

Mjerenje 3D parametara hrapavosti mikroskopom atomskih sila

Turkalj, Lovro

Undergraduate thesis / Završni 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:235:783704>

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

ZAVRŠNI RAD

Lovro Turkalj

Zagreb, 2020. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Biserka Runje
Dr. sc. Amalija Horvatić Novak

Student:

Lovro Turkalj

Zagreb, 2020. godina

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje i komentorici dr. sc. Amaliji Horvatić Novak na ukazanom povjerenju i stručnim savjetima pri pisanju rada. Također se želim zahvaliti mag. ing. Mech. Andreju Razumiću na pomoći pri eksperimentalnom dijelu mjerenja. Hvala mojoj majci na velikoj podršci tijekom studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne 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:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Turkalj**

Mat. br.: 0035205449

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje 3D parametara hrapavosti primjenom mikroskopa atomskih sila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of 3D roughness using an atomic force microscope**

Opis zadatka:

Površinska hrapavost jedan je od parametara korištenih za opis topografije površine. Površinska hrapavost je mikrogeometrijsko stanje površine nastalo kao rezultat površinskih obrada ili nekih drugih utjecaja. Površinska hrapavost može se definirati 2D i 3D parametrima površinske hrapavosti. Usljed sve složenijih tehničkih zahtjeva i potreba za razumijevanjem prirode tekture površine, područje ispitivanja hrapavosti prošireno je s dvodimenzionalnog profila na 3D odsječak ispitivane površine. Međunarodna norma ISO 25718-2:2012 definira 3D parametre tekture površine.

U radu je potrebno:

- Definirati 3D parametre površinske hrapavosti sukladno međunarodnoj normi ISO 25178-2:2012.
- Navesti metode mjerenja 3D parametara hrapavosti.
- Na danim uzorcima izmjeriti površinsku hrapavost koristeći mikroskop atomskih sila (AFM) te analizirati dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

- 1. rok: 21. veljače 2020.
- 2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
- 3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
- 2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
- 3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Komentor:

Dr.sc. Amalija Horvatić Novak

Predsjednik Povjerenstva

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. 3D PARAMETRI HRAPAVOSTI.....	2
2.1. Amplitudni parametri	2
2.2. Prostorni parametri	4
2.3. Hibridni parametri	6
2.4. Funkcijski parametri.....	8
2.5. Raznovrsni parametri	14
3. METODE MJERENJA 3D PARAMETARA HRAPAVOSTI.....	15
3.1. SEM (engl. Scanning Electron Microscope).....	15
3.2. TEM (engl. Transmission Electron Microscopy).....	18
3.3. Profilometrija	19
3.3.1. Kontaktna profilometrija.....	19
3.3.2. Optička profilometrija.....	20
3.4. AFM (enlg. Atomic Force Microscope).....	22
3.4.1. Način rada.....	23
3.4.1.1. Kontaktna metoda	24
3.4.1.2. Beskontaktna metoda.....	24
3.4.1.3. Isprekidani način rada (engl. Tapping method).....	25
3.4.2. Karakterizacija materijala	26
3.4.3. Priprema uzorka.....	28
4. MJERENJE HRAPAVOSTI	29
4.1. Hrapavosti različitih površina	29

4.2. Uzorci etalona	29
4.2.1. Uzorak 1	30
4.2.2. Uzorak 2	31
4.2.3. Uzorak 3	32
4.2.4. Usporedba parametara etalona	33
4.3. Uzorci aluminijske legure	34
4.3.1. Uzorak 4	35
4.3.2. Uzorak 5	36
4.3.3. Usporedba parametara aluminijske legure	36
4.4. Usporedba amplitudnih parametara uzoraka etalona i aluminijske legure	38
5. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA	41
PRILOZI	44

POPIS SLIKA

Slika 1. Opis prikazivanja S_{sk} parametra [5]	3
Slika 2. 3D Prikaz određivanja S_a parametra [8].....	4
Slika 3. Prikaz parametra duljine autokorelacije [2]	5
Slika 4. Ovisnost parametra S_{tr} o orijentaciji neravnina [4]	6
Slika 5. Utjecaj oblika površine ovisno o iznosu S_{dq} parametra [12]	7
Slika 6. Utjecaj oblika površine ovisno o iznosu S_{dr} parametra [12].....	7
Slika 7. Grafički prikaz omjera materijala na promatranoj površini [2]	8
Slika 8. Grafički prikaz inverznog načina omjera materijala na promatranoj površini [2].....	9
Slika 9. Grafički prikaz visine jezgre S_k [2]	9
Slika 10. Prikaz smanjene visine vrha (S_{pk}) i dola (S_{vk}) [15].....	10
Slika 11. Parametri volumena praznina i materijala [2]	12
Slika 12. Primjer funkcije gustoće gradijenta [2].....	13
Slika 13. Najstrmiji gradijent α , i smjer najstrmijeg gradijenta β [2]	13
Slika 14. Raspodjela metode mjerenja hrapavosti površine [19]	15
Slika 15. Utjecaj atomskog broja na prodiranje elektrona [20].....	16
Slika 16. Prikaz utjecaja položaja detektora na sakupljanje sekundarnih elektrona [20]	17
Slika 17. Skenirajući elektronski mikroskop [23].....	17
Slika 18. TEM uređaj [26].....	18
Slika 19. Optički profilometar [27]	19
Slika 20. Shematski prikaz kontaktne profilometrije [28]	20
Slika 21. Shematski prikaz optičke profilometrije [31]	21
Slika 22. Prikaz oblika površine novčića i amplitudnih parametara [32]	21
Slika 23. Mikroskop atomskih sila [36].....	22
Slika 24. Shematski prikaz rada mikroskopa atomskih sila (AFM).....	23
Slika 25. Shematski prikaz kontaktne metode AFM [33]	24
Slika 26. Shematski prikaz beskontaktne metode AFM [37].....	25
Slika 27. Utjecaj promjene amplitude pri kontaktu ticala i površine uzorka [35]	25
Slika 28. Shematski prikaz isprekidanog načina rada AFM [33].....	26
Slika 29. Prikaz slike hrapavosti površine pomoću AFM-a [39]	26
Slika 30. Ispitivanje krutosti savijanja ugljikovih nanocijevi [35].....	27
Slika 31. 3D slika pukotine nastale pri zamoru [33]	27
Slika 32. MFP 3D Origin model mikroskopa atomskih sila [40].....	29

Slika 33. 2D prikaz profila površine <i>Uzorka 1</i>	30
Slika 34. 3D prikaz profila površine <i>Uzorka 1</i>	30
Slika 35. 2D prikaz profila površine <i>Uzorka 2</i>	31
Slika 36. 3D prikaz profila površine <i>Uzorka 2</i>	31
Slika 37. 2D prikaz profila površine <i>Uzorka 3</i>	32
Slika 38. 3D prikaz profila površine <i>Uzorka 3</i>	32
Slika 39. 2D prikaz profila površine <i>Uzorka 4</i>	35
Slika 40. 3D prikaz profila površine <i>Uzorka 4</i>	35
Slika 41. 2D prikaz profila površine <i>Uzorka 5</i>	36
Slika 42. 3D prikaz profila površine <i>Uzorka 5</i>	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri topografije površine <i>Uzorka 1</i> , <i>Uzorka 2</i> i <i>Uzorka 3</i>	33
Tablica 2. Parametri topografije površine <i>Uzorka 4</i> i <i>Uzorka 5</i>	37
Tablica 3. Usporedba amplitudnih parametara	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm	površina
f_{APS}	-	spektar snage zadanog smjera
f_{SRC}	-	glatko gruba skala križanja
R	-	prefiks parametra hrapavosti profila
S	-	prefiks prostornog parametra profila
S_a	μm	aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila
S_{afc}	-	prostorna fraktalna složenost
S_{al}	μm	duljina autokorelacije
S_{dr}	%	omjer prirasta različitosti površine
S_{dq}	-	srednji kvadratni nagib profila
S_k	μm	visina jezgre
S_{ku}	-	oštrina hrapavosti profila
S_{mq}	-	omjer materijala
$S_{mc}(mr)$	%	inverzan omjer materijala u prostornoj ravnini
$S_{mr}(c)$	%	omjer materijala u prostornoj ravnini
S_{mr1}	%	omjer površine iznad linije sjecišta
S_{mr2}	%	omjer površine ispod linije sjecišta
S_p	μm	maksimalna visina vrha profila
S_{pk}	μm	smanjena visina vrha
S_{pq}	-	korijen srednje vrijednosti odstupanja brda
S_q	μm	kvadratna vrijednost odstupanja profila
$S_{rel}(c)$	-	funkcija relativne površine
S_{sk}	-	asimetričnost profila
S_{td}	-	smjer teksture
S_{tr}	-	ujednačenost teksture površine
S_v	μm	maksimalna dubina dola
S_{vfc}	-	volumen fraktalne složenosti

S_{vk}	μm	smanjena dubina dola
S_{vq}	-	korijen srednje vrijednosti odstupanja dolova
$S_{vs(c)}$	-	funkcija skale volumena
S_{xp}	μm	razlika u visini omjera materijala
S_z	μm	maksimalna visina neravnina
V	-	prefiks volumnog parametra
$V_{m(p)}$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen materijala po jedinici površine
V_{mc}	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen materijala jezgre
V_{mp}	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen materijala vrha
$V_{v(p)}$	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen praznina po jedinici površine
V_{vc}	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen praznina jezgre površine
V_{vv}	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	volumen praznine dolova
T_h	-	vrijednost relativne površine ili volumena

SAŽETAK

Površinska hrapavost je mikrogeometrijsko stanje, te je ujedno jedan od parametara korištenih za opis topografije površine. Hrapavost površine može se opisati 2D i 3D parametrima površinske hrapavosti. Ovaj rad sastoji se od teorijskog dijela u kojem su navedeni i objašnjeni 3D parametri hrapavosti tehničkih površina pomoću norme “ISO 25178-2:2012“. U teorijskom dijelu također su opisane različite metode mjerenja 3D parametara hrapavosti, u kojima se ujedno nalazi metoda pomoću koje se provodio eksperimentalni dio. U drugom dijelu rada provedeno je mjerenje 3D parametara hrapavosti na zadanim uzorcima mikroskopom atomskih sila (AFM). Dobiveni rezultati parametara analizirani su, uspoređeni i komentirani.

SUMMARY

Surface roughness is a microgeometric condition, and is also one of the parameters used to describe the surface topography. Surface roughness can be described by 2D and 3D surface roughness parameters. This thesis consists of a theoretical part in which the 3D parameters of the roughness of technical surfaces are listed and explained using the standard “ISO 25178-2:2012“. The theoretical part also describes various methods for measuring 3D roughness parameters, which also include the method used to perform the experimental part. In the second part of the thesis, the measurement of 3D roughness parameters on given samples was performed with an atomic force microscope (AFM). The obtained parameter results were analyzed, compared and commented on.

1. UVOD

Tehničke površine su one površine strojnih dijelova koje su dobivene nekom od obrada odvajanjem čestica ili nekom od obrada bez odvajanja čestica [1]. Tijekom obrade i eksploatacije, strojni dijelovi su izloženi različitim vrstama opterećenja što dovodi do trošenja površine. Zahtjevi za hrapavošću površine svakog strojnog dijela ovise o njihovim namjenama. Ponekad je potrebna hrapava površina, kako bi se, ako je riječ o podmazivanju površine, ulje što dulje zadržalo na njoj, a ponekad je potrebna glatka površina, kao kod dijelova koji su u kontaktu jedan sa drugim kako bi se izbjeglo trošenje i smanjilo trenje. Veličina hrapavosti tehničkih površina može utjecati na:

- smanjenje dinamičke izdržljivosti
- pojačano trenje i trošenje površina
- smanjenje prijeklopa i nosivosti kod steznih spojeva
- ubrzavanje procesa korozije
- čistoću površine

Površinska hrapavost obuhvaća sve mikrogeometrijske nepravilnosti na površini promatranog predmeta uzrokovane postupkom obrade, koje se mogu ispitivati u 2D ili 3D sustavima. Strojarska proizvodnja je podvrgnuta sve strožim zahtjevima u smislu dopuštenih odstupanja, što utječe na postavljanje strožih zahtjeva za kvalitetu obrade površine. U posljednjim desetljećima, dostupnost moderne mjerne tehnologije, te pojava i nagli razvoj računala omogućili su mnogo preciznije mjerenje i opisivanje površina, poput 3D sustava. Iako 3D sustav ima mnoge prednosti nad 2D, u većoj mjeri se i dalje koristi 2D sustav zbog cijene strojeva i opreme koja je potrebna za mjerenje 3D sustavima.

2. 3D PARAMETRI HRAPAVOSTI

Kako je oblik svake površine jedinstven, nemoguće ga je opisati jednim parametrom, stoga je uveden niz parametara koji opisuju stanje promatrane površine. Norma “ISO 25178-2:2012” sadrži pojmove, definicije i parametre za određivanje 3D oblika teksture površine [2]. U parametrizaciji koji će biti navedeni, svaki izraz slijedi svoj parametar, a zatim simbol. Svi parametri teksture površine započinju s velikim tiskanim slovom S ili V, popraćeni sa sufiksom od jednog ili dva slova. 3D parametri površinske hrapavosti mogu se podijeliti na amplitudne, prostorne, hibridne, funkcijske i raznovrsne parametre.

2.1. Amplitudni parametri

Svi amplitudni parametri definirani su preko teksture promatrane površine. Većina ih ima matematičke izraze koji se mogu lako prenijeti na oblik ravnine površine. Jednadžbe takvih parametara koriste dvostruke integrale jer se izračunavaju po ravnini površini.

