Mjerna sposobnost optičkog sustava za očitanje veličine otiska tvrdoće

Grlić, Danijel

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:903245

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Danijel Grlić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

MJERNA SPOSOBNOST OPTIČKOG SUSTAVA ZA OČITANJE VELIČINE OTISKA TVRDOĆE

Mentor:
Doc.dr.sc. Željko Alar, dipl.ing.

Student:
Danijel Grlić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem svom mentoru doc.dr.sc. Željku Alaru na stručnoj pomoći, susretljivosti, strpljenju i podršci tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se tehničkim suradnicima Romanu Divjak i Ivanu Martinko na stučnim savjetima.

Zahvaljujem se asistentima s Katedre mjerenja i kontrole na stručnoj pomoći i korisnim savjetima.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studiranja.

I na kraju, veliko hvala mojoj curi na lekturi, strpljenju i podršci.

Danijel Grlić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Danijel Grlić** Mat. br.: 0035180699

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerna sposobnost optičkog sustava za očitanje veličine otiska tvrdoće**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement capability of an optical system for reading the hardness indentation**

Opis zadatka:

Mjerenje tvrdoće je jedno od najčešće ispitivanih mehaničkih svojstava unatoč tomu što mehanička svojstva utvrđena ispitivanjem tvrdoće nisu fizikalno jednoznačne veličine. Sustav za mjerenje veličine otiska kod Vickersove metode mjerenja tvrdoće je jedan od glavnih izvora nesigurnosti mjerenja.

U radu je potrebno sljedeće:

1. Opisati značenje mjerenja tvrdoće te opisati Vickersovu metodu.
2. Opisati vrste sustava za očitanje veličine otiska te dati literaturni pregled njihovih mjernih sposobnosti.
3. Rekonstrukcija sustava za očitanje veličine otiska LIMS_320/HV.
4. Umjeravanje sustava LIMS_320/HV i određivanje mjerne sposobnosti.
5. Obrada i analiza rezultata.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
29. rujna 2016.	1. prosinca 2016.	7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Željko Alar Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA..... III

POPIS TABLICA.....V

POPIS OZNAKA.....VI

SAŽETAK..... VIII

SUMMARY..... IX

1. UVOD.....1

2. MJERENJE TVRDOĆE.....2

2.1. Općenito.....2

2.1.1. Povijest mjerenja tvrdoće.....4

*2.1.2. Metode ispitivanja tvrdoć*e.....6

2.2. Tvrdoća po Vickersu.....6

2.3. Mjerna sljedivost.....9

3. SUSTAVI ZA OČITANJE VELIČINE OTISKA TVRDOĆE.....11

3.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10.....11

3.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV.....13

3.3. Umjeravanje mjernog sustava za očitanje otiska.....14

3.3.1. Provjera sustava za očitanje otiska.....14

4. MJERNA NESIGURNOST SUSTAVA ZA OČITANJE VELIČINE OTISKA.....16

4.1. Općenito o mjernoj nesigurnosti.....16

4.1.1. Mjerna nesigurnost.....16

4.1.2. Umjeriteljska i mjerna sposobnost.....16

4.2. Mjerni model.....16

4.2.1. Određivanje standardnih nesigurnosti.....17

4.2.2. Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti [9].....20

4.2.3. Određivanje proširene standardne nesigurnosti.....20

4.3. Mjerna nesigurnost mjerenja tvrdoće.....21

4.3.1. Osnovna podjela parametara koji utječu na mjernu nesigurnost mjerenja tvrdoće.....21

4.3.2. Postupak izračuna mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće [4].....25

4.3.3. Mjerna nesigurnost umjeravanja sustava za očitanje otiska.....27

5. EKSPERIMENTALNI DIO.....29
5.1. Plan eksperimenta.....29
5.2. Osnovne karakteristike tvrdomjera i sustava za mjerenje veličine otiska.....29
5.2.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10.....29
5.2.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV.....30
5.2.3. Sustav za mjerenje tvrdoće otiska LIMS 320/HV.....31
5.3. Podešavanje sustava LIMS 320/HV.....34
5.4. Umjeravanje sustava LIMS 320/HV.....41
5.4.1. Mjerne skale PS serije.....42
5.4.2. Rezultati umjeravanja sustava LIMS 320/HV.....43
5.5. Provjera mjernog sustava LIMS 320/HV pomoću referentnih etalona.....45
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....48
6.1. Analiza podešavanja sustava LIMS 320/HV.....48
6.2. Analiza umjeravanja sustava LIMS 320/HV.....54
6.3. Usporedna mjerenja na referentnim etalonima.....57
6.4. Mjerna sposobnost sustava za očitanje veličine otiska tvrdoće LIMS 320/HV.....61
7. ZAKLJUČAK.....69
LITERATURA.....71
PRILOG.....73

POPIS SLIKA:

Slika 2.1. Tvrdomjeri; analogni i automatizirani.....2

Slika 2.2. Otisci ispitivanja tvrdoće; a) Knoop, b) Vickers, c) Brinell.....3

Slika 2.3. Vremenska linija razvoja ispitivanja tvrdoće [2].....5

Slika 2.4. Princip ispitivanja [3].....7

Slika 2.5. Mjerna sljedivost mjerne veličine tvrdoće [4].....10

Slika 3.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10.....12

Slika 3.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV.....13

Slika 3.3. Mjerenje pomoću mjernih linija.....14

Slika 3.4. Prikaz mjerne skale [7].....15

Slika 4.1. Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine [9].....17

Slika 4.2. Studentova razdioba [9].....18

Slika 4.3. Simetrična pravokutna razdioba [9].....19

Slika 4.4. Simetrična trokutasta razdioba [9].....20

Slika 5.1. Sustav LIMS 320/HV.....32

Slika 5.2. Sučelje za mjerenje.....33

Slika 5.3. Primjer izmjerenog otiska (805,5 HV0,2 40x) s aplikacijom IC Measure.....34

Slika 5.4. Namještanje duljine podešavanja za mjernu skalu PS12 pri povećanju 20x.....35

Slika 5.5. Prikaz konfiguracije i očitanja omjera za mjernu skalu PS12 pri povećanju 20x.....35

Slika 5.6. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 40x.....41

Slika 5.7. Mjerna skala PS 26 [12].....42

Slika 5.8. Mjerna skala PS 16 [13].....42

Slika 5.9. Mjerna skala PS 12 [14].....43

Slika 5.10. Referentni otisak na referentnoj etalonskoj pločici 33P1825.....45

Slika 6.1. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 5x i duljinom podešavanja 10 µm.....48

Slika 6.2. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 10x i duljinom podešavanja 10 µm.....49

Slika 6.3. Histogram podešavanja mjernom skalom PS12 za povećanje 20x i duljinom podešavanja 10 µm.....49

Slika 6.4. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 40x i duljinom podešavanja 10 µm.....50

Slika 6.5. Mjerna skala PS16 pri povećanju 10x.....51

Slika 6.6. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 5x.....52

Slika 6.7. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 10x.....52

Slika 6.8. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 20x.....53

Slika 6.9. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 40x.....53

Slika 6.10. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 5x.....54

Slika 6.11. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 10x.....55

Slika 6.12. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 20x.....55

Slika 6.13. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 40x.....56

Slika 6.14. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu IN45180G-461,9 HV1.....57

Slika 6.15. Mjerenje referentnog otiska na etalonskoj pločici IN45180G-461,9 HV1 sa sustavom LIMS 320/HV.....58

Slika 6.16. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu 33P1825 - 204,4 HV20.....59

Slika 6.17. Rub otiska na etalonu 33P1825 - 204,4 HV20.....59

Slika 6.18. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu IN6087G-808,7 HV50.....60

Slika 6.19. Prikaz mjerenja na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV.....61

Slika 6.20. Mjerna sposobnost pri povećanju od 5x.....62

Slika 6.21. Mjerna sposobnost pri povećanju od 10x.....62

Slika 6.22. Mjerna sposobnost pri povećanju od 20x.....63

Slika 6.23. Mjerna sposobnost pri povećanju od 40x.....63

Slika 6.24. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 5x.....64

Slika 6.25. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 10x.....65

Slika 6.26. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 20x.....65

Slika 6.27. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 40x.....66

Slika 6.28. Ukupna proširena mjerna nesigurnost za sustav LIMS 320/HV.....67

Slika 6.29. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu IN45180G.....67

Slika 6.30. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu 33P1825.....68

Slika 6.31. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu IN6087G.....68

POPIS TABLICA:

Tablica 2.1. Mohs-ova ljestvica tvrdoće [1] 4

Tablica 2.2. Usporedba metoda ispitivanja tvrdoće.....6

Tablica 2.3. Sile ispitivanja [3] 8

Tablica 3.1. Povećanja i skala za tvrdomjer Zwick/ZHV10.....13

Tablica 3.2. Rezolucija očitanja mjernog sustava [6] 15

Tablica 4.1. Izvori mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće [4] 24

Tablica 4.2. Prikaz sređenog rasporeda veličina procjena, standardnih nesigurnosti, koeficijenata osjetljivosti i doprinosa nesigurnosti koji se primjenjuje u analizi nesigurnosti kod mjerenja tvrdoće [4] 25

Tablica 5.1. Karakteristike tvrdomjera Zwick/ZHV10 [11] 30

Tablica 5.2. Karakteristike tvrdomjera Indentec 5030 TKV.....31

Tablica 5.3. Karakteristike sustava LIMS 320/HV.....31

Tablica 5.4. Faktori podešavanja za povećanje 5x.....37

Tablica 5.5. Faktori podešavanja za povećanje 10x.....38

Tablica 5.6. Faktori podešavanja za povećanje 20x.....39

Tablica 5.7. Faktori podešavanja za povećanje 40x.....40

Tablica 5.8. Umjeravanje mjernom skalom PS26 za povećanje 5x sustava LIMS 320/HV....44

Tablica 5.9. Umjeravanje mjernom skalom PS12 za povećanje 40x sustava LIMS 320/HV...44

Tablica 5.10. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na sustavu LIMS 320/HV.....46

Tablica 5.11. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na tvrdomjeru Zwick/ZHV10.....46

Tablica 5.12. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV.....47

Tablica 6.1. Faktori podešavanja za povećanja.....50

Tablica 6.2. Proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV po povećanjima.....64

Tablica 6.3. Proširena mjerna nesigurnost sustava LIMS 320/HV.....66

POPIS OZNAKA:

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
Δd_{rel}	mm	relativno odstupanje izmjerenih dijagonla
ΔK	px/µm	razlika odstupanja minimalnog i maksimalnog faktora podršavanja
ΔL_{rel}	mm	relativno odstupanje pokazivanja sustava za očitavanje veličine otiska
a	mm	vrijednost skale
b	mm	konstanta skale
c_i		koeficijent osjetljivosti
d	mm	duljina dijagonale otiska tvrdoće
d_{ref}	mm	duljina dijagonale referentnog otiska tvrdoće
d_{sr}	mm	srednja vrijednost dijagonala
F	N	sila opterećivanja
F_0	N	sila predopterećenja
H		tvrdoća
k		faktor pokrivanja
K	px/µm	faktor podešavanja
K_{max}	px/µm	maksimalna vrijednost faktora podešavanja
K_{min}	px/µm	minimalna vrijednost faktora podešavanja
K_{sr}	px/µm	srednja vrijednost faktora podešavanja
$\bar{L}$	mm	aritmetička sredina mjerenja jedne točke
L_{RS}	mm	vrijednosti duljina očitana na mjernoj skali
m	kg	masa utega
n		broj opetovanih opažanja
N		broj ulaznih veličina X_i
P	%	razina povjerenja
s		standardno odstupanje
s_{Li}	µm	standardno odstupanje vrijednosti duljine
t	s	trajanje ukupnog opterećenja
t_0	s	trajanje predopterećenja
$t_p(\nu)$		t-faktor iz Studentove razdiobe
U	%	proširena mjerna nesigurnost
$u(x_i)$		standardna nesigurnost procjene x_i
$u^2(x_i)$		procijenjena varijancija pridružena procjeni x_i ulazne veličine X_i
$u_c^2(y)$		sastavljena varijancija pridružena procjeni y izlazne veličine
$u_c(y)$		sastavljena standardna nesigurnost procjene y
U_d		proširena mjerna nesigurnost za mjerenu dijagonalu
U_{ix}		proširena mjerna nesigurnost za i-to povećanje
U_L	%	proširena mjerna nesigurnost mjernog sustava

u_{LHTM}	%	relativna standardna mjerna nesigurnost tvrdomjera
u_{ms}	%	relativna mjerna nesigurnost uslijed rezolucije optičkog mjernog sustava
u_{RS}	%	relativna mjerna nesigurnost mjerne skale
ν_{eff}		stvarni broj stupnjeva slobode
ν_i		broj stupnjeva slobode
X_i		i-ta mjerena ulazna veličina
x_i		procjena i-te mjerene ulazne veličine
Y		mjerena izlazna veličina
α	°	vršni kut piramidalnog indentora
δ_{ms}	mm	rezolucija uređaja za očitavanje veličine otiska

SAŽETAK

Mjerenje tvrdoće je jednostavan postupak, ali nepoznavanje faktora koji utječu na mjerenje tvrdoće može prouzrokovati velike nesigurnosti. Sustav za mjerenje veličine otisaka tvrdoće kod Vickersove metode jedan je od tih faktora, tj. najznačajniji izvor nesigurnosti mjerenja.

U radu su opisani sustavi za mjerenje veličine otisaka tvrdoće kod Vickersove metode, te jedan sustav u razvoju, sustav LIMS 320/HV. Navedeni su njegova konstrukcija i karakteristike. Proveli su se postupci podešavanja i direktnog umjeravanja sustava LIMS 320/HV. Podešavalo se namještanjem duljine podešavanja pri povećanjima 5x, 10x, 20x i 40x pomoću mjernih skala te su kao rezultati dobiveni faktori podešavanja. Sustav se umjeravao pomoću mjernih skala čime se prikazala mjerna nesigurnost sustava. Analizom rezultata su dobivene mjerne sposobnosti za svako povećanje i ukupna mjerna sposobnost sustava izražena eksponencijalnom jednadžbom. Usporednim mjerenjem referentnih otisaka na referentnim etalonskim pločicama (IN45180G-461,9HV1, 33P1825-204,4HV20 i IN6807G-808,7HV50) potvrđeno je da je sustav primjenjiv za veličine dijagonala iznad 0,2 (ili 0,3) mm, dok je za vrijednosti ispod 0,2 mm mjerna nesigurnost velika.

Ključne riječi: Mjerenje tvrdoće, mjerna nesigurnost, mjerna sposobnost, umjeravanje, sustav za očitanje veličine otiska LIMS 320/HV.

SUMMARY

Hardness measurement is a simple procedure, but lack awareness of factors that affect hardness measurement can lead to large uncertainty. Indentation measurement systems for Vickers hardness method is one of those factors, i.e. most significant source of measurement uncertainty.

In this paper, indentation measurement system for Vickers method are described, and one who is in development, system LIMS 320/HV. His structure and characteristics are described. Procedures of alignment and direct calibration were conducted on system LIMS 320/HV. Alignment was made with adjustment of alignment length on magnifications of 5x, 10x, 20x and 40x with stage micrmeters and obtained results were alignment factors. Calibration of system was made with stage micrometer which showed measurement uncertainty. Results were analyzed and gave calibration and measurement capability for every magnification and total calibration and measurement capability of system, expressed in exponencial equation. Comparative measurement of reference indents on a standard reference blocks (IN45180G-461,9HV1, 33P1825-204,4HV20 and IN6807G-808,7HV50) confirmed that the system is effective for the size of the indent diagonal above the 0.2 (or 0.3) mm, while for values below 0.2 mm measurement uncertainty is high.

Key words: Hardness measurement, measurement uncertainty, calibration and measurement capability, calibration, indentation measurement system LIMS 320/HV

1. UVOD

Tvrdoća je svojstvo koje opisuje otpornost materijala na prodiranja tvrđeg materijala u mekši. Ispitivanje tvrdoće materijala je nerazorno makar ostavlja neznatan otisak, što ga čini podobnim za ispitivanje poluproizvoda i proizvoda. Nema uniformnu mjernu jedinicu nego je sastavljena od dvije jedinice, sile i duljine. Sila opterećuje indentor, indentor prodire u površinu uzorka i ostavlja otisak. Otisak se mjeri i uvrštava u jednadžbu za dobivanje tvrdoće materijala. Otisci se mjere s optičkim uređajima (mikroskopima), opto – električnim uređajima (kamerama) i laserskim uređajima. Da bi se izmjerena vrijednost mogla uzeti u obzir kao istinita i usporediva, potrebna su umjeravanja i ispitivanja uređaja sukladno normama. Svako umjeravanje i ispitivanje uređaja je popraćeno certifikatom i njegovom mjernom nesigurnošću. Usporedba i praćenje normi, od nivoa korisnika preko umjeriteljskih laboratorija, nacionalnog nivoa pa sve do međunarodnog, se zove sljedivost mjerenja. Izmjereni rezultat sam po sebi nema smisla ukoliko uz njega ne stoji njegova mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Pri mjerenju tvrdoće treba uzeti u obzir mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće, mjeritelja, mjeriteljskih uvjeta, uzorka i mjernog sustava. Da bi se odredila mjerna nesigurnost mjernog sustava, sustav se mora umjeriti. Umjeravanje se sastoji od mjerenja tvrdoće na referentnim etalonima tvrdoće (indirektna metoda), a sustav za očitanje se još provjerava s mjernim skalama (direktna metoda), pomoću kojih se dobiva mjerna nesigurnost umjeravanja. Na temelju mjerne nesigurnosti umjeravanja se zapravo određuje mjerna sposobnost mjernog sustava koja se definira kao najmanja mjerna nesigurnost uređaja pri svakodnevnom mjerenju etalona određene veličine. Mjerna sposobnost mjernog sustava se izražava kao proširena mjerna nesigurnost.

U ovom radu će biti opisan sustav za mjerenje veličine otiska tvrdoće LIMS 320/HV, kod Vickers metode i postupak njegova umjeravanja. Kroz rezultate podešavanja i umjeravanja sustava LIMS 320/HV će se utvrditi izvori nesigurnosti te procjenjene i proračunate mjerne nesigurnosti. Na temelju dobivenih rezultata bit će ocjenjena sposobnost ovog sustava.

2. MJERENJE TVRDOĆE

2.1. Općenito

Tvrdoća je svojstvo, tj. otpornost materijala da se odupire prodiranju tvrđeg materijala, indentora, u površinu ispitnog materijala, uzorka. Ispitivanje tvrdoće je nerazorno ispitivanje, iako oštećuje površinu. Na površini ispitnog uzorka ostavlja otisak koji ne utječe na promjenu mehaničkih svojstava materijala ili ispitivanih dijelova. Ispitivanje je poprilično jednostavno i brzo, a ispituje se i mjeri tvrdomjerom (slika 2.1.), postupkom propisnim normom koji se sastoji od:

- utiskivanja indentora u ispitni uzorak pod određenom silom i uvjetima,
- određivanja (mjerenja) dimenzija otiska.

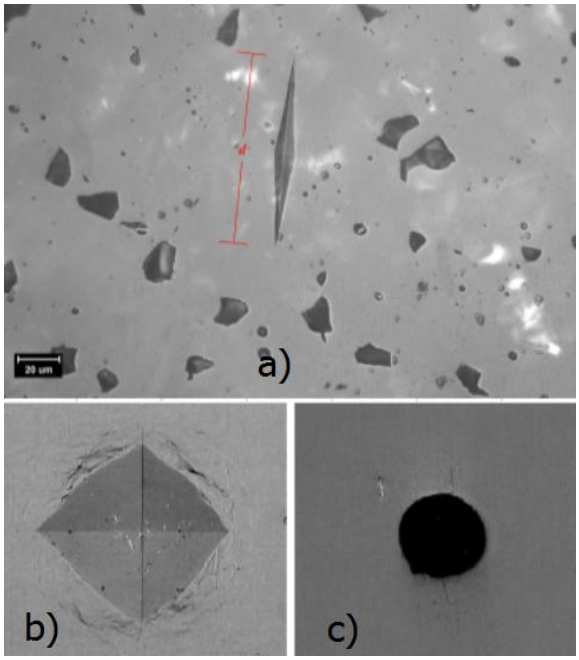


Slika 2.1. Tvrdomjeri; analogni i automatizirani

Opterećeni indentor ulaskom u uzorak ostavlja karakterističan otisak (slika 2.2.), ovisno o metodi ispitivanja.

Najčešće korištene metode ispitivanja tvrdoće su:

- Brinell,
- Knoop,
- Vickers,
- Rockwell.



Slika 2.2. Otisci ispitivanja tvrdoće; a) Knoop, b) Vickers, c) Brinell

Indentori oblikom mogu biti piramide, stošci ili kuglice. Nakon rasterećenja uzorka mjeri se veličina otiska ili dubina prodiranja indentora, iz kojih se indirektnim metodama dobivaju vrijednosti tvrdoće. Način mjerenja tvrdoće od presudne je važnosti za dobivanje točne i precizne vrijednosti tvrdoće. Odstupanje od par mikrometara u mjerenju otiska ispitnog uzorka veoma utječe na dobivenu vrijednost tvrdoće. Potreban je kvalitetan i točan sustav za mjerenje s visoko preciznom optikom. Takvi sustavi su jedan od glavnih izvora nesigurnosti pri mjerenju tvrdoće. Utjecaj okoliša, mjeritelja i priprema uzorka uveliko utječu na izmjerenu vrijednost tvrdoće. Zato je potrebno pratiti određene smjernice i pravila pri mjerenju.

Tvrdoća nema svoju fizikalnu uniformnu veličinu, izvedenica je veličine duljine koja se dobiva mjerenjem otiska i sile opterećenja na indentor. Isptivanje tvrdoće se često koristi za ispitivanje mehaničkih svojstava te se lako mogu iz tvrdoće saznati i druga mehanička svojstva kao što su otpornost na trošenje (abrazija), vlačna čvrstoća itd.

Ispitivanje tvrdoće igra važnu ulogu u ispitivanju mehaničkih svojstava i kontroli kvalitete. Koristi se za potvrdu kvalitetno provedene toplinske obrade, prihvaćanje ulaznih ili ispitivanje izlaznih dijelova u proizvodnji, razna istraživanja u znanosti. Radi potrebe za sve točnijim, preciznijim i bržim mjerenjima razvila su se i takozvana automatizirana mjerenja tvrdoće. Automatizirani tvrdomjeri rade na principu da sami opterete indentor silom opterećenja, koji se pomoću programabilnog kontrolera spušta i radi otisak na uzorku. Pomoću senzora i kamera tvrdomjer sam nalazi otisak, fokusira ga i mjeri. Na kraju se autogenerira izvještaj koji služi za

daljnju analizu. Takvi sustavi uklanjaju višak opreme koji je služio u prošlosti, izostavljajući razne komplikacije i dodatne faktore u ispitivanju i mjerenju.

2.1.1. Povijest mjerenja tvrdoće

Tvrdoća je mehaničko ispitivanje koje se mijenjalo od njegovog prvotnog otkrića u 17. stoljeću, a kao svojstvo se primijenjuje na skoro svim materijalima, posebno metalima. Tijekom godina su razvijane i upotrebljavane razne metode za određivanje tvrdoće materijala, od ranih oblika testiranja grebanjem do sofisticiranih automatiziranih programa za prepoznavanje i mjerenje otiska. Sav taj razvoj doprinio je prihvaćanju ispitivanja tvrdoće kao cijenjene metode ispitivanja materijala.

Neki od najranijih oblika ispitivanja grebanjem datiraju iz 1722.g. Ispitivanje je osmislio R.A. Réaumur, a po uzorku se grebalo te se mjerila širina ogrebotine. Kasnije, 1822.g., njemački znanstvenik Friedrich Mohs osmislio je Mohs-ovu skalu tvrdoće (tablica 2.1.).

Mohs-ova tablica se sastoji od 10 minerala, poredanih od najtvrđih 10 (dijamant) do najmekših 1 (puder). Svaki od njih može grebati onog ispod njega po hijerarhiji ljestvice. Mohs-ova ljestvica nije linearna, razlika između 9 i 10 je veća nego razlika između 1 i 2. Za usporedbu, kaljenom alatnom čeliku pripada tvrdoća između 7 i 8 na ljestvici [1].

Tablica 2.1. Mohs-ova ljestvica tvrdoće [1]

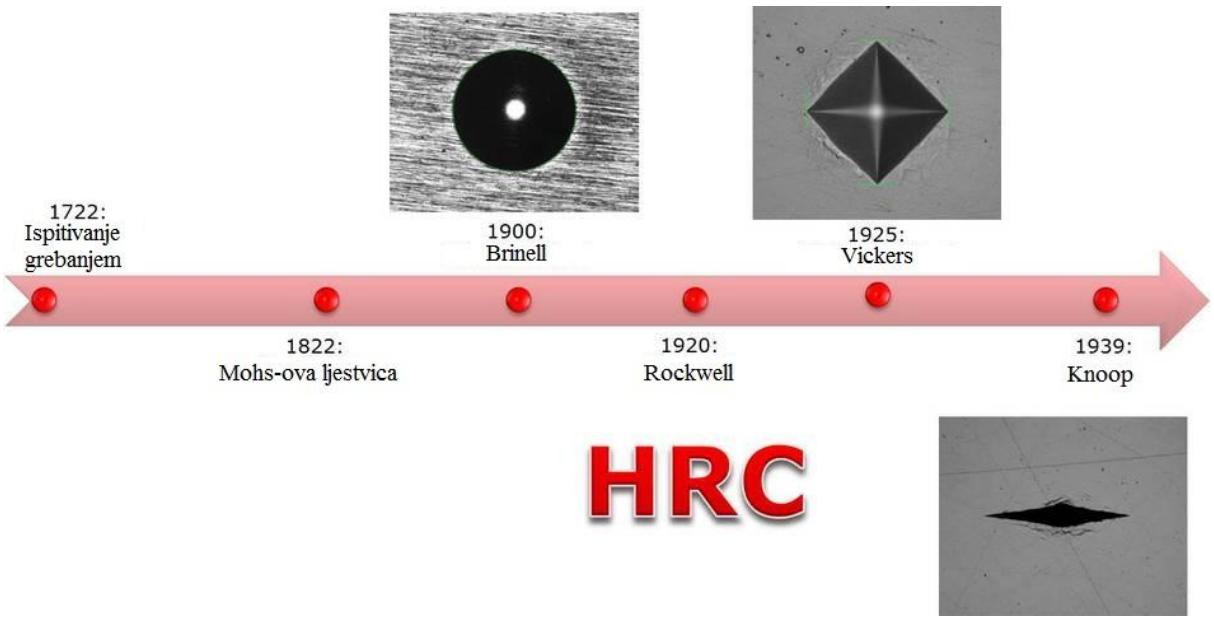
Mohs-ova ljestvica	Vrsta minerala	Vickers tvrdoća (HV)
1	Puder	2 HV
2	Gips	35 HV
3	Kalcit	100 HV
4	Fluorit	200 HV
5	Apatit	540 HV
6	Ortoklas/Feldspar	800 HV
7	Kvarc	1.100 HV
8	Topaz	1.400 HV
9	Korund	2.000 HV
10	Dijamant	10.000 HV

Prvo široko prihvaćeno i standardizirano indentacijsko ispitivanje je predložio J.A. Brinell 1900.godine. Brinellovo zanimanje za znanost o materijalima je raslo tijekom suradnje s nekoliko švedskih željezara i željom za doseljednim i brzim određivanjem tvrdoće materijala. Otprilike u isto vrijeme, Albert F. Shore je napravio i skleroskop, uređaj za ispitivanje tvrdoće

koji nije ostavljao otisak. Vickers je razvijen 1924.g. od strane Smitha i Sandlanda u Vickers Ltd., britanskom inženjerskom konglomeratu. Kasnije, u 1939.g., Fredrick Knoop je napravio alternativu Vickers-u. Iako zamišljeno kao ideja 1908.g., od strane bečkog profesora Paula Ludwika, ispitivanje tvrdoće po Rockwellu nije postalo značajno sve do oko 1914.g., kada su braća Stanley i Hugh Rockwell, iz tvrtke za proizvodnju u Bristolu, proširili ideju s korištenjem konusnog dijamantnog indentora u ispitivanju.

Najvažniji datumi u povijesti ispitivanja tvrdoće su slijedeći [2]:

- 1722.g. R.A. Réaumur razvija ispitivanje grebanjem površine mineralom za određivanje tvrdoće čelika,
- 1822.g. Mohs-ova ljestvica s 10 stupnjeva tvrdoće,
- 1900.g. J.A. Brinell razvija ispitivanje s indentacijskom kuglicom (Brinellova metoda),
- 1920.g. S.R. Rockwell razvija metodu s predopterećenjem za ispitivanje njegovih brodova,
- 1924.g. Vickers metoda razvijena od R. Smitha i G. Sandlanda (dostupno i ispitivanje mikrotvrdoće),
- 1939.g. F. Knoop, C.G. Peters and W.B.E. Emerson razvijaju Knoop metodu na američkom nacionalnom birou standarda,
- 1950.g. E.S. Berkovich, trostrana piramida za ispitivanje mikrotvrdoće.



