

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Jukić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

prof. dr. sc. Biserka Runje

Student:

Josip Jukić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje na ukazanom povjerenju i razumijevanju za vrijeme izrade ovog rada.

Zahvaljujem asistentu Andreju Razumiću na konkretnim uputama, susretljivosti i vođenju prilikom izrade ovog rada. Također mu zahvaljujem na pomoći pri eksperimentalnom dijelu mjerenja.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na razumijevanju, podršci i poticaju iskazanom tijekom cijelog studiranja.

Josip Jukić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Jukić** JMBAG: **0035220727**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Parametri topografije površine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Surface topography parameters**

Opis zadatka:

Topografija površine uključuje komponente hrapavosti, valovitosti i druge nepravilnosti površine, poput odstupanja oblika. Stanje površine se kvantitativno opisuje linijskim ili prostornim parametrima topografije površine ovisno o primijenjenoj mjernoj metodi i traženoj razini točnosti. Mjeriteljstvo površine se razvija u skladu s tehnologijom te se ubrzano mijenjaju norme, preporuke i vodiči kojima se definiraju osnovni pojmovi, uvjeti mjerenja te broj i definicije parametara topografije površine.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled važećih normi na području mjeriteljstva površine.
2. Usustaviti (sistematizirati) uređaje i metode kojima se mogu mjeriti parametri topografije površine.
3. Na odabranim uzorcima provesti mjerenje parametara topografije površine primjenom elektroničko mehaničkog uređaja s ticalom i mikroskopa atomskih sila te analizirati dobivene rezultate.
4. Komentirati trenutno stanje na području mjeriteljstva površine sa stajališta mogućnosti usporedbe rezultata mjerenja dobivenih različitim metodama.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Biserka Runje

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| SADRŽAJ | 1 |
| POPIS SLIKA | 2 |
| POPIS TABLICA..... | 3 |
| POPIS OZNAKA | 4 |
| SAŽETAK..... | 5 |
| SUMMARY | 6 |
| 1. UVOD..... | 7 |
| 2. NORME I PARAMETRI NA PODRUČJU MJERITELJSTVA POVRŠINE | 8 |
| 2.1. Pregled važećih normi na području mjeriteljstva površine | 8 |
| 2.2. 2D i 3D mjerni sustavi mjerenja hrapavosti površina..... | 10 |
| 2.3. Parametri topografije površine..... | 12 |
| 2.3.1. Amplitudni parametri..... | 12 |
| 2.3.2. Prostorni (spatial) parametri..... | 15 |
| 2.3.3. Hibridni parametri..... | 17 |
| 2.3.4. Funkcijski parametri | 18 |
| 2.3.5. Funkcijski parametri volumena..... | 19 |
| 3. UREĐAJI ZA ANALIZU TOPOGRAFIJE POVRŠINE | 22 |
| 3.1. Skenirajući mikroskopi | 22 |
| 3.1.1. Mikroskopi sa skenirajućom sondom | 22 |
| 3.1.1.1. Pretražni tunelirajući mikroskop (STM)..... | 23 |
| 3.1.1.2. Mikroskop atomskih sila (AFM) | 24 |
| 3.1.2. Skenirajući elektronski mikroskop | 26 |
| 3.1.2.1. Transmisijski elektronski mikroskop..... | 27 |
| 3.2. Optički uređaji..... | 28 |
| 3.2.1. Uređaji na principu fokusa..... | 28 |
| 3.2.2. Interferometrijski mikroskopi | 29 |
| 3.2.3. Elipsometri..... | 30 |
| 3.3. Uređaji s ticalom | 31 |
| 3.3.1. Kontaktni profilometar..... | 32 |
| 3.3.2. Beskontaktni profilometar..... | 33 |
| 3.4. Usporedba značajki skupina mjernih uređaja | 34 |
| 4. MJERENJE HRAPAVOSTI | 35 |
| 4.1. Mjerenje na mikroskopu atomskih sila (AFM)..... | 35 |
| 4.2. Mjerenje primjenom električko mehaničkog uređaja s ticalom..... | 38 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 41 |
| LITERATURA..... | 42 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Profil površine [1] | 10 |
| Slika 2. Određivanje S_a parametra [12] | 12 |
| Slika 3. Usporedba S_q , S_a , S_p i S_v parametara [13] | 13 |
| Slika 4. Raspodjela visine S_{sk} [12] | 14 |
| Slika 5. Raspodjela visine S_{ku} [12] | 15 |
| Slika 6. Izotropna (lijevo) i anizotropna (desno) površina [14] | 15 |
| Slika 7. Grafikon polarnog spektra koji predstavlja smjerove teksture [11] | 16 |
| Slika 8. Minimalno i maksimalno izmjereni radijusi na središnjem režnju [11] | 18 |
| Slika 9. Krivulja omjera površinskog materijala [12] | 18 |
| Slika 10. Volumen praznine V_v ispod visine presjeka definiran omjerom materijala mr [11] . | 19 |
| Slika 11. Volumen materijala iznad visine presjeka definiran omjerom materijala mr [11] ... | 20 |
| Slika 12. Definicija parametara volumena [12] | 21 |
| Slika 13. Uređaji za mjerenje topografije površine [15] | 22 |
| Slika 14. Princip rada STM-a [17] | 23 |
| Slika 15. Mikroskop atomskih sila na FSB-u u Zagrebu | 24 |
| Slika 16. Princip rada AFM-a [23] | 25 |
| Slika 17. Princip rada SEM mikroskopa [28] | 26 |
| Slika 18. SEM slika minerala [29] | 27 |
| Slika 19. Princip rada TEM mikroskopa [31] | 28 |
| Slika 20. Mjerni princip metoda na principu fokusa [32] | 28 |
| Slika 21. Princip rada Michelsonovog interferometra [33] | 30 |
| Slika 22. Shematski prikaz elipsometra [35] | 31 |
| Slika 23. Način rada kontaktnog profilometra [37] | 32 |
| Slika 24. Prikaz vrha ticala [37] | 32 |
| Slika 25. Profilometar [40] | 33 |
| Slika 26. Uzorak za mjerenje | 35 |
| Slika 27. 2D prikaz skeniranog područja | 37 |
| Slika 28. 3D prikaz skeniranog područja | 37 |
| Slika 29. 3D prikaz skeniranog područja | 38 |
| Slika 30. Uređaj s ticalom | 38 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Pregled važećih normi | 8 |
| Tablica 2. Usporedba značajki različitih skupina mjernih uređaja [15]..... | 34 |
| Tablica 3. Parametri dobiveni pomoću AFM-a..... | 36 |
| Tablica 4. Parametri dobiveni pomoću uređaja s ticalom | 39 |
| Tablica 5. <i>t</i> -test za parametre <i>R_a</i> i <i>S_a</i> | 39 |
| Tablica 6. <i>t</i> -test za parametre <i>R_z</i> i <i>S_z</i> | 40 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------------|-----------------|---|
| <i>A</i> | mm | površina |
| <i>ACF</i> | – | autokorelacija |
| <i>r_{max}</i> | mm | maksimalni radijus |
| <i>r_{min}</i> | mm | minimalni radijus |
| <i>Sa</i> | μm | aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila |
| <i>Sal</i> | μm | duljina autokorelacije |
| <i>Sdc</i> | – | razlika površinskog presjeka |
| <i>Sdq</i> | – | srednji kvadratni nagib profila |
| <i>Sdr</i> | % | površina pojedinog trokuta površinske mreže |
| <i>Sku</i> | – | mjera oštine profila |
| <i>Smc</i> | % | inverzni površinski omjer materijala |
| <i>Smr</i> | % | omjer površinskog materijala |
| <i>Sp</i> | μm | najviša točka površine |
| <i>Sq</i> | μm | srednja kvadratna vrijednost odstupanja profila |
| <i>Ssk</i> | – | asimetričnost profila |
| <i>Std</i> | ° | smjer teksture |
| <i>Str</i> | % | omjer teksture |
| <i>Sv</i> | μm | najniža točka površine |
| <i>Sz</i> | μm | maksimalna visina površine |
| <i>Vm</i> | μm ³ | volumen materijala |
| <i>Vmc</i> | μm ³ | volumen temeljnog materijala |
| <i>Vmp</i> | μm ³ | maksimalni volumen materijala |
| <i>Vv</i> | μm ³ | volumen praznine |
| <i>Vvc</i> | μm ³ | volumen šupljine jezgre |
| <i>Vvv</i> | μm ³ | volumen praznine |

SAŽETAK

Izraz topografija površine koristi se za analizu površine i površinskih komponenti, kao što su hrapavost, valovitost i druge nepravilnosti površine. Topografija površine može se kvantitativno opisati linijskim (2D) ili prostornim (3D) parametrima topografije površine. U prvom dijelu rada dan je pregled relevantnih normi na području mjerenja površine te pregled prostornih parametara topografije površine. U radu su usustavljene metode i uređaji kojima se mogu mjeriti parametri topografije površine. S ciljem analize topografije površine provedeno je mjerenje odabranih uzoraka primjenom elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom i mikroskopom atomskih sila (AFM).

SUMMARY

Expression surface topography is used in surface analysis and surface components such as roughness, ripple and other surface irregularities. Surface topography can be quantitatively described with line (2D) or areal (3D) surface topography parameters. In the first part of the paper the relevant standards in surface metrology and areal parameters of surface topography are reviewed. In this paper methods and devices for measuring parameters of surface topography are systemised. To analyse surface topography, selected samples have been measured using the electronic-mechanical device with antenna and atomic force microscope (AFM).

1. UVOD

Mjerenje je proces dobivanja jedne ili više vrijednosti veličine eksperimentalnim putem. Svrha svakog mjerenja je da dobijemo vrijednost mjerne veličine [1].

Stanje površine se procjenjuje parametrima topografije površine na mikro ili nano razini. S obzirom na to da se radi o malim odstupanjima, pred proizvođačima mjerne opreme i mjeriteljskim sustavom postavljaju se vrlo veliki zahtjevi. Zbog tih razloga u mjeriteljstvu topografije tehničkih površina teži se k ostvarivanju mjernog jedinstva koji se odvija na nekoliko različitih područja:

- Normizaciji s ciljem definiranja jedinstvenih nacionalnih normi baziranih na ISO normama.
- Konstrukciji mjernih uređaja za mjerenje topografije tehničkih površina s ciljem osiguravanja obnovljivosti rezultata mjerenja.
- Umjeravanju uređaja i etalona hrapavosti s ciljem osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja [1].

Površinska hrapavost obuhvaća sve nepravilnosti mikro ili nano razine na površini promatranog predmeta uzrokovane različitim postupcima obrade, koje se mogu ispitivati u 2D ili 3D sustavima. U posljednjim desetljećima razvoj moderne mjerne tehnologije omogućio je mnogo preciznije mjerenje i opisivanje površina, poput 3D sustava. Iako 3D sustav ima mnogo prednosti u odnosu na 2D, danas se u većoj mjeri koriste 2D sustavi zbog manje cijene uređaja i zbog opreme koja je potrebna za mjerenje 3D sustavima [2].

2. NORME I PARAMETRI NA PODRUČJU MJERITELJSTVA POVRŠINE

Razvoj metode dodirrom i razvoj elektromehaničkih uređaja s ticalom činio je veliku ulogu u normizaciji kod definiranja parametara topografije površine. Može se reći kako su u današnje vrijeme uspostavljene posebne norme za definiranje parametara hrapavosti i ispitivanja hrapavosti koje se temelje na dodiru. Topografija površine uključuje komponente teksture i odstupanja površine od oblika. Tekstura površine se sastoji od finih nepravilnosti dobivenih nakon obrade oblikovanjem. Takva tekstura se sastoji od hrapavosti i valovitosti. Hrapavost je rezultat površinske nepravilnosti nastale zbog obrade oblikovanjem, a ne zbog stroja. Hrapave površine se brže troše i imaju veći koeficijent trenja [1].

