Utjecaj ticala i filtracije na parametre hrapavosti ostvarene elektroničko-mehaničkim uređajem s ticalom

Klarić, Dora

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:570955

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dora Klarić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Doc.dr.sc. Gorana Baršić, dipl. ing.

Student:
Dora Klarić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentorici doc.dr.sc. Gorani Baršić na susretljivosti i ukazanoj pomoći tijekom pisanja rada te obitelji i prijateljima na podršci tijekom studija.

Dora Klarić

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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DORA KLARIĆ** Mat. br.: 0069067536

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj ticala i filtracije na parametre hrapavosti ostvarene elektroničko-mehaničkim uređaje s ticalom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of stylus and filtration on roughness parameters obtained using stylus instrument**

Opis zadatka:

Elektroničko-mehanički uređaji za ispitivanje hrapavosti najčešće su korišteni uređaji za utvrđivanje kvantitativne informacije o stanju hrapavosti površina. Elektroničko-mehanički uređaji imaju izmjenjiva ticala te mogućnost filtracije signala različitim filterima koji su integrirani u sam mjerni uređaj. Nazivne karakteristike elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom definirane su normom ISO 3274:1996, a pravila i postupci za ocjenu površinske teksture dani su u normi ISO 4288:1996. Primjena različitih sustava vođenja ticala i radijusa igle ticala, kao i izbor filtera i graničnih vrijednosti električnog filtera mogu utjecati na izobličenje geometrije snimljenog profila te posljedično na rezultate mjerenja parametara hrapavosti. U skladu s navedenim u diplomskom radu potrebno je obraditi sljedeće:

1. Detaljno opisati karakteristike elektroničko-mehaničkih uređaja te pravila i postupke za ocjenu površinske teksture.
2. Na regularnim i iregularnim geometrijama profila provesti mjerenje korištenjem različitih sustava vođenja ticala i radijusa igle ticala.
3. Profile ostvarene u uvjetima navedenim u prethodnoj točki filtrirati različitim komercijalno dostupnim filterima.
4. Analizirati utjecaj ticala i filtracije na izobličenje geometrije snimljenog profila i rezultate mjerenja parametara hrapavosti.

U diplomskom zadatku potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
24. rujna 2020.	26. studenog 2020.	30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:
doc. dr. sc. Gorana Baršić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA VI

POPIS OZNAKA VII

SAŽETAK VIII

SUMMARY IX

1. UVOD 1

2. POVRŠINSKA TOPOGRAFIJA I PARAMETRI HRAPAVOSTI 2

2.1. Komponente površinske topografije 2

2.2. Parametri hrapavosti 3

2.2.1. Amplitudni parametri 5

2.2.2. Uzdužni parametri 7

2.2.3. Hibridni parametri 8

2.2.4. Krivuljni i srodni parametri 9

3. MJERENJE HRAPAVOSTI 12

3.1. Mjerenje hrapavosti elektroničko-mehaničkim uređajem s ticalom 12

3.3. Perthometer S8P 14

4. PRAVILA I POSTUPCI KOD MJERENJA PROFILA HRAPAVOST 16

5. UTJECAJ RADIJUSA TICALA I FILTRACIJE NA PARAMETRE 17

6. IZBOR ETALONA ZA MJERENJE I REZULTATI MJERENJA 20

6.1. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 2 μm 24

6.2. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 5 μm 30

6.3. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 10 μm 35

7. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA 41

8. ZAKLJUČAK 50

LITERATURA 51

PRILOZI..... 52

POPIS SLIKA

Slika 1. Komponente površinske topografije [2] 2
Slika 2. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti [1] 4
Slika 3. Karakteristične duljine ispitivanja [1] 5
Slika 4. Srednja linija profila [1] 5
Slika 5. Prikaz *Ra* parametra 6
Slika 6. *Rp*, *Rv* i *Rz* parametri [1] 6
Slika 7. *Rt* parametar [1] 7
Slika 8. Prikaz koraka profila [1] 7
Slika 9. Prikaz lokalnih vrhova profila iznad odabrane razine [5] 8
Slika 10. Nagib profila u različitim točkama [1] 9
Slika 11. Krivulja udjela materijala [1] 9
Slika 12. Računanje udjela materijala u profilu [1] 10
Slika 13. Parametri hrapavosti [1] 11
Slika 14. Dijelovi elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom [6] 13
Slika 15. Prikaz vanjskog vođenja igle ticala [2] 13
Slika 16. Prikaz vođenja igle ticala pomoću nožice [2] 14
Slika 17. Perthometer S8P [6] 14
Slika 18. Prikaz utjecaja veličine ticala na površinski profil [8] 17
Slika 19. Konusni oblik ticala sa zakrivljenim vrhom koji ima različite vrijednosti radijusa i kuta konusa [9] 18
Slika 20. Etalon s regularnom trokutastom geometrijom 20
Slika 21. Etalon s regularnom pravokutnom geometrijom 21
Slika 22. Etalon s iregularnom geometrijom 21
Slika 23. Mjerna ticala polumjera 2 μm i 5 μm 22
Slika 24. Mjerenje etalona regularne trokutaste geometrije ticalom polumjera 10 μm 23
Slika 25. Mjerenje etalona iregularne geometrije ticalom polumjera 5 μm 23
Slika 26. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm) 25
Slika 27. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 2 μm) 25
Slika 28. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 2 μm) 25

Slika 29. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm) 26
Slika 30. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm,. 27
Slika 31. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm) 27
Slika 32. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 2 μm) 28
Slika 33. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8mm, (polumjer ticala 2 μm) 29
Slika 34. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5mm, (polumjer ticala 2 μm) 29
Slika 35. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm) 30
Slika 36. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm) 31
Slika 37. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm) 31
Slika 38. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm) 32
Slika 39. Prikaz pravokutnog profila dobivenog Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm) 32
Slika 40. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm) 33
Slika 41. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 5 μm) 34
Slika 42. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm) 34
Slika 43. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 5 μm) 35
Slika 44. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm) 36
Slika 45. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm) 36

Slika 46. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm) 37
Slika 47. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm) 37
Slika 48. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm) 38
Slika 49. Prikaz pravokutnog profila dobivenog RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm 38
Slika 50. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 10 μm) 39
Slika 51. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm) 40
Slika 52. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 10 μm) 40
Slika 53. Usporedba rezultata *Ra* parametra regularne trokutaste geometrije 43
Slika 54. Usporedba rezultata *Rz* parametra regularne trokutaste geometrije 44
Slika 55. Usporedba rezultata *RSm* parametra regularne trokutaste geometrije 45
Slika 56. Usporedba rezultata *Ra* parametra regularne pravokutne geometrije 46
Slika 57. Usporedba rezultata *Rz* parametra regularne pravokutne geometrije 47
Slika 58. Usporedba rezultata *Ra* parametra iregularne geometrije 48
Slika 59. Usporedba rezultata *Rz* parametra iregularne geometrije 49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o uređaju Perthometer S8P 15
Tablica 2. Preporučene *cut-off* vrijednosti 16
Tablica 3. Rezultati mjerenja ticalom radijusa 2 μm regularne trokutaste geometrije 24
Tablica 4. Rezultati mjerenja ticalom 2 μm regularne pravokutne geometrije 26
Tablica 5. Rezultati mjerenja ticalom 2 μm iregularne geometrije 28
Tablica 6. Rezultati mjerenja ticalom 5 μm regularne trokutaste geometrije 30
Tablica 7. Rezultati mjerenja ticalom 5 μm regularne pravokutne geometrije 32
Tablica 8. Rezultati mjerenja ticalom 5 μm iregularne geometrije 33
Tablica 9. Rezultati mjerenja ticalom 10 μm regularne trokutaste geometrije 35
Tablica 10. Rezultati mjerenja ticalom 10 μm iregularne geometrije 39
Tablica 11. Prikaz rezultata analize parametra *Ra* za regularnu trokutastu geometriju 42
Tablica 12. Prikaz rezultata analize *Rz* parametra za regularnu trokutastu geometriju 44
Tablica 13. Prikaz rezultata analize parametra *RSm* za regularnu trokutastu geometriju 45
Tablica 14. Prikaz rezultata analize *Ra* parametra regularne pravokutne geometrije 46
Tablica 15. Prikaz rezultata analize *Rz* parametara regularne pravokutne geometrije 47
Tablica 16. Prikaz rezultata analize parametra *Ra* iregularne geometrije 48
Tablica 17. Prikaz rezultata analize parametra *Rz* iregularne geometrije 49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Ra	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
Rz	μm	najveća visina profila unutar referentne duljine
RSm	μm	srednji korak elemenata profila
λc	mm	granica između valne duljine hrapavosti i valovitosti (cut-off)
lr	mm	referentna duljina
lt	mm	duljina ispitivanja
ln	mm	duljina vrednovanja
r	mm	polumjer ticala
U	μm	proširena mjerna nesigurnost
u	μm	standardna mjerna nesigurnost
x_{ref}	μm	referentna vrijednost
R_B		Birgov kriterij
En		Faktor slaganja
k		Faktor pokrivanja
C		Težinski faktor

SAŽETAK

Tema ovog rada utjecaj je ticala i filtracije na parametre hrapavosti ostvarene elektroničko-mehaničkim uređajem s ticalom. U radu je je opisana površinska topografija te su prikazani i opisani najčešće korišteni parametri hrapavosti. Opisani su osnovni dijelovi i način rada elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom te dane značajke konkretnog uređaja korištenog u eksperimentalnom dijelu rada. Dijelovi uređaja kao i način mjerenja propisani su normama ISO 3274:*1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* i normom ISO 4288:1996 *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mjerenja tri etalona različitih geometrija s tri različita ticala uz korištenje dvije filtracije te tri granične vrijednosti električnog filtra. Na svakom etalonu, za svaki od uvjeta mjerenja, provedeno je snimanje na 6 profila jednako distribuiranih preko mjernih površina etalona. Na snimljenim profilima računati su najčešće korišteni parametri hrapavosti *Ra, Rz* i *RSm*. Na ostvarenim rezultatima provedena je analiza kako bi se utvrdio utjecaj ticala i filtracije na rezultate mjerenja parametara hrapavosti *Ra, Rz* i *RSm.*

Ključne riječi: parametri hrapavosti, elektroničko-mehanički uređaj s ticalom, radijus ticala, filtracija, usporedba rezultata

SUMMARY

The subject of this paper is influence of the stylus type and filtration on roughness parameters obained by an stylus instrument. The paper describes the surface topography while also presents and describes the most commonly used roughness parameters. The basic parts and the mode of operation of the electronic-mechanical device with a stylus are described, and the specifications of the specific device used in the experimental part of the paper are given. Parts of the device as well as the method of measurement are prescribed by ISO 3274: 1996 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments and ISO 4288: 1996 Geometrical Product Specification (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. In the experimental part of the work, measurements of three standards of different geometries with three different stylus were performed using two filtrations and three limit values of the electric filter. On each standard, for each of the measurement conditions, recording was performed on 6 profiles equally distributed over the measuring surfaces of the standard. An analysis was performed on the achieved results in order to determine the influence of the stylus and filtration on the results of measuring the roughness parameters *Ra, Rz* and *RSm.*

Key words: roughness parameters, stylus instrument, stylus radius, filtration, comparison of the results

1. UVOD

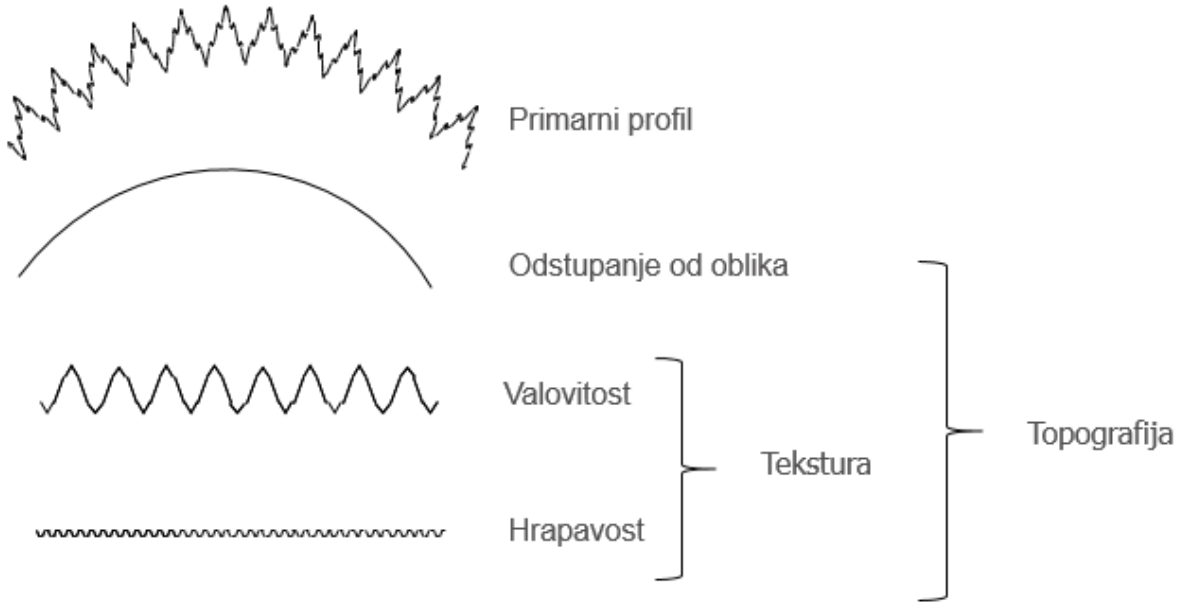
Tehničke površine strojnih dijelova nisu idealno glatke. Ovisno o vrsti i parametrima obrade nepravilnosti na površini mogu varirati od oku primjetne strukture do nepravilnosti na nano skali. Razlikujemo dvije osnovne mogućnosti mjerenja hrapavosti to su kontaktna i bezkontaktna metoda mjerenja. Postoje brojni uređaji s kojima smo u mogućnosti ostvariti kvantitativnu informaciju o stanju hrapavosti površine, poput mikroskopa atomskih sila, interferometra, mikroskopa s detekcijom fokusa, i dr. No uređaj koji se najčešće koristi za mjerenje stanja hrapavosti je elektroničko mehanički uređaj s ticalom. Razlozi za široku primjenu uređaja s ticalom su brojni. U prvom redu to je jednostavna uporaba, potom prijenosne izvedbe uređaja kao i konkurentna cijena u odnosu na ostale mjerne sustave. Uređaj s ticalom bilježi vertikalni pomak ticala koji odgovara nepravilnostima na ispitnoj površini i potom, pomoću pretvornika, pretvara otklon ticala u električni signal koji se šalje u računalo na obradu. Dobiveni profil površine zatim se filtrira, čime je omogućeno izdvajanje različitih komponenti topografije površine. Pogreške, koje se najčešće javljaju prilikom mjerenja uređajem s ticalom, posljedica su pogrešnog odabira radijusa vrha igle ticala. Iako je mjerenje hrapavosti površina uređajem s ticalom izuzetno dobro pokriveno različitim tehničkim normama u primjeni se nerijetko viđa da se zanemaruju uvjeti mjerenja koje norme jasno propisuju. Stoga su u okviru ovog rada provedena mjerenja na tri etalona različite geometrije na kojima su mjereni parametri hrapavosti uz različite uvjete mjerenja kako bi se utvrdio utjecaj ticala i filtracije na rezultate mjerenja parametara hrapavosti *Ra, Rz* i *RSm.*

2. POVRŠINSKA TOPOGRAFIJA I PARAMETRI HRAPAVOSTI

Kako je već navedeno tehničke površine nisu idealno glatke već uključuju različite nepravilnosti površine. Topografija površine kvantitativno ju opisuje te se sastoji od različitih komponenti. Jedna od komponenti je i hrapavost površine koju definiraju različiti parametri opisani u ovom poglavlju.

2.1. Komponente površinske topografije

Topografija površine uključuje komponente teksture površine te odstupanja od oblika (Slika 1.). Odstupanje od oblika karakteriziraju veće valne duljine od hrapavosti i valovitosti te se odnose na odstupanja od zadane geometrije. Različite nepravilnosti površine imaju različito podrijetlo u procesu proizvodnje. Tekstura površine uključuje fine nepravilnosti na površini te se sastoji od komponenata hrapavosti i valovitosti. Valovitost je komponenta koja sadrži i hrapavost. Ona je uglavnom periodična nepravilnost površine koja se iskazuje u obliku dugih valova na površini u odnosu na geometrijsku površinu. [1]



Slika 1. Komponente površinske topografije [2]

Hrapavost je komponenta teksture površine koja se odnosi na odstupanja stvarne površine od njezinog idealnog oblika. Odnosi se na periodične ili neperiodične nepravilnosti površine s malim razmacima karakterističnim za različite procese oblikovanja te visokofrekventnu duljinu mjere kratke valne duljine. Određuje se na temelju jednog ili više reprezentativnih dijelova površine te se njezine visine mjere uglavnom u mikrometrima. Smanjenje hrapavosti površine rezultira povećanim troškovima proizvodnje. [1]

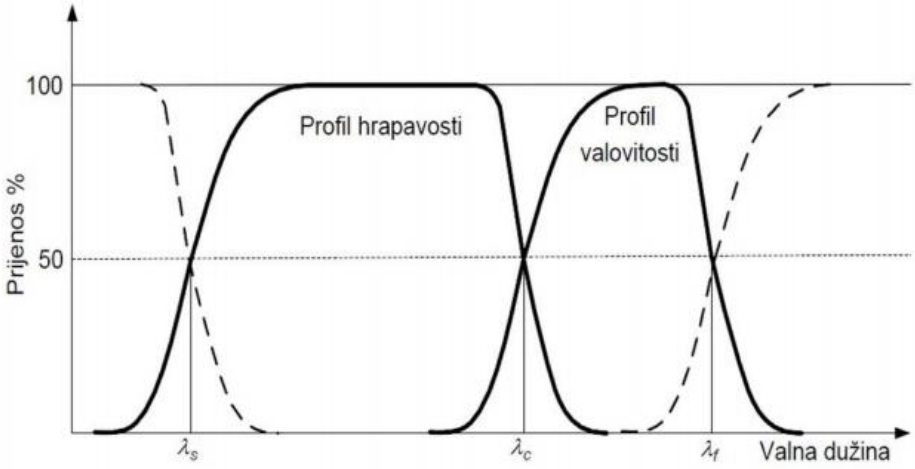
2.2. Parametri hrapavosti

Stvarni profil površine proizlazi iz sjecišta stvarne površine dijela s ravninom okomitom na tu površinu. Razlikujemo nefiltrirani primarni profil (*P*-profil), koji predstavlja stvarni izmjereni površinski profil, valovitost (*W*-profil) i hrapavost (*R*-profil).