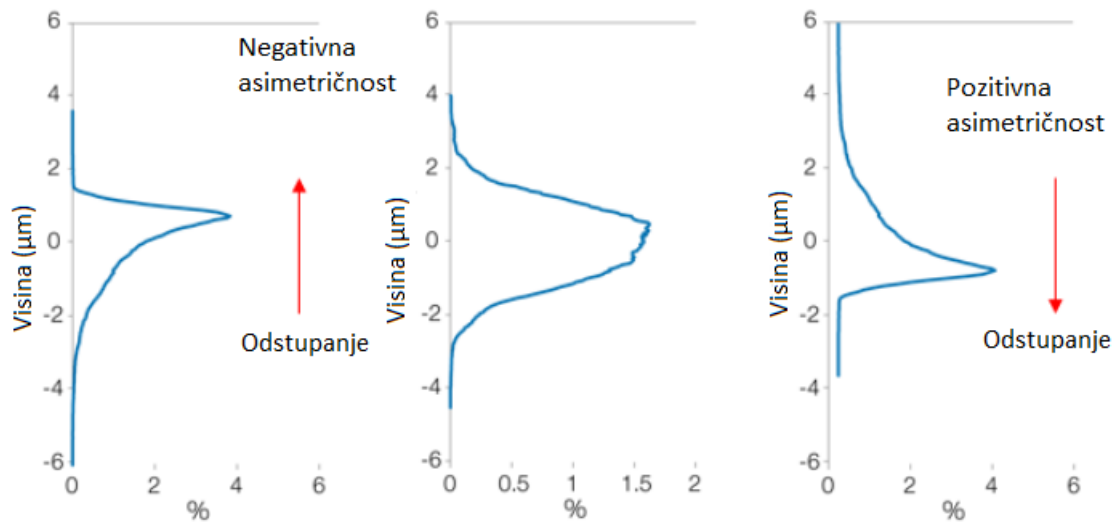
Amplitudni 3D parametri su:

S_q - predstavlja srednju kvadratnu vrijednost odstupanja profila na promatranom području površine. Postoji 2D parametar R_q , koji predstavlja korijen srednjeg odstupanja profila [3]. Usporedbom ta dva parametra, vidljivo je da je parametar S_q proširenje na ravninu (3D) jednadžbe parametra R_q , koji je definiran za liniju (2D). S_q parametar matematički je prikazan formulom:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \int \int_A z^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

S_{sk} – asimetričnost (eng. *skewness*) raspodjele visine ravnine na promatranu površinu, vrijednost ovog parametra predstavlja odstupanje od oblika hrapavosti. Ako je ovaj parametar jednak nuli, znači da se razlika u visini raspoređuje ravnomjerno, negativna vrijednost pokazuje odstupanje na gornju stranu, a pozitivna pokazuje odstupanje na donju stranu [4] [Slika 1]. Matematički izraz S_{sk} parametra je:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \int \int_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (2)$$



Slika 1. Opis prikazivanja S_{sk} parametra [5]

S_{ku} – parametar koji prikazuje mjeru oštrote promatranog profila hrapavosti površine. Matematički zapis ovog parametra prikazan je formulom:

$$s_{ku} = \frac{1}{s_q^4} \left[\frac{1}{A} \int_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (3)$$

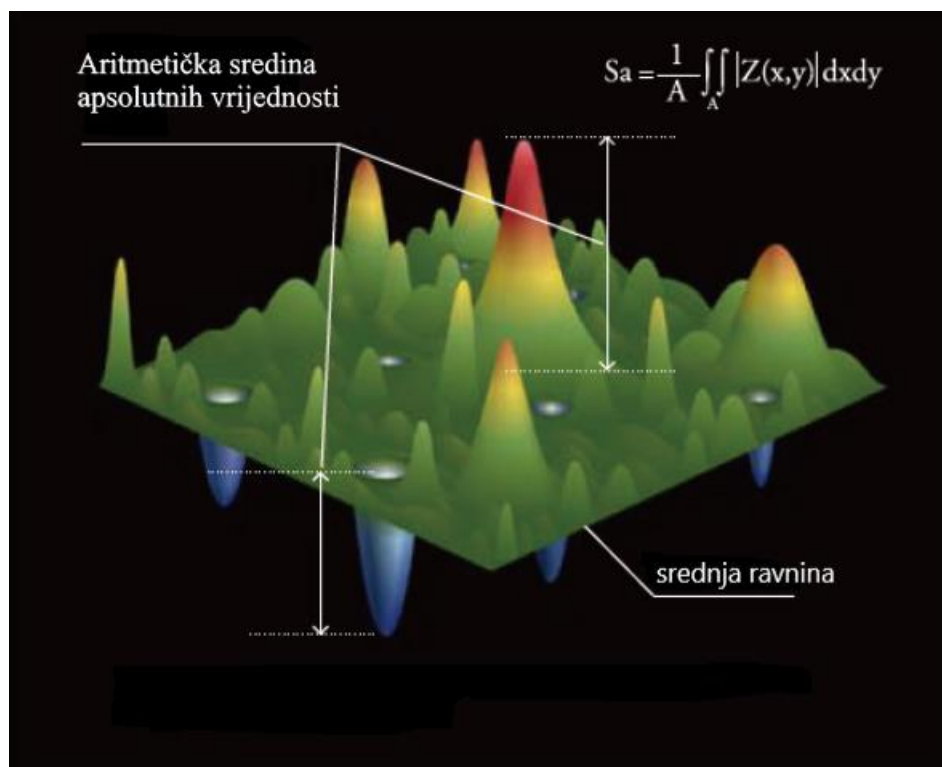
S_p – parametar koji definira najveću vrijednost visine vrha unutar promatranog područja. Ovaj parametar možemo usporediti s 2D parametrom R_p koji isto opisuje maksimalnu visinu vrha profila [6]. Jedina razlika ovih dvaju parametara je treća dimenzija.

S_v – parametar koji definira maksimalnu dubinu dola promatranog područja. Ovaj parametar možemo usporediti s 2D parametrom R_v koji definira maksimalnu dubinu dola u liniji [7]. Razlika ovih dvaju parametara je u trećoj dimenziji.

S_z – parametar koji definira maksimalnu visinu između neravnina na promatranom području. Čini ga suma najvišeg vrha i najdubljeg dola na promatranoj površini. Može se usporediti s 2D parametrom R_z koji opisuje istu sumu samo na referentnoj duljini.

$$S_z = S_p + S_v \quad (4)$$

S_a – parametar koji predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti na promatranoj površini. Ovaj parametar je proširenje s referentne duljine na površinu parametra R_a [8]. Prikazuje razliku u visini svake točke u odnosu na aritmetičku sredinu površine [slika 2].



Slika 2. 3D Prikaz određivanja S_a parametra [8]

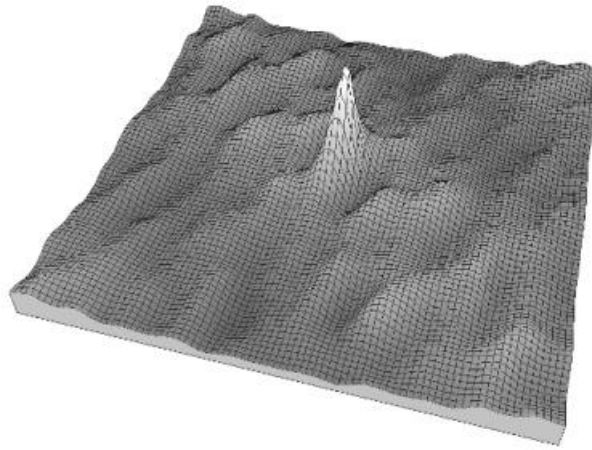
Matematički se definira prema formuli:

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |z(x, y)| dx dy \quad (5)$$

2.2. Prostorni parametri

Razvojem tehnologije i informatike, došlo je do razvoja matematičke autokorelacije (ACF), pomoću koje se prikazuju prostorni parametri [9]. Prostorna autokorelacija može se opisati kao mjerenje sličnosti neravnina unutar promatranog područja. Uzimaju se promatrani podaci i procjenjuje se jesu li oni međusobno povezani. Može se klasificirati kao pozitivna i negativna [10]. Svi prostorni parametri definirani su preko teksture promatrane površine.

S_{al} – parametar duljine autokorelacije. Predstavlja vodoravnu udaljenost u smjeru u kojem funkcija automatske korelacije najbrže pada.



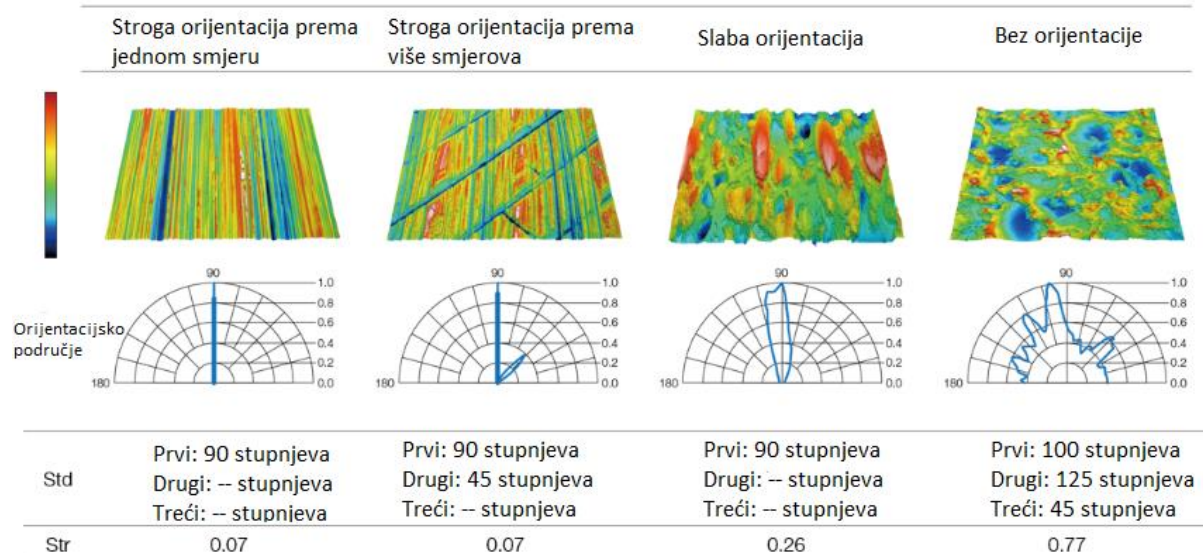
Slika 3. Prikaz parametra duljine autokorelacije [2]

Matematički se definira prema formuli:

$$S_{al} = \min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2} ; \text{ gdje je } R = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\} \quad (6)$$

S_{tr} – parametar koji prikazuje ujednačenost tekstone površine. Vrijednost se dobiva dijeljenjem vodoravne udaljenosti u smjeru u kojem funkcija automatske korelacije najbrže pada i u smjeru gdje najsporije pada. Ovaj parametar je koristan kako bi se odredio smjer orijentacije neravnina. Parametar teži u nulu kada imamo točnu orijentaciju neravnina, a kada nema međusobne povezanosti orijentacije neravnina, teži u jedan [Slika 4]. Matematički se definira prema formuli:

$$S_{tr} = \frac{\min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{\max_{t_x, t_y \in Q} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}} ; \text{ gdje je } R = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}, Q = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \geq s\} \quad (7)$$

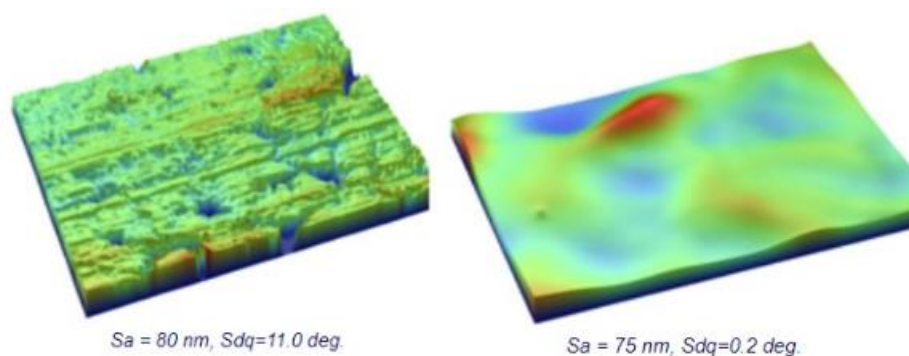
Slika 4. Ovisnost parametra S_{tr} o orijentaciji neravnina [4]

2.3. Hibridni parametri

Hibridni parametri opisuju varijacije iz kombinacija amplitudnih i uzdužnih karakteristika površine [11].

S_{dq} – srednja vrijednost kvadrata korijena gradijenta nagiba u svim točkama promatrane površine. Što površina ima više nagiba, vrijednost parametra raste, a što je površina glada i ravniya, vrijednost teži u nulu [Slika 5]. Ovaj parametar računa se prema formuli:

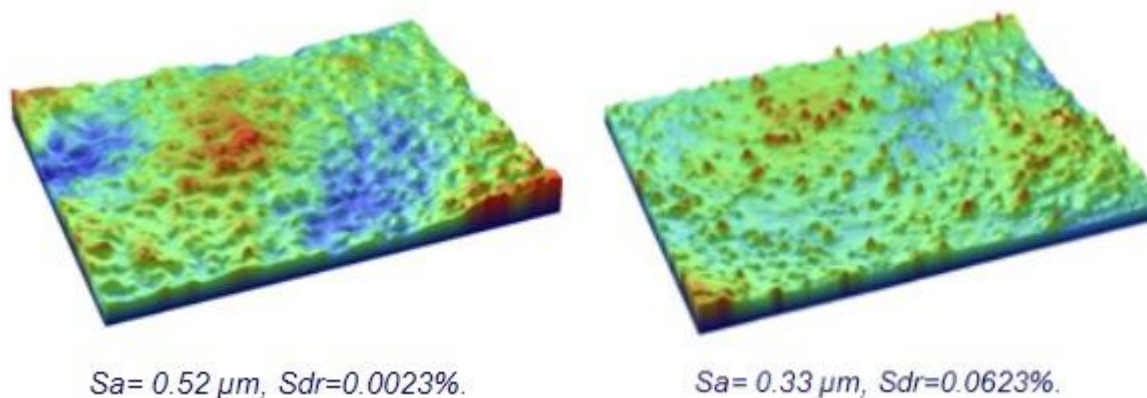
$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \int \int_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (8)$$



Slika 5. Utjecaj oblika površine ovisno o iznosu S_{dq} parametra [12]

S_{dr} – omjer prirasta različitosti površine u promatranom području [2]. Izražava se kao postotak površine koja odstupa od idealne ravnine [13]. Iznos parametra raste ako promatrana površina ima nagle promjene u nagibu [Slika 6]. Matematički zapis definira se kao:

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right] \quad (9)$$



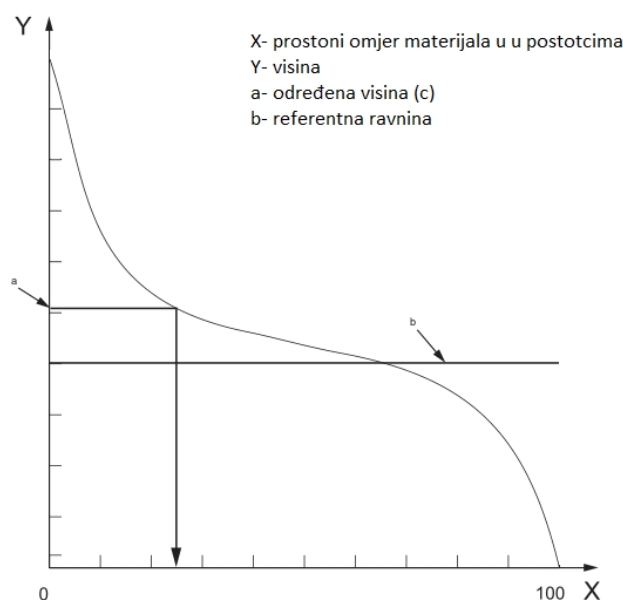
Slika 6. Utjecaj oblika površine ovisno o iznosu S_{dr} parametra [12]

2.4. Funkcijski parametri

Funkcijski parametri su krivuljni parametri koji su prošireni na 3D područje promatrane površine [14]. Krivulje i međusobno povezani parametri daju mnogo više informacija o obliku površine.

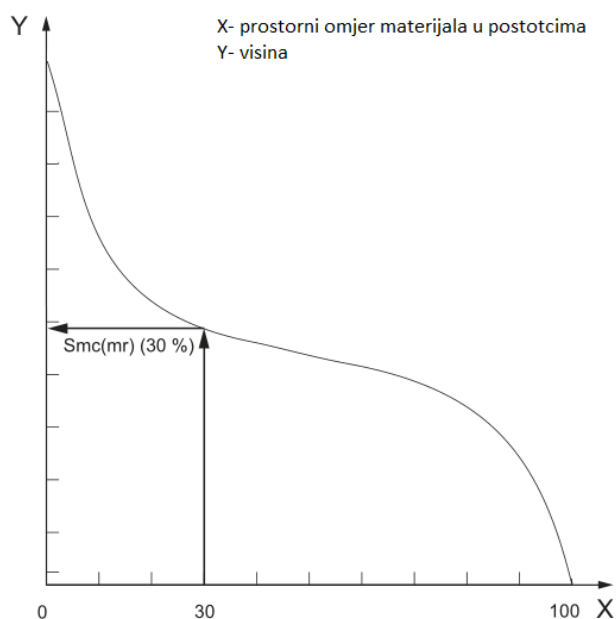
Prostorna funkcija omjera materijala na skali promatrane površine – ova funkcija predstavlja prostorni omjer materijala na skali promatrane površine kao funkciju visine [2].

$S_{mr}(c)$ - omjer materijala u promatranoj prostornoj ravnini na površinskoj skali. Prikazuje omjer prostorne površine materijala na određenoj visini (c). Najčešće se izražava u postocima. Visina se uzima u odnosu na referentnu ravninu, i povezana je s uzorkom kumulativne vjerojatnosti funkcije ordinata [2].



Slika 7. Grafički prikaz omjera materijala na promatranoj površini [2]

$S_{mc}(mr)$ – inverzan omjer materijala u promatranoj prostornoj ravnini na površinskoj skali. Visina se uzima preko referentne ravnine. To je visina (c) na kojoj je zahtjev za prostornim omjerom materijala (mr) zadovoljen [2].