2.1. Pregled važećih normi na području mjeriteljstva površine

Tablica 1. Pregled važećih normi

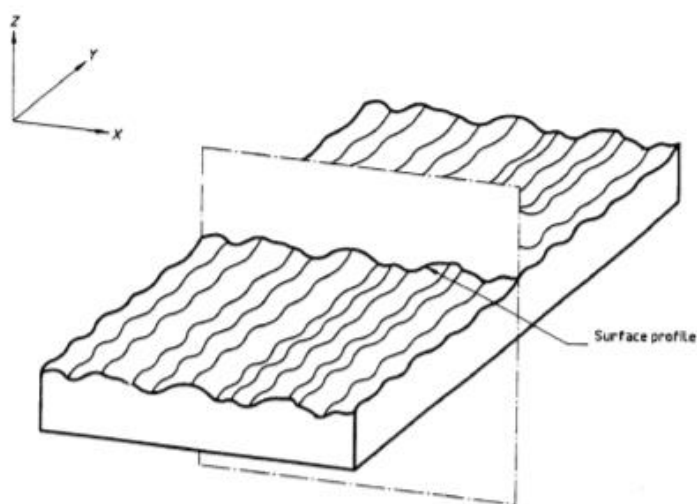
| OZNAKA NORME | NAZIV NORME | OPIS |
|--------------------------|--|---|
| ISO 3274:1996 | <i>Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila - Nazivne karakteristike elektromehaničkog uređaja s ticalom | Ova norma definira profile i opću strukturu instrumenata za mjerenje hrapavosti i valovitosti površine. Ona ukazuje na svojstva instrumenata koja utječu na profil i daje osnovne specifikacije ticala [3]. |
| ISO 3274:1996/COR 1:1998 | <i>Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments — Technical Corrigendum 1</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila - Nazivne karakteristike elektromehaničkog uređaja s ticalom– Tehnička ispravka 1 | |
| ISO 13565-1:1996 | <i>Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 1: Filtering and general measurement conditions</i> Geometrijske specifikacije proizvoda | Ova norma opisuje metodu filtriranja. Površine imaju relativno malu količinu valovitosti. Ova metoda filtriranja potiskuje utjecaj doline na referentnu liniju [4]. |

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| | (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Površine sa slojevitim funkcijskim osobinama – 1. dio: Filtriranje i opći uvjeti mjerenja | |
| ISO 13565-1:1996/ COR 1:1998 | <i>Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties — Part 1: Filtering and general measurement conditions</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Površine sa slojevitim funkcijskim osobinama – 1. dio: Filtriranje i opći uvjeti mjerenja – Tehnička ispravka 1 | |
| ISO 5436-1:2000 | <i>Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Measurement standards – Part 1: Material measures</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Mjerni etaloni – 1. dio: Tvarne mjere | Ovaj dio ISO 5436 norme utvrđuje karakteristike tvornih mjera koje se koriste kao etaloni za mjerenje površinske teksture [5]. |
| ISO 5436-2:2012 | <i>Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Measurement standards – Part 1: Software measurement standards</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Mjerni etaloni – 1. dio: Softverski mjerni standardi | Ovaj dio ISO 5436 norme definira softverske mjerne standarde za provjeru softvera mjernih instrumenata [6]. |
| ISO 12179:2021 | <i>Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Calibration of contact (stylus) instruments</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Metoda snimanja profila – Umjeravanje elektromehaničkih uređaja s ticalom | Ovaj dokument određuje postupak umjeravanja i podešavanja mjeriteljskih karakteristika elektromehaničkih uređaja s ticalom za mjerenje površinske teksture metodom snimanja profila kako je definirano u ISO 3274 [7]. |
| ISO 21920-1:2021 | <i>Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Profil – 1. dio: Indikacija teksture površine | Ovaj dokument utvrđuje pravila za označavanje teksture površine u tehničkoj dokumentaciji proizvoda pomoću grafičkih simbola [8]. |

| | | |
|------------------|--|--|
| ISO 21920-2:2021 | <i>Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Profil – 1. dio: Pojmovi, definicije i parametri teksture površine | Ovaj dokument utvrđuje pojmove, definicije i parametre za određivanje teksture površine metodom snimanja profila [9]. |
| ISO 21920-3:2021 | <i>Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Profil – 1. dio: Indikacija teksture površine | |
| ISO 25178-1:2016 | <i>Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 1: Indication of surface texture</i> Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Tekstura površine: Prostorna – 1. dio: Indikacija teksture površine | Ovaj dokument utvrđuje pravila za označavanje površinske teksture u tehničkoj dokumentaciji proizvoda pomoću grafičkih simbola [10]. |

2.2. 2D i 3D mjerni sustavi mjerenja hrapavosti površina

Zbog razvoja tehnologije današnja mjerna površina se može označavati sa 2D i 3D parametrima. Realna površina je površina koja čini granice tijela i odvaja ga od okoline. Profil površine [Slika 1.] je površina koja nastaje presjekom realne površine i ravnine.

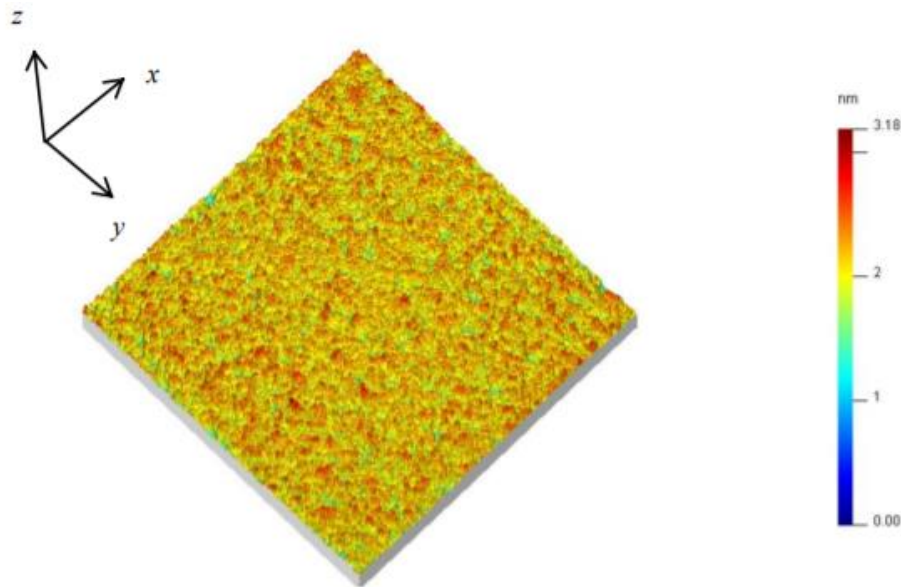


Slika 1. Profil površine [1]

2D mjerenje površine je mjerenje linije površine koja se može opisati matematičkim izrazom funkcije $z = f(x)$. To je mjerenje okomito na smjer tragova. U praksi se nastoji mjeriti okomito

na trag, iako postoje i iznimke zbog javljanja trenja ili brtvljenja. Kada se ne zna koji je smjer traga, mjeri se u više pravaca i odabiru se maksimalne vrijednosti za hrapavost površine.

3D mjerenje površine se može opisati sljedećim matematičkim izrazom $z = f(x, y)$. Mjerenjem prostorne teksture površine dobivamo trodimenzionalni prikaz površine [Slika 2].



Slika 2. Prostorna tekstura površine [1]

Potrebna su najmanje dva presjeka pod pravim kutem kako bi se odredila topografija površine no najbolje je da bude pet presjeka u različitim smjerovima koje odabiremo proizvoljno [1].

Prednosti 3D mjernog sustava hrapavosti površina u odnosu na 2D:

- Topografija površine je u stvarnom svijetu trodimenzionalna pa se može bolje opisati 3D mjerenjima.
- Parametri koje dobijemo 3D pristupom su realniji od onih dobivenih 2D pristupom.
- Statička analiza 3D topografije površine je pouzdanija i reprezentativnija jer uzima velik broj podataka.
- 3D mjerenjem možemo izmjeriti posebne značajke površine kao što su udubine, anizotropija, nehomogenost, žljebovi i usmjerenost.
- Primjenom 3D mjerenja topografije površine možemo dobiti neke nove parametre koje ne bismo dobili 2D mjerenjem. To su volumeni brjegovova i dolova te možemo saznati površinu dodira [1].

2.3. Parametri topografije površine

U ISO 25178 standardu definirana su dva simbola za prostorne (areal) parametre. To su prefiksi S ili V iza kojih slijedi jedno ili više slova u istom retku, a ne kao sufiks. Prefiks S se koristi za većinu parametara dok je prefiks V alternativa za parametre volumena [11].

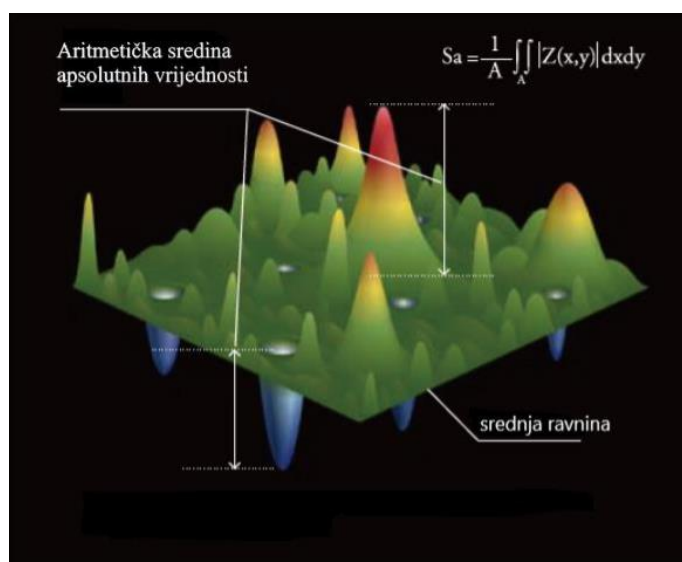
2.3.1. Amplitudni parametri

Sq – predstavlja srednju kvadratnu vrijednost odstupanja profila na promatranoj dijelu površine. Matematička formula za ovaj parametar je:

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

Sa – predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti na promatranoj površini [Slika 3]. Parametri Sq i Sa jako su povezani no ipak Sq ima statistički veći značaj. Kada je visinska raspodjela normalna tada je $Sa = 0,8 Sq$. Parametar Sa računa se prema sljedećem matematičkom izrazu:

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (2)$$



Slika 2. Određivanje Sa parametra [12]

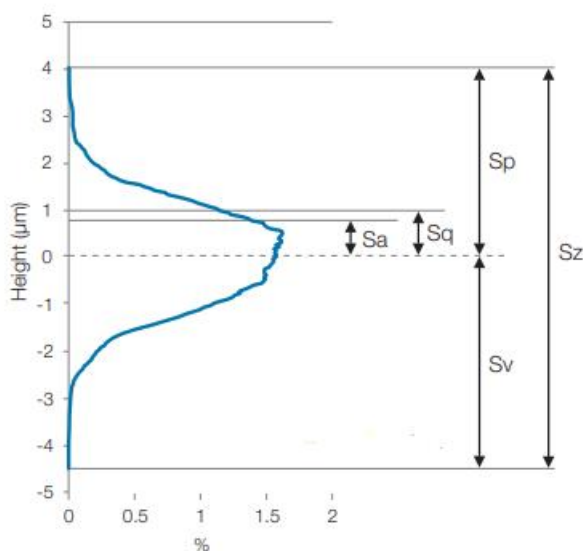
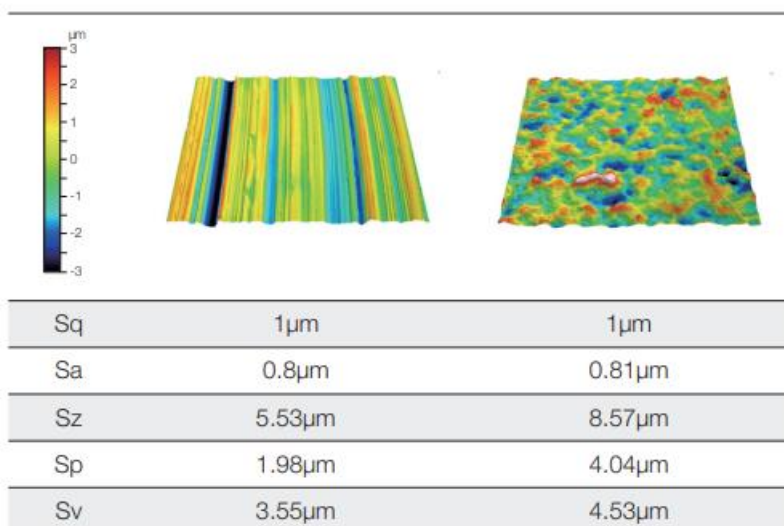
Sp – parametar koji predstavlja najvišu točku na promatranoj površini.