Postupkom filtracije omogućeno je propuštanje kratkih valnih duljina visoke frekvencije kako bi se izdvojila komponenta hrapavosti, propuštanje dugih valnih duljina niske frekvencije kako bi se izdvojila komponenta valovitosti i oblika te izdvajanje komponenti određene širine upotrebom oba filtera. Postoje različite vrste filtera te se sama filtracija koristi u nekoliko svrha u procesu analize teksture površine. Prvi filtri su implementirani kao visokopropusni filtri čiji je cilj bio izbjeći velike varijacije signala kako bi se profil pravilno nacrtao na termalnoj traci papira. To su RC filtri čiji je glavni nedostatak izobličenje njegove prijenosne funkcije. Prema normi ISO 3274:*1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* dozvoljena je jedino filtracija profila Gaussovim filterom. Gaussov filter za profile definiran je normom ISO 16610-21:2011 *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters*. Norma specificira mjeriteljske karakteristike Gaussovog filtra za filtriranje profila te kako razdvojiti komponente dugog i kratkog vala profila površine. Filteri se ne bi trebali smatrati iznenadnim blokatorima valne duljine već su karakteristike prijenosa kontinuirane i progresivne. Stoga je odabir *cut-offa* presudan, ovisno o primjeni, kako bi se pravilno odvojile valne duljine. [3], [4]

Cut-off predstavlja graničnu valnu duljinu iznad ili ispod koje se, u svrhu dobivanja željenog raspona frekvencije, filtrira površina te treba biti određena na način da odvaja dvije komponente bez da ih izobliči.

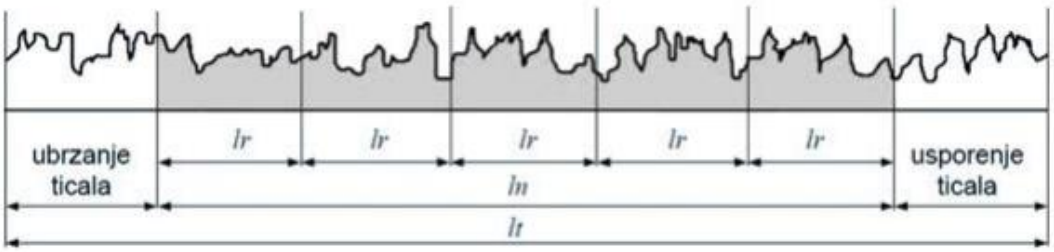
Varijabla kojom se određuje granica između valovitosti i hrapavosti je granična vrijednost filtra λc. Ostale granične vrijednosti predstavljaju granicu između valne duljine hrapavosti površine i komponenti kraćih valnih duljina (λs) te granicu između valne duljine valovitosti i komponenti većih valnih duljina (λf), kako je prikazano na slici 2. [1]



Slika 2. Prijenosne karakteristike profila hrapavosti [1]

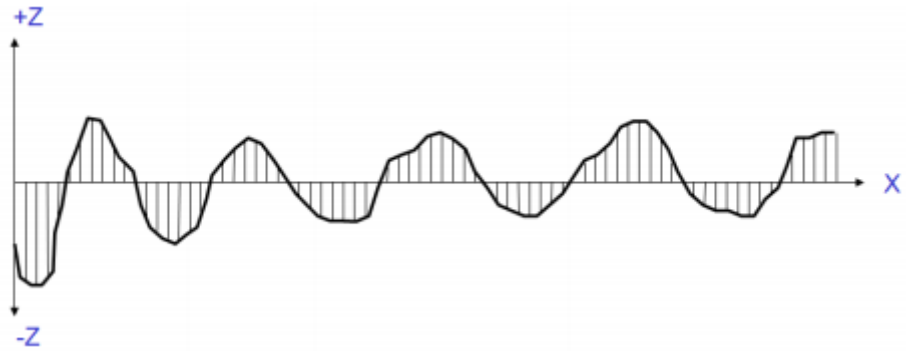
Prema normi ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* nominalne vrijednosti *cut-offa* odabiru se iz navedenog niza vrijednosti: 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8,0 mm. [3]

Parametri hrapavosti profila za 2D mjerni sustav podijeljeni su na amplitudne, uzdužne, hibridne te krivuljne i srodne parametre. Karakteristične duljine ispitivanja su referentna duljina (*lr)*, duljina vrednovanja (*ln)* i duljina ispitivanja *(lt)*, (Slika 3.). Referenta duljina *lr* iznosom je jednaka graničnoj vrijednosti filtra λc. [1]



Slika 3. Karakteristične duljine ispitivanja [1]

Referentna linija za izračun parametara srednja je linija profila te se za hrapavost i valovitost ona određuje uz primjenu profilnih filtera λc i λf. Referentna linija prikazana je na slici 4. [1]



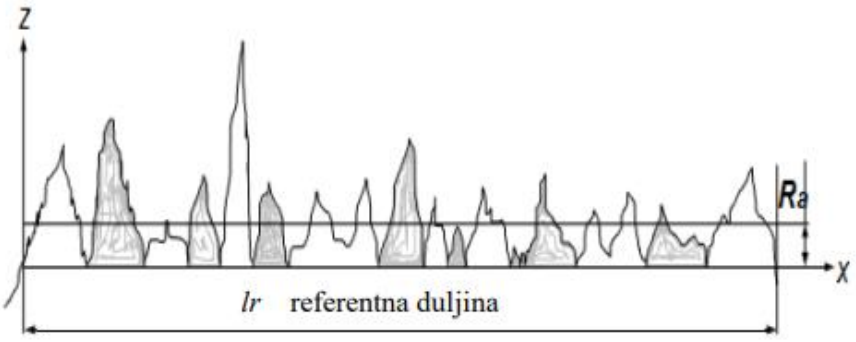
Slika 4. Srednja linija profila [1]

Na sljedećim stranicama opisani su i prikazani najčešće korišteni parametri hrapavosti.

2.2.1. Amplitudni parametri

Amplitudni parametri predstavljaju najvažnije parametre za karakterizaciju topografije površine te se koriste za mjerenje vertikalnih karakteristika površinskog odstupanja.

Ra parametar najčešće je korišten amplitudni parametar hrapavosti koji predstavlja srednju aritmetičku vrijednost apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije, (Slika 5.).

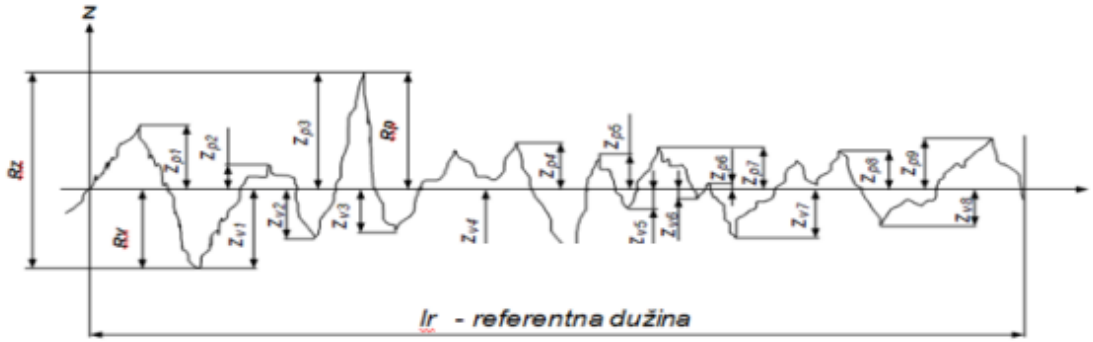


Slika 5. Prikaz *Ra* parametra

Rp parametar označava najveću visinu vrha profila referentne dužine.

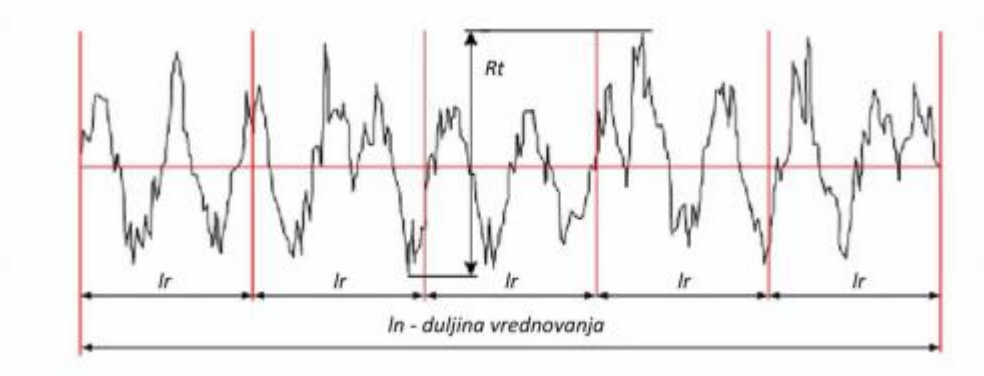
Najveću dubinu dola unutar referentne dužine označava parametar *Rv*.

Parametar *Rz* označava sumu *Rp* i *Rv* parametara odnosno najveću visinu profila unutar referentne dužine, (Slika 6.). [1]



Slika 6. *Rp*, *Rv* i *Rz* parametri [1]

Rt parametar označava sumu visine najvećeg vrha i dubine najnižeg dola unutar duljine ocjenjivanja, (Slika 7.). [1]



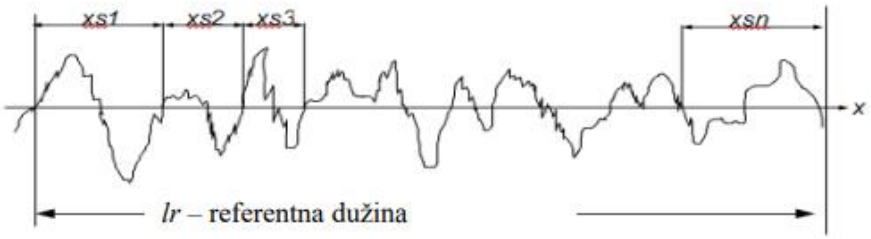
Slika 7. *Rt* parametar [1]

2.2.2. Uzdužni parametri

Uzdužni parametar *RSm* predstavlja srednji korak elemenata profila, (Slika 8.). Izračunava se sljedećim izrazom:

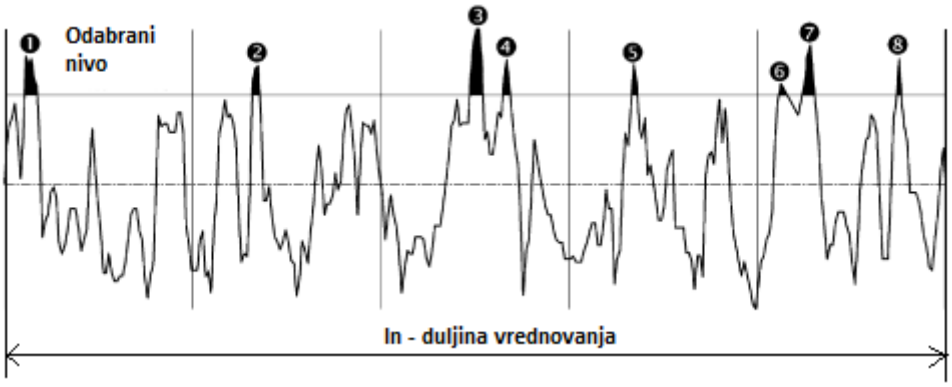
$$RSm = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Xs_i \qquad (1)$$

gdje je m broj elemenata profila. [1]



Slika 8. Prikaz koraka profila [1]

Parametar *HSC* (High spot count) broj je lokalnih vrhova profila unutar dužine vrednovanja, (Slika 9.). [1]



Slika 9. Prikaz lokalnih vrhova profila iznad odabrane razine [5]

2.2.3. Hibridni parametri

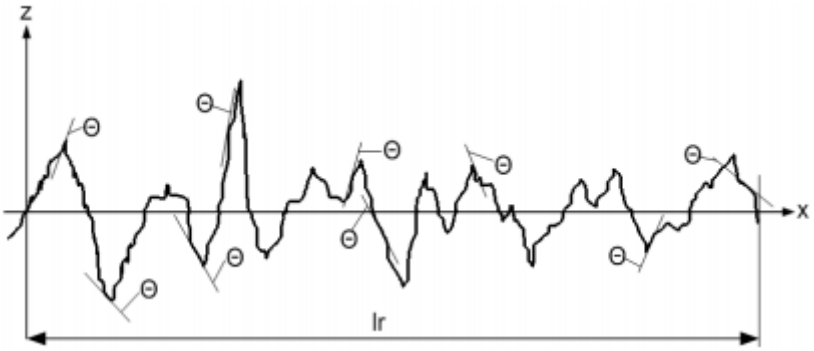
Hibridni parametri opisuju kombinacije amplitudnih i uzdužnih karakteristika profila.

Parametar $R\Delta q$ predstavlja srednji kvadratni nagib profila te se računa prema sljedećoj formuli:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{lr}\int_0^{lr}(\theta(x)-\theta)^2 dx} \tag{2}$$

$$\theta = \frac{1}{lr}\int_0^{lr}\theta(x)dx \tag{3}$$

gdje θ predstavlja nagib profila u pojedinoj točki, (Slika 10.). Povećanjem strmine srednjeg nagiba duža je stvarna duljina profila u odnosu na nazivnu duljinu. [1]

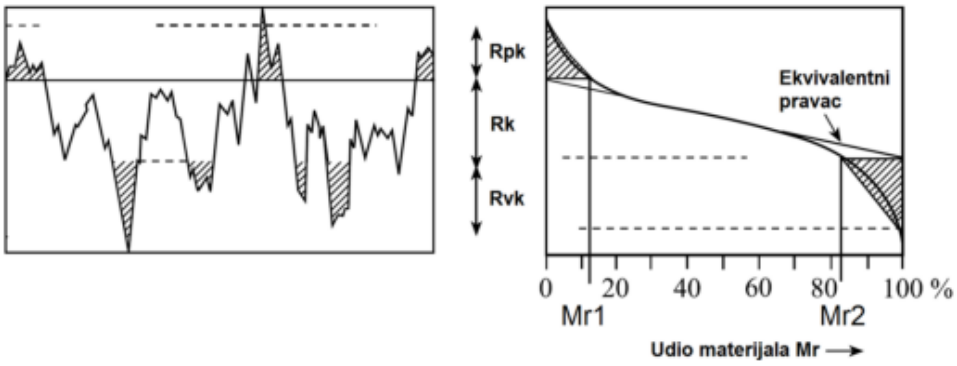


Slika 10. Nagib profila u različitim točkama [1]

2.2.4. Krivuljni i srodni parametri

Krivuljni i srodni parametri koriste se za karakterizaciju triboloških stratificiranih (slojevitih) površina. Razlog zbog kojeg se koriste navedeni parametri je što je jednim amplitudnim parametrom poput *Ra* parametra teško prikazati slojevitu površinu učinkovito i dosljedno. Gornja površina koja se dobije brušenjem i duboki dolovi koji ostanu netaknuti obradom razmatraju se odvojeno.

Navedeni parametri temeljeni su na krivulji udjela materijala profila te su definirani na duljini vrednovanja. Krivulja udjela materijala profila naziva se Abbott – Firestone krivulja, (Slika 11.). [1]

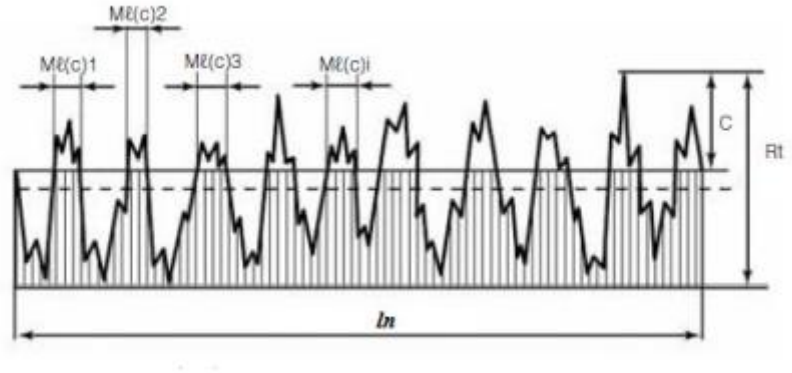


Slika 11. Krivulja udjela materijala [1]

Udio materijala u profilu *Rmr(c)* računa se prema formuli:

$$Rmr(c)=Ml(c) / ln \quad (4)$$

gdje je *c* razina odreza (u µm ili %), (Slika 12.).



Slika 12. Računanje udjela materijala u profilu [1]

Parametri hrapavosti krivulje udjela materijala su sljedeći, (Slika 13.):

Rpk – reducirana visina vrha profila, dio profila koji će u tijeku eksploatacije biti prvi istrošen

Rk – dubina jezgre hrapavosti profila, dio profila s povećanom nosivosti koja preuzima osnovna opterećenja te utječe na karakteristike i životni vijek površine

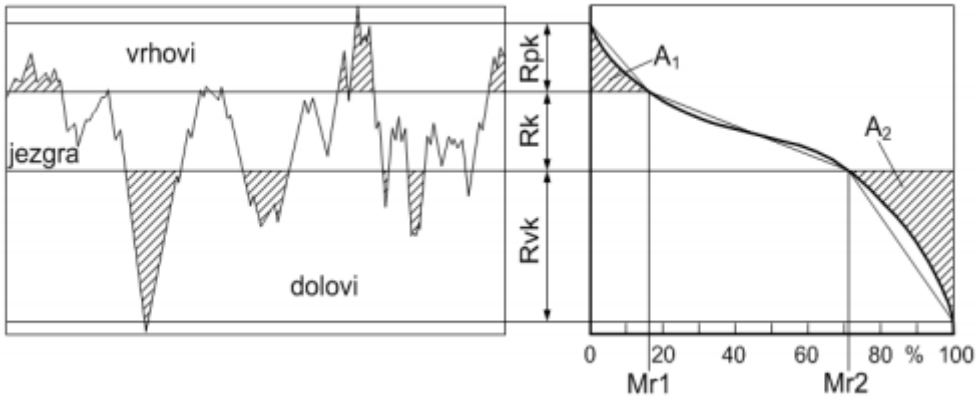
Rvk – reducirana dubina dolova profila, dio profila koji ima sposobnost zadržavanja ulja u dubokim žljebovima koji su stvoreni pri strojnoj obradi površine

Mr1 – relativni udio materijala u vrhovima

Mr2 – relativni udio ulja u dolovima

A1 – površina materijala vrhova profila

A2 – površina maziva dolova profila



Slika 13. Parametri hrapavosti [1]

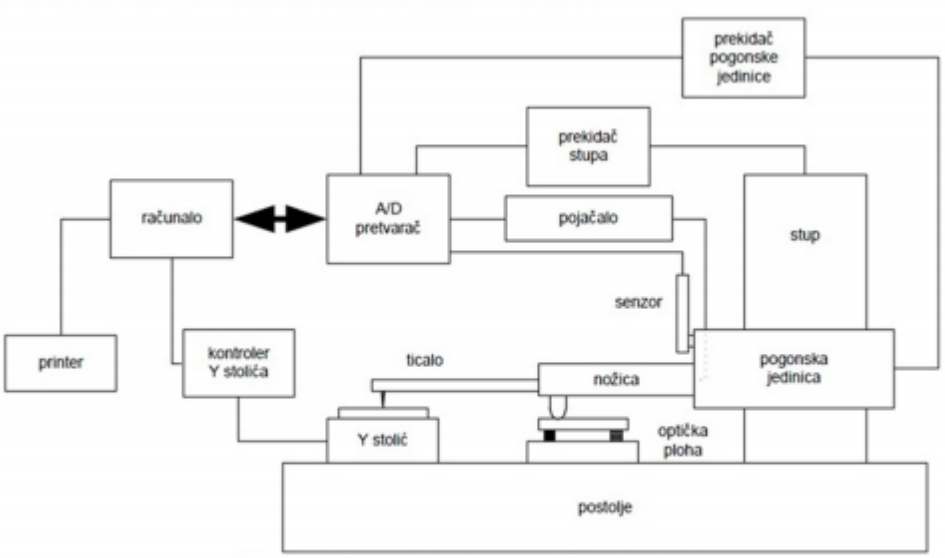
3. MJERENJE HRAPAVOSTI

Kod mjerenja hrapavosti razlikujemo dvije metode, a to su kontaktna i bezkontaktna metoda mjerenja. Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke te se koriste za specifičnu primjenu odnosno 2D ili 3D mjerenje hrapavosti. Kako bi se utvrdilo stanje površine potrebno je mjerenjem dobiti relevantne podatke o samoj površini te se mjerenje hrapavosti najčešće provodi kontaktnom metodom.

3.1. Mjerenje hrapavosti elektroničko-mehaničkim uređajem s ticalom

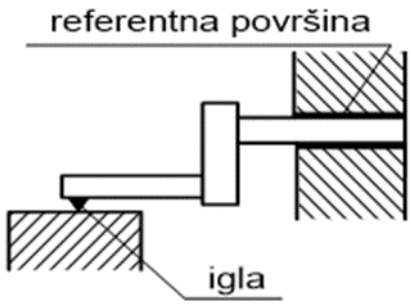
Mjerenje hrapavosti najčešće se provodi, kako je spomenuto, kontaktnom metodom kod koje vrh ticala dolazi u fizički kontakt s površinom koja se mjeri te se pomoću pretvornika vertikalno kretanje pretvara u električni signal. Skeniranjem od točke do točke dobiva se kvantitativna informacija s obzirom na poziciju igle ticala. Normom ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* definirani su sastavni dijelovi uređaja s ticalom. Profil se skenira pomoću vrha ticala te se zatim iz tog profila filtriraju pojedinačni skupovi nepravilnosti koji čine stvarnu teksturu površine. Navedene nepravilnosti razlikuju se u svojim utjecajima na površinske performanse, zbog čega su i odvojeni za analizu odnosno komponenta hrapavosti mora biti odvojena od ostalih vrsta nepravilnosti kako bi se mogli utvrditi specifični parametri hrapavosti. Prema navedenoj normi ISO 3274:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* elektroničko mehanički uređaji s ticalom definirani su kao mjerni instrumenti koji kontaktnom metodom ticalom skeniraju površinu te dobivaju odstupanja u obliku površinskog profila, izračunavaju parametre i bilježe snimljeni profil. Gibanje ticala pretvara se u električni signal pomoću različitih pretvornika. Pretvornici mogu biti optički, induktivni i piezoelektrični. Ticalo se nalazi na konzoli koja je pokretna u smjeru x-osi pomoću linearnog ili step motora. Ticalo se po površini mjernog uzorka giba konstantnom brzinom te se signal koje pretvornik generira iz vertikalnog pomaka pojačava pomoću električnog pojačala i šalje u računalo koje prikuplja podatke, prati ih i kontrolira. Prednosti uređaja s ticalom je mogućnost ostvarenja vrlo točnih mjerenja s vertikalnim rasponom od nekoliko milimetara i rezolucijom u nanometrima. Negativne strane ovih uređaja uključuju način vođenja i oblik igle ticala koji mogu u velikoj mjeri utjecati na točnost reprodukcije snimljenog profila. [2], [3]

Na slici 14. prikazani su dijelovi elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom.

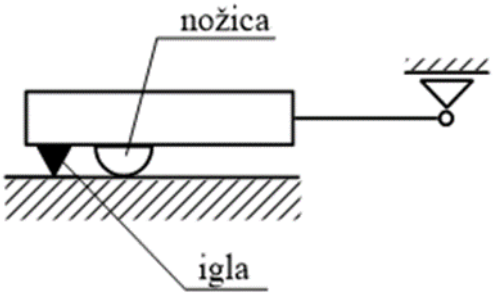


Slika 14. Dijelovi elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom [6]

Ticalo se sastoji od igle, pretvornika i referentne površine. Prema normi ISO 3274:*1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* idealan oblik vrha ticala konusni je s kuglastim vrhom. Nominalne vrijednosti radijusa vrha su 2 μm, 5 μm ili 10 μm te kut konusa od 60° ili 90°. Razlikuju se dvije vrste vođenja igle ticala: vanjsko vođenje (Slika 15.) i vođenje s nožicom (Slika 16.). [2], [3]



Slika 15. Prikaz vanjskog vođenja igle ticala [2]



Slika 16. Prikaz vođenja igle ticala pomoću nožice [2]

Različit način vođenja može imati utjecaja na rezultate mjerenja kao i mjerna sila ticala, odnosno nožice. Visoki pritisak može uzrokovati elastične i plastične deformacije. Prema normi ISO 3274:1996 nazivna vrijednost statičke mjerne sile iznosi 0,00075 N. [3]

3.3. Perthometer S8P

Uređaj Perthometer S8P, proizvođača Mahr Perthen, namijenjen je za kontaktnu metodu mjerenja 2D parametara hrapavosti, te će se koristiti u eksperimentalnom dijelu rada, (Slika 17.). Umjerava se prema vodiču DKD-R 4-2 Calibration of measuring instruments and standards for roughness measuring technique. Podaci o uređaju prikazani su u Tablici 1.

Slika 17. Perthometer S8P [6]

Sljedivost rezultata mjerenja ostvarenih na Perthometer S8P osigurana je preko državnih etalona za hrapavost RH (u vlasništvu Nacionalnog laboratorija za duljinu RH). [6]

Tablica 1. Podaci o uređaju Perthometer S8P [6]

Proizvođač	Feinprüf Perthen GmbH, Njemačka
Tragovi	Od 4 do 128 s 8064 točaka po tragu
Duljina očitavanja/mm	0,56; 1,75; 5,6; 17,5; 56,0
Standardni mjerni putovi/mm	0,4; 1,25; 4,0; 12,5; 40
Cut-off (granične valne dužine)/mm	0,025; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8,0
Mjerni opseg/µm	±12,5 µm, ±62,5 µm, ±125 µm, ±625 µm, ±2500 µm
Profili	*D* – direktni *G* – ispravljeni *P* – ispravljen bez početnog i završnog dijela *W* – valovitost *R* – hrapavost
Tip filtera	Gaussov filter, RC filter, osni filteri (*cut-off* kod 75 % i 50 %)

4. PRAVILA I POSTUPCI KOD MJERENJA PROFILA HRAPAVOST

Sustav ocjenjivanja teksture površine definiran je skupom standarda koji opisuju oznake, mjerenje, ocjenu teksture površine, umjeravanje mjernih uređaja i ostale aspekte koji zajedno čine geometrijsku specifikaciju proizvoda odnosno Geometrical Product Specification (GPS). Međunarodnom normom ISO 4288:1996 *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture* određena su pravila i postupci kod mjerenja uređajima s ticalom. Osnovna pravila mjerenja parametara hrapavosti uzorka uključuju odabir *cut-off* vrijednosti prema podacima u tehničkoj dokumentaciji proizvoda dok se u suprotnom odabire prema procedurama koje su propisane navedenom ISO normom. Prilikom mjerenja uzorka mjerenja se, u slučajevima kada postupak nije specificiran, provode na onom dijelu površine gdje se očekuju kritične vrijednosti dok je kod neovisnih mjerenja potrebna je ravnomjerna raspodjela kako bi se dobili neovisni rezultati mjerenja. [7]

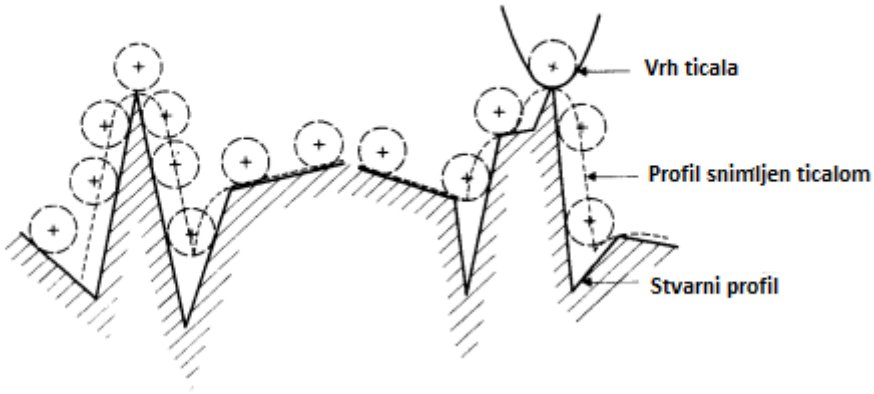
Prilikom mjerenja profila hrapavosti važno je odrediti je li profil periodičan ili neperiodičan. Prvi korak snimanje je profila, filtracija Gaussovim filterom s λc = 0,8 mm te očitanje vrijednosti *RSm* parametra za regularne profile odnosno *Ra* ili *Rz* parametara za iregularne profile. Za dobivenu vrijednost određenog parametra, pomoću tablice 2. u kojoj su dane preporučene vrijednosti, odredi se vrijednost *cut-offa* te ponovnim mjerenjem dobiju rezultati traženih parametara.

Tablica 2. Preporučene *cut-off* vrijednosti [7]

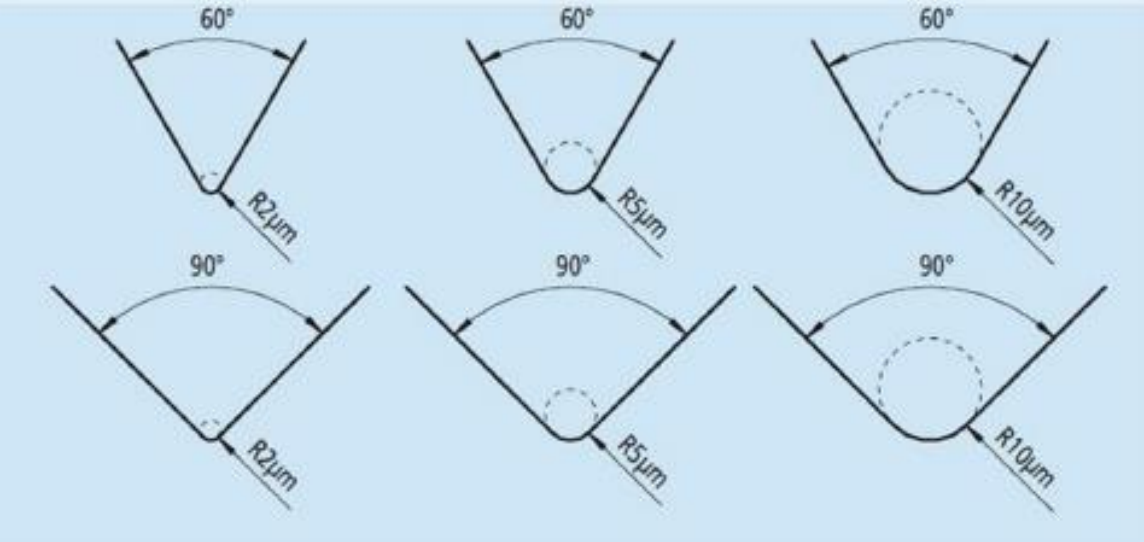
Referentna duljina	***Duljina vrednovanja***	***Vrijednosti za neperiodične profile***	***Vrijednosti za neperiodične profile***	***Vrijednosti za periodične profile***
lr/mm	*ln*/mm	*Ra*/μm	*Rz*/μm	*RSm*/mm
0,08	0,4	0,006 < *Ra* ≤ 0,02	0,025 < *Rz* ≤ 0,1	0,013 < *RSm* ≤ 0,04
0,25	1,25	0,02 < *Ra* ≤ *0,1*	0,1 < *Rz* ≤ 0,5	0,04 < *RSm* ≤ 0,13
0,8	4	0,1 < *Ra* ≤ 2	0,5 < *Rz* ≤ 10	0,13 < *RSm* ≤ 0,4
2,5	12,5	2 < *Ra* ≤ 10	10 < *Rz* ≤ 50	0,4 < *RSm* ≤ 1,3
8	40	10 < *Ra* ≤ 80	50 < *Rz* ≤ 200	1,3 < *RSm* ≤ 4

5. UTJECAJ RADIJUSA TICALA I FILTRACIJE NA PARAMETRE

Na rezultate mjerenja kontaktnom metodom mogu utjecati razni čimbenici povezani s mjernim instrumentom, predmetom mjerenja, osobom koja provodi mjerenja, mjerenim protokolom i uvjetima okoliša. Jedan od čimbenika povezanih s mjernim instrumentom je i radijus vrha ticala. Kako bi snimljeni trag profila bio što vjerodostojniji stvarnom stanju na ispitnoj površini poželjno je da je radijus vrha ticala što manji. Upravo prilikom promjene zakrivljenosti vrha ticala moguće je da se njegovim povećanjem ne registriraju ekstremne geometrije poput izrazitih dolova (vrh ne dodiruje dno uskih dolova) te se na taj način snimljeni profil i na njemu računate vrijednosti parametara hrapavosti također mijenjaju. Na slici 18. prikazano je kako veličina promjera ticala utječe na razliku između stvarnog i snimljenog profila.