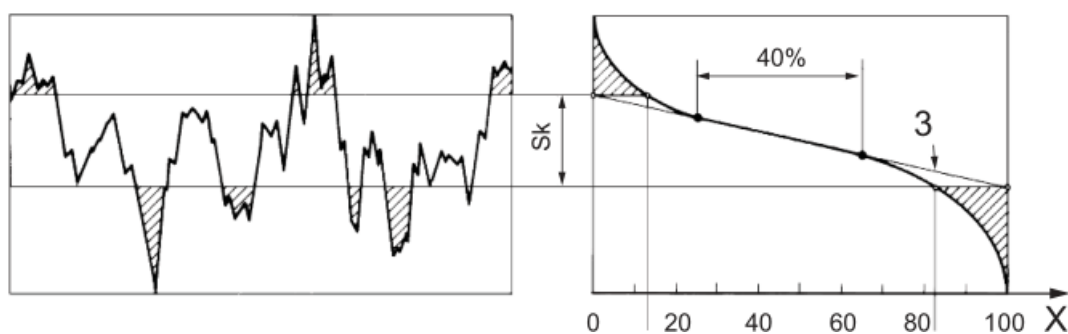


Slika 8. Grafički prikaz inverznog načina omjera materijala na promatranoj površini [2]

Prostorni parametar slojeva promatrane površine - predstavlja omjer materijala na promatranoj površini po slojevima, mijenja se ovisno o funkciji visine. Pod njega spadaju:

Površina jezgre – površina koja isključuje brda i dolove na kojima se ne nalazi jezgra

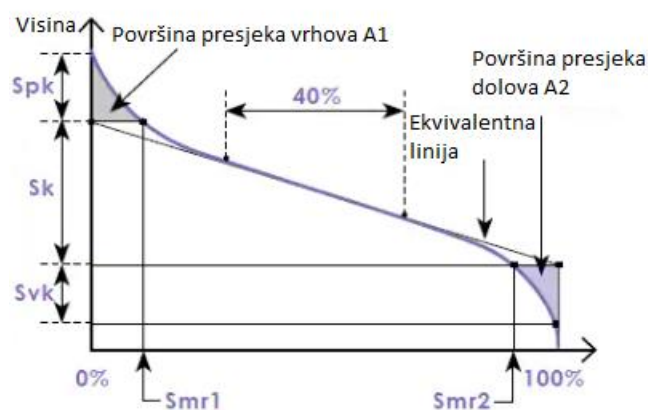
Visina jezgre (S_k) – udaljenost između najviše i najniže razine površine jezgre. Povlači se sekanta na najmanji nagib krivulje, i tako se dobiva visina jezgre [slika 9].



Slika 9. Grafički prikaz visine jezgre S_k [2]

Smanjena visina vrha (S_{pk}) – predstavlja prosječnu visinu vrhova iznad površine jezgre

Smanjena visina dola (S_{vk}) – predstavlja prosječnu visinu dolova ispod površine jezgre



Slika 10. Prikaz smanjene visine vrha (S_{pk}) i dola (S_{vk}) [15]

Omjer materijala (S_{mr1}) – omjer površine materijala iznad linije sjecišta gornje granice visine jezgre i krivulje. Omjer je izražen u postotcima [2].

Omjer materijala (S_{mr2}) – omjer površine materijala ispod linije sjecišta donje granice visine jezgre i krivulje. Omjer je izražen u postotcima [2].

Krivulja vjerojatnosti materijala u prostoru – prikaz krivulje prostornog omjera površine materijala u kojoj se omjer površine materijala u prostoru izražava kao Gaussova vjerojatnost u vrijednostima standardnog odstupanja [2].

Korijen srednje vrijednosti kvadratnog odstupanja dolova (S_{vq})

Korijen srednje vrijednosti odstupanja brda (S_{pq})

Omjer materijala (S_{mq}) – omjer materijala u prostoru između sjecišta brda i dolova

$V_{v(p)}$ – volumen praznina po jedinici površine pri danom omjeru materijala izračunatog iz krivulje omjera materijala u prostoru [2]. Matematički zapis ovog parametra glasi:

$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^{100\%} [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq \quad (10)$$

V_{vv} – volumen praznine dolova, prikazuje količinu volumena pri određenom p% materijala [2]. Zadane vrijednosti p% mogu se naći u “ISO 25178-3“. Može se koristiti za utvrđivanje veličine površine jezgre, smanjenih vrhova i dolova na temelju parametara volumena [16]. Matematički se može prikazati kao:

$$V_{vv} = V_v(p) \quad (11)$$

V_{vc} – volumen praznina jezgre površine koji predstavlja razliku između volumena praznine površine materijala p% i volumena praznine površine materijala q%. Zadane vrijednosti p% i q% se također mogu pronaći u “ISO 25178-3“. Matematički zapis definira se kao:

$$V_{vc} = V_v(p) - V_v(q) \quad (12)$$

$V_{m(p)}$ – volumen materijala po jedinici površine u danom omjeru materijala izračunate iz krivulje omjera materijala u prostoru [2]. Matematički zapis definira se kao:

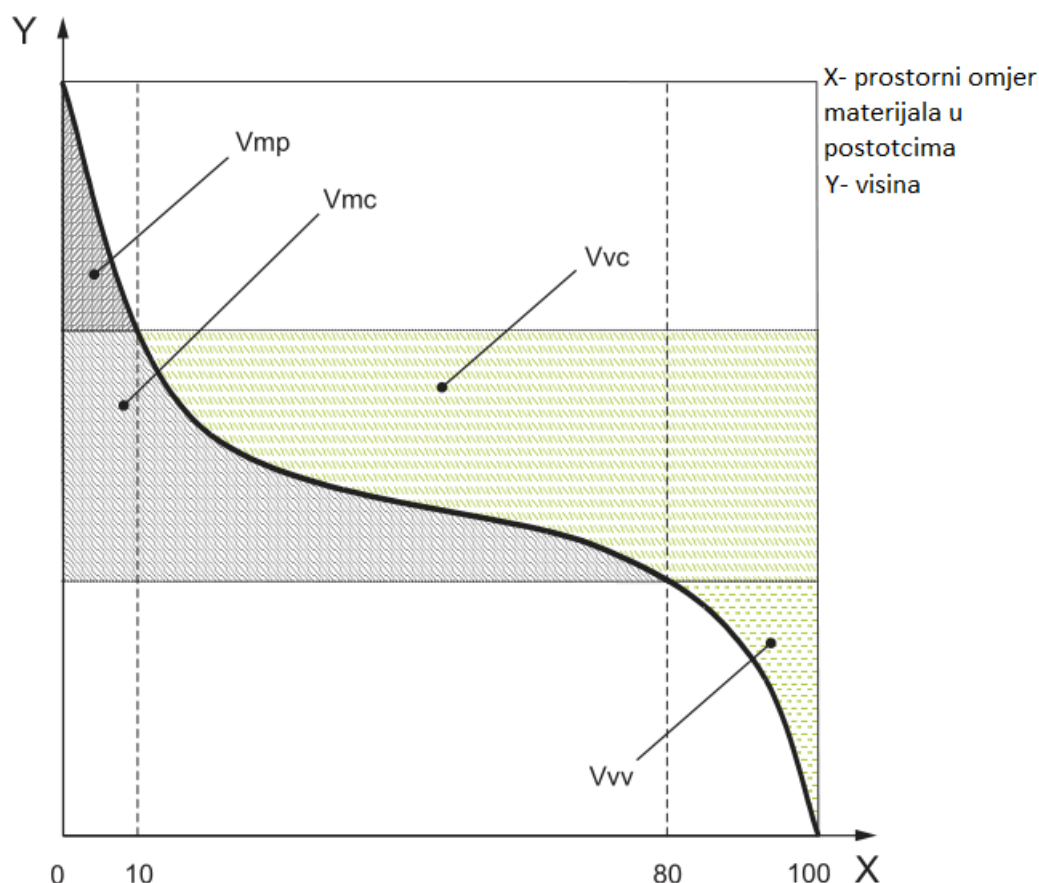
$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^p S_{mc}(q) - S_{dc}(p) dq \quad (13)$$

V_{mp} – volumen materijala vrha, predstavlja volumen materijala u omjeru površine materijala određenog p%. Zadane vrijednosti p% mogu se naći u “ISO 25178-3“.

V_{mc} – volumen materijala jezgre, predstavlja razliku između volumena q% i p% odnosa materijala. Zadane vrijednosti p% i q% mogu se naći u “ISO 25178-3“. Matematički zapis definira se kao:

$$V_{mc} = V_m(q) - V_m(p) \quad (14)$$

Iznad opisani volumeni materijala vrha (V_{mp}) i jezgre (V_{mc}), te volumeni praznina dolova (V_{vv}) i jezgre (V_{vc}) mogu se prikazati grafički u vidu lakšeg razumijevanja [Slika 11].



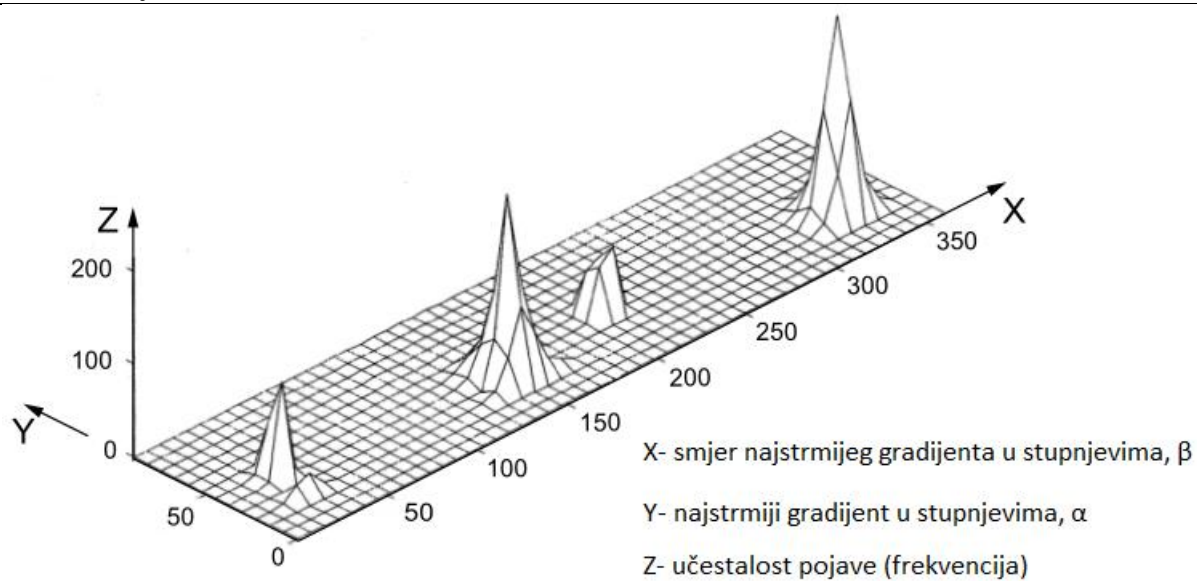
Slika 11. Parametri volumena praznina i materijala [2]

S_{xp} – razlika u visini između vrijednosti omjera materijala p% i q%. Krivulja omjera prostora i materijala koristi se za izračun ovog parametra. Predstavlja razliku u visini između prosječne visine ravnine i ostalih vrhova koji su ostali nakon uklanjanja posebno visokih vrhova [17]. Zadane vrijednosti p% i q% mogu se naći u “ISO 25178-3” [2]. Matematički zapis definira se kao:

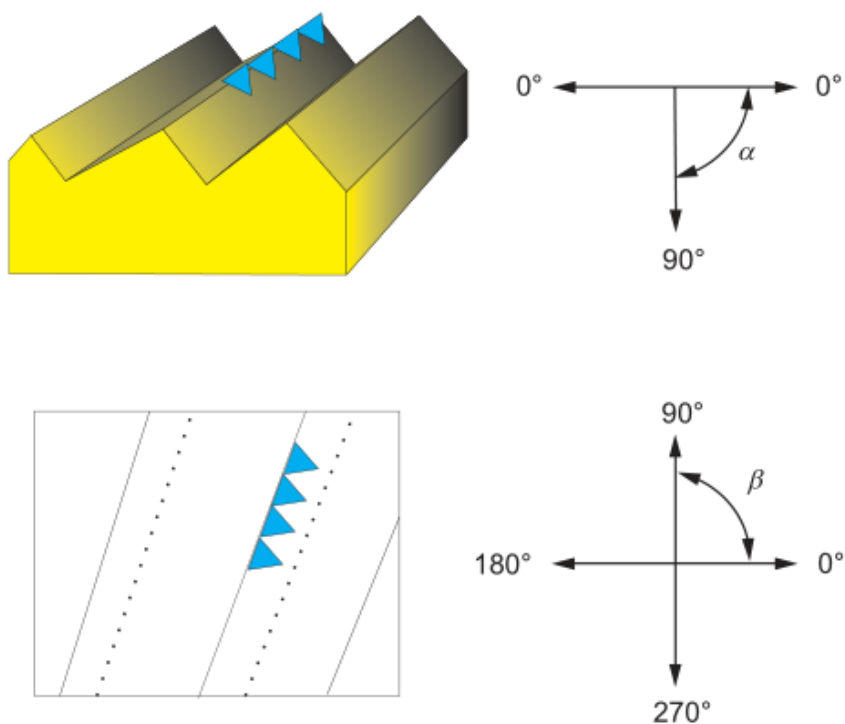
$$S_{xp} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q) \quad (15)$$

$\alpha(x,y)$ - funkcija gustoće gradijenta, prikazuje relativne frekvencije naspram kuta najstrmijeg gradijenta, i smjer najstrmijeg gradijenta (β) u smjeru suprotnom od kazaljke na satu ovisno o osi x [2]. Matematički zapisi definiraju se kao:

$$\alpha(x,y) = \arctan \sqrt{\frac{\partial z^2}{\partial y} + \frac{\partial z^2}{\partial x}} \Big|_{(x,y)} ; \beta(x,y) = \arctan \left[\frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\frac{\partial z}{\partial x}} \right] \Big|_{(x,y)} \quad (16)$$



Slika 12. Primjer funkcije gustoće gradijenta [2]

Slika 13. Najstrmiji gradijent α , i smjer najstrmijeg gradijenta β [2]

$S_{vs}(c)$ – funkcija skale volumena, najčešće se izražava u logaritamskim skalama.

$S_{rel}(c)$ – funkcija relativne površine, najčešće se izražava u logaritamskim skalama.

Duljina skale promatranja – duljina na kojoj se računaju funkcije skale volumena i relativne površine

S_{vfc} - volumen fraktalne složenosti, parametar je složenosti dobiven iz funkcije skale volumena

S_{afc} – prostorna fraktalna složenost, parametar je složenosti dobiven iz funkcije relativne površine

Skala križanja – duljinska skala promatranja na kojoj dolazi do promjene u nagibu funkcije relativne površine ili funkcije skale volumena. Potreban je postupak određivanja razmjera na kojem se promjena događa, zbog toga što promjena nagiba nije nužno nagla s obzirom na razmjer [2].

f_{SRC} – glatko-gruba skala križanja, gdje je prva skala križanja prikazana u manjim mjerilima te se čini da je površina glađa. Povećanjem mjerila vidljiva je sve grublja i hrapavija površina.