Slika 2.3. Vremenska linija razvoja ispitivanja tvrdoće [2]

2.1.2. Metode ispitivanja tvrdoće

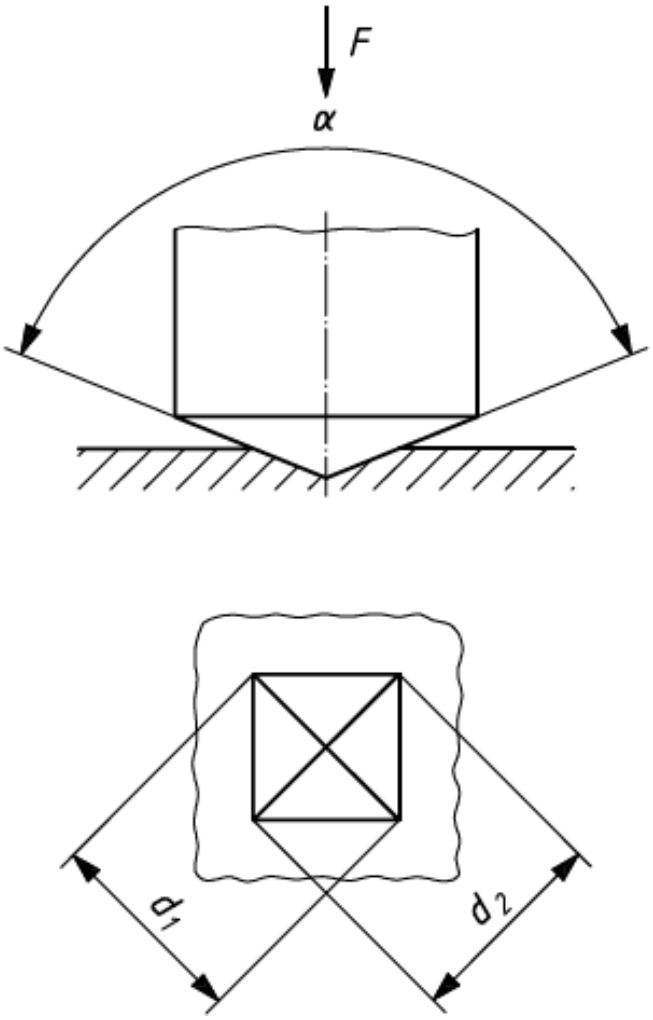
Postoje mnoge metode ispitivanja tvrdoće, ali generalno se dijele po ispitnom materijalu. Postoje metode za ispitivanje metalnih i metode za ispitivanje polimernih materijala. Najčešće primjenjivane metode za mjerenje tvrdoće metalnih materijala su Brinell, Vickers i Rockwell (tablica 2.2.), dok su druge, kao što su Shore, Knoop, itd., puno manje zastupljene.

Tablica 2.2. Usporedba metoda ispitivanja tvrdoće

Metoda/Karakteristike	Vickers HV	Brinell HB	Rockwell	
			HRC	HRB
Norma	HRN EN ISO 6507-1, 2 (DIN 50133)	HRN EN ISO 6506 (DIN 50351)	ISO 6508/EN 10004 (DIN 50103-1)	
Prikladnost ispitivanja materijala	Metalni materijali s jako malom do jako velikom tvrdoćom	Metalni materijali s jako malom do jako velikom tvrdoćom	Kaljeni čelici, kaljene i popuštene legure	Materijali srednje tvrdoće, čelici s niskim do srednjim udjelom %C, bronce, mjedi
Vlačna čvrstoća R_m (N/mm^2)	< 250 - 2000	255 - 1520	770 - 2000	250 -800
Penetrator	Četverostrana dijamantna piramida s vršnim kutem od 136°	Kaljena čelična kuglica promjera 10/15/2,5 ili 1 mm	Dijamantni stožac s vršnim kutem od 120° Radijus zakrivljenosti: 0,2 mm	Kaljena čelična kuglica promjera 1,5875 mm
Vrijeme ispitivanja/opterećivanja	10 - 15 s	10 - 15 s	2 -25 s (predopterećenje + opterećenje)	
Oznaka	640 HV 30/10	120 HB 5/250/15	45 HRC	45 HRB
	640 - vrijednost tvrdoće	120 - vrijednost tvrdoće	45 - vrijednost tvrdoće	45 - vrijednost tvrdoće
	HV - tvrdoća po Vickersu	HB - tvrdoća po Brinellu	HRC - metoda po Rockwell C	HRB - metoda po Rockwell B
	30 - opterećenje F = 294 N	5 - promjer indentora		
	10 - trajanje ispitivanja, s	250 - opterećenje u kg		
		15 - trajanje ispitivanja, s		

2.2. Tvrdoća po Vickersu

Tvrdoća po Vickersu (HV) je mjera otpornosti prodiranja dijamantne piramide s vršnim kutom od 136º u ispitni materijal (uzorak) pod određenim opterećenjem F (N) (slika 2.4.). Metoda je potekla kao zamjena ispitivanju po Brinellu. Sukladno tome, vršni kut piramide je odabran prema indentoru koji ostavlja udubljenje promjera $d = 0{,}375D$ (prosječna vrijednost donje i gornje granice promjera udubljenja koja se kreće od (0,25 do 0,5) D, unutar koje su rezultati ispitivanja po Brinellu upotrebljivi). Ispitivanjem po Vickersu ostaje otisak iskrivljenog kvadrata ili romba. Mjere se obje dijagonale te se uzima njihova srednja vrijednost.



Slika 2.4. Princip ispitivanja [3]

Jednadžba za izračun tvrdoće po Vickersu [3]:

$$HV = konstanta \times \frac{sila\ ispitivanja}{površina\ otiska} = 0{,}102 \times \frac{2Fsin\frac{136}{2}}{d^2} = 0{,}1891 \times \frac{F}{d^2}, \qquad (1)$$

gdje je:

α – vršni kut piramidalnog indentora,

F – sila ispitivanja, N,

d – aritmetička sredina dviju dijagonala, d_1 i d_2, mm,

HV – oznaka za tvrdoću po Vickersu,

Konstanta – 0,102 ≈ 1/9,80665; gdje je 9,80665 pretvorbeni faktor iz kgf u N.

S obzirom da tvrdoća nema svoju mjernu jedinicu, napravljen je sistematski način izražavanja tvrdoće.

Primjer:

640 HV 30 / 10 gdje je:

- 640 – dobivena vrijednost tvrdoće,
- *HV* – oznaka za tvrdoću po Vickersu,
- 30 – sila ispitivanja, 30 kg = 294 N
- 10 – vrijeme pod silom ispitivanja.

Generalno, ispitivanja se provode pod temperaturom od 10 °C do 35 °C. U kontroliranim uvjetima, ispitivanja se provode na temperaturi od (23 ± 5) °C. Preporučene ispitne sile su prikazane u tablici 2.3. [3].

Tablica 2.3. Sile ispitivanja [3]

Normalne sile ispitivanja		Male sile ispitivanja		Sile ispitivanja mikrotvrdoće	
Oznake tvrdoće	Nominalna vrijednost sile ispitivanja *F*, N	Oznake tvrdoće	Nominalna vrijednost sile ispitivanja *F*, N	Oznake tvrdoće	Nominalna vrijednost sile ispitivanja *F*, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

Za konvencionalno ispitivanje tvrdoće po Vickersu koriste se nominalne vrijednosti sile ispitivanja (od 49,03 N do 980,7 N). Male sile ispitivanja (od 1,961 N do 29,42 N) su za ispitivanje semitvrdoće, a najmanjim silama (od 0,09807 N do 0,9807 N) se ispituje mikrotvrdoća. Mikrotvrdoća se većinom koristi za ispitivanje tankih slojeva materijala, faza materijala i tankih uzoraka. Sile ispitivanja mogu prijeći 980,7 N.

Ispitivanje započinje približavanjem indentora u dodir s ispitnom površinom te nametanjem sile ispitivanja u smjeru okomitom na uzorak sve dok sila opterećenja ne postigne svoju vrijednost. Vrijeme postizanja pune vrijednosti ne smije biti manje od 2 s ili veće od 8 s. Za male sile ispitivanja tvrdoće i mikrotvrdoće vrijeme postizanja ne smije prijeći 10 s, a brzina prilaska indentora površini 0,2 mm/s. Vrijeme trajanja ispitivanja mora biti unutar 10 do 15 s,

osim za materijale čija su svojstva vremenski promenjiva. Tijekom ispitivanja tvrdomjer mora biti zaštićen od udara ili vibracija [3].

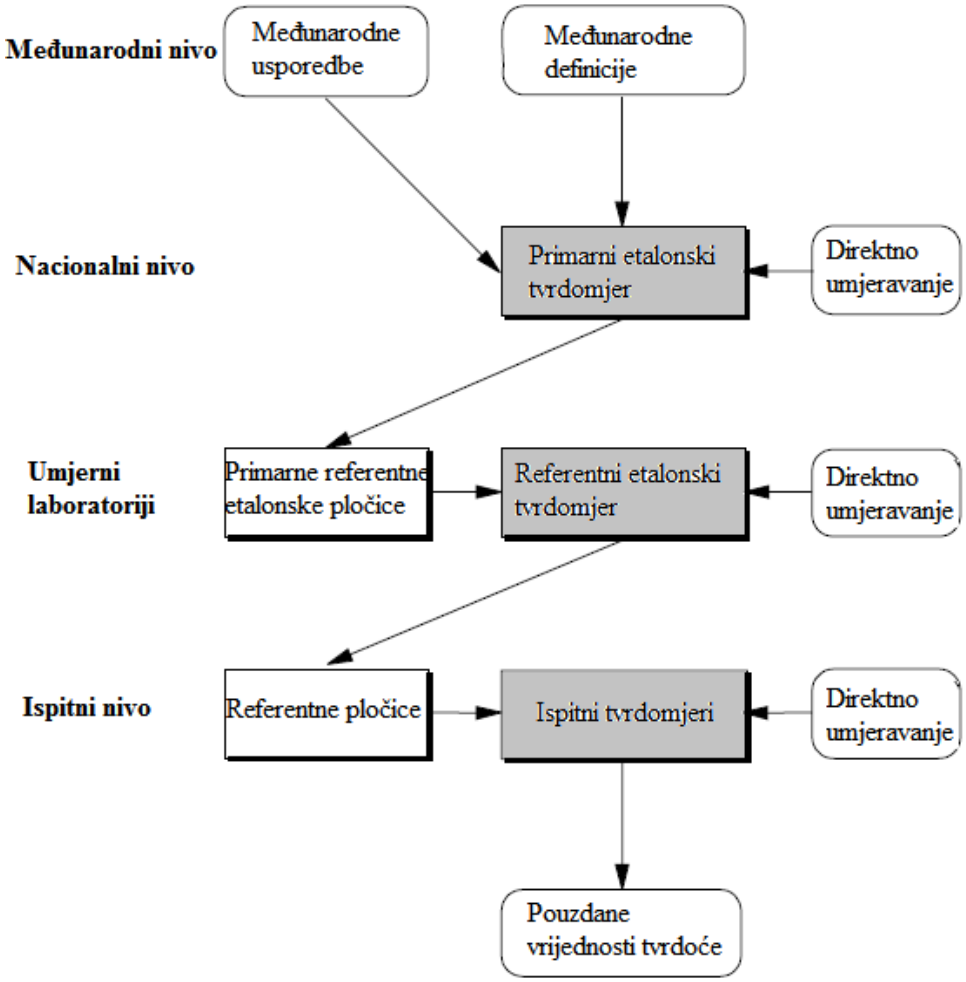
Za čelike udaljenost od otiska do ruba uzorka mora biti najmanje 2,5 puta srednja vrijednost duljine dijagonala, dok kod lakih metala mora biti 3 puta veća. Npr., ako su dva susjedna otiska različite veličine, razmak između njih će se temeljiti na srednjoj vrijednosti veće dijagonale.

Za ravne ispitne površine, razlika u veličini dijagonala otiska ne smije biti veća od 5%. U slučaju da je, mora se navesti u izvještaju [3].

Ispitivanje se mora provesti na glatkoj, ravnoj, neoksidiranoj i čistoj površini. Za mikrotvrdoću se površina uzorka dodatno polira. Debljina uzorka ili sloja koji se ispituje mora biti najmanje 1,5 puta dijagonala otiska. Ne bi smjelo biti vidljivih deformacija na pozadini uzorka nakon ispitivanja. Za uzorke malog poprečnog presjeka ili iregularnog oblika potrebno je koristiti dodatne oslonce za njihovu stabilizaciju tijekom ispitivanja.

2.3. Mjerna sljedivost

Tvrdoća je veličina dobivena ispitivanjem na uzorku, definiranim određenim smjernicama i uputama po propisanoj normi. Da bi se ta izmjerena vrijednost mogla uzeti u obzir kao istinita i usporediva, potrebna su umjeravanja i ispitivanja opreme, također opisana nacionalnim normama. Usporedba i praćenje tih normi, od nivoa korisnika preko umjeriteljskih laboratorija, nacionalnog nivoa sve do međunarodnog, se zove sljedivost mjerenja (slika 2.5.).



Slika 2.5. Mjerna sljedivost mjerne veličine tvrdoće [4]

Područje skala tvrdoće je zasnovano na tri glavna elementa [4]:

- Definicija skale tvrdoće: Opis metode mjerenja, relevantne tolerancije uključenih veličina i ograničavajući uvjeti okoline.
- Referentni tvrdomjer: Mjerni uređaj koji materijalizira definiciju skale tvrdoće. Potrebno je razlikovati primarni etalon tvrdoće koji najbolje realizira definiciju skale tvrdoće i referentni etalon korišten za proizvodnju referentnih pločica tvrdoće.
- Referentne pločice tvrdoće: Potrebno je razlikovati primarne etalonske pločice umjerene primarnim etalonima, koje se koriste kada su potrebne najveće preciznosti, npr. za vefirikaciju i umjeravanje referentnih etalona tvrdoće i referentne pločice za tvrdoću namijenjene pretežno za verifikaciju i umjeravanje industrijskih ispitnih tvrdomjera.

3. SUSTAVI ZA OČITANJE VELIČINE OTISKA TVRDOĆE

Sustavi za očitanje veličine otiska tvrdoće su optički, opto-električni ili laserski uređaji koji mjere veličinu otiska. Pod mjerenje se podrazumijeva mjerenje dijagonala (Vickers i Knoop), promjera (Brinell), dubine (Rockwell) i površine otiska. Pod optičke sustave pripadaju razni mikroskopi, a pod opto-električne uređaji izrađeni od mikroskopa uz dodatak kamere i automatizirani uređaji za mjerenje veličine otiska. Laserski uređaji većinom služe za mjerenje dubine otiska. Za mjerenje otisaka napravljenih Vickers metodom generalno se koriste optički i opto-električni sustavi koji imaju visoku točnost, preciznost, malu mjernu nesigurnost i nisku mjernu rezoluciju.

U posjedu LIMS-a su tri sustava za ispitivanje i očitanje:

- Tvrdomjer Zwick/ZHV10,
- Tvrdomjer INDENTEC 5030 TKV,
- Sustav za očitanje veličine otiska LIMS 320/HV (novi sustav u razvoju).

3.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10

Proizvođač tvrdomjera Zwick/ZHV10 je tvrtka Zwick/Roell, Njemačka, koji je najpoznatiji proizvođač tvrdomjera.

Tvrdomjer je specijaliziran za ispitivanja i mjerenja slijedećeg:

- Tvrdoća po Vickersu,
- Tvrdoća po Knoopu,
- Tvrdoća po Brinellu.



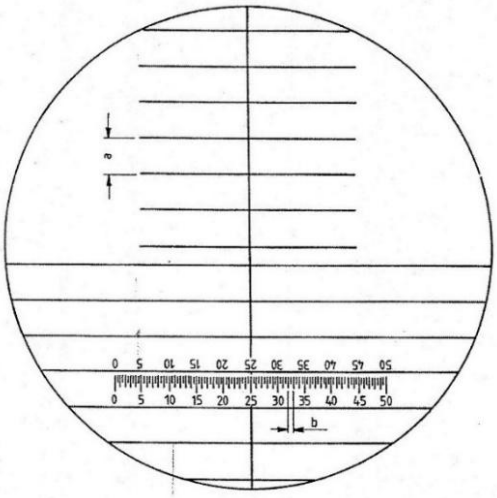
Slika 3.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10

Prilikom mjerenja prvo se uzme objektiv koji će dati ukupno povećanje potrebno da se otisak pregledno i čisto vidi. Otisak mora biti orijentiran tako da su mu dijagonale, horizontalna pod 0° (180°) i vertikalna pod 90° (270°), a doljnji rub namješten na sjecištu vertikalne i horizontalne crte mjernog područja. Dodatno se fokusira otisak da se precizno vide granice otiska. Kada je otisak u fokusu broji se koliko je puta (x_1) područje "a" (tablica 3.1.) unutar otiska te se množi s vrijednosti skale "a" za uzeto povećanje. Slijedeći korak je da se pomakne kotačić i dovede najbliža crta u gornji rub otiska, za precizniju mjeru. Na mjernoj skali se iščita vrijednost (x_2) te se pomnoži s konstantom "b" za uzeto povećanje. Dvije iščitane vrijednosti množene s pripadajućim im konstantama se zbrajaju te se dobiva duljina jedne dijagonale.

$$d_1 = x_1 \times a + x_2 \times b \qquad (2)$$

Ponavlja se postupak za drugu dijagonalu, a kao rezultat se uzima srednja vrijednost dijagonala d_{sr} s kojom se ide u tablice [5] iz kojih se iščita vrijednost tvrdoće ili se preko izraza (1) izračuna.

Tablica 3.1. Povećanja i skala za tvrdomjer Zwick/ZHV10



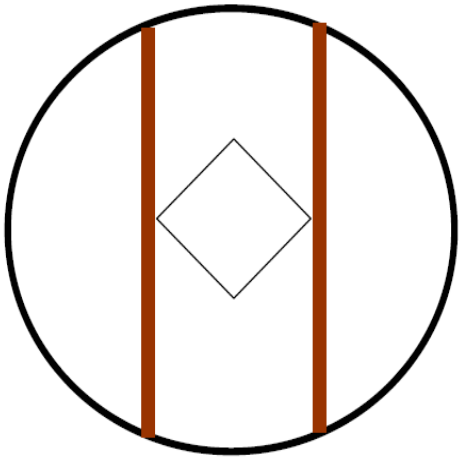
Ukupno povećanje *Gesamtvergrößerung*	Povećanje objektiva *Objektivvergrößerung*	Vrijednost skale a *Skalenvert a* mm	Konstanta skale b *Skalenkonstante b* mm	Mjerno područje *Meßbereich* mm	Udaljenost objektiva od uzorka *Objektivabstand zur Probe* mm	Postavljanje oznaka tolerancije *Toleranzmarkeneinstellung* mm
50 x	5 x	0,2	0,004	0...2,4	Ca. 31,5	0...0,072
100 x	10 x	0,1	0,002	0...1,2	Ca. 10,4	0...0,036
200 x	20 x	0,05	0,001	0...0,6	Ca. 1,8	0...0,018
400 x	40 x	0,025	0,0005	0...0,3	Ca. 0,9	0...0,009
600 x	60 x	0,0166	0,00033	0...0,18	Ca. 0,4	0...0,006

3.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV

Indentec 5030 TKV (slika 3.2.) je tvrdomjer koji ispituje i mjeri tvrdoću. Nema mogućnost promjene povećanja, ono je uvijek 10x. Otisak se fokusira, a mora biti orijentiran tako da su mu dijagonale, horizontalna pod 0° (180°) i vertikalna pod 90° (270°). Mjeri pomoću mjernih linija (slika 3.3.) koje su u okularu. Gleda se kroz okular te se desnim kotačićem namješta lijeva mjerna linija na lijevi rub otiska, a lijevim kotačićem desna linija na desni rub otiska. Rezultat dijagonale se očita na ekranu. Otisak se zarotira i ponovi se mjerenje za drugu dijagonalu te se izračunaju aritmetička sredina i vrijednost tvrdoće.



Slika 3.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV



Slika 3.3. Mjerenje pomoću mjernih linija

3.3. Umjeravanje mjernog sustava za očitanje otiska

Umjeravanje se provodi po normi HRN EN ISO 6507: 2008 [6].

Tvrdomjer se umjerava na direktan ili indirektan način. Direktan način umjeravanja podrazumijeva premjeravanje sustava za očitanje pomoću mjerne skale, a indirektan preko referentnih etalona tvrdoće.

Direktno umjeravanje se mora provesti na temperaturi od (23 ± 5) °C, u suprotnom se temperatura ispitivanja mora navesti u izvještaju. Istrumenti korišteni za provjeravanje i umjeravanje su povezivi s nacionalnim etalonima za pojedinu veličinu [6].

Direktna metoda umjeravanja obuhvaća [6]:

- provjere sile ispitivanja,
- provjere indentora,
- provjere sustava za očitanje otiska,
- provjere ispitnog ciklusa.

3.3.1. Provjera sustava za očitanje otiska

Provjera sustava za očitanje otiska provodi se prema mogućnostima očitanja na mjernoj skali i određuje prema veličini mjerenja najmanjeg otiska. Skala mjernog uređaja mora biti podijeljena tako da omogućuje mjerenja dijagonala prema zahtjevima koji su navedeni u tablici 3.2.

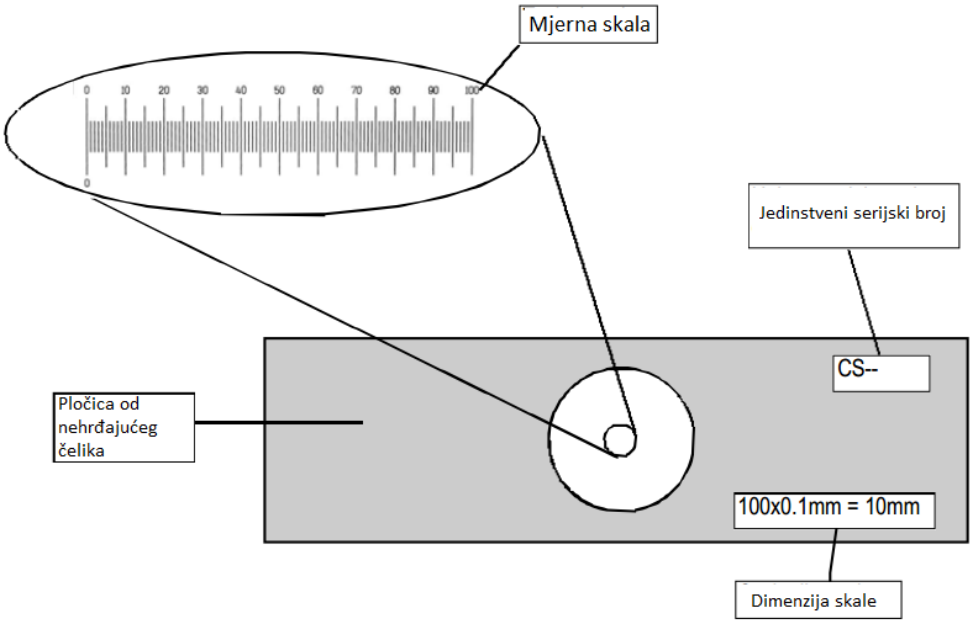
Tablica 3.2. Rezolucija očitanja mjernog sustava [6]

Duljina dijagonale d, mm	Rezolucija mjernog uređaja	Maksimalno dozvoljeno odstupanje
$d \leq 0{,}040$	0,0002 mm	0,0004 mm
$0{,}040 < d \leq 0{,}200$	0,5 % od d	1 % od d
$d > 0{,}200$	0,001 mm	0,002 mm

Sustav očitanja otiska se umjerava mjerenjima mjerne skale u minimalno 5 intervala preko cijelog mjernog područja. Maksimalno dozvoljeno odstupanje ne smije prijeći vrijednosti dane u tablici 3.2. [6].

3.3.1.1. Mjerne skale

Mjerne skale su pločice s mjernom raspodjelom duljine na sebi (slika 3.4.). Skala ima svoje realne vrijednosti s visokom točnosti. Koriste se za umjeravanje optičkih sustava za mjerenje i praćenje mjerne sljedivosti. Postoji puno vrsta mjernih skala za razna umjeravanja. Na sebi imaju ugraviran serijski broj radi lakše mjerne sljedivosti.



Slika 3.4. Prikaz mjerne skale [7]

4. MJERNA NESIGURNOST SUSTAVA ZA OČITANJE VELIČINE OTISKA

4.1. Općenito o mjernoj nesigurnosti

4.1.1. Mjerna nesigurnost

Izmjerena veličina ili rezultat je samo procijenjena vrijednost mjerne veličine koja ne opisuje u potpunosti rezultat mjerenja. Kada se iskazuje izmjerena veličina, obavezno se daje neki količinski pokazatelj kakvoće tog rezultata, tako da se iz njega može procijeniti njegova pouzdanost. Bez takvog pokazatelja, mjerni se rezultat ne može međusobno uspoređivati i koristiti. Da bi se mogli koristiti i lakše razumjeti ti rezultati, uz njih je potrebno izraziti njihovu nesigurnost.

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjernoj veličini [8].

Način iskazivanja mjernih rezultata:

Mjerni rezultat = najbolja procjena vrijednosti mjerne veličine + mjerna nesigurnost.

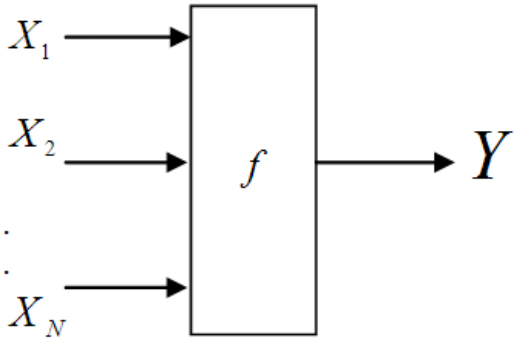
4.1.2. Umjeriteljska i mjerna sposobnost

Umjeriteljska i mjerna sposobnost (CMC) je najmanja moguća mjerna nesigurnost nekog laboratorija pri svakodnevnom umjeravanju mjernih etalona neke veličine. Mjerna sposobnost je zapravo povećana ili proširena mjerna nesigurnost, obično s faktorom pokrivanja $k = 2$ i vjerojatnosti od 95%. Obično se iskazuje analitički i preko dijagrama koji daju nedvosmislen zaključak.

Mjerna sposobnost ima višestruko značenje. Daje korisnicima usluga umjeravanja i mjerenja prikladnu procjenu mogućnosti određenog laboratorija za provođenje određenih mjerenja i omogućava usporedbu međusobnih mogućnosti raznih mjeriteljskih laboratorija.

4.2. Mjerni model

U većini slučajeva mjerena veličina Y ne mjeri se izravno nego se određuje iz N drugih veličina X_1, X_2,...X_N na temelju funkcijskog odnosa $Y = f(X_1, X_2, ..., X_N)$ koji predstavlja osnovni matematički model za potpuno određenje mjerene veličine (slika 4.1.) [9].



Slika 4.1. Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine [9]

Ulazne veličine X_1, X_2,...X_N o kojima ovisi izlazna veličina Y mogu se promatrati kao mjerene veličine i mogu ovisiti o drugim veličinama dovodeći tako do složenog funkcijskog odnosa koji se ne mora uvijek moći eksplicitno napisati [9].

4.2.1. Određivanje standardnih nesigurnosti

Standardna nesigurnost se određuje na dva načina. Jedan način je statistička procjena rezultata izravno iz mjerenih veličina - procjena standardne nesigurnosti A-vrste. Drugi način je procjena koja se temelji na prije izmjerenim podacima i iskustvu i zove se procjena standardne nesigurnosti B-vrste.

4.2.1.1. Određivanje standardne nesigurnosti A-vrste [9]

Vrlo jednostavno, može se reći da se proračun nesigurnosti A-vrste temelji na statističkoj analizi niza ponovljenih mjerenja. Procijenjeno standardno odstupanje izračunato iz niza ponovljenih mjerenja ujedno je procijenjeno standardno odstupanje $u(x_i)$ koje opisuje sastavnicu nesigurnosti A-vrste i često se naziva standardna nesigurnost A-vrste. Za opisivanje sastavnice nesigurnosti A-vrste potrebno je dati i broj stupnjeva slobode v_i nesigurnosti $u(x_i)$. Za veličinu procijenjenu pomoću srednje vrijednosti niza ponovljenih mjerenja broj stupnjeva slobode v jednak je n-1. Ukoliko se procjena x_i ulazne veličine X_i dobiva iz krivulje dobivene metodom najmanjih kvadrata broj stupnjeva slobode standardne nesigurnosti bit će n-2.

4.2.1.2. Određivanje standardne nesigurnosti B-vrste [8]

Za procjenu x_i ulazne veličine X_i koja nije dobivena iz opetovanih opažanja pridružena procjena varijancije $u^2(x_i)$ ili standardna nesigurnost $u(x_i)$ izračunava se znanstvenom prosudbom koja se temelji na svim raspoloživim podacima o mogućoj promjenljivosti X_i.

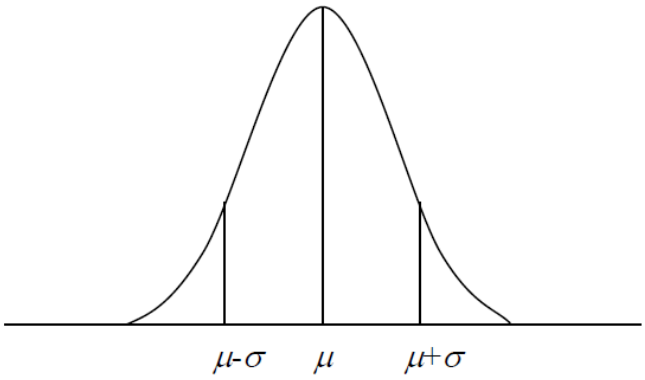
Takav skup podataka može uključivati:

- prijašnje mjerne podatke,
- iskustvo s tvarima i instrumentima ili opće poznavanje ponašanja i svojstava bitnih tvari i instrumenata,
- proizvodne specifikacije,
- podatke dane u potvrdama o umjeravanju i drugim potvrdama,
- nesigurnosti dodijeljene referentnim podacima uzetim iz priručnika.