Sv – parametar koji predstavlja najnižu točku na promatranoj površini.

Obje visine se računaju od srednje ravnine tako da je S_p uvijek pozitivan, a S_v uvijek negativan.

Parametar S_z je maksimalna visina površine tj. ona je jednaka zbroju S_p i apsolutne vrijednosti parametra S_v .

$$S_z = S_p + |S_v| \quad (3)$$

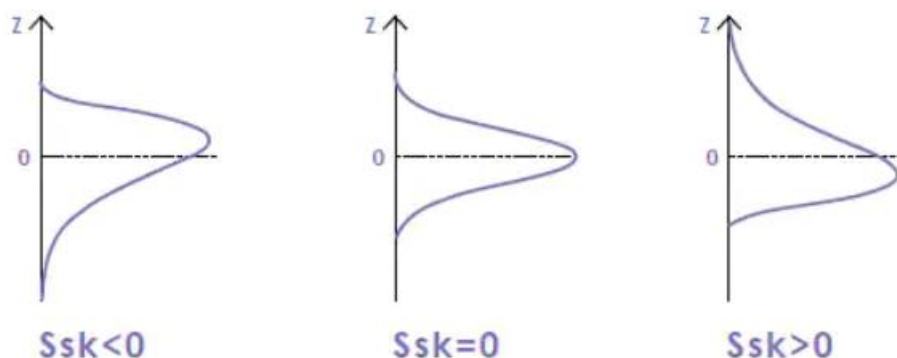


Slika 3. Usporedba S_q , S_a , S_p i S_v parametara [13]

S_{sk} – asimetričnost (engl. skewness) raspodjele visine ravnine na promatranu površinu. Vrijednost ovog parametra predstavlja odstupanje od oblika hrapavosti. Matematički izraz za ovaj parametar je:

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy. \quad (4)$$

Ovaj parametar može biti pozitivan, negativan ili jednak nuli. Ako je parametar pozitivan, raspodjela visine je iznad srednje visine. Negativan parametar označava da je raspodijela visine je ispod srednje visine. Kada je $Ssk = 0$ raspodjela visine je simetrična u odnosu na srednju visinu [Slika 5].

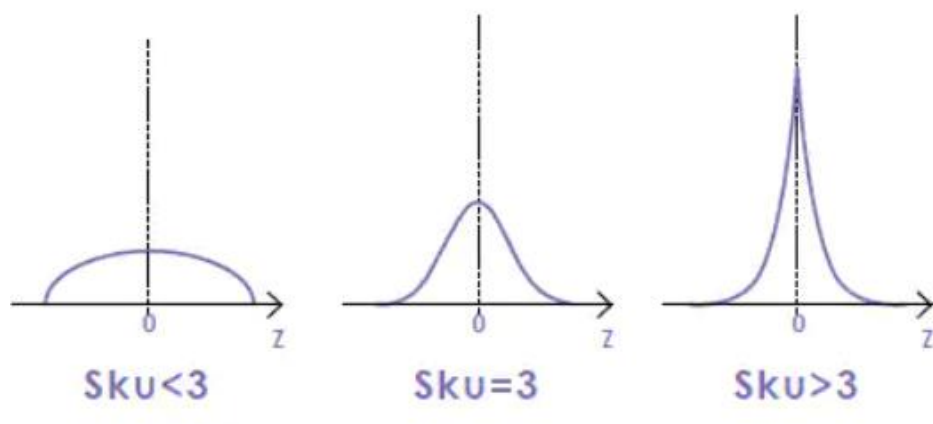


Slika 4. Raspodjela visine Ssk [12]

Sku – (engl. kurtosis) parametar koji prikazuje mjeru oštine promatranog profila hrapavosti površine. Računa se pomoću matematičkog izraza:

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy. \quad (5)$$

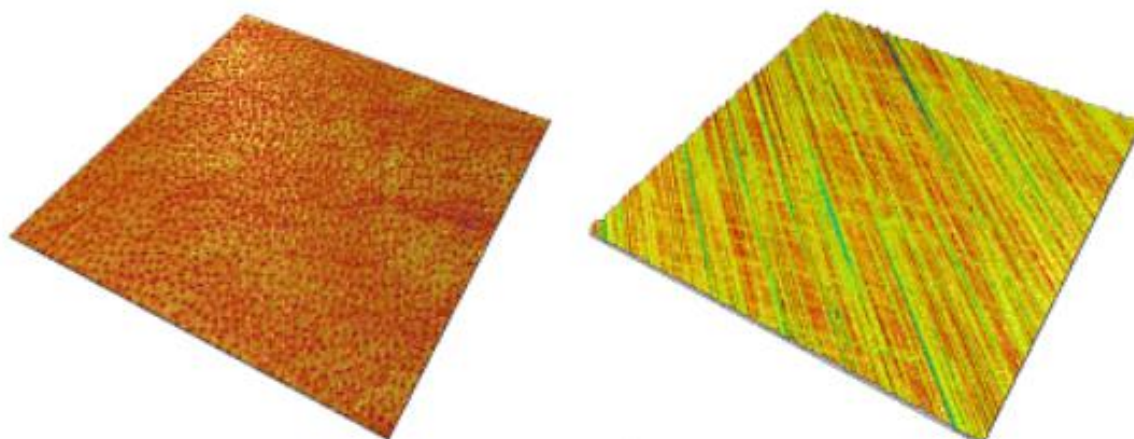
Sku je uvijek pozitivan, a kada je $Sku = 3$ onda je površina raspodjele simetrična. Kada je vrijednost Sku manja od 3, površina je tada kvrgava. Površina će biti šiljasta kada je Sku veći od 3 [Slika 6].

Slika 5. Raspodjela visine Sk_u [12]

Parametri Ssk i Sk_u znaju biti matematički nestabilni zbog velikih potencija. Zbog toga se greške mogu brže širiti.

2.3.2. Prostorni (spatial) parametri

Izotropna površina je ona koja ima identične karakteristike u bilo kojem pravcu mjerenja [14]. To su površine koje nemaju teksturu koja se ističe. Danas, u industriji, rijetko se mogu vidjeti takve površine. One su uglavnom brušene ili imaju periodičnu strukturu. Za takve površine kažemo da su anizotropne [Slika 6] [14].



Slika 6. Izotropna (lijevo) i anizotropna (desno) površina [14]

Izotropija površine se može odrediti pomoću Fourierove transformacije i autokorelacije.

Autokorelaciju opisujemo sljedećom jednačinom:

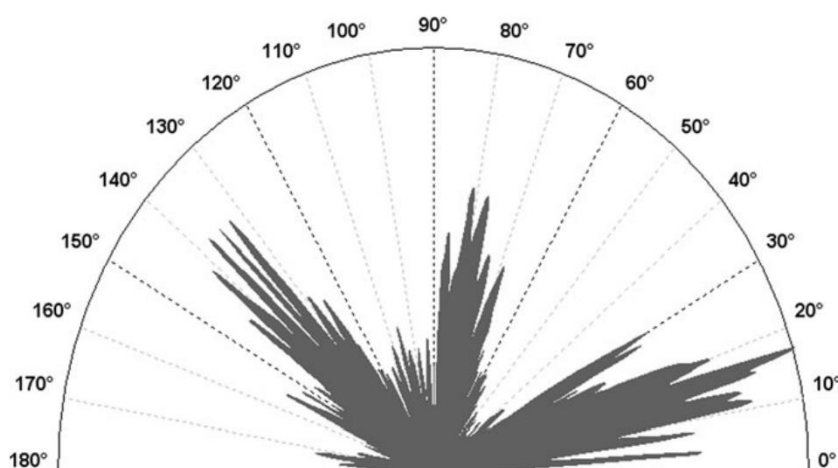
$$ACF(\tau x, \tau y) = \frac{\iint_A Z(x, y)Z(x - \tau x, y - \tau y)dxdy}{\iint_A Z^2(x, y)dxdy} \quad (6)$$

Ovaj izraz omogućuje generiranje slike na kojoj se može mjeriti karakteristične visine. Slika autokorelacije uvijek prikazuje središnji vrh s normaliziranom amplitudom od 1.

Sal – duljina autokorelacije, izražava se u μm . Ovaj parametar se definira kao horizontalna udaljenost *AFC* (engl. *Antral follicle count*) koja ima najbrži raspad do neke vrijednosti *s* ($0 \leq s \leq 1$). Velike vrijednosti ovog parametra govore da tom površinom vladaju komponente niske prostorne frekvencije, dok male vrijednosti označavaju suprotan slučaj [11].

$$Sal = \min\sqrt{tx^2 + ty^2} \quad (7)$$

Std – ovaj parametar označava smjer teksture. Prikladan je za površine koje označavaju ogrebotine i orijentiranu teksturu. *Std* ili glavni smjer teksture predstavlja maksimalna vrijednost grafikona polarnog spektra [Slika 7]. Ovaj parametar dan je u stupnjevima između 0° i 180° [11].



Slika 7. Grafikon polarnog spektra koji predstavlja smjerove teksture [11]

2.3.3. Hibridni parametri

Hibridni parametri opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila [1].

Sdq – srednja vrijednost kvadrata korijena gradijenta nagiba u svim točkama promatrane površine. Što je površina ravnija, to je parametar Sdq bliži nuli, a ako površina ima nagibe, Sdq raste. Matematički izraz za ovaj parametar je:

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint \left(\frac{dz^2}{dx} + \frac{dz^2}{dy} \right) dx dy} \quad (8)$$

Ovaj parametar se izražava u $\mu\text{m}/\text{mm}$ i $\mu\text{m}/\mu\text{m}$, a u nekim slučajevima se mjerna jedinica izostavlja. Može se izraziti i preko kuta α , odnosno kuta β . Kut α karakterizira najstrmiji gradijent, a može iznositi od 0° do 90° . Kut β predstavlja srednju orijentaciju površine, a može biti u rasponu od 0° do 360° [11].

Sdr – ovaj parametar izračunava površinu svakog pojedinog trokuta površinske mreže te ih zbraja kako bi se definiralo zakrivljeno područje koje prati svaki element neravnine i teksture površine [14]. Računa se prema izrazu:

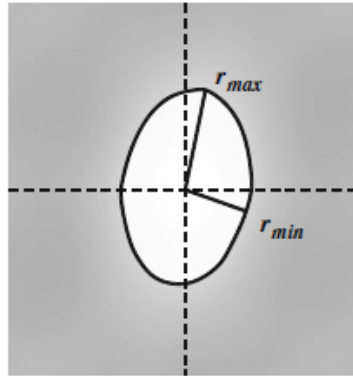
$$Sdr = \frac{\sum \sum A_{ij} - A}{A} \quad (9)$$

Sdr se uglavnom piše bez mjernih jedinica ili kao oblik postotka. Površina koja ima $Sdr = 0\%$ bi bila glatka površina. Vrijednost ovog parametra je uglavnom između 0% i 10% .

Str – parametar omjera teksture. To je jedan od najvažnijih parametara površine zato što karakterizira izotropiju površine. Računa se kao omjer minimalnog i maksimalnog radijusa [Slika 8].

$$Str = \frac{r_{\min}}{r_{\max}} \quad (10)$$

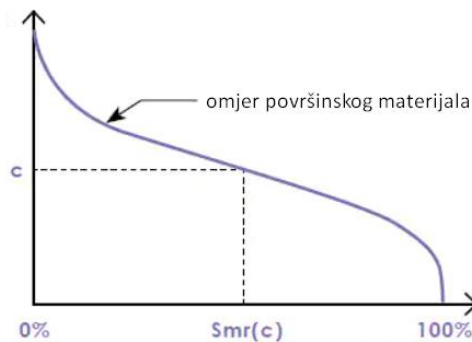
Vrijednost parametra Str je između 0 i 1 ili izražena u postotci između 0% i 100%. Ako je ovaj parametar jednak nuli, tada je površina anizotropna, tj. smjer teksture je dominantan. Ako je vrijednost 1, površina je izotropna i ima ista svojstva bez obzira na smjer [11].