T_h – prag, vrijednost relativne površine ili volumena koji se koristi za određivanje glatko-grube skale križanja. Vrijednosti praga mogu se naći u “ISO 25178-3” [2]. Matematički zapis definira se kao:

$$T_h = 1 + (P)(F - 1) \quad (17)$$

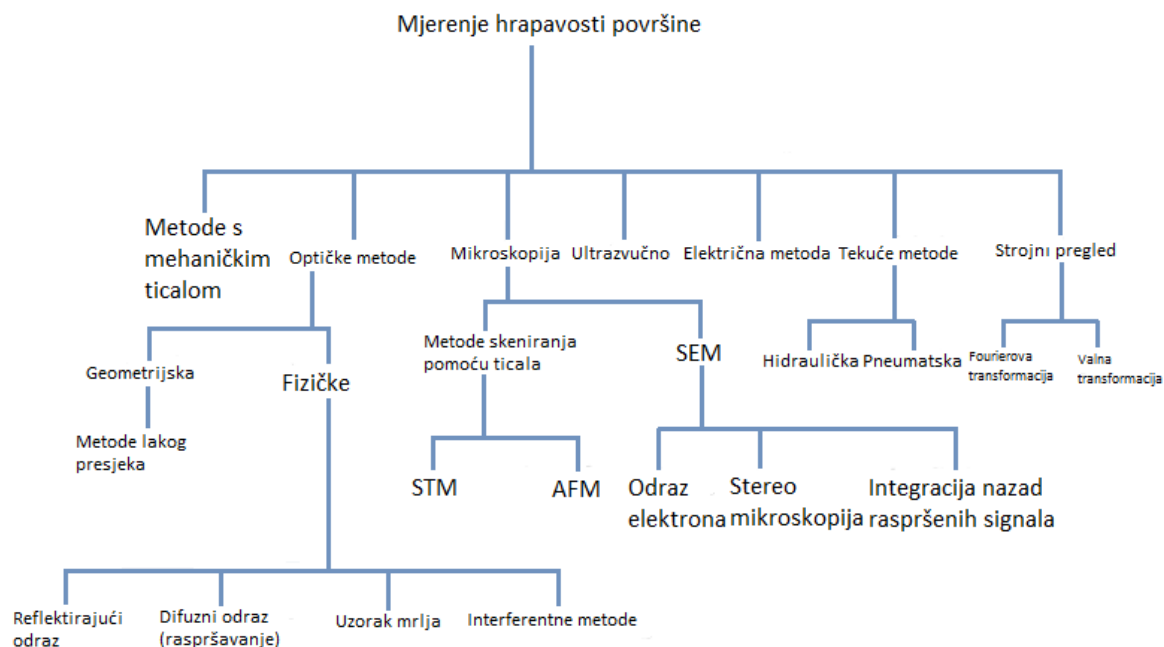
2.5. Raznovrsni parametri

S_{td} – smjer tekture, predstavlja sloj tekture površine. Kada se postavi da je $s = S_{td}$, maksimizira se apsolutna vrijednost od $f_{APS}(s - \theta)^a$. To je kut, s obzirom na određeni smjer θ , od apsolutne maksimalne vrijednosti spektra kuta.

^a Spektar snage za zadani smjer, s obzirom na određeni smjer θ u ravnini područja

3. METODE MJERENJA 3D PARAMETARA HRAPAVOSTI

Korištenje mikroskopa visoke rezolucije široko je rasprostranjeno u inženjerstvu, medicini i drugim prirodnim znanostima. Koriste se za snimanje i opisivanje površine materijala do razine atoma. Kada se površine proučavaju na dovoljno visokoj razlučivosti, moguće je utvrditi da su sve površine neravne. Kako tehnologija napreduje, sve su stroži zahtjevi za kvalitetu obrade površine, što utječe na razvoj mikroskopa koji imaju razlučivost do razine nanometra i nižih vrijednosti. Postoje ispitivanja površine elektronskim ili svjetlosnim mikroskopom, no postoje još i ispitivanja koja se temelje na električnim i toplinskim mjerenjima [18]. Metode mjerenja hrapavosti površine mogu se podijeliti na niz različitih metoda koje se granaju na njihove podskupine slikom 14.

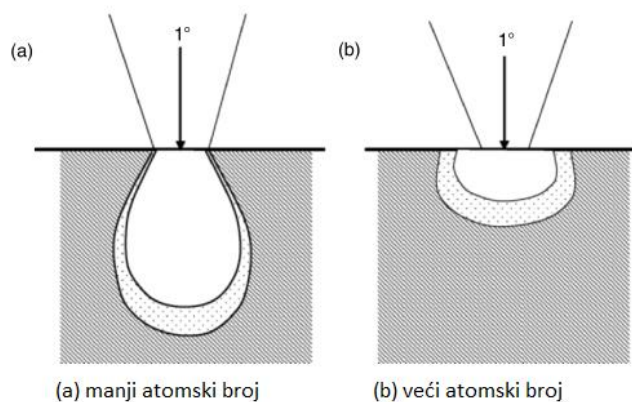


Slika 14. Raspodjela metode mjerenja hrapavosti površine [19]

3.1. SEM (engl. Scanning Electron Microscope)

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) jedan je od svestranijih instrumenata za prikaz morfološke slike mikrostrukture promatrane površine te karakterizacije i analize njenog kemijskog sastava [20]. To je vrsta elektronskog mikroskopa koji proizvodi slike uzorka skeniranjem površine snopom elektrona. Elektroni iz snopa dolaze u kontakt s atomima na površini uzorka, proizvode različite signale koji sadrže podatke o kemijskom sastavu uzorka te o topografiji površine. Ovisno o energiji snopa elektrona, moguće je da se elektron pri sudaru s površinom uzorka ne odbije odmah, nego prodire u uzorak na određenu dubinu gdje se sudara

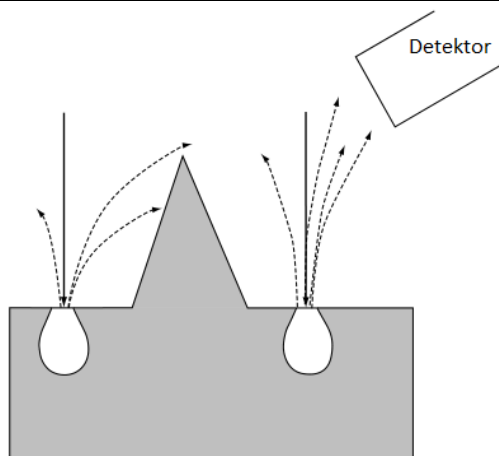
s atomom uzorka i odbija natrag. Volumen i dubina prodora povećavaju se s povećanjem energije snopa svjetlosti i manjim atomskim brojem, zbog toga što uzorci s većim atomskim brojem imaju više čestica koje mogu zaustaviti prodiranje elektrona [slika 15].



Slika 15. Utjecaj atomskog broja na prodiranje elektrona [20]

Proizvode se različite vrste signala, uključujući sekundarne elektrone (SE), odbijene ili povratno raspršene elektrone (BSE), karakteristično rendgensko zračenje i svjetlost, apsorbiranu struju i prenesene elektrone. Sekundarni elektroni uglavnom se koriste za dobivanje oblika teksture površine i njene hrapavosti. Najrašireniji signal proizveden dodiranjem elektrona sa površinom uzorka je signal sekundarne emisije elektrona [20]. Kada glavna zraka pogodi površinu uzorka, uzrokuje ionizaciju atoma uzorka, što omogućuje emitiranje slabo vezanih elektrona koji se nazivaju sekundarni elektroni. Kako imaju nisku energiju (3 eV-5 eV), mogu prodrijeti u površinu svega nekoliko nanometara i lako se detektirati u detektoru sekundarnih elektrona (*Everhart-Thornley* detektor). Da bismo uočili sekundarne elektrone, scintilator^b pretvara energiju elektrona u vidljivu svjetlost u obliku fotona. Zatim, fotoni putuju kroz svjetlosnu cijev gdje dolaze do fotomultiplikatora (PMT), koji pretvara energiju fotona natrag u elektrone. Signal koji emitira fotomultiplikator prikazuje se kao dvodimenzionalna raspodjela intenziteta koja se može vidjeti i podvrgnuti analogno-digitalnoj pretvorbi te spremi kao digitalna slika [21]. Svjetlina signala ovisi o broju sekundarnih elektrona koji dolaze do detektora. Sekundarni elektroni koji ne dopiju do detektora stvaraju sjene na slici. Slijedom navedenog moguće je zaključiti da topografska slika ovisi o tome koliko sekundarnih elektrona dopiye do detektora. Također, povoljan položaj detektora može utjecati na povećanje količine sakupljenih elektrona [slika 16].

^b Materijal koji gama zračenje pretvara u vidljivu svjetlost



Slika 16. Prikaz utjecaja položaja detektora na sakupljanje sekundarnih elektrona [20]

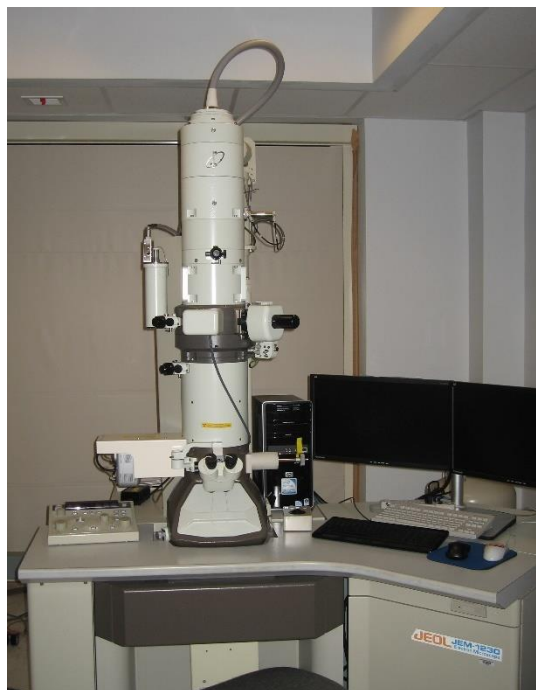
Postoji još jedna metoda stvaranja slike u SEM-u pomoću povratno raspršenih elektrona (BSE). Definiraju se kao elektroni koji su prošli kroz jednostruko ili višestruko rasipanje koje bježi od površine s velikom energijom (> 50 eV) [20]. Kod elemenata s većim atomskim brojem koji imaju više pozitivnih naboja u jezgri, više elektrona će se raspršiti što rezultira jačim povratim signalom i svjetlijom slikom. Zbog toga što ova vrsta elektrona ima veliku energiju, sprječava im da se apsorbiraju u uzorak površine. Detektori BSE najčešće su scintilatori i poluvodiči [22]. Razlučivost slike ovih elektrona znatno je manja u odnosu na sekundarne elektrone.



Slika 17. Skenirajući elektronski mikroskop [23]

3.2. TEM (engl. Transmission Electron Microscopy)

Kao i SEM, ovaj tip mikroskopa također koristi zraku snopa elektrona. Budući da je valna duljina elektrona manja od svjetlosti, razlučivost slike koje se može dobiti TEM-om veća je nego kod svjetlosnih mikroskopa [24]. Za razliku od SEM-a, elektroni prolaze kroz tanak promatrani uzorak. Zraka elektrona iz izvora koncentrira se u malu tanku zraku pomoću optičke leće. Zraka nakon što prođe leću, ima veliku brzinu i tako udara u uzorak gdje dio elektrona prođe kroz uzorak, dok se dio odbije. Elektroni koji su prošli kroz uzorak fokusiraju se objektivom i lećama u sliku. Slika koju proizvodi TEM, zvana mikrograf, vidi se kroz projekciju na fosforescentni ekran [25]. Kamera koja je smještena ispod ekrana služi za stvaranje digitalne slike ili snimke. Ova vrsta mikroskopa može nam dati informacije o obliku, strukturi i kemijskom sastavu, pa je zbog toga primjena ove vrste mikroskopa rasprostranjena od medicinskih grana gdje se koristi za istraživanje bakterija i virusa, do forenzike i znanosti o materijalima. Priprema uzoraka traje duže, zbog toga što se zahtijevaju vrlo tanki poluprozirni uzorci kroz koje elektroni mogu proći. Također, potreban je vakuumski sustav koji je neophodan kako bi se osiguralo da ne dođe do sudaranja elektrona s atomima plina. Iako je za elektronske mikroskope potreba specijalizirana obuka, korištenje TEM-om nije napredno i moguće je lako rukovanje.



Slika 18. TEM uređaj [26]

3.3. Profilometrija

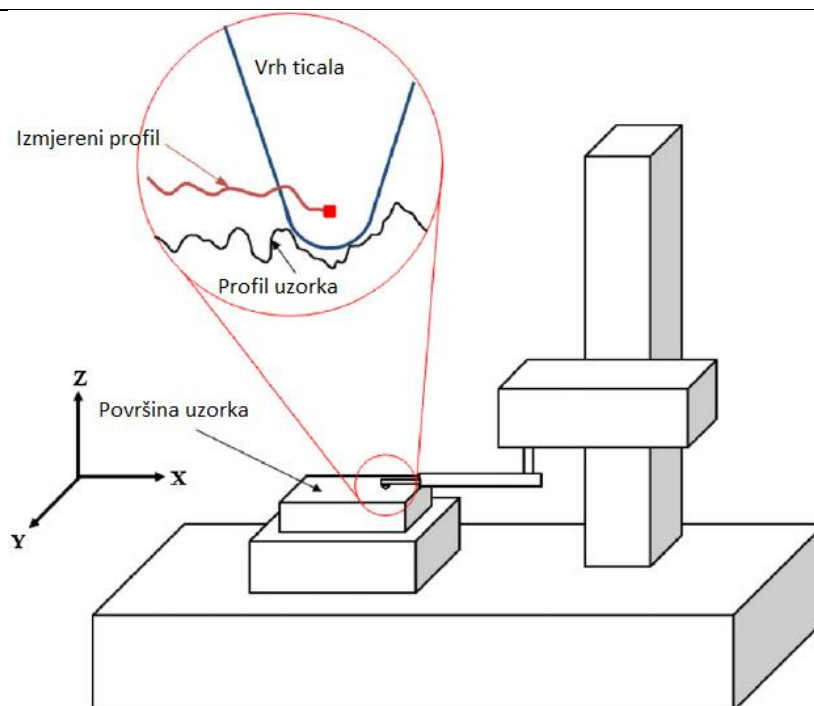
Profilometar je mjerni instrument koji se koristi za mjerenje površina kako bi se utvrdila njena hrapavost. U početku je postojala samo jedna vrsta profilometrije koja je koristila metalno ticalo pomoću kojeg se mjerila hrapavost površine i ta metoda se naziva kontaktna profilometrija. Razvojem tehnologije došlo je i do razvoja optičke beskontaktna profilometrije gdje svjetlosna ili laserska zraka skeniraju uzorak površine bez izravnog dodira.



Slika 19. Optički profilometar [27]

3.3.1. Kontaktna profilometrija

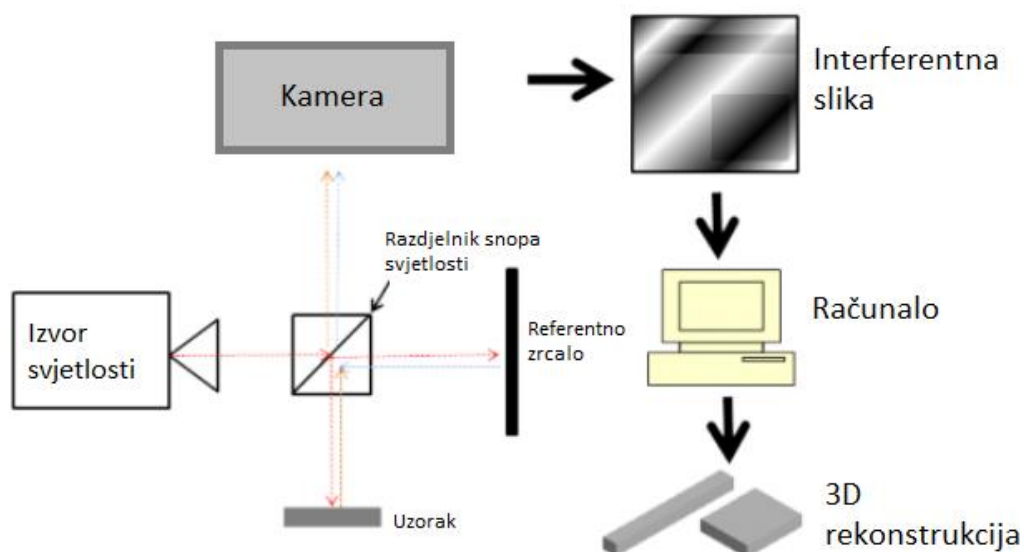
Kod ove vrste profilometrije ticalo se u dodiru s uzorkom pomiče okomito kako bi se dobila visina površine. Postupak se odvija mehanički pomoću povratne petlje koja nadzire silu iz uzorka koja gura ticalo prema gore, i na taj način dobiva informacije o hrapavosti površine [28]. Iako je ova vrsta mjerenja hrapavosti površine jako osjetljiva, osjetljiva je i na mekane površine zbog toga što ticalo može deformirati površinu i tako oštetiti promatrani uzorak [28]. Kako se ticalo giba po sve tri osi, može se zaključiti da je ova kontaktna metoda sporija od beskontaktna. U obzir se mora uzeti veličina i vrh ticala jer mogu utjecati na mjerenje i ograničiti bočnu rezoluciju [29].