Radi pogodnosti na ovaj način određene $u^2(x_i)$ i $u(V)$ katkad se nazivaju redom varijancijom B-vrste i standardnom nesigurnošću B-vrste. Ispravna uporaba skupa raspoloživih podataka za određivanje standardne nesigurnosti B-vrste zahtijeva sposobnost opažanja koja se temelji na iskustvu i općem znanju, a to je vježba koja se praksom može naučiti. Trebalo bi priznati da određivanje standardne nesigurnosti B-vrste može biti isto tako pouzdano kao i određivanje A-vrste, posebno u mjernim situacijama gdje se određivanje A-vrste temelji na razmjerno malom broju statistički neovisnih opažanja.

4.2.1.3. Razdiobe vjerojatnosti

Ako se procjena x_i ulazne veličine X_i temelji na nizu ponovljenih mjerenja n, standardna nesigurnost $u(x_i)$ dobiva se iz Studentove razdiobe (slika 4.2.), uz faktor Studentove razdiobe $t_p(v)$ koji ovisi o broju stupnjeva slobode v i traženoj vjerojatnosti P. Svođenje procijenjenog standardnog odstupanja na razinu standardne nesigurnosti izvodi se dijeljenjem s t_p - faktorom Studentove razdiobe [9].



Slika 4.2. Studentova razdioba [9]

U slučaju kad $v \rightarrow \infty$ t-razdioba se približava normalnoj razdiobi, a $t_p(v) \approx \sqrt{(1+\frac{2}{v})} \times k$,

gdje je k faktor pokrivanja za normalnu raspodjelu uz vjerojatnost P. Ako je $u_c^2(y)$ zbroj dviju ili više procijenjenih sastavnica varijance $u_i^2(y)=c_i^2u^2(x_i)$, primjenom centralnog graničnog teorema, razdioba te varijable također se približno može opisati t-razdiobom sa stvarnim brojem stupnjeva slobode v_{eff} dobivenim iz Welch-Satterthwaiteove formule prema izrazu [9]:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \qquad (3)$$

gdje je

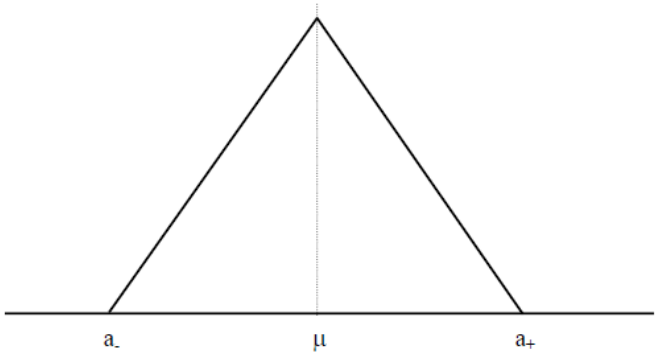
$$u_i(y) = |c_i|u(x_i). \qquad (4)$$

Kad se procjena ulazne veličine temelji na procjeni granica intervala pojavljivanja (od $-a$ do $+a$), uz jednaku vjerojatnost pojavljivanja unutar cijelog procijenjenog intervala, odnosno vjerojatnost da ulazna veličina leži izvan tog intervala jednaka je ništici, tada se standardna nesigurnost dobiva iz pravokutne razdiobe (slika 4.3.) mogućih vjerojatnosti. Svođenje procijenjenog standardnog odstupanja na razinu standardne nesigurnosti izvodi se dijeljenjem s √3 [9].



Slika 4.3. Simetrična pravokutna razdioba [9]

Simetrična trokutasta razdioba (slika 4.4.) koristi se u slučaju kada se pretpostavlja procjena ulazne veličine određene vrijednosti, a vjerojatnost pojavljivanja u granicama od $-a$ do $+a$ u okolici pretpostavljene vrijednosti je nepoznata. Svođenje na standardnu nesigurnost izvodi se dijeljenjem s √6 [9].



Slika 4.4. Simetrična trokutasta razdioba [9]

4.2.2. Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti [9]

Standardna nesigurnost veličine y, gdje je y procjena mjerene veličine Y pa prema tomu i mjernog rezultata, dobiva se odgovarajućim sastavljanjem standardnih nesigurnosti procjene ulaznih veličina x_1, x_2,...,x_N. Ta sastavljena standardna nesigurnost procjene y označuje se s $u_c(y)$. Sastavljena je standardna nesigurnost $u_c(y)$ pozitivni drugi korijen sastavljene varijancije $u_c^2(y)$, koja je dana izrazom:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \qquad (5)$$

Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ procjena je standardnog odstupanja i opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini Y.

Premda se sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ može sveobuhvatno upotrebljavati za izražavanje nesigurnosti mjernog rezultata, u nekim trgovačkim, industrijskim i upravnim primjenama te kad je riječ o zdravstvu i sigurnosti često je nužno dati mjeru nesigurnosti koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe vrijednosti koje se razumno mogu pridružiti mjerenoj veličini [8].

4.2.3. Određivanje proširene standardne nesigurnosti

Dodatna mjera nesigurnosti koja zadovoljava zahtjev za osiguranje određenog intervala te vrste naziva se povećanom nesigurnošću i označuje slovom U. Povećana nesigurnost dobiva se množenjem sastavljene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ faktorom pokrivanja k [8]:

$$U = k \times u_c(y) \qquad (6)$$

Vrijednost faktora pokrivanja k može se samo naći ako postoji široko znanje o razdiobi vjerojatnosti svake ulazne veličine i ako se te razdiobe sastavljaju da bi se dobila razdioba izlazne veličine. Procjene x_i ulaznih veličina i njihove standardne nesigurnosti $u(x_i)$ same nisu prikladne za tu svrhu [9].

Mjerni rezultat tada se dogovorno izražava kao $Y = y \pm U$, čime se hoće reći da je y najbolja procjena vrijednosti koja se može pripisati mjerenoj veličini Y i da je $y - U$ do $y + U$ interval za koji se može očekivati da obuhvaća velik udio razdiobe vrijednosti koje bi se mogle razumno pripisati veličini Y. Takav interval također se izražava kao $y - U \leq Y \leq y + U$ [8].

4.3. Mjerna nesigurnost mjerenja tvrdoće

Postoje mnogi faktori koji utječu na mjerenje tvrdoće. Neki od njih utječu više, a neki manje. Odmak od jednog mikrometra u mjerenju znatno mijenja tvrdoću nekog uzorka. Zato treba nabrojati sve te faktore i za njih izračunati mjernu nesigurnost kako bi se znali njihovi utjecaji na mjerenje.

4.3.1. Osnovna podjela parametara koji utječu na mjernu nesigurnost mjerenja tvrdoće je:

- ispitni uzorak,
- tvrdomjer,
- okoliš,
- mjeritelj.

4.3.1.1. Ispitni uzorak [4]

Ispitni uzorak ima velik broj značajnih izvora nesigurnosti. Debljina materijala može imati utjecaj na mjerenje tvrdoće ako je izabrana kriva metoda ispitivanja. Ispitni uzorak mora biti odgovarajuće debljine ovisne o ispitnoj sili. Što je dublji otisak, to deblji uzorak mora biti. Pretanki uzorak će pokazati preveliku tvrdoću radi efekta nakovnja. Ukoliko je uzorak pretanak, a sila prevelika, postoji mogućnost oštećenja indentora, a to utječe na pouzdanost svih ostalih mjerenja koja se provode s tim indentorom.

Kvaliteta površine ispitnog uzorka također ima značajan utjecaj na rezultate mjerenja tvrdoće. Hrapavija površina bi zahtjevala veće sile i veći indentor kako bi se dobio veći otisak. Utjecaj hrapavosti ima najmanji učinak na ispitivanje po Brinellu. Uglavnom, jednoličnost površine je važna za točne i ponovljive rezultate.

Čistoća površine je također bitna za precizne i ponovljive rezultate mjerenja tvrdoće. Površine onečišćene mašću, raznim oksidima ili prašinom mogu dati značajna odstupanja u rezultatima, štoviše, može doći od nepovratnog oštećenja uzoraka ili referentnih pločica.

4.3.1.2. Uređaj za ispitivanje tvrdoće [4]

Konstrukcija, sastavljanje i uvjeti uređaja za ispitivanje tvrdoće su vrlo značajni za pouzdanost rezultata. Jako trenje može dovesti do naprezanja i nemogućnosti ispravnog ponavljanja mjerenja. Čak i uređaji koji pravilno rade mogu dati loše rezultate zbog prevelikog trenja u sustavu za primjenu sile. Slični doprinosti nesigurnosti mogu se očekivati kod sustava za mjerenje dubine otiska zbog slabog trenja.

Jaka iskrivljenost okvira uređaja i sustav koji podržava ispitivani uzorak mogu također uzrokovati probleme. Odstupanja od 1 do 3 jedinice tvrdoće nisu rijetkost zbog nepravilnog pridržavanja ispitnog uzorka i jakih izobličenja okvira tvrdomjera.

Sustav za opterećivanje mora uvijek davati točne iznose sile. Visoko kvalitetna mjerna oprema mora biti u stanju primjenjivati sile unutar granica od ± 1 % F na razini korisnika ili čak od ± 0,1 % F nazivne sile kod etalonskih tvrdomjera. Pri procesu djelovanja opterećenja zahtijeva se da brzina i vrijeme zastoja, u kojem se primjenjuje opterećenje, budu definirani. Varijacije cikličkih parametara ispitivanja, koje se mogu javiti kod nekih ručno kontroliranih tvrdomjera, mogu dovesti do varijacija u rezultatu (npr. kod Rockwell metode do ±1 HRC pri 60 HRC). Mekši materijali i materijali koji su podložni mehanizmu hladnog deformacijskog očvrsnuća, mogu dati značajno veće nesigurnosti. U tim slučajevima treba specifično procijenjivati nesigurnost vremena zastoja primjenjene sile i brzinu utiskivanja indentora.

Svojstva indentora također utječu na nesigurnost mjerenja tvrdoće. Relativno je lako proizvesti kuglicu potrebnih dimenzija za Brinell. Međutim, držač kuglice je glavni izvor nesigurnosti. Dijamantne indentore je teže proizvesti u željenim dimenzijama. Potencijalni izvori nesigurnosti su značajni, ali u tom kontekstu nije potrebno kategorizirati utjecaje svakog od njih.

4.3.1.3. Okoliš [4]

Temperatura okoliša može imati značajan utjecaj na rezultate mjerenja tvrdoće, naročito kod malih duljina dijagonala otiska. Niža granica za duljine dijagonala kod Vickersa od 20 µm, uz utjecaj okoliša, može dovesti do većih rasipanja rezultata mjerenja. Shodno odgovarajućim normama, propisano temperaturno područje za ispitna mjerenja je 10 °C do 35 °C, a za

umjeravanje referentnih pločica (23 ± 5) °C. Za neke skale tvrdoće ove su granice široke, no rad izvan tih granica u svakom slučaju treba zabrinjavati. Ukoliko se to ne može izbjeći, treba provesti komparativna mjerenja, kako bi se procijenio utjecaj temperature.

Vibracije, električne interferencije i nedostatak čistoće mogu dovesti do značajnih problema koji se teško kvantificiraju. Mjerenja mikrotvrdoće s ultra malom silom, zahtijevaju naravno potpunu odsutnost vibracija, dok zahtjevi za vibracijama pri ispitnim silama iznad 200 mN nisu tako kritični.

4.3.1.4. Mjeritelj

Pozicije mjernih točaka ispitivanja na površini uzorka su bitne u više slučajeva. Mjerenje blizu ruba uzorka ili mjerenje točaka koje su preblizu jedna drugoj, mogu prouzročiti velike nesigurnosti. Nesigurnosti do 2HRC nisu neobične u ovom slučaju. Sveukupno nadziranje ispitivanja i mjerenja je jako važno. Neki moderni uređaji za ispitivanje tvrdoće imaju mogućnosti minimizacije utjecaja mjeritelja, no bez obzira, mjeritelj je i dalje od bitnog značenja za uspješno mjerenje tvrdoće [4].

Osim navedenih utjecaja mjeritelja, postoji ih još. Jedna od njih je i vid, jer će mjeritelj sa slabijim vidom npr. morati bolje ili drugačije fokusirati otisak uzorka na mikroskopu te time dobiti drugačiju vrijednost dijagonale. Iskustvo i poznavanje uređaja i opreme je također bitno, dokazano je da će mjeritelj s manje iskustva drugačije izmjeriti dijagonale od mjeritelja s više iskustva.

Najznačajniji utjecaj koji se pridodaje pogreški tijekom mjerenja otiska je osobna pogreška koja varira među raznim mjeriteljima tijekom mjerenja dijagonala. Neiskusniji mjeritelj obično dobiva manja mjerenja dijagonala od stvarnih. Prekomjerna izmjera dijagonala se lakše uoči zbog malog razmaka između otiska i paralelne linije [10].

U tablici 4.1. je dan popis izvora mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće.

Tablica 4.1. Izvori mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće [4]

Utjecajni faktor	Izvor nesigurnosti	Napomena	Parametar	
1. Ispitni uzorak	Mala debljina uzorka			
	Krutost			
	Krutost pomoćnih dijelova			
	Hrapavost površine	Značajno u slučaju izbora krive metode		
	Veličina zrna u mikrostrukturi			
	Nehomogena raspodjela tvrdoće			
	Čistoća površina			
Ispitni uređaj (tvrdomjer)				
okvir tvrdomjera	Gubici uslijed trenja			
	Elastična odstupanja			
	Nagib držača indentora			
b1) sposobnost mjernog sustava (dubina)	Greška pokazivanja	Značajno za Rockwell	Indentacijska dubina	h
	Slaba rezolucija			
	Nelinearnost			
	Histereza			
b2) postrani mjerni sustav	Greška pokazivanja	Značajno za Brinell, Vickers i Knoop		
	Slaba rezolucija			
	Numerički otvor objektiva ili osvjetljenja			
	Nehomogenost osvjetljenja otiska			
c) sustav opterećivanja	Odstupanje od nominalne sile		predopterećenje / ukupno opterećenje	F_0, F
	Odstupanje od vremenskog intervala ciklusa		trajanje predopterećenja / ukupnog opterećenja	t_0, t
	Uvođenje sile			
	Prekoračenje vrijednosti sile		brzina utiskivanja	v
d) indentor	Odstupanje od idealnog oblika		radijus i kut indentora	r, α
	Oštećenja			
	Deformacija pod djelovanjem sile			
Okoliš	Temperatura odstupanja ili strujanje zraka			
	Vibracije ili udarci			
Mjeritelj	Pogrešan izbor metode			
	Rukovanje			

4.3.2. Postupak izračuna mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće [4]

Postupak za procjenu i proračun mjerne nesigurnosti je zasnovan na temelju dokumenta EA/4-02 [4].

1. Izražavanje odnosa između mjerene tvrdoće H (izlazna veličina) i ulaznih iznosa X_i (funkcija modela), matematičkim izrazom:

$$H = f(X_1, X_2, ..., X_N) \qquad (7)$$

   Treba primijetiti da u slučaju tvrdoće, dan danas, nije poznata matematička veza koja povezuje ulazne veličine X_i s izlaznom veličinom H. Veza je dana putem definiranja skale, što su empirijski postupci. Funkcija modela stoga ne daje više nego sam popis čimbenika koji utječu na mjerne rezultate. U praksi je to dovoljno, kako bi se uspostavio postupak zasnovan na EA/4-02, ali da se pritom posveti posebna pažnja procjeni standardnih nesigurnosti ulaznih veličina i koeficijenata osjetljivosti, kao što je to prikazano u nastavku.

2. Utvrđivanje i primjena svih značajnih korekcija.
3. Popisivanje izvora nesigurnosti u obliku analize nesigurnosti prema tablici:

Tablica 4.2. Prikaz sređenog rasporeda veličina procjena, standardnih nesigurnosti, koeficijenata osjetljivosti i doprinosa nesigurnosti koji se primjenjuje u analizi nesigurnosti kod mjerenja tvrdoće [4]

Veličina X_i	Procjena x_i	Standardna nesigurnost $u(x_i)$	Koeficijent osjetljivosti c_i	Doprinos standardnoj nesigurnosti $u_i(H)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(H)$
...	...	...	...	...
X_n	x_n	$u(x_n)$	c_n	$u(H)_n$
Tvrdoća	H			$u(H)$

Vrijednosti iz tablice 4.2. su opisane kako slijedi:

X_i - veličine koje utječu na rezultat mjerenja tvrdoće H. Nesigurnost se može odrediti na dva odvojena načina. Prvi način uključuje fizikalne veličine koje se koriste u definiranju skale (sila, duljina, vrijeme, brzina itd.) i odnose se na direktno umjeravanje. Drugi način uključuje sve čimbenike utjecaja prisutnih u praksi odnosi se na indirektnu metodu umjeravanja. Treba primijetiti da bi se moglo pretpostaviti, kako ovaj drugi način sadrži sve doprinose nesigurnosti pa bi time on sam mogao dati traženu veličinu nesigurnosti, no to nije uvijek točno. Npr.,

moguće je provesti vrlo pažljivo indirektno umjeravanje, koje daje manju nesigurnost, nego što je nesigurnost uzrokovana prihvaćenim tolerancijama za direktno umjeravanje. Zbog toga treba primijeniti oba načina, a kao rezultat se uzima veća vrijednost nesigurnosti, koja se dobiva iz ta dva načina.

x_i - procjenjene vrijednosti veličina X_i.

$u(x_i)$ - standardne nesigurnosti procijenjenih vrijednosti x_i. Za određivanje $u(x_i)$ se može odabrati nekoliko načina. Za dio koji je povezan s nesigurnošću definicije skale tvrdoće, treba uzeti polja tolerancija prema definiciji u normi HRN EN ISO 6507-3, kao polja varijabilnosti te procijeniti doprinos nesigurnosti tipa B. Tip B nesigurnosti se primjenjuje u svim slučajevima kada je na raspolaganju samo izjava o suglasnosti. Za dio povezan s direktnom metodom umjeravanja moguće je odrediti $u(x_i)$ pomoću nesigurnosti deklariranih u certifikatima umjeravanja mjernih instrumenata, koji su upotrijebljeni za direktna umjeravanja. Za dio povezan s indirektnom metodom umjeravanja, a to je provedena usporedba uz korištenje etalonskih pločica tvrdoće, treba procijeniti relevantnu nesigurnosti tipa A.

c_i je koeficijent osjetljivosti povezan s ulaznom procjenom x_i. Koeficijent osjetljivost c_i pokazuje iznos do kojega se utječe na tvrdoću H variranjem ulaznih procjena x_i. Kao što je prije rečeno, na današnjoj razini razvoja znanosti, nepoznata je matematička veza između x_i i H pa koeficijente osjetljivosti treba eksperimentalno procjenjivati pomoću promjene tvrdoće H zbog promjene ulazne procjene x_i kako slijedi:

$$c_i \approx \left.\frac{\Delta H}{\Delta x_i}\right|_{X_1 = x_1, \ldots, X_n = x_n} \qquad (8)$$

Eksperimentalno vrednovanje koeficijenata osjetljivosti često oduzima mnogo vremena pa je obično prikladno koristiti eksperimentalne rezultate navedene u literaturi [EA 10/16] te ih usvojiti za primjere, no, uvijek treba biti oprezan, kada relevantni čimbenici ovise o karakteristikama ispitivanog materijala (vrijeme zastoja i brzina utiskivanja). U takvim slučajevima su nužni određeni eksperimenti na specifičnom materijalu.

$u_i(H)$ je doprinos standardnoj nesigurnosti, povezan uz tvrdoću H, a rezultat je standardne nesigurnosti $u(x_i)$, povezane s ulaznom procjenom x_i:

$$u_i(H) = c_i u(x_i) \qquad (9)$$

4. Za nekorelirane ulazne veličine, kvadrat standardne nesigurnosti *u(H)* povezan je s mjerenom tvrdoćom *H* prema izrazu:

$$u^2(H) = \sum_{i=1}^{n} u_i^2(H) \qquad (10)$$

5. Izračun za svaku ulaznu veličinu X_i doprinos $u_i(H)$ nesigurnosti pridružene tvrdoći *H*, koja je rezultat procjene ulaza x_i, prema jednadžbama (8) i (9), te zbrojiti njihove kvadrate, kao što je to pokazano u jednadžbi (10), kako bi se dobio kvadrat standardne nesigurnosti *u(H)* tvrdoće *H*.
6. Izračunavanje proširene mjerne nesigurnosti *U* množeći standardnu nesigurnost *u*(*H*) vezanu uz tvrdoću *H* pomoću faktora pokrivenosti $k = 2$:

$$U = ku(H) \qquad (11)$$

   Ukoliko je efektivni stupanj slobode ν_{eff} u iznimnim slučajevima manji od 15, tada izračunati faktor pokrivenosti *k* prema EA/4-02, aneks E.

7. Prikazivati rezultate mjerenja na slijedeći način: u certifikatima za umjeravanje navesti ukupan rezultat mjerenja, koji sadrži procjene tvrdoće *H* mjerenog objekta i pridruženu proširenu nesigurnost *U* i to u obliku ($H \pm U$). Uz to treba navesti napomenu u kojoj treba biti slijedeće:

   Prikazana proširena nesigurnost je dobivena množenjem kombinirane standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja $k = 2$, što po normalnoj distribuciji odgovara nivou pouzdanosti $P = 95\%$. Kombinirana standardna nesigurnost je određena u sukladnosti s EA/4-02.

4.3.3. Mjerna nesigurnost umjeravanja sustava za očitanje otiska

Procjena i proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja sustava za očitanje otiska se provodi direktnom metodom te će zato biti opisana.

Nesigurnost umjeravanja direktnom metodom se sastoji od:

- proračuna nesigurnosti umjeravanja sile opterećenja i
- proračuna nesigurnosti umjeravanja sustava za očitanje otiska.

4.3.3.1. Proračun nesigurnosti umjeravanja sustava za očitanje otiska

Sukladno HRN EN ISO 6507-2, umjerava se kroz pet nizova mjerenja gdje svaki sadrži pet mjernih točaka raspodjeljenih na mjernom području.

Sastavljena relativna mjerna nesigurnost sustava za očitanje otiska izračunava se prema izrazu:

$$u_{\mathrm{L}} = \sqrt{u_{\mathrm{RS}}^2 + u_{\mathrm{ms}}^2 + u_{\mathrm{LHTM}}^2} \qquad (12)$$

gdje je:

- u_{RS} – relativna mjerna nesigurnost mjerne skale,
- u_{ms} – relativna mjerna nesigurnost rezolucije mjernog sustava,
- u_{LHTM}- relativna mjerna nesigurnost tvrdomjera ili sustava za očitanje veličine otiska.

Mjerna nesigurnost referentnog etalona duljine, mjerne skale, je dana u potvrdi o umjeravanju.

Relativna mjerna nesigurnost radi rezolucije mjernog sustava se dobiva iz rezolucije uređaja za očitanje (δ_{ms}) primjenom apriorne pravokutne razdiobe, ovisno o kojem se sustavu radi. Ako je digitalni sustav sa svim znamenkama onda je $u_{\mathrm{ms}} = \delta_{\mathrm{ms}}$.

Relativna mjerna nesigurnost tvrdomjera ili sustava za očitanje veličine otiska se računa prema:

$$u_{\mathrm{LHTM}} = \frac{s_{Li}}{\bar{L}} \times \frac{1}{\sqrt{n}} \qquad (13)$$

gdje je:

- s_{Li} – standardna devijacija duljine za i-tu veličinu mjerne točke mjerne skale,
- $\bar{L}$ – aritmetička sredina mjerenja duljine jedne točke.

Relativno odstupanje pokazivanja mjernog sustava za očitanje se računa prema izrazu:

$$\Delta L_{\mathrm{rel}} = \frac{\bar{L} - L_{\mathrm{RS}}}{L_{\mathrm{RS}}} \qquad (14)$$

Proširena mjerna nesigurnost sustava za očitanje računa se prema izrazu:

$$U_{\mathrm{L}} = k \times u_{\mathrm{L}}\,, k = 2. \qquad (15)$$

Maksimalno odstupanje sustava za očitanje izražava se kao:

$$\Delta L_{\mathrm{max}} = |\Delta L_{\mathrm{rel}}| + U_{\mathrm{L}} \qquad (16)$$

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Plan eksperimenta

Eksperimentalni dio je proveden na sustavu za očitanje veličine otiska LIMS 320/HV. Sustav LIMS 320/HV je u razvoju i njegovi sastavni dijelovi opisani su u poglavlju 5.2.3. Da bi se utvrdila mjerna sposobnost sustava LIMS 320/HV, provedeno je podešavanje i umjeravanje sustava te proračun i procjena mjerne nesigurnosti. Radi usporedbe mjerne sposobnosti sustava LIMS 320/HV s drugim sustavima, provedeno je usporedno mjerenje referentnih otisaka na referentnim etalonskim pločicama.

Plan eksperimenta je slijedeći:

1. Podešavanje sustava LIMS 320/HV pomoću mjerne skale,
2. Umjeravanje sustava LIMS 320/HV pomoću mjerne skale, procjena i proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja,
3. Usporedna mjerenja na referentnim etalonima IN45180G - 461,9 HV1, 33P1825 - 204,4 HV20 i IN6087G - 808,7 HV50 na sustavu LIMS 320/HV,
4. Usporedna mjerenja na referentnim etalonima IN45180G - 461,9 HV1, 33P1825 - 204,4 HV20 i IN6087G - 808,7 HV50 na tvrdomjeru Zwick/ZHV10,
5. Usporedna mjerenja na referentnim etalonima IN45180G - 461,9 HV1, 33P1825 - 204,4 HV20 i IN6087G - 808,7 HV50 na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV,
6. Određivanje mjerne sposobnosti sustava LIMS 320/HV.

5.2. Osnovne karakteristike tvrdomjera i sustava za mjerenje veličine otiska

5.2.1. Tvrdomjer Zwick/ZHV10

Postiže ispitno opterećenje od 1,96 N do 98 N (ili do 294 N). Ima sustav za očitanje s promjenjivim povećanjima: 10x, 40x i 60x, a trenutno se u sustavu Zwick/ZHV10 koriste samo povećanja od 10x i 40x. Analogni je uređaj te se tvrdoća određuje iz tablica tvrdoće. Na njemu je namontiran dijamantni piramidalni indentor tj., na njemu se ispituje tvrdoća po Vickersu. Postoje i novije verzije ovog tvrdomjera, kao što je verzija 3212003, koja je spojena na računalo te preko programa testXpert mjere i samostalno procjenjuju dimenzije dijagonala.

Tablica 5.1. Karakteristike tvrdomjera Zwick/ZHV10 [11]

Karakteristike	ZHV10 (3212001)
Metoda mjerenja	analogno
Procjena rezultata	manualno
Sustav opterećenja	direktno
Površina stola (mm x mm)	300 x 230
Ispitna visina *h,* mm	0....300
Ispitne sile *F* , N	1,96/2,94/4,9/9,8/19,6/29,4/49/98/(294)
Vrijeme indentacije *t,* s	0....10
Sustav za mjerenje	Mikroskop s monokularom/binokularom (sustav za osvjetljenje)
Sustav napajanja	110V/220V
Dimenzije (visina x duljina x širina), mm	600 x 400 x 350
Masa, *m*	50kg
Rezolucija mjerenja, μm	0,1
Mjerna nesigurnost	± 1,5%

5.2.2. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV

Tvrdomjer tvrtke Indentec iz Engleske, koji služi za ispitivanja i mjerenja po Vickers metodi (HRN EN ISO 6507). S njim je moguće ispitivati HV1, HV3, HV5, HV10, HV30 i HV50. Ima potpuno automatizirani ispitni ciklus koji u potpunosti eleminira utjecaj mjeritelja, mjernu skalu unutar objektiva, mogućnost izračuna aritmetičke sredine (X-bar) i raspona (R), nadogradnje s kamerom te spajanja s računalom i automatskog mjerenja pomoću programa.