Slika 8. Minimalno i maksimalno izmjereni radijusi na središnjem reznju [11]

2.3.4. Funkcijski parametri

Smr – omjer površinskog materijala. Krivulja omjera površinskog materijala [Slika 9] predstavlja visine na kojima se ovaj omjer mijenja od 0% do 100% [12]. prostorni



Slika 9. Krivulja omjera površinskog materijala [12]

Smc – inverzni površinski omjer materijala. Funkcija $Smc(p)$ procjenjuje vrijednost visine c koja odgovara parametru p .

Sdc – razlika površinskog presjeka. Ovaj parametar se računa prema izrazu:

$$Sdc = Smc(p) - Smc(q) \quad (11)$$

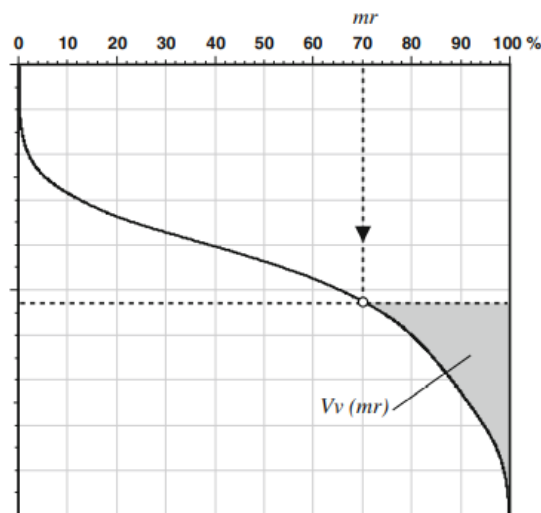
gdje su p i q dva omjera materijala koja se mogu slobodno birati ovisno o primjena.

2.3.5. Funkcijski parametri volumena

V_v – volumen praznine. Volumen šupljine ili praznine je parametar izračunat za omjer materijala mr . Opisuje ga sljedeći matematički izraz:

$$V_v(mr) = k \int_{mr}^{100\%} [Smc(mr) - Smc(q)] dq \quad (12)$$

Volumen praznine se prikazuje pomoću Abbott-Firestone krivulje [Slika 10.]. Na slici se može vidjeti da za $mr = 100\%$ volumen praznine je nula, a za $mr = 0\%$ volumen praznine je maksimalan [11].

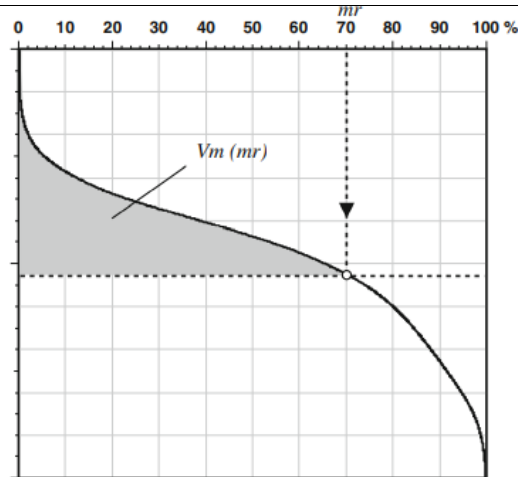


Slika 10. Volumen praznine V_v ispod visine presjeka definiran omjerom materijala mr [11]

V_m – volumen materijala. Parametar $V_m(mr)$ je volumen izračunat za omjer materijala mr . Računa se sljedećim izrazom:

$$V_m(mr) = k \int_{mr}^{100\%} [Smc(q) - Smc(mr)] dq \quad (13)$$

Volumen materijala se također može prikazati pomoću Abbott-Firestone krivulje [Slika 11.]. Volumen praznine maksimalan je za $mr = 100\%$, a za $mr = 0\%$ volumen praznine je 0 [11].



Slika 11. Volumen materijala iznad visine presjeka definiran omjerom materijala mr [11]

V_{mp} – maksimalni volumen materijala. Ovaj parametar predstavlja volumen materijala izračunat uz fiksni omjer materijala mr :

$$V_{mp} = V_m(mr_1) \quad (14)$$

gdje je zadano $mr_1 = 10\%$. Parametar V_{mp} se može koristiti za karakterizaciju volumena koji će se vjerojatno ukloniti tijekom izvođenja komponenti [11].

V_{mc} – volumen temeljnog materijala. V_{mc} je razlika između dva volumena različitih materijala koji su izračunati na različitim visinama:

$$V_{mc} = V_m(mr_2) - V_m(mr_1) \quad (15)$$

Gdje je zadano da je $mr_1 = 10\%$, a $mr_2 = 80\%$. Ovaj parametar predstavlja onaj dio površine koji ne stupa u kontakt s drugom površinom [11].

V_{vc} – volumen šupljine jezgre. Ovaj parametar prikazuje razliku volumena šupljina dvaju materijala mr_1 i mr_2 :

$$V_{vc} = V_v(mr_1) - V_v(mr_2) \quad (16)$$

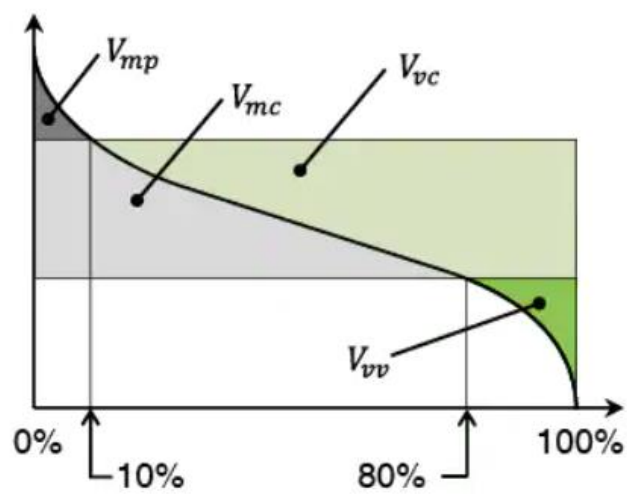
gdje je zadano $mr_1 = 10\%$ i $mr_2 = 80\%$ [11].

V_{vv} – volumen praznine. Parametar V_{vv} se zapisuje kao:

$$V_{vv} = V_v(mr_2) \quad (17)$$

gdje je zadano da je $mr_2 = 80\%$ [11].

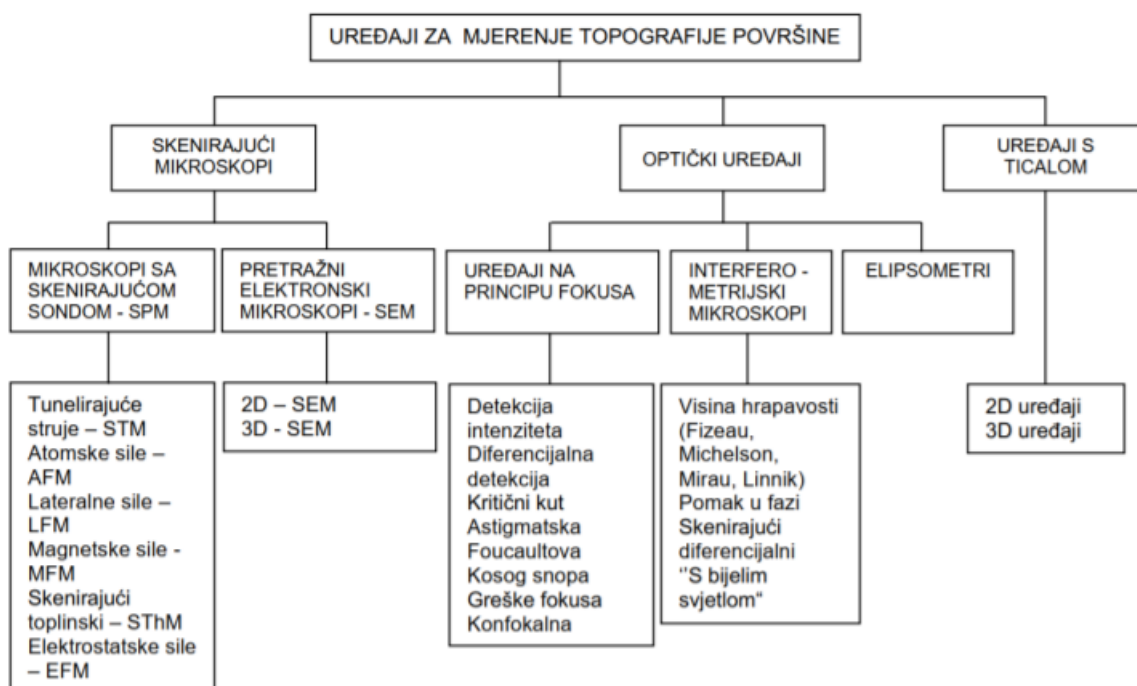
Slika 12. prikazuje parametre volumena V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} i V_{vv} te omjere mr_1 i mr_2 .



Slika 12. Definicija parametara volumena [12]

3. UREĐAJI ZA ANALIZU TOPOGRAFIJE POVRŠINE

Mjerne metode i mjerni uređaji koji se danas koriste se dijele na način koji prikazuje Slika 13:



Slika 13. Uređaji za mjerenje topografije površine [15]

3.1. Skenirajući mikroskopi

Skenirajući mikroskopi se dijele na mikroskope sa skenirajućim ticalom (SPM) i skenirajuće elektronske mikroskope (SEM).

3.1.1. Mikroskopi sa skenirajućom sondom

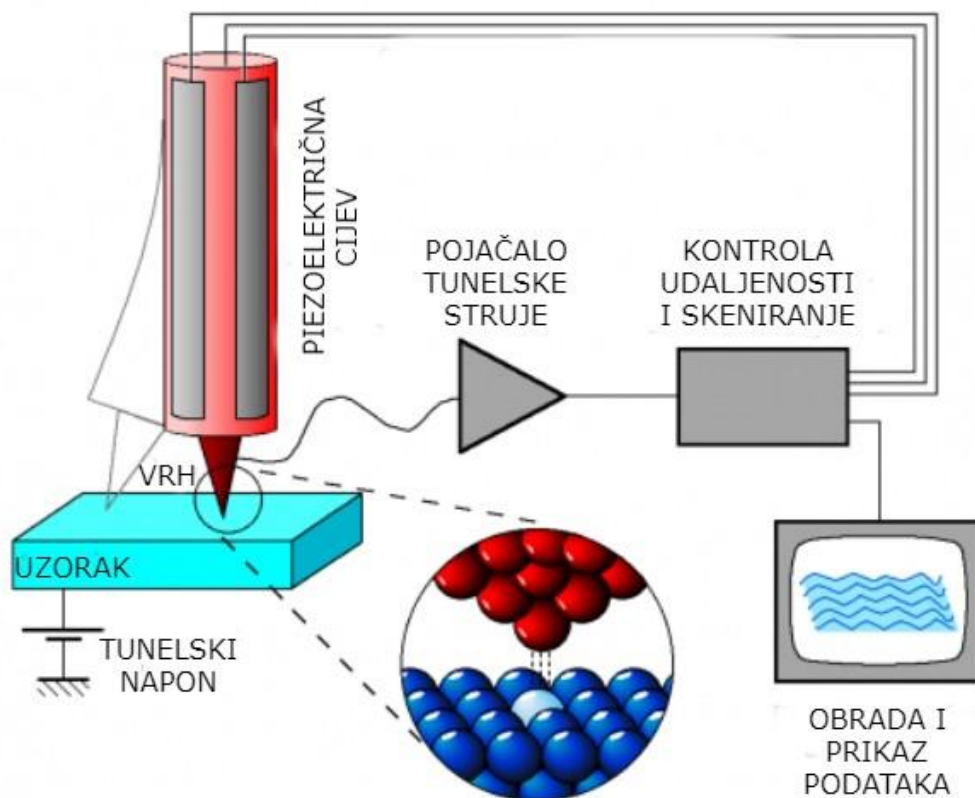
Mikroskop sa skenirajućom sondom (engl. *Scanning Probe Microscopy* – SPM) je instrument koji proučava površine na nanorazini. SPM oblikuje sliku površine uz pomoć sonde koja dodiruje površinu i prikuplja podatke stvarajući dvodimenzionalnu računalnu sliku točaka. Evolucija SMP-a je dovela do toga da su znanstvenici mogli vidjeti detalje uz veliku razlučivost bez prethodne pripreme uzorka. Prvi SMP je bio skenirajući tunelirajući

mikroskop koji je bio razvijen u Zurichu 1982. [16]. Uz SMP najpoznatiji skenirajući mikroskop je mikroskop atomskih sila (engl. *Atomic Force Microscope* – AFM).