Slika 20. Shematski prikaz kontaktne profilometrije [28]

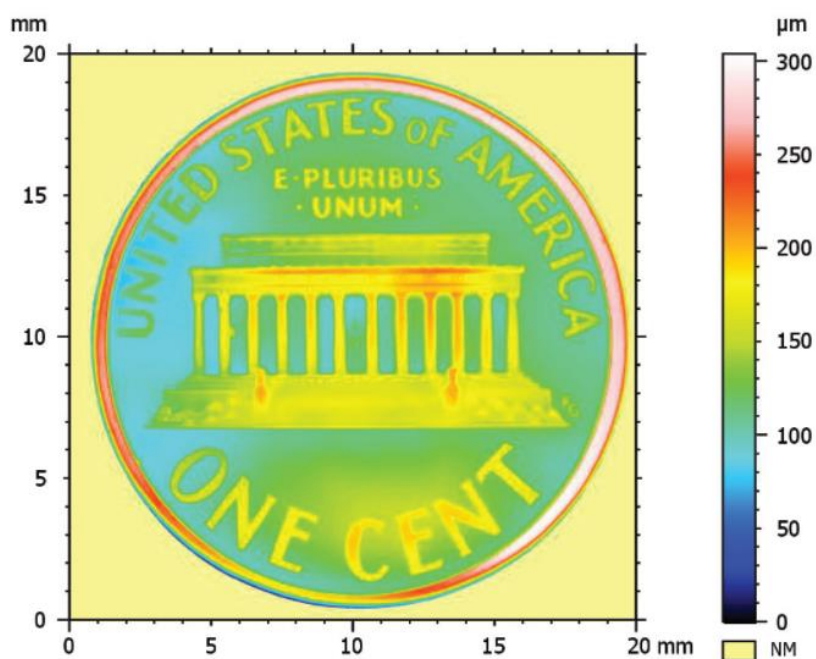
3.3.2. Optička profilometrija

Ova vrsta profilometrije moderno je rješenje kako bi se povećala točnost u odnosu na kontaktnu metodu. Umjesto ticala koji se kreće po površini, koristi se valna duljina svjetlosti i tako se dobiva slika oblika površine. Mjerenje oblika površine temelji se na tehnici zvanoj interferometrija bijelog svjetla [30]. Snop svjetlosti pogađa razdjelnik snopa koji ga dijeli na dva snopa. Referentni snop reflektira se od referentne ravnine zrcala, dok se mjerni snop svjetlosti odbija na promatrani uzorak. Kad je udaljenost razdjelnika snopa do referentne ravnine zrcala i promatrane površine uzorka jednaka, zrake se kombiniraju, i takve ulaze u kameru koja očitava razliku između valnih duljina tih dviju zraka.



Slika 21. Shematski prikaz optičke profilometrije [31]

Razlika u valnim duljinama daje nam crno-bijelu sliku koja odgovara obliku površine promatranog uzorka koje računalo pretvara u 3D sliku promatranog uzorka. Primjer površine dobivene primjenom optičke profilometrije dan je slikom u nastavku [slika 21].



Slika 22. Prikaz oblika površine novčića i amplitudnih parametara [32]

3.4. AFM (enlg. Atomic Force Microscope)

Mikroskopija atomskih sila tehnika je koja se koristi za snimanje lokalnih površinskih karakteristika s velikom rezolucijom i preciznošću [33]. Omogućava dobivanje slika koje imaju rezoluciju toliko visoku da prikazuju raspored pojedinih atoma u promatranom uzorku. To je vrsta nerazorne analitičke metode koja se može koristiti u zraku, tekućini i vakuumu [34]. U inženjerstvu materijala i ostalim bliskim poljima, koristi se za dobivanje 3D informacija o obliku površine. Velika prednost je ta što se gotovo svaki uzorak može snimiti, bilo da je to jako tvrdi materijal poput keramike, ili jako mekani poput ljudskih stanica. Osim toga što se koristi kao mikroskop, postoje i drugi spektroskopski načini koji mjere druga svojstva uzorka na nanometarskoj skali [35]. Zbog toga se koristi u svim područjima znanosti, kao što su biologija, kemija, fizika, znanost o materijalima, nanotehnologija i astronomija. Mikroskop atomskih sila (AFM) poprilično se razlikuje od ostalih mikroskopa jer ne stvara sliku fokusiranjem svjetlosti ili elektrona na površinu, već fizički ocrta površinu uzorka oštrom ticalom, stvarajući topografsku sliku površine uzorka.



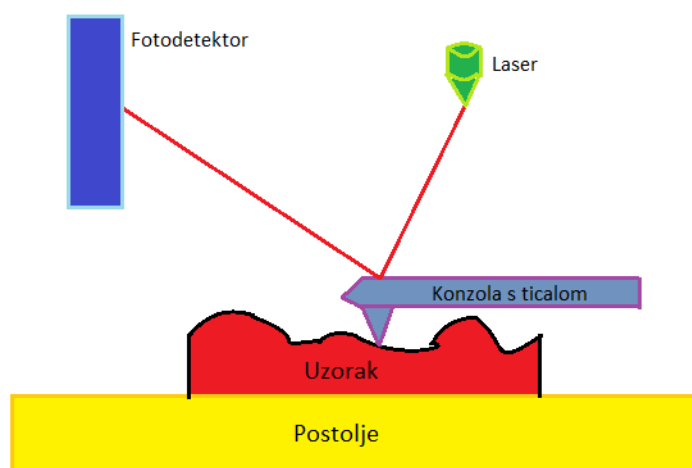
Slika 23. Mikroskop atomskih sila [36]

3.4.1. Način rada

Kako bi se izmjerila površina uzorka, koristi se konzola koja na svom vrhu ima ticalo s oštrim vrhom. Kako se vrh ticala približava površini, privlačne Van derWaalsove sile između vrha ticala i promatrane površine privlače konzolu prema površini uzorka [33]. Kada vrh ticala dođe u kontakt s površinom uzorka, stvaraju se odbojne van derWaalsove sile koje odbijaju konzolu u suprotnom smjeru. Ova odstupanja konzole, od ili prema površini uzorka detektiraju se laserskim snopom. Laserski snop udara u vrh konzole i odražava se na fotodetektor. Otklon konzole bilježi fotodetektor koji se koristi za praćenje položaja laserske točke na detektoru i kutnih otklona konzole [33]. Konzola s ticalom koristi se zbog svoje prikladnosti mjerenja topografske površine uzorka. Vrh ticala i dijelovi konzole najčešće su napravljeni od silicija ili silicijevog nitrida [33]. Vrh, pri kontinuiranim mjerenjima može postati tup što smanjuje kvalitetu slike, a također može doći i do oštećenja površine promatranog uzorka. AFM je najčešće opremljen za rad u tri različita načina, a to su:

- kontaktna metoda
- beskontaktna metoda
- isprekidani način rada (engl. *Tapping method*)

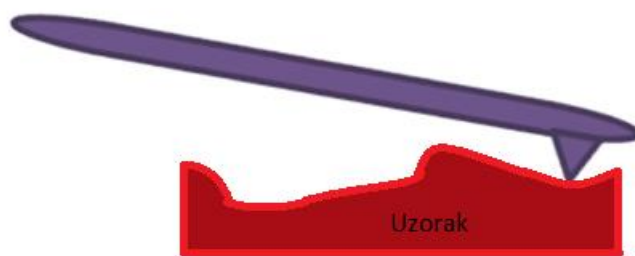
Ove tri vrste načina rada međusobno se razlikuju ovisno o interakciji između vrha ticala i uzorka površine.



Slika 24. Shematski prikaz rada mikroskopa atomskih sila (AFM)

3.4.1.1. Kontaktna metoda

Stalan kontakt između vrha ticala i površine uzorka najjednostavniji je način snimanja. Ovaj način poželjan je kada površina uzorka nije znatno tvrđa od vrha ticala [33]. Kada se vrh približava površini, dolazi do stvaranja privlačne sile gdje vrh postaje nestabilan i dolazi u kontakt s površinom uzorka. Kako vrh ticala putuje po površini, interakcija se mijenja u odbojni režim, što znači da vrh ticala stvara silu na uzorak, i uzorak stvara suprotnu silu na vrh [35]. Sustav ima povratnu petlju koja kontinuirano podešava visinu konzole kako bi se održala konstantna sila između vrha ticala i uzorka [34]. Zbog toga što postoji dodir s površinom uzorka, ovaj način može se koristiti i za mjerenje koeficijenta trenja površine. Ovaj način ujedno je i najbrži, jer progib konzole izravno daje sliku topografije uzorka. Kontaktna metoda preferira se za površine s umjerenom hrapavošću, jer se pri jako hrapavim površinama mogu pojaviti bočne sile kod strmih rubova koje uvelike utječu na trošenje ticala i smanjuju kvalitetu slike. Glavni nedostatak kontaktne metode je stvaranje većih kontaktnih sila tijekom skeniranja, što može dovesti do prekomjernog savijanja, te do oštećenja površine uzorka i ticala.



Slika 25. Shematski prikaz kontaktne metode AFM [33]

3.4.1.2. Beskontaktna metoda

U beskontaktnoj metodi konzola i površina uzorka ne dolaze međusobno u kontakt, već se drže na udaljenosti od 0,1 nm-10 nm [33]. Konzola s vrhom ticala oscilira iznad površine uzorka s malom amplitudom. Kad se oscilirajući vrh ticala približi površini uzorka, dolazi do promjene oscilacije zbog interakcije vrha ticala i polja sile od uzorka. Privlačne van derWaalsove sile prigušuju oscilaciju konzole, što utječe na smanjenje rezonantne frekvencije i amplitude vibracije [35]. Oscilacija se prati putem optičke poluge, a skener podešava visinu po osi z putem povratne petlje kako bi se konzola održala na fiksnoj udaljenosti, kao i kod kontakne metode. Određeni materijali moraju biti u svom radnom okruženju kako bi se odredila neka svojstva, a

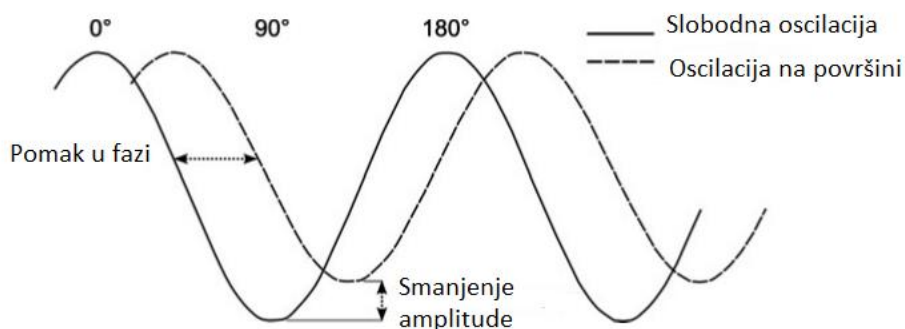
beskontaktna metoda ima mogućnost skeniranja uzoraka u raznim okruženjima. Zbog toga, ova metoda omogućava mjerenje površine kod kojih snimanje elektronskim mikroskopom nije bilo moguće. Ovom metodom ne može se naštetiti površini uzorka zbog toga što nema kontakta između ticala i uzorka, no to je ujedno i razlog zašto nema toliko visoku razlučivost.



Slika 26. Shematski prikaz beskontaktna metode AFM [37]

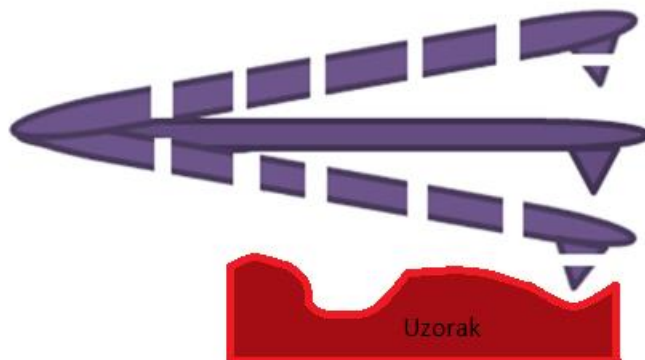
3.4.1.3. Isprekidani način rada (engl. Tapping method)

Iako su u počecima razvoja AFM-a znanstvenici imali cilj razvoja beskontaktna metode, nije prošlo dugo prije otkrivanja prednosti korištenja dinamičkog načina koji dopušta vrhu ticala kontakt s površinom uzorka. Ova metoda razvijena je za prevladavanje problema kod kontaktne metode, poput adhezije, trenja i bočnih sila. Bočne sile koje mogu uzrokovati velike probleme kod kontaktne metode ne utječu na ovu metodu zbog toga što se vrh pomiče okomito na površinu pri skeniranju. Prije nego što se konzola dovede blizu površine uzorka, ona oscilira na frekvenciji malo ispod svoje rezonancije [35]. Amplituda se smanjuje kada dolazi u kontakt s površinom uzorka, i na taj način pomoću amplitudnog signala koji služi za praćenje razlike u visini površina dobiva se slika visine površine [slika 27].



Slika 27. Utjecaj promjene amplitude pri kontaktu ticala i površine uzorka [35]

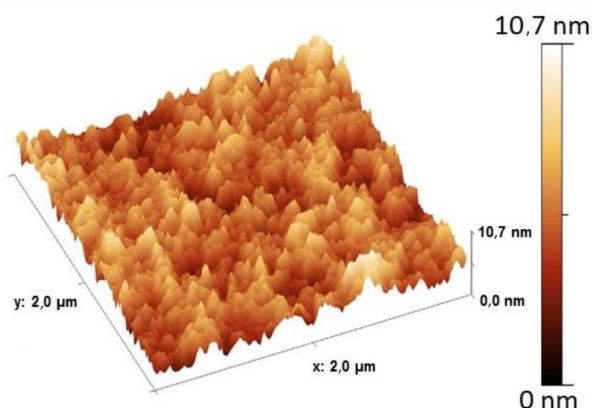
Za to vrijeme, povratna petlja prilagođava oscilaciju amplitude kako bi se vratila zadana vrijednost amplitude i dalje nastavilo snimanje [38]. Iako kod ove metode sile na površinu uzorka mogu biti znatno veće nego kod kontaktne metode, ne dolazi do intenzivnog trošenja vrha ticala i površine jer sile djeluju u jako kratkom vremenu na površinu. Osim u zraku, ova metoda može se koristiti i u vodi. Jedini nedostaci ove metode u usporedbi s kontaktnom metodom su ti što su brzine skeniranja sporije, i korištenje AFM-a je složenije.



Slika 28. Shematski prikaz isprekidanog načina rada AFM [33]

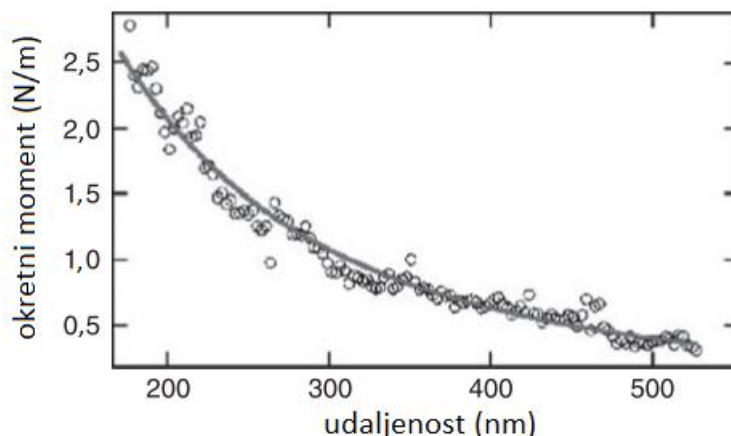
3.4.2. Karakterizacija materijala

AFM se najčešće koristi u mjerenju svojstava kao što je hrapavost površine, no raznolikost primjene je mnogo veća. Karakterizacija topografije površine bitna je za razvoj određenih konstrukcijskih dijelova u kojima su trenje, podmazivanje i trošenje važna svojstva [33].



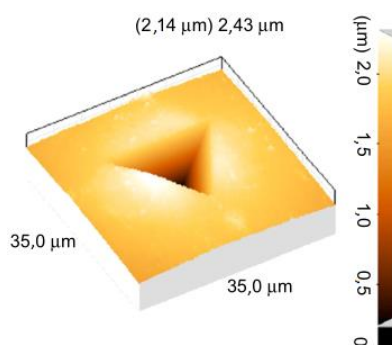
Slika 29. Prikaz slike hrapavosti površine pomoću AFM-a [39]

Na nanorazini karakterizacija materijala može dati potpuno razumijevanje ponašanja materijala u raznim okolnostima, pošto se svojstva nanočestica od kojega se materijal sastoji znatno razlikuju od svojstava samog materijala [35]. Kombinacija visoke rezolucije, 3D informacija koje se dobivaju, te mjerenje lokalnih svojstava uvjetuju da se AFM smatra jednim od najvažnijih alata u nanotehnologiji.



Slika 30. Ispitivanje krutosti savijanja ugljikovih nanocijevi [35]

Svojstva površina materijala koja se nalaze u eksploataciji se mijenjaju. Značajke poput ogrebotina, udubljenja i korozije utječu na konačna svojstva materijala, te na sigurnost samih konstrukcija. Pri umoru materijala dolazi do stvaranja plastičnih deformacija na površini materijala koje uvjetuju stvaranju pukotina [slika 31]. Mjerenjem stanja površine može se zaključiti o konačnom vijeku trajanja promatranog elementa, te na vrijeme postupiti promjenom istoga.



Slika 31. 3D slika pukotine nastale pri zamoru [33]

3.4.3. Priprema uzorka

Najčešće, priprema uzoraka za AFM je jednostavna. Nema potrebe za premazivanjem uzorka, električnog uzemljivanja i bojanja. Neki uzorci poput tankih filmova ni ne zahtijevaju pripremu uzoraka [35]. Ostali uzorci, poput ljudskih stanica ili nanočestica su osjetljiviji te se treba obratiti posebna pažnja kako bi se dobili najbolji rezultati mjerenja. Pravila za pripremu uzoraka kod AFM mogu se sažeti na iduće korake [35]:

- Uzorak mora biti fiksiran na površinu. Pošto je AFM površinska tehnika, uzorci zahtijevaju neku vrstu podloge. Ako materijal nije dobro fiksiran, može doći do pomicanja uzorka kako vrh ticala dolazi u kontakt s površinom. Ova vrsta struganja i nošenja uzorka uobičajena je kod kontaktne metode i može nanijeti jake bočne sile koje dovode do oštećenja uzorka.
- Uzorak mora biti čist. Onečišćenje u obliku čestica otežavaju prepoznavanje temeljne strukture površine uzorka. Slojeve soli izuzetno je teško raspoznati okom, a u potpunosti utječe na snimanje uzorka [35]. Većina uzoraka obložena su kontaminacijskim slojem koji je tanak, što najčešće ne utječe na sliku uzorka. Svako onečišćenje bit će prikazano zajedno s uzorkom zbog načina rada AFM-a, tako da je važno uklanjanje što više onečišćenja
- Pošto je AFM tehnika visoke rezolucije, a većina instrumenata dizajnirana za male uzorke, značajke na uzorku moraju biti dovoljno male kako bi se skenirale. Naprotiv, postoje posebni instrumenti i za veće uzorke, ali su obično usmjereni za industrijske primjene i visoke su cijene [35].

Može se zaključiti da priprema površine uzoraka nije zahtjevna te ne oduzima mnogo vremena, i smatra se jednom od prednosti AFM-a.

4. MJERENJE HRAPAVOSTI

Mjerenje hrapavosti provedeno je mikroskopom atomskih sila (AFM) proizvođača Oxford Instruments, modelom MFP 3D Origin. Navedeni uređaj spojen je s računalom kojemu šalje informacije o površini i crno bijele slike mjerene površine.



Slika 32. MFP 3D Origin model mikroskopa atomskih sila [40]

4.1. Hrapavosti različitih površina

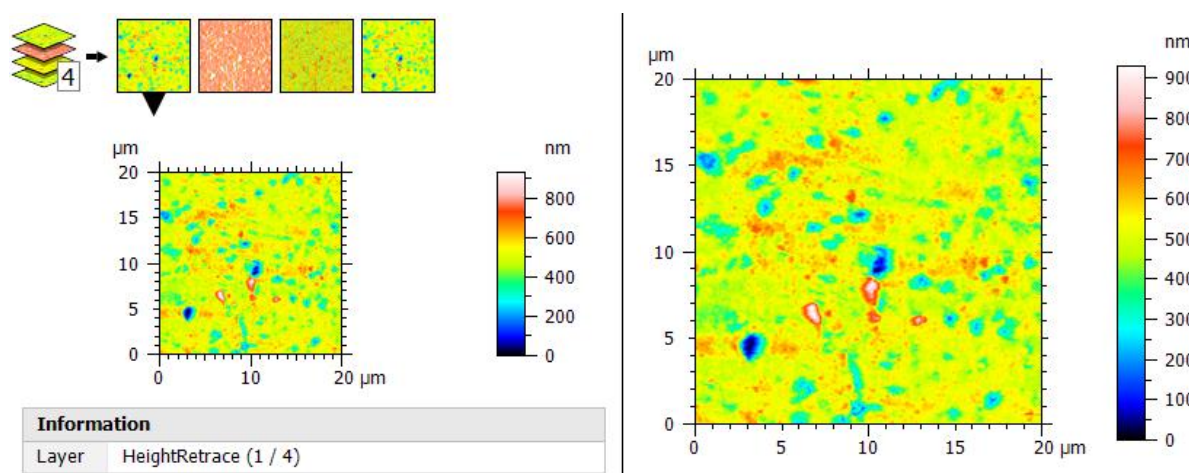
Mjerenje hrapavosti provedeno je na 5 uzoraka (dimenzija $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$). Od promatranih uzoraka tri su etaloni, i dva su aluminijski uzorci. Prije mjerenja potrebno je očistiti promatrani uzorak, fiksirati ga na ispitno postolje, te provesti ispitivanje. Slike na kojima su prikazane površine i tablice s parametrima dobivene su programom MountainsLab Premium – trial verzija, koji se koristi za analizu površina i parametara slika profilometara i mikroskopa [41].

4.2. Uzorci etalona

U ovom poglavlju bit će opisane hrapavosti površine i parametri tri uzorka koja su bila ispitivanja i izmjerena mikroskopom atomskih sila.

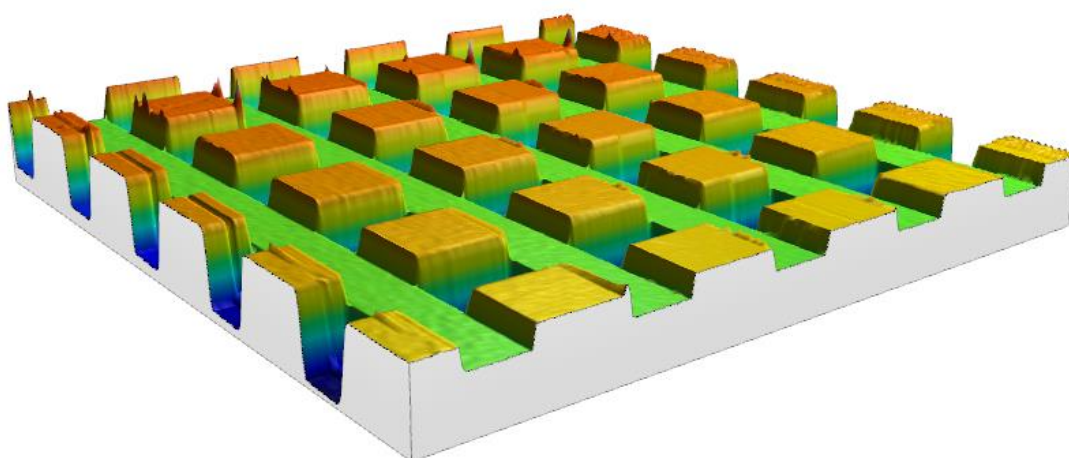
4.2.1. Uzorak 1

Rezultati mjerenja *Uzorka 1* u nastavku prikazani su u 2D [slika 33] i 3D obliku [slika 34].



Slika 33. 2D prikaz profila površine *Uzorka 1*

Kod 3D prikaza ispitivanog uzorka može se uočiti ponavljajući uzorak kvadratnih oblika. Pregledom skale boja vidljivo je da se radi o površini s izbočenim kvadratnim strukturama na istoj razini koje opisuje žuta boja. [slika 34].

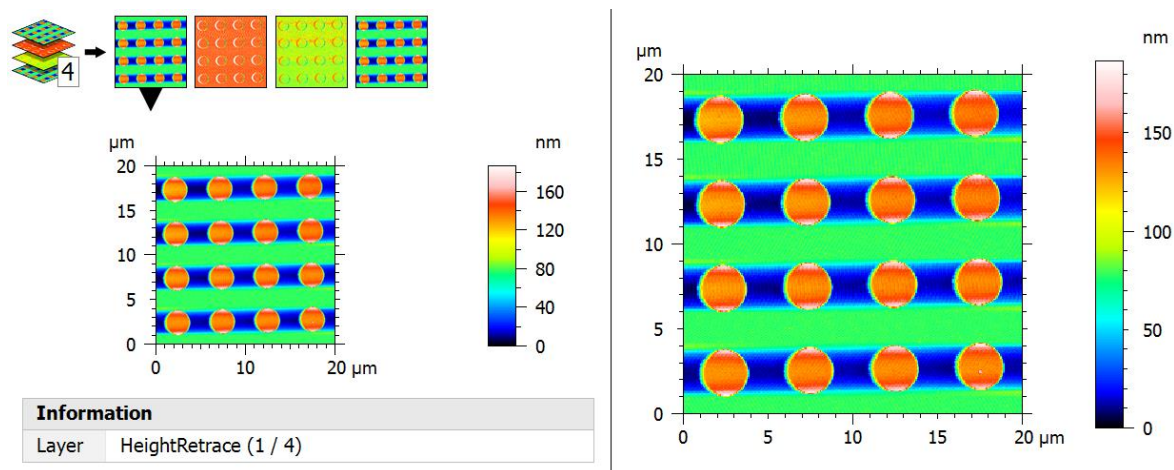


Slika 34. 3D prikaz profila površine *Uzorka 1*

S obzirom na činjenicu da je ispitivani uzorak etalon, na slici se očekuje jednolika tekstura površine. Ipak, na slici se mogu uočiti izbočenja oštih vrhova koja se nalaze na krajevima kvadratnih oblika, te se ne mogu pripisati stvarnom stanju površine etalona. Ovakva zapažanja mogu biti posljedica različitih utjecajnih parametara u procesu snimanja i kasnije analize slike.

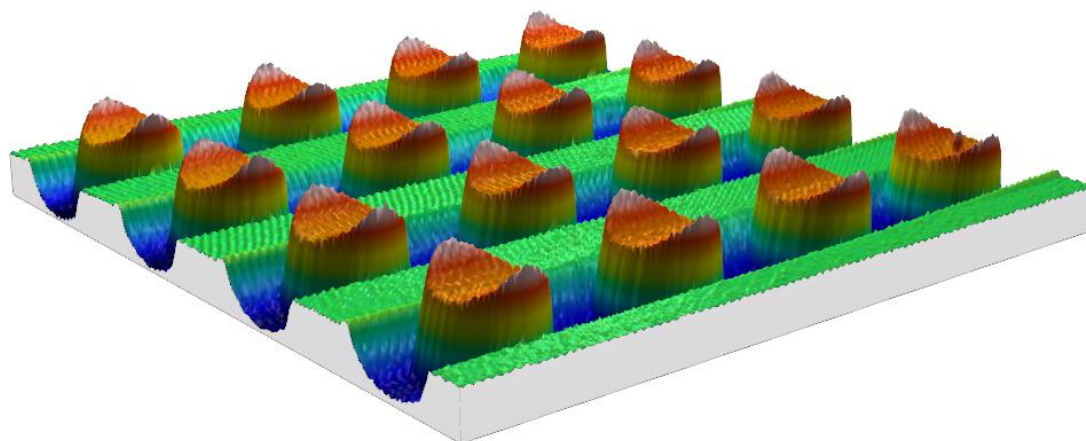
4.2.2. Uzorak 2

Rezultati mjerenja *Uzorka 2* u nastavku prikazani su u 2D [slika 35] i 3D obliku [slika 36].



Slika 35. 2D prikaz profila površine *Uzorka 2*

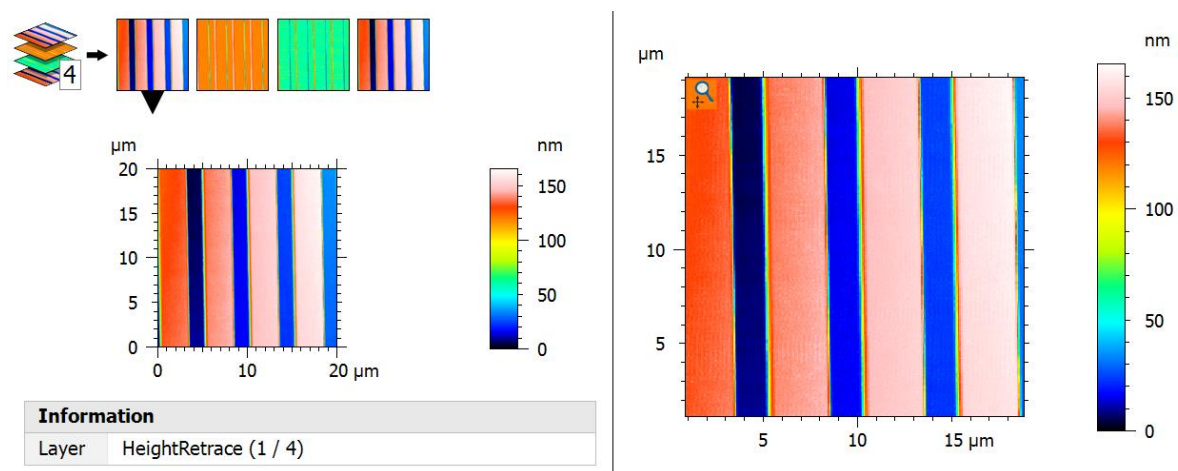
Kod 2D i 3D prikaza ispitivanog uzorka može se uočiti ponavljajući uzorak kružnih oblika. Pregledom skale boja vidljivo je da su kružni oblici crvene boje izbočeni u odnosu na najnižu plavu razinu.