Tablica 5.2. Karakteristike tvrdomjera Indentec 5030 TKV

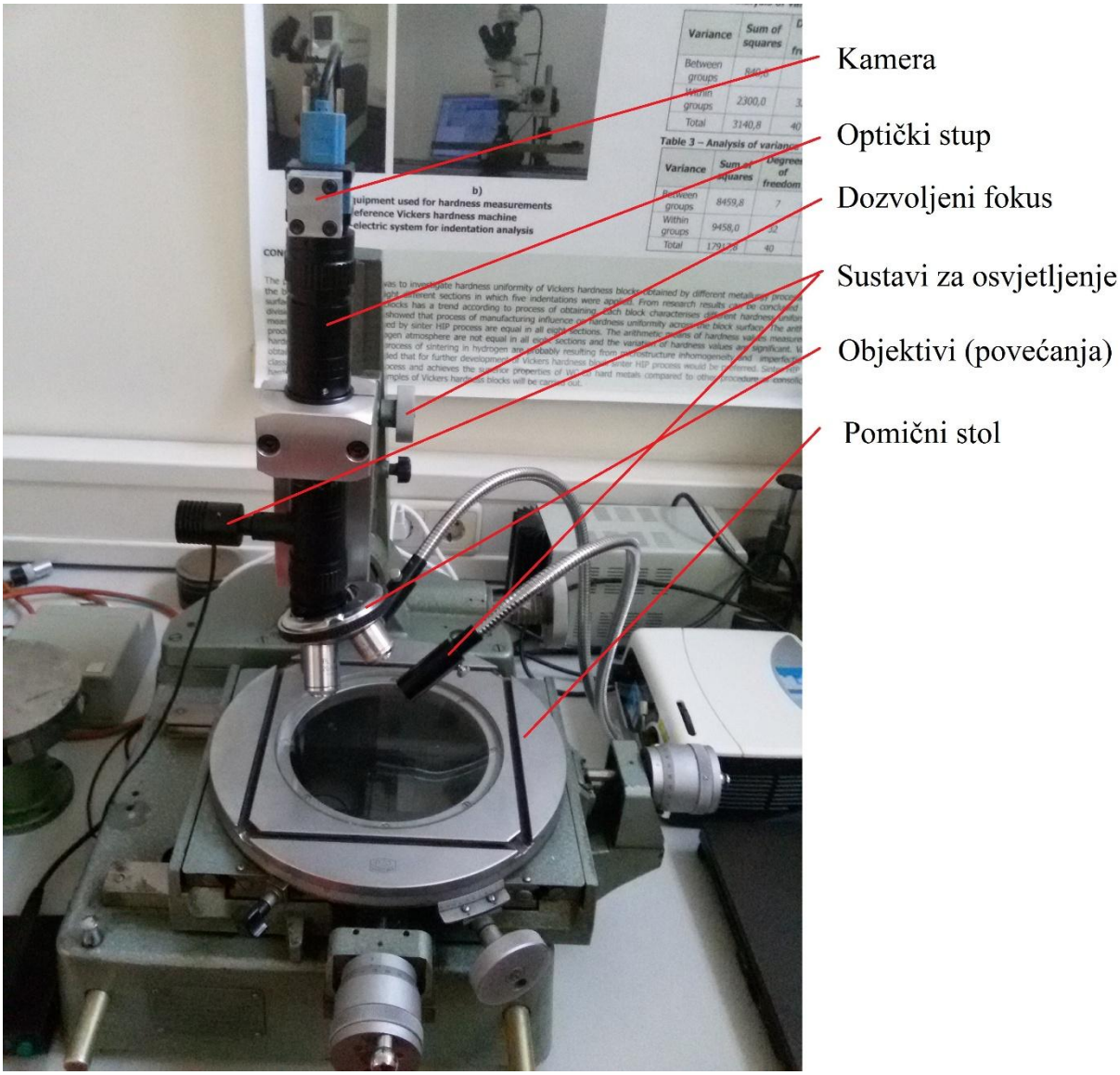
Karakteristike	5030 TKV
Metoda mjerenja	digitalno
Procjena rezultata	automatski
Sustav opterećenja	automatski
Promjer stola (*d* , mm)	100
Umjeravanje	HRN EN ISO 6507 i ASTM E384
Ispitne sile *F* , N	9,8/29,4/49/98/196/294/490
Vrijeme indentacije *t,* s	8...10
Sustav za mjerenje	digitalno (LCD)
Sustav napajanja	240/120 V
Dimenzije (visina x duljina x širina), mm	782 x 348 x 700
Masa, *m*	80kg
Rezolucija mjerenja, μm	0,1
Mjerna nesigurnost	± 1%

5.2.3. Sustav za mjerenje tvrdoće otiska LIMS 320/HV

Napravljen je od postolja starog Zwick tvrdomjera na koji je namontiran stup s optikom i kamerom. Ima mogućnost povećanja 5x, 10x, 20x i 40x. Na slici 5.1. je prikazan sa svim svojim elementima. Po konstrukciji i rukovanju je sličan drugim mikroskopima, razlikuju ga kamera i digitalni prikaz otiska i mjerenja, što ga čini jednostavnijim za mjerenja. Kamera je MT9J003. Karakteristike sustava su prikazane u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Karakteristike sustava LIMS 320/HV

Karakteristike	320/HV
Metoda mjerenja	digitalno
Procjena rezultata	manualno
Promjer stola (*d* , mm)	400
Umjeravanje	HRN EN ISO 6507
Sustav za mjerenje	digitalno (kamera)
Sustav napajanja	220/120V
Dimenzije (visina x duljina x širina), mm	600 x550 x 500
Masa, *m*	45kg
Rezolucija mjerenja, μm	0,8266/0,4216/0,2160/0,1049



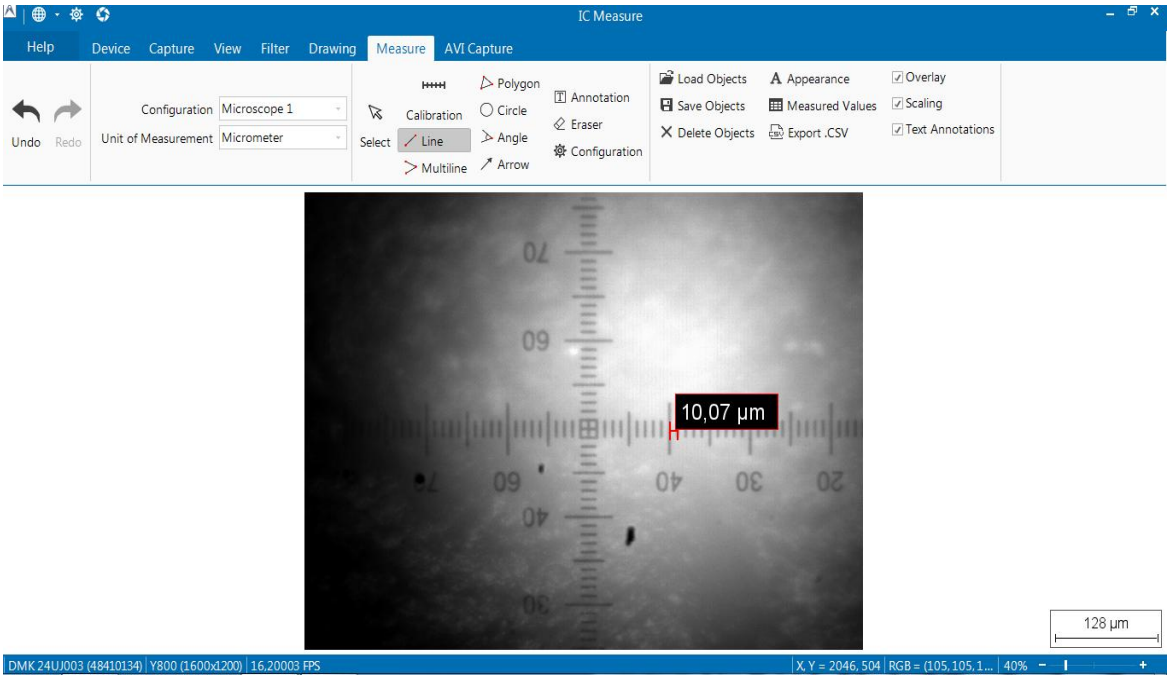
Slika 5.1. Sustav LIMS 320/HV

5.2.3.1. Aplikacija za mjerenje IC Measure

S kamerom je instalirana i aplikacija za mjerenje koja se pokreće preko računala, IC Measure, napravljena od strane Imaging Source, tvrtke koja proizvodi kamere visokih performansi. Aplikacija mjeri duljine, površine i kuteve, ima jednostavno korisničko sučelje koje pruža spremanje slika kao i njihova poboljšanja (slika 5.2.).

Aplikacija sadrži alat za podešavanje i umjeravanje s kojim se odabire razmjer slike i mjerna jedinica. Program se može podešavati pomoću mjerne skale ili predmeta poznate veličine.

Mjerni alati su napravljeni za makroskopska, kao i mikroskopska mjerenja. Pomoću spremanja i poboljšanja slike, jako efektivno se obavljaju manualna mjerenja duljine, kuteva, krugova i raznih poligona. Uz pomoć zoom-a može se mjeriti na preciznost jednog piksela. Sva mjerenja i postavke napravljene s IC Measure se mogu spremiti te naknadno koristiti.



Slika 5.2. Sučelje za mjerenje

IC Measure nudi razne alate za označavanje koji omogućuju korisniku da dodaje tekstove, grafike i oznake. Tekst može, po potrebi, biti pozicioniran unutar slike. Osim toga, grafički alati omogućavaju crtanje linija, pravokutnika, elipsa i poligona na svakoj slici. Boje, fontovi i širine linija su potpuno podesivi. Razni filteri omogućavaju smanjenje pogrešaka i distorzije leća.

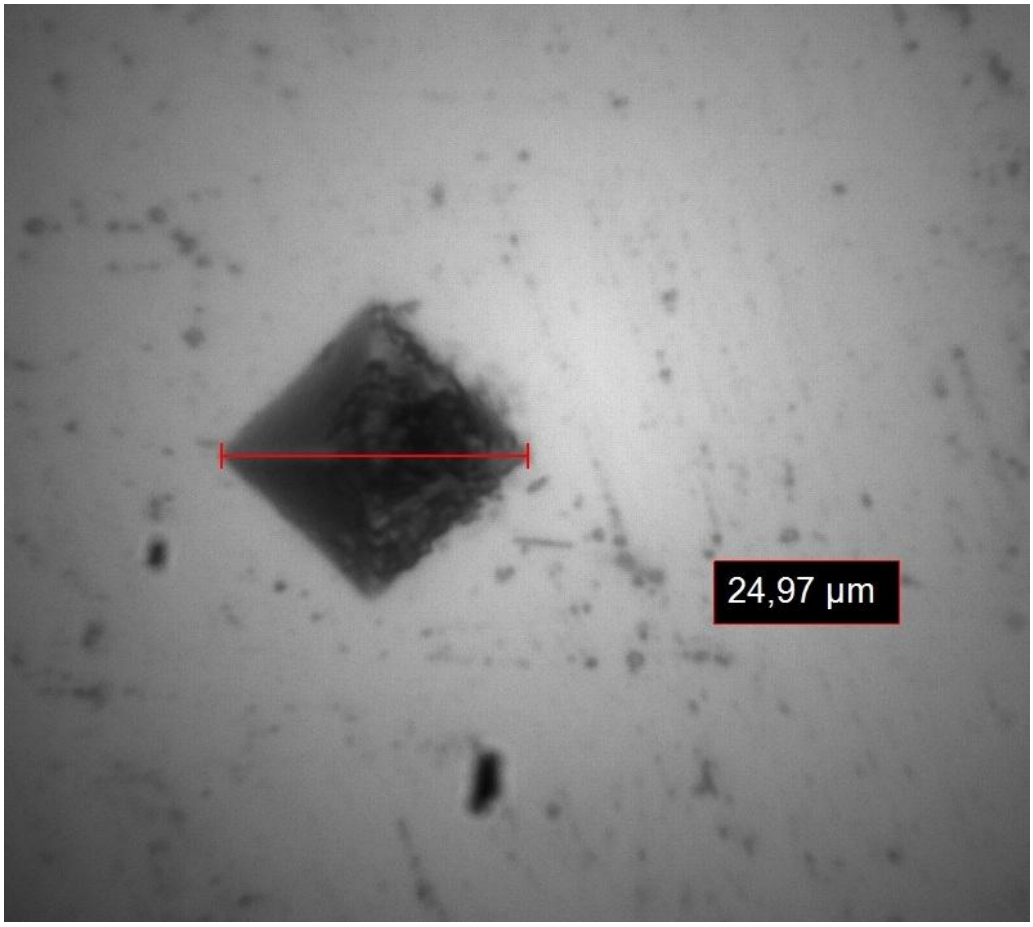
IC Measure ima mogućnost spremanja slika i nizova slika u formate kao što su BMP, TIFF, JPEG i PNG, a snimanja videa u AVI formatu. Sve napravljene oznake i bilješke na slici također se mogu spremiti u CSV formatu.

Sve postavke kamere, kao što su vrijeme ekspozicije, brzina očitanja slike, fokus, prigušenje tonova slike, kontrast i zasićenje, se mogu namjestiti i spremiti za daljnju uporabu.

Željeni otisak se stavlja pod objektiv, fokusira, uzima se potrebno povećanje te ga se opet fokusira. U IC Measure se klikom miša otvara "Configuration" i upisuje izračunati faktor

podešavanja za željeno povećanje. Klikom miša se otvara funkcija "Line". Stisne se na jedan rub otiska, povuče linija do drugog ruba te dobiva duljina jedne dijagonale. Isti postupak se ponavlja za drugu dijagonalu i računa srednja vrijednost te tvrdoća.

Prednosti mjerenja sa sustavom LIMS 320/HV su svakako brzina, jednostavnost i fleksibilnost mjerenja, dok digitalni zoom daje veću preciznost mjerenja i djelomično smanjuje utjecaj pogreške mjeritelja. Na slici 5.3. je prikazan primjer izmjerenog otiska.

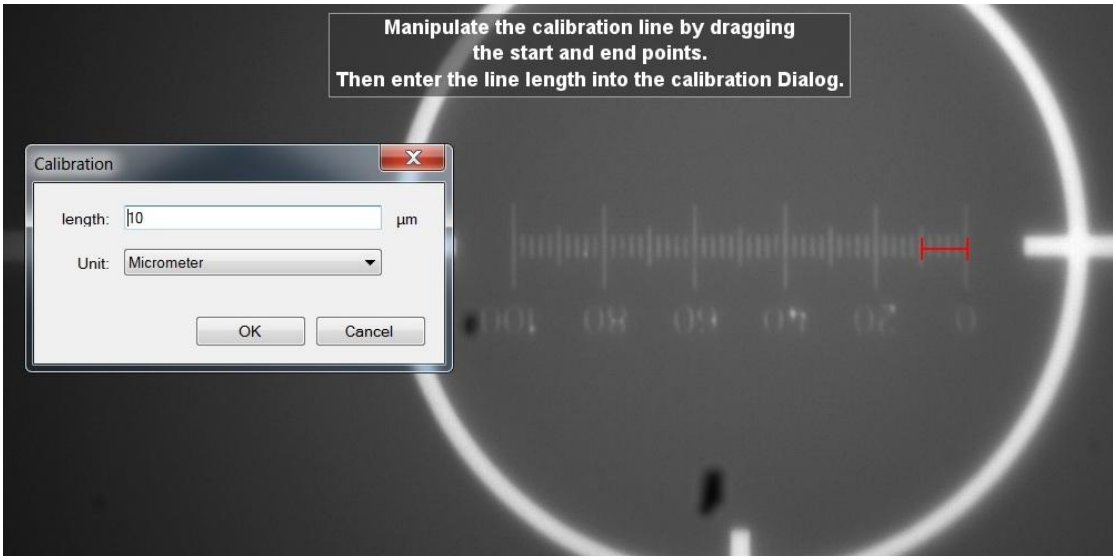


Slika 5.3. Primjer izmjerenog otiska (805,5 HV0,2 40x) s aplikacijom IC Measure

5.3. Podešavanje sustava LIMS 320/HV

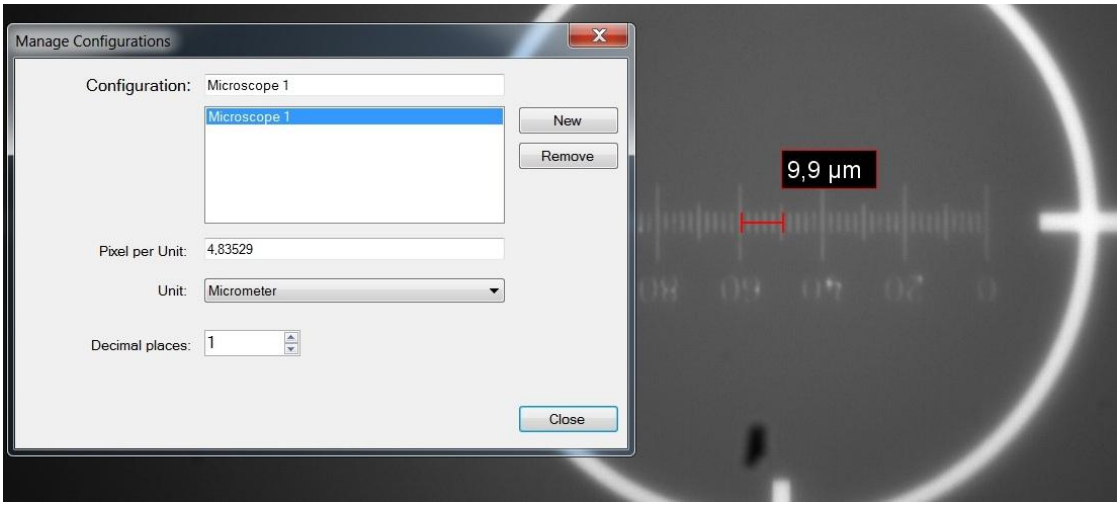
Podešavanje sustava je proces određivanja odnosa između stvarne fizikalne vrijednosti prikazane mjernom skalom i vrijednost dobivene mjerenjem. Stvarna fizikalna vrijednost je veličina duljine a mjerena vrijednost je broj piksela prikazan na ekranu. Dijeleći te dvije vrijednosti dobiven je faktor podešavanja K, px/µm.

Podešavanje sustava se provodi tako da mjerna skala bude stavljena ispod objektiva i može početi nakon što promatrana mjerna skala bude u fokusu. Fokusira se pomoću dizanja ili spuštanja cijelog optičkog stupa, bez podešavanja optičkog fokusa i zoom-a na optičkom stupu. Premjerava se nasumično odabrana duljina, tj. razmak između dvije točke na svim mjernim skalama pod svim povećanjima. Uzima se što manja moguća, vidljiva, podjela na skali. Podešava se klikom miša na "Calibration" te se otvori prozor za podešavanje (slika 5.4.).



Slika 5.4. Namještanje duljine podešavanja za mjernu skalu PS12 pri povećanju 20x

Povlači se duljina podešavanja i namješta na poznatu stvarnu duljinu te unosi poznati iznos stvarne duljine. Nakon toga se klikom miša na "Configuration" otvara prozor s omjerom px/µm (pixel/mikrometar) kojeg se sprema (slika 5.5.).



Slika 5.5. Prikaz konfiguracije i očitanja omjera za mjernu skalu PS12 pri povećanju 20x

Nakon 30 podešavanja uzima se srednja vrijednost faktora podešavanja (omjera) te unosi u "Configuration"→"Pixel per Unit" (slika 5.5.).

Postupak podešavanja se primjenjuje za svako povećanje zasebno, jer se s povećanjem mijenjaju i faktori podešavanja. Svaka promjena fokusa ili zoom-a na optičkom stupu mijenja faktor podešavanja te bi njihovom primjenom bila velika odstupanja faktora podešavanja i ne bi se dobile točne vrijednosti mjerenih veličina. Postoji mogućnost izračunavanja faktora podešavanja za svaki pomak u optičkom fokusu ili zoom-u, ali opseg takvog podešavanja bi bio ogroman.

Neka podešavanja na istom povećanju su provedena dvaput, ali s manjom duljinom podešavanja radi istraživanja utjecaja duljine podešavanja na faktor podešavanja. Također će se gledati razlike između faktora podešavanja na istim povećanjima.

U tablicama 5.4., 5.5., 5.6. i 5.7. su dani izračunati faktori podešavanja za sva povećanja.

Tablica 5.4. Faktori podešavanja za povećanje 5x

Povećanje	5x		
Mjerna skala	PS26	PS16	
Duljina podešavanja	100µm	50µm	10µm
Podešavanja	px/µm	px/µm	px/µm
K_1	1,21356	1,208684	1,241838
K_2	1,290256	1,233315	1,209905
K_3	1,28132	1,262278	1,112633
K_4	1,266418	1,249863	1,181655
K_5	1,260461	1,233317	1,285065
K_6	1,23364	1,208486	1,135605
K_7	1,230663	1,204345	1,049122
K_8	1,218741	1,212622	1,178707
K_9	1,200862	1,2002	1,077867
K_{10}	1,206822	1,179514	1,135345
K_{11}	1,191937	1,196177	1,320383
K_{12}	1,180007	1,200207	1,189981
K_{13}	1,168088	1,216755	1,138381
K_{14}	1,162128	1,204338	1,05204
K_{15}	1,132327	1,229172	1,121007
K_{16}	1,123392	1,241594	1,241703
K_{17}	1,120407	1,270584	1,19035
K_{18}	1,153189	1,24987	1,32792
K_{19}	1,162124	1,241615	1,276191
K_{20}	1,180007	1,220922	1,069141
K_{21}	1,200866	1,200207	1,224827
K_{22}	1,221724	1,179507	1,263076
K_{23}	1,233639	1,162954	1,189975
K_{24}	1,23662	1,179514	1,207222
K_{25}	1,230674	1,209332	1,189981
K_{26}	1,254512	1,206821	1,207098
K_{27}	1,26642	1,206913	1,327914
K_{28}	1,287275	1,1969	1,431268
K_{29}	1,212549	1,206821	1,327926
K_{30}	1,221938	1,201897	1,224341
K_{sr}	**1,211418867**	**1,213824133**	**1,204282**
K_{min}	1,120407	1,162954	1,049122
K_{max}	1,290256	1,270584	1,431268
ΔK	0,169849	0,10763	0,382146

Tablica 5.5. Faktori podešavanja za povećanje 10x

Povećanje	10x		
Mjerna skala	PS26	PS16	
Duljina podešavanja	100µm	50µm	10µm
Podešavanja	px/µm	px/µm	px/µm
K_1	2,516108	2,434533	2,189681
K_2	2,477751	2,450274	2,44613
K_3	2,440707	2,450119	2,501721
K_4	2,397432	2,483174	2,724097
K_5	2,403611	2,41697	2,502339
K_6	2,397424	2,363166	2,05697
K_7	2,366561	2,346614	2,335598
K_8	2,329456	2,330059	2,446762
K_9	2,32331	2,301075	2,33561
K_{10}	2,267667	2,313504	2,280036
K_{11}	2,224424	2,35077	2,309562
K_{12}	2,378789	2,325906	2,535673
K_{13}	2,205886	2,292802	2,259167
K_{14}	2,267667	2,30935	2,120034
K_{15}	2,304741	2,325909	2,213367
K_{16}	2,267675	2,354879	2,347344
K_{17}	2,298636	2,392125	2,508207
K_{18}	2,323285	2,43766	2,707982
K_{19}	2,372717	2,454233	2,654224
K_{20}	2,397432	2,42937	2,439893
K_{21}	2,415961	2,388016	2,379039
K_{22}	2,446856	2,354879	2,327426
K_{23}	2,490116	2,334186	2,223853
K_{24}	2,533369	2,35489	2,288538
K_{25}	2,483998	2,379707	2,210963
K_{26}	2,40361	2,363156	2,379039
K_{27}	2,372716	2,359017	2,366077
K_{28}	2,329457	2,354908	2,456614
K_{29}	2,375562	2,342473	2,348876
K_{30}	2,309013	2,339199	2,327283
K_{sr}	**2,370731**	**2,371097**	**2,37407**
K_{min}	2,205886	2,292802	2,05697
K_{max}	2,533369	2,483174	2,724097
ΔK	0,327483	0,190372	0,667127

Tablica 5.6. Faktori podešavanja za povećanje 20x

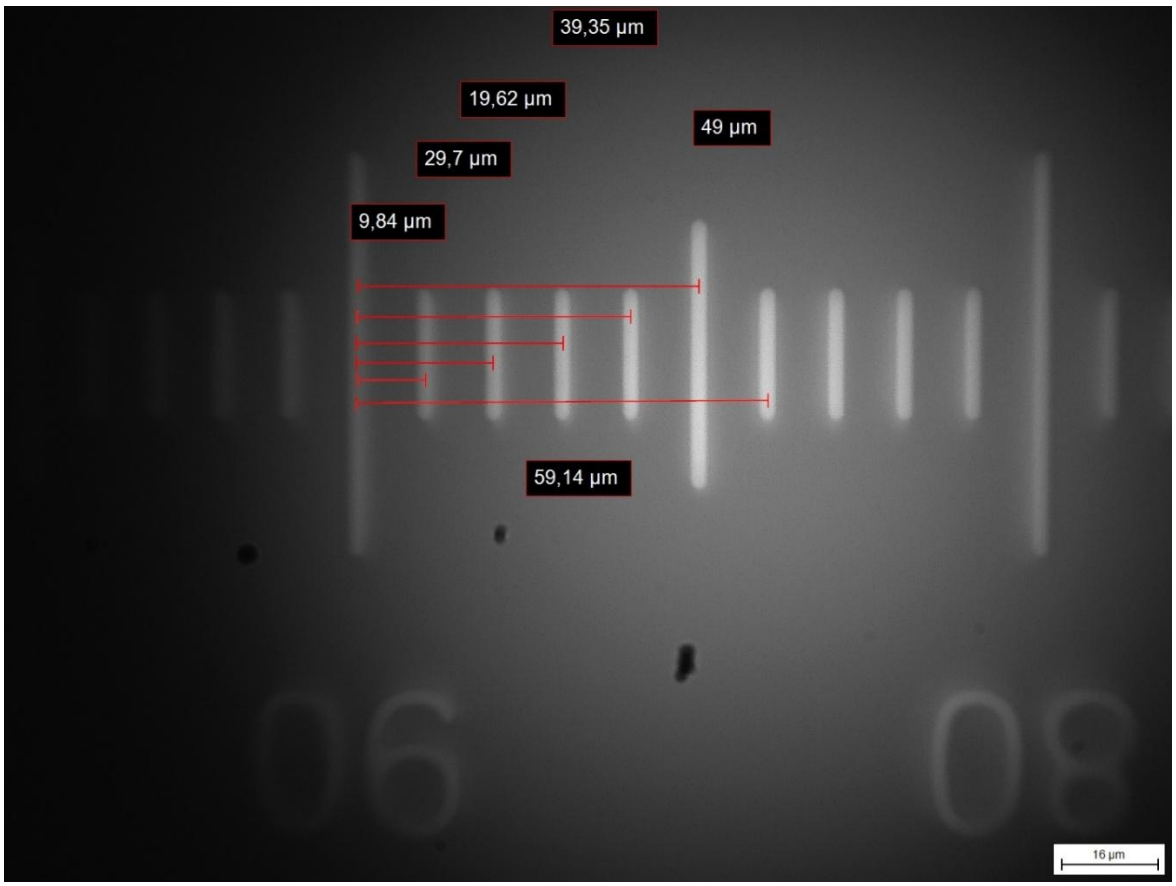
Povećanje	20x			
Mjerna skala	PS26	PS16		PS12
Duljina podešavanja	100µm	50µm	10µm	
Podešavanja	px/µm	px/µm	px/µm	px/µm
K_1	4,977809	4,788997	4,696391	4,550517
K_2	4,929793	4,665058	4,634604	4,651228
K_3	4,856653	4,775158	4,574069	4,608003
K_4	4,825758	4,730959	4,572406	4,713462
K_5	4,757791	4,775076	4,449251	4,787749
K_6	4,726884	4,656535	3,954999	4,911577
K_7	4,677449	4,597148	4,078557	4,705713
K_8	4,621905	4,716132	4,325692	4,602573
K_9	4,547692	4,567465	4,882918	4,499341
K_{10}	4,535337	4,522999	5,314239	4,396191
K_{11}	4,492085	4,568865	5,191772	4,476412
K_{12}	4,430361	4,634227	5,005313	4,543492
K_{13}	4,399436	4,677137	4,819964	4,600828
K_{14}	4,356149	4,651748	4,388789	4,658164
K_{15}	4,3809	4,54867	4,325256	4,701135
K_{16}	4,34997	4,505673	4,45055	4,596148
K_{17}	4,393235	4,45401	4,572824	4,678726
K_{18}	4,424151	4,471151	4,758177	4,883613
K_{19}	4,436487	4,531288	5,068231	4,697372
K_{20}	4,523013	4,591285	5,12851	4,490453
K_{21}	4,553886	4,677106	5,004938	4,531835
K_{22}	4,603404	4,762932	4,449264	4,573228
K_{23}	4,640375	4,754467	4,263464	4,738766
K_{24}	4,689843	4,694341	4,699641	4,800838
K_{25}	4,720706	4,642905	4,63461	4,676636
K_{26}	4,770133	4,617317	4,449257	4,6353
K_{27}	4,831922	4,5999	4,5724	4,620697
K_{28}	4,739242	4,634229	4,20166	4,608655
K_{29}	4,683627	4,531224	4,449257	4,624622
K_{30}	4,628021	4,625615	4,881745	4,620433
K_{sr}	**4,616801**	**4,632321**	**4,626625**	**4,639457**
K_{min}	4,34997	4,45401	3,954999	4,396191
K_{max}	4,977809	4,788997	5,314239	4,911577
ΔK	0,627839	0,334987	1,35924	0,515386

Tablica 5.7. Faktori podešavanja za povećanje 40x

Povećanje	40x				
Mjerna skala	PS26	PS16		PS12	
Duljina podešavanja	100µm	50µm	10µm		2µm
Podešavanja	px/µm	px/µm	px/µm	px/µm	px/µm
K_1	9,97646	9,466781	8,00033	9,508814	10,395842
K_2	9,874563	9,24456	8,372442	9,449917	9,985625
K_3	9,852423	9,079254	8,248407	9,312045	8,865558
K_4	9,785977	9,182098	9,302716	9,329203	9,116799
K_5	9,697443	9,310842	9,675016	9,329138	8,493765
K_6	9,498181	9,490879	9,2409	9,208451	9,735258
K_7	9,343173	9,670813	9,426955	9,242936	9,823369
K_8	9,210572	9,77366	10,23317	9,449869	9,099126
K_9	9,232499	9,670781	10,79133	9,622429	9,006876
K_{10}	8,989039	9,310734	10,04712	9,760315	8,484822
K_{11}	8,856116	9,33656	9,861072	9,674039	9,105568
K_{12}	9,033211	9,413614	9,48877	9,656837	9,519422
K_{13}	9,16608	9,388	9,612999	9,605103	9,006876
K_{14}	9,409699	9,619341	9,488973	9,536449	9,003903
K_{15}	9,564679	9,795911	9,364728	9,519073	9,658476
K_{16}	9,697645	9,805827	10,10914	9,467153	10,586249
K_{17}	9,963199	9,752243	10,48124	9,363687	10,14018
K_{18}	10,07383	9,662936	10,23317	9,294669	9,21076
K_{19}	9,940961	9,627213	9,2409	9,39812	9,823011
K_{20}	9,808144	9,537909	8,186618	9,622305	9,979309
K_{21}	9,564807	9,484308	8,744763	9,674024	9,77222
K_{22}	9,453876	9,412859	9,613005	9,777506	9,764852
K_{23}	9,453979	9,54563	9,861078	9,777627	10,31229
K_{24}	9,409619	9,696528	9,923094	9,915454	10,56154
K_{25}	9,409594	9,825129	10,10971	9,898446	10,31203
K_{26}	9,29892	9,593614	8,682538	9,829359	10,245891
K_{27}	9,321059	9,465047	10,48106	9,795273	10,06252
K_{28}	9,343173	9,413608	10,29519	9,708754	9,854641
K_{29}	9,453875	9,28497	9,178885	9,415499	8,759482
K_{30}	9,498181	9,285007	8,930603	9,432747	8,649142
K_{sr}	**9,506032567**	**9,504888533**	**9,507530733**	**9,552508033**	**9,577846733**
K_{min}	8,856116	9,079254	8,00033	9,208451	8,484822
K_{max}	10,07383	9,825129	10,79133	9,915454	10,586249
ΔK	1,217714	0,745875	2,791	0,707003	2,101427

5.4. Umjeravanje sustava LIMS 320/HV

Umjeravanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 6507-2, direktnom metodom, na način da se premjeravaju duljine na cijelom mjernom području u minimalno pet točaka. Princip umjeravanja je prikazan na slici 5.7.



Slika 5.6. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 40x

Sustav je umjeren na tri mjerne skale, pod svim povećanjima, u minimalno pet točaka preko cijelog mjernog područja. Npr., PS16 ima najmanju podjelu od 0,01mm na cijelokupnoj duljini mjerne skale od 1mm. Pri povećanju od 40x, savršeno se vide mjerne linije, tj. raspodjela od 0,01mm. Sukladno tome umjeravalo se s tom duljinom, na mjernom području od 0,1mm. Na slici se vidi da je mjerno područje veće od 0,1mm, ali nije u fokusu radi osvjetljenja koje nije moglo biti korigirano.

5.4.1. Mjerne skale PS serije

Mjerne skale su tanke pločice od nehrđajućeg čelika dimenzija 76mm x 25mm x 1,5mm, u sredini imaju okruglo stakalce na čijoj površini je označena mjerna skala s finom podjelom.

U radu se umjeravalo pomoću mjernih skala:

- PS 26 (CS 3759) (slika 5.8.) [12]
  - Općenito se koristi za umjeravanje Brinella. Ima x i y skalu.
  - Krugovi (promjer, mm): 5,0; 2,5; 1,0; 0,7; 0,3
  - Skale: horizontalna (x) i vertikalna (y), 5 mm raspodijeljeno u razmacima od 0,1 mm
  - Točnost (ukupna): ±0,0015 mm
  - U= (150+L) nm, L u mm (potvrda o umjeravanju)



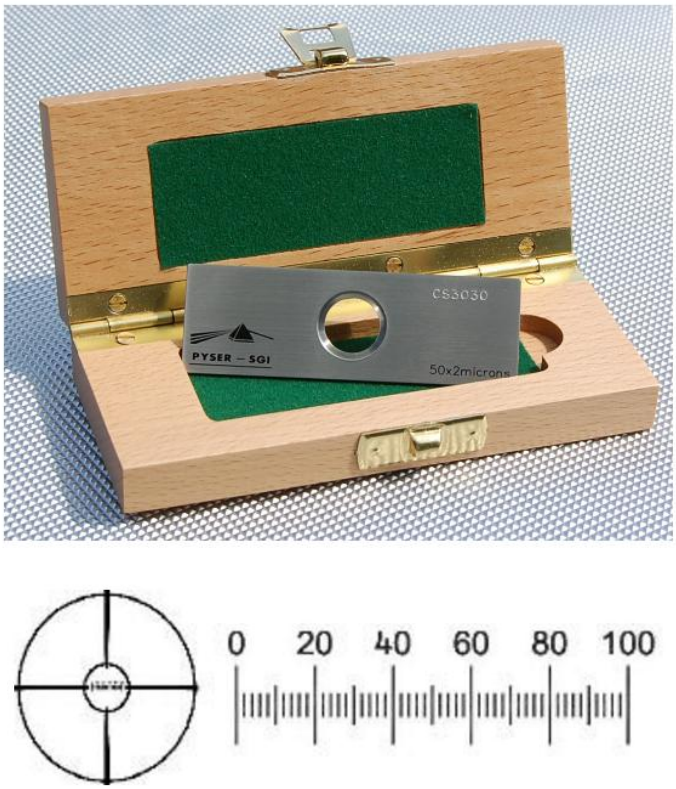
Slika 5.7. Mjerna skala PS 26 [12]

- PS 16 (CS 3892) (slika 5.9.) [13]
  - Ima podjelu od 0,01 mm na 1 mm.
  - Širina linije: 0,0015 mm
  - Točnost: <0,001 mm
  - U= (150+L) nm, L u mm (potvrda o umjeravanju)



Slika 5.8. Mjerna skala PS 16 [13]

- PS 12 (CS3989) (slika 5.10.) [14]
  - Ima podjelu od 0,002 mm na 0,1 mm.
  - Širina linije: 0,001 mm
  - Točnost: <0,001 mm
  - U= (150+L) nm, L u mm (potvrda o umjeravanju)



Slika 5.9. Mjerna skala PS 12 [14]

5.4.2. Rezultati umjeravanja sustava LIMS 320/HV

Umjeravanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 6507:2008. Sama procedura je opisana u poglavlju 3.3.. Temperatura prilikom umjeravanja je bila (22 ± 0,5) °C čime nije imala velik utjecaj na mjernu nesigurnost mjerenja.

U tablicama 5.8. i 5.9. (a ostale u prilogu) su dani rezultati umjeravanja za mjerne skale, izračunata je proširena mjerna nesigurnost umjeravanja U_L i odstupanje umjeravanja ΔL.

Tablica 5.8. Umjeravanje mjernom skalom PS26 za povećanje 5x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,10	0,10001	0,00001	0,10009	0,00009	0,10001	0,00001	0,10009	0,00009	0,10008	0,00008	0,100056	5,6E-05	0,0003391	0,0006782
0,20	0,20006	0,00005	0,20016	0,00016	0,20017	0,00017	0,20015	0,00015	0,20013	0,00013	0,200132	0,000132	0,0002997	0,0005994
0,30	0,30014	0,00013	0,30026	0,00026	0,300277	0,00028	0,30016	0,00016	0,30040	0,00040	0,300246	0,000246	0,0003227	0,0006455
0,40	0,40042	0,00042	0,40050	0,00050	0,40059	0,00059	0,40063	0,00063	0,40062	0,00062	0,400552	0,000552	0,0002992	0,0005983
0,50	0,50068	0,00068	0,50055	0,00055	0,50069	0,00069	0,50070	0,00070	0,50077	0,00077	0,500678	0,000678	0,0002907	0,0005814
0,60	0,60065	0,00065	0,60092	0,00092	0,60086	0,00086	0,60095	0,00095	0,60102	0,00102	0,600881	0,000881	0,0003004	0,0006009
0,70	0,70110	0,00110	0,70110	0,00110	0,701	0,00100	0,70114	0,00114	0,70124	0,00124	0,701116	0,001116	0,0002872	0,0005744
0,80	0,80117	0,00117	0,80117	0,00117	0,80121	0,00121	0,80133	0,00133	0,80122	0,00122	0,80122	0,001219	0,0002842	0,0005685
0,90	0,90127	0,00127	0,90140	0,00140	0,9013	0,00130	0,90126	0,00126	0,90123	0,00123	0,901292	0,001292	0,0002837	0,0005674
1,00	1,00134	0,00134	1,00157	0,00157	1,00153	0,00153	1,00156	0,00156	1,00140	0,00140	1,00148	0,00148	0,0002856	0,0005712
1,10	1,10158	0,00158	1,10169	0,00169	1,10169	0,00169	1,10133	0,00133	1,10163	0,00163	1,101584	0,001584	0,0002883	0,0005766
1,20	1,20183	0,00183	1,20189	0,00189	1,20182	0,00182	1,20188	0,00188	1,20174	0,00174	1,201832	0,001832	0,0002827	0,0005654

Tablica 5.9. Umjeravanje mjernom skalom PS12 za povećanje 40x sustava LIMS 320/HV

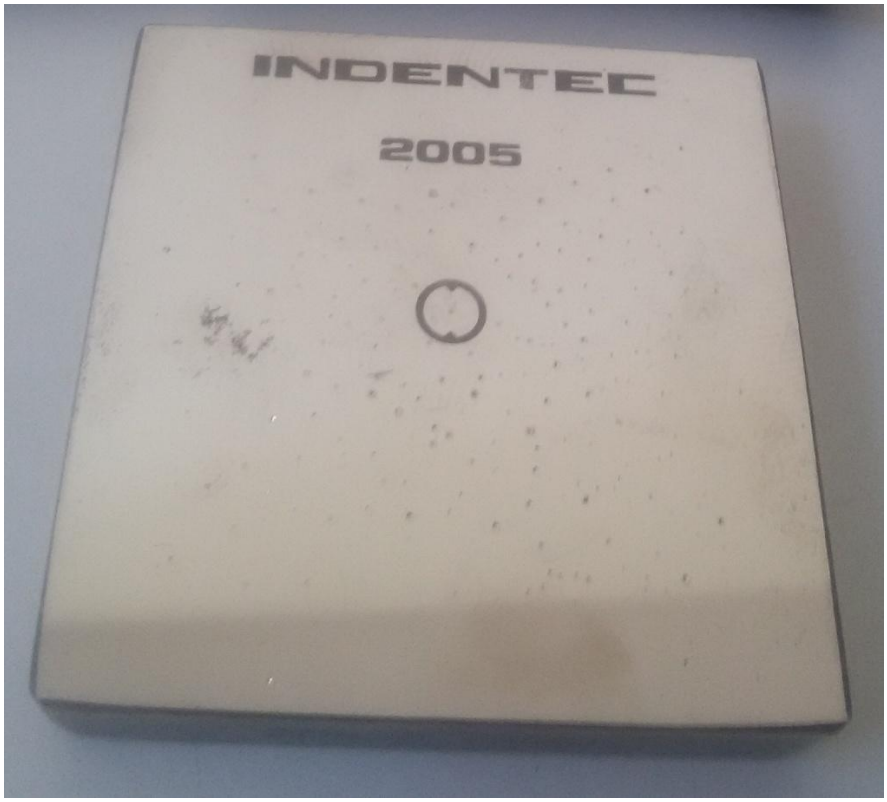
L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,01	0,01007	0,00007	0,01007	0,00007	0,01018	0,00018	0,01009	0,00009	0,01007	0,00007	0,010096	9,6E-05	0,002121	0,004241
0,02	0,02012	0,00012	0,01997	-0,00003	0,01994	-0,00006	0,02008	0,00008	0,02019	0,00019	0,02006	6E-05	0,002327	0,004654
0,03	0,02999	-0,00001	0,02998	-0,00002	0,02988	-0,00012	0,03011	0,00011	0,03019	0,00019	0,03003	3E-05	0,001809	0,003618
0,04	0,04000	0,00000	0,03979	-0,00021	0,03971	-0,00029	0,03994	-0,00006	0,03991	-0,00009	0,03987	-0,00013	0,001329	0,002658
0,05	0,04966	-0,00034	0,04972	-0,00028	0,04961	-0,00039	0,04977	-0,00023	0,04984	-0,00016	0,04972	-0,00028	0,000826	0,001653
0,06	0,05969	-0,00031	0,05954	-0,00046	0,05935	-0,00065	0,05962	-0,00038	0,05962	-0,00038	0,059564	-0,00044	0,000995	0,001989
0,07	0,06941	-0,00059	0,06926	-0,00074	0,06934	-0,00066	0,06934	-0,00066	0,06950	-0,00050	0,06937	-0,00063	0,0006	0,0012
0,08	0,07924	-0,00076	0,07940	-0,00060	0,07918	-0,00082	0,07934	-0,00066	0,07935	-0,00065	0,079302	-0,0007	0,000528	0,001055
0,09	0,08920	-0,00080	0,08922	-0,00078	0,08913	-0,00087	0,08937	-0,00063	0,08932	-0,00068	0,089248	-0,00075	0,000506	0,001012
0,10	0,09915	-0,00085	0,09931	-0,00069	0,09903	-0,00097	0,09944	-0,00056	0,09949	-0,00051	0,099284	-0,00072	0,000885	0,001771

5.5. Provjera mjernog sustava LIMS 320/HV pomoću referentnih etalona

Provjera mjernog sustava i usporedba s drugim sustavima, provedena je mjerenjem referentnog otiska na referentnim etalonima tvrdoće (slika 5.11.). Mjereni su referentne dijagonale koje imaju certifikatom određenu duljinu te tvrdoću i tri referentna otiska pod svim povećanjima na tri mjerna sustava. Na svakom etalonu pet puta je mjerena dijagonala te se izračunala srednja vrijednost izmjerene dijagonale i relativna pogreška duljine dijagonale.

Mjerenja su provedena na slijedećim referentnim etalonima:

- IN45180G 461,9 HV1,
- 33P1825 204,4 HV20,
- IN6087G 808,7 HV50.



Slika 5.10. Referentni otisak na referentnoj etalonskoj pločici 33P1825

U tablici 5.10. dane su izmjerene vrijednosti referentnog otiska sa sustavom za mjerenje veličine otiska LIMS 320/HV. U tablici 5.11. su izmjerene vrijednosti za tvrdomjer Zwick/ZHV10, a u tablici 5.12. su izmjerene vrijednosti za tvrdomjer Indentec 5030 TKV.

Tablica 5.10. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na sustavu LIMS 320/HV

Referentni etalon	IN45180G 461,9 HV1				33P1825 204,4 HV20		IN6087G 808,7 HV50		
Povećanje	5x	10x	20x	40x	5x	10x	5x	10x	20x
Mjerenja	*d*, mm				*d*, mm		*d*, mm		
1	0,06117	0,06325	0,06309	0,06286	0,42359	0,42368	0,33821	0,33746	0,3368
2	0,06199	0,06282	0,06331	0,06283	0,42524	0,42282	0,33741	0,33832	0,33786
3	0,06072	0,0624	0,06308	0,06275	0,42197	0,42367	0,33738	0,33914	0,33785
4	0,06117	0,06284	0,06331	0,06286	0,4211	0,42409	0,33718	0,33872	0,33894
5	0,06142	0,06325	0,06324	0,06298	0,42449	0,42407	0,33573	0,33819	0,3385
d_{sr}, mm	0,061294	0,062912	0,063206	0,062856	0,423278	0,423666	0,337182	0,338366	0,33799
d_{ref}, mm	0,0638				0,4266		0,3389		
Δd_{rel}	-3,92790	-1,39185	-0,93103	-1,47962	-0,77872	-0,68776	-0,50693	-0,15757	-0,26852
HV	493,6	468,5	464,2	469,4	207,0	206,6	815,6	809,9	811,7
ΔHV	31,7	6,6	2,3	7,5	2,6	2,2	6,9	1,2	3,0
s, mm	0,000464	0,000355	0,000114	0,000083	0,001723	0,000515	0,000902	0,000628	0,000809
U, mm	0,000415	0,000318	0,000102	0,000074	0,001541	0,000460	0,000807	0,000562	0,000723

Tablica 5.11. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na tvrdomjeru Zwick/ZHV10

Referentni etalon	IN45180G 461,9 HV1		33P1825 204,4 HV20	IN6087G 808,7 HV50
Povećanje	10x	40x	10x	10x
Mjerenja	*d*		*d*	*d*
1	0,064	0,06525	0,428	0,338
2	0,064	0,0655	0,429	0,336
3	0,064	0,06475	0,426	0,334
4	0,064	0,0655	0,432	0,341
5	0,064	0,06425	0,426	0,339
d_{sr}, mm	0,064	0,06505	0,4282	0,3376
d_{ref}, mm	0,0638		0,4266	0,3389
Δd_{rel}	0,3135	1,9592	0,3751	-20,8626
HV	452,7	438,2	202,3	813,5
ΔHV	-9,2	-23,7	-2,1	4,8
s, mm	0	0,000542	0,002490	0,002702
U, mm	0	0,000485	0,002227	0,002417

Tablica 5.12. Rezultati mjerenja duljine referentnog otiska na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV

Referentni etalon	IN45180G 461,9 HV1	33P1825 204,4 HV20	IN6087G 808,7 HV50
Povećanje	10x	10x	10x
Mjerenja	*d*	*d*	*d*
1	0,0641	0,4045	0,3365
2	0,0637	0,4153	0,3328
3	0,0627	0,4016	0,3334
4	0,0627	0,4082	0,3322
5	0,063	0,4113	0,3324
d_{sr}, mm	0,06324	0,40818	0,33346
d_{ref}, mm	0,0638	0,4266	0,3389
Δd_{rel}	-0,877743	-4,317862	-1,605193
HV	463,7	222,6	833,9
ΔHV	1,8	18,2	25,2
s, mm	0,000631	0,005415	0,001760
U, mm	0,000564	0,004843	0,001574

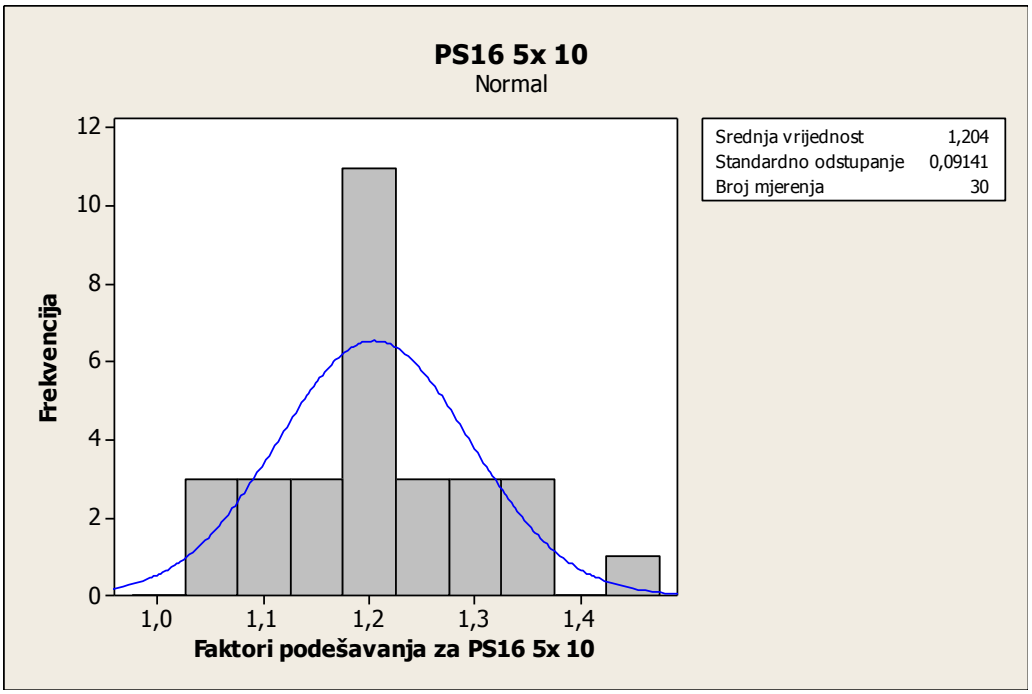
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Kako bi se donijeli protrebni zaključci, provedena je analiza rezultata svih točaka eksperimentalnog dijela, potrebnih za saznavanje mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV. Svaka točka je detaljno analizirana sa ciljem obuhvaćanja što većeg broja mjernih nesigurnosti koje utječu na mjernu sposobnost sustava.

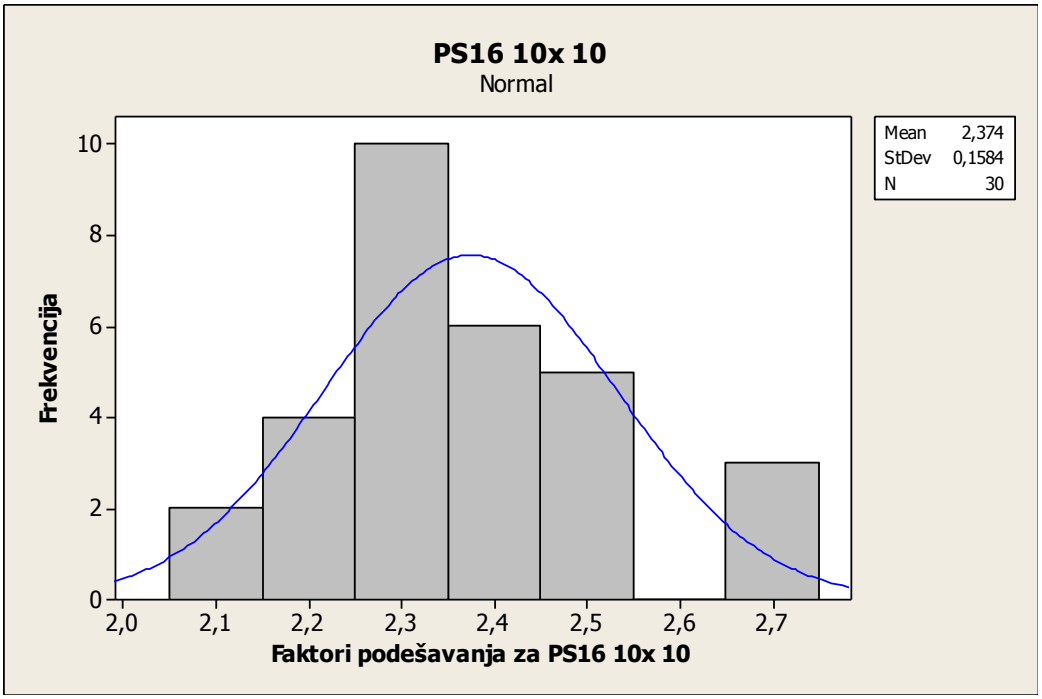
6.1. Analiza podešavanja sustava LIMS 320/HV

Podešavanje sustava se analizira od načina dobivanja faktora podešavanja, određivanja duljine podešavanja i utjecaja opreme i mjeritelja na proces podešavanja.

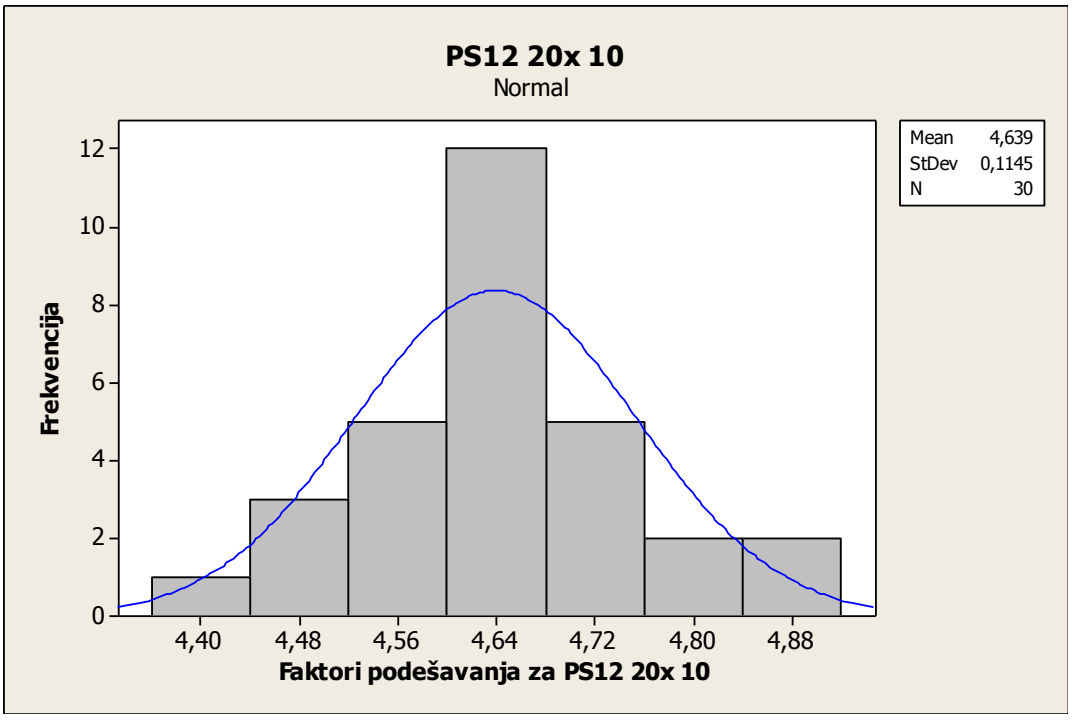
Na slikama 6.1., 6.2., 6.3. i 6.4. su prikazani histogrami mjerenja faktora podešavanja za sve mjerne skale pri svim povećanjima. Na histogramima se vidi normalna raspodjela faktora podešavanja za sva povećanja, što znači da nije bilo odstupanja (pomicanja mjerne skale, ponovnog fokusiranja, sustavnog pomaka, itd.) i da je dobivanje faktora podešavanja bilo slučajno mjerena duljina podešavanja bez tendencije namještanja rezultata što smanjuje utjecaj mjeritelja na mjerni rezultat. Također se vide dobivene srednje vrijednosti, standardna odstupanja i broj podešavanja.



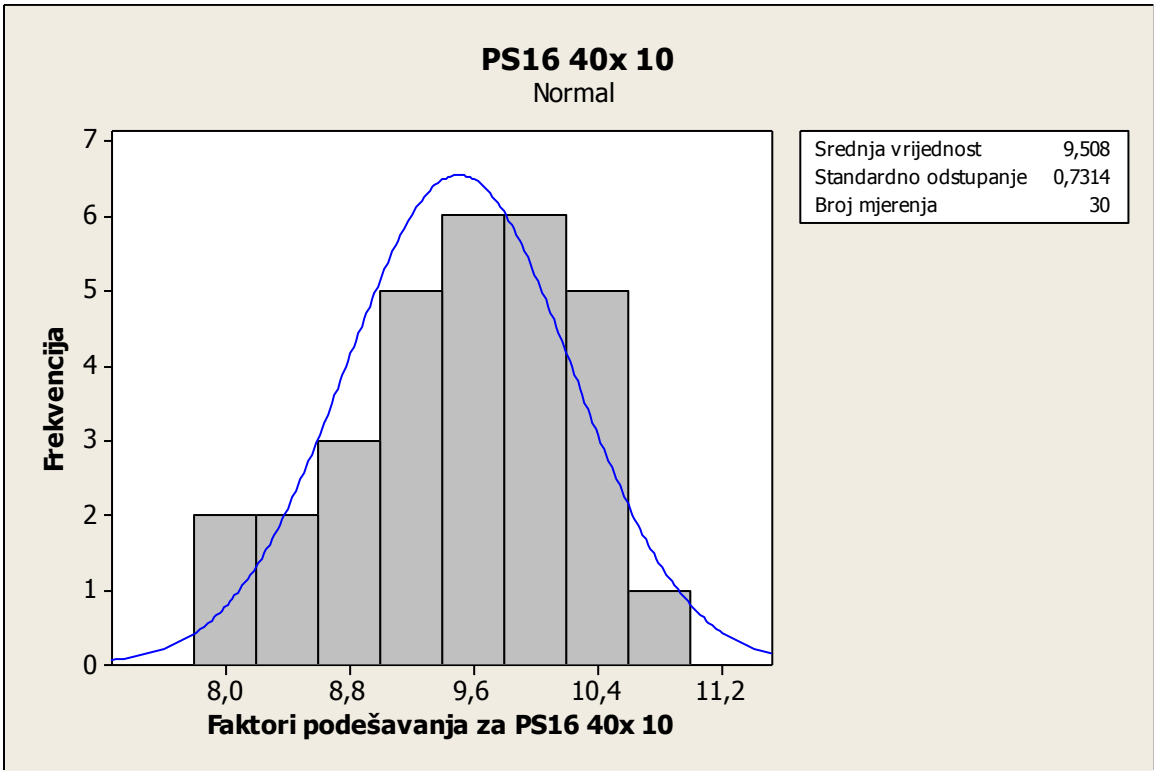
Slika 6.1. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 5x i duljinom podešavanja 10 μm



Slika 6.2. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 10x i duljinom podešavanja 10 μm



Slika 6.3. Histogram podešavanja mjernom skalom PS12 za povećanje 20x i duljinom podešavanja 10 μm



Slika 6.4. Histogram podešavanja mjernom skalom PS16 za povećanje 40x i duljinom podešavanja 10 µm

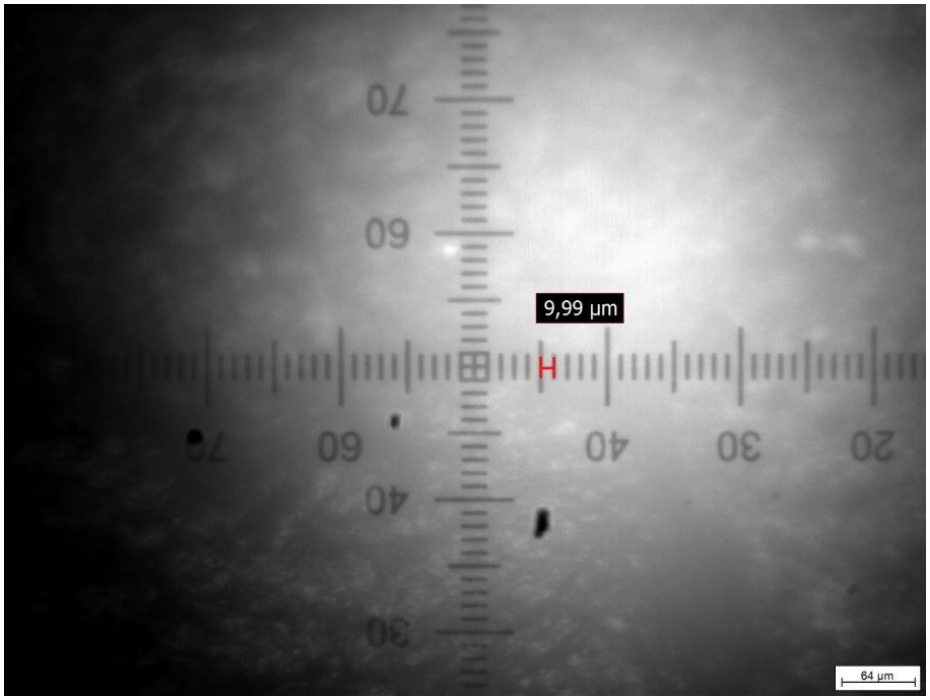
Najbolje procjenjene vrijednosti faktora podešavanja su izračunate kao srednje vrijednosti za svako povećanje. Njihova prava i točna (referentna) vrijednost se ne može znati, ona ovisi o sustavu i mjeritelju. Ukoliko se mjeritelj posluži optičkim fokusom ili optičkim zoom-om te onda ide podešavati, pod istim povećanjem za više mjernih skala dobit će puno veća odstupanja. Ta odstupanja u umjeravanju će dati veću pogrešku (za L_{rs} = 100 µm, L_1 = 102,3 µm). U tablici 6.1. su navedeni faktori podešavanja.