3.1.1.1. Pretražni tunelirajući mikroskop (STM)

Pretražni tunelirajući mikroskop (eng. *Scanning Tunneling Microscope* - STM) je mikroskop koji daje sliku površine s velikom rezolucijom. Rad STM-a temelji se na tunelirajućoj struji koja počinje teći kada se vrh približi na udaljenost od približno jednog nanometra od vodljive površine. Vrh se nalazi na piezoelektričnoj cijevi koja zbog elektroda koje se nalaze na njoj radi male pomake. Time STM sustav kontrolira da udaljenost vrha od površine bude konstantna i time skenira površinu uzorka [Slika 14].

Slike koje se dobiju pomoću STM-a su uglavnom u sivom tonu gdje bijela boja predstavlja izbočine, a crna udubine [17].



Slika 14. Princip rada STM-a [17]

3.1.1.2. Mikroskop atomskih sila (AFM)

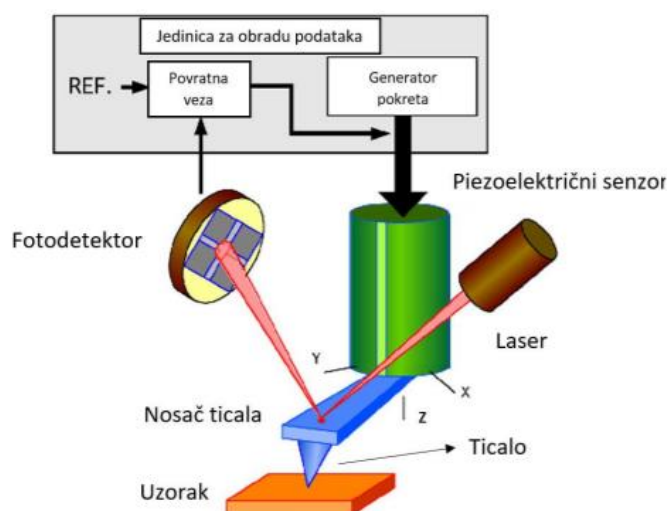
Mikroskop atomskih sila je uređaj koji mjeri hrapavost i formira sliku visina ili topografiju površine uzorka. Takve slike su vrlo visoke razlučivosti površine i do atomske rezolucije [18].

Prednost AFM-a je ta što može snimati gotovo sve vrste površina (polimeri, keramika, staklo...) [19]. Slika 15. prikazuje mikroskop atomskih sila koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 15. Mikroskop atomskih sila na FSB-u u Zagrebu

Skeniranje uzoraka na mikroskopu atomskih sila provodi se prelaskom ticala oštrog vrha po površini mjerenog uzorka [20]. Vrh se približava površini i zbog bliskih privlačnih sila između površine i vrha dolazi do otklona nosača ticala prema površini [21]. Ticalo se sve više približava površini i dolazi do dodira vrha s njom te tada vrh preuzima sve snažnije sile i uzrokuje odbijanje konzole od površine [22]. Slika 16. prikazuje način rada AFM-a.



Slika 16. Princip rada AFM-a [23]

Prednosti AFM-a su:

- Visoka razlučivost.
- Može analizirati fizička svojstva (trenja, električna svojstva, magnetska svojstva itd.).
- Moguće je promatrati u atmosferskim uvjetima, bez prethodne obrade uzorka.
- Mogućnost 3D mjerenja s jako velikim povećanjem [24].

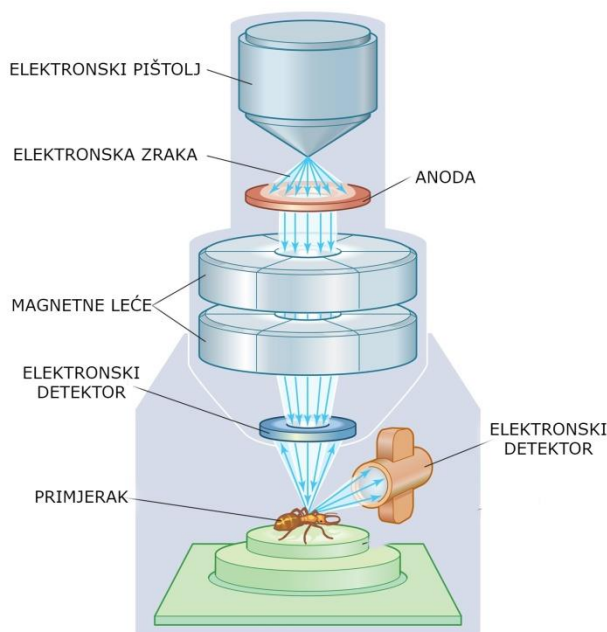
Nedostaci AFM-a su:

- Uzorci čije se površine razlikuju za nekoliko μm ne mogu se izmjeriti.
- Nemogućnost mjerenja velikih uzoraka zato što je potrebna prethodna obrada i predobrada.
- Analiza za svaki uzorak zahtjeva vrijeme .
- Poteškoće u pozicioniranju zbog sužavanja vidnog polja [24].

AFM mikroskopi nisu samo ograničeni na topografska mjerenja [25]. Oni se široko koriste za određivanje električnih i mehaničkih svojstava materijala. Takvo određivanje se također temelji na varijacijama kontaktnog načina i ponekad se dodaje specijalizirana sonda. Mikroskop piezometričkih sila (engl. *Piezoresponse force microscopy* – PFM) jedan je od primjera koji koristi AFM mikroskope za elektromehaničko spajanje materijalnog sustava preko vrha sonde [26].

3.1.2. Skenirajući elektronski mikroskop

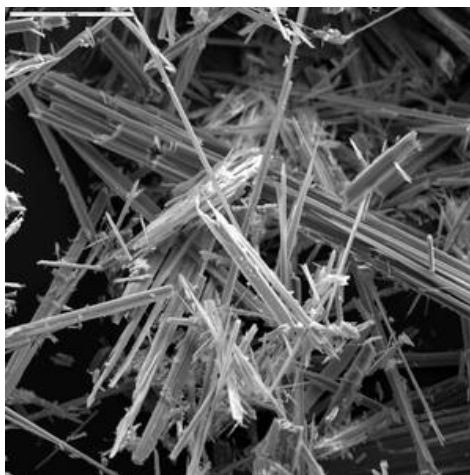
Skenirajući elektronski mikroskop (engl. *Scanning Electron Microscope* – SEM) je vrsta elektronskog mikroskopa koji proizvodi sliku uzorka tako da skenira površinu snopom fokusiranih elektrona relativno niske energije. SEM-ovi sadrže magnetne leće koji fokusiraju snop elektrona poslan iz elektronskog pištolja, koji prolazi kroz površinu uzorka. Nakon toga se elektroni odbijaju od površine i bivaju prikupljeni uz pomoć raznih detektora za prikupljanje koji te informacije pretvaraju u crno-bijelu sliku. Ponekad se koriste i vakuumske pumpe koje fizički uklanjaju zrak kako bi snop elektrona mogao neometano putovati do uzorka bez da se sudara s molekulama zraka [27].



Slika 17. Princip rada SEM mikroskopa [28]

Prednosti koje nudi SEM je velika širina primjene u proučavanju čvrstih materijala, jednostavno je korištenje i uglavnom je potrebna minimalna priprema uzoraka. Prikupljanje slika je jako brzo, za neke aplikacije i do 5 minuta po slici. Moderni SEM generiraju formate u digitalnim oblicima koji se mogu lako prenositi. [Slika 18]

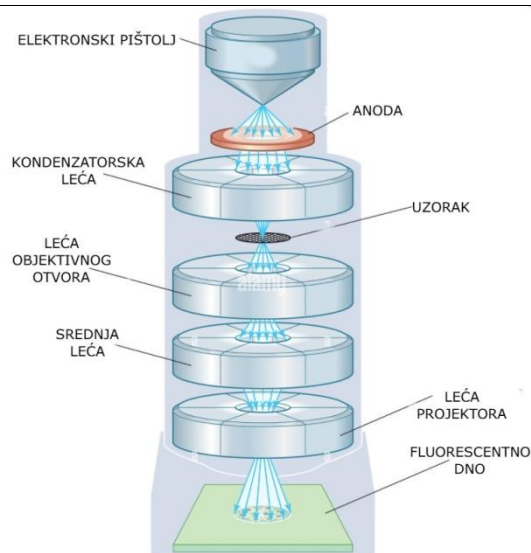
Jedan od glavnih nedostataka SEM-a je veličina uzoraka. Oni moraju biti čvrsti i moraju stati u vakuumsku komoru [29].



Slika 18. SEM slika minerala [29]

3.1.2.1. *Transmisijski elektronski mikroskop*

Transmisijski elektronski mikroskop (engl. *Transmission Electron Microscopy* – TEM) je mikroskop koji koristi snop elektrona za vizualizaciju uzoraka i generiranje slike, koja može biti povećana i do 2 milijuna puta. Elektronski top koji se nalazi na vrhu TEM-a emitira elektrone koji putuju kroz vakuumsku cijev. TEM koristi elektromagnetnu leću koja fokusira elektrone u jako fini snop koji kasnije prolazi kroz uzorak. Uzorak je jako tanak, a elektroni se nakon prolaska kroz uzorak raspršuju ili udaraju od dno mikroskopa [Slika 19] [30].



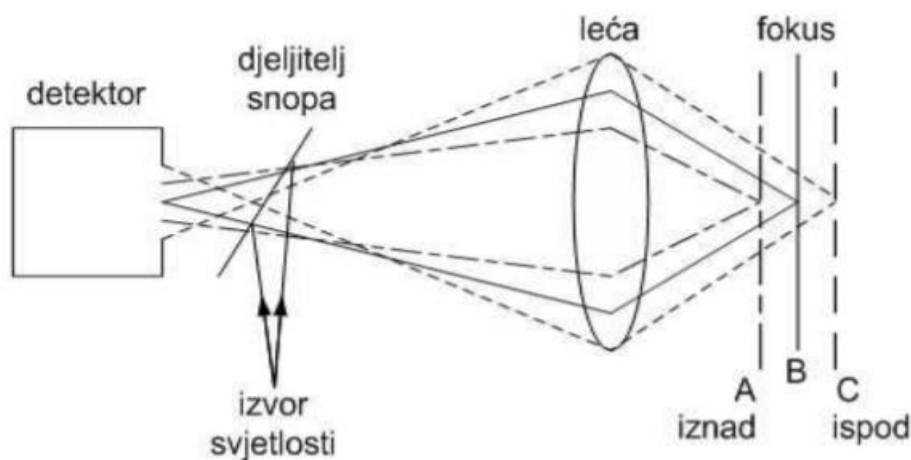
Slika 19. Princip rada TEM mikroskopa [31]

3.2. Optički uređaji

Optički uređaji se dijele na uređaje na principu fokusa, interferometrijske mikroskope i elipsometre.

3.2.1. Uređaji na principu fokusa

Uređaji na principu detekcije fokusa djeluju tako da skupljaju defokusirane signale na uzorak. Skeniranje se može ostvariti na dva načina pomicanjem uzorka ili pomicanjem svjetlosti. Slika 20. prikazuje princip rada ovih uređaja.