Slika 36. 3D prikaz profila površine *Uzorka 2*

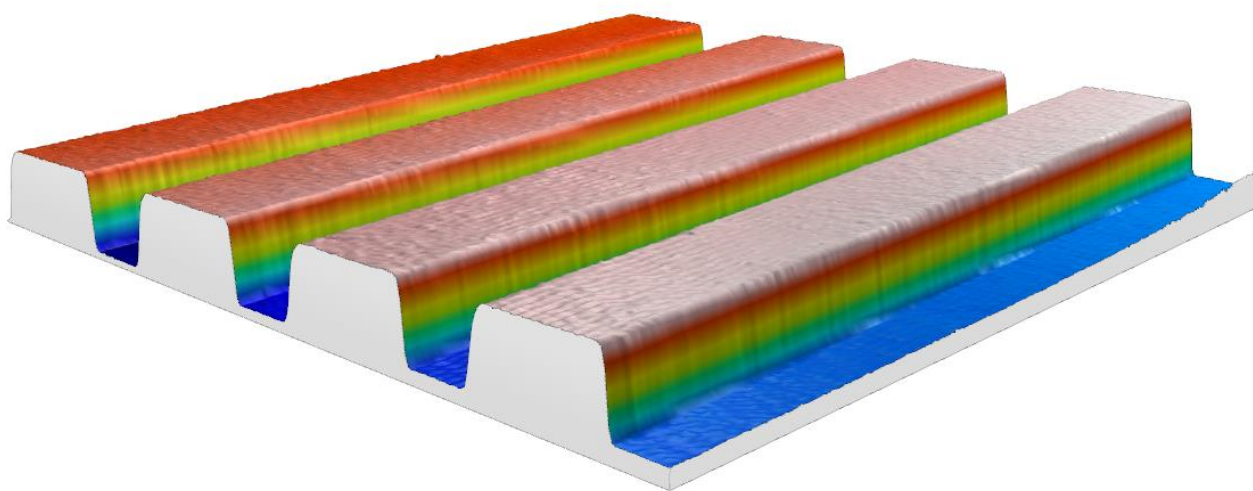
4.2.3. Uzorak 3

Rezultati mjerenja *Uzorka 3* u nastavku prikazani su u 2D [slika 37] i 3D obliku [slika 38].



Slika 37. 2D prikaz profila površine *Uzorka 3*

U slučaju analize *Uzorka 3*, također je uočen ponavljajući uzorak koji je pravokutnih oblika. Pregledom skale boja može se zaključiti da su pravokutni oblici koji su crveno ružičaste boje izbočeni u odnosu na najnižu plavu razinu.



Slika 38. 3D prikaz profila površine *Uzorka 3*

4.2.4. Usporedba parametara etalona

Iz Tablice 1. moguće je vidjeti parametre prethodno opisanih uzoraka etalona. U nastavku će biti opisani i uspoređeni amplitudni parametri navedenih uzoraka.

Tablica 1. Parametri topografije površine Uzorka 1, Uzorka 2 i Uzorka 3

ISO 25178 - Primary surface				ISO 25178 - Primary surface				ISO 25178 - Primary surface			
F: None				F: None				F: None			
S-filter (λs): None				S-filter (λs): None				S-filter (λs): None			
Height parameters				Height parameters				Height parameters			
Sq	44.17	nm		Sq	40.63	nm		Sq	58.57	nm	
Ssk	-0.5511			Ssk	0.2517			Ssk	-0.5745		
Sku	2.243			Sku	2.442			Sku	1.511		
Sp	114.5	nm		Sp	108.8	nm		Sp	65.42	nm	
Sv	94.37	nm		Sv	77.79	nm		Sv	100.0	nm	
Sz	208.9	nm		Sz	186.6	nm		Sz	165.5	nm	
Sa	32.74	nm		Sa	29.19	nm		Sa	54.58	nm	
Functional parameters				Functional parameters				Functional parameters			
Smr	100.0	%		Smr	100.0	%		Smr	100.0	%	
Smc	53.26	nm		Smc	60.25	nm		Smc	56.18	nm	
Sxp	85.18	nm		Sxp	66.05	nm		Sxp	127.3	nm	
Spatial parameters				Spatial parameters				Spatial parameters			
Sal	1.955	μm		Sal	0.9545	μm		Sal	0.9514	μm	
Str	*****			Str	0.4892			Str	*****		
Std	89.98	°		Std	22.25	°		Std	91.49	°	
Hybrid parameters				Hybrid parameters				Hybrid parameters			
Sdq	0.07818			Sdq	0.1649			Sdq	0.1572		
Sdr	0.3001	%		Sdr	1.231	%		Sdr	1.128	%	
Functional parameters (Volume)				Functional parameters (Volume)				Functional parameters (Volume)			
Vm	0.0003985	μm ³ /μm ²		Vm	0.001167	μm ³ /μm ²		Vm	0.0002669	μm ³ /μm ²	
Vv	0.05366	μm ³ /μm ²		Vv	0.06142	μm ³ /μm ²		Vv	0.05645	μm ³ /μm ²	
Vmp	0.0003985	μm ³ /μm ²		Vmp	0.001167	μm ³ /μm ²		Vmp	0.0002669	μm ³ /μm ²	
Vmc	0.06307	μm ³ /μm ²		Vmc	0.04295	μm ³ /μm ²		Vmc	0.0779	μm ³ /μm ²	
Vvc	0.05107	μm ³ /μm ²		Vvc	0.05805	μm ³ /μm ²		Vvc	0.0544	μm ³ /μm ²	
Vvv	0.002585	μm ³ /μm ²		Vvv	0.00337	μm ³ /μm ²		Vvv	0.002054	μm ³ /μm ²	
Functional parameters (Stratified surfaces)				Functional parameters (Stratified surfaces)				Functional parameters (Stratified surfaces)			
Sk	6.537	nm		Sk	14.90	nm		Sk	55.45	nm	
Spk	83.62	nm		Spk	103.9	nm		Spk	1.905	nm	
Svk	127.5	nm		Svk	75.49	nm		Svk	158.9	nm	
Smr1	35.77	%		Smr1	24.20	%		Smr1	1.117	%	
Smr2	75.62	%		Smr2	69.19	%		Smr2	62.88	%	
Spq	7.780			Spq	*****			Spq	*****		
Svq	43.02			Svq	*****			Svq	*****		
Smq	11.82			Smq	*****			Smq	*****		
Uzorak 1				Uzorak 2				Uzorak 3			

Iz Tablice 1 može se vidjeti da *Uzorak 3* ima najveću srednju kvadratnu vrijednost odstupanja profila (S_q) zbog konstantnih naglih razlika u visini koje se ravnomjerno nastavljaju po površini uzorka, dok *Uzorak 1* i *Uzorak 2* imaju manju vrijednost parametra srednje kvadratne vrijednosti odstupanja.

Iz parametra asimetričnosti raspodjele visine (S_{sk}) vidljivo je da *Uzorak 1* i *Uzorak 3* imaju negativnu vrijednost, što znači da je odstupanje na gornju stranu, dok *Uzorak 2* ima pozitivnu vrijednost, što znači da je odstupanje na donju stranu. To se može vidjeti i iz 3D prikaza navedenih uzoraka. Težnja iznosa ovog parametra je nula, što znači da se razlika u visini raspoređuje podjednako.

Iz parametra koji mjeri oštrinu hrapavosti površine (S_{ku}) vidljivo je da *Uzorak 1* i *Uzorak 2* imaju veću oštrinu profila hrapavosti, dok *Uzorak 3* ima manju.

Iz parametra koji opisuje najveću vrijednost visine vrha promatrane površine (S_p) *Uzorak 1* ima najveću vrijednost zbog sitnih vrhova koji se mogu vidjeti na 3D prikazu. Za očekivati je da bi *Uzorak 2* imao najveću visinu vrha ukoliko kod *Uzoraka 1* ne bi bilo oštih vrhova koji utječu na iznos parametara S_p . *Uzorak 3* ima manju vrijednost visine vrha u odnosu na ostala dva uzorka.

Iz parametra koji opisuje maksimalnu dubinu dola (S_v) može se vidjeti da su *Uzorak 1* i *Uzorak 3* po vrijednostima blizu, no najveću dubinu dola ipak ima *Uzorak 3*. *Uzorak 2* u usporedbi sa ostala dva uzorka i manju maksimalnu dubinu dola.

Iz parametra koji koristi sumu najvišeg vrha i najdubljeg dola, i opisuje najveću visinu između neravnina (S_z), moguće je zaključiti iz prethodno opisana dva parametra da *Uzorak 1* ima najveću vrijednost sume najvišeg vrha i najdubljeg dola, te i na ovaj parametar utječu vrhovi koji su vidljivi na 3D prikazu *Uzorka 1*. Nakon njega po iznosu je *Uzorak 2*, i najmanju vrijednost ovog parametra ima *Uzorak 3*.

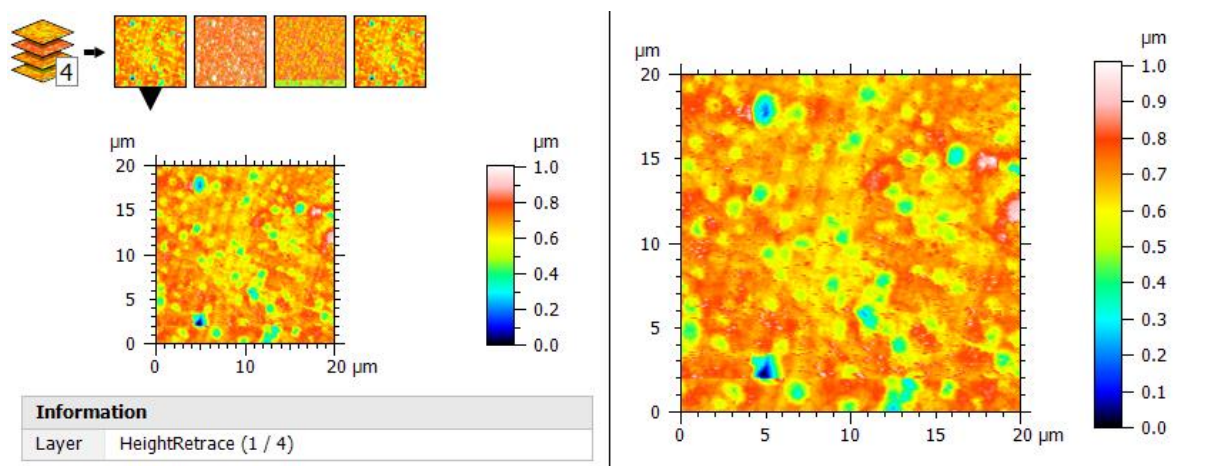
Iz parametra koji predstavlja razliku u visini svake točke u odnosu na aritmetičku sredinu površine (S_a) vidljivo je čak i sa 3D prikaza sva tri uzorka da najveću vrijednost ovog parametra ima *Uzorak 3*, zbog toga što ima najveći povišeni volumen površine. *Uzorak 1* i *Uzorak 2* su podjednaki, no ipak *Uzorak 1* ima nešto veću vrijednost ovog parametra.

4.3. Uzorci aluminija

U ovom poglavlju bit će opisane hrapavosti površine i parametri dvaju uzorka aluminija. Ispitivanje se također izvodilo mikroskopom atomskih sila.

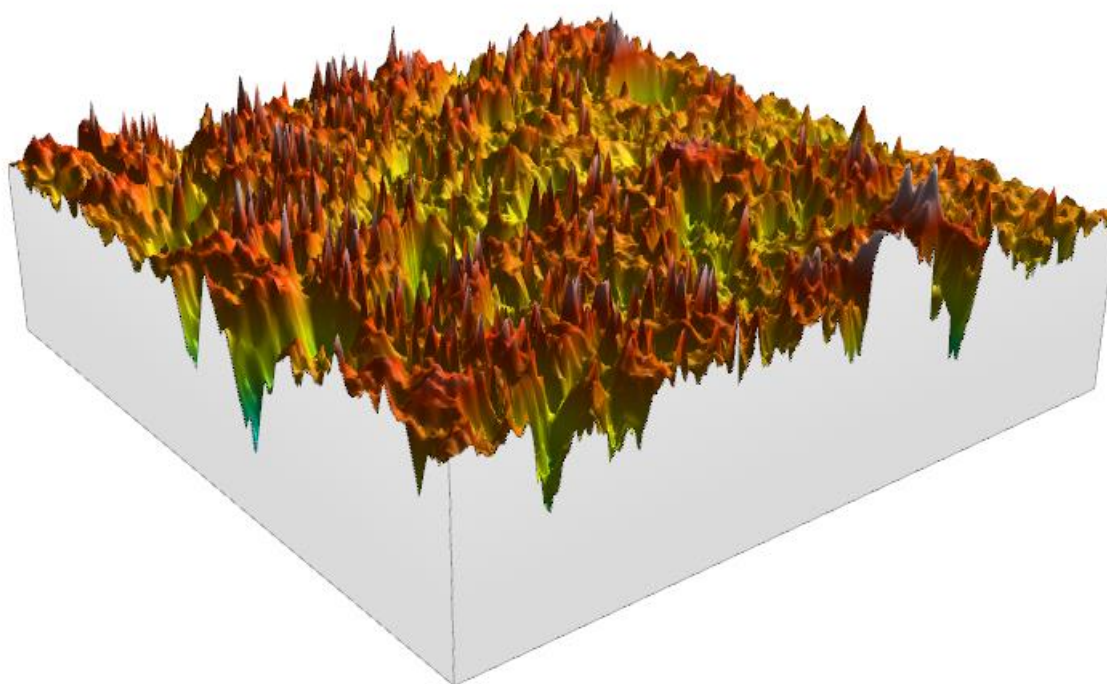
4.3.1. Uzorak 4

Rezultati mjerenja *Uzorka 4* u nastavku prikazani su u 2D [slika 39] i 3D obliku [slika 40].



Slika 39. 2D prikaz profila površine Uzorka 4

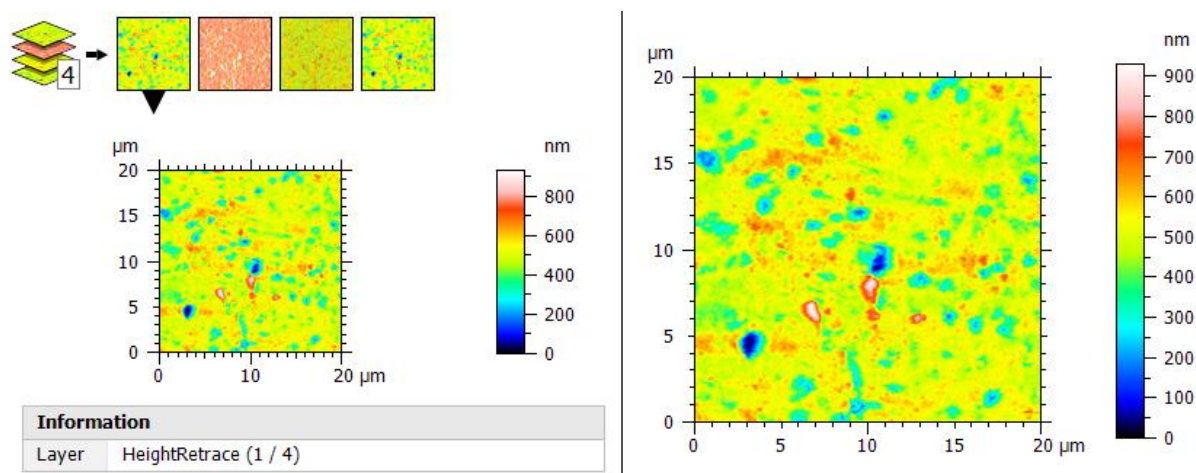
Iz slike 39 vidljivo je da ne postoji simetričnost između boja koje označavaju visinu površine, što može potvrditi i 3D prikaz *Uzorka 4* [slika 40].