Tablica 6.1. Faktori podešavanja za povećanja

Povećanje	5x	10x	20x	40x
Faktori podešavanja K_{sr}, px/µm	1,209842	2,371966	4,628801	9,529761

Sve tri korištene mjerne skale imaju istu mjernu nesigurnost (U = (150 + L) nm, L u mm). Prema tome, njihov utjecaj na točnost faktora podešavanja ovisi samo o njihovoj podjeli na mjernoj skali. Što je manja podjela mjerne skale dobivaju se precizniji faktori podešavanja, naravno uz povoljno povećanje. Ukoliko povećanje nije povoljno (premalo povećanje s malom mjernom raspodjelom skale, npr. pokušaj podešavanja s duljinom podešavanja od 0,01 mm na mjernoj skali PS16 pri povećanju od 10x, (slika 6.5.)) , dolazi do pogreške u izračunu faktora

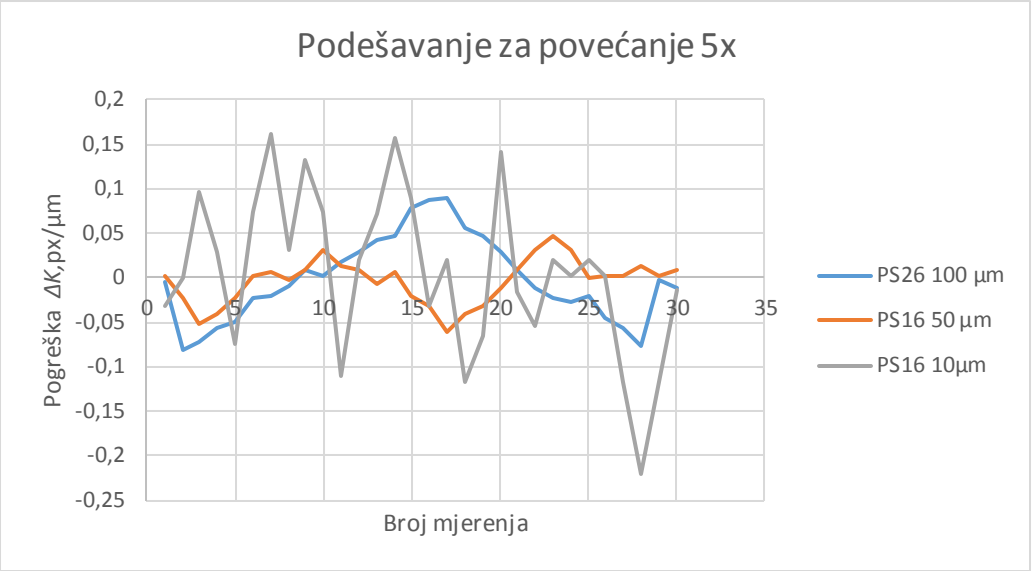
podešavanja. Ta pogreška je pogreška mjeritelja i njegove procjene postavljanja duljine podešavanja. Postoji mogućnost zoom-a, ali pritom dolazi do pikselizacije mjerne linije, što također dovodi do pogreške dobivanja faktora podešavanja.



Slika 6.5. Mjerna skala PS16 pri povećanju 10x

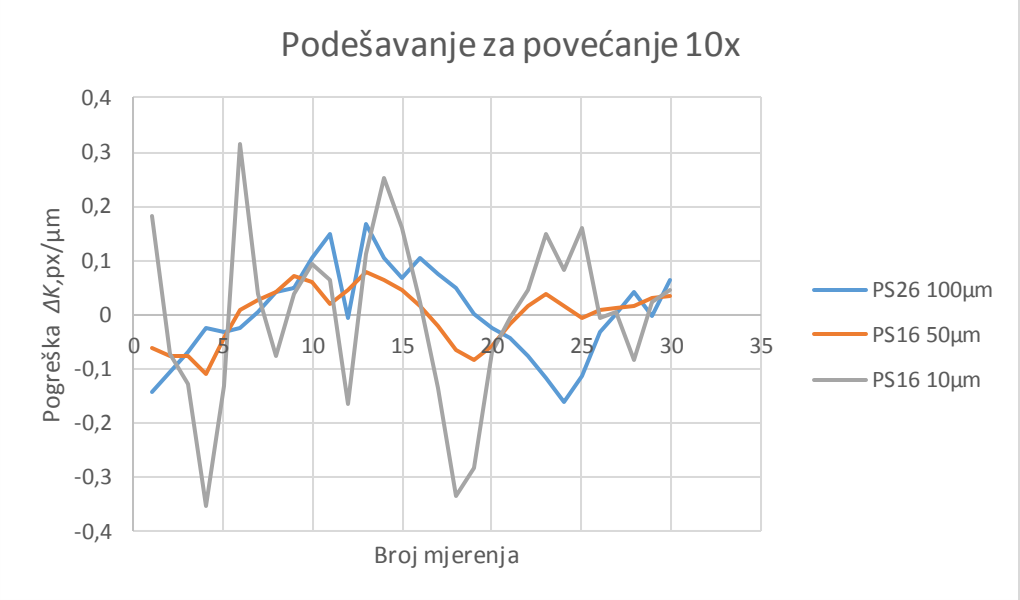
Na slikama 6.6., 6.7., 6.8. i 6.9. su dijagramski prikazi odstupanja faktora podešavanja za pojedine mjerne skale pri određenim povećanjima.

Na slici 6.6. se vidi da je za povećanje 5x najtočniji faktor podešavanja za mjernu skalu PS16 pri duljini podešavanja 50 µm jer ima najmanje odstupanje. Mjerna skala PS26 pri duljini podešavanja 100 µm također je poprilično točna, dok mjerna skala PS16 pri duljini podešavanja 10 µm ima premalu mjernu podjelu, tj. uzeta je premala duljina podešavanja za povećanje 5x.



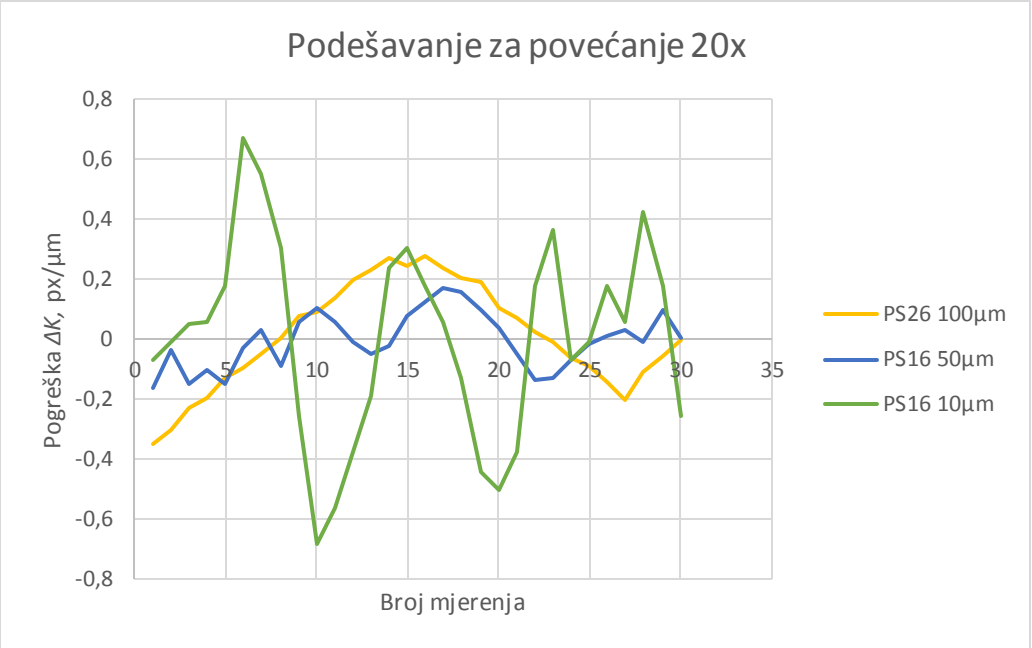
Slika 6.6. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 5x

Na slici 6.7. se vidi da je mjerna skala PS16 pri duljini podešavanja 50 µm najbolja za podešavanje za povećanje 10x, dok mjerna skala PS16 pri duljini podešavanja 10 µm i dalje ima premalu duljinu podešavanja.



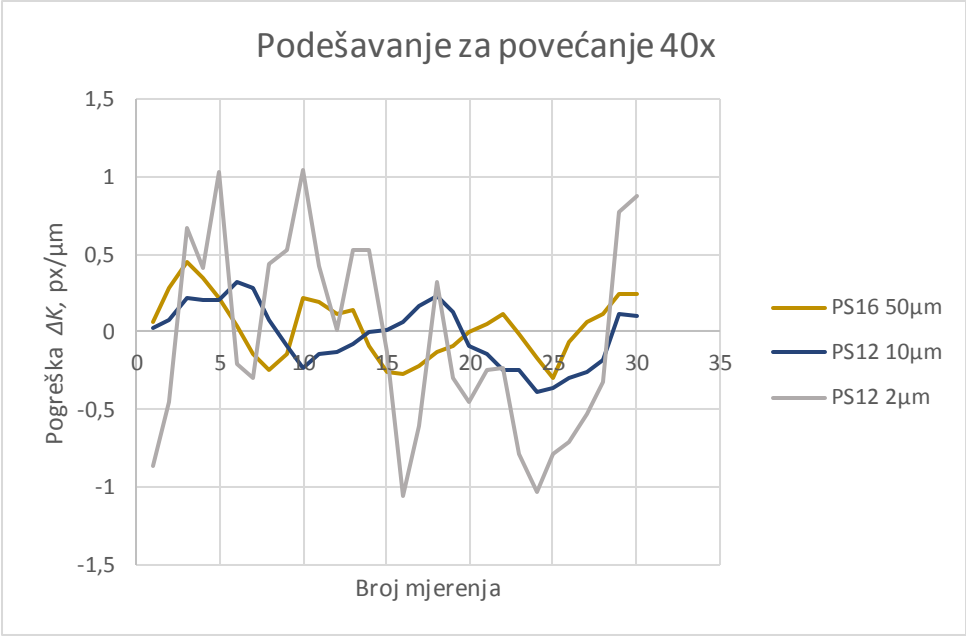
Slika 6.7. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 10x

Na slici 6.8. se vidi da je najbolje podešavanje za povećanje 20x moguće s mjernom skalom PS16 pri duljini podešavanja 50 µm, dok mjerna skala PS16 pri duljini podešavanja 10 µm i dalje ima premalu duljinu podešavanja za isto povećanje i teško ju je namjestiti.



Slika 6.8. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 20x

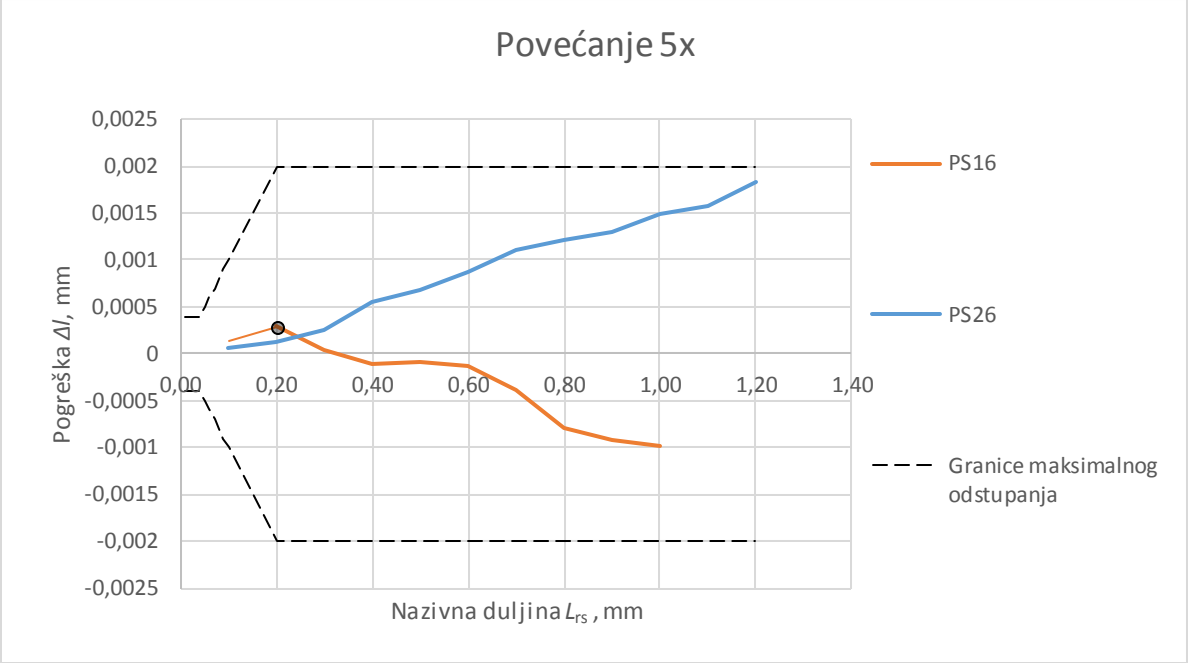
Na slici 6.9. se vidi da mjerna skala PS16 pri duljini podešavanja 50 µm i mjerna skala PS12 pri duljini podešavanja 10 µm za povećanje 40x daju najbolje podešavanje dok mjerna skala PS12 pri duljini podešavanja 2 µm ima premalu uzetu duljinu podešavanja te ju je teško namjestiti.



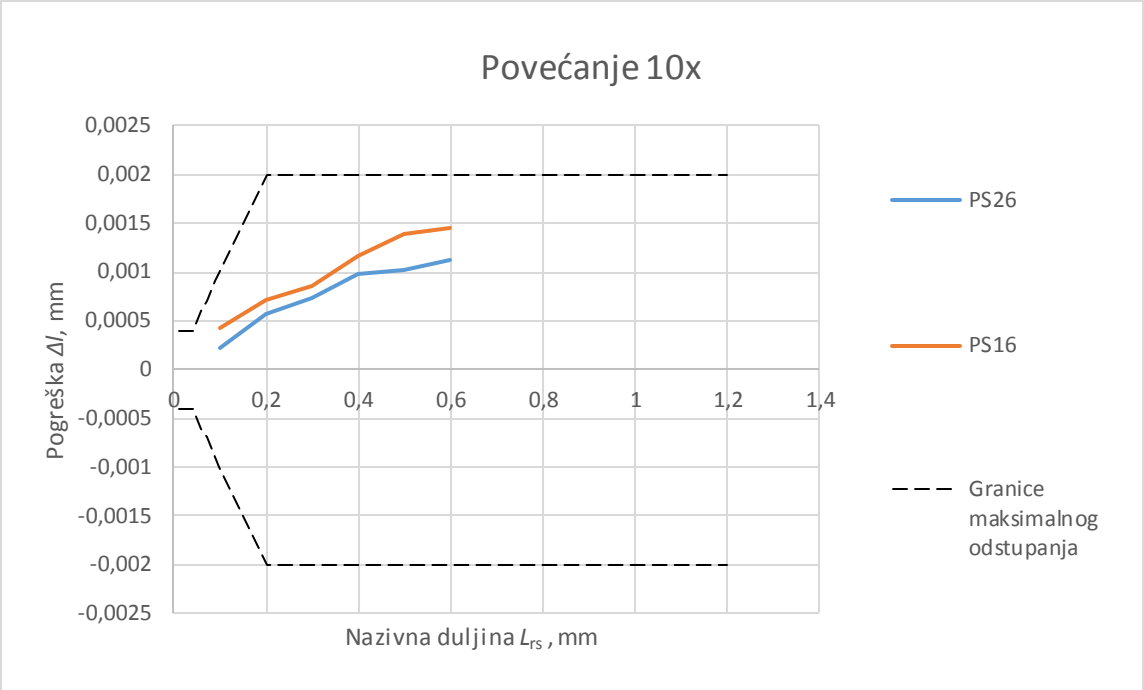
Slika 6.9. Dijagramski prikaz odstupanja faktora podešavanja za povećanje 40x

6.2. Analiza umjeravanja sustava LIMS 320/HV

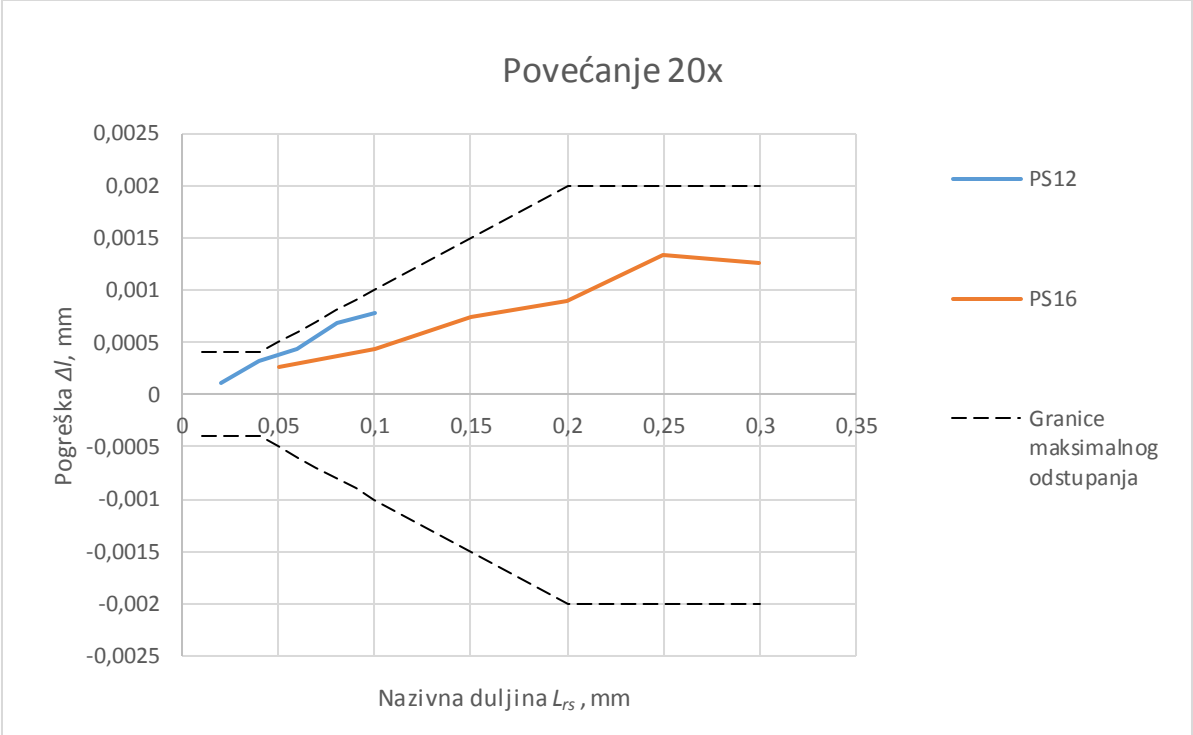
Direktnom metodom umjeravanja sukladno normi HRN EN ISO 6507:2008, dobivene su vrijednosti odstupanja pojedinih povećanja (tablica 5.8. i 5.9., a ostale dane u prilogu) na svim mjernim skalama. Radi provjere sustava očitanja analizirana su odstupanja te dijagramski prikazana na slikama 6.10., 6.11., 6.12. i 6.13. Crnom isprekidanom crtom je označeno maksimalno dozvoljeno odstupanje koje je određeno po tablici 3.2. iz norme.



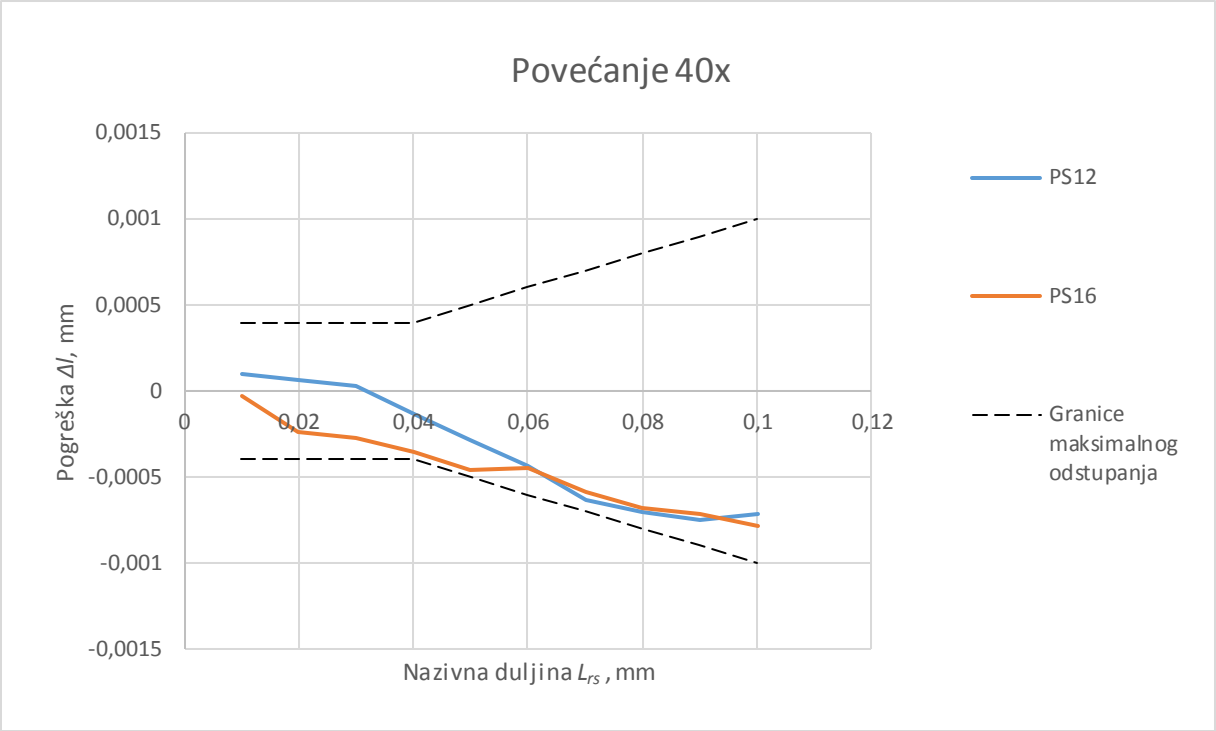
Slika 6.10. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 5x



Slika 6.11. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 10x



Slika 6.12. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 20x

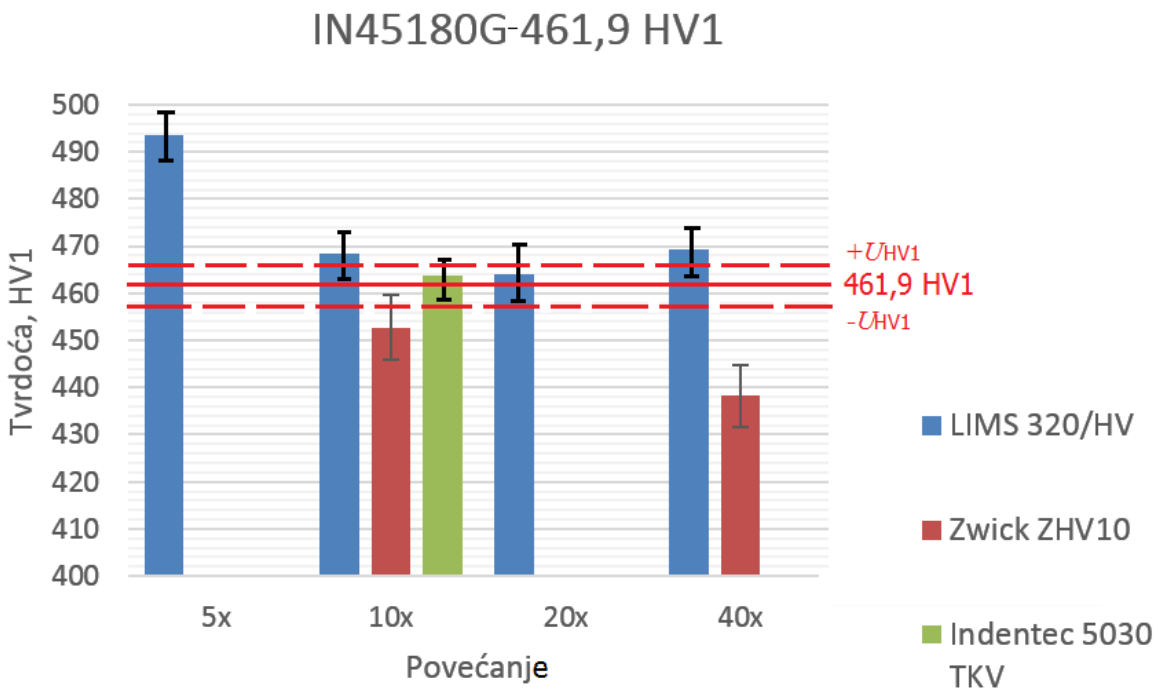


Slika 6.13. Dijagramski prikaz odstupanja pri povećanju 40x

Iz dijagramskih prikaza na slikama 6.10., 6.11., 6.12. i 6.13. se vidi da nijedna mjerna skala pri povećanjima od 5x, 10x, 20x i 40x nije prošla dozvoljeno maksimalno odstupanje i da su razlike između njihovih odstupanja vrlo male. Jedino je kod povećanja 5x (slika 6.10.) razlika u odstupanju dvije mjerne skale velika. Razlog tome je pogreška mjeritelja, koji je napravio sustavni pomak kod mjerenja mjerne skale PS16 koji se očitava u točki $T(0{,}2;0{,}000288)$. Ukoliko interpolacijske linije teže doljnjoj granici, pri mjerenju dijagonala dat će doprinos njihovom smanjenju te time povećanju tvrdoće. U suprotnom, dogodit će se drugi slučaj.