Slika 18. Prikaz utjecaja veličine ticala na površinski profil [8]



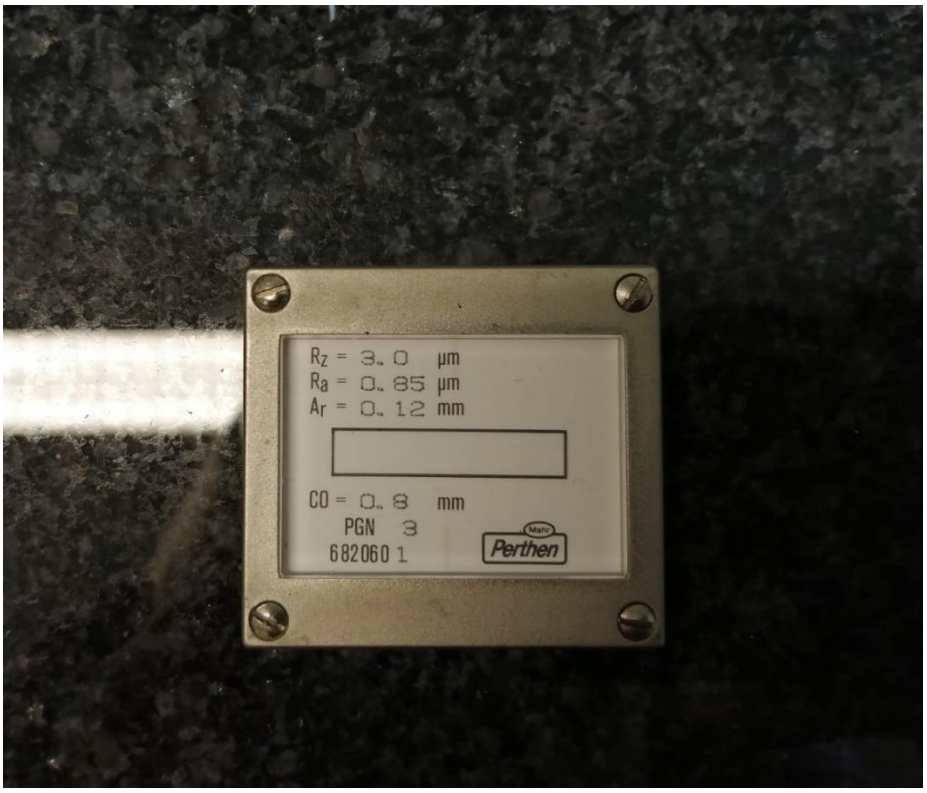
Slika 19. Konusni oblik ticala sa zakrivljenim vrhom koji ima različite vrijednosti radijusa i kuta konusa [9]

Jedan od primjera utjecaja polumjera ticala je i istraživanje koje je objavljeno u kolovozu 2018. godine u članku *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* časopisa, čiji su autori Walter dos Santos Motta Neto, Jose Eduardo Silveira Leal, Luciano José Arantes i Rosenda Valdés Arencibia. Cilj istraživanja je bio istražiti utjecaj radijusa vrha ticala na *Ra, Rq, Rp, Rv* i *Rt* parametre. Mjerenje hrapavosti provedeno je u uzorcima ugljičnog čelika SAE 1020 i sivog lijeva, obrađenih postupcima tokarenja i glodanja u različitim uvjetima rezanja. U provedenom istraživanju korištena su dva dijamantna vrha ticala polumjera 2 μm i 5 μm s kutom od 60°, (Slika 19.). Odabrana referentna duljina iznosila je 2,5 mm te je na primarnom profilu primijenjena Gaussova filtracija. Mjerenja su rezultirala sličnim ili većim prosječnim vrijednostima *Ra, Rq, Rp, Rv* i *Rt* parametara dobivenih mjerenjem ticalom radijusa 2 μm od onih mjerenih ticalom radijusa vrha 5 μm. Zaključeno je kako bi se osigurao odabir odgovarajućeg radijusa ticala da je potrebno u obzir uzeti vrh ticala, mjernu silu i materijal uzorka. Istraživanje pokazalo je da su razlike između prosječnih vrijednosti *Ra, Rq, Rp, Rv* i *Rt* dobivenih pomoću vrhova ticala polumjera 2 μm i 5 μm niže od vrijednosti pridružene proširene nesigurnosti (95 %) u 82 % izvedenih pokusa. Igla ticala može prouzročiti značajne elastične i plastične deformacije površine. Krajnji rezultat ukazao je kako su parametri na koje je utjecaj bio najveći *Rp* i *Rt* dok onaj na koje je utjecaj bio najmanji je *Rv* parametar. [9]

Filtracija također ima utjecaj na vrijednosti rezultata parametara hrapavosti. Uspoređujući utjecaj filtracije na različite površine regularne i iregularne geometrije provedeno je istraživanje koje je objavljeno 2017. godine pod nazivom „*Study the influence of selected new filtration methods on roughness of standard surfaces"* čiji je autor Aneta Łętocha. Mjerenja su provedena pomoću TOPO 01P kontaktnog profilometra s polumjerom zakrivljenosti vrha ticala 2 μm i kutom od 90 stupnjeva. Prilikom istraživanja korištene su tri vrste filtera: Gaussov filter, Spline filter i Morfološki filter. Na rezultate parametara hrapavosti uzorka iregularne geometrije upotreba novih metoda filtriranja imala je veći utjecaj nego na rezultate uzorka regularne geometrije. Povećanjem granične vrijednosti Gaussovog filtera i Spline filtera vrijednosti parametara hrapavosti su se povećale za razliku od Morfološkog filtra kod kojeg su se vrijednosti parametara, povećanjem granične vrijednosti filtra, smanjile. [10]

6. IZBOR ETALONA ZA MJERENJE I REZULTATI MJERENJA

Za eksperimentalni dio rada odabrana su tri etalona. Dva etalona imaju periodične profile i to trokutaste i pravokutne geometrije. Dok je kod trećeg etalona prisutna iregularna geometrija. Mjerenja su provedena u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Etaloni na kojima je provedeno mjerenje prikazani su na slikama od 20. do 21.



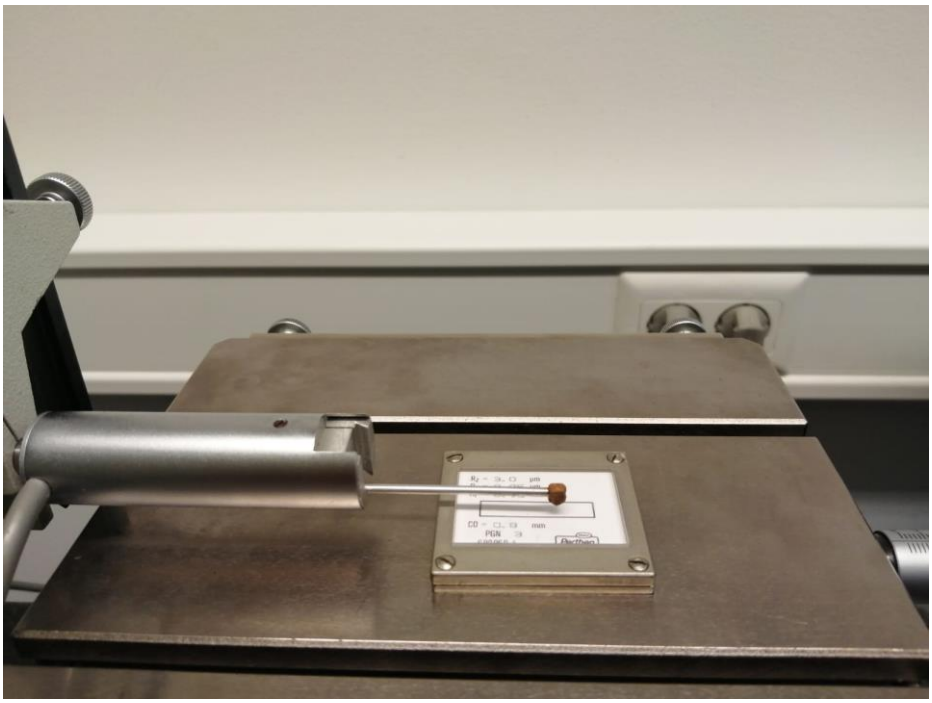
Slika 20. Etalon s regularnom trokutastom geometrijom

Slika 21. Etalon s regularnom pravokutnom geometrijom

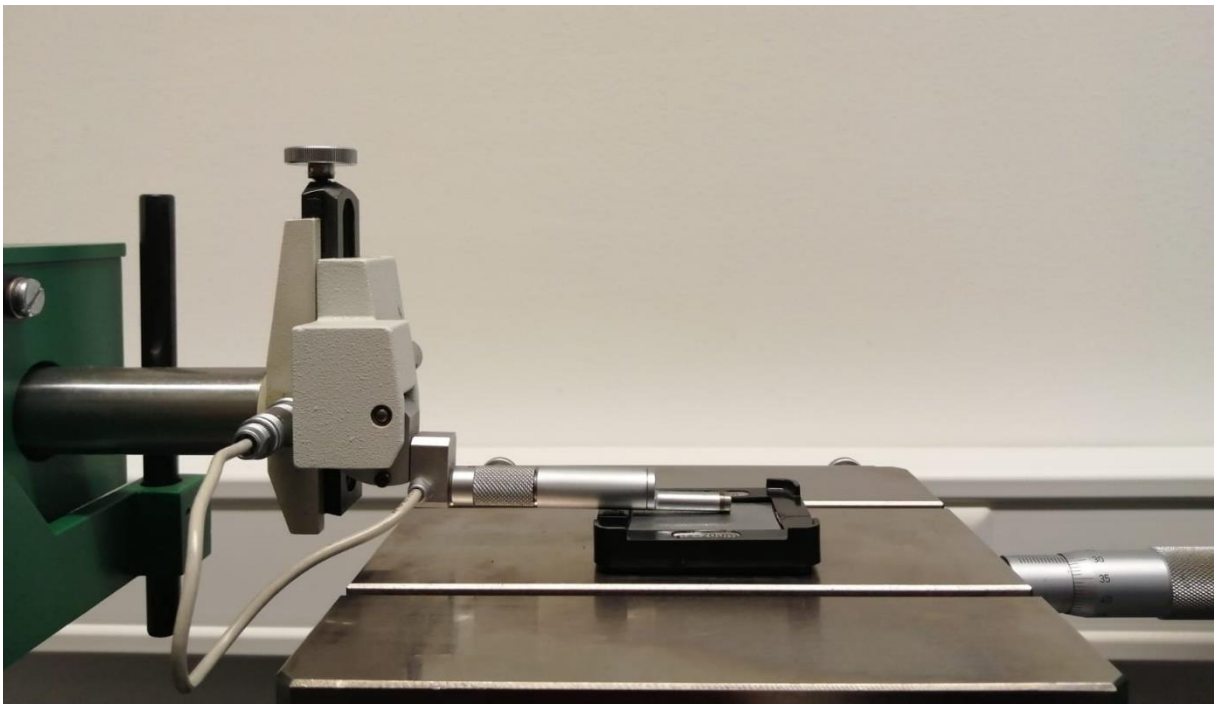
Slika 22. Etalon s iregularnom geometrijom

Sva mjerenja su provedena na ranije opisanom mjernom uređaju Perthometer S8P.Mjerenja su provedena korištenjem dva ticala s vođenjem u vidu nožice različitog polumjera zakrivljenosti – 2 μm i 5 μm (Slika 23.) te jednog ticala s vanjskim vođenjem i radijusom zakrivljenosti 10 μm (Slika 24.).

Slika 23. Mjerna ticala polumjera 2 μm i 5 μm



Slika 24. Mjerenje etalona regularne trokutaste geometrije ticalom polumjera 10 μm



Slika 25. Mjerenje etalona iregularne geometrije ticalom polumjera 5 μm

Svako mjerenje ponovljeno je šest puta i na kraju dobivene vrijednosti parametara hrapavosti rezultat su aritmetičke sredine pojedinih mjerenja. Zabilježeni parametri su *Ra*, *Rz* i *RSm* parametar čije su dobivene vrijednosti prikazane tablično u sljedećim poglavljima. Korištene su ukupno tri filtracije: Gaussov filter određen s dvije različite *cut-off* vrijednosti i RC filter. Srednji korak elemenata profila kod regularne trokutaste geometrije iznosi 120 μm, kod regularne pravokutne geometrije 80 μm dok je mjerenje iregularne geometrije izvršeno uz vrijednost parametra *Rz* u iznosu od 20 μm.

6.1. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 2 μm

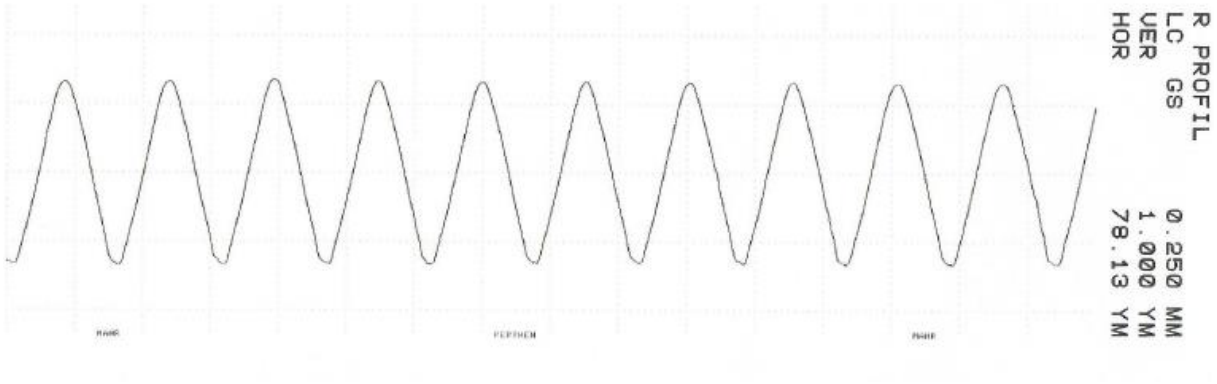
S obzirom da srednji korak elemenata profila kod regularne trokutaste geometrije iznosi 120 μm potrebno je filtrirati signal s λc = 0,25 mm. Za potrebe ovog rada snimljeni su profili i uz filtraciju s λc = 0,25 mm jer se upravo ta granična vrijednost filtera koristi kao „univerzalna“. Na kraju je snimljen etalon uz normom zahtijevanu vrijednost λc = 0,25 mm, ali s pogrešnom filtracijom - RC filter.

U Tablici 3. prikazani su rezultati mjerenja kod regularne trokutaste geometrije ostvareni uz ticalo radijusa 2 μm.

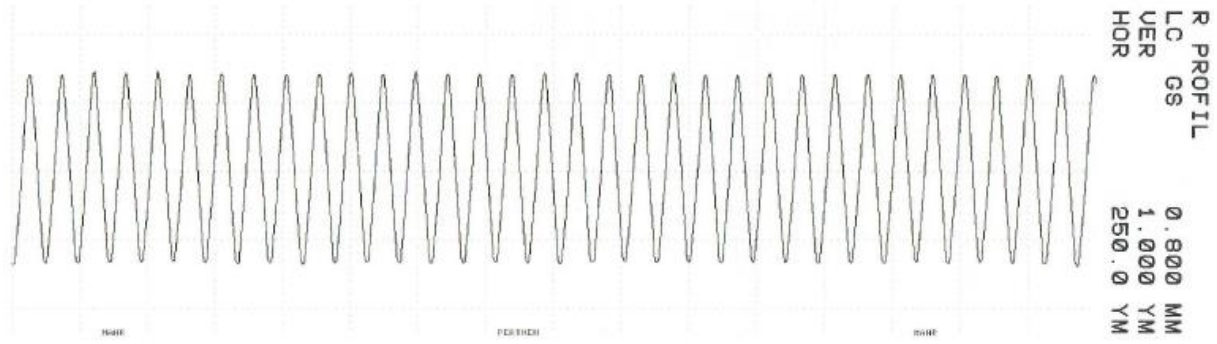
Tablica 3. Rezultati mjerenja ticalom radijusa 2 μm regularne trokutaste geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 0,25 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 0,25 mm
***Ra*/μm**	0,807	0,830	0,770
***Rz*/μm**	2,724	2,810	2,581
***RSm*/μm**	119,3	120	119,3

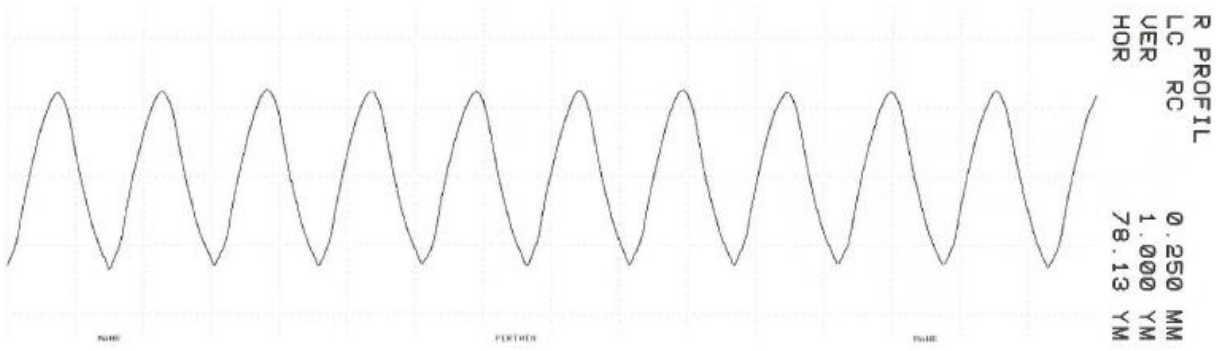
Na slikama 26., 27. i 28. grafički je prikaz zabilježenih profila trokutaste geometrije filtriranih navedenim filterima.



Slika 26. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm)



Slika 27. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 2 μm)



Slika 28. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 2 μm)

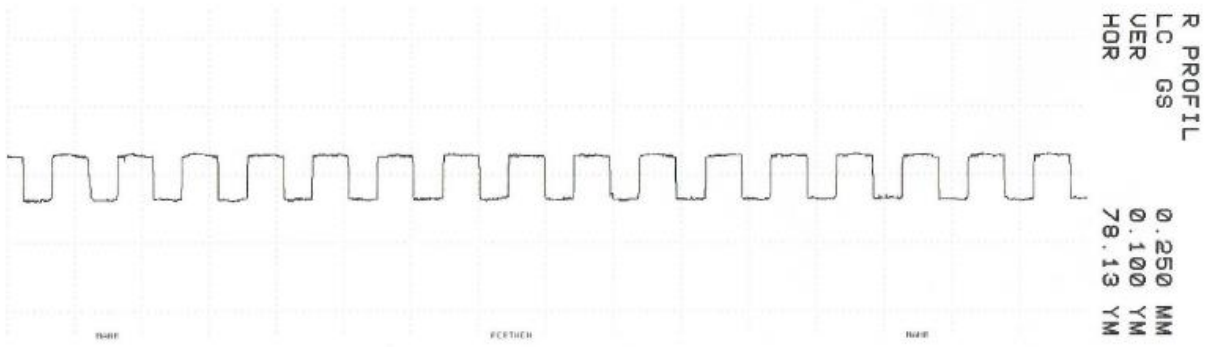
Kao što je to bio slučaj s trokutastom geometrijom i kod etalona s pravokutnom geometrijom potrebno je filtrirati signal s λc = 0,25 mm jer je nazivna vrijednost *RSm* parametra 80 μm. Razlozi za izbor ostalih uvjeta filtracije isti su kao kod etalona s trokutastom geometrijom profila.

U Tablici 4. prikazane su ostvarene aritmetičke sredine šest pojedinih mjerenja prikazanih parametara hrapavosti za profile regularne pravokutne geometrije.

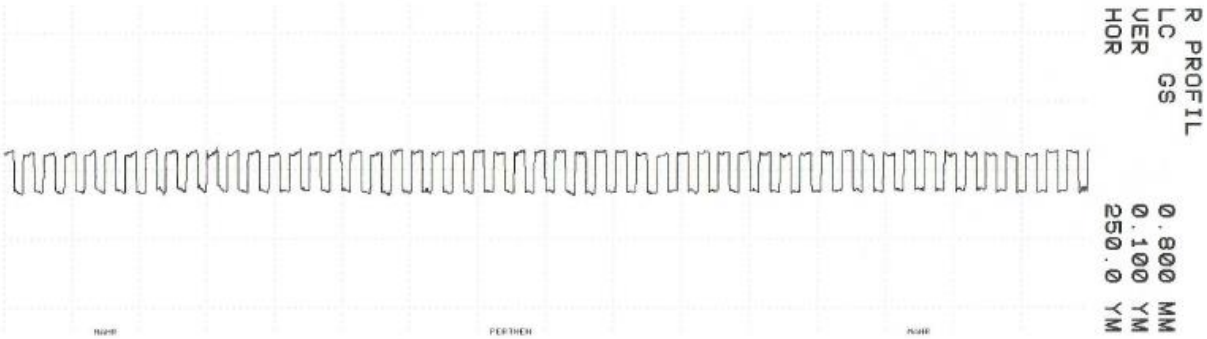
Tablica 4. Rezultati mjerenja ticalom 2 μm regularne pravokutne geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 0,25 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 0,25 mm
***Ra*/nm**	30	29	27
***Rz*/nm**	69	71	93

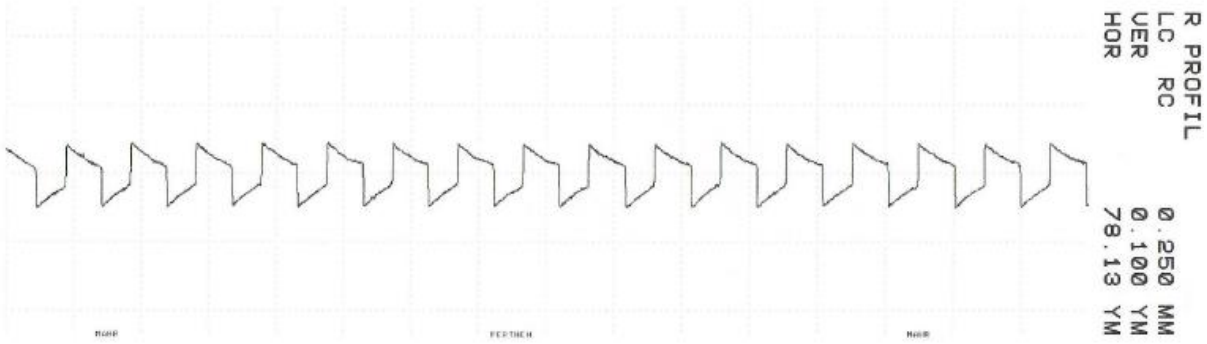
Grafički prikazi snimljenih tragova profila pravokutne geometrije prikazani su na slikama 29., 30. i 31.



Slika 29. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm)



Slika 30. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 2 μm)



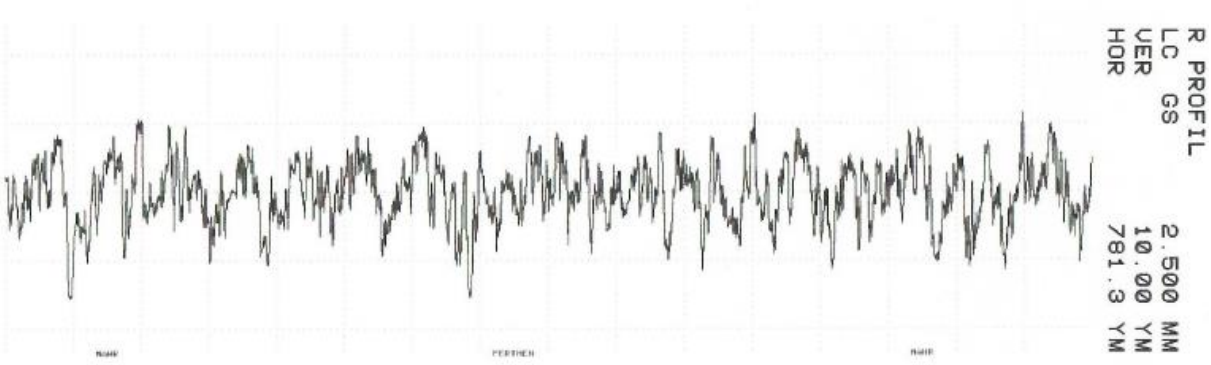
Slika 31. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 2 μm)

S obzirom na nazivnu vrijednost parametra *Rz* na etalonu s iregularnom geometrijom bilo je potrebno filtrirati stvarni profil uz graničnu vrijednost λc = 2,5 mm. Razlozi za izbor ostalih uvjeta filtracije isti su kao i kod etalona s regularnim geometrijama. Dobiveni rezultati profila iregularne geometrije prikazani su u Tablici 5.

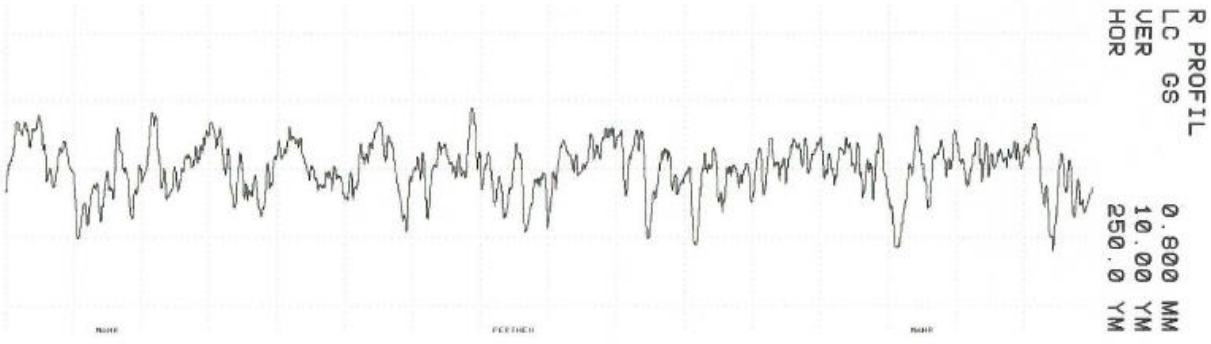
Tablica 5. Rezultati mjerenja ticalom 2 μm iregularne geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 2,5 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 2,5 mm
***Ra*/μm**	3,68	3,29	3,65
***Rz*/μm**	23,82	18,56	23,78

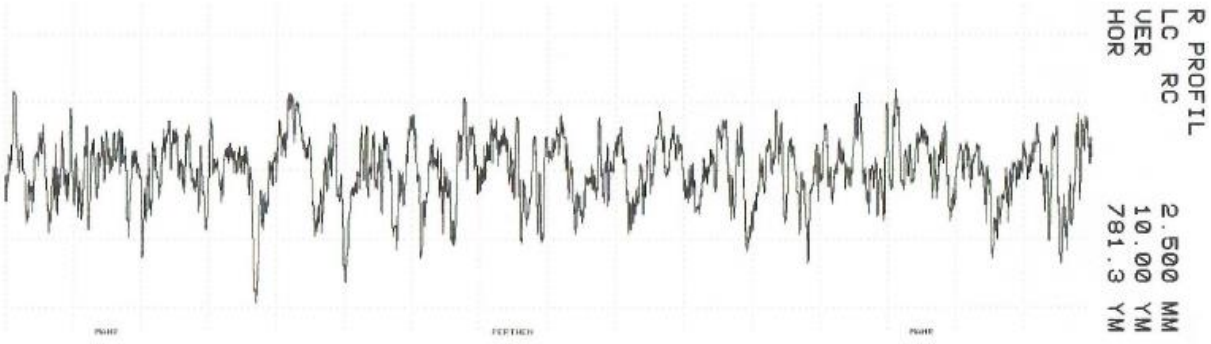
Grafički prikazi zabilježenih tragova profila iregularne geometrije prikazani su na slikama 32., 33. i 34.



Slika 32. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 2 μm)



Slika 33. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8mm, (polumjer ticala 2 μm)



Slika 34. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5mm, (polumjer ticala 2 μm)

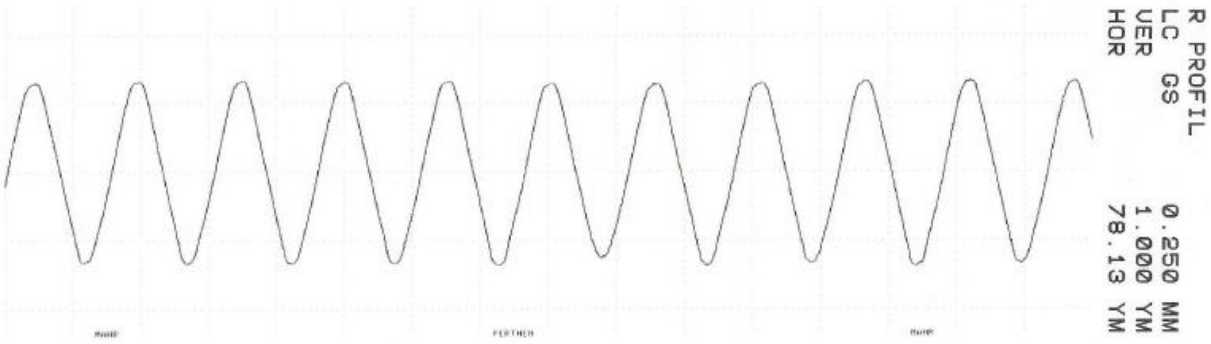
6.2. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 5 µm

Mjerenjem regularne trokutaste geometrije, ticalom veličine 5 µm, dobivene su vrijednosti parametara hrapavosti čije su aritmetičke sredine navedene u Tablici 6.

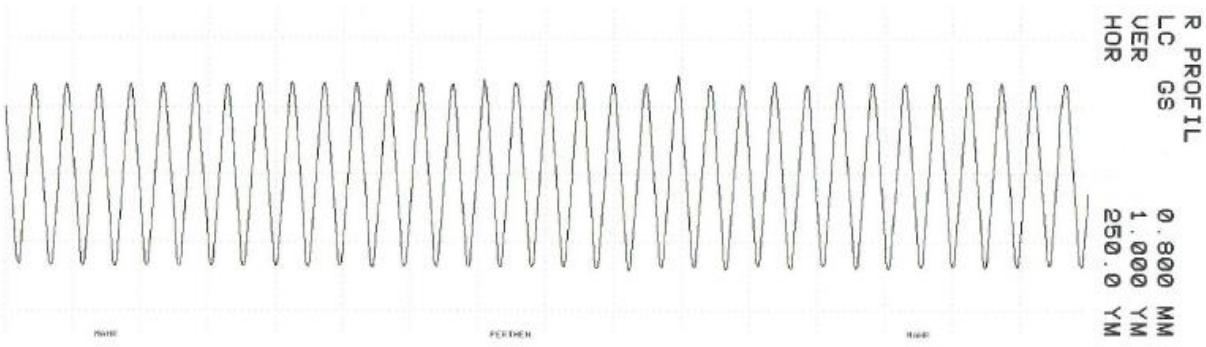
Tablica 6. Rezultati mjerenja ticalom 5 µm regularne trokutaste geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 0,25 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 0,25 mm
***Ra*/µm**	0,787	0,815	0,783
***Rz*/µm**	2,689	2,814	2,601
***RSm*/µm**	121,2	119,4	121,2

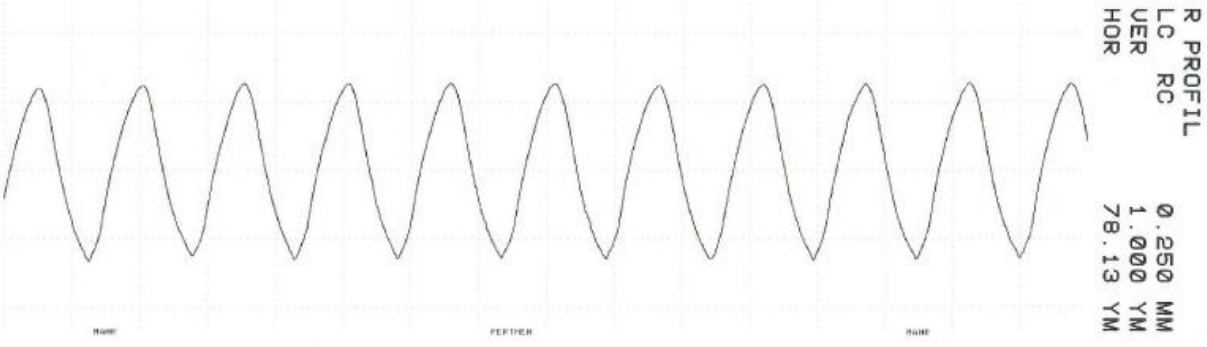
Grafički prikaz tragova profila prikazani su na slikama 35., 36. i 37.



Slika 35. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 µm)



Slika 36. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm)



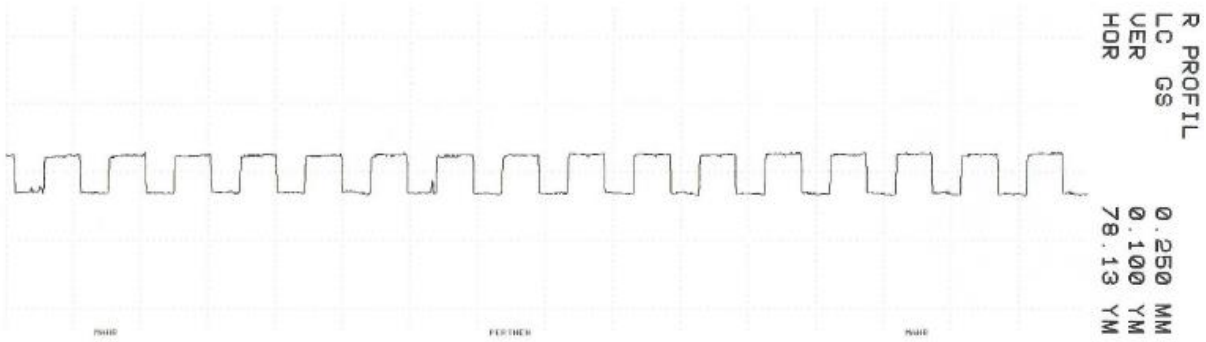
Slika 37. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm)

Tablica 7. prikazuje aritmetičke sredine vrijednosti parametara hrapavosti za profil regularne pravokutne geometrije.

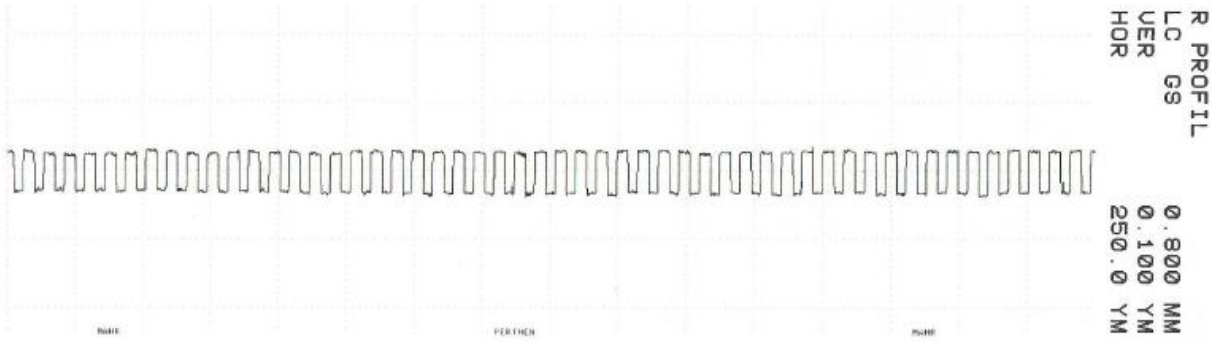
Tablica 7. Rezultati mjerenja ticalom 5 μm regularne pravokutne geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 0,25 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 0,25 mm
***Ra*/nm**	28	29	26
***Rz*/nm**	67	71	90

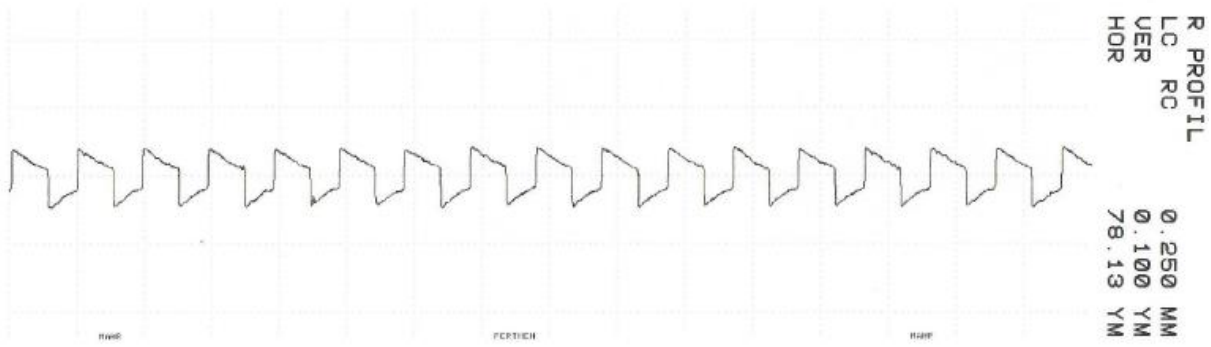
Grafički prikaz tragova profila prikazani su na slikama 38., 39. i 40.



Slika 38. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm)



Slika 39. Prikaz pravokutnog profila dobivenog Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm)



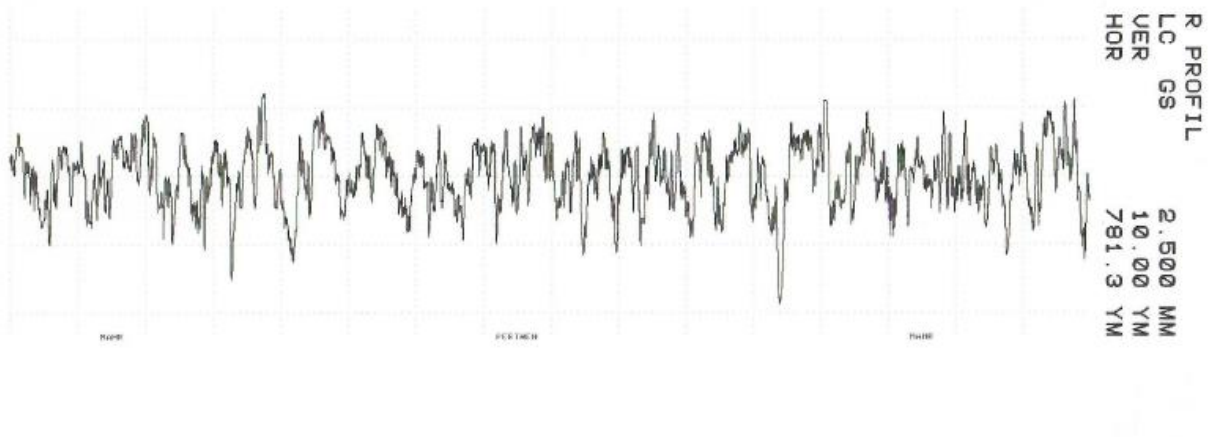
Slika 40. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 5 μm)

Tablica 8. prikazuje aritmetičke sredine vrijednosti parametara hrapavosti za profil iregularne geometrije.

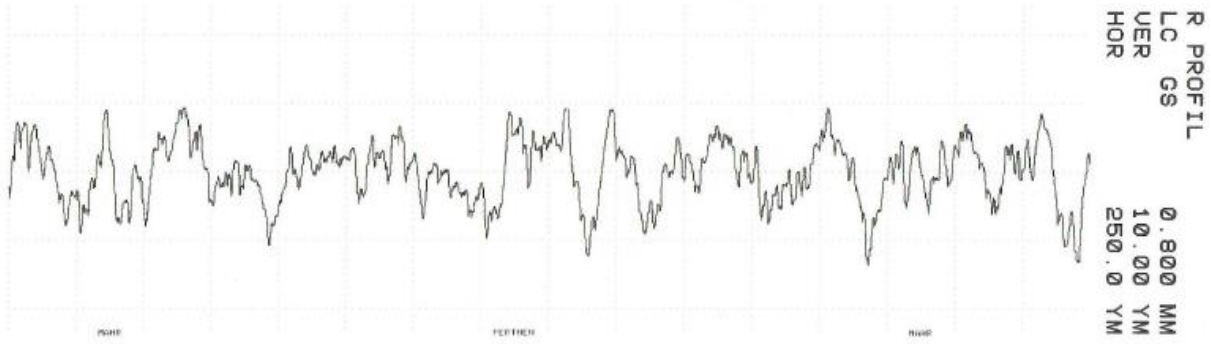
Tablica 8. Rezultati mjerenja ticalom 5 μm iregularne geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 2,5 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 2,5 mm
Ra*/*μm	3,61	3,08	3,67
***Rz*/μm**	23,18	17,49	23,04

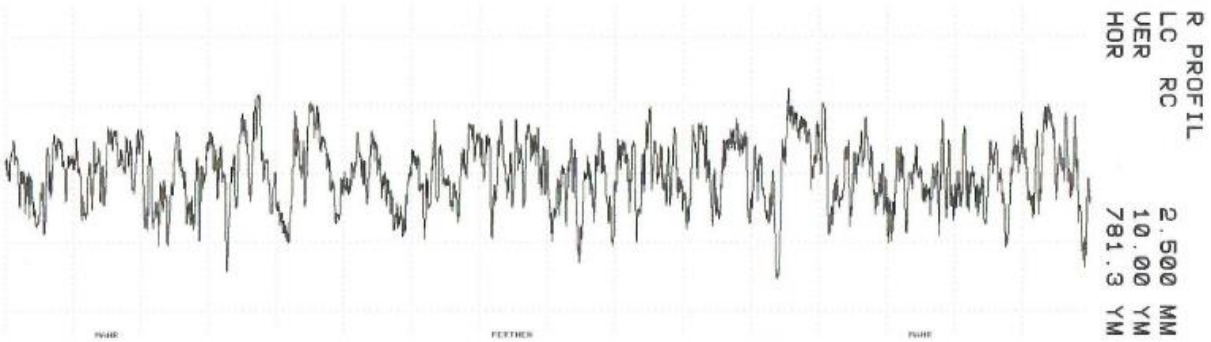
Grafički prikazi tragova profila prikazani su na slikama 41.,42. i 43.



Slika 41. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 5 μm)



Slika 42. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 5 μm)



Slika 43. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 5 μm)

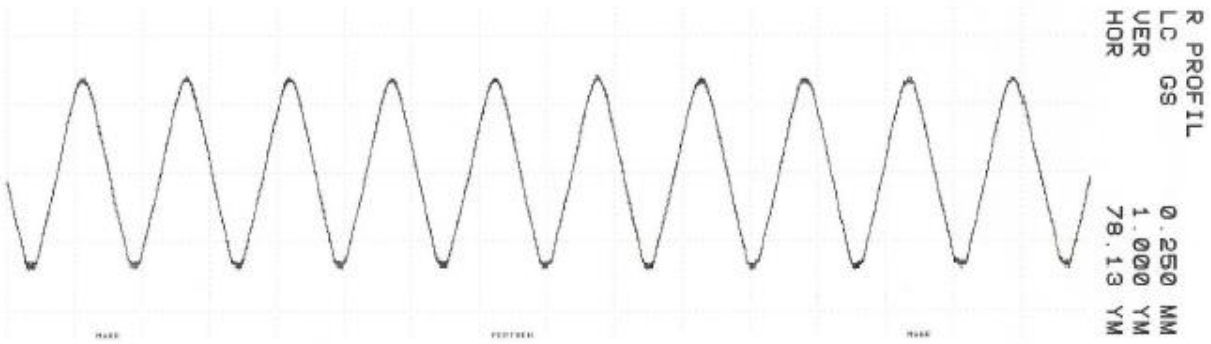
6.3. Rezultati mjerenja korištenjem ticala radijusa 10 μm

Mjerenjem regularne trokutaste geometrije, ticalom veličine 10 μm, dobivene su vrijednosti parametara hrapavosti čije su aritmetičke sredine navedene u Tablici 9.

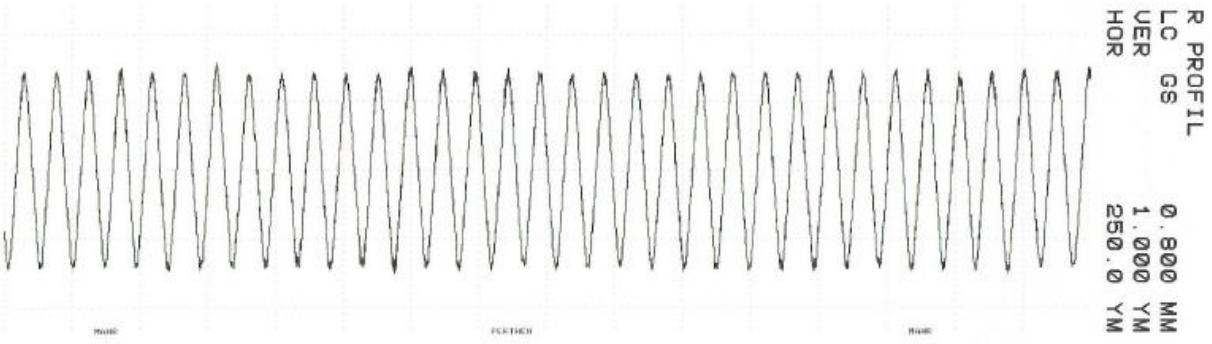
Tablica 9. Rezultati mjerenja ticalom 10 μm regularne trokutaste geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 0,25 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 0,25 mm
***Ra*/μm**	0,80	0,84	0,78
***Rz*/μm**	2,78	2,99	2,68
***RSm*/μm**	121,2	119,4	114,0

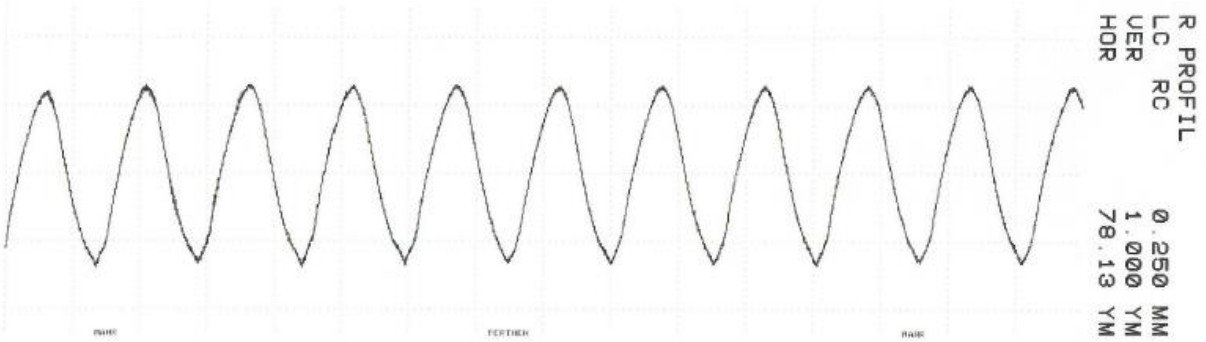
Grafički prikazi tragova profila prikazani su na slikama 44., 45. i 46.



Slika 44. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm)

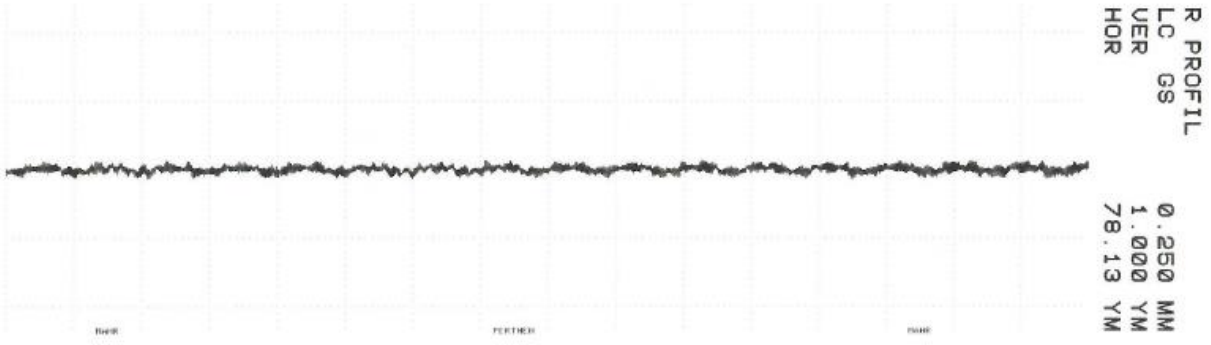


Slika 45. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm)

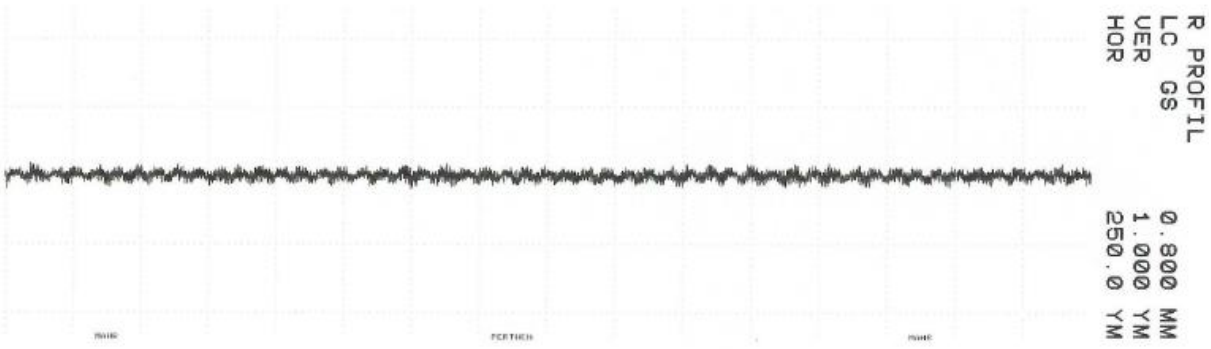


Slika 46. Prikaz trokutastog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm)

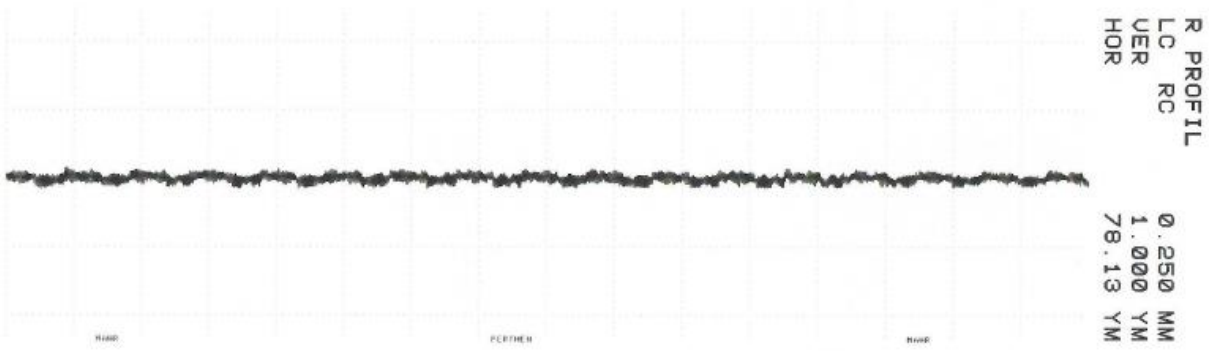
Vrijednosti parametara kod regularnog pravokutnog profila, mjerenog ticalom 10 μm, nije moguće očitati zbog veličine polumjera zakrivljenosti vrha ticala s kojom nije moguće razlučiti vertikalnu strukturu navedenog profila. Grafički prikaz tragova prikazan je na slikama 47., 48. i 49.



Slika 47. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm)



Slika 48. Prikaz pravokutnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm)



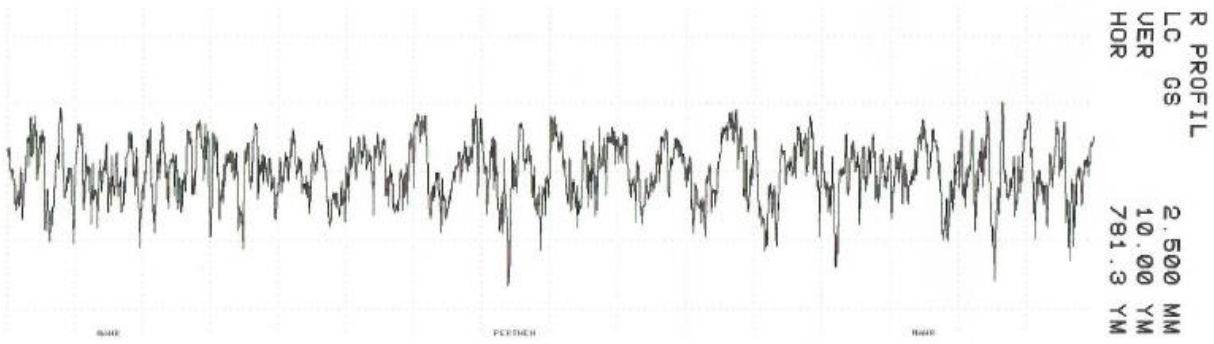
Slika 49. Prikaz pravokutnog profila dobivenog RC filterom s λc = 0,25 mm, (polumjer ticala 10 μm

Mjerenjem iregularne geometrije, ticalom veličine 10 μm, dobivene su vrijednosti parametara hrapavosti čije su aritmetičke sredine navedene u Tablici 10.

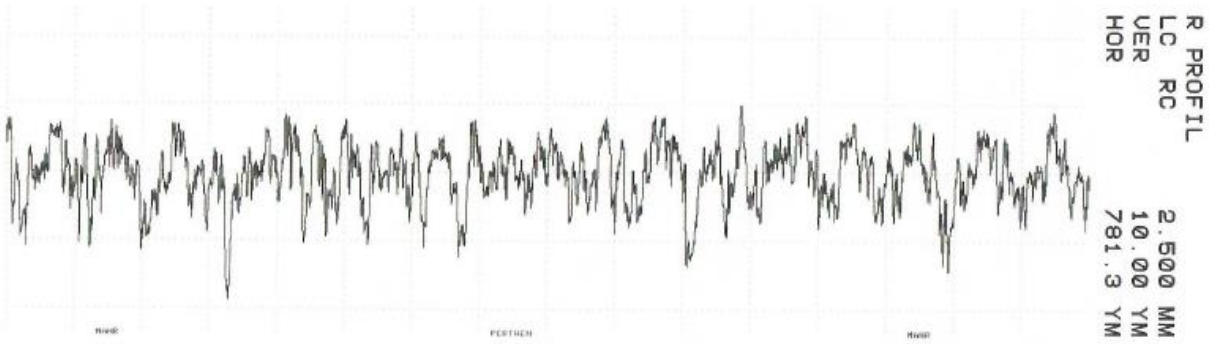
Tablica 10. Rezultati mjerenja ticalom 10 μm iregularne geometrije

Parametar	**Filter**		
	Gaussov filter λc = 2,5 mm	Gaussov filter λc = 0,8 mm	RC filter λc = 2,5 mm
***Ra*/μm**	3,56	3,02	3,45
***Rz*/μm**	22,76	17,83	22,69

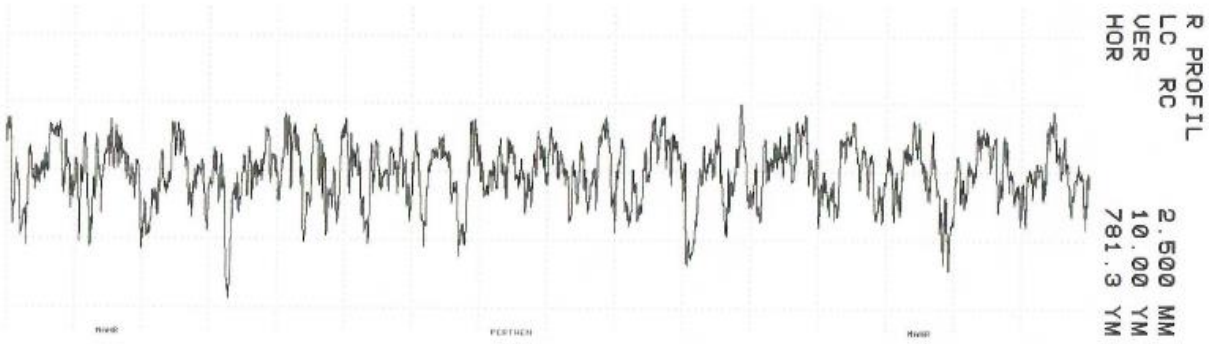
Grafički prikazi tragova profila prikazani su na slikama 50., 51. i 52.



Slika 50. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 10 μm)



Slika 51. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom Gauss filterom s λc = 0,8 mm, (polumjer ticala 10 μm)



Slika 52. Prikaz iregularnog profila dobivenog filtracijom RC filterom s λc = 2,5 mm, (polumjer ticala 10 μm)

7. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Usporedbu mjernih rezultata možemo provesti na tri načina. Prvi način podrazumijeva da imamo definiranu referentnu vrijednost pa sve rezultate uspoređujemo u odnosu na tu zadanu, referentnu mjeru. Kod druga dva načina uspoređujemo rezultate međusobno, s tim da ukoliko svi rezultati imaju istu težinsku vrijednost računamo aritmetičku sredinu usporedbe. Ukoliko rezultati nemaju istu težinsku vrijednost računa se srednja težinska vrijednost usporedbe.

Prilikom usporedbe rezultata u ovom radu možemo definirati referentnu vrijednost. Referentna vrijednost će biti ona koja je ostvarena uz izbor granične vrijednosti filtera sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996 i najmanji radijus zakrivljenosti igle ticala.

Kod usporedbe dobivenih rezultata koristi se faktor slaganja *En*. Ovaj faktor određuje ocjenu usporedivosti mjernih rezultata s referentnom vrijednosti. Računa se prema izrazu:

$$En = \frac{x_i - x_{ref}}{k \cdot \sqrt{u^2(x_i) - u^2(x_{ref})}} \tag{5}$$

gdje je k faktor proširenja.

U slučaju kada je apsolutna vrijednost faktora slaganja *En* manja od 1 smatra se da je rezultat usporediv. U slučaju kada je njegov predznak negativan dobiveni rezultat mjerenja manji je od referentne vrijednosti dok kada je pozitivan rezultat je veći od referentne vrijednosti.

Kriterij koji mora pri tome biti zadovoljen je Birgov kriterij koji je dan sljedećim izrazom:

$$R_B < R_{Bgr} \text{ , gdje je } R_B = \frac{u_{ext}(x_{ref})}{u_{int}(x_{ref})} \tag{6}$$

$$R_{Bgr} < \sqrt{1 + \sqrt{\frac{8}{n-1}}} \tag{7}$$

$$u_{int}(x_{ref}) = \sqrt{C} \tag{8}$$

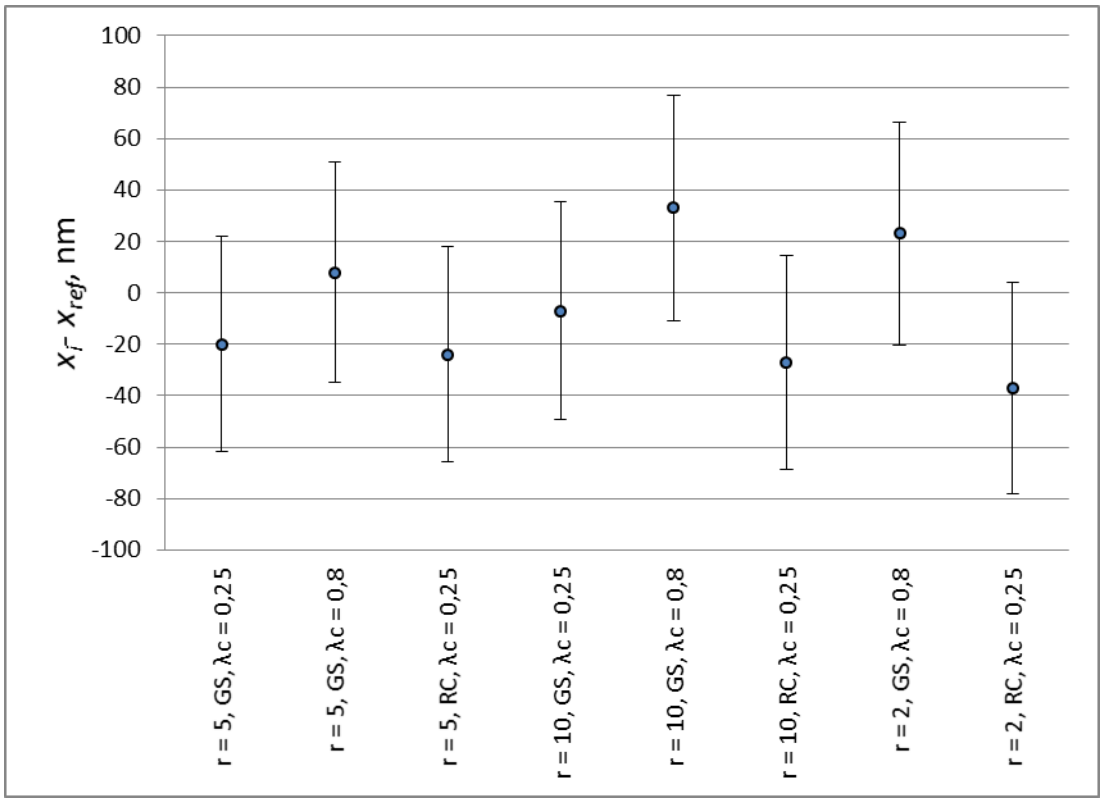
$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{u^2(x_i)}} \quad (9)$$

Birgov kriterij ukazuje na to ima li statistički značajne razlike između rezultata mjerenja. U slučaju da ovaj kriterij nije zadovoljen iz analize se izbacuje rezultat s najvećom vrijednosti faktora slaganja *En* te se postupak ponavlja dok se kriterij ne zadovolji.

Rezultati analize i usporedba za parametre hrapavosti *Ra*, na etalonu regularne trokutaste geometrije, prikazani su u Tablici 11. i grafički slikom 53.

Tablica 11. Prikaz rezultata analize parametra *Ra* za regularnu trokutastu geometriju

***Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost*/ µm**	***U*(x_i) , *k* = 2/nm**	***En***		x_i-x_{ref} /nm
r = 5, GS, λc = 2,5	0,787	42	-0,33	☑	-20,00
r = 5, GS, λc = 0,8	0,815	43	0,13	☑	8,00
r = 5, RC, λc = 2,5	0,783	42	-0,40	☑	-24,00
r = 10, GS, λc = 2,5	0,800	42	-0,12	☑	-7,00
r = 10, GS, λc = 0,8	0,840	44	0,54	☑	33,00
r = 10, RC, λc = 2,5	0,780	42	-0,45	☑	-27,00
r = 2, GS, λc = 0,8	0,830	44	0,37	☑	23,00
r = 2, RC, λc = 2,5	0,770	41	-0,62	☑	-37,00



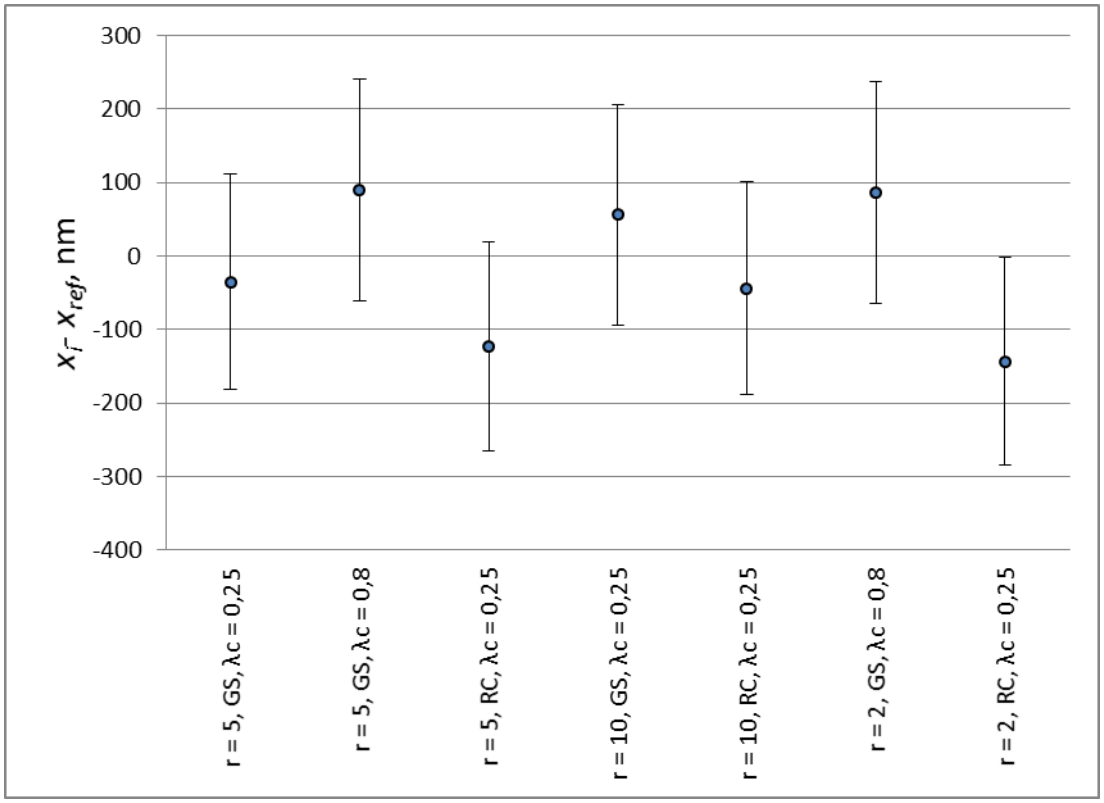
Slika 53. Usporedba rezultata *Ra* parametra regularne trokutaste geometrije

Usporedba rezultata mjerenja *Ra* parametara regularne trokutaste geometrije, s tri različita ticala i nakon tri različite filtracije, pokazuje konzistentnost rezultata unutar granica mjernih nesigurnosti. Apsolutne vrijednosti faktora slaganja za svaki pojedini rezultat, uz zadovoljen Birgov kriterij, manje su od 1 te se ostvareni rezultati smatraju usporedivim.

Analizirajući rezultate parametara *Rz*, regularne trokutaste geometrije, uspoređuje se ukupno osam vrijednosti s određenom referentnom vrijednošću. Jedan od rezultata (r = 10 mm, GS, λc = 0,8 mm) ne zadovoljava Birgov kriterij zbog čega se taj rezultat izbacuje iz analize. Preostalih sedam rezultata nalazi se unutar granica mjernih nesigurnosti te su usporedivi i prikazani u Tablici 12. i grafički slikom 54.

Tablica 12. Prikaz rezultata analize *Rz* parametra za regularnu trokutastu geometriju

***Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost*/ µm**	***U*(x_i) , *k* = 2/nm**	***En***		x_i-x_{ref}/nm
r = 5, GS, λc = 0,25	2,689	146	-0,17	☑	-35,00
r = 5, GS, λc = 0,8	2,814	151	0,43	☑	90,00
r = 5, RC, λc = 0,25	2,601	142	-0,60	☑	-123,00
r = 10, GS, λc = 0,25	2,780	150	0,27	☑	56,00
r = 10, RC, λc = 0,25	2,680	145	-0,21	☑	-44,00
r = 2, GS, λc = 0,8	2,810	151	0,41	☑	86,00
r = 2, RC, λc = 0,25	2,581	141	-0,70	☑	-143,00

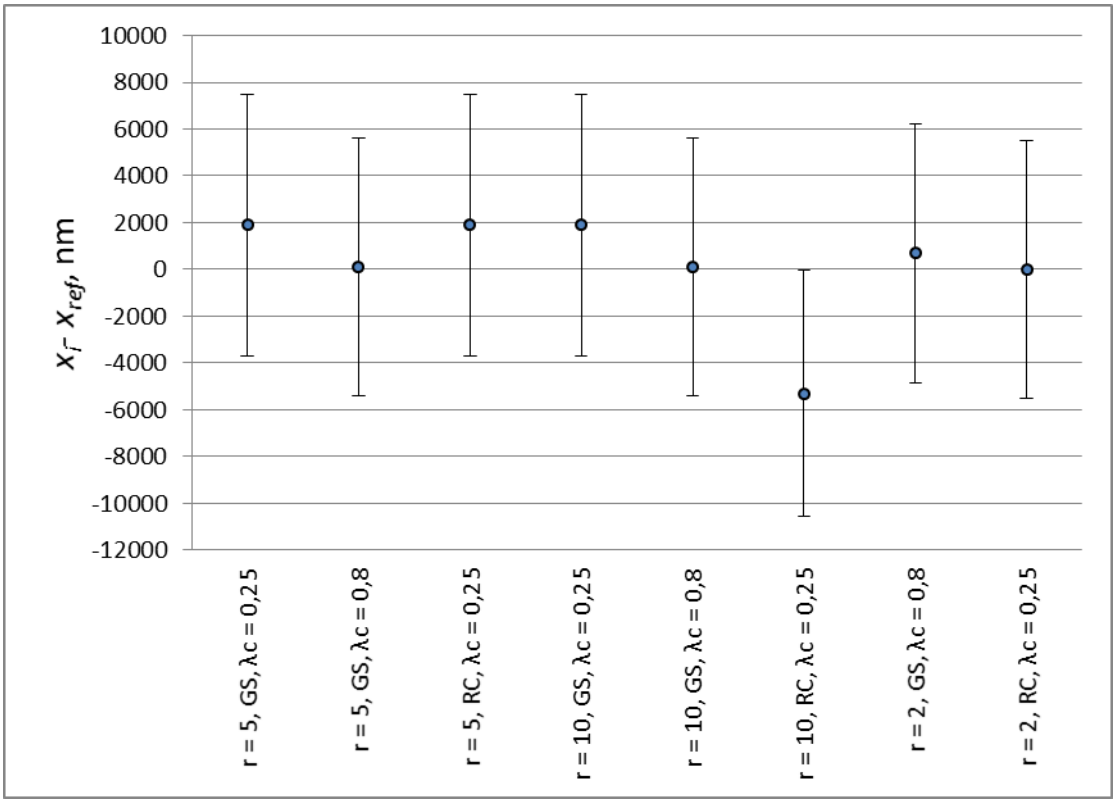


Slika 54. Usporedba rezultata *Rz* parametra regularne trokutaste geometrije

Rezultati analize i usporedba za parametre hrapavosti *RSm*, na etalonu regularne trokutaste geometrije, prikazani su u Tablici 13. i grafički na slikom 55. Apsolutne vrijednosti faktora slaganja za svaki pojedini rezultat, uz zadovoljen Birgov kriterij, manje su od 1 te se ostvareni rezultati smatraju usporedivim. Svih osam rezultata unutar je granica mjerne nesigurnosti.

Tablica 13. Prikaz rezultata analize parametra *RSm* za regularnu trokutastu geometriju

***Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost*/ µm**	**$U(x_i)$, k = 2/nm**	***En***		**x_i-x_{ref}/nm**
r = 5, GS, λc = 0,25	121,200	5597	0,15	☑	1900,00
r = 5, GS, λc = 0,8	119,400	5514	0,01	☑	100,00
r = 5, RC, λc = 0,25	121,200	5597	0,15	☑	1900,00
r = 10, GS, λc = 0,25	121,200	5597	0,15	☑	1900,00
r = 10, GS, λc = 0,8	119,400	5514	0,01	☑	100,00
r = 10, RC, λc = 0,25	114,000	5266	-0,43	☑	-5300,00
r = 2, GS, λc = 0,8	120,000	5542	0,06	☑	700,00
r = 2, RC, λc = 0,25	119,300	5510	0,00	☑	0,00

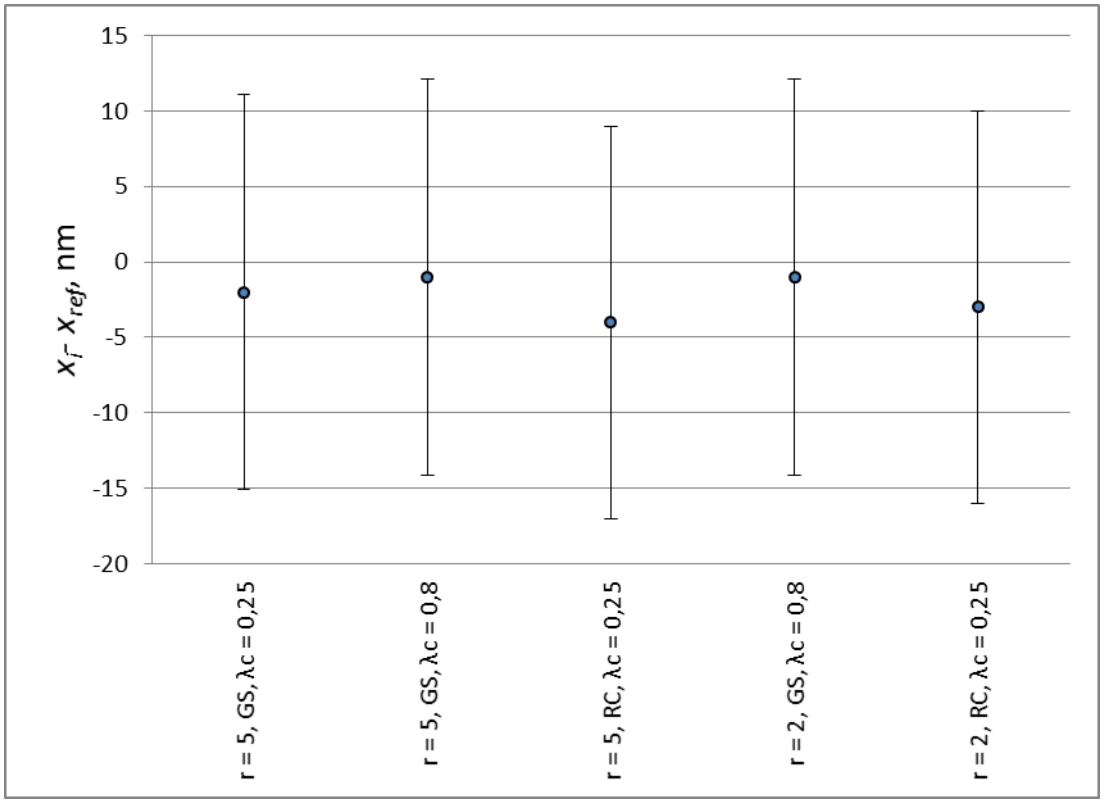


Slika 55. Usporedba rezultata *RSm* parametra regularne trokutaste geometrije

Analiza i usporedba rezultata parametara *Ra* i *Rz*, na etalonu regularne pravokutne geometrije, prikazana je u Tablicama 14. i 15. te grafički slikama 56. i 57. Ukupno se pet rezultata uspoređuje s određenom referentnom vrijednošću. Svi rezultati nalaze se unutar granica mjernih nesigurnosti, zadovoljavaju Birgov kriterij i usporedivi su.

