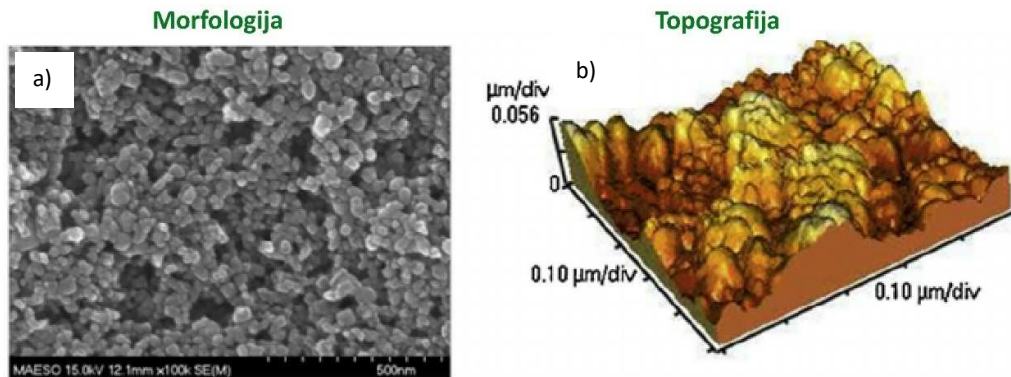


## 6. VEŽBA - TOPOGRAFIJA POVRŠINE

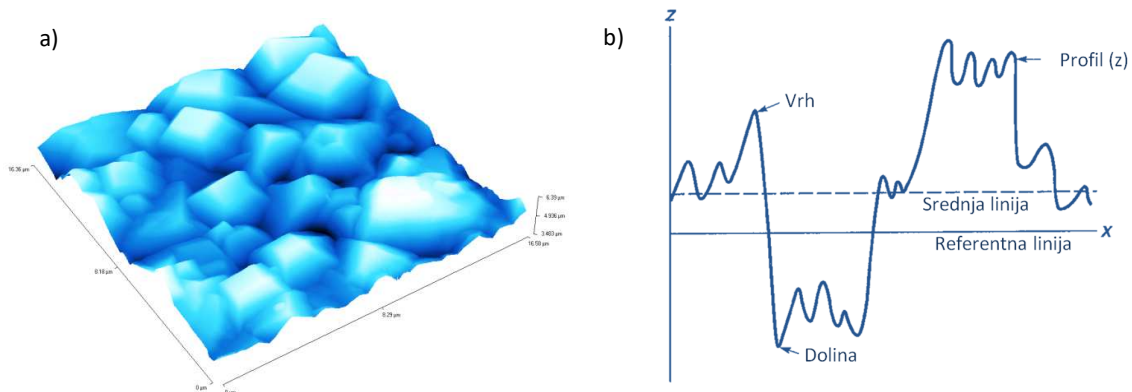
Inženjerske površine znatno odstupaju od idealnog stanja, kako po obliku tako i po hemijskom sastavu i strukturi. Poznavanje stanja površine igra važnu ulogu u utvrđivanju međusobnog odnosa inženjerskih površina i njihovog tribološkog ponašanja.

Pri definisanju ili oceni oblika površine razlikujemo dva osnovna pristupa ili dva osnovna pojma a to su: morfologija površine i topografija površine (slika 6.1). Morfologija površine predstavlja izgled površine, odnosno oblike na toj površini, njenu teksturu i raspored materijala po površini. Morfologija je kvalitativni uvid u oblik površine bez brojčanih vrednosti a može se dobiti na primer primenom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM), slika 6.1 a. Topografija površine je trodimenzionalni izgled površine koja sadži i brojčane podatke o elementima na površini, kao što su visine neravnina itd. Topografija kvantitativno karakteriše površinu i iz nje se mogu izračunati parametri hrapavosti a ovakva merenja se mogu dobiti primenom 3D profilometara ili mikroskopijom atomskih sila (AFM) slