijedi u slučaju kada se uzorak mora izrezati da bi se moglo sprovesti ispitivanje.

Prvu metodu za mjerenje tvrdoće razvio je Friedrich Mohs 1822.g. koja se temeljila na brazdanju površine svakog prethodnog člana ljestvice sa deset minerala, poredanih po tvrdoći. Ostali materijali su se uspoređivali s njima, no zbog nelinearnih intervala između pojedinih minerala na ljestvici, teško je točno utvrditi tvrdoću određenog materijala.

Najznačajnije inovacije u području ispitivanja tvrdoće potaknuta su Drugom industrijskom revolucijom. U tom razdoblju započinje masovna industrijska proizvodnja, a poseban utjecaj na razvoj novih ili poboljšanih metoda ispitivanja imale su automobilska i vojna industrija, a posljedično i proizvodnja alatnih strojeva. Javila se potreba za kontrolom svakog proizvoda, a tvrdoća daje podatke o djelotvornosti stroja ili konstrukcije, ukazuje na otpornost prema

trošenju ili krhkost pri kaljenju. Ispitivanje tvrdoće je lako provedivo, ali ne i previše precizno. Razvojem novih materijala i tehnologija obrade, prilagođene su i metode za ispitivanje tvrdoće. Predstavljeno je nekoliko metoda ispitivanja, a neke od njih su danas najznačajnije. Najpoznatije metode ispitivanja tvrdoće tehničkih materijala jesu:

- Rockwell
- Vickers
- Brinell
- Knoop.



Slika 3. Pregled razvoja metoda ispitivanja tvrdoće kroz povijest [7]

Nakon Mohs-ove skale, koja za strojarstvo nije pogodna, 1900. godine Brinell razvija metodu ispitivanja tvrdoće utiskivanjem kuglice od kaljenog čelika i mjerenjem otisaka. Iako napredna za to doba, imala je brojnih nedostataka, naročito ograničeno mjerno područje. Slijedi Rockwell metoda 1920.godine s predopterećenjem i mjerenjem dubine prodiranja. Vickers-ova metoda 1925. godine ispravlja neke greške prethodnih metoda te uvodi četverostranu dijamantnu piramidu kao indentor. Knoop metoda je razvijena 1939. god. zbog potrebe ispitivanja vrlo tankih uzoraka i slojeva, te je promijenjen oblik indentora. Ni jedna od metoda nije u potpunosti primjenjiva na sve materijale i razine ispitivanja, te je zbog toga danas u upotrebi čitav niz metoda za ispitivanje tvrdoće, a ovisno o zahtjevima ispitivanja te svojstvima materijala [7].

Ispitivanje tvrdoće provodi se na tri osnovne razine: nanotvrdoća, mikrotvrdoća i makrotvrdoća te jedne podrazine semi-mikrotvrdoća. Ove razine razlikuju se prema primijenjenim silama i području primjene (tablica 1.).

Vrijednosti dobivene pri ispitivanju tvrdoće primjenom sila većih od 1,96 N smatraju se makrotvrdoćom. Koriste se sile u rasponu od 1,96 N pa sve do 29 420 N. Područje u kojem se primjenjuju sile od 1,96 N do 49,03 N još se prema nekim autorima svrstava u semi-mikrotvrdoću, a razlika od ispitivanja makrotvrdoće je u primjeni nižih vrijednosti opterećenja. Mjerenja provedena u području makrotvrdoće smatraju se referentnim vrijednostima za ispitivani materijal [7].

Postupci kod kojih se koriste sile od 0,1 N do 1,96 N svrstavaju se u područje ispitivanje mikrotvrdoće. Na mikrotvrdoću utječe obrada površine (koja na ovoj razini ima veći utjecaj

nego kod makrotvrdoće), trenje između dodirnih površina, očvršćivanje u blizini otiska, vibracije uređaja itd. [2,7].

Ispitivanje nanotvrdoće provodi se silama od 0,1-100 mN, prema nekoliko metoda (tablica 1.). Prvenstveno se koristi za ispitivanje tvrdoće tankih tvrdih prevlaka, mjerenje tvrdoće kristalnih zrna, u elektronici itd. Pomoću ovih metoda može se odrediti i modul elastičnosti materijala. Zbog izuzetno malih indentora, sila i otisaka, za provođenje postupka nužna je izuzetna antivibracijska, zvučna i toplinska zaštita te kontrolirani uvjeti okoline [8].

Tablica 1. Područja ispitivanja tvrdoće

	Primijenjena sila	Postupci (poznatiji)	Područje primjene
Nanotvrdoća	mN, μ N	Berkovich Vickers Knoop	Uključci u materijalu,, Faze u materijalu, Slojevi u elektronici, Prevlake (PVD, CVD)
Mikrotvrdoća	< 1,96 N	Vickers Knoop Grozinski Ultrazvučno	Vrlo tanki slojevi, Kristalna zrna, Mikrostrukturni konstituenti, Premazi, prevlake
Semi-makrotvrdoća	1,96 N-49,03 N	Vickers Ultrazvučno	površinski difuzijski slojevi, toplinsko – kemijski postupci
Makrotvrdoća	$\geq 49,03$ N	Vickers Brinell statički Rockwell	Kontrola kvalitete materijala Mjerenje referentnih vrijednosti tvrdoće materijala
		Leeb Poldi dinamički Shore	Heterogeni materijali Područje ZUT-a Polimerni materijali

Pri ispitivanju tankih limova i slojeva, dubina indentora ne smije prelaziti 1/10 debljine lima ili sloja iz razloga da podloga ne utječe na rezultat. Pri svakoj razini ispitivanja gdje su primijenjene sile manje, utjecaj okoline, priprema uzoraka, preciznost uređaja za očitavanje, oštećenje indentora ima veći utjecaj na rezultate mjerenja.

Zbog razvoja metoda ispitivanja tvrdoće pretežno početkom 20. stoljeća, korištene su mjerne jedinice iz starog tehničkog sustava. Jedinica za silu, koja se tada koristila bila je kilopond [kp]. Danas se prema SI sustavu za silu koristi mjerna jedinica Newton [N], no kako bi se izbjegle dvostruke oznake i različite vrijednosti za istu tvrdoću, u oznake se upisuje masa u kilogramima [kg] koja je proizvela tu silu. U mnogim literaturama, poglavito američkim, još se koristi kilopond kao mjerna jedinica, iako to nije službeno.

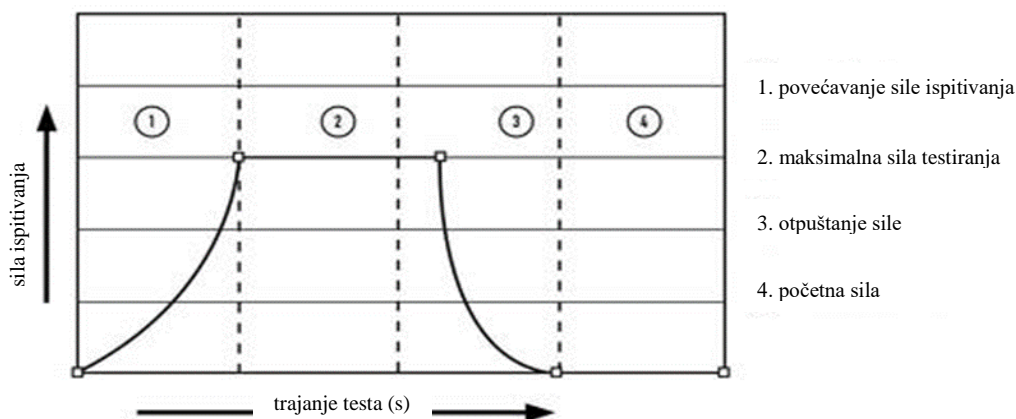
Kod iskazivanja rezultata ispitivanja tvrdoće za metalne materijale koriste se bezdimenzijske vrijednosti. Kod metoda mjerenja površine otiska, tvrdoća se izražava kao omjer upotrijebljene sile i površine koju je na ispitivanom materijalu ostavio indenter, pri ispitivanju Rockwell metodom mjeri se dubina prodiranja indentora, kod dinamičkih metoda vrijednosti tvrdoće određuju se na osnovu gubitka energije ispitnog tijela, kod ultrazvučnih ispitivanja osnova za procjenu tvrdoće je promjena frekvencije. Uporaba različitih metoda za ispitivanje tvrdoće je zbog nemogućnosti bilo koje od njih da provodi ispitivanja na svim materijalima. Postoje bitne razlike u ispitivanju tvrdoće polimera, metalnih materijala, keramika.

3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

3.1. Statičke metode

Osnovni razlog podjele na statičke i dinamičke metode ispitivanja tvrdoće jest u načinu djelovanja ispitne sile. Kod ispitivanja tvrdoće najčešće su u praksi koriste statičke metode, a posebno Brinell, Vickers i Rockwell metode koje su i standardizirane. Statičkim metodama ispituje se tvrdoća na svim razinama. Pažnja se mora posvetiti i stanju okoline, odnosno vlazi, temperaturi, antivibracijskoj i zvučnoj izolaciji, a ovisno od metode i razine ispitivanja [4].

Statičkim metodama ispitivanja tvrdoće smatraju se one kod kojih je utiskivanje indentora vrši nekom određenom silom, bez trzaja, te se ta postignuta sila primjenjuje određeno vrijeme, vidljivo na dijagramu sa slike 4, uobičajeno 10-15 s, ovisno od metode i materijala. Djelovanje sile mora biti u smjeru normale u odnosu na podlogu na kojoj se nalazi uzorak. Obzirom na postupak izvođenja ispitivanja kod statičkih metoda, postoji problem da se sila ispitivanja



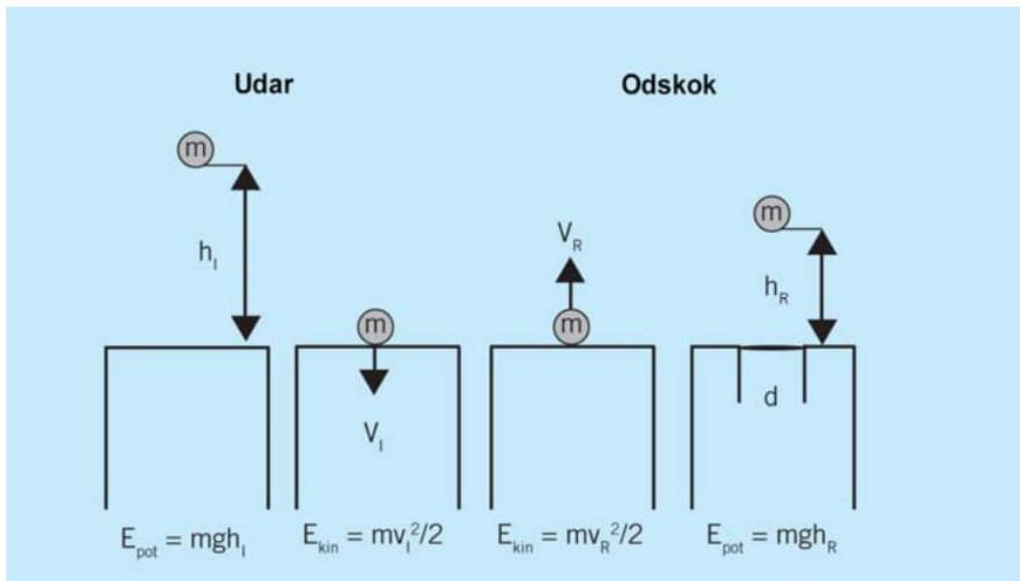
Slika 4. Dijagram djelovanja sile pri ispitivanju tvrdoće statičkim metodama [10]

održava konstantnom. Zbog toga je većina statičkih ispitivanja optimizirana za ispitivanja u laboratorijima. Moguće su varijante ispitivanja sa prijenosnim uređajima, ali se tada mora osigurati dobro namještanje i stezanje uređaja na sam ispitivani uzorak [4].

3.2. Dinamičke metode ispitivanja tvrdoće

Kod dinamičkih metoda ispitivanja tvrdoće, ispitno tijelo udara nekom određenom kinetičkom energijom o površinu ispitnog uzorka. Ispitivanje tvrdoće izvodi se padom, udarom ili elastičnim odskokom. Određivanje tvrdoće izvodi se iz otiska kojeg ostavi ispitno tijelo (ispitivanje padom ili udarom) ili promjenom kinetičke energije (udar, elastični odskok), slika 5, a očituje se kao promjena brzine pri povratu ili visina odskoka. Dobivene vrijednosti tvrdoće uspoređuju se putem etalona, izražavaju u HRC ili HV pomoću baždarenih skala ili imaju vlastite skale (Leeb) [2,4].

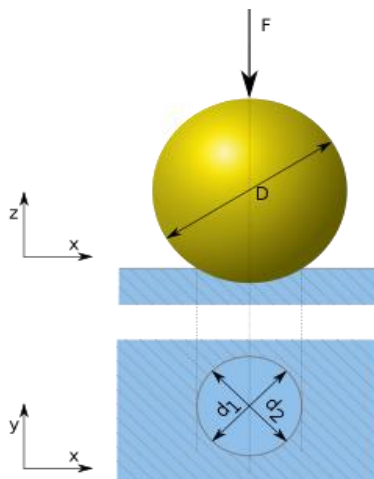
Sve dinamičke metode znatno ovise o visini pada, masi utega, veličine ispitnog komada (zbog mogućih vibracija) i kvalitete površine. Rezultati dobiveni ovim postupcima stoga mogu znatno varirati, te biti nepouzdana.



Slika 5. Shema postupka ispitivanja tvrdoće metodom odskoka [2]

3.3. Ispitivanje tvrdoće po Brinell-u

Godine 1900. J.A. Brinell predstavio je postupak ispitivanja tvrdoće prema kojem se tvrdoća definira kao omjer sile kojom se u ispitivani materijal utiskuje kuglica određenog promjera i površine nastalog otiska u materijalu, shematski prikazano na slici 6. Tvrdoća po Brinellu označava se kraticom HB. Na točnost rezultata utječe primijenjena sila utiskivanja,

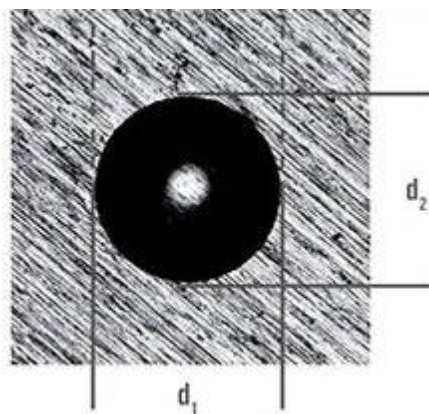


Slika 6. Shematski prikaz ispitivanja po Brinell-u [5]

promjer kuglice i točnost očitavanja dimenzija otiska. Promjer kuglice D ovisi pak o sili i debljini materijala [4].

Nakon rasterećenja kuglice, potrebno je pomoću povećala s mikrometrom ili pomoću ravnala očitati promjere otiska u dva smjera, d_1 i d_2 , prikazano na slici 7, te srednju vrijednost ovih mjerenja uvrstiti u formulu (1) za vrijednost tvrdoće po Brinell-u:

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



Slika 7. Način mjerenja promjera otiska u dva smjera kod ispitivanja Brinell metodom [7]

Prilikom ispitivanja potrebno je voditi računa da se kuglica ne utisne preduboko (moguće prevelika sila, premala kuglica ili premala tvrdoća ispitivanog materijala) ili pak da otisak nije premali (premala sila, prevelika kuglica ili pretvrđi materijal). Omjer dijagonale otiska i dijagonale kuglice, d/D , mora biti u granicama 0,24-0,6 da bi se ispitivanje smatralo ispravno provedenim [4,7].