Tablica 14. Prikaz rezultata analize *Ra* parametra regularne pravokutne geometrije

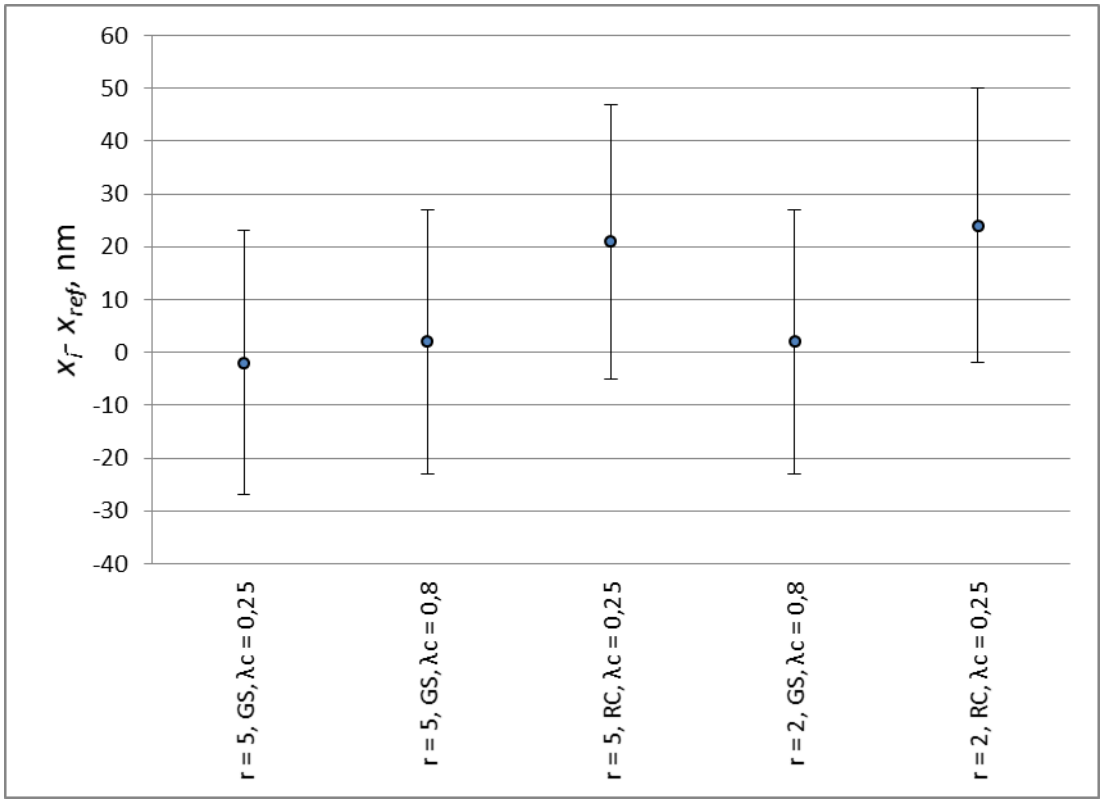
***Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost*/ µm**	**$U(x_i)$, k = 2/nm**	***En***		**x_i-x_{ref}/nm**
r = 5, GS, λc = 0,25	0,028	13	-0,11	☑	-2,00
r = 5, GS, λc = 0,8	0,029	13	-0,05	☑	-1,00
r = 5, RC, λc = 0,25	0,026	13	-0,22	☑	-4,00
r = 2, GS, λc = 0,8	0,029	13	-0,05	☑	-1,00
r = 2, RC, λc = 0,25	0,027	13	-0,16	☑	-3,00



Slika 56. Usporedba rezultata *Ra* parametra regularne pravokutne geometrije

Tablica 15. Prikaz rezultata analize *Rz* parametara regularne pravokutne geometrije

***Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost*/ µm**	**$U(x_i)$, k = 2/nm**	***En***		**x_i-x_{ref}/nm**
r = 5, GS, λc = 0,25	0,067	25	-0,06	☑	-2,00
r = 5, GS, λc = 0,8	0,071	25	0,06	☑	2,00
r = 5, RC, λc = 0,25	0,090	26	0,58	☑	21,00
r = 2, GS, λc = 0,8	0,071	25	0,06	☑	2,00
r = 2, RC, λc = 0,25	0,093	26	0,67	☑	24,00

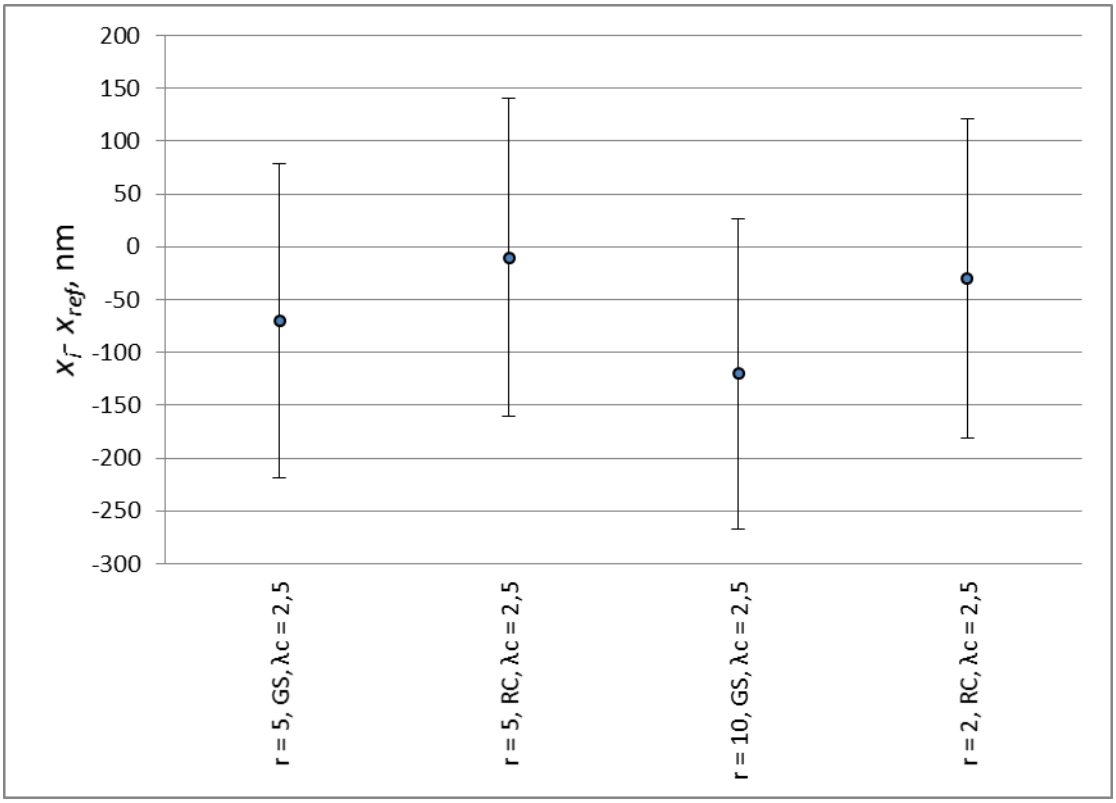


Slika 57. Usporedba rezultata *Rz* parametra regularne pravokutne geometrije

Analizom rezultata parametara *Ra* iregularne geometrije određena su 4 rezultata (r = 5 μm, GS, λc = 0,8 mm; r = 10 μm, GS, λc = 0,8 mm; r = 10 μm, RC, λc = 2,5 mm; r = 2 μm, GS, λc = 2,5 mm) koja ne zadovoljavaju Birgov kriterij te se oni isključuju iz analize. Analiza i usporedba, preostala 4 usporediva rezultata, prikazane su u Tablici 16. te grafički slikom 58.

Tablica 16. Prikaz rezultata analize parametra *Ra* iregularne geometrije

***Polumjer ticala* /μm, filter, *cut-off* /mm**	***Izmjerena vrijednost/* μm**	**$U(x_i)$, k = 2/nm**	***En***		**x_i-x_{ref}/nm**
r = 5, GS, λc = 2,5	3,610	149	-0,33	☑	-70,00
r = 5, RC, λc = 2,5	3,670	151	-0,05	☑	-10,00
r = 10, GS, λc = 2,5	3,560	147	-0,57	☑	-120,00
r = 2, RC, λc = 2,5	3,650	151	-0,14	☑	-30,00

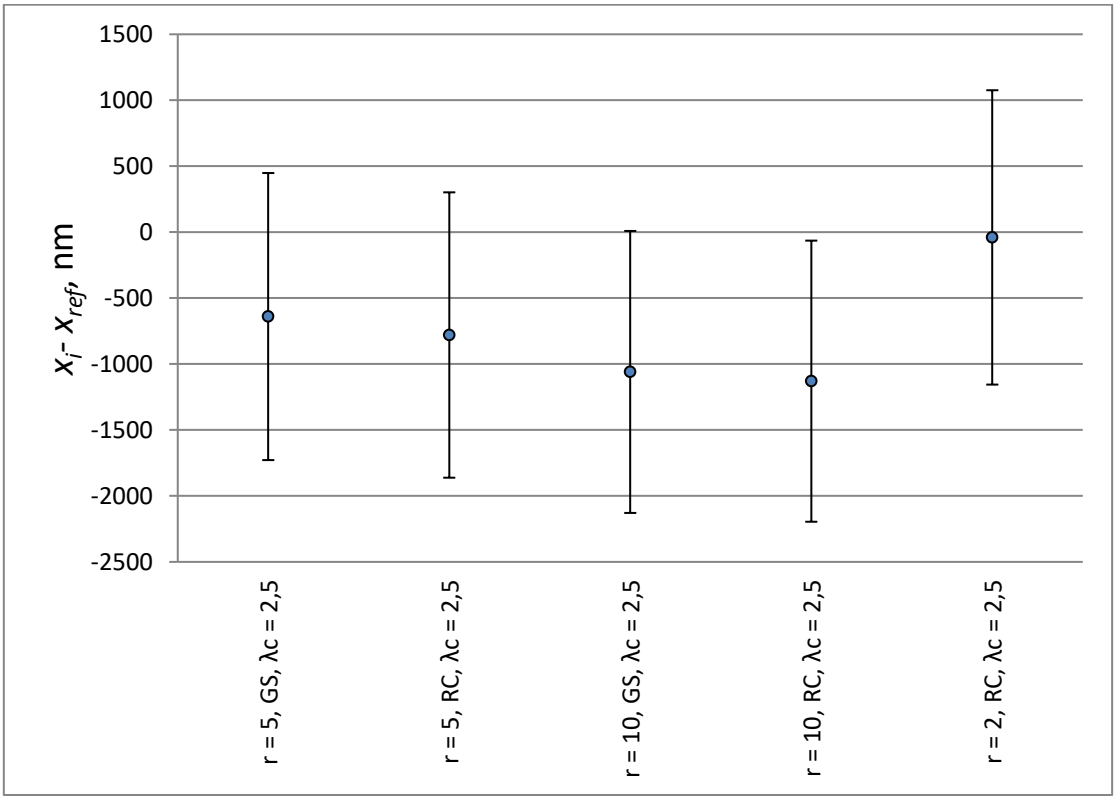


Slika 58. Usporedba rezultata *Ra* parametra iregularne geometrije

Analizom rezultata parametra *Rz*, na etalonu iregularne geometrije, određena su tri rezultata (rezultati mjereni sa sva tri radijusa i filtrirani Gauss filterom s λc = 0,8 mm) koja ne zadovoljavaju Birgov kriterij te su isključeni iz analize. Preostali, usporedivi rezultati, uspoređeni su s referentnom vrijednošću i prikazani u Tablici 17. i grafički slikom 59.

Tablica 17. Prikaz rezultata analize parametra *Rz* iregularne geometrije

Polumjer ticala* /µm, filter, *cut-off /mm	***Izmjerena vrijednost/* µm**	***U*(x_i) , *k* = 2/nm**	***En***		**x_i-x_{ref}/nm**
r = 5, GS, λc = 2,5	23,180	1088	-0,41	☑	-640,00
r = 5, RC, λc = 2,5	23,040	1082	-0,50	☑	-780,00
r = 10, GS, λc = 2,5	22,760	1069	-0,69	☑	-1060,00
r = 10, RC, λc = 2,5	22,690	1066	-0,73	☑	-1130,00
r = 2, RC, λc = 2,5	23,780	1116	-0,03	☑	-40,00



Slika 59. Usporedba rezultata *Rz* parametra iregularne geometrije

8. ZAKLJUČAK

Hrapavost površine važna je značajka funkcionalnosti strojnog dijela te je ispravno, točno i precizno mjerenje nužno kako bismo mogli odgovoriti na različite proizvodne zahtjeve. Mjerenjem hrapavosti mehaničko-elektroničkim uređajima s ticalom pojava greški uglavnom je uzrokovana odabirom pogrešne *cut-off* vrijednosti te utjecajem radijusa zakrivljenosti i načina vođenja igle ticala.

U ovom radu cilj je bio utvrditi nastale promjene kod rezultata mjerenja koje su uzrokovane upravo odabirom različitih ticala te filtracijom različitim dostupnim tipovima filtera. Provedena mjerenja obuhvatila su mjerenje s tri ticala različitih radijusa zakrivljenosti na tri etalona različitih regularnih i jedne iregularne geometrije uz upotrebu tri različite vrste filtracije. Mjerena su tri najčešće korištena parametra hrapavosti: *Ra, Rz* i *RSm*. U radu su navedeni ostvareni rezultati mjerenja parametara hrapavosti kao i grafički prikazi snimljenih profila. Usporedba mjernih rezultata podrazumijevala je definiranje referentne vrijednosti. Referentna vrijednost bila je ona koja je ostvarena uz izbor granične vrijednosti filtera sukladno zahtjevima norme ISO 4288:1996 i najmanji radijus zakrivljenosti igle ticala. Zaključak da li su ostvareni rezultati usporedivi temeljen je na vrijednosti faktora slaganja *En.*

Ostvareni rezultati parametara hrapavosti *Ra, Rz* na oba regularna profila i parametra *RSm* na trokutastom profilu pokazali su usporedivost iako se na snimljenim geometrijama profila primjećuje izobličenje geometrije profila koji je filtriran RC filterom. Amplitudni parametri ostvareni uz graničnu vrijednost Gaussovog filtra od 0,8 mm viših su vrijednosti nego u ostalim uvjetima filtracije, uz izuzetak parametra *Rz* na etalonu pravokutne geometrije gdje je RC filtracija značajno izobličila profil u smjeru z osi, a što je rezultiralo značajno većim vrijednostima izmjerenog parametra *Rz*.

Kod iregularnog profila u svim analizama bilo je potrebno isključiti rezultat ostvaren uz graničnu vrijednost Gaussovog filtra od 0,8 mm kako bi Birgov kriterij bio zadovoljen. Očekivano, na snimljenim profilima nije bilo moguće utvrditi utjecaj ticala ili filtracije na izobličenje profila. Uvjeti filtracije u području ispitivanja hrapavosti korištenjem elektroničko-mehaničkih uređaja s ticalom imaju značajniji utjecaj na ostvarene rezultate i geometriju snimljenog profila nego je to slučaj s utjecajem ticala.

Za očekivati je da će utjecaj uvjeta filtracije biti značajniji kod većih nazivnih vrijednosti parametara hrapavosti stoga je nužno provoditi mjerenja sukladno zahtjevu norme ISO 4288:1996 uz navođenje informacije o korištenom tipu mjernog ticala.

LITERATURA

[1] Runje, B. Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.

[2] Baršić, G. Predavanja iz kolegija Nanomjeriteljstvo. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019.

[3] ISO 3274:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments; 1996.

[4] https://guide.digitalsurf.com/en/guide-filtration-techniques.html, Pristupljeno: 16.11.2020.

[5]file:///C:/Users/lenovo/Downloads/1-s2.0-S0924013602000602-main%20(3).pdf, Pristupljeno: 16.11.2020.

[6] Grabavac, M. Diplomski rad: Nadogradnja uređaja za ispitivanje hrapavosti Perthometer S8P. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.

[7] ISO 4288:1996 Geometrical Product Specification (GPS) – Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture; 1996.

[8] Radhakrishnan V. Effect of stylus radius on the roughness values measured with tracing stylus instruments. Mechanical Engineering Department, Indian Institute of Technology, Madras (India); 1970.

[9] Dos Santos Motta Neto W., Silveira Leal J.E., Arantes L.J., Valdés Arencibia R. The effect of stylus tip radius on Ra, Rq, Rp, Rv, and Rt parameters in turned and milled samples. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018.) 99:1979–1992

[10] Łętocha A. Study the influence of selected new filtration methods on roughness of standard surfaces: 2017.

PRILOZI

I. CD – R disc