Slika 20. Mjerni princip metoda na principu fokusa [32]

Osnovne metode koje rade na princip fokusa su:

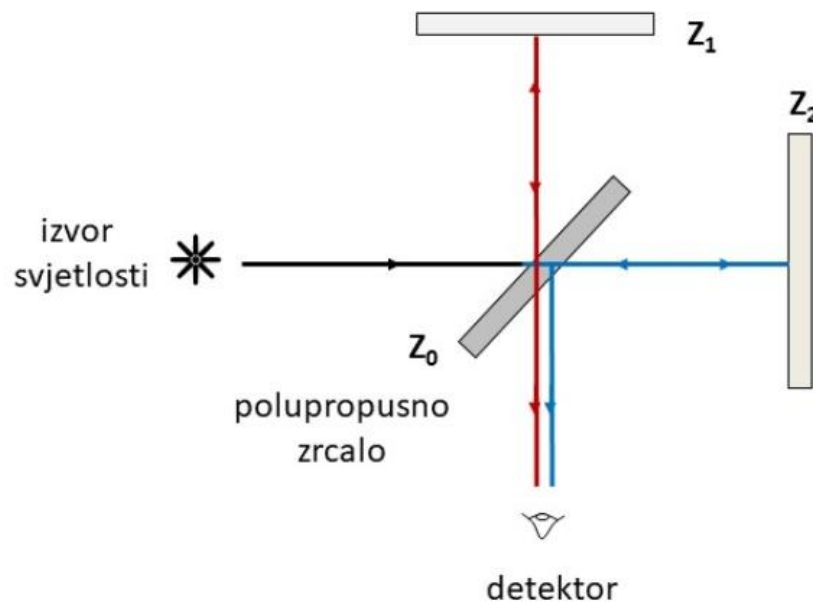
- Detekcija intenziteta
- Diferencijalna detekcija
- Kritični kut
- Astigmatska metoda
- Foucaultova metoda
- Kosog snopa
- Greške fokusa

Nedostaci ove metode su osjetljivost na nagib površine, reflektiranje od uzorka, osjetljivost na nečistoće itd. [15].

3.2.2. Interferometrijski mikroskopi

Interferencija svjetlosti je djelovanje najmanje dva toka iz različitih izvora koji dovode do pojačanja ili slabljenja intenziteta rezultantnog vala. Dva parametra su najvažnija kod interferencije, a to su amplituda i faza. Da bi se opazila interferencija, valovi moraju biti koherentni.

Jedan od prvih modela interferometrijskog mikroskopa je Michelsonov interferometar [Slika 21.]. Na slici se vidi izvor svjetlosti koji šalje val do polupropusnog zrcala. Nakon toga jedan val ide do nepomičnog zrcala (Z_1), a drugi do pomičnog zrcala (Z_2). Reflektirane zrake se nakon toga usmjeravaju na detektor i zbog razlike u prijeđenim optičkim putevima dobivamo interferenciju [15].



Slika 21. Princip rada Michelsonovog interferometra [33]

Prema načinu rada ovi se mikroskopi mogu podijeliti na:

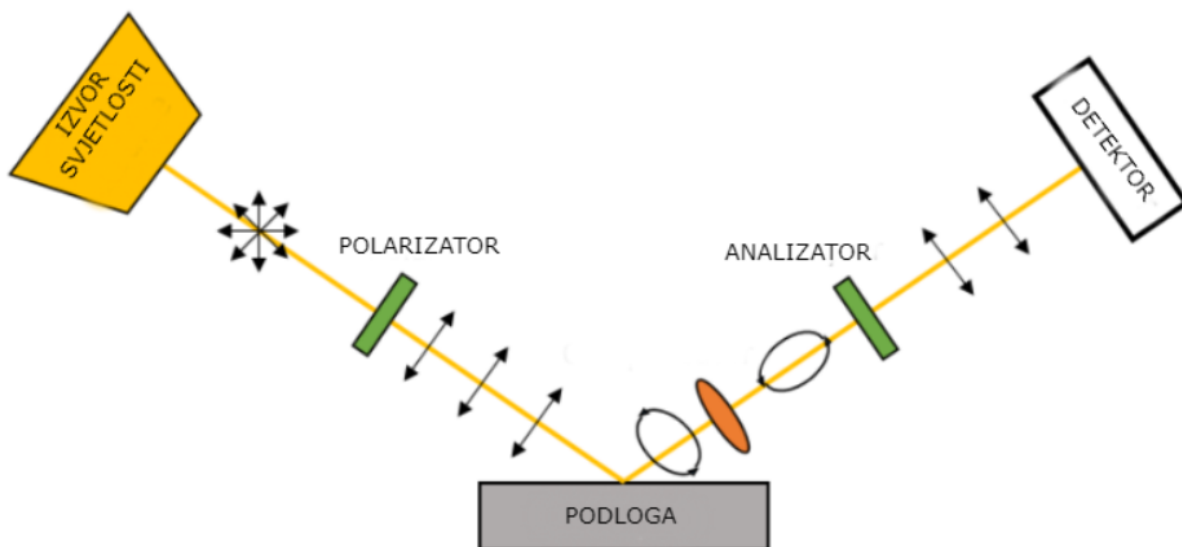
- Mikroskopi koji mjere visinu hrapavosti
- Mikroskopi koji mjere pomak u fazi
- Skenirajući diferencijalni mikroskopi
- Mikroskopi s „bijelim svjetlom“

Prednosti ovih mikroskopa su mogućnost istovremenog mjerenja hrapavosti i valovitosti, mogućnost analiziranja velikog mjernog područja, sub-nanometarska rezolucija u vertikalnom smjeru, a nedostatak je što uzorak mora imati optičku konstantu koja se ne mijenja po označenom području [32].

3.2.3. Elipsometri

Elipsometrija mjeri promjenu polarizacije koja je predstavljena kao omjer amplitude (Ψ) i fazne razlike (Δ). Ona se najčešće koristi za mjerenje debljine filma i optičkih konstanti [34].

Elipsometar je dizajniran za mjerenje faznog pomaka između s i p polarizirane svjetlosti. Svjetlost koja prolazi kroz polarizator je linearna i kao takva dolazi na pločicu. Nakon odlaska s pločice svjetlost je eliptično polarizirana i sa sobom „nosi“ informacije o debljini filma i indeksu loma. Eliptično polarizirana svjetlost će zatim proći kroz analizator i ponovo će postati linearna. Takva svjetlost odlazi do detektora gdje se mjeri [Slika 22] [35].



Slika 22. Shematski prikaz elipsometra [35]

Prednost elipsometrije je određivanje debljine i indeksa loma prozirnog tankog filma na podlozi. Ona je brza i može se izvoditi u različitim okruženjima. Najvažniji parametar elipsometrije je što izmjereni parametri ne ovise intenzitetu mjerne zrake. Ogrebotine, hrapavosti i ostali defekti ne stvaraju problem kod elipsometrije. Te neidealnosti raspršuju mjerni snop tako da ta svjetlost ne ulazi u detektor polarizacijskog stanja elipsometra [36].

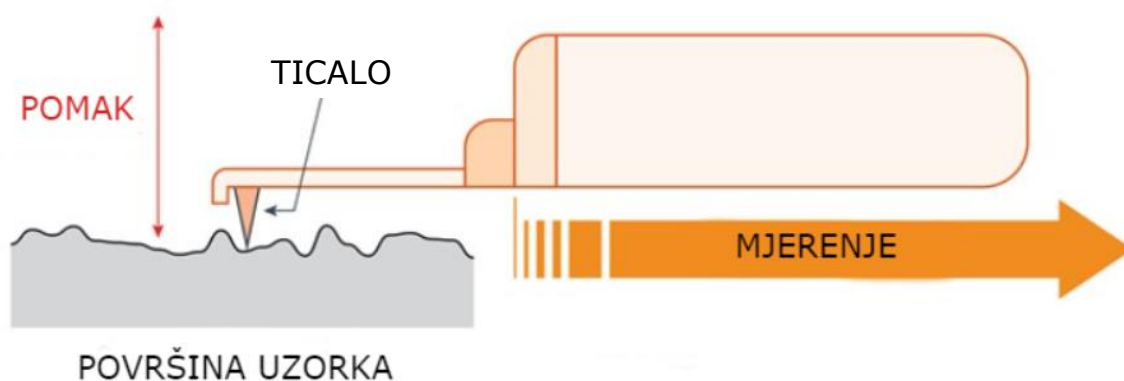
3.3. Uređaji s ticalom

Najpoznatiji uređaj kod kojeg se koristi ticalo je profilometar. Profilometar je mjerni instrument koji se koristi kako bi se utvrdila hrapavost određene površine. U početku se koristio kontaktni profilometar koji je imao metalno ticalo. Razvojem tehnologije došlo je do razvoja beskontaktnog profilometra koji koristi svjetlosnu ili lasersku zraku za skeniranje uzorka, bez da ga dodiruje.

Postoje 2D i 3D uređaji s ticalima. Kod 2D uređaja vrh prelazi preko površine u jednom smjeru, a optički pretvornik pretvara vertikalno gibanje u električni signal. Kod 3D uređaja potrebna je još jedna dimenzija [15].

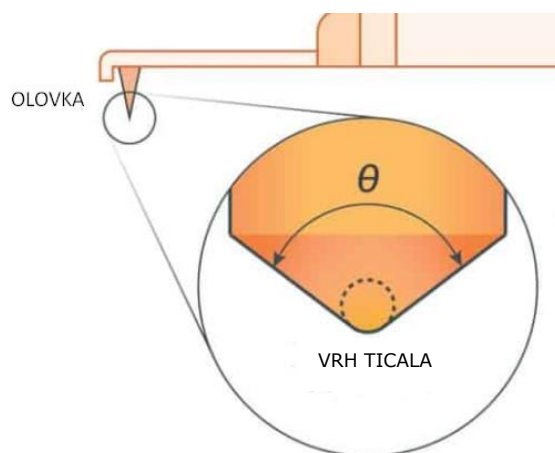
3.3.1. Kontaktni profilometar

Kontaktni profilometri mjere hrapavosti na površini laganim povlačenjem ticala po površini. Vrh ticala se kreće pravocrtno preko dolova i brjegova [Slika 23.][37].



Slika 23. Način rada kontaktnog profilometra [37]

Električnim putem se prate promjene u visini ticala te se stvara izmjereni profil. Slika 24. prikazuje vrh ticala koji je sferni, a ticalo je konusnog oblika. Vrh ticala je uglavnom izrađen od dijamanta ili safira [37].



Slika 24. Prikaz vrha ticala [37]

Kontaktni profilometri se obično koristi za mjerenje hrapavosti prilikom završne obrade. Brzina ticala je oko 1 mm/s, a radijus vrha ticala može biti do nekoliko mikrometara.

Kontaktne profilometre imaju mnoge prednosti. Za razliku od beskontaktnih profilometara, kontaktne nisu osjetljive na ulje i prašinu. Njihova točnost ne ovisi o optičkim karakteristikama površine i jeftiniji su.

Najveći nedostaci ovog mjerenja su problemi s ticalom. Vrh ticala može stvoriti ogrebotine na mekim materijalima. Nakon određenog vremena vrh ticala se potroši te ga je potrebno zamijeniti. Istrošen vrh ticala ili izgreban materijal nam mogu dati pogrešne informacije o hrapavosti površine [37].

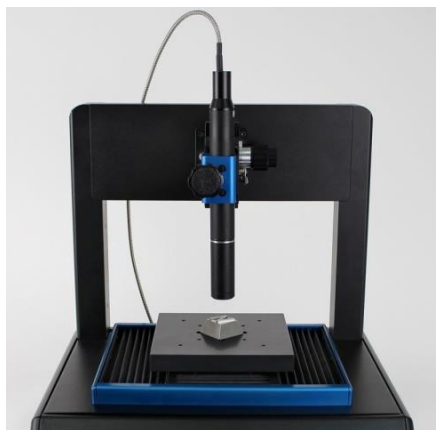
3.3.2. *Beskontaktni profilometar*

Beskontaktni profilometar koristi tehnologiju aksijalnog kromatizma i može izmjeriti bilo koju površinu bez prethodne pripreme. Mogu se mjeriti nano- i makrovisine bez utjecaja reflektivnosti, zakrivljenosti i prozirnosti [38]. S obzirom na to da nema kontakta s površinom, optički ili beskontaktni profilometri prate topografiju površine i određuju hrapavost bez oštećenja površine. Mogu se koristiti za mjerenje hrapavosti različitih materijala u rasponu od tvrdih metala do mekih polimera [39].

Važne karakteristike beskontaktnih optičkih profilometara su:

- Izvor zelenog svjetla kao standard i interferometrija bijelog svjetla.
- Pruža slike velike rezolucije čak i pri velikom povećanju.
- Može raditi i u načinu s faznim i s vertikalnim.
- Posjeduje napredni softver za spajanje slika u veliki kolaž.
- Može raditi u vrlo širokim uvjetima okoline.

Slika 25. prikazuje jedan tip beskontaktnog profilometra.



Slika 25. Profilometar [40]

3.4. Usporedba značajki skupina mjernih uređaja

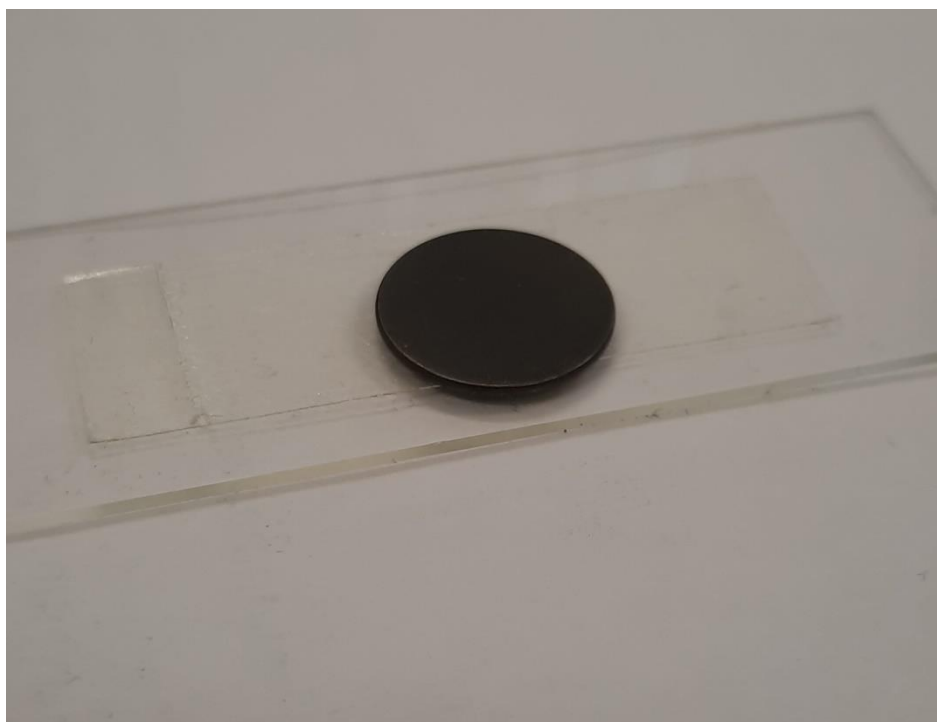
Tablica 2. prikazuje usporedbu triju skupina mjernih uređaja koji se koriste u nanomjeriteljstvu s obzirom na različite značajke.

Tablica 2. Usporedba značajki različitih skupina mjernih uređaja [15]

| <i>ZNAČAJKA UREĐAJA</i> | <i>UREĐAJI S TICALOM</i> | <i>OPTIČKI SUSTAVI</i> | <i>SKENIRAJUĆI MIKROKOPI</i> |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| Vertikalna rezolucija | visoka | visoka | vrlo visoka |
| Vertikalni raspon | velik | malen | jako malen |
| Uzdužna rezolucija | srednja | visoka | vrlo visoka |
| Uzdužni raspon | velik | srednji | jako malen |
| Način mjerenja | kontaktno | beskontaktno | Beskontaktno |
| Vrijeme za pripremu uzorka i uređaja | kratko | dosta dugo | dugo |
| Vrijeme mjerenja | dugo | kratko | kratko |
| Cijena uređaja | srednja | srednja | visoka |
| Utjecaj nagiba površine | ne | da | da |
| Osjetljivost na utjecaj okoline | nije jako osjetljiv | osjetljiv | jako osjetljiv |
| Utjecaj refleksivnosti površina | ne | da | ne |
| Ovisnost o provodljivosti površina | ne | da | da |
| Mogućnost oštećenja površine | lagano | ne | ne |

4. MJERENJE HRAPAVOSTI

Eksperimentalni dio rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Za mjerenje je izabran cilindrični uzorak od nehrđajućeg čelika [Slika 26.]. Mjerenja su provedena na elektroničko-mehaničkom uređaju s ticalom i mikroskopu atomskih sila.



Slika 26. Uzorak za mjerenje

4.1. Mjerenje na mikroskopu atomskih sila (AFM)

Provedena su tri skeniranja na mikroskopu atomskih sila. Parametri veličine slike, brzine skeniranja i rezolucije su držani konstantnim, a mijenjalo se područje skeniranja. Povećanjem brzine skeniranja može se skratiti vrijeme skeniranja. Veliko povećanje brzine skeniranja može dovesti do oštećenja ticala što u konačnici rezultira manjom točnosti rezultata. Zbog velikog broja prolaza brže se troši vrh ticala [41]. Odabrani ulazni parametri kod mjerenja mikroskopom atomskih sila su:

- veličina skeniranog područja: $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$
- rezolucija skeniranja: 256
- brzina skeniranja: $50 \mu\text{m/s}$

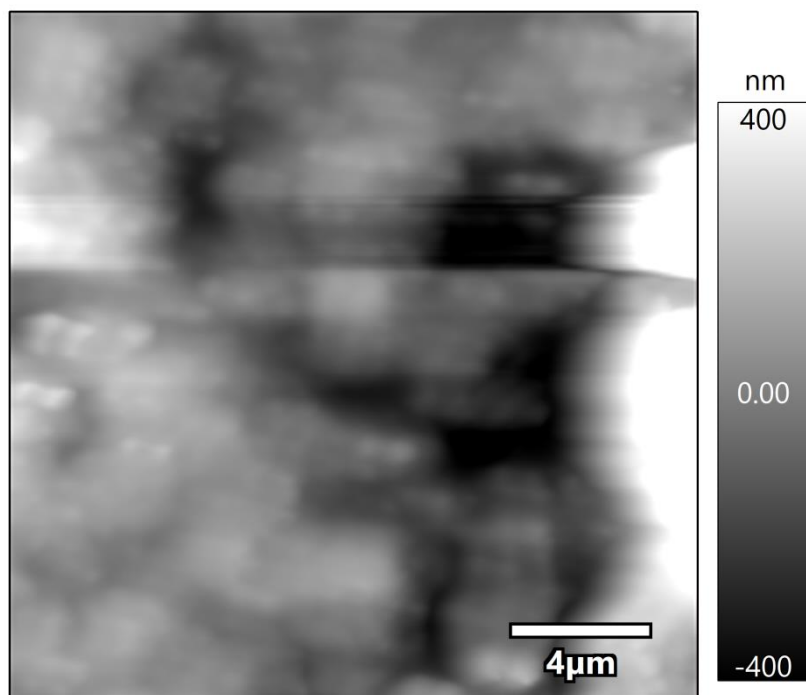
Tablica 3. pokazuje parametre dobivene prilikom mjerenja hrapavosti uzorka na različitim područjima skeniranja.

Tablica 3. Parametri dobiveni pomoću AFM-a

| Parametar topografije | <i>Sq</i> | <i>Ssk</i> | <i>Sku</i> | <i>Sp</i> | <i>Sv</i> | <i>Sz</i> | <i>Sa</i> |
|------------------------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Mjerna jedinica | nm | – | – | nm | nm | nm | nm |
| Mjesto 1 | 84,28 | 0,28 | 4,30 | 408,23 | 341,09 | 749,32 | 63,25 |
| Mjesto 2 | 113,25 | -0,42 | 3,11 | 303,09 | 450,72 | 753,82 | 90,88 |
| Mjesto 3 | 147,01 | -0,47 | 4,12 | 490,77 | 682,14 | 1172,91 | 112,64 |

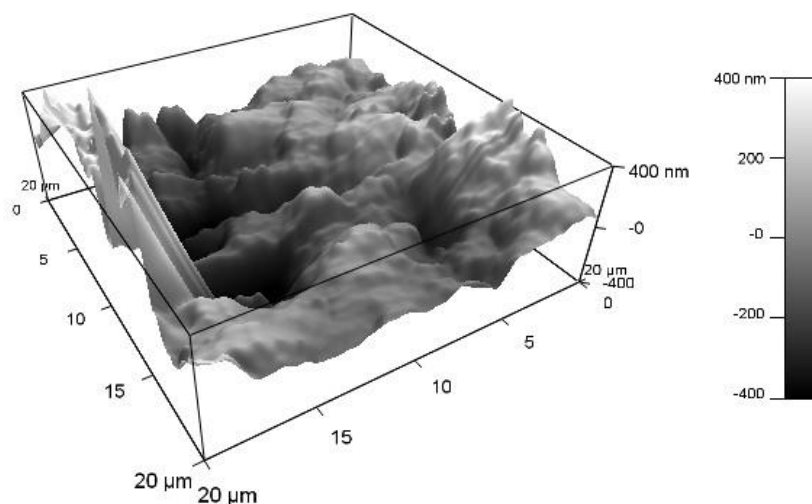
AFM nudi dvodimenzionalni i trodimenzionalni prikaz zapisa s površine materijala. Ovi prikazi dobiveni AFM-om daju uvid u izgled površine ispitivanog uzorka. U radu su prikazani samo neki od primjera kakve se sve slike mogu dobiti pomoću mikroskopa atomskih sila. Obrada slike u nekom od dostupnih programa za analizu slike u pravilu se podrazumijeva [42]. Ti su paketi namijenjeni za obradu i analizu slika, a moguće je i eliminirati artefakte koji se nalazi na slici [39].

Slika 27. prikazuje 2D zapis s površine uzorka. Razlike u visinama prikazane su različitim nijansama sive boje. Crna boja predstavlja dolove, a bijela brijegove. Kvaliteta slika ovisi o rezoluciji skeniranja. Što je rezolucija skeniranja veća, kvalitetniji će biti prikazi površina.



Slika 27. 2D prikaz skeniranog područja

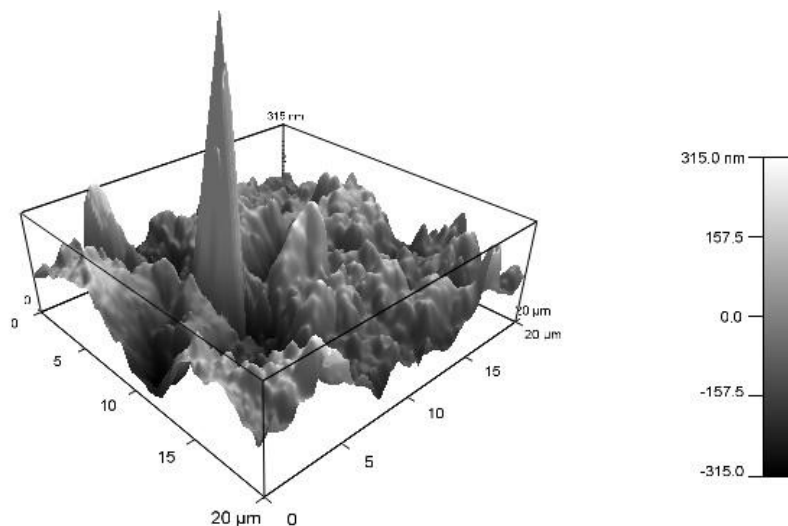
3D prikaz nudi model kojeg je moguće okretati te tako vidjeti stvarno stanje površine koje je golim okom nevidljivo. Njihova kvaliteta također ovisi o rezoluciji skeniranja.



Slika 28. 3D prikaz skeniranog područja

Slika 29. prikazuje 3D prikaz kao rezultat mjerenja dobiven AFM-om. Jasno se vidi pojava artefakta, odnosno elementa koji se nalazi na slici, ali se ne nalazi na samom predmetu

mjerenja. Razni čimbenici mogu uzrokovati pojavu artefakata. Najčešće se artefakti pojavljuju zbog istrošenog ili oštećenog ticala. S obzirom na to da se pojavom artefakta kakvog prikazuje Slika 29. značajno se mijenjaju parametri topografije površine, koji opisuju stanje površine izmjenjenog uzorka, takvi rezultati nisu bili korišteni u daljnjoj analizi.



Slika 29. 3D prikaz skeniranog područja

4.2. Mjerenje primjenom električno mehaničkog uređaja s ticalom

Za ovo mjerenje korišten je isti uzorak. Mjerenje se izvodilo na uređaju s ticalom koji se nalazi na FSB-u [Slika 30].



Slika 30. Uređaj s ticalom

Mjerenje su provedena na tri različita mjesta na istom uzorku. Tablica 4. Parametri dobiveni pomoću uređaja s ticalom prikazuje parametre koji su dobiveni mjerenjem na mehaničkom uređaju s ticalom. Prije samog mjerenja odabrana je granična vrijednost filtra $\lambda_c = 0,80$ mm.