Ovisno od upotrijebljene kuglice, tvrdoća po Brinellu nosi oznake:

- HBS – kod ispitivanja korištena kuglica od kaljenog čelika (izvan upotrebe)
- HBW – kod ispitivanja korištena kuglica od tvrdog metala (volframov karbid)

Pri izražavanju vrijednosti tvrdoće ispred oznake metode navodi se utvrđena brojčana vrijednost, iza oznake navode se promjer kuglice D , mm, masa u kilogramima koja je proizvela silu utiskivanja te vrijeme utiskivanja t , s:

Primjer: 185 HBW 5/250/15

Sila utiskivanja mora se povećavati postupno, bez trzaja. Trajanje povećanja sile do njene najveće vrijednosti iznosi 15 s, a vrijeme trajanja punog opterećenja iznosi za vrlo tvrde materijale 10-15 s, za aluminij i legure aluminija 30 s, a za magnezij i legure magnezija 120 s [4].

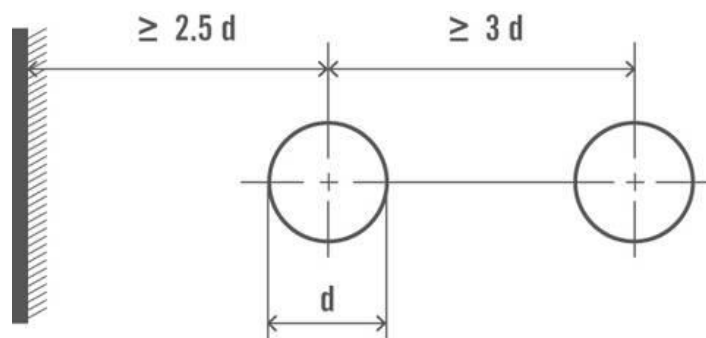


Slika 8. Indentori kuglice različitih veličina za ispitivanje po Brinell-u [5]

Promjeri kuglica koje se koriste su 1, 2, 2.5, 5 i 10 mm (slika 8), a sile utiskivanja od 49,05 do 29420 N. Pri odabiru sile i promjera kuglice mora se poštivati vrijednost stupnja opterećenja $X = F/D^2$, a koja je ovisi o materijalu. Za čelik, sivi lijev, Ti-legure i Ni-Co legure ta konstanta iznosi 30 [4].

Tvrdoća je ovisna o opterećenju pa je potrebno odrediti odgovarajuću silu, odnosno za tvrdi materijal potrebno je primijeniti veće opterećenje. Otisci su relativno veliki, što omogućuje lakše mjerenje i mjerenje tvrdoće heterogenih materijala npr. ljevova na bazi željeza, no to narušava estetiku površine ali i funkcionalnost ako se tvrdoća ispituje na samom proizvodu. Brinell metoda ima ograničenja u vidu ograničenog područja mjerenja. Ono iznosi do 450 HB pri korištenju čelične kuglice, te do 650 HB kod korištenja kuglice od tvrdog metala [4,5,6].

Ispitivanje ovom metodom je relativno jednostavno, priprema površine osim čišćenja zahtjeva tek grubo brušenje, najjeftinija je statička metoda, najmanje je osjetljiva na hrapavost površine zbog primjene velikih sila. Debljina materijala koji se ispituje mora biti 8 puta veća od dubine otiska kako bi se rezultati smatrali relevantnima. Također se mora poštivati razmak između dva otiska koji mora iznositi $3d$, a od ruba mora biti odmaknuto minimalno za $2,5d$, kako je prikazano na slici 9 [4].



Slika 9. Zahtjevi za minimalnim razmacima između otisaka i udaljenosti od ruba na uzorku pri ispitivanju Brinell metodom [7]

Tvrdoća po Brinell-u je u gotovo linearnoj ovisnosti o čvrstoći mnogih žilavih materijala. Ovo svojstvo poglavito vrijedi za čelike, pa postoje i tablice pomoću kojih je vrlo lako odrediti čvrstoću određenog čelika. Za preciznije određivanje potrebno je poznavati odnos granice elastičnosti R_e i vlačne čvrstoće R_m . Općenito vrijedi izraz:

$$R_m = k * HB \text{ [MPa]} \quad (2),$$

gdje koeficijent k iznosi $3,4 - 3,6$ za čelik. Ovaj način određivanja čvrstoće se u praksi često koristi jer je određivanje tvrdoće jednostavnije, no treba ipak uzeti u obzir da su ovo orijentacijske vrijednosti i mogu se razlikovati od stvarnih [4].

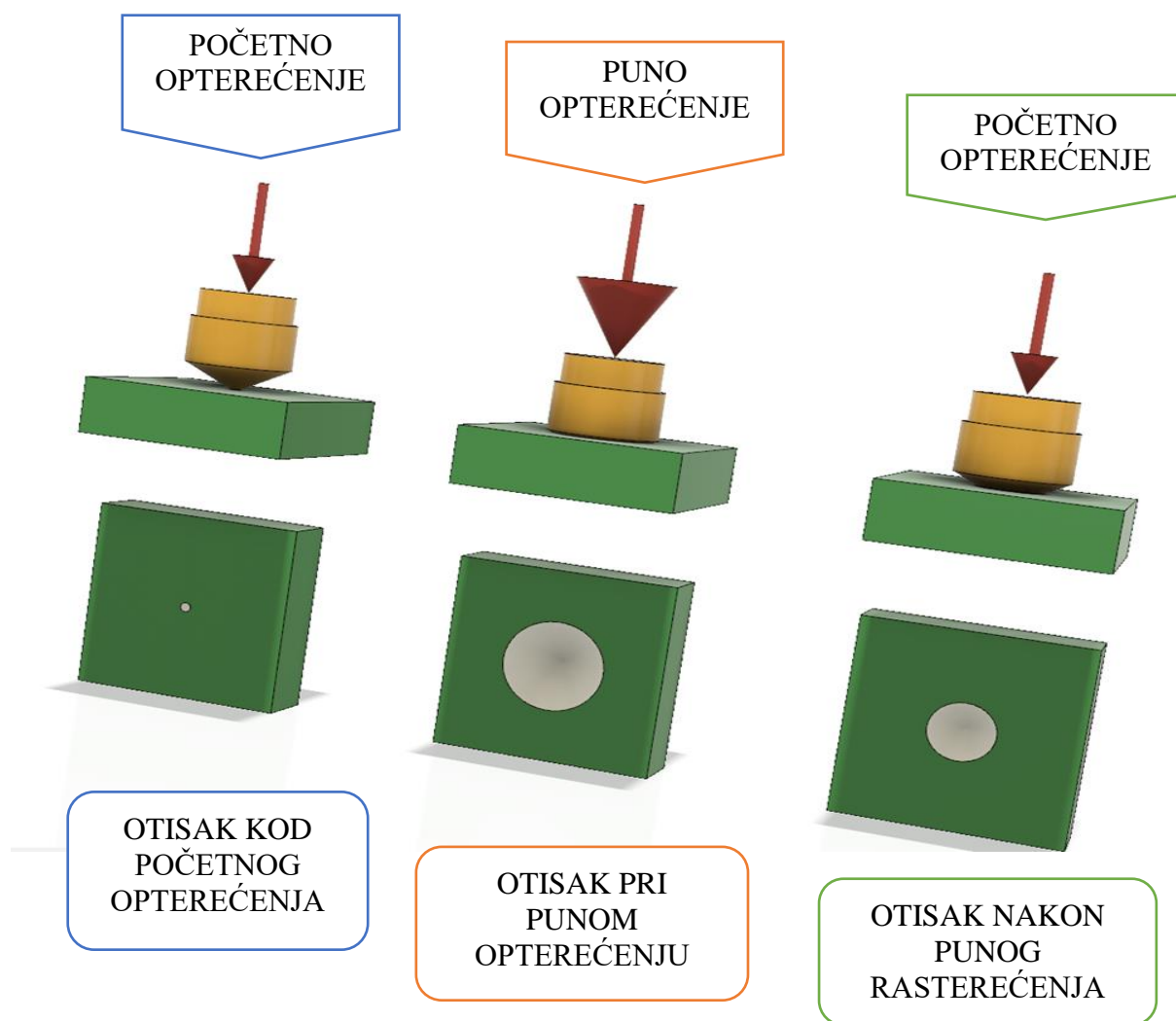
Kod metode Meyer (oznaka H), postupak ispitivanja je isti kao i kod Brinell-a, ali je razlika što se za izračun tvrdoće uzima površina projekcije otiska. Stoga su vrijednosti za H uvijek nešto veće nego za HB, a razlika se povećava što je otisak veće dubine. Tvrdoća H je stoga točnija vrijednost, ne ovisi o opterećenju kao HB, ali se u praksi daleko više koristi tvrdoća HB [4].

Prednosti Brinell-ove metode je jednostavna priprema uzoraka (može se koristiti na površinama odljevaka), lako se mjeri promjer otiska. Nedostatci su ograničenje mjerenja tvrdoće do 650 HB (ne mogu se ispitivati kaljeni čelici), ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili, prema stupnju opterećenja X potrebno je odabrati odgovarajuću silu, nakon mjerenja ostaje veliki otisak [5,6]. Ispitivanje Brinell metodom najčešće se koristi za željezne lijevove, poglavito zbog heterogene strukture na koju je Brinell metoda najmanje osjetljiva.

3.4. Ispitivanje tvrdoće po Rockwell-ovoj metodi

Kod mjerenja promjera otiska mogu nastati greške zbog neravne površine. Da bi se izbjegle takve pogreške, 1920.g. predstavljena je statička metoda koja koristi dijamanti stožac ili kuglicu, a kod koje se ne mjeri površina otiska već dubina prodiranja indentora. Indentor je dijamantni stožac s vršnim kutom 120° , kuglica od zakaljenog čelika ili tvrdog metala (volframovog karbida). Vrijednosti tvrdoće očitavaju se neposredno na skali tvrdomjera.

Postupak ispitivanja sastoji se od tri faze. Prvo se utiskuje predopterećenje od 98,1 N. Ovim se predopterećenjem uklanjaju moguće greške i neravnine na površini uzorka. Dubina prodiranja tom početnom silom predstavlja početni položaj indentora, h_1 . Nakon toga slijedi opterećenje glavnom silom (490,3 N; 882,6 N; 1372,9 N), porast opterećenja u vremenu od 1-8 s, kako bi se dobila ukupna sila opterećenja. Trajanje ukupnog opterećenja je između 2 i 6 s. Nakon popuštanja dodatnog opterećenja, indentor se vraća u neki položaj h_2 (ne početni, jer je nastala plastična deformacija materijala zbog djelovanja sile), no početno opterećenje je još uvijek prisutno kako bi se izbjegle pogreške zbog elastične deformacije materijala. Cijeli postupak ispitivanja traje oko 10 s, a shematski je prikazan na slici 10 [5,7].



Slika 10. Shematski prikaz postupka ispitivanja tvrdoće Rockwell metodom

Maksimalna dubina prodiranja h stošca je 0,2 mm i to je područje podijeljeno na 100 dijelova. Kod kuglice je maksimalna dubina prodiranja 0,26 mm i podijeljena je na 130 dijelova. Kao mjera tvrdoće kod Rockwell metode uzima se razlika dubina penetracije između početnog h_1 i položaja h_2 , podijeljena sa skalom od 0,002 mm i oduzeto od konstante 100 (za dijamanti stožac), odnosno 130 (čeličnu kuglicu) [4,5,6].

Oblik vrha i radijus indentora imaju značajan utjecaj na rezultate ispitivanja. Zbog toga kut konusa smije odstupati za $\pm 0,5^\circ$, a profil vrha konusa ne smije odstupati za više od 0,002 mm od teoretskog profila [4].

Indentori, predopterećenja, opterećenja i mjerne jedinice standardizirane unutar Rockwell metode dijele se u dvije skupine: standardna metoda i površinska metoda.

Kod standardne Rockwell metode predopterećenje uvijek iznosi 98,1 N a glavne sile 490,3N , 882,6 N ili 1372,9 N. Iza oznake HR nalazi se slovo koje označava kojim indentorom je provedeno ispitivanje i koje su sile korištene. U tablici 2. je prikazan popis svih oznaka sa pripadajućim ukupnim silama, vrstom te veličinom indentora. Obojeni simboli označavaju najčešće korištene postupke kod Rockwell metode [10].

Tablica 2. Popis oznaka, sila i indentora pri ispitivanju standardnim Rockwell metodama [10]

Indentor	HR Skala				
	Dijamant	Kuglica 1/16"	Kuglica 1/8"	Kuglica 1/4 "	Kuglica 1/2 "
F=1471 N	C	G	K	P	V
F=980.7N	D	B	E	M	S
F=588.4N	A	F	H	L	R

Ispitno područje tvrdoće za stožac je 20-80 HRC, a za kuglicu 35-100 HRB. Izvan tog područja rezultati nisu pouzdani. Ispitivanja stošcem HRC provode se najčešće za toplinski obrađeni čelike, a kuglica HRB za normalizirane čelike, Cu-legure, Al-legure [4,7,10].

Postoji i površinska Rockwell metoda ili Super Rockwell (naziv koji se koristi u SAD-u). Početna sila iznosi 29,42 N a glavne sile kojima se opterećuje indentor iznose 117,7 N, 264,8 N i 411,9 N. Podjela mjerne skale iznosi 0,001 mm. Oznaka je HR uz dodanu oznaku sile (masa u kg koja je uzrokovala silu) i indentora (N,TW,WW,XW,YW). Skale ispitivanja po površinskoj metodi Rockwell prikazane su u tablici 3 [10].

Za ispitivanje površinskim Rockwell metodama koriste se isti indentori, ali izrađeni preciznije, odnosno manje su tolerancije oblika i vršnog radijusa. Uz primjenu manjih sila od standardnog postupka, omogućeno je ispitivanje tanjih materijala i slojeva [10].

Tablica 3. Skale tvrdoće za površinsku Rockwell metodu [10]

Indentor	Dijamant	Kuglica 1/16''	Kuglica 1/8'' *	Kuglica 1/4'' *	Kuglica 1/2'' *
F=441,3 N	45 N	45 T	45 W	45 X	45 Y
F=294,2 N	30 N	30 T	30 W	30 X	30 Y
F=147.1 N	15 N	15 T	15 W	15 X	15 Y

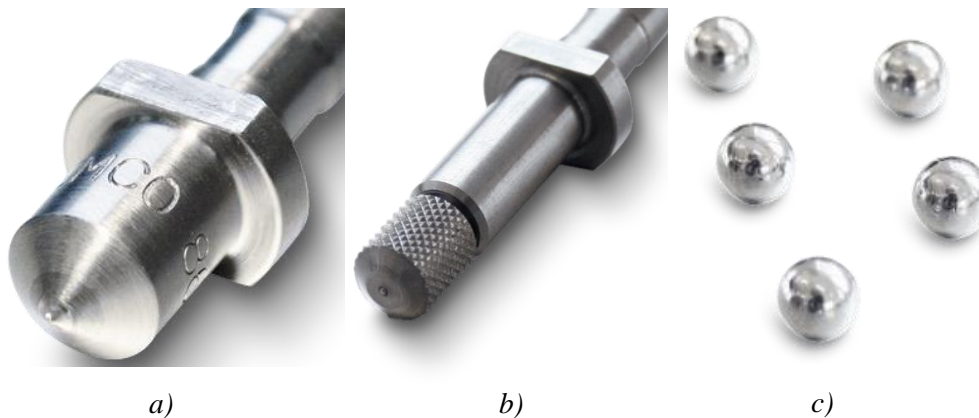
Primjer označavanje tvrdoće za ispitivanja po Rockwell metodi:

59 HRC – tvrdoća 59, ispitivano stošcem, sila od 1471 N

60 HR30TW – tvrdoća 60, ispitivano kuglicom od tvrdog metala promjera 1/16", silom od 294,2 N (oznaka W dodaje se sukladno normi ISO 6508 od 03/2015 pa je u starijim oznakama nema, označava kuglicu od tvrdog metala) [10]

Postupak ispitivanja Rockwell metodom je brži u odnosu na ostale statičke metode, očitavanje je neposredno na skali uređaja, nije potrebno dodatno mjerenje otiska ni oprema za povećanje, otisci su manje dubine pa se manje oštećuje uzorak. Zbog predopterećenja, dovoljna je tek osnovna priprema površine (grubo brušenje) što još pojednostavljuje postupak. Često se koristi i u pogonu za provjeru kvalitete toplinske obrade jer je tvrdoću moguće mjeriti i na gotovim proizvodima [7,10].