Slika 40. 3D prikaz profila površine Uzorka 4

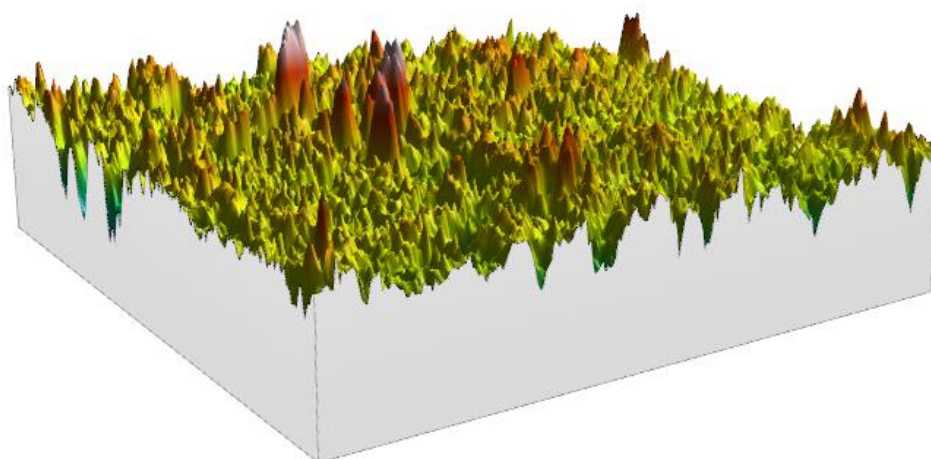
4.3.2. Uzorak 5

Rezultati mjerenja *Uzorka 5* u nastavku su prikazani u 2D [slika 41] i 3D obliku [slika 42].



Slika 41. 2D prikaz profila površine *Uzorka 5*

Kod ispitivanog uzorka ne može se uočiti ponavljajući uzorak karakterističnog oblika između boja koje označavaju visinu površine.



Slika 42. 3D prikaz profila površine *Uzorka 5*

Kada bi uspoređivali 3D prikaze profila *Uzorka 4* i *Uzorka 5*, vidljivo je da imaju sličnu topografiju površine.

4.3.3. Usporedba parametara aluminija

Iz Tablice 2 moguće je vidjeti parametre prethodno opisanih uzoraka aluminija. U nastavku će biti opisani i uspoređeni amplitudni parametri navedenih uzoraka.

Tablica 2. Parametri topografije površine Uzorka 4 i Uzorka 5

ISO 25178 - Primary surface				ISO 25178 - Primary surface			
<i>F: None</i>				<i>F: None</i>			
<i>S-filter (λ_s): None</i>				<i>S-filter (λ_s): None</i>			
Height parameters				Height parameters			
Sq	0.09401	μm		Sq	81.78	nm	
Ssk	-1.284			Ssk	-0.9302		
Sku	6.775			Sku	6.732		
Sp	0.3424	μm		Sp	430.3	nm	
Sv	0.6690	μm		Sv	499.6	nm	
Sz	1.011	μm		Sz	929.9	nm	
Sa	0.06753	μm		Sa	57.99	nm	
Functional parameters				Functional parameters			
Smr	100.0	%		Smr	100.0	%	
Smc	0.09517	μm		Smc	80.89	nm	
Sxp	0.2594	μm		Sxp	215.6	nm	
Spatial parameters				Spatial parameters			
Sal	0.8382	μm		Sal	0.6771	μm	
Str	0.7889			Str	0.8751		
Std	2.756	$^\circ$		Std	171.0	$^\circ$	
Hybrid parameters				Hybrid parameters			
Sdq	0.5993			Sdq	0.5599		
Sdr	13.70	%		Sdr	13.26	%	
Functional parameters (Volume)				Functional parameters (Volume)			
Vm	0.003777	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vm	0.00401	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Vv	0.09895	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vv	0.0849	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Vmp	0.003777	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vmp	0.00401	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Vmc	0.0685	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vmc	0.05871	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Vvc	0.08149	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vvc	0.07008	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Vvv	0.01746	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$		Vvv	0.01482	$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	
Functional parameters (Stratified surfaces)				Functional parameters (Stratified surfaces)			
Sk	0.1700	μm		Sk	143.4	nm	
Spk	0.07579	μm		Spk	80.41	nm	
Svk	0.1786	μm		Svk	149.6	nm	
Smr1	9.015	%		Smr1	9.559	%	
Smr2	83.71	%		Smr2	83.34	%	
Spq	0.06461			Spq	56.13		
Svq	0.1994			Svq	159.2		
Smq	83.82			Smq	82.40		
<i>Uzorak 4</i>				<i>Uzorak 5</i>			

Iz parametara koji opisuje najveću srednju kvadratnu vrijednost odstupanja profila (S_q) *Uzorak 4* ima veću srednju kvadratnu vrijednost odstupanja od *Uzorka 5*, no ne značajno veću.

Iz parametra asimetričnosti raspodjele visine (S_{sk}) može se vidjeti da oba uzorka imaju negativne vrijednosti, što govori da hrapavosti površina odstupaju na gornju stranu. Iz Tablice 2 vidljivo je da *Uzorak 4* ima veću vrijednost parametra asimetričnosti od *Uzorka 5*.

Iz parametra koji mjeri oštrinu hrapavosti površine (S_{ku}) vidljivo je da oba uzorka imaju gotovo jednake vrijednosti.

Iz parametra koji opisuje najveću vrijednost visine vrha promatrane površine (S_p), *Uzorak 5* ima veću vrijednost visine vrha za čak 100 nm u usporedbi sa *Uzorkom 4*.

Iz parametra koji opisuje maksimalnu dubinu dola (S_v) može se vidjeti da *Uzorak 4* ima veću maksimalnu dubinu dola od *Uzoraka 5* za 160 nm.

Iz parametra koji koristi sumu najvišeg vrha i najdubljeg dola (S_z), po prethodna dva parametra gdje su navedene vrijednosti razlika promatranih uzoraka, može se zaključiti njihovim sumiranjima i usporedbom da *Uzorak 4* ima veću vrijednost ovog parametra od *Uzoraka 5*.

Iz parametra koji predstavlja razliku u visini svake točke u odnosu na aritmetičku sredinu površine (S_a), nije moguće zaključiti iz 3D prikaza površina uzorka koji od opisanih ima veću vrijednost kao što je to bilo kod etalona. *Uzorak 4* ima veću vrijednost opisanog parametra u odnosu na *Uzorak 5*.

4.4. Usporedba amplitudnih parametara uzoraka etalona i aluminija

U Tablici 3 mogu se vidjeti parametri svih promatranih uzoraka te se po iznosu parametara može zaključiti da se etaloni uvelike razlikuju od uzoraka aluminija.

Tablica 3. Usporedba amplitudnih parametara

Amplitudni parametri					
	Etalon			Aluminij	
S_q	44,17 nm	40,63 nm	58,57 nm	94,01 nm	81,78 nm
S_{sk}	-0,5511	0,2517	-0,5745	-1,284	-0,9302
S_{ku}	2,243	2,442	1,511	6,775	6,732
S_p	114,5 nm	108,8 nm	65,42 nm	342,4 nm	430,3 nm
S_v	94,37 nm	77,79 nm	100,0 nm	669,0 nm	499,6 nm
S_z	208,9 nm	186,6 nm	165,5 nm	1011,0 nm	929,9 nm
S_a	32,74 nm	29,19 nm	54,58 nm	67,53 nm	57,99 nm
	<i>Uzorak 1</i>	<i>Uzorak 2</i>	<i>Uzorak 3</i>	<i>Uzorak 4</i>	<i>Uzorak 5</i>

Vidljivo je da je kvadratna vrijednost odstupanja profila površine (S_q) veća kod aluminijskih uzoraka u odnosu na etalone, jer površina koja će imati više odstupanja će biti ona koja je bila podvrgnuta nekom načinu eksploatacije.

Asimetričnost (S_{sk}) ovisi o raspodjeli visine gdje svaki promatrani uzorak ima svoju asimetriju, te se iz ovog parametra ne može vidjeti uočljiva razlika.

Kod mjerenja oštine hrapavosti površine (S_{ku}) može se vidjeti razlika između uzoraka etalona i aluminijskih, gdje aluminijski uzorci imaju znatno veću oštrinu površine u usporedbi sa uzorcima etalona, što se može vidjeti i usporedbom njihovih 3D prikaza profila.

Iz parametra koji daje najveću vrijednost visine vrha promatrane površine (S_p) može se vidjeti znatno veća vrijednost ovog parametra kod uzoraka aluminijskih, što znači da se na promatranoj površini nalaze viši vrhovi nego kod etalona, koji su gledajući vrijednost parametara, puno niži od aluminijskih uzoraka.

Također, parametar koji definira maksimalnu dubinu dola promatrane površine (S_v) ima veću vrijednost kod uzoraka aluminijskih u odnosu na uzorke etalona.

Ono što možemo zaključiti iz prethodno dva opisana i uspoređena parametra, je da će parametar koji definira sumu najvišeg vrha i najdubljeg dola (S_z) biti znatno veći kod uzoraka aluminijskih. To se također može zaključiti samim pogledom i usporedbom 3D prikaza uzoraka, jer je površina uzoraka aluminijskih oštija, ima nagle prijelaze brda i dolova, te nema nikakve simetrije.

Usporedbom parametra koji predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti (S_a) vidljivo je da uzorci aluminijskih imaju nešto veću vrijednost od uzoraka etalona.

5. ZAKLJUČAK

Mikroskop atomskih sila (AFM) ima široku primjenu mjerenja u raznim industrijama. Razlog korištenja mikroskopa atomskih sila su sve stroži zahtjevi na karakteristike površina. AFM-om su omogućena mjerenja parametara topografije površine na nanometarskoj razini. Mjerenja se mogu provoditi na uzorcima koji ne zahtijevaju opsežnu pripremu površine ispitivanja, kao što je to slučaj kod drugih vrsta mikroskopa. Mjerenja se mogu provoditi u različitim medijima: zraku i otopinama (npr. elektrolitima u kojima se provode mjerenja elektrokemijskih značajki). Moguća su mjerenja kemijskih svojstava, kao i mjerenja krutosti i modula elastičnosti, te električnih i magnetskih svojstava.

U ovome radu opisani su 3D parametri površinske hrapavosti sukladni međunarodnoj normi “*ISO 25178-2:2012*“. Parametri hrapavosti mjereni su na uzorcima etalona i aluminijskim. Na danim uzorcima provedena su mjerenja mikroskopom atomskih sila, te su dobivene vrijednosti 3D parametara međusobno uspoređene između uzoraka. Uz definirane 3D parametre i provedena mjerenja, objašnjena su tri različita načina rada mikroskopa atomskih sila, te su opisane i objašnjene ostale metode mjerenja i njihovi načini rada.

S obzirom na nagli razvoj tehnologije i sve strožih zahtjeva kvaliteta obrade, javljaju se sve češća ispitivanja svojstava na nanorazini, te se otvara prostor za širu implementaciju i daljnji razvoj metode mjerenja mikroskopom atomskih sila.

LITERATURA

- [1] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf ,preuzeto 23. lipnja 2020.
- [2] Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 25178-2:2012)
- [3] Runje B.: Mjerenje hrapavosti tehničkih površina, Laboratorijske vježbe iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [4] <https://www.olympus-ims.com/ru/metrology/surface-roughness-measurement-portal/evaluating-parameters/> , preuzeto 23. lipnja 2020.
- [5] <https://help.profilmonline.com/ssk---skewness.html> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [6] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/maximum-profile-peak-height.jsp> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [7] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sv-maximum-pit-height.jsp> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [8] <https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [9] https://www.michmet.com/3d_s_spatial_parameters.htm , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [10] <https://hrcak.srce.hr/42853> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [11] Runje B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja (Skripta), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- [12] https://www.michmet.com/3d_s_hybrid_parameters.htm , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [13] <https://www.ndt.net/article/qirt2014/papers/QIRT-2014-045.pdf> , preuzeto 24. lipnja 2020.
- [14] https://books.google.hr/books?id=1C8MrW57ayUC&pg=PA239&lpg=PA239&dq=areal+material+ratio+function+of+the+scale-limited+surface&source=bl&ots=PqVVdC5NhV&sig=ACfU3U2B7_-XprU44oLTHyPDp9ParBBEmQ&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwixwfKG3pzqAhX_AxAIHcieA9YQ6AEwCXoECAgQAQ#v=onepage&q=areal%20material%20ratio%20function%20of%20the%20scale-limited%20surface&f=false , preuzeto 25. lipnja 2020.
- [15] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/spk-reduced-peak-height.jsp> , preuzeto 25. lipnja 2020.

- [16] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/vvv-dale-void-volume.jsp> , preuzeto 25. lipnja 2020.
- [17] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sxp-peak-extreme-height.jsp> , preuzeto 25. lipnja 2020.
- [18] Chin Y. Poon, Bharat Bhushan :Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler, 24 May 1995
- [19] https://pdfs.semanticscholar.org/1489/0bbedab9002cb965c0e9e617334e7b71a89d.pdf?_ga=2.183497062.1196974654.1596451266-512241034.1596451266 , preuzeto 3. kolovoza 2020.
- [20] [http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/aulas%20pptx%20e%20livros/livro/Scanning%20Microscopy%20for%20Nanotechnology/Fundamentals%20of%20Scanning%20Electron%20Microscopy%20\(SEM\).pdf](http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/aulas%20pptx%20e%20livros/livro/Scanning%20Microscopy%20for%20Nanotechnology/Fundamentals%20of%20Scanning%20Electron%20Microscopy%20(SEM).pdf) , preuzeto 29. lipnja 2020.
- [21] <https://www.ecmjournal.org/smi/pdf/smi98-17.pdf> , preuzeto 29. lipnja 2020.
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope , preuzeto 1. srpnja 2020.
- [23] http://www.angstrom-advanced.com/index.asp?page=SEM2300&gclid=CjwKCAjw1K75BRAEEiwAd41h1GpF4dre7nTAApOv5rCl3quqSEnlz0PE5-z_ny0-dA_sYB1ZNXQrRoCgmKQAvD_BwE , preuzeto 5. kolovoza 2020.
- [24] <https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/techniques/structural/tem/> , preuzeto 1. srpnja 2020.
- [25] <https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Transmission-Electron-Microscopy.aspx> , preuzeto 1. srpnja 2020.
- [26] <https://med.virginia.edu/advanced-microscopy-facility/equipment/> , preuzeto 5. kolovoza 2020.
- [27] <https://www.novacam.com/products/profilometers/> , preuzeto 5. kolovoza 2020.
- [28] <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/stylus/> , preuzeto 2. srpnja 2020.
- [29] Hutchings I., Shipway P.: Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials, 2nd edition, 12 October 2017

- [30] <https://www.zygo.com/?/met/profilers/opticalprofilersabout.htm> , preuzeto 2. srpnja 2020.
- [31] <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/#optical> , preuzeto 2. srpnja 2020.
- [32] <https://nanovea.com/3d-surface-analysis-of-a-penny-with-profilometry/> , preuzeto 2. srpnja 2020.
- [33] Khan M.K., Wang, Q.Y., Fitzpatrick M.E.: Atomic force microscopy (AFM) for materials characterization, 2016.
- [34] Johnson D. Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N.: Atomic Force Microscopy (AFM), Chapter 7, Swansea University, 2017.
- [35] Eaton P., West P. : Atomic Force Microscopy, Oxford University Press, 2010.
- [36] <https://www.azonano.com/equipment-details.aspx?EquipID=1714> , preuzeto 5. kolovoza 2020.
- [37] [http://www.ewingdigital.com/text_content/3%20\(unit-2\)15871093155e995dc34d9aa.pdf](http://www.ewingdigital.com/text_content/3%20(unit-2)15871093155e995dc34d9aa.pdf) , preuzeto 8. srpnja 2020.
- [38] https://www.researchgate.net/figure/Contact-mode-and-tapping-mode-AFM-In-contact-mode-imaging-is-obtained-by-raster-scanning_fig1_221927188 , preuzeto 8. srpnja 2020.
- [39] https://www.researchgate.net/figure/AFM-3D-image-of-the-upper-surface-of-the-RF-sputtered-VO-2-thin-films_fig1_333612685 , preuzeto 9. srpnja 2020.
- [40] <https://www.spectraresearch.com/product/asylum-research-mfp-3d-origin-atomic-force-microscope/> , preuzeto 9. rujna 2020.
- [41] <https://www.digitalsurf.com/> , preuzeto 5. rujna 2020.

PRILOZI

- I. CD-R disc