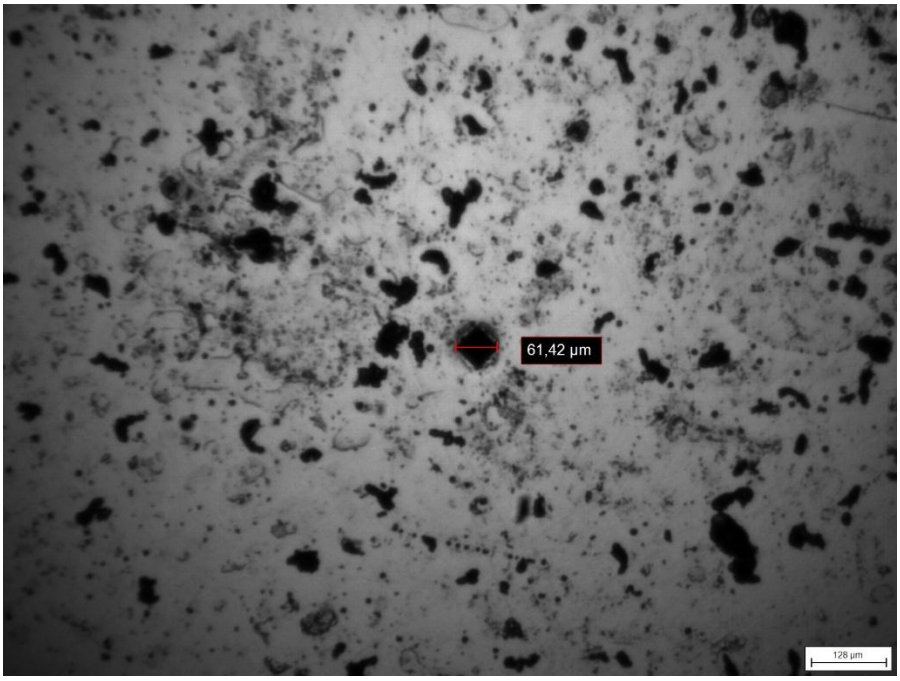
6.3. Usporedna mjerenja na referentnim etalonima

Prema rezultatima mjerenja u tablicama 5.10., 5.11. i 5.12. napravljena je analiza mjerenja referentnih otisaka na referentnim etalonskim pločicama kako bi se usporedili rezultati mjerenja tvrdomjera Zwick/ZHV10, tvrdomjera Indentec 5030 TKV i sustava za mjerenje LIMS 320/HV i došlo do određenih zaključaka. Na slikama 6.14., 6.15. i 6.16. su prikazana mjerenja referentnih otisaka na tri spomenuta uređaja, pod svim mogućim povećanjima. Na svakoj slici crvenom crtom su označene referentne vrijednosti tvrdoće, a isprekidanom crvenom crtom granice proširene mjerne nesigurnosti čije su vrijednosti preuzete iz potvrde o umjeravanju. Na svakom stupcu mjerenja s tvrdomjerima Zwick/ZHV10 i Indentec 5030 TKV dana je njihova mjerna nesigurnost koja se nalazi u tablicima 5.1. i 5.2.. Također je dana na temelju potvrde o umjeravanju. Na stupcima mjerenim sa sustavom LIMS 320/HV dano je njegovo standardno odstupanje mjerenja. Sustav LIMS 320/HV mjeri na svim povećanjima, dok tvrdomjeri Zwick/ZHV10 na 10x i 40x i Indentec 5030 TKV samo na 10x.



Slika 6.14. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu IN45180G - 461,9 HV1

Slika 6.14. prikazuje mjerenja referentnog otiska na etalonskoj pločici IN45180G - 461,9 HV1. S tvrdomjerom Indentec 5030 TKV se jedino može mjeriti na povećanju 10x. Izmjerena vrijednost sa sustavom LIMS 320/HV podosta odstupa od referentne vrijednosti (tablica 5.9.). Uzrok je premali otisak (d_{ref} = 0,0638 µm) za isto povećanje i neiskustvo mjeritelja koji uveliko pridodaju mjernoj nesigurnosti mjerenja (slika 6.15.).

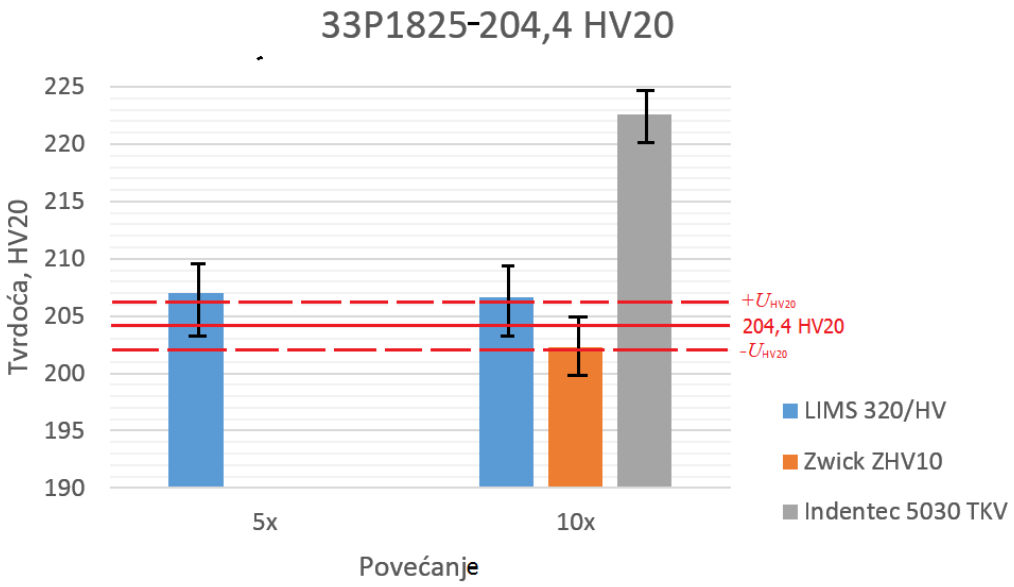


Slika 6.15. Mjerenje referentnog otiska na etalonskoj pločici IN45180G - 461,9 HV1 sa sustavom LIMS 320/HV

Pri povećanju od 10x sve tri vrijednosti mjerenja su oko referentne vrijednosti tvrdoće. Tvrdomjer Indentec 5030 TKV ima najmanje odstupanje, dok tvrdomjer Zwick/ZHV10 i sustav LIMS 320/HV imaju nešto veće. Tvrdomjer Zwick/ZHV10 sa svojom proširenom mjernom nesigurnosti ulazi u područje proširene mjerne nesigurnosti etalona.

Pri povećanju od 20x mjereno je samo na sustavu LIMS 320/HV, a mjerena je vrijednost u području proširene mjerne nesigurnosti etalona.

Pri povećanju od 40x sustav LIMS 320/HV malo odstupa od referentne vrijednosti dok tvrdomjer Zwick/ZHV10 odstupa ΔHV= -23,655 (tablica 5.10.). Njegovo odstupanje je toliko radi slabije mogućnosti očitanja veličine otiska zbog oštećenja prizme u sustavu za očitanje.



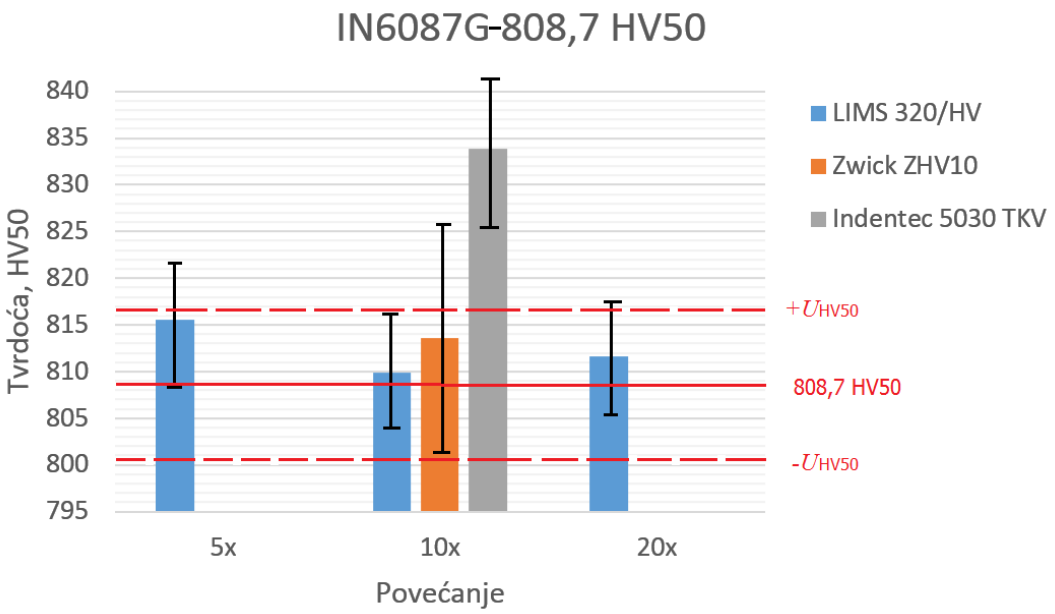
Slika 6.16. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu 33P1825 - 204,4 HV20

Na slici 6.16. se vide rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu 33P1825 - 204,4 HV20 pri povećanjima 5x i 10x. Na ostalim povećanjima mjerenje nije moguće radi prevelikog otiska (slika 6.17.). Na povećanju 5x sustav LIMS 320/HV je izmjerio 207,01 HV20, što je prihvatljiv rezultat, a na povećanju 10x 206,63 HV20, što je također prihvatljiv rezultat i unutar mjerne nesigurnosti mjerenja tvrdoće. Tvrdomjer Zwick/ZHV10 je izmjerio tvrdoću unutar proširene mjerne sigurnosti etalona, dok je mjerenje tvrdomjerom Indentec 5030 TKV izvan svih granica mjernih nesigurnosti s odstupanjem od $\Delta HV = 18{,}207$ (tablica 5.11.).



Slika 6.17. Rub otiska na etalonu 33P1825 - 204,4 HV20

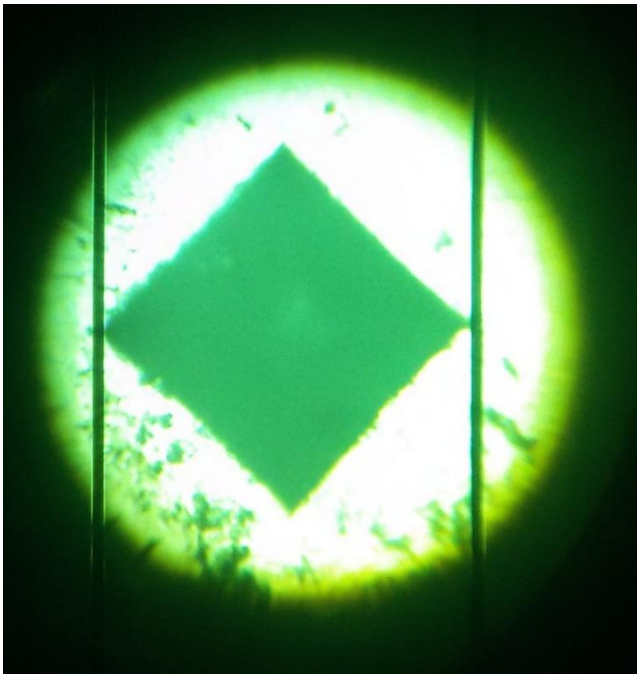
Na slici 6.18. su rezultati mjerenja na etalonu IN6087G - 808,7 HV50. Mjeren je pri povećanjima 5x, 10x i 20x. Pri povećanju 40x dijagonale otiska se nisu mogle izmjeriti. Pri povećanju 5x, rezultat mjerenja dijagonala sa sustavom LIMS 320/HV daje izvrstan rezultat te je unutar proširene mjerne nesigurnosti etalona. Na povećanju od 10x sustav LIMS 320/HV ima jako malo odstupanje od referentne vrijednosti (ΔHV = 1,158 (tablica 5.9.)). Mjerenje na tvrdomjeru Zwick ZHV10 je unutar proširene mjerne nesigurnosti etalona, a na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV su prevelika odstupanja.



Slika 6.18. Rezultati mjerenja referentnog otiska na etalonu IN6087G - 808,7 HV50

Gotovo sva mjerenja na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV imaju velika odstupanja, koja se mogu pripisati neiskustvu mjeritelja i dovode do sustavne pogreške. Na slici 6.19. se vidi mjeriteljska pogreška prilikom mjerenja na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV, prijelaz lijevom mjernom linijom unutar otiska, što je tipična pogreška neraspoznavanja ruba otiska. Obično se prezentira kao doprinos povećanju tvrdoće mjerenog otiska.

Iako ovaj sustav ima jako dobru rezoluciju, način očitavanja te podešavanja mjernih linija na rub otiska je vrlo problematično i iziskuje iskustvo mjeritelja.

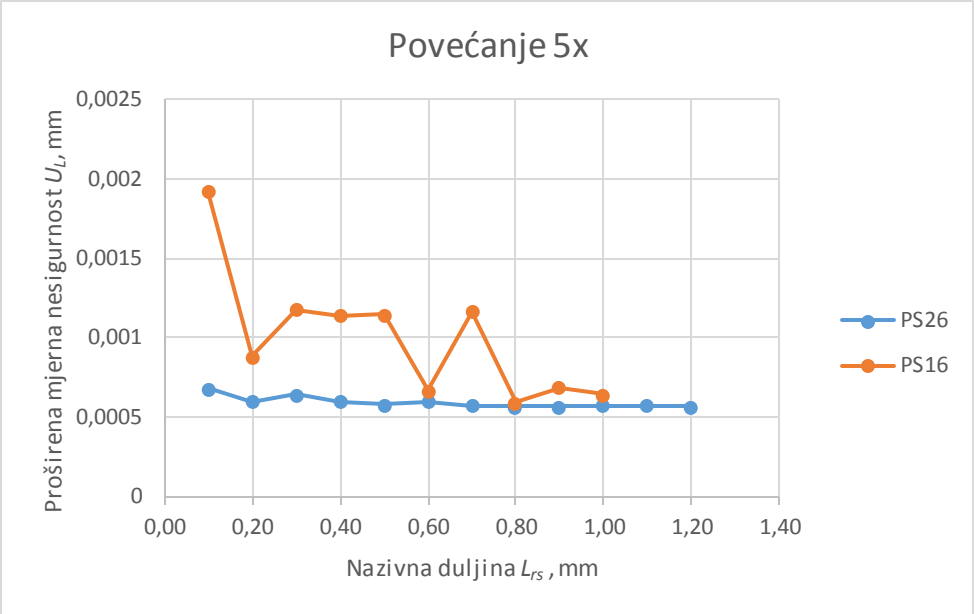


Slika 6.19. Prikaz mjerenja na tvrdomjeru Indentec 5030 TKV

6.4. Mjerna sposobnost sustava za očitanje veličine otiska tvrdoće LIMS 320/HV

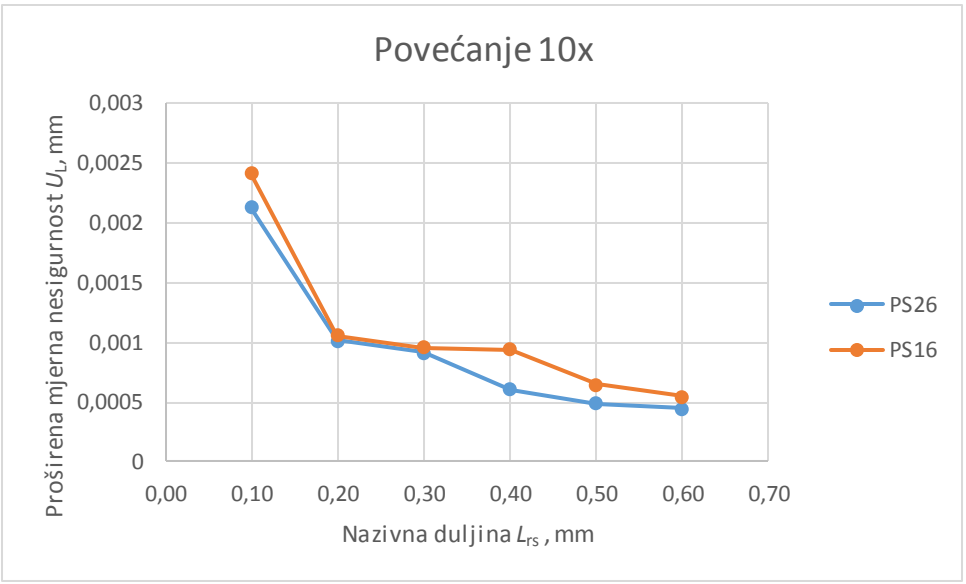
Radi dobivanja saznanja od mjernoj sposobnosti sustava, analizirani su rezultati umjeravanja i proširene mjerne nesigurnosti umjeravanja. Na slikama 6.20., 6.21., 6.22. i 6.23. su prikazane slike proširene mjerne nesigurnosti U_L po nazivnoj duljini L_{rs} za svako povećanje.

Prema slici 6.20. sustav LIMS 320/HV može mjeriti (pri povećanju 5x) veličine dijagonale otiska od 0,1 mm s proširenom mjernom nesigurnosti od 0,001925 mm. Mjerna nesigurnost opada na 0,001181 mm za dijagonale od 0,2 mm do 0,8 mm. Za dijagonale od 0,8 mm do 1 mm proširena mjerna nesigurnost je 0,000686 mm.



Slika 6.20. Mjerna sposobnost pri povećanju od 5x

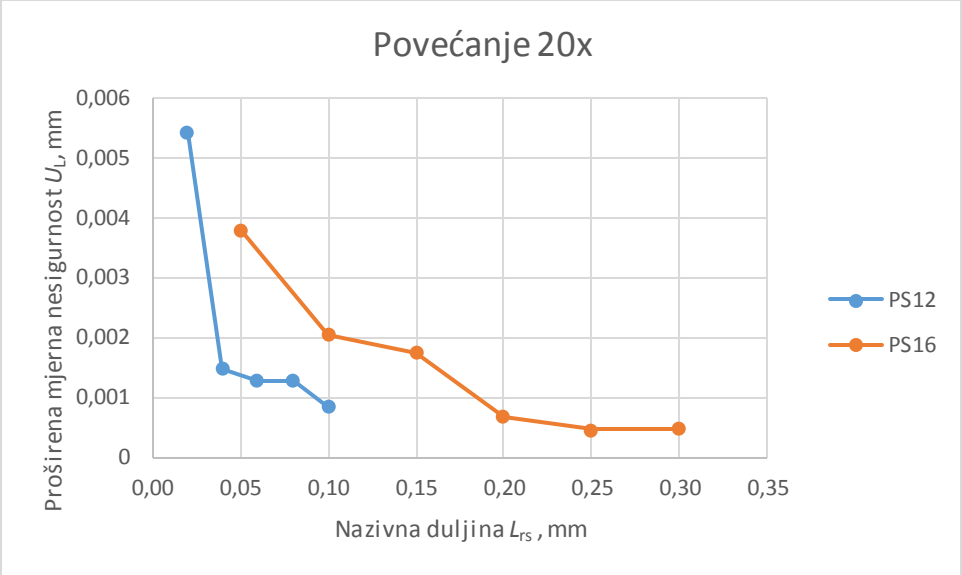
Prema slici 6.21. sustav LIMS 320/HV može mjeriti veličine dijagonala otiska od 0,1 mm do 0,2 mm s mjernom nesigurnošću od 0,002411 mm. Od 0,2 mm do 0,4 mm može mjeriti s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,001059 mm. Od 0,4 mm do 0,5 mm može mjeriti s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,000941 mm. Od 0,5 mm mjeri s U_L = 0,00065 mm.



Slika 6.21. Mjerna sposobnost pri povećanju od 10x

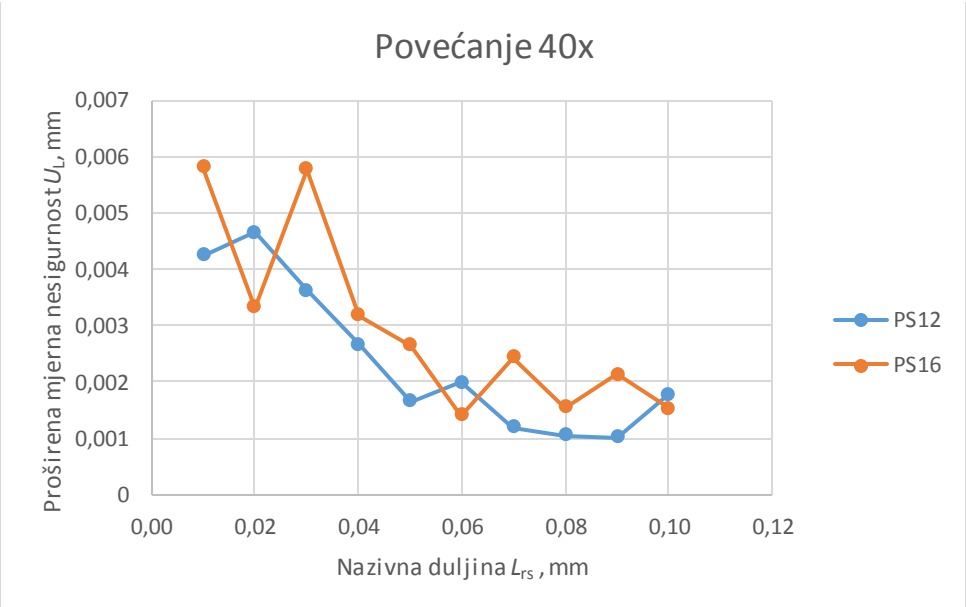
Pri povećanju od 20x (slika 6.22.) sustav LIMS 320/HV može mjeriti dijagonale otiska veličine od 0,02 mm do 0,05 mm s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,005435 mm. Od 0,05 mm do 0,1 mm može mjeriti s U_L = 0,00381mm. Od 0,1 mm do 0,15 mm može mjeriti s

U_L = 0,002057 mm. Od 0,15 mm do 0,2 mm može mjeriti s U_L = 0,00175 mm. Od 0,2 mm nadalje može mjeriti s U_L = 0,00068 mm.



Slika 6.22. Mjerna sposobnost pri povećanju od 20x

Pri povećanju od 40x (slika 6.23.) sustav LIMS 320/HV može mjeriti dijagonale veličine od 0,01 mm do 0,04 mm s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,005775 mm. Od 0,04 mm do 0,05 mm može mjeriti s proširenom mjernom nesigurnošću od 0,00318 mm. Od 0,05 – 0,07 mm može mjeriti s U_L = 0,00264 mm. Od 0,07 – 0,1 mm može mjeriti s U_L = 0,00213 mm.

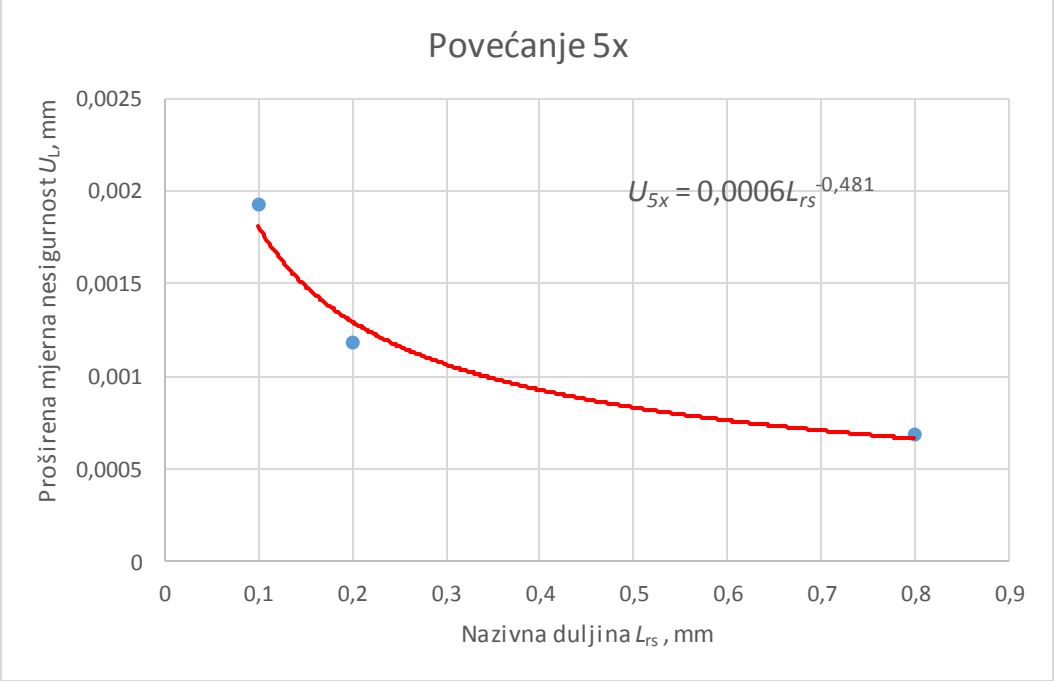


Slika 6.23. Mjerna sposobnost pri povećanju od 40x

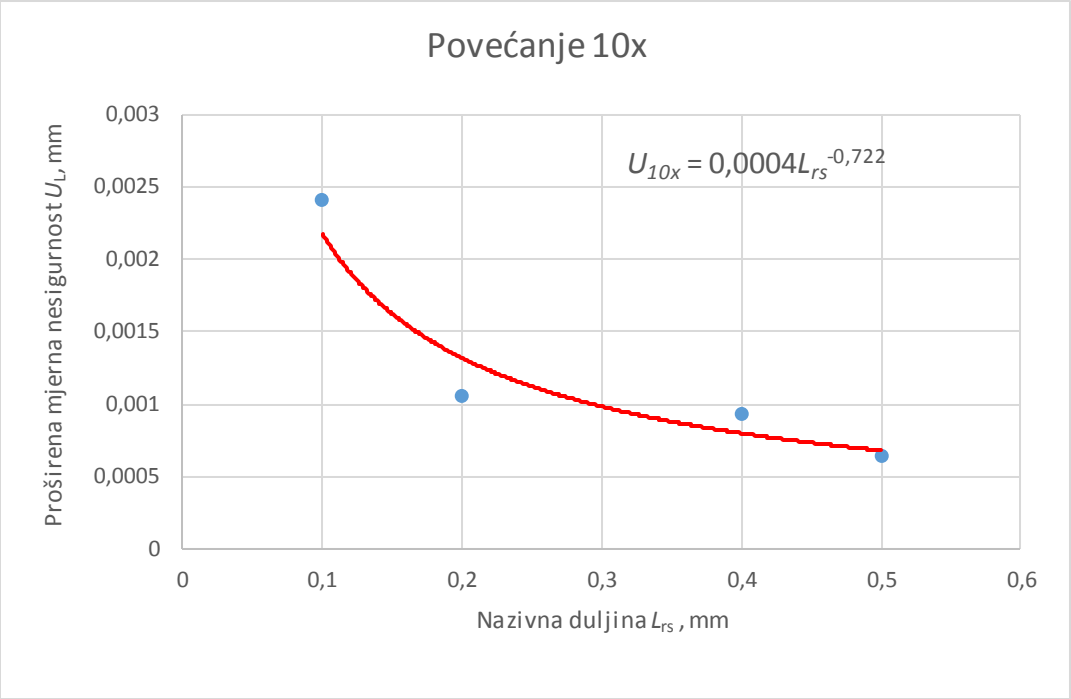
Iz tablice 6.2. su uzete vrijednosti za sastavljanje krivulja proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV po povećanjima, koje su prikazane na slikama 6.24., 6.25., 6.26. i 6.27.