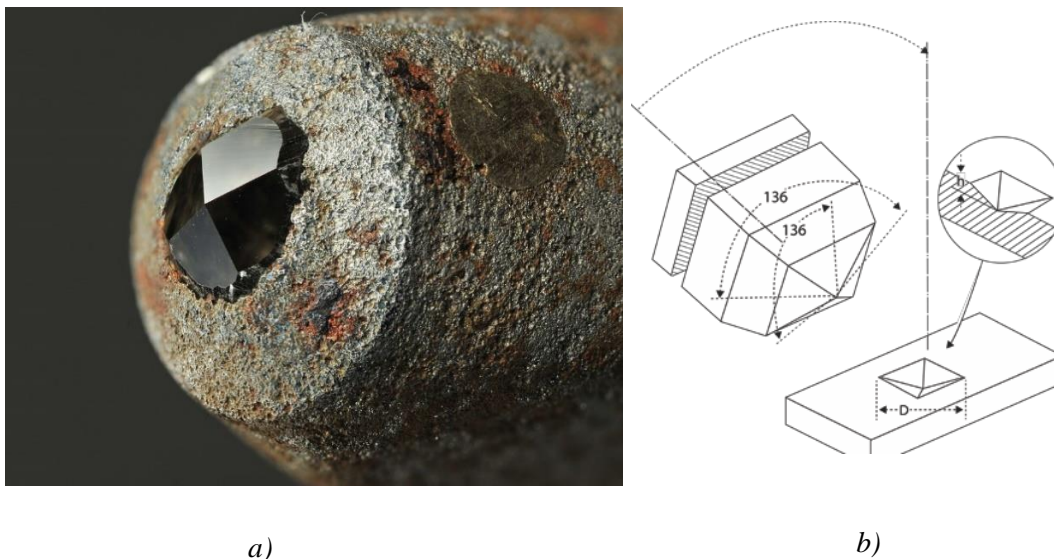
Pogreška mjerenja ove metode iznosi ± 2 HRC/HRB, te je veće nego kod ostalih metoda. Ispitivanje Rockwell metodom može se provoditi na stacionarnim, ali i na prijenosnim uređajima. Nekoliko indentora za ispitivanje Rockwell metodom prikazano je na slici 11.



Slika 11. Indentori za standardnu Rockwell metodu, a) konični indenter, b) držač kuglica, c) karbidne kuglice [7]

3.5. Ispitivanje tvrdoće po Vickers-u

Nedostatke Brinell-ove metode pokušali su riješiti iz tvrtke Vickers 1925.g. Princip Vickers-ove metode ispitivanja jednak je onom kod Brinell metode. U površinu ispitnog uzorka utiskuje se indentor te se mjere dijagonale otiska. Razlika je u indentoru, a koristi se četverostrana dijamantna piramida sa kutom između stranica od 136° , prikazano na slici 12. Ovaj kut je odabran kako bi se zadovoljio odnos dijagonale otiska i dijagonale kuglice za ispitivanje kod Brinell metode, odnosno u ovom slučaju d/D iznosi 0,375. Odabirom oblika indentora uklonjen je nedostatak prethodne metode, odnosno ovisnost primijenjene sile i dubine otiska na vrijednost izmjerene tvrdoće. Odabirom dijamanta kao materijala uklonjen je nedostatak Brinell-ove metode mjerenja samo relativno mekih materijala, odnosno moguće je mjeriti i najtvrdje materijale. Tvrdoća se i ovdje izražava kao odnos primijenjene sile i površine otiska. Za tvrdoće do 450, skale Brinell (HB) i Vickers (HV) su linearno zavisne, iznad tih vrijednosti potrebno je koristiti tablice. Metodom Vickers teoretski je moguće mjeriti vrijednosti do tvrdoće dijamanta odnosno 10000 HV, no prema standardima u upotrebi su rezultati vrijednosti tvrdoće do 3000 HV [4].

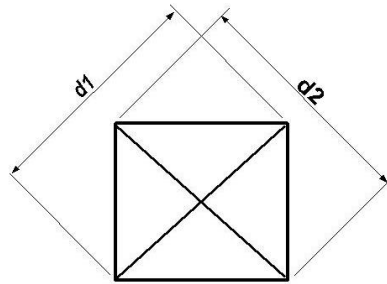


Slika 12. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od 136° b) shema geometrije indentora [9]

Tvrdoća po Vickers-u definira se kao omjer primijenjene sile na indentor i površine nastalog otiska:

$$HV = 0,102 * \frac{2 * F * \sin \frac{136}{2}}{d^2} \quad (3)$$

Mjerenje dijagonala otiska (slika 13) obavlja se pomoću povećala/mikroskopa sa ugrađenim mikrometrom, a sve više su u upotrebi i uređaji sa ugrađenim kamerama koje sliku otiska prikazuju na ekranu i pomažu u izračunu vrijednosti tvrdoće. Mjere se obje dijagonale i računa srednja vrijednost [4,7].



Slika 13. Način mjerenja otiska kod Vickers metode [10]

Za ispitivanje Vickers metodom zahtijeva se polirana površina, bez obzira na vrijednost opterećenja prilikom ispitivanja. Nedostatak u odnosu na Brinell metodu je upravo priprema površine koja ima veliki utjecaj na rezultate ispitivanja. Osim toga, vrlo precizno mora biti i obrađena dijamantna piramida (polirana, bez površinskih grešaka). Svi vrhovi piramide moraju se sjeći u jednoj točki uz odstupanje do 0,002 mm. Debljina ispitivanog uzorka prema normi ISO 6507 mora biti najmanje 1,2 d za čelik i 1,5 d za obojene metale, dok prema normi ASTM E384 mora iznositi najmanje 10 puta dubina indentacije [4,7].

Primijenjene sile su u rasponu od 98 mN do 980,7 N. U tablici 4 prikazan je raspon ispitivanja tvrdoće po Vickers-u s pripadajućim silama i vrijednostima tvrdoće. Primjena ove metode je prvenstveno u laboratorijskim uvjetima te u pogonima gdje se mogu postići kontrolirani uvjeti, dok za terenska ispitivanja nije prikladna [6,10].

Indentor se u uzorak utiskuje određenom silom bez trzaja. Trajanje opterećenja je 10-15 s. Ukoliko se primjenjuje dulje trajanje opterećenja (npr. 30 s), vrijeme utiskivanja se navodi pored dobivene vrijednosti tvrdoće.

Primjer označavanja tvrdoće po Vickers-u ima sljedeći oblik, numerička vrijednost ispred oznake je izmjerena tvrdoća, iza oznake se navodi masa u kg koja je proizvela silu ispitivanja te vrijeme trajanja punog opterećenja (navodi se samo ako je različito od 15 s)

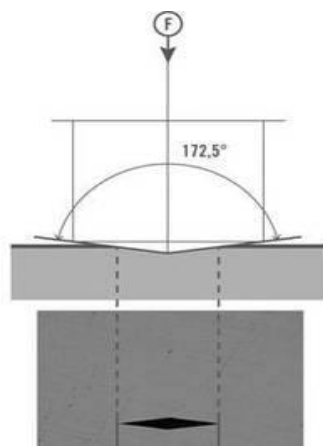
Primjer: 210 HV 30/30

Tablica 4. Prikaz područja ispitivanja Vickers-ovom metodom [7]

Područje ispitivanja	METODA	indentor	Sila ispitivanja [N]	primjena	
nanotvrdoća	HV 0.01	Dijamantna piramida 136°	0,098	Strukturne faze, vrlo tanki slojevi	Raspon 1-3000 HV
	HV 0.025		0,245		
	HV 0.05		0,490		
	HV 0.1		0,980		
mikrotvrdoća	HV 0.2	Dijamantna piramida 136°	1,961	Tanki slojevi, tanke metalne ploče, mali uzorci	
	HV0.3		2,942		
	HV 0.5		4,903		
	HV 1		9,807		
	HV 2		19,61		
	HV 3		29,42		
makrotvrdoća	HV 5	Dijamantna piramida 136°	49,03	Normalni uzorci	
	HV 10		98,07		
	HV 20		196,1		
	HV 30		294,2		
	HV 50		490,3		
	HV 100		980,7		

3.6. Ispitivanje tvrdoće po Knoop metodi

Knoop metoda razvijena kao alternativa Vickers metodi, a namijenjena je ispitivanju tvrdoće tankih i krhkih materijala, u području mikrotvrdoće. Kao indenter koristi se dijamantna piramida, ali koja ima bazu u obliku romba, kutovi nasuprotnih stranica su $172,5^\circ$ i 130° , prikazano na slici 14. Zbog toga je otisak manje dubine, odnosno iznosi tek 1/30 dulje



Slika 14. Geometrijski parametri indentora za metodu ispitivanja po Knoop-u [7]

dijagonale. Kako su otisci vrlo male dubine zbog primjene malih sila, potrebno je osigurati ispitivanje bez pojave vibracija ili udaraca, a koji bi mogli bitno utjecati na rezultata ispitivanja. Temperatura i stanje okoline moraju biti normalne [5,6,7].

Izmjerene vrijednosti tvrdoće po Knoop-u (HK) su približno ekvivalentne sa Vickersovim vrijednostima. Vrijeme povećavanje sile do ispitne vrijednosti je od 2 do 8 s, a preporučeno zadržavanje te sile je u vremenu od 10 - 15 s. Kod označavanja tvrdoće po Knoop-u, nakon numeričke vrijednosti i oznake tvrdoće navodi se masa u kg koja je proizvela silu ispitivanja, te vrijeme opterećenja ako je različito od preporučenog.

Primjer: 750 HK 1/30

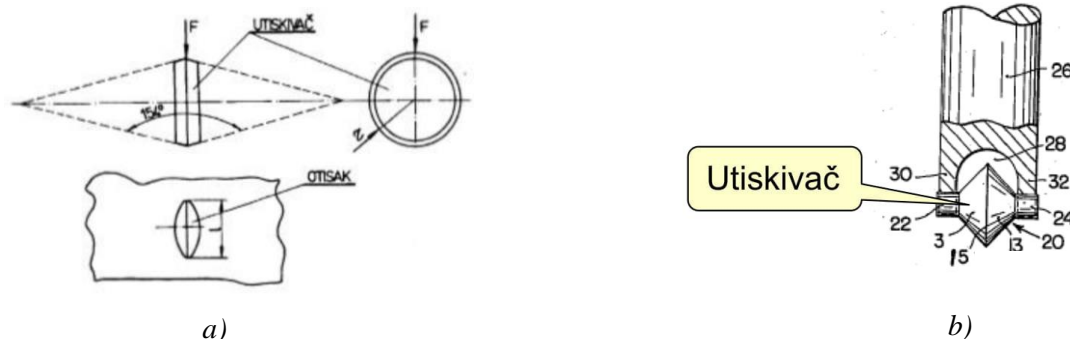
Knoop metoda je preciznija od Vickers metode, otisci su manje dubine pa je i manja šteta na površini uzorka, a primjenjuje se na materijalima na kojima ostale metode ne daju dovoljno dobre rezultate (staklo, keramika, aluminijska folija). Kod Vickers metode, indenter može lako izazvati pukotine oko otiska, dok je ta pojava kod Knoop metode znatno smanjena zbog geometrije indentora [7].

Primijenjene sile kod Knoop metode su u rasponu od 98 mN do 19,6 N. Ispitno područje iznosi između 100 i 1000 HK, unutar kojeg se rezultati smatraju prihvatljivima [7].

Priprema površine mora biti vrlo dobra, uzorak mora biti poliran. Relativno spora metoda (30-60 s), potrebna oprema za očitavanje otiska (mjerni mikroskop, točnost očitavanja $0,5 \mu\text{m}$), mora se osigurati dobar prihvat vrlo tankih ili uskih uzoraka te ukloniti bilo kakve vibracije [7].

3.7. Ispitivanje tvrdoće Grozdinski metodom

Sam princip metode je isti kao i kod Vickers i Knoop metode, razlika je indentoru. On je oblika dvije spojene kupole na mjestu šire baze, prikazano na slici 15. Vrijednost tvrdoće je omjer sile i površine otiska, a ispitivanja se u području mikrotvrdoće. Zbog oblika indentora



Slika 15. Prikaz otiska (a) i indentora (b) za ispitivanje tvrdoće po Grozdinskom [9]

otisak je zaobljen i vrlo je plitak (dubina h iznosi otprilike $1/80$ duže osi otiska) pa se mogu ispitivati još tanji uzorci nego kod Knoop metode. Zaobljeni indentor je vrlo otporan na lom, a njegovim zakretanjem mu se produžuje vijek trajanja [6,9].

3.8. Ispitivanje tvrdoće Shore metodom

Ispitivanje Shore-ov metodom uključuju i dinamičke i statičke varijante ispitivanja. Ranije varijante metode zasnivale su se na principu odskoka probijača nakon njegova ispuštanja s visine 254 mm. Današnji uređaji koriste različite indentore i sile (ukupno 12 varijanti) a koji direktno mjere dubinu penetracije. Princip mjerenja zasniva se na penetraciji indentora koji se prvo optereti početnom silom. Nakon toga se putem opruge naglo poveća opterećenje do ispitnog i utiskuje u uzorak. Trajanje opterećenja može biti trenutno ili neko određeno vrijeme, ovisno o materijalu ispitivanja. Primijenjene ukupne sile su 9,81 ili 49 N, a sama sila na opruzi je u rasponu od 0,764 do 44,5 N. Maksimalna dubina je određena (1,25, 2,5 ili 5 mm) te je podijeljena na 100 dijelova. Rezultat penetracije oduzima se od maksimalne dubine i ta vrijednost je tvrdoća po Shore-u (Shore). Tvrdoća je veća što je prodiranje manje. Mjerna područja su, ovisno o varijanti, 10-90 Shore. Označavanje tvrdoće je u obliku:

Primjer: 60 Shore D 10

gdje je brojčana vrijednost prije oznake tvrdoća, a iza oznake je varijanta po kojoj je ispitivano te vrijeme djelovanja sile ako je ono različito od preporučenog.

Primjena ove metode je za polimerne materijale te viskoelastične materijale i nije za primjenu kod metalnih i tvrdih materijala. Uređaji za mjerenje su sa ugrađenom skalom, jeftini su, mjerenja su brza (1-12 s), pouzdanost mjerenja je teško provjeriti drugim metodama zbog prirode samih materijala ispitivanja [4].

3.9. Ispitivanje tvrdoće UCI metodom



Slika 16. Nekoliko veličina sondi za UCI metodu, razlikuju se ispitnom silom [2]

UCI metoda je relativno nov način (u posljednjih 50-tak godina) mjerenja tvrdoće, a koristi se prednostima već ranije razvijenih ultrazvučnih uređaja. Za razliku od klasičnih ultrazvučnih ispitivanja gdje se pojavljuje odziv odnosno odbijanje zvučnog vala ili njegovo skretanje, kod UCI metode mjerenje se temelji na promjeni frekvencije titranja same sonde. Neki od uređaja za ispitivanje UCI metodom prikazani su na slici 16.

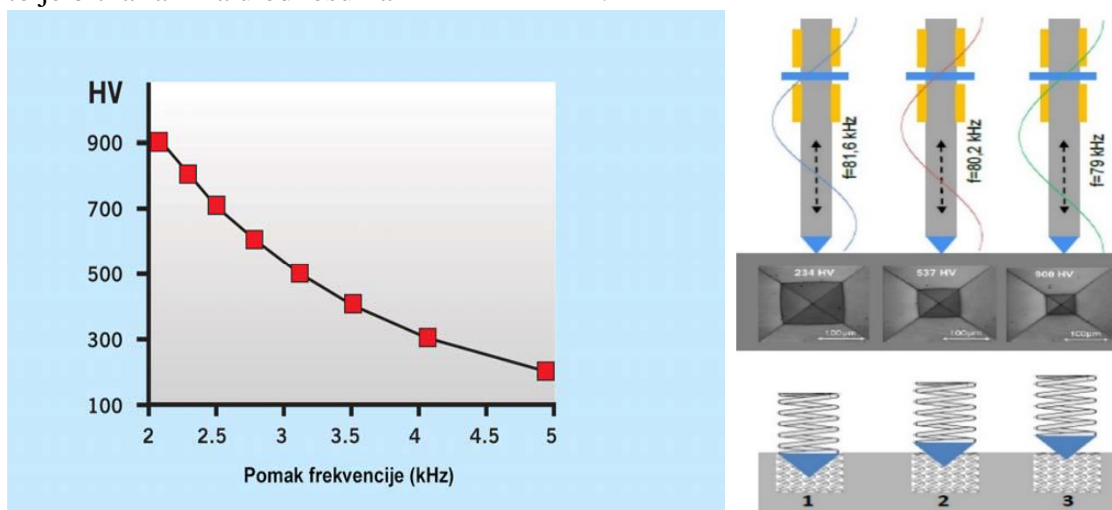
Slika 17 shematski prikazuje sondu za mjerenje UCI metodom i njezine glavne dijelove. Kao osnova služi Vickers-ova dijamantna piramida koja je pričvršćena na oscilirajuću šipku, a iznad nje smješten je Piezo-električni pretvarač. Piezo-električni pretvarač služi za generiranje



Slika 17. Shematski prikaz sonde za mjerenje UCI metodom [2]

radne frekvencije od oko 70 kHz. Kako je povezan za šipkom, i sama šipka oscilira tom frekvencijom u longitudinalnom smjeru. Na vrhu te šipke nalazi se pričvršćen dijamant koji se približava površini ispitnog materijala. Kada se ostvari kontakt, dolazi do vezanja atoma materijala i dijamanta, a oscilacije se prenose i na ispitivani materijal, no na atomskoj razini. S vezanjem atoma, masa šipke koja oscilira se povećava, jer sada titraju i atomi ispitivanog materijala. Povećanjem mase šipke ona više ne može oscilirati istom frekvencijom kao kada nije bila u kontaktu. Dolazi do smanjenja frekvencije, a ono je veće što je masa šipke više povećana. Što je materijal tvrdi, jače su i veze između atoma, pa će posljedično tome, dijamant ne može penetrirati duboko, već je u kontaktu sa manjim brojem atoma, odnosno masa nije mnogo povećana. Smanjenje frekvencije biti će manje u odnosu na mekani materijal kod kojeg penetrator ulazi dublje. Za materijale niže tvrdoće broj atoma koji osciliraju biti će veći, vezana masa veća i veće smanjenje frekvencije (slika 18). To smanjenje frekvencije naziva se i pomak frekvencije [2].

Pomak frekvencije f proporcionalan je veličini ispitnog otiska koji ostavlja dijamant. U ovom se slučaju dijagonale otiska ne utvrđuju optički, već se mjerenje obavlja elektronički i to mjerenjem pomaka frekvencije. Za ovakav postupak dovoljno je tek nekoliko sekundi (1-5 s), to je bitna razlika u odnosu na statičke metode.



Slika 18. Pomak frekvencije u odnosu na tvrdoću ispitivanog materijala [2]

Pomak frekvencije funkcija je od površine (područja) otiska A i efektivnog modula elastičnosti E_{ef} te sile kojom sonda djeluje na ispitni materijal

$$\Delta f = f(E_{ef}, A, F) \quad (4)$$

pa se prije mjerenja mora kalibrirati uređaj za određeni materijal, nakon čega se mogu provoditi mjerenja za sve materijale koji imaju tu vrijednost E_{ef} .

Kako bi ispitivanja bila što preciznija, potrebno je povećati penetraciju sonde u materijal, no tada dolazi do znatnijeg oštećenja površine, a ne mogu se više ni ispitivati tanki materijali. Kod UCI metode koriste se različite sonde koje ostvaruju unaprijed zadanu silu djelovanja na materijal (slika 16). Sile kojom djeluju su u rasponu od 0,3 N do 98 N.

Ove izuzetno male sile pogodne su za mjerenje mikrotvrdoće, no kod njih je i promjena frekvencije neznatna pa je potreban vrlo osjetljiv indikator za što točnije mjerenje. Svaka od ovih sonda ima svoju namjenu pa se najčešće isporučuju kao komplet uz uređaje.



Slika 19. Ispitivanje UCI metodom na poliranim površinama [2]

Zbog izuzetno malih sila, posljedično i malih otisaka, mogu ispitivati i polirane površine gotovih proizvoda (slika 19), vrlo tanki materijali (čelični limovi od 1 mm debljine)(slika 20), te premazi.

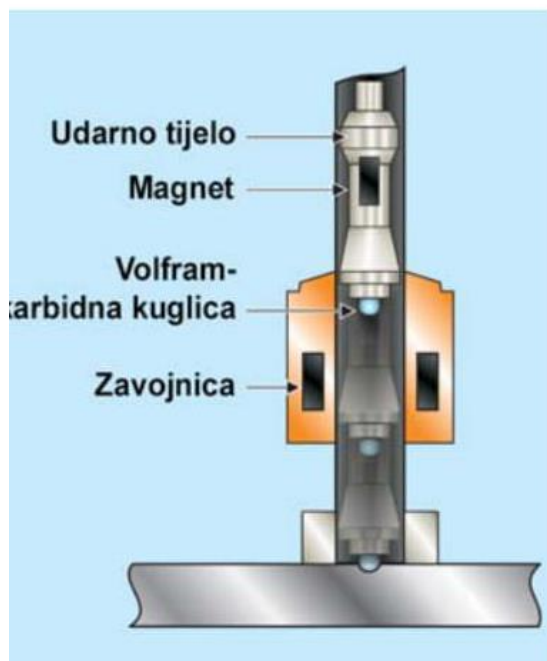


Slika 20. Ispitivanje tvrdoće tankih limova UCI metodom [11]

Njihova primjena najviše dolazi do izražaja pri mjerenju tvrdoće sitnozrnatih materijala, očvrstnutih materijala, tankih slojeva te zavarenih spojeva.

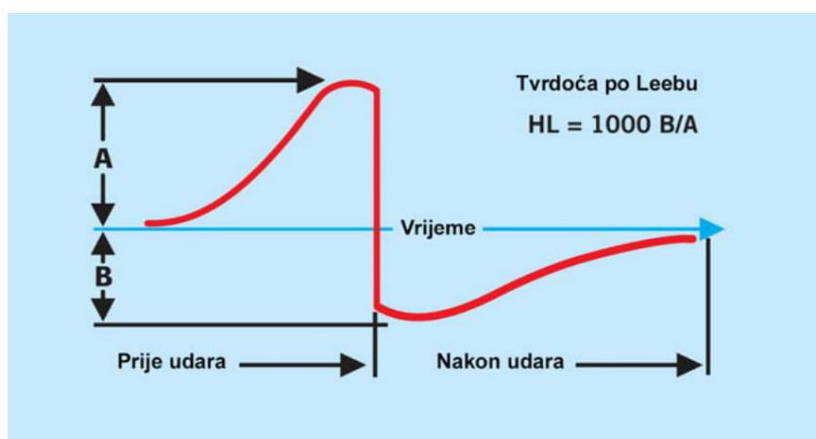
Nedostatak ove metode primjećuje se kod ispitivanja odljevaka, odnosno vrlo grube površine, gdje je svakako potrebna znatnija sila da se izbjegnu neravnine površine, ili pak zahtijeva pripremu površine. Izmjerene vrijednosti tvrdoće iskazuju se u HV, no kako su svi uređaji ovog tipa elektronski, mogu odmah prikazati i vrijednosti u HR skali.[2]

3.10. Ispitivanje tvrdoće Leeb metodom



Slika 21. Prikaz ispitne sonde za metodu odskoka [2]

Leeb metoda dinamička je metoda na principu odskoka koja se izvodi prijenosnim uređajima. Na slici 21. prikazana je ispitna sonda za metodu odskoka. Razvijena sredinom 1970-ih, koristi se i pod nazivom Equotip (standard razvijen od strane tvrtke Proceq SA). Princip mjerenja tvrdoće zasniva se na omjeru brzine udarnog tijela nakon udara i prije udara. Što je taj omjer veći, tvrdoća ispitivanog materijala je viša. Na slici 22 je prikazan dijagram



Slika 22. Princip ispitivanja tvrdoće po Leeb-u, dijagram brzina [2]

brzine udarnog tijela te izračun tvrdoće. Udarno tijelo ima određenu masu kako bi se postigla zadana kinetička energija pri udaru. Na vrhu udarnog tijela nalazi se kuglica, a koja je izrađena od tvrdog metala, dijamanta ili keramike. Promjeri kuglica, materijali i brzine prikazani su u tablici 5. Princip rada uređaja temelji se na izbacivanju udarnog tijela pomoću opruge u ispitnu površinu. Uslijed udara dio površine se plastično deformira za što je utrošena određena energija koju je udarno tijelo izgubilo. Manja kinetička energija znači i manju brzinu pri povratu (slika

22). Udarom u tijelo manje tvrdoće, gubitak brzine biti će veći, manji je omjer povratne i definirane brzine, pa je zbog toga tvrdoća niža [2,12].

Brzina prolaza mjeri se malim permanentnim magnetom koji je vezan uz udarno tijelo (slika 30.). Oko vodilica, gdje prolazi udarno tijelo, nalaze se zavojnice u kojima se prolazom magneta inducira napon koji je proporcionalan brzini. Udarno tijelo dva puta prolazi pokraj zavojnica, a kako je drugi nešto sporiji, to je i napon niži. Odnos ovih napona množi se sa 1000 i dobiva se tvrdoća po Leeb-u (HL). Tvrdoća po Leeb-u iskazuje se s vrijednosti dobivene tvrdoće, oznakom tvrdoće po Leeb-u te dodatkom slova ispitne metode.

Primjer označavanja: 450 HLG

Tablica 5. Dimenzije indentora, brzine i materijali za ispitivanje tvrdoće po Leeb-u [7]

Metoda ispitivanja	Kinetička energija udara, E_k , mJ	Udarna brzina m/s]	Povratna brzina [m/s]	odmak indentora i površine uzorka +/- 1[mm]	Masa udarnog tijela [g]	polumjer sfere kuglice [mm]	Materijal indentora	Mjerno područje
HLD	11.5	2.05	0.61 – 1.82	8.00	5.45	1.5	WC-Co	300 – 890 HLD
HLS	11.4	2.05	0.82 – 1.88	8.00	5.40	1.5	C	400 – 920 HLS
HLE	11.5	2.05	0.61 – 1.88	8.00	5.45	1.5	PCD	300 – 920 HLE
HLDL	11.95	1.82	1.11 – 1.72	8.00	7.25	1.39	WC-Co	560 – 950 HLDL
HLD+15	11.2	1.7	0.56 – 1.51	8.00	7.75	1.5	WC-Co	330 – 890 HLD+15
HLC	3.0	1.4	0.49 – 1.34	8.00	3.1	1.5	WC-Co	350 – 960 HLC
HLG	90.0	3.0	0.9 – 2.25	15.0	20.0	2.5	WC-Co	300 – 750 HLG

Metoda je pogodna za ispitivanje uzoraka veće mase i grublje površine (odljevci). Preporučuje se minimalna debljina od 15 mm, ovisno o ispitnom tijelu (metodi). Sve manje debljine moraju se ispitivati sa određenim pomagalima jer u suprotnome dolazi do oscilacija stjenke. To je problem kod ispitivanja cijevi koje imaju tanku stjenku. Zbog toga mogu ove metode biti neprikladne [2,12].

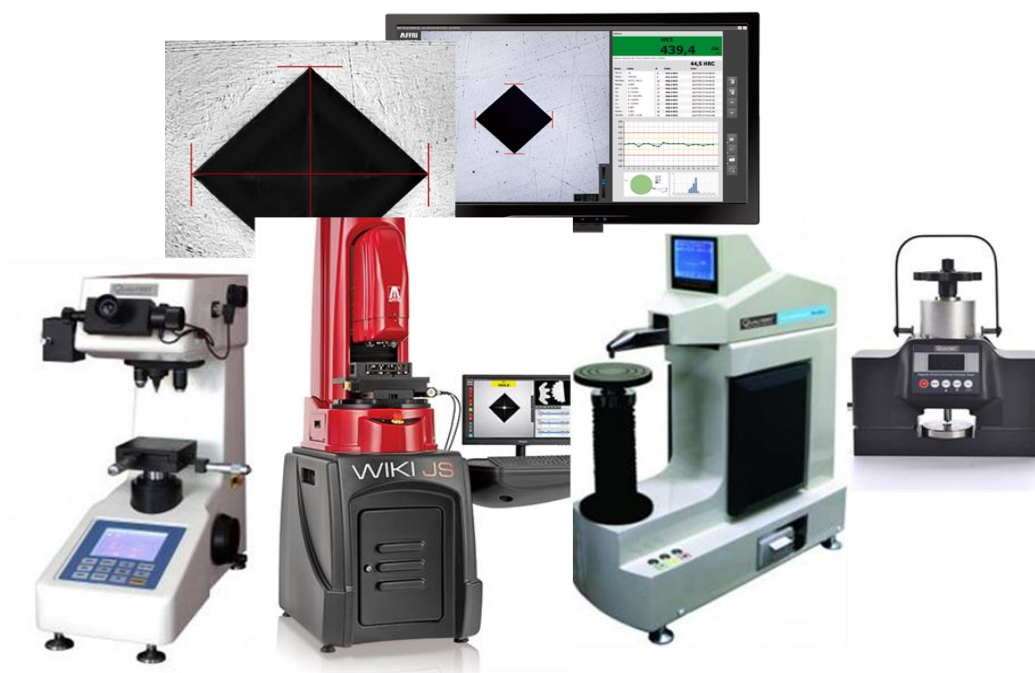
Primjena prijenosnih uređaja za mjerenje tvrdoće metodom odskoka pokazuje uzlazni trend. Radi se o uređajima sa kojima je rukovanje izuzetno jednostavno, brzo, nije potrebna zahtjevna priprema površine i lako se dohvaćaju teže dostupna mjesta. Noviji trend kod ovih uređaja jest kombiniranje nekoliko metoda ispitivanja jednim uređajem, kako bi se pokrili nedostaci jedne od korištenih metoda. Najčešće se kombiniraju metoda odskoka, UCI i prijenosna Rockwell metoda, izmjenjuju se samo sonde, prikazane na slici 23. Mjerna područja, ovisno o metodi, odnosno primijenjenoj sondi, iznose od 300-960 HL [8,12].



Slika 23. Kombinirani uređaj Proceq Equotip 550 sa različitim sondama [12]

3.11. Laboratorijske metode

Zbog načina izvođenja, mogućih pogrešaka i konstrukcije samih uređaja, spomenute metode koriste se u laboratorijima i nisu pogodne za terenska i mobilna ispitivanja. Uzorci koji se ispituju moraju biti odgovarajućih dimenzija, a time je onemogućeno ispitivanje na gotovim



Slika 24. Uređaji za laboratorijska ispitivanje tvrdoće [13]

konstrukcijama i proizvodima koji su većih gabarita. Rezultati dobiveni kod ovih ispitivanja smatraju se relevantnima, tj. najtočnijima koji se mogu dobiti. Kako bi rezultati bili što točniji, potrebno je precizno mjeriti sile utiskivanja ili dijagonale otiska. Kod ispitivanja u laboratorijima ti se uvjeti lako mogu ispuniti, dok su za pogonska ispitivanja moguća daleko veća odstupanja. Postoje iznimke, odnosno uređaji koji mogu poslužiti kao prijenosni, montiraju se i pričvršćuju na uzroke koji se ispituju. Ovakvi su uređaji masivni, a kako bi mogli lakše zadovoljiti sve uvjete ispitivanja, odnosno sile i do 30000 N, antivibracijsku i zvučnu izolaciju, imaju ugrađene precizne mikroskope. Noviji uređaji su često opremljeni i elektroničkom opremom koja služi za provođenje i kontrolu cijelog postupka, primjeri kojih su prikazani na slici 24.

3.12. Prijenosne metode

Razvoj novih uređaja za ispitivanje tvrdoće više je usmjeren prema prijenosnim uređajima. Ispitivanje na licu mjesta ima brojne prednosti. Osnovna prednost prijenosnih uređaja jest njihova prilagodljivost za ispitivanje različitih oblika i položaja uzoraka, mogu se koristiti za velike komade, nije potrebno izrezivanje uzoraka, pa se mogu ispitivati i gotove kompletne konstrukcije, odnosno najčešće područje ZUT-a. Pouzdanost dobivenih rezultata

smatra se znatno manjom od ispitivanja u laboratorijima, no njihova je velika prednost u brzini ispitivanja kao i u mogućnostima dostupnosti mjestu ispitivanja. Ali razvojem novih uređaja i pouzdanost i ponovljivost su uvelike približene laboratorijskim uređajima.

Često korišteni prijenosni uređaji, a koji rade na principu statičkog ispitivanja jesu UCI te Rockwell uređaji. UCI metoda prikladnija je za prijenosna ispitivanja u odnosu na ostale statičke metode, jer je trajanje djelovanja maksimalne ispitne sile kratko (1-3 s). No, i to je relativno dugi postupak u odnosu na dinamičke metode kod kojih ispitno tijelo udara u uzorak i odmah se odbija. Metoda odskoka prema Leeb-u je jedna od najčešće korištenih prijenosnih metoda.[2]



Slika 25. Uređaj za ispitivanje tvrdoće MIC20 metodom odskoka i UCI [2]

Česti su uređaji koji kombiniraju nekoliko načina ispitivanja, pa se samo zamjenom sonde mogu vršiti ispitivanja i po tri različite metode sa jednim uređajem. Najčešće su kombinacije uređaja sa metodom odskoka (Leeb) i UCI (slika 25).



Slika 26. Prijenosni ručni uređaji za ispitivanje tvrdoće po Rockwell-u [14]

I za ispitivanje statičkim metodama postoji niz prijenosnih uređaja, a koji se temelje na Rockwell i Brinell metodi. Općenito, radi se o vrlo jednostavnim prijenosnim uređajima (slika 26) koji mogu zadovoljiti najosnovnije potrebe, opremljeni su osnovnim mjernim uređajima, a njihovo korištenje bilo je rašireno prije pojave mobilnih uređaja opremljenih elektroničkim dodacima. Uređaji specijalne namjene, jesu prijenosni, ali su ipak vrlo velike mase (slika 27)



Slika 27. Specijalni uređaj za ispitivanje po Vickers-u, prijenosni ali vrlo velike mase [13]

Razvijeni su i uređaji kod kojih je kamera ugrađena u sam indenter, odnosno Vickers-ova dijamantna prizma. Ova metoda, TIV (Through-Indenter-Viewing) koristi se vrlo malom CCD kamerom koja prenosi sliku otiska kroz cijelo vrijeme ispitivanja (slika 28) [2].



Slika 28. Uređaj za ispitivanje tvrdoće TIV metodom [2]

Metode ispitivanja tvrdoće UCI, TIV i metoda odskoka su relativno nove metode, u uporabi u posljednjih 50-ak godina, a najveći su napredak imale uz veliki skok mogućnosti elektronike, kako u vidu preciznosti, tako i funkcijama (pretvaranje vrijednosti, ponovljivost, jednostavnost) te u smanjenju mase i dimenzija, pa i cijene uređaja. Iako se rezultati dobiveni prijenosnim uređajima ne smatraju relevantnim u odnosu na rezultate dobivene u laboratorijima, njihova se primjena povećava, a rezultati postaju zadovoljavajući za sve veći broj ispitivanja.

3.13. Priprema površine

Bez obzira kojom se metodom ispitivalo, potrebna je neka priprema uzorka. Jedna od grešaka pri ispitivanju tvrdoće je neadekvatna pripreme površine na zahtijevanu hrapavost. Kod svih metoda ispitivanja površina mora očišćena od oksida, masnoća, boje, antikorozivnih ili drugih premaza koji nisu predmet ispitivanja. Sve što se nalazi između indentora i materijala koji želimo ispitati izravno utječe na rezultate ispitivanja koji mogu znatno odstupati. Pri postupku pripreme površine ne smije doći do promjene svojstava u površinskom sloju [2,12].

Brušenje i poliranje provodi se prema zahtjevima norme, a ovisno o metodi, indentoru i sili koja će se primijeniti kod ispitivanja.

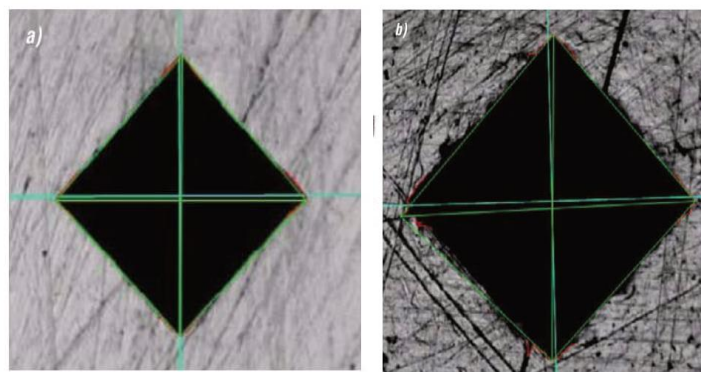
Tablica 6. Zahtjevi za minimalnom obradom u odnosu na metodu ispitivanja [2,4,10,12,15]

metoda \ obrada	osnovna/gruba	brušeno	fino brušeno	polirano
Brinell				
Rockwell				
Super Rockwell				
Vickers				
Vickers mikro				
Leeb				
UCI				
Knoop				

Minimalno zahtijevana priprema

Osnovni pregled minimalno zahtijevane obrade površine za ispitivanje tvrdoće ovisno o metodi ispitivanja prikazan je u tablici 6. Najbolji način poliranja je elektrolitičko poliranje, kako bi se najmanje utjecalo na promjene stanja površine [4,12].

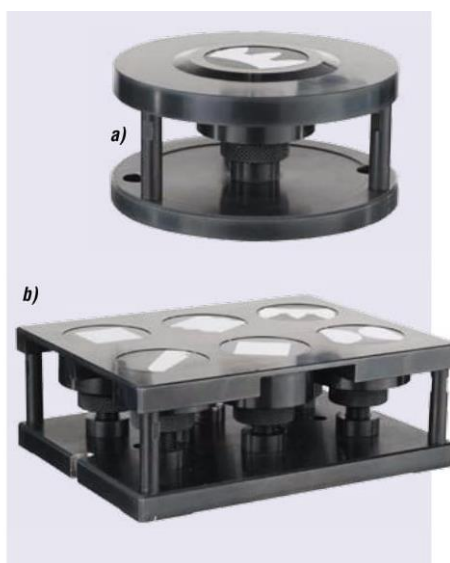
Dubina otiska koju ostavlja indenter treba biti relativno velika u usporedbi sa hrapavošću površine. Ako je hrapavost površine prevelika dolazi do razlika u dubini prodiranja ali i do problema sa preciznim očitanjem dimenzija otiska, prikazano na slikama 29 a) i b). Kod Rockwell metode ovi su problemi izbjegnuti samim postupkom ispitivanja [15].



Slika 29. Utjecaj pripreme površine na očitavanje otiska: a) dovoljna priprema, b) nedovoljna priprema [15]

3.14. Stezanje uzoraka

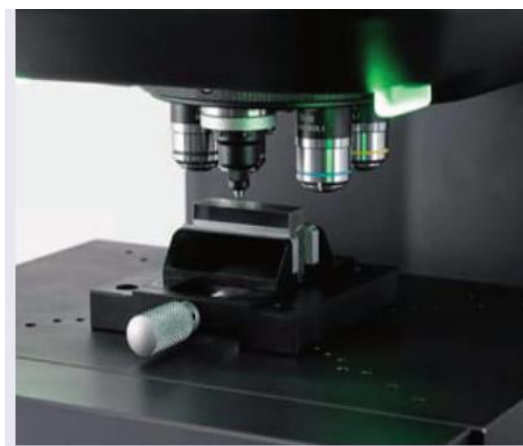
Kod mjerenja tvrdoće primijenjena sila mora na uzorak djelovati u smjeru normale na podlogu. Kod pripreme uzorka ručnim brušenjem i poliranjem teško se dobiva paralelna površina sa podlogom. Zbog toga je za sve metode gdje se očitavaju dimenzije otiska



Slika 30. Specijali držači uzoraka za ispitivanje tvrdoće [15]

poželjno koristiti specijalne držače (slika 30).

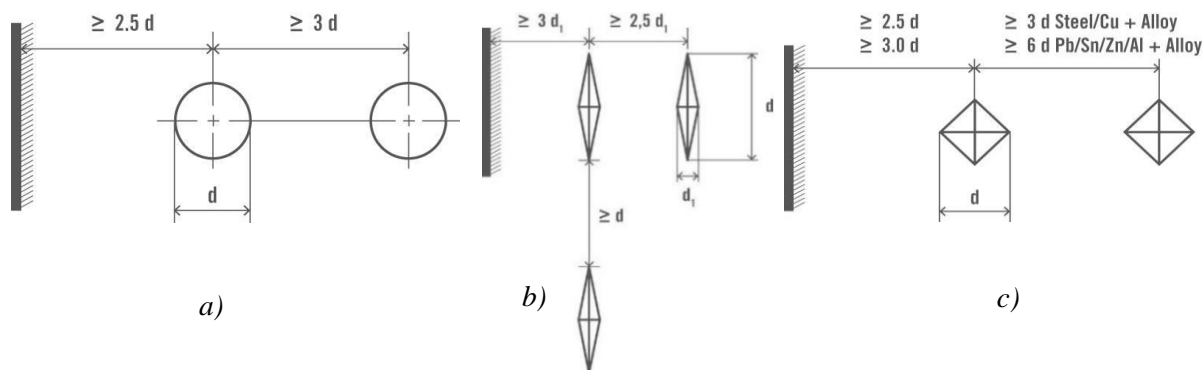
Kod malih masa uzorka također se koriste potpornji (slika 31), a moguće je upotrijebiti mast ili pastu, u obliku tankog filma, za povezivanje uzorka i podloge kada se ispituju izuzetno tanki uzorci. Na ovaj način se izbjegava pomicanje ili osciliranje uzorka, a koje može dovesti do pogrešnih očitavanja, naročito kod dinamičkih metoda [7,15].



Slika 31. Upotreba potpornja pri ispitivanju tvrdoće kod male mase uzorka [15]

3.15. Opća pravila o debljini i dimenzijama uzorka

Ispitivanja tvrdoće imaju ograničenja u vidu debljine i dimenzija uzoraka. Što je debljina uzorka manja, moraju se upotrijebiti manje sile ili se pristupa nekoj drugoj metodi koja dozvoljava tu debljinu. Minimalna debljina uzorka pri mjerenju tvrdoće mora iznositi 10 dubina otiska kako ne bi došlo do utjecaja podloge na rezultate ispitivanja. Zbog toga metode koje ostavljaju manje otiske za istu primijenjenu silu, mogu biti korištene na tanjim uzorcima. Proračun minimalne debljine treba odrediti prije ispitivanja, a prema očekivanim rezultatima. Ako je došlo do neispunjavanja uvjeta debljine, ispitivanje se mora ponoviti manjom silom ili nekom prikladnijom metodom.



Slika 32. Minimalni razmak između dva otiska za metode: a) Brinell, b) Knoop, c) Vickers [7]

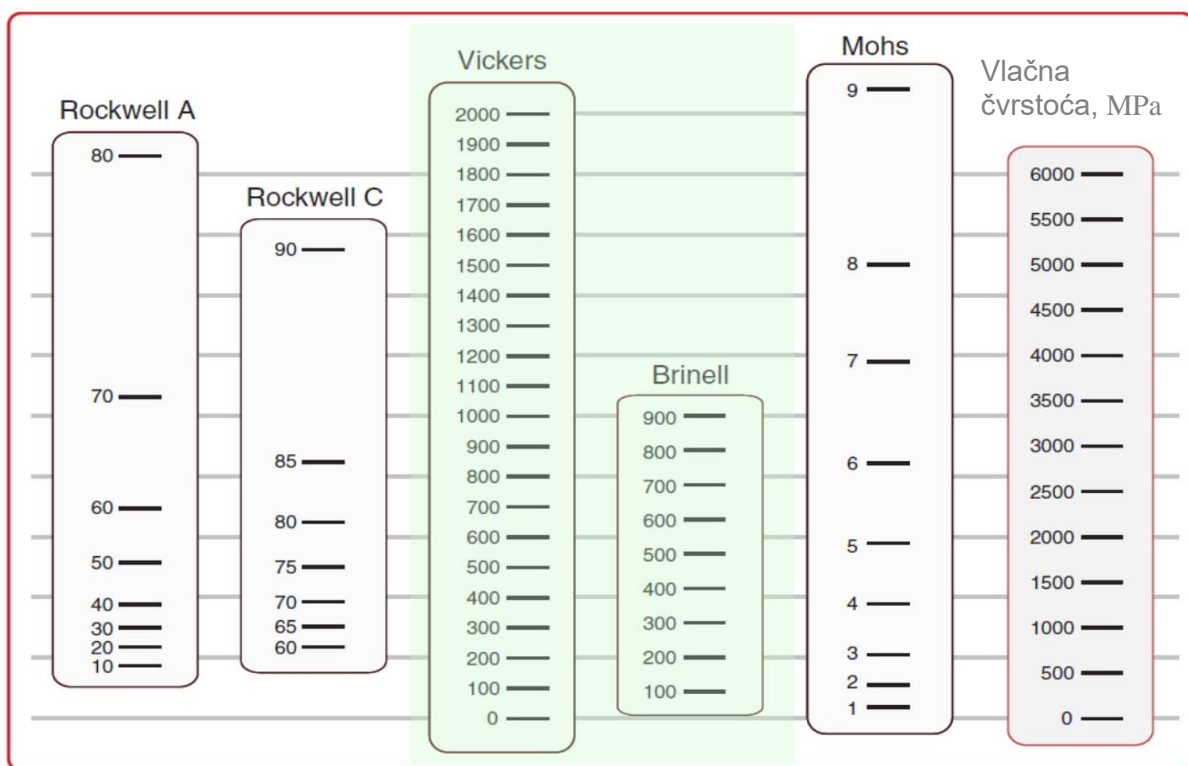
Na mjestima otiska pri ispitivanju tvrdoće dolazi do očvrnuća oko zone utiskivanja, pa stoga je potrebno poštivati minimalne razmake između dva otiska, te razmak otiska od ruba uzorka kako te lokalne promjene ne bi utjecale na izmjerene vrijednosti. Zahtjevi za minimalnim razmakom između otisaka prikazani su na slici 32 [5,7].

Kod ispitivanja tvrdoće jedno očitavanje nije pouzdan pokazatelj stvarne vrijednosti tvrdoće (nehomogenost materijala, greška pri mjerenju, nedovoljna priprema površine i dr). Prosječna tvrdoća može se utvrditi tek nakon odgovarajućeg broja mjerenja, odnosno što je veći

broj mjerenja, utvrđena vrijednost je vjerojatnija. Broj mjerenja obično iznosi između 3 i 10. Većim brojem mjerenja prosjek je bliži stvarnoj tvrdoći, no sa prevelikim brojem mjerenja dobivamo samo malo bolju procjenu, ali ne i bitno drugačiji rezultat. Stoga treba uzeti u obzir i vrijeme potrebno za obavljanje mjerenja, predviđene troškove, veličinu serije koja se treba ispitati, potrebnu točnost i sl. Ako nije drugačije zahtijevano, dovoljno se držati ovih smjernica o broju očitavanja. Zbog većeg broja ponavljanja mjerenja i držanja dovoljnog razmaka između otisaka, nužno je i odrediti minimalnu veličinu uzorka koja se ispituje. [12]

Vrijednosti tvrdoće pojedine metode ne mogu se konvergirati ili preračunati u vrijednosti neke druge metode. Razlog je što vrijednosti ne rastu linearno već logaritamski, ali ni to nije isto u svim područjima tvrdoće niti pak su sve metode jednako osjetljive na različite

Tablica 7. Usporedna tablica vrijednosti tvrdoće za nekoliko metoda ispitivanja [9]



materijale niti su primjenjive na svim materijalima. Vrijednosti tvrdoća različitih metoda pretvaraju se u tvrdoće drugih metoda pomoću priručnih tablica, a neke od pretvorbenih tablica sadržane su u standardima ISO 18265 i ASTM 140E. Orijentacijski odnosi za neke metode ispitivanja tvrdoće prikazani su u tablici 7. Te tablice postoje i vrijede samo za one pretvorbene odnose koji su utvrđeni statistički utemeljenim usporednim mjerenjima. Elektronički uređaji novije generacije imaju spomenute tablice pohranjene u memoriji te mogu rezultate trenutno prikazivati u odabranoj skali tvrdoće.

Kako bi rezultati ispitivanja bili upotrebljivi, a moguće i usporedivi, potrebno je ispuniti sve uvjete za pojedinu metodu navedene prema određenoj normi. Popis najčešće korištenih metoda i njihove norme po standardima ISO/DIN i ASTM navedeni su u tablici 8.

Tablica 8. Norme prema standardima ISO i ASTM za neke najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće [2,7]

Standard Metoda ispitivanja	ISO	ASTM
Brinell	ISO 6506	ASTM E10
Vickers	ISO 6507	ASTM E92 ASTM E384
Rockwell	ISO 6508 DIN 50103	ASTM E18
Knoop	ISO 4545	ASTM E92 ASTM E384
Leeb	ISO 16859 DIN 50156	ASTM A956
Shore		ASTM D2240
UCI	DIN 50159	ASTM A1038

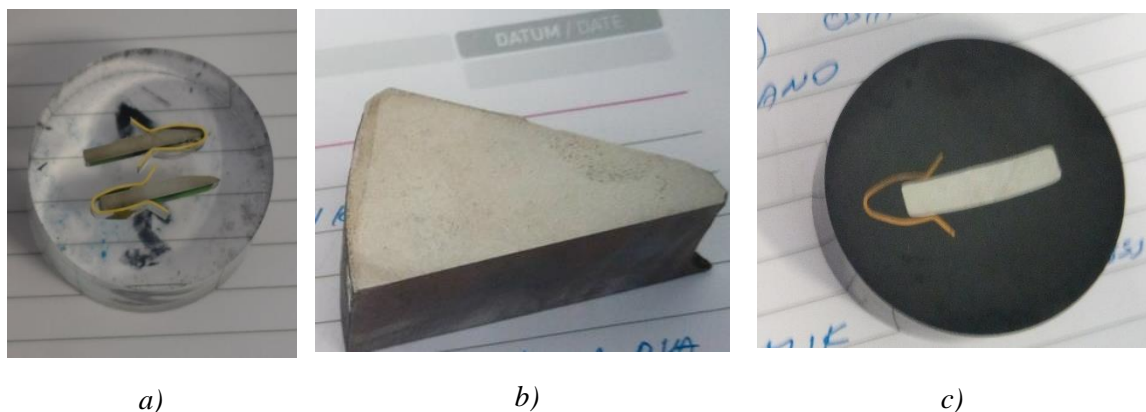
4. USPOREDBA PRIJENOSNE I LABORATORIJSKE METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

Preciznost uređaja (očitanje mikroskopa, podešavanje sile), uvjeti okoline (vibracije, temperatura, vlažnost, prašina i dr.) te zahtijevano stanje uzoraka (masa, debljina, površina) imaju velik utjecaj na rezultate mjerenja pri provođenju ispitivanja tvrdoće materijala. Kako je osnova za svako laboratorijsko ispitivanje kontrolirani zahtijevani uvjeti okoline i procedure, to kod prijenosnih uređaja za ispitivanje tvrdoće nije moguće u istoj mjeri. Zbog toga prijenosni uređaji nisu zamjena za laboratorijske, ali su u upotrebi upravo radi mobilnosti i jednostavnije uporabe. Ispitivanja provedena u laboratorijskim uvjetima smatraju se pouzdanima, dok se ona provedena sa prijenosnim uređajima smatraju tek orijentacijskim pokazateljima vrijednosti tvrdoće i služe za pogonske uvjete.

Kako bi se utvrdila pouzdanost mjerenja prijenosnim uređajima, u praktičnom dijelu rada izvršena su ispitivanja istih uzoraka pomoću dvije metoda ispitivanja tvrdoće, jednom prijenosnom i jednom laboratorijskom.

Kao prijenosna metoda odabrana je metoda odskoka odnosno metoda prema Leeb-u. Ova se metoda zasniva na izbacivanju kuglice unutar sonde u površinu materijala te usporedbu brzine te kuglice neposredno prije udara o površinu i nakon udara. Ova je metoda odabrana jer je najčešće korištena prijenosna metoda za ispitivanje tvrdoće čelika [2,12], a sam postupak ispitivanja traje kratko. Postupak ispitivanja tvrdoće sa 12 mjerenja traje oko 2 minute.

Za ispitivanje metodom odskoka potrebna je priprema površine brušenjem, u upotrebi je nekoliko tipova sondi ovisno o zahtjevima i pristupačnosti mjesta ispitivanja, a prema odabranoj sondi nužno je prilagoditi i stanje uzoraka. Ispitivanja se provode prema normi ISO 16859 i ASTM A956.



Slika 33. Pripremljeni uzorci za ispitivanje tvrdoće: a)alatni čelik, b)sivi lijev, c)austenitni čelik

Ispitivanja laboratorijskim uređajem provedena su metodom Vickers u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uzorci za potrebe diplomskog rada ispitivani su na uređaju koji je nacionalni umjerni etalon tvrdoće u RH, proizvođača Indentec, tip 5030 TKV, serijskog broja 05281. Ispitivanja na umjernom etalonu

tvrdooe provedena su prema normi HRN EN ISO 6507:2018. Laboratorij je akreditiran prema normi EN ISO/IEC 17025 kao ispitni laboratorij za mehanička svojstva materijala, posjeduje kvalitetnu opremu, a ispitivanja se provode od strane iskusnih mjeritelja. Prema svemu navedenom, relevantnim podacima smatraju se rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjem provedenom u navedenom laboratoriju.

4.1. Prijenosni uređaj za ispitivanje tvrdoće

Za prijenosna ispitivanja odabran je uređaj tvrtke BAQ GmbH naziva dynaROCK II. Uređaj na kojem je provedeno mjerenje spada u skupinu uređaja za ispitivanje tvrdoće pomoću metode odskoka tj. Leeb metoda. Dimenzije uređaja su 135 x 79 x 22 mm, mase 425 g. U standardnom kompletu nalazi se uz uređaj i ispitna sonda tipa D (slika 34), nekoliko nastavaka za cilindrična mjesta ispitivanja te etalon blok za umjeravanje uređaja. Uz uređaj se mogu koristiti različiti tipovi sonde, ovisno o metodi ispitivanja (tablica 6), a koje se razlikuju po dužini, presjeku te po kuglicama, udarnim tijelima, koje se koriste za ispitivanje.



Slika 34. Prijenosni uređaj za ispitivanje tvrdoće BAQ dynaROCK II [16]

Ovisno od upotrijebljene sonde, masa uzorka mora iznositi minimalno 0,5, 2 ili 5 kg, a debljina uzorka mora biti minimalno 10, 25 ili 70 mm. Ako nisu zadovoljeni ovi uvjeti, potrebno je uzorke stabilizirati uz radni stol ili masivni dio preko držača. Za uvjet minimalne debljine potrebno je upotrijebiti odgovarajuću podlogu, na koju će uzorak biti pričvršćen ili zalijepljen.

Uređaj se koristi za terenska ispitivanja tvrdoće, na teško dostupnim mjestima masivnih konstrukcija, ispitivanje zavarenih spojeva, cjevovoda te za brzu kontrolu u pogonskim uvjetima.

4.2. Ispitivanje tvrdoće metodom odskoka

Ispitivanje tvrdoće prijenosnim uređajem BAQ dynaROCK II provedeno je u Laboratoriju za materijale Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Dostavljena su tri uzorka materijala koji su bili pripremljeni standardnom metalografskom pripremom uzorka za ispitivanje tvrdoće. Oznake uzorka i materijali navedeni su u tablici 9.

Tablica 9. Materijali uzorka i pripadajuće oznake

<i>Materijal</i>	<i>Laboratorij UNIN Varaždin</i>	<i>Laboratorij FSB Zagreb</i>
<i>Sivi lijev SL10</i>	1A	1B
<i>Austenitni čelik 316L</i>	2A	2B
<i>alatni čelik C85W</i>	3A	3B

Ispitivanje je započeto provjerom opreme, prikazane slikom 35 a), a nakon unosa osnovnih podataka u uređaj (vrijeme, naziv datoteke) izvršeno je umjeravanje uređaja pomoću etalona, prikazano na slici 35 b). Na uređaju je odabran prikaz rezultata u HLD skali. Ispitivanje metodom odskoka provedeno je prema normi ISO 16859.

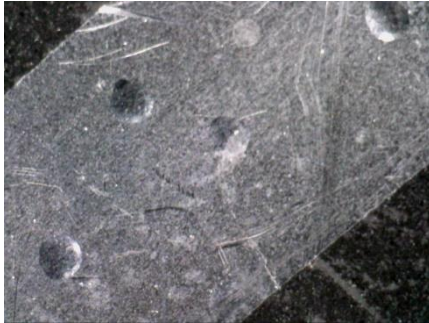


Slika 34. a) osnovna oprema uređaja BAQ dynaROCK II, b) postupak umjeravanja pomoću etalona

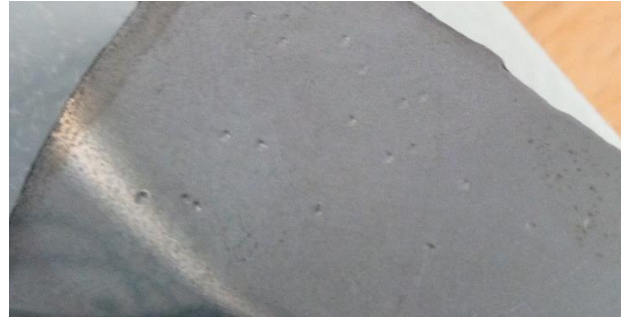
Mjerenje započinje postavljanjem sonde okomito na pripremljenu površinu uzorka te otpuštanjem opruge sonde. Opruga djeluje na ispitnu kuglicu koja dobiva ubrzanje te nekom brzinom v_a udara o površinu uzorka. Nakon udara kuglica se vraća u početni položaj, ali

manjom povratnom brzinom v_b . Povratna brzina biti to veća što je materijal veće tvrdoće. Omjer brzina v_a i v_b daje tvrdoću HL. Pri upotrebi sonde tipa D, tvrdoća se označava HLD. Nije potrebno nikakvo očitavanje brzina, već uređaj na ekranu prikazuje izmjerenu tvrdoću, čime je mjerenje završeno. Rezultati se mogu prikazati skalama HL, HV ili HR, prema već unaprijed utvrđenim odnosima skala.

Nakon ispitivanja na površini uzorka ostaje vidljivo udubljenje, vidljivo na slikama 36 a) i 36 b), a ona mogu poslužiti za naknadnu provjeru udaljenosti od ruba ili ranijih otisaka, jer pozicioniranje prije otpuštanja kuglice nije moguće zbog veličine sonde.



a)



b)

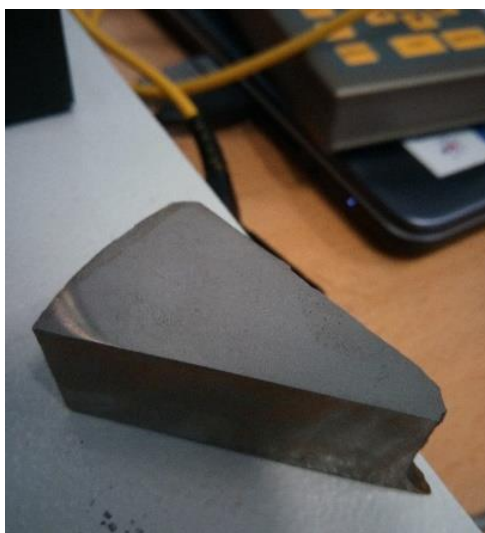
Slika 36. Udubljenja nakon ispitivanja tvrdoće metodom odskoka: a) pogled stereo mikroskopom, b) otisci vidljivi bez povećala

Dostavljeni uzorci nisu imali podatke o materijalu, već samo skupine kako bi se moglo odabrati na uređaju skupina materijala (austenitni, sivi lijev, alatni čelik). Na svakom uzorku provedeno je 12 mjerenja od kojih prva dva nisu uzeta u izračun srednje vrijednosti kako bi se umanjile moguće greške postavljanja, umjeravanja ili prilagodbe uređaja. Izmjerene vrijednosti tvrdoće predstavljaju srednju vrijednost deset mjerenja na svakom uzorku.

4.3. Rezultati ispitivanja uzoraka

Uzorak 1.

Materijal uzorka je sivi lijev SL10. Na samom uređaju potrebno je odabrati ovu vrstu materijala. Tvrdoća sivog lijeva klase SL10 iznosi od 150 HB do 175 HB. [1]



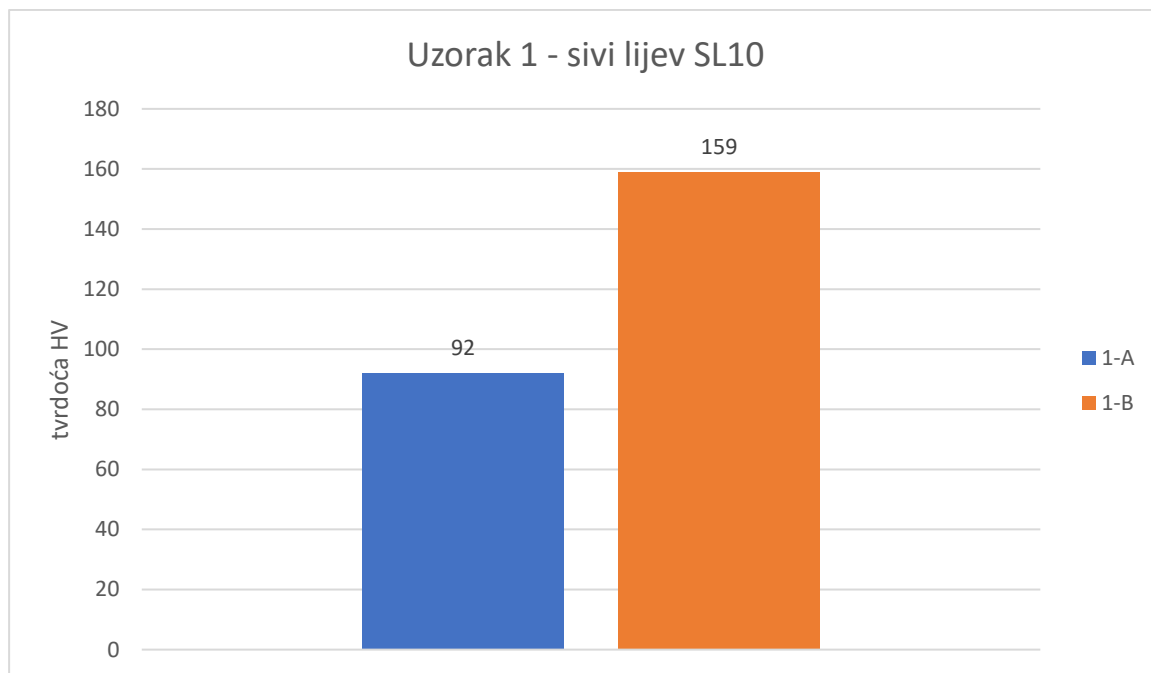
Slika 37. Uzorak od sivog lijeva pripremljen za ispitivanje tvrdoće

Tablica 10. rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 1-A

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HV
1.	361	117
2.	309	89
3.	290	81
4.	353	112
5.	254	60
6.	297	83
7.	284	79
8.	273	77
9.	332	100
10.	361	117
Srednja vrijednost	311,4	92