Tablica 4. Parametri dobiveni pomoću uređaja s ticalom

| Parametar topografije | Ra | Rz |
|-----------------------|---------------|---------------|
| Mjerna jedinica | μm | μm |
| Prvo mjerenje | 0,24 | 1,9 |
| Drugo mjerenje | 0,22 | 1,7 |
| Treće mjerenje | 0,24 | 2,3 |

S ciljem usporedbe rezultata mjerenja dobivenih mikroskopom atomskih sila i elektromehaničkog uređaja s ticalom, odnosno usporedbe rezultata mjerenja 2D i 3D parametara topografije, provedeni su t -testovi. Za provedbu t -testa korišten je softverski paket Minitab 19 (probna verzija). Odabrana razina značajnosti testa iznosi $\alpha = 5\%$, a nulta i alternativna hipoteza glase:

$$H_0: Ra = Sa \quad (17)$$

$$H_1: Ra \neq Sa \quad (18)$$

Provedenom analizom dolazi se do P -vrijednosti [Tablica 5.], na temelju koje se donose zaključci o (ne)odbacivanju nulte hipoteze.

Tablica 5. t -test za parametre Ra i Sa

| | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------------|
| Nulta hipoteza | | $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ |
| Alternativna hipoteza | | $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ |
| T-Vrijednost | DF | P-Vrijednost |
| 9,16 | 2 | 0,012 |

Vidi se da P-vrijednost iznosi 0,012, što je manje od odabrane značajnosti testa $\alpha = 0,05$, a što znači da postoji dovoljno dokaza da se odbaci nulta hipoteza. Drugim riječima, postoji statistički značajna razlika između parametara R_a i S_a .

Ponovno je proveden t -test, ali ovog puta za parametre R_z i S_z . Nulta i alternativna hipoteza glase:

$$H_0: R_z = S_z \quad (19)$$

$$H_1: R_z \neq S_z \quad (20)$$

Provedenom analizom dolazi se do P -vrijednosti u iznosu od 0,024 [Tablica 6.], stoga se odbacuje postavljena nulta hipoteza. Dakle, postoji statistički značajna razlika između parametara R_z i S_z .

Tablica 6. t -test za parametre R_z i S_z

| | | |
|-----------------------|-----------|-----------------------------|
| Nulta hipoteza | | $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ |
| Alternativna hipoteza | | $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ |
| T-Vrijednost | DF | P-Vrijednost |
| 4,77 | 3 | 0,018 |

Provedenim t -testovima može se zaključiti da ne postoji povezanost prostornih i linijskih parametara topografije.

5. ZAKLJUČAK

Mjeriteljstvo je sastavni dio inženjerstva, znanosti, proizvodnog procesa i svakodnevnog života. U današnjem svijetu mjeriteljstva topografije površine definirane su ISO norme koje su jedan od glavnih uvijeta za uspostavljanje mjernog jedinstva na tom području. Te norme daju smjernice za pravilno korištenje parametara topografije te za različite metode koje se koriste na području mjeriteljstva. Ipak nisu sve ISO norme u uporabi. S vremenom se norme ispravljaju ili nadopunjuju tako da se neke stare norme povuku iz upotrebe.

Skenirajući mikroskopi se dijele na mikroskope sa skenirajućim ticalom i skenirajuće elektronske mikroskope. Najpoznatiji skenirajući mikroskop s ticalom je mikroskop atomskih sila (AFM) koji je korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Njegova prednost je mogućnost mjerenja raznih materijala. Zbog svoje jednostavne primjene i zbog mogućnosti skeniranja u visokoj rezoluciji, AFM se danas koristi u mnogim industrijama.

Električno mehanički uređaj s ticalom je drugi uređaj koji se koristio za eksperimentalni dio rada. Uređaji s ticalom su najdulje u primjeni ispitivanja hrapavosti površine. Oni prelaskom ticala po površini stvaraju mehaničko gibanje koje se pretvara u električni signal. Na osnovu tog signala stvara se slika profila površine iz koje možemo dobiti parametre hrapavosti.

S ciljem analize topografije površine i usporedbe rezultata, provedeno je mjerenje topografije površine primjenom elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom i mikroskopa atomskih sila. Za dobivene rezultate utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika između linijskih (2D) i prostornih (3D) parametara topografije.

Današnja znanost zahtjeva od uređaja preciznija mjerenja i što bolje opisivanje površine. Pomoću uređaja s ticalom dobivaju se parametri hrapavosti samo za određenu liniju hrapavosti. S obzirom na to da nije obuhvaćena cijela površina, takvi parametri se ne mogu uzeti kao srednja vrijednost hrapavosti površine. Dok s druge strane, pomoću AFM-a se dobivaju parametri hrapavosti na promatranoj površini. I to je jedan od razloga zašto AFM ima široku primjenu.

LITERATURA

- [1] “Biserka Runje: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, 2014.”.
- [2] L. Turkalj, “Procjena sastavnica mjerne nesigurnosti prostornih parametara topografije dobivenih primjenom mikroskopa atomskih sila,” info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Department of Quality. Chair of Precise Measurement and Quality, 2021. Pristupljeno dana 20. veljače 2022. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:097392>
- [3] “ISO 3274:1996(en), Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.”
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3274:ed-2:v1:en> (pristupljeno dana 20. veljače 2022).
- [4] “ISO 13565-1:1996,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/02/22/22279.html> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).
- [5] “ISO 5436-1:2000(en), Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Measurement standards — Part 1: Material measures.”
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5436:-1:ed-1:v1:en> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).
- [6] “ISO 5436-2:2012,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/12/61261.html> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).
- [7] “ISO 12179:2021,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/07/27/72758.html> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).
- [8] “ISO 21920-1:2021,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/07/21/72196.html> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).
- [9] “ISO 21920-2:2021,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/07/22/72226.html> (pristupljeno dana 21. veljače 2022).

- [10] “ISO 25178-1:2016,” *ISO*.
<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/60/46065.html> (pristupljeno dana 20. veljače 2022).
- [11] R. Leach, Ed., *Characterisation of Areal Surface Texture*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36458-7.
- [12] “Sq (Root mean square height) | Area Roughness Parameters | Surface roughness parameters in ISO 25178 | List of parameters useful for design/inspection other than Sa and Sz | Solving the questions about profile and surface roughness measurements! Introduction to ‘Roughness’ | KEYENCE International Belgium.”
https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/surface/tab01_c.jsp (pristupljeno dana 12. siječnja 2022).
- [13] “Introduction to Surface Roughness Measurement.pdf.”
- [14] “Surface Metrology Guide - Digital Surf.” <https://guide.digitalsurf.com/en/guide.html> (pristupljeno dana 12. siječnja 2022).
- [15] “G. Barišić: Razvoj etalona hrapavosti za nanomjeriteljstvo, Doktorska disertacija, 2011”.
- [16] “What is an SPM?” <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/what-is-an-spm.html> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [17] C. F. Quate, “Vacuum Tunneling: A New Technique for Microscopy,” *Phys. Today*, vol. 39, no. 8, pp. 26–33, Aug. 1986, doi: 10.1063/1.881071.
- [18] “atomic-force-microscopy-guide.pdf.” Pristupljeno dana 5. veljače 2022. [Online]. Available: <https://www.npl.co.uk/surface-technology/atomic-force-microscopy-guide>
- [19] “Atomic Force Microscopy,” *Nanoscience Instruments*.
<https://www.nanoscience.com/techniques/atomic-force-microscopy/> (pristupljeno dana 4. veljače 2022).
- [20] A. Razumić, A. Horvatić Novak, B. Štrbac, and B. Runje, “Influence of scan parameters on surface topography obtained via AFM,” *Etikum 2021*, p. 17, 2021.
- [21] F. Razumić, “Analiza topografije površine primjenom mikroskopa atomskih sila,” [info:eu-repo/semantics/bachelorThesis](https://info.eu-repo.semantics/bachelorThesis), University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2020. Pristupljeno dana 24. veljače 2022. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:925446>

- [22] “Načelo mikroskopa atomske sile | AFM skeniranje | Kako AFM radi.”
<https://www.parksystems.com/medias/nano-academy/how-afm-works> (pristupljeno dana 4. veljače 2022).
- [23] “File:Afm-schematic.png - FBSwiki.”
<https://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/index.php?title=File:Afm-schematic.png> (pristupljeno dana 4. veljače 2022).
- [24] “Atomic force microscope (AFM) | Instruments used for roughness measurements | Solving the questions about profile and surface roughness measurements! Introduction to ‘Roughness’ | KEYENCE International Belgium.”
https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/equipment/surface_02.jsp (pristupljeno dana 4. veljače 2022).
- [25] A. Razumić, A. Horvatić Novak, B. Runje, and M. Carević, “Measurement of surface topography using an atomic force microscope,” 2020, Pristupljeno dana 4. veljače 2022. [Online]. Available: <https://www.bib.irb.hr/1094655>
- [26] “AFM Principle - How Does an Atomic Force Microscope Work?,” *Oxford Instruments*. <https://afm.oxinst.com/outreach/how-does-an-afm-microscope-work> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [27] “Skenirajući elektronski mikroskop Rijedak alat za studente SC – Schoolcraft College.” <https://www.schoolcraft.edu/2021/07/19/news/scanning-electron-microscope-rare-tool-for-sc-students/> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [28] “skenirajući elektronski mikroskop | Definicija, slike, upotrebe, prednosti i činjenice | Britannica.” <https://www.britannica.com/technology/scanning-electron-microscope> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [29] “Scanning Electron Microscopy (SEM),” *Techniques*.
https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [30] “The Transmission Electron Microscope | CCBER.” <https://www.ccber.ucsb.edu/ucsb-natural-history-collections-botanical-plant-anatomy/transmission-electron-microscope> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [31] A. Limited, “The components of a transmission electron microscope (TEM Stock Photo - Alamy.” <https://www.alamy.com/stock-photo-the-components-of-a-transmission-electron-microscope-tem-24898253.html> (pristupljeno dana 5. veljače 2022).
- [32] “20_03_2009_diplomski_bc.pdf.” Pristupljeno dana 14. veljače 2022. [Online]. Available: http://repositorij.fsb.hr/582/1/20_03_2009_diplomski_bc.pdf

- [33] “Fizika 4 - 5.2. Specijalna teorija relativnosti, Postulati specijalne teorije relativnosti.” <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/postulati-specijalne-teorije-relativnosti.html> (pristupljeno dana 15. veljače 2022).
- [34] “What is Ellipsometry?,” *J.A. Woollam*. <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/what-is-ellipsometry> (pristupljeno dana 15. veljače 2022).
- [35] A. Rosenberg, D. Hu, H. Chouaib, Z. Tan, and N. Malkova, “Tracking the defects and the band gap of ultra-thin HfO₂ using a multi-oscillator Cody Lorentz model,” *Ožujak* 2018, p. 102. doi: 10.1117/12.2296980.
- [36] “Technology Information,” *Multi-Wavelength Ellipsometers - Film Sense*. <https://film-sense.com/ellipsometry-technology/> (pristupljeno dana 15. veljače 2022).
- [37] “What is a Profilometer? | GD&T Basics.” <https://www.gdandtbasics.com/what-is-a-profilometer/> (pristupljeno dana 16. veljače 2022).
- [38] K. M. P. Editor, “Portable And Flexible Non-Contact Profilometer,” *Metrology and Quality News - Online Magazine*, May 17, 2019. <https://metrology.news/portable-and-flexible-non-contact-profilometer/> (pristupljeno dana 16. veljače 2022).
- [39] “Non-Contact Optical Profilometer.” <https://www.iitk.ac.in/dordoldn/non-contact-optical-profilometer> (pristupljeno dana 16. veljače 2022).
- [40] “Profilometer,” *Wikipedia*. Jun. 25, 2021. Pristupljeno dana 16. veljače 2022. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Profilometer&oldid=1030325743>
- [41] M. Carević, “Analiza utjecajnih veličina na mjerenje parametara topografije površine kod primjene mikroskopa atomskih sila,” *info:eu-repo/semantics/masterThesis*, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2020. Pristupljeno dana 20. veljače 2022. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:017499>
- [42] A. Razumić, A. Horvatić Novak, B. Štrbac, V. Alar, and B. Runje, “The influence of filtering on surface topography parameters obtained by the AFM,” *21th Int. Conf. Mater. Tribol. Recycl. MATRIB 2021*, p. 418, 2021.