Tablica 6.2. Proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV po povećanjima

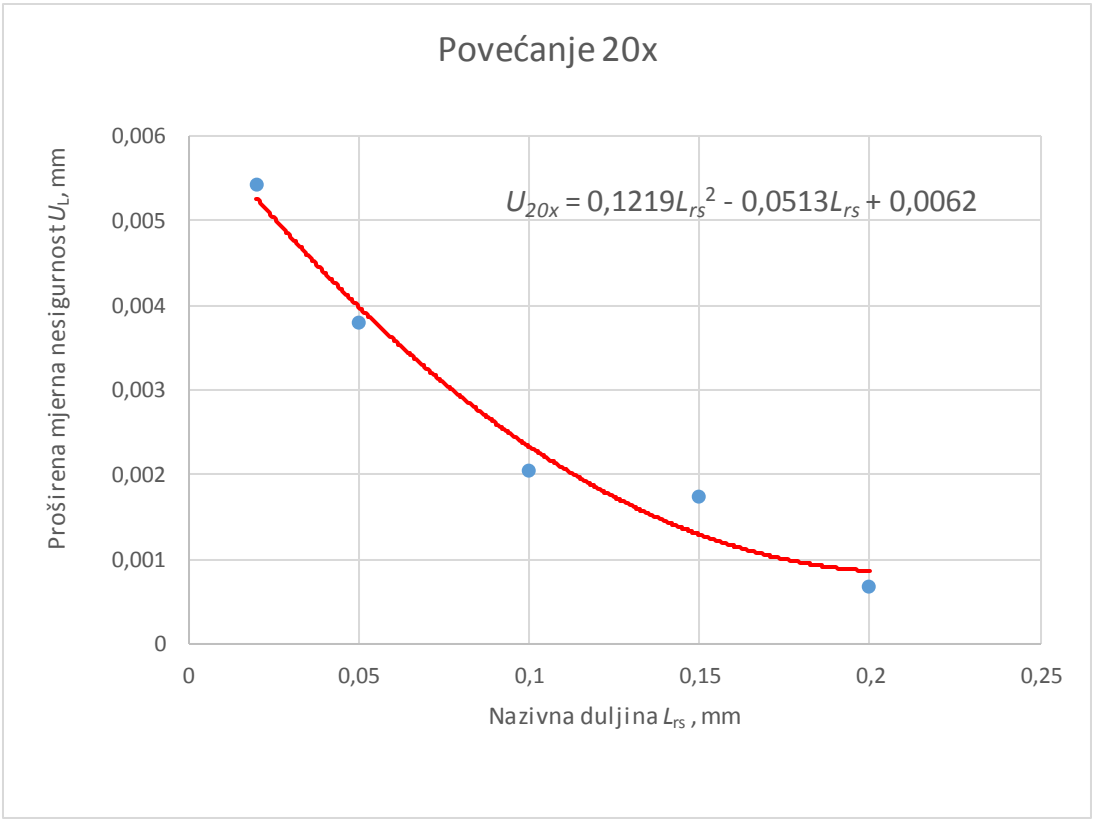
Povećanje	Nazivna duljina L_{rs} ,mm	U_L, mm
5x	0,1 - 0,2	0,001925
	0,2 - 0,8	0,001181
	0,8 - 1	0,000686
10x	0,1 - 0,2	0,002411
	0,2 - 0,4	0,001059
	0,4 - 0,5	0,000941
	0,5 - 0,6	0,00065
20x	0,02 - 0,05	0,005435
	0,05 - 0,1	0,00381
	0,1 - 0,15	0,002057
	0,15 - 0,2	0,00175
	0,2 - 0,3	0,00068
40x	0,01 - 0,04	0,005775
	0,04 - 0,05	0,00318
	0,05 - 0,07	0,00264
	0,07 - 0,1	0,00213



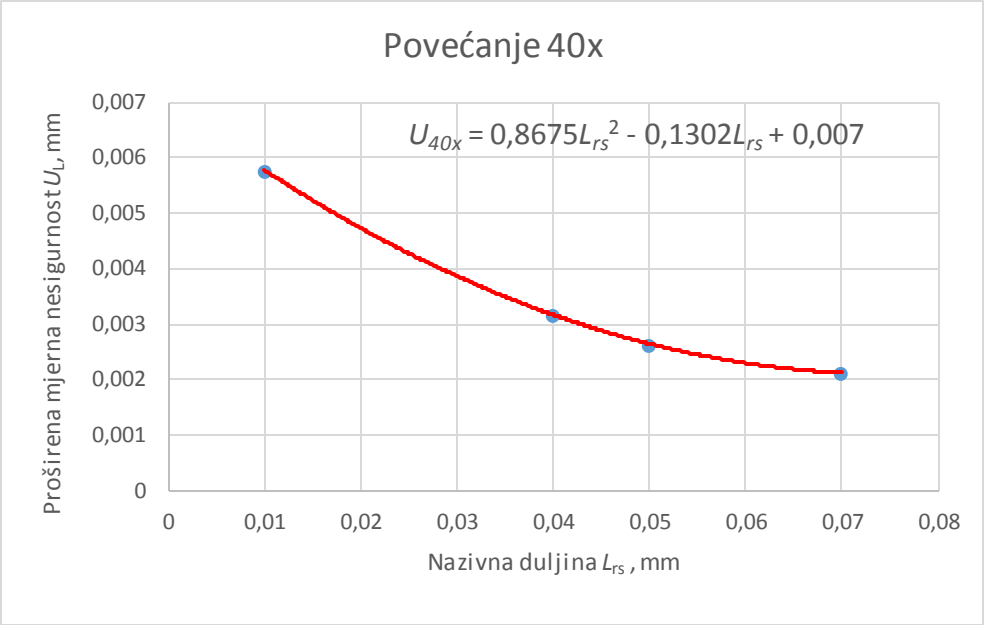
Slika 6.24. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 5x



Slika 6.25. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 10x



Slika 6.26. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 20x



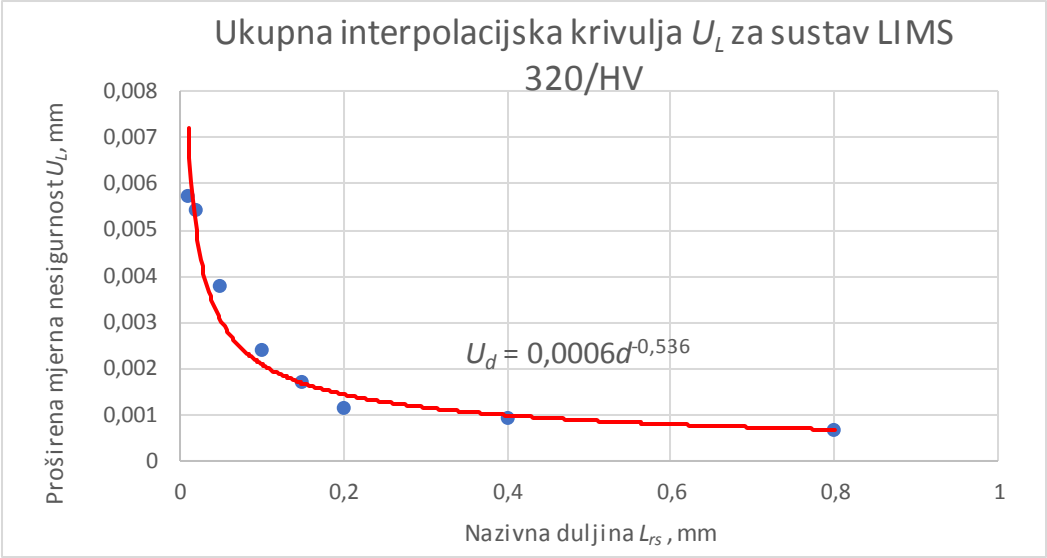
Slika 6.27. Dijagramski prikaz proširene mjerne nesigurnosti za povećanje 40x

Tablica 6.3. Proširena mjerna nesigurnost sustava LIMS 320/HV

Povećanje	Mjerno područje	$U_{LIMS\ 320/HV}$
5x	0,1 - 0,8	$U_{5x} = 0{,}0006d^{-0{,}481}$
10x	0,1 - 0,5	$U_{10x} = 0{,}0004d^{-0{,}722}$
20x	0,02 - 0,2	$U_{20x} = 0{,}1219d^2 - 0{,}0513d + 0{,}0062$
40x	0,01 - 0,07	$U_{40x} = 0{,}8675d^2 - 0{,}1302d + 0{,}007$

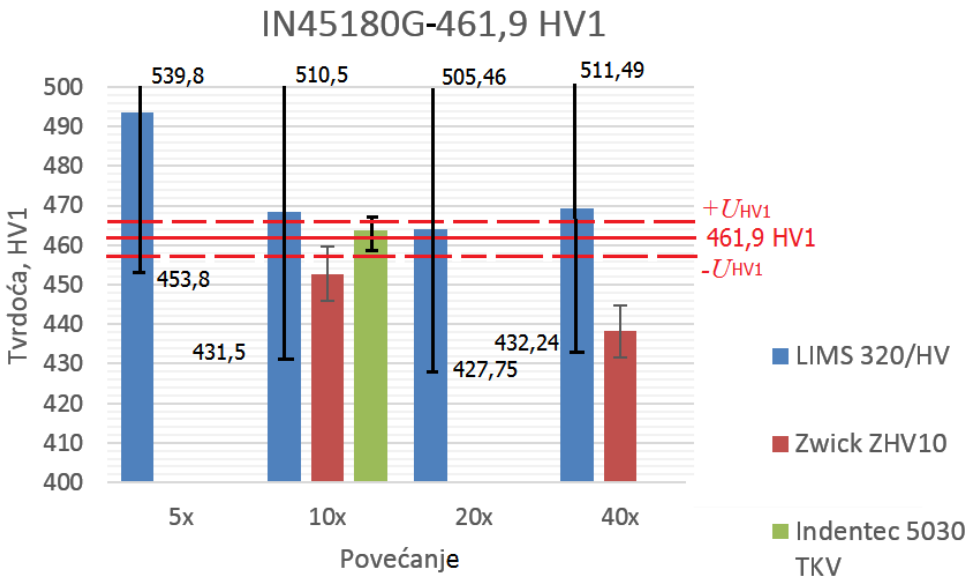
U tablici 6.3. su prikazane jednadžbe interpolacijskih krivulji proširene mjerne nesigurnosti za sustav LIMS 320/HV, za sva povećanja i mjerna područja. Mjerenjem određenog uzorka na uređaju, pod određenim povećanjem te ubacivanjem vrijednosti njegove dijagonale u jednadžbu dobiva se mjerna nesigurnost mjerenja sa sustavom LIMS 320/HV.

Na slici 6.28. je prikazana ukupna proširena mjerna nesigurnost za sustav LIMS 320/HV. Opisana je eksponencijalnom jednadžbom $U_d = 0{,}0006d^{-0{,}536}$ koja je mjerna sposobnost sustava LIMS 320/HV na svim povećanjima. Na osnovu ovih analiza može se zaključiti da ovaj sustav ima jako visoku mjernu nesigurnost u mjernom području ispod 0,2 mm.

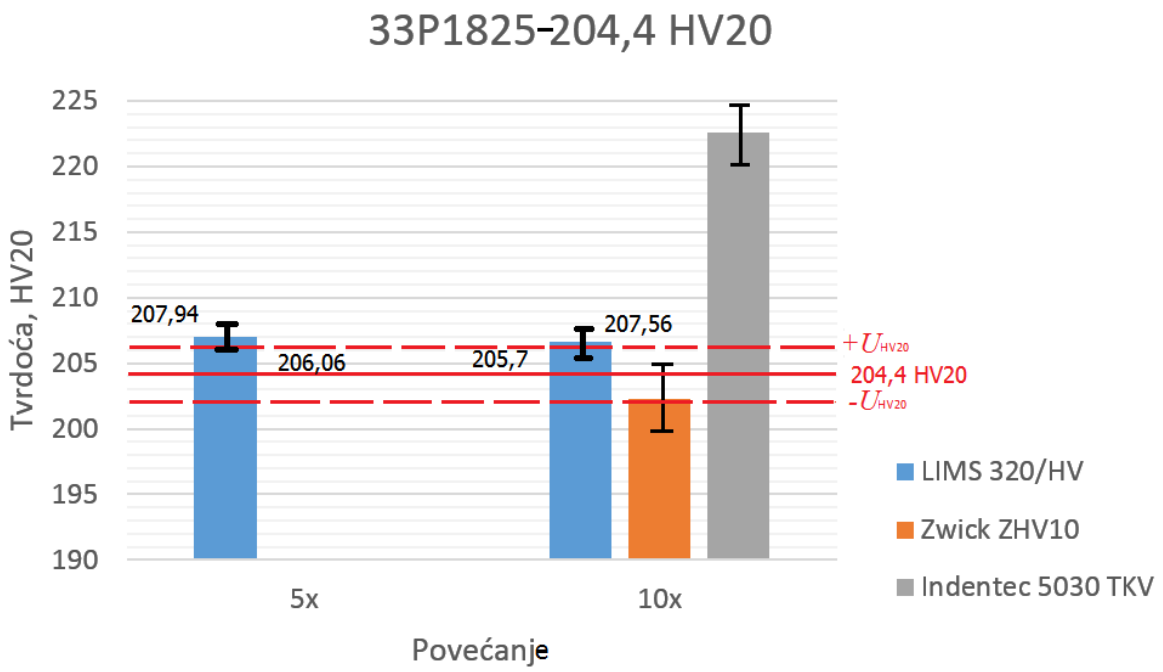


Slika 6.28. Ukupna proširena mjerna nesigurnost za sustav LIMS 320/HV

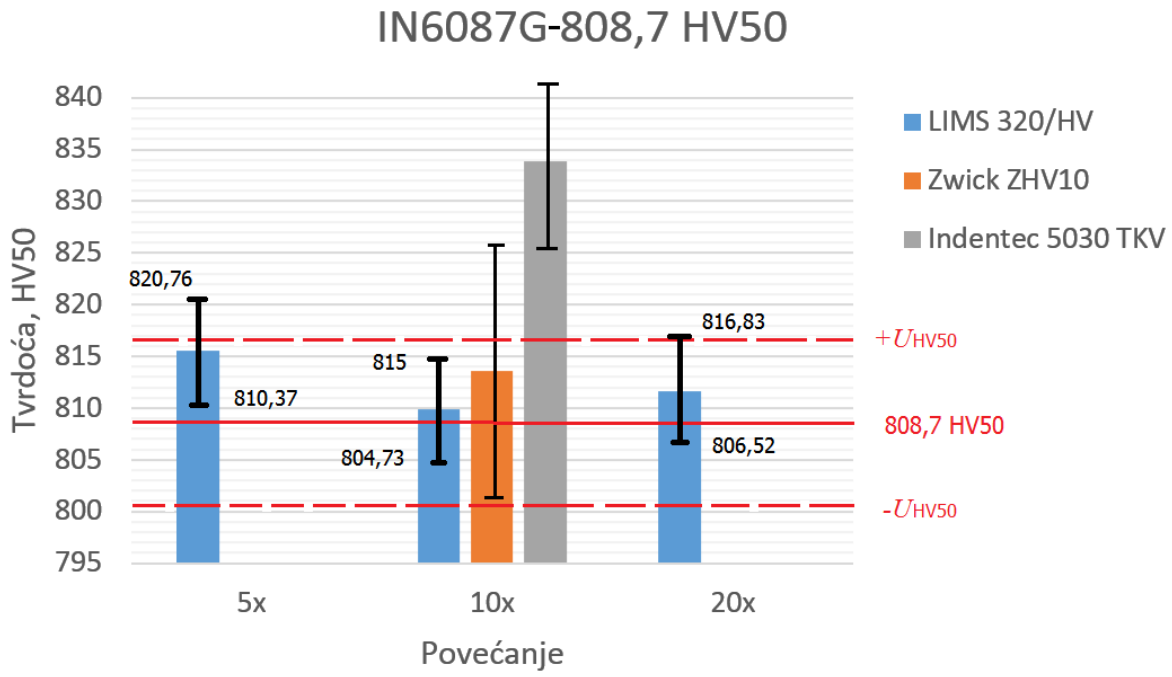
Na slikama 6.29., 6.30. i 6.31. su prikazana mjerenja sustava LIMS 320/HV s njegovom proširenom mjernom nesigurnošću. Pri mjerenju dijagonala otiska oko 0,0638 mm, proširena mjerna nesigurnost je 0,00298 mm što je oko ± 9% HV (slika 6.29.). Pri mjerenju dijagonala 33P1825, proširena mjerna nesigurnost pada na 0,000951 mm što je oko ± 0,5% HV (slika 6.30.), dok pri mjerenju dijagonala IN6087G, proširena mjerna nesigurnost je 0,0010725 mm što je ± 0,635% HV (slika 6.31.) Ovo također ide u prilog prijašnjem zaključku da ovaj sustav daje preveliku pogrešku pri mjerenjima dijagonale ispod 0,2 mm. Odnosno da je ključan faktor izbor odgovarajućeg povećanja.



Slika 6.29. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu IN45180G



Slika 6.30. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu 33P1825



Slika 6.31. Prikaz proširene mjerne nesigurnosti sustava LIMS 320/HV pri mjerenju referentnog otiska na etalonu IN6087G

7. ZAKLJUČAK

Mjerenje tvrdoće je jednostavan postupak ispitivanja, ali nepoznavanje sustava za očitanje otiska može prouzrokovati velike nesigurnosti. Na rezultat mjerenja utječu razni faktori, od okoliša do mjernog sustava, čiji su utjecaji izraženi mjernom nesigurnošću. S obzirom da su sustavi za mjerenje veličine otiska tvrdoće kod Vickers metode jedni od glavnih izvora nesigurnosti mjerenja, za jedan takav sustav je provedena analiza umjeravanja i izračun mjerne sposobnosti. Na temelju analize rezultata doneseni su slijedeći zaključci:

- Faktor podešavanja je polazna točka dobivanja mjerne sposobnosti mjernog sustava, zato je od velike važnosti dobiti što precizniju vrijednost faktora podešavanja *K*. Za svako povećanje (5x, 10x, 20x, 40x), faktor je drugačiji. Faktor nema svoju točnu i referentnu vrijednost, uvelike ovisi o samom sustavu koji se podešava, kameri u sustavu, pomoćnoj opremi s kojom se podešava i mjeritelju. Svaka korekcija fokusa ili zoom-a na optičkom stupu mijenja faktor te se iz tog razloga, jednom kada se optičke opcije namjeste, ne smiju dirati, u suprotnom se podešavanje mora ponoviti. Jedina mogućnost korekcije slike je pomoću dizanja i spuštanja cijelog optičkog stupa, što je definitivno nedostatak sustava LIMS 320/HV.

- Kod sustava s većim brojem povećanja, kao što je i sustav LIMS 320/HV, veliku ulogu ima umjeravanje koje je provedeno u skladu s normom HRN EN ISO 6507-2. Rezultati umjeravanja pokazuju da sustav pri svim povećanjima i na svim mjernim skalama pokazuje sposobnost mjerenja. Na dijagramskim prikazima odstupanja se vidi da nijedno odstupanje ne prelazi maksimalno dozvoljeno odstupanje, u suprotnom sustav ne bi bio podoban za buduća mjerenja. Izbor mjernih skala može znatno utjecati na mjernu sposobnost cijelokupnog sustava. Ovo je pogotovo izraženo pri velikim povećanjima kada se povećava i širina podjele na mjernoj skali, što dovodi do toga da je širina jedne linije podjela čak nekoliko piksela. Na mjernu nesigurnost umjeravanja velik utjecaj ima osvjetljenje. S obzirom da osvjetljenje nije prekrivalo cijelo mjerno područje, mjerna nesigurnost umjeravanja je veća.

- Kod optičkih sustava jedan od presudnih izvora nesigurnosti je način očitanja. Ovo je prikazano pri ponovnom mjerenju referentnih otisaka na referentnim etalonskim pločicama. Usporedbom mjernih rezultata zaključeno je da sustav LIMS 320/HV

otiske od 0,06 mm na povećanjima od 10x, 20x i 40x mjeri s malim odstupanjem iznad proširene mjerne nesigurnosti etalona, dok pri povećanju od 5x ima veliko odstupanje koje je uzrokovano nepodobnim povećanjem. Na otiscima većim od 0,3 mm pri svim povećanjima rezultati mjerenja se podudaraju s vrijednostima referentnog otiska. Kod sva tri sustava se pokazalo da namještanje mjernih linija unutar otiska doprinosi velikoj pogrešci mjerenja te samim time i povećanje mjerne vrijednosti tvrdoće. Prednosti sustava LIMS 320/HV su jednostavno sučelje i mjerenje. Također ima i digitalni zoom otiska čime olakšava mjerenje otiska, ali ga s druge strane i pikselizira, čime pridodaje mjernoj nesigurnosti mjerenja.

- Analizom rezultata određene su mjerne sposobnosti sustava LIMS 320/HV pri svakom povećanju i ukupna mjerna sposobnost koja je opisana eksponencijalnom jednadžbom $U_d = 0{,}0006d^{-0{,}536}$. Analizom je vidljivo da je ovaj sustav primjenjiv za veličine otisaka iznad 0,2 (ili 0,3) mm. Kod nižih vrijednosti dijagonala je mjerna nesigurnost jako velika (povećana). Također prikazivanje mjerne sposobnosti jednom jednadžbom nije prihvatljivo te je bolje za svako povećanje zasebno imati izračun mjerne sposobnosti. No u tom slučaju su potrebne odgovarajuće mjerne skale, što u ovom slučaju nije u potpunosti omogućeno.

LITERATURA:

[1] Quality Magazine; 50 Years of Quality: History of Hardness Testing (http://www.qualitymag.com/articles/88218-50-years-of-quality-history-of-hardness-testing) (6.11.16.)

[2] Emco Test; Principles of Hardness Testing: History of Hardness Testing (http://www.emcotest.com/en/the-world-of-hardness-testing/hardness-know-how/theory-of-hardness-testing/principles-of-hardness-testing/history-of-hardness-testing/) (6.11.16.)

[3] HRN EN ISO 6507: Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – 1. dio : Metoda ispitivanja (ISO 6507-1:2008)

[4] EURAMET; Calibration Guide: Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements, 2007.

[5] HRN EN ISO 6507: Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – 3. dio : Tablične vrijednosti tvrdoće (ISO 6507-3:2008)

[6] HRN EN ISO 6507: Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – 2. dio : Provjeravanje i umjeravanje ispitnih tvrdomjera (ISO 6507-2:2008)

[7] stage micrometers web.pdf (http://www.pyser-sgi.com/images/thumbnails/Graticules/Stage%20Micrometers%20web.pdf) (29.11.16.)

[8] mjerna_nesigurnost.pdf

(http://www.dzm.hr/_download/repository/mjerna_nesigurnost.pdf) (29.11.16.)

[9] Runje, B.; Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, 2014.

[10] Yamamoto, Y., Yamamoto, M., Hattori, K.; Study on methods for measuring Vickers indentations, IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences, Metrology in Modern Context; Pattaya, Chonburi, Thailand; November 22-25, 2010.

[11] Tvrdomjer Zwick/ZHV10 (ZHV10.pdf) (http://senselektro.hu/wp-content/uploads/zwick/ZHV10.pdf) (29.11.16.)

[12] Pyser – SGI Limited; Stage micrometer PS26 (http://www.pyser-sgi.com/graticules/stage-micrometers-calibration-scales-grids/calibration-scales-ps-series/ps26-mkii-hardness-tester-calibration-slides-brinell-detail) (29.11.16.)

[13] Pyser – SGI Limited; Stage micrometer PS16 (http://www.pyser-sgi.com/graticules/stage-micrometers-calibration-scales-grids/calibration-scales-ps-series/ps16-micrometer-scale-crossed-scales-1mm-0-01mm-detail) (29.11.16.)

[14]] Pyser – SGI Limited; Stage micrometer PS12 (http://www.pyser-sgi.com/graticules/stage-micrometers-calibration-scales-grids/calibration-scales-ps-series/ps12-micrometer-scale-0-1mm-in-0-002mm-divisions-detail) (29.11.16.)

PRILOG:

Tablica P1. Umjeravanje mjernom skalom PS26 za povećanje 10x sustava 320/HV

Tablica P2. Umjeravanje mjernom skalom PS12 za povećanje 20x sustava 320/HV

Tablica P3. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 5x sustava 320/HV

Tablica P4. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 10x sustava 320/HV

Tablica P5. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 20x sustava 320/HV

Tablica P6. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 40x sustava 320/HV

Tablica P1. Umjeravanje mjernom skalom PS26 za povećanje 10x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,10	0,09987	-0,00013	0,10030	0,00030	0,10044	0,00044	0,10038	0,00038	0,10009	0,00009	0,100216	0,000216	0,001064	0,002127
0,20	0,20047	0,00047	0,20060	0,00060	0,20092	0,00092	0,20052	0,00052	0,20037	0,00037	0,200576	0,000576	0,000506	0,001011
0,30	0,30031	0,00031	0,30107	0,00107	0,30085	0,00085	0,30069	0,00069	0,30080	0,00080	0,300744	0,000744	0,000458	0,000916
0,40	0,40080	0,00080	0,40121	0,00121	0,40114	0,00114	0,40073	0,00073	0,40099	0,00099	0,400974	0,000974	0,000302	0,000604
0,50	0,50074	0,00074	0,50103	0,00103	0,50116	0,00116	0,50101	0,00101	0,50114	0,00114	0,501016	0,001016	0,000244	0,000489
0,60	0,60098	0,00098	0,60124	0,00124	0,60112	0,00112	0,60097	0,00097	0,60129	0,00129	0,60112	0,00112	0,000222	0,000443

Tablica P2. Umjeravanje mjernom skalom PS12 za povećanje 20x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,02	0,02008	0,00008	0,02000	0,00000	0,02009	0,00009	0,02003	0,00003	0,02031	0,00031	0,020102	0,000102	0,0027177	0,0054355
0,04	0,04039	0,00039	0,04031	0,00031	0,0403	0,00030	0,04022	0,00022	0,04036	0,00036	0,040316	0,000316	0,0007395	0,001479
0,06	0,06037	0,00037	0,06034	0,00034	0,06053	0,00053	0,06051	0,00051	0,06044	0,00044	0,060438	0,000438	0,0006388	0,0012775
0,08	0,08077	0,00077	0,08054	0,00054	0,08069	0,00069	0,08059	0,00059	0,08080	0,00080	0,080678	0,000678	0,0006424	0,0012847
0,10	0,10086	0,00086	0,10077	0,00077	0,10085	0,00085	0,10064	0,00064	0,10081	0,00081	0,100786	0,000786	0,0004272	0,0008545

Tablica P3. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 5x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,10	0,10014	0,00014	0,10022	0,00022	0,09997	-0,00003	0,09989	-0,00011	0,10041	0,00041	0,100126	0,000126	0,0009622	0,0019245
0,20	0,20042	0,00042	0,20041	0,00041	0,20036	0,00036	0,20016	0,00016	0,20009	0,00009	0,200288	0,000288	0,0004421	0,0008842
0,30	0,30004	0,00004	0,30040	0,00040	0,3003	0,00030	0,29951	-0,00049	0,29996	-0,00004	0,300042	4,2E-05	0,0005903	0,0011807
0,40	0,39923	-0,00077	0,40009	0,00009	0,39994	-0,00006	0,39972	-0,00028	0,40042	0,00042	0,39988	-0,00012	0,0005707	0,0011413
0,50	0,49924	-0,00076	0,50023	0,00023	0,49951	-0,00049	0,49990	-0,00010	0,50064	0,00064	0,499904	-9,6E-05	0,000573	0,001146
0,60	0,60008	0,00008	0,59982	-0,00018	0,59952	-0,00048	0,59981	-0,00019	0,60011	0,00011	0,599868	-0,000132	0,0003338	0,0006676
0,70	0,70009	0,00009	0,69953	-0,00047	0,69911	-0,00089	0,69864	-0,00136	0,70067	0,00067	0,699608	-0,000392	0,0005831	0,0011663
0,80	0,79925	-0,00075	0,79940	-0,00060	0,79903	-0,00097	0,79932	-0,00068	0,79907	-0,00093	0,799214	-0,000786	0,0002956	0,0005913
0,90	0,89912	-0,00088	0,89955	-0,00045	0,89854	-0,00146	0,89930	-0,00070	0,89885	-0,00115	0,899072	-0,000928	0,0003428	0,0006855
1,00	0,99927	-0,00073	0,99946	-0,00054	0,99867	-0,00133	0,99881	-0,00119	0,99882	-0,00118	0,999006	-0,000994	0,0003203	0,0006405

Tablica P4. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 10x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,10	0,10012	0,00012	0,10030	0,00030	0,10033	0,00033	0,10059	0,00059	0,10080	0,00080	0,100428	0,000428	0,001205	0,00241
0,20	0,20036	0,00036	0,20080	0,00080	0,20075	0,00075	0,20068	0,00068	0,20096	0,00096	0,20071	0,00071	0,000529	0,001058
0,30	0,30038	0,00038	0,30078	0,00078	0,30105	0,00105	0,30097	0,00097	0,30110	0,00110	0,300856	0,000856	0,000476	0,000952
0,40	0,40080	0,00080	0,40094	0,00094	0,4011	0,00110	0,40120	0,00120	0,40180	0,00180	0,401168	0,001168	0,000471	0,000941
0,50	0,50120	0,00120	0,50098	0,00098	0,50154	0,00154	0,50153	0,00153	0,50170	0,00170	0,50139	0,00139	0,000325	0,00065
0,60	0,60125	0,00125	0,60110	0,00110	0,60172	0,00172	0,60159	0,00159	0,60160	0,00160	0,601452	0,001452	0,000275	0,00055

Tablica P5. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 20x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,05	0,05029	0,00029	0,05060	0,00060	0,05027	0,00027	0,05002	0,00002	0,05017	0,00017	0,05027	0,00027	0,001904	0,003807
0,10	0,10032	0,00032	0,10078	0,00078	0,10055	0,00055	0,10019	0,00019	0,10038	0,00038	0,100444	0,000444	0,001028	0,002057
0,15	0,15045	0,00045	0,15118	0,00118	0,15064	0,00064	0,15056	0,00056	0,15086	0,00086	0,150738	0,000738	0,000873	0,001746
0,20	0,20088	0,00088	0,20107	0,00107	0,20096	0,00096	0,20071	0,00071	0,20085	0,00085	0,200894	0,000894	0,000339	0,000677
0,25	0,25125	0,00125	0,25134	0,00134	0,25122	0,00122	0,25137	0,00137	0,25146	0,00146	0,251328	0,001328	0,000236	0,000472
0,30	0,30116	0,00116	0,30136	0,00136	0,30111	0,00111	0,30133	0,00133	0,30137	0,00137	0,301266	0,001266	0,000243	0,000486

Tablica P6. Umjeravanje mjernom skalom PS16 za povećanje 40x sustava LIMS 320/HV

L_{rs}, mm	L_1, mm	ΔL_1, mm	L_2, mm	ΔL_2, mm	L_3, mm	ΔL_3, mm	L_4, mm	ΔL_4, mm	L_5, mm	ΔL_5, mm	L_{sr}, mm	Δl, mm	u_L, mm	U_L, mm
0,01	0,00995	-0,00005	0,00993	-0,00007	0,00996	-0,00004	0,01009	0,00009	0,00995	-0,00005	0,009976	-2,4E-05	0,002902	0,005805
0,02	0,01981	-0,00019	0,01982	-0,00018	0,01977	-0,00023	0,01964	-0,00036	0,01979	-0,00021	0,019766	-0,00023	0,001659	0,003318
0,03	0,02985	-0,00015	0,02966	-0,00034	0,02977	-0,00023	0,02943	-0,00057	0,02992	-0,00008	0,029726	-0,00027	0,002887	0,005775
0,04	0,03968	-0,00032	0,03962	-0,00038	0,03969	-0,00031	0,03942	-0,00058	0,03980	-0,00020	0,039642	-0,00036	0,001588	0,003175
0,05	0,04950	-0,00050	0,04941	-0,00059	0,04961	-0,00039	0,04941	-0,00059	0,04975	-0,00025	0,049536	-0,00046	0,00132	0,002639
0,06	0,05957	-0,00043	0,05942	-0,00058	0,05953	-0,00047	0,05967	-0,00033	0,05959	-0,00041	0,059556	-0,00044	0,000704	0,001408
0,07	0,06932	-0,00068	0,06934	-0,00066	0,06973	-0,00027	0,06925	-0,00075	0,06940	-0,00060	0,069408	-0,00059	0,00122	0,002439
0,08	0,07936	-0,00064	0,07933	-0,00067	0,07931	-0,00069	0,07911	-0,00089	0,07948	-0,00052	0,079318	-0,00068	0,000769	0,001538
0,09	0,08922	-0,00078	0,08939	-0,00061	0,08923	-0,00077	0,08903	-0,00097	0,08959	-0,00041	0,089291	-0,00071	0,001064	0,002128
0,10	0,09916	-0,00085	0,09911	-0,00089	0,09922	-0,00078	0,09909	-0,00091	0,09950	-0,00050	0,099215	-0,00078	0,000768	0,001536