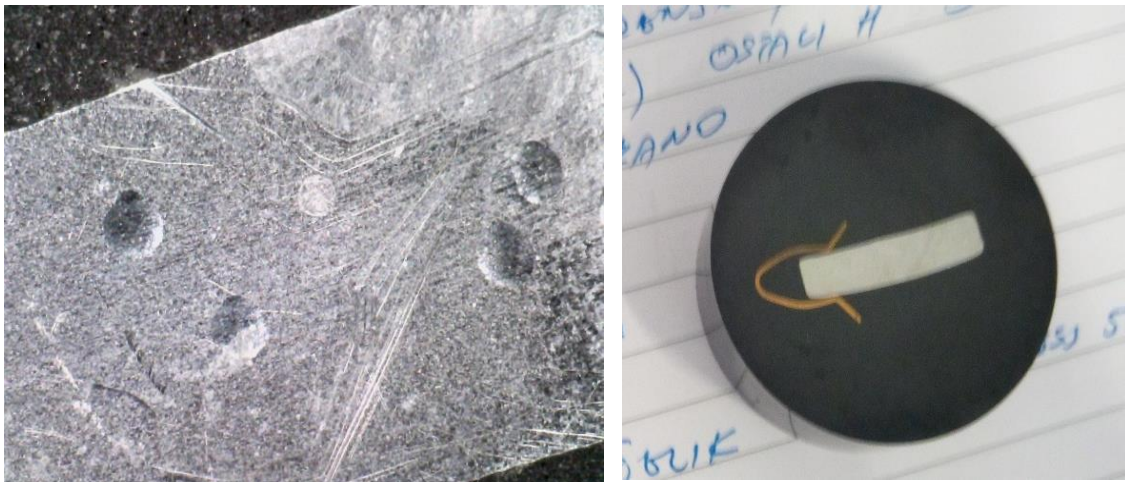
Tablica 11. Rezultati ispitivanja Vickers metodom – uzorak 1-B [17]

Sila:	9,8 N
Vrijeme djelovanja sile:	10 s
Broj ispitivanja	Izmjerena tvrdoća / HV
1.	157
2.	166
3.	154
Srednja vrijednost:	159



Slika 38. Grafikon usporednih rezultata ispitivanja za uzorak 1

Uzorak 2



a)

b)

Slika 39. Uzorak austenitnog čelika 316L : a) udubljenja nakon ispitivanja metodom odskoka, b) uzorak pripremljen za ispitivanje

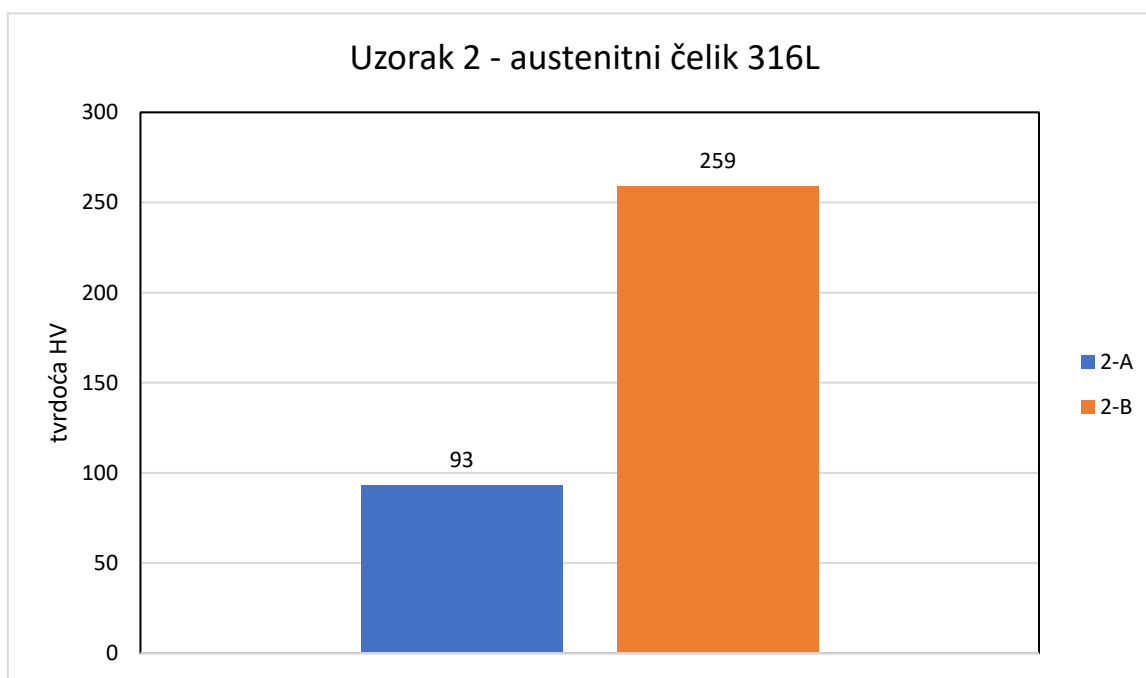
Materijal uzorka 2, slika 39, je nehrđajući austenitni čelik 316L. Vrijednost tvrdoće za ovaj čelik, specificirano prema normi ASTM A249, iznosi 215 HB30 [18].

Tablica 12. rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 2-A

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost HL	Konvergirana vrijednost / HV
1.	237	65
2.	370	118
3.	356	109
4.	309	85
5.	329	94
6.	324	92
7.	294	79
8.	379	124
9.	339	100
10.	255	68
Srednja vrijednost	319,2	93

Tablica 13. Rezultati ispitivanja Vickers metodom - uzorak 2-B [17]

Sila:	9,8 N
Vrijeme djelovanja sile:	10 s
Broj ispitivanja	Izmjerena tvrdoća / HV
1.	252
2.	266
3.	258
Srednja vrijednost:	259



Slika 40. Grafikon usporednih rezultata za uzorak 2

Uzorak 3.

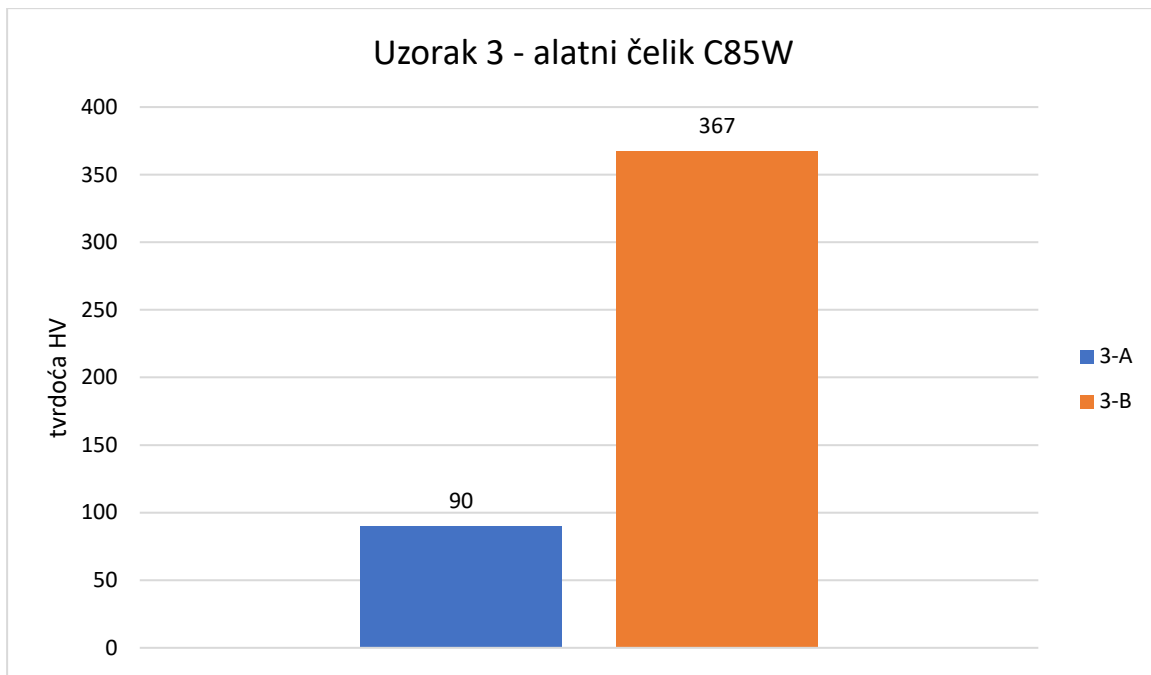
Materijal Uzorka 3 je nelegirani alatni čelik C85W, tvrdoće nakon popuštanja 113 HBW, u zakaljenom stanju sa 100% martenzitnom strukturom. [1]

Tablica 14. Rezultati ispitivanja metodom odskoka (Leeb) - uzorak 3-A

Broj ispitivanja	Izmjerena vrijednost / HL	Konvergirana vrijednost / HV
1.	306	87
2.	289	80
3.	295	82
4.	223	60
5.	372	119
6.	361	117
7.	353	112
8.	252	68
9.	322	95
10.	287	80
Srednja vrijednost	306	90

Tablica 15. Rezultati ispitivanja Vickers metodom - uzorak 3-B [17]

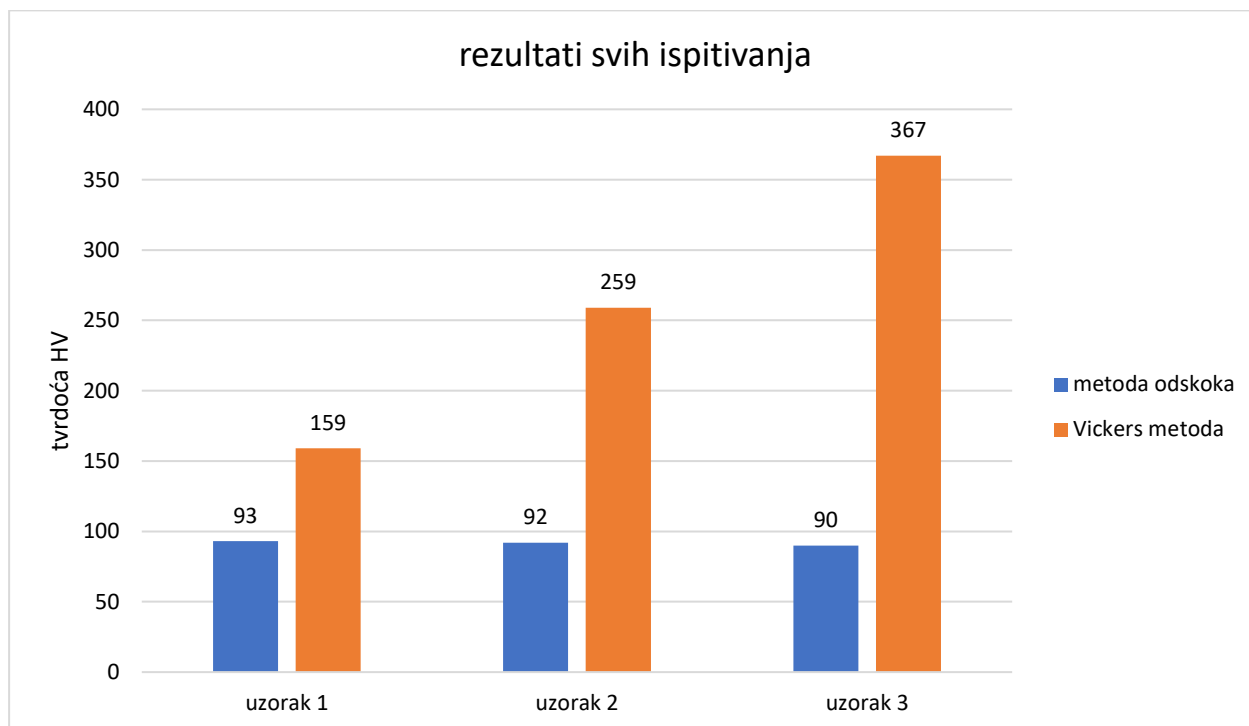
Sila:	9,8 N
Vrijeme djelovanja sile:	10 s
Broj ispitivanja	Izmjerena tvrdoća / HV
1.	360
2.	378
3.	364
Srednja vrijednost:	367



Slika 41. Grafikon usporednih rezultata ispitivanja za uzorak 3

4.4. Uspoređivanje rezultata

Za svaki uzorak provedeno je ispitivanje tvrdoće i dobiveni rezultati su prikazani u tablicama zasebno za svako ispitivanje, a u grafovima su prikazane usporedbe. Kako su rezultati kod ispitivanja prijenosnim uređajem bili u HL (HLD zbog korištenja sonde tipa D), pretvoreni su pomoću tablica u HV (HV1 označava ispitivanje silom koju uzrokuje masa od 1 kg).



Slika 42. Grafikon usporedih rezultata ispitivanja za sve uzorke i metode

Na grafu sa slike 42 plavom bojom označena su mjerenja provedena prijenosnim uređajem pomoću metode odskoka (nazivi uzoraka „broj uzorka-A“) dok su mjerenja provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva materijala na FSB-u označena narančastom bojom (nazivi uzoraka „broj uzorka-B“). Iz prethodnih grafova gdje su uspoređeni dobiveni rezultati odmah je uočljivo veliko odstupanje u dobivenim vrijednostima. Analizom podataka primijećeni su podjednaki rezultati pri mjerenju prijenosnim uređajem za sve ispitivane materijale, iako se zbog različitih materijala očekuju i različiti rezultati. U laboratorijskim ispitivanjima vrijednosti tvrdoće za pojedine materijale su vrlo različite, prema očekivanju.

Rezultati dobiveni ispitivanjem pomoću prijenosnog uređajem za ispitivanje tvrdoće ne odgovaraju rezultatima laboratorijskog ispitivanja unutar prihvatljivog odstupanja, pa stoga nisu iskoristivi za bilo kakvu analizu u svrhu određivanje tvrdoće, kontrole ili konstruiranja. Kako bi se što točnije utvrdio razlog ovakvim odstupanjima, učinjena je statističku analiza rezultata te su analizirani svi detalji sa ispitivanja.

Tablica 16. Statistička obrada dobivenih rezultata

Naziv uzorka	Srednja vrijednost rezultata mjerenja	Standardna devijacija	Standardna devijacija %	Odstupanje sred. vrijednosti od FSB-a (HV / %)
1-A	92	19,26	20,93	-67 / 72,8
2-A	93	19,93	21,43	-166 / 178,4
3-A	90	20,37	22,60	-277 / 307,7
1-B	159	6,24	3,92	0 / 0
2-B	259	7,02	2,71	0 / 0
3-B	367	9,45	2,57	0 / 0

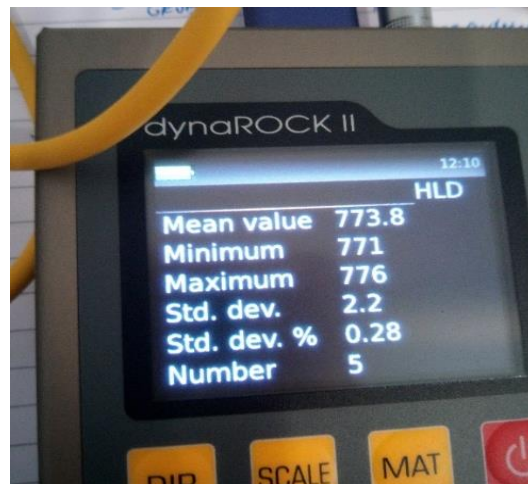
Iz tablice srednjih vrijednosti vidljivi su rezultati koji svojim vrijednostima potvrđuju očekivanja (svi uzorci „-B“) te vrijednosti koje ni teoretski ne mogu pripadati navedenim materijalima (svi uzorci „-A“) jer čak i ferit, kao najmekša faza u čelicima, ima vrijednost višu od utvrđenih prijenosnim uređajem kod ovog ispitivanja.

Standardna devijacija, prema normama DIN 50156-1 i ISO 16859-1 mora biti $\leq 15HL$, odnosno $\leq 5\%$ kod prijenosnih uređaja za ispitivanje tvrdoće metodom odskoka. Kako su sve vrijednosti izvan tih granica, rezultati su odbačeni.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja pri umjeravanju etalonom za metodu odskoka

Hardness scale	HL
Value /HL	Impact direction / \hat{A}°
776	0
771	0
775	0
772	0
775	0
Srednja vrijednost rezultata mjerenja etalona	Standardna devijacija
773,8	2,16

Prijenosni uređaj prilikom umjeravanja etalonom postigao rezultate mjerenja prema tablici 18 i na slici 43, unutar granica odstupanja. Nakon provedenog ispitivanja na uzorcima ponovno je provedeno ispitivanje na etalonu i rezultati su bili u istim relacijama, pa se uređaj smatra ispravnim.

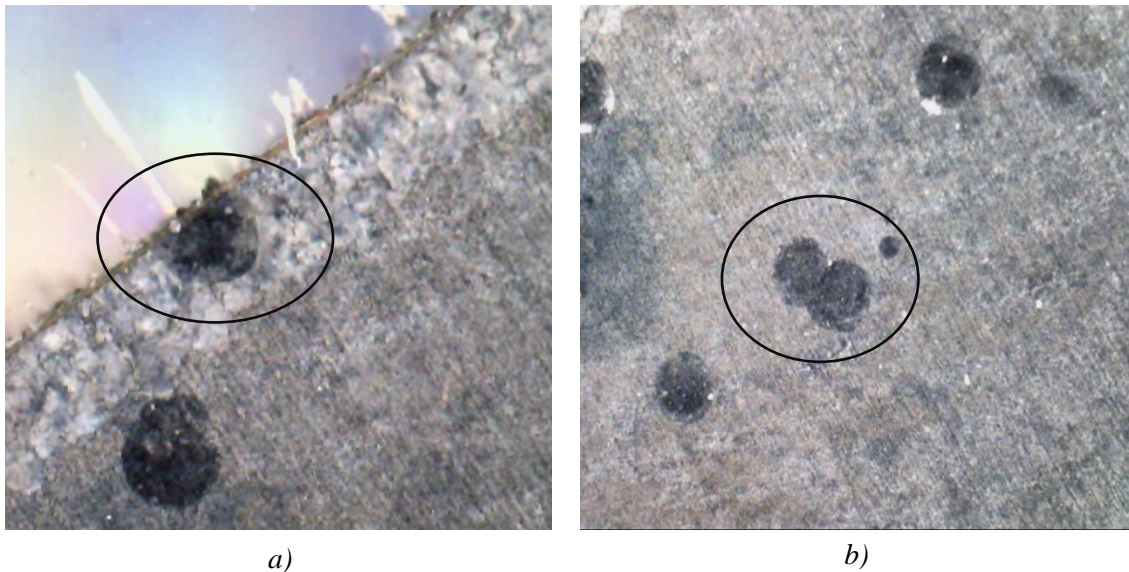


Slika 43. Prikaz rezultata na uređaju (kod umjeravanja)

4.5. Uzrok pogreške

Odstupanja vrijednosti van dopuštenih ograničenja te znatno odstupanje rezultata ispitivanja tvrdoće prijenosnih uređajem od stvarnih vrijednosti zahtijevaju pronalaženje pogreške. Neke od navedenih pogrešaka uočene su tijekom ispitivanja te su mjerenja obavljena sa uočenim greškama izbrisana i ponovljena.

Jedna od mogućih grešaka pri ispitivanju uzoraka koji su pripremljeni za laboratorij, odnosno obloženi, je ispitno mjesto preblizu ruba materijala, kao na slici 40 a). Naime, ako je vrlo mali uzorak, sonda prilikom postavljanja zaklanja točno mjesto udara kuglice te može se dogoditi da ona udari u sam rub ili čak oblogu. Uređaj ne detektira grešku, a vrijednost znatno odstupa.



Slika 44. Greške prilikom ispitivanja tvrdoće: a) otisak je preblizu ruba uzorka, b) razmak između otisaka je premali

Sonda u dijelu koji naliže na uzorak ima promjer 20 mm pa mjesto udara nije točno vidljivo. Također se može dogoditi da mjeritelj pomakne sondu neposredno prije otpuštanja, pa kuglica udara na drugo mjesto nego gdje je predviđeno. Osim blizu ruba može se poklopiti i mjesto udara sa već ranijim ispitnim mjesto na kojem je ostalo udubljenje, vidljivo na slici 44 b). Takav slučaj također dovodi do pogrešnih rezultata te se i oni moraju detektirati i odbaciti. Veličina sonde u odnosu na uzorak prikazana je na slici 45.



Slika 45. Veličina sonde u odnosu na uzorak

Pomoću stereo mikroskopa i računala, na slici 46, izvršena je provjera na svim uzorcima, te su ponovljena mjerenja ukoliko se utvrdila greška.

Prilikom ispitivanja sonda mora obavezno nalijegati okomito na površinu uzorka. Za cilindrične uzorke postoje dodatne naprave koje se montiraju na sondu, a dio njih se nalazi u početnom kompletu pri isporuci uređaja (slika 35 a). Mjerenja se mogu obaviti i na uzorcima čija površina nije u horizontalom položaju već je nagnuta do 45° , kao na slici 47, što je pogodno za terenska ispitivanja. Sonda svakako mora okomito nalijegati na površinu uzorka. Za takvo



Slika 46. Pregled uzoraka stereo mikroskopom

mjerenje se na samom uređaju odabire orijentacija sonde jer u protivnom dolazi do pogrešnih rezultata. Iako to na uređaju kojim je provedeno ispitivanje nije moguće, neki od sličnih uređaja imaju mogućnost ispitivanja pod kutom od 90° ili 180° , no u svakom slučaju mora se odabrati ispravna orijentacija.

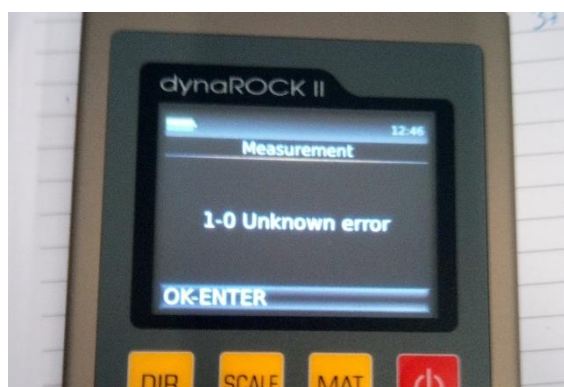
Pri opisanom ispitivanju, svi uzorci su imali horizontalno položenu ispitnu površinu, a na uređaju je bila odabrana takva opcija (zadana u postavkama). Sva ispitivanja provedena su na način da se sonda čvrsto pritisne uz ispitivanu površinu i u tom trenutku se drugom rukom



Slika 47. Ispitivanje uzorka kada je sonda nagnuta

otpušta opruga. Ako se sonda prerano odmakne od površine, uređaj to mjerenje registrira kao grešku, prikazano na slici 48.

Prema opisanome, ni ova vrsta greške, koja se inače često pojavljuje kada je prostor za ispitivanje skučen i ima ograničen pristup, nije bila prisutna pri opisanome ispitivanju uzoraka. Takve namjerno učinjene greške (slika 48) odmah su prikazane na zaslonu ili su odbačene.



Slika 48. Prijava greške na zaslonu uređaja

Stanje površine, odnosno prevelika hrapavost, može također dovesti do rezultata koji ne odgovaraju stvarnom stanju. Ovisno od korištene sonde, površina mora imati minimalno obrađenu površinu. Za sondu tipa D pri ispitivanju metodom odskoka maksimalna srednja hrapavost površine R_a mora iznositi $2 \mu\text{m}$. Sve površine prilikom ovog ispitivanja bile su obrađene poliranjem te stoga hrapavost površine nije utjecala na rezultate.

Temperatura, vlažnost i stanje okoline utječe na rezultate ispitivanja. Prilikom provedenog ispitivanja stanje vlage i temperature odgovaralo je normalnim radnim uvjetima predviđenim za ovaj uređaj te su odbačene pretpostavke da su nepovoljni uvjeti uzrokovali greške pri ispitivanju. Stanje okoline kao što su vibracije mogu znatno utjecati na rezultate, a utjecaj je veći što su sile ispitivanja manje. Pri opisanom ispitivanju metodom odskoka nije bilo prisutnih vibracija od vanjskog izvora.

Zahtijevana minimalna debljina, prema slici 49, postignuta je kod svih uzoraka. Greška je kod materijala oblaganja na uzorcima 2 i 3 jer je potrebno spojiti sa istim ili sličnim materijalom ako, odnosno slične tvrdoće, ako uzorci samostalno ne zadovoljavaju uvjet minimalne debljine. Kako je tvrdoća polimerne mase drugačija, moguć je utjecaj na rezultate ispitivanja [7,14].

Available Impact Devices – Type D

- ◆ Standard for most testing tasks
- ◆ Min. workpiece mass: 2 kg (5 kg without stable underlay)
- ◆ Min. workpiece thickness: 25 mm (3 mm with coupling)
- ◆ Max. surface roughness (Ra): 2 μm



Slika 49. Opis sonde tipa D i nužnih uvjeta ispitivanja [16]

Minimalna masa uzoraka nije postignuta niti za jedan uzorak (min 2 kg na stabilnoj podlozi ili 5 kg samostalno). Prilikom ispitivanja metodom odskoka, kuglica udara u površinu uzorka (energija udara je 11,5 mJ) te se uslijed toga stvaraju vibracije. Energije sa tako malom vrijednošću ne izazivaju vibracije koje bi ispitivač mogao osjetiti, no one su vrlo utjecajne na mikrorazini. Kako vibracije negativno utječe na rezultate mjerenja te da vanjskih vibracija nije bilo, postoji opravdana sumnja da je upravo izazivanje ove pojave zbog premale mase uzoraka imalo najveći utjecaj na greške pri ispitivanju.

Prilikom ispitivanja gotovo svi noviji uređaji imaju mogućnost prikaza rezultata u nekoliko skala tvrdoće. Sve se konverzije odvijaju prema unaprijed unesenim podacima dobivenim ispitivanjima i uspoređivanjem. Za gotovo ni jednu relaciju konverzije ne postoji funkcija koja bi davala potpuno točne omjere u cijelom mjernom području. Pri ispitivanju odabran je prikaz rezultata u HRC skali, no uređaj je odmah prikazao grešku te nemogućnost prikaza u toj skali (slika 50) jer su izmjerene vrijednosti bile van područja u kojem se rezultati smatraju upotrebljivima. Stoga je odabrana direktna skala HLD, odnosno ona koja izražava tvrdoću omjerom brzina kuglice prije i poslije udara. Uređaj može mjeriti vrlo male vrijednosti, no pregledom tablice 5. uočava se podatak da je ispravno mjerno područje za sondu tipa D 300-890 HLD, pa bi svi rezultati van tog područja trebali ukazivati na određenu pogrešku u postupku ispitivanja (debljina, masa, odabir materijala, uvjeti okoline...).



Slika 50. Prikaz greške pri odabiru skale tvrdoće

5. ZAKLJUČAK

Svrha i cilj ovog rada bio je pokazati u kojoj mjeri su prijenosni uređaji pouzdani pri korištenju. Provedbom ispitivanja istih uzoraka dvama različitim metodama na dva različita uređaja utvrđeno je veliko rasipanje rezultata mjerenja. Na temelju ovih rezultata ne može se donositi zaključak o pouzdanosti mjerenja pri ispitivanju tvrdoće prijenosnim uređajima.

Pregledom svih grešaka koje se mogu pojaviti i minimalno zahtijevanih uvjeta za provedbu postupka ispitivanja tvrdoće prijenosnim uređajem BAQ dynaROCK II, utvrđeno je odstupanje od minimalno zahtijevane mase uzorka kao glavni problem. Iako su uzorci postavljeni na ravnu i stabilnu podlogu, time ipak nije ispunjen potreban uvjet minimalne mase. Premala masa dovela je do titranja samog uzorka što je uzrok rezultatima mjerenja koji nisu u skladu sa očekivanim. Rezultati ispitivanja provedenog na etalonu potvrđuju ispravnost uređaja.

Kada se promotri cijeli tijek ispitnog postupka, svakako se uočava neiskustvo mjeritelja te nepridržavanje procedure i uvjeta ispitivanja prema normi ISO 16859, kao ni prema uputama proizvođača (neispunjavanje minimalno potrebnih uvjeta). U praksi je ovo učestala situacija, a koja dovodi u zabludu mjeritelja.

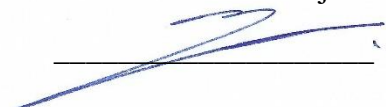
Ovim ispitivanjem zasigurno nije dokazana ni opovrgnuta pouzdanost prijenosnih uređaja za ispitivanje tvrdoće, niti u kojoj mjeri mogu biti pouzdani. Dokazano je da nepoštivanje minimalnih zahtjeva dovodi do pogrešaka koje pak mogu uzrokovati dalekosežne posljedice (npr. ispitivanje zavarenog spoja daje povoljne rezultate iako realno nisu takvi).

Iako i pri laboratorijskim ispitivanjima postoji mogućnost pogreške, ona je znatno smanjena jer za provedbu ispitivanja nije dovoljno samo uključiti uređaj i postaviti uzorak, već je potrebno odabrati čitav niza parametara (vrijeme utiskivanja, sile, mjerenje otiska...). Sve ovo dovodi do zaključka da su mjeritelji u laboratorijima educirani u dovoljnoj mjeri kako bi takva ispitivanja sproveli prema standardima.

Kod terenskih ispitivanja teško je utvrditi jesu li svi uvjeti zadovoljeni (npr. zadovoljava li debljina stjenke cijevi minimalno potrebnu debljinu) pa do greške dolazi i nesvjesno. Takva ispitivanja često provode osobe sa nižom razinom stručnog znanja koje rezultate ispitivanja ne znaju objasniti u dovoljnoj mjeri ili im nisu dostupni parametri i literatura nužni za provedbu ispitivanja (često su u pogonu literatura i sam uređaj odvojeni). Jednostavnost primjene i kratkotrajno ispitivanje ovim uređajima jest njihova velika prednost ali koja može biti uvelike narušena ukoliko se ne poštuju minimalni uvjeti. Također treba voditi i o ograničenosti u primjeni (masa, debljina, hrapavost, vrsta materijala), a koja vrijedi za gotove sve uređaje pri ispitivanju tvrdoće.

U Varaždinu, 16.10.2020.

Zoran Majcen



Sveučilište
Sjever

UNIVERSITY
OF NORTH



SVEUČILIŠTE
SJEVER

**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Zoran Majcen, pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom

POUZDANOST PRIJENOSNIH METODA ISPITIVANJA TVRDOĆE

te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Zoran Majcen


(vlastoručni potpis)

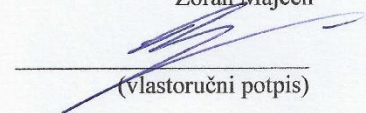
Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Zoran Majcen, neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom

POUZDANOST PRIJENOSNIH METODA ISPITIVANJA TVRDOĆE

čiji sam autor.

Student:
Zoran Majcen


(vlastoručni potpis)

6. LITERATURA

1. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.(2013):Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
2. Frank, S. : Mobilno ispitivanje tvrdoće, GE Inspection Technologies (www.ideal.hr)
3. <https://www.mineralab.com/MohsHardnessIndustrial/> (18.05.2020.)
4. Vitez, I., Oruč, M., Sunulahpašić, R. (2006) : Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici
5. Kladarić, I. : MATERIJALI I – Mehanička svojstva materijala , SFSB Slavonski Brod, <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf> (18.05.2020.)
6. Rešković, S.: predavanja iz kolegija Ispitivanje materijala, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009.
7. <https://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/> (20.05.2020.)
8. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/nanohardness> (25.05.2020.)
9. <https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2018/11/vezba-5-masinski-materijali-odredjivanje-tvrdoc487e-brinel-i-vickers-metodom.pdf> (24.05.2020.)
10. <https://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/> (18.05.2020.)
11. <https://www.newsonic.de/en/products/hardness-testing> (18.05.2020.)
12. https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Equotip_Application_Booklet_Portable_Hardness_Testing_Using_Leeb_Portable_Rockwell_UCI.pdf (24.05.2020.)
13. <https://www.buehler.com/vickers-hardness-testing.php> (25.05.2020.)
14. <https://www.struers.com/en/Knowledge/Hardness-testing#> (19.05.2020.)
15. <http://foundrax.co.uk/hardness-testing-machines/model-134-portable-brinell-hardness-tester/> 25.05.2020.)
16. https://www.baq.de/files/artikel/1981/_en_dynaROCK_II_Manual (04.08.2020.)
17. Laboratorij za ispitivanje materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
18. <http://woite-edelstahl.com/aisi316len.html> (20.09.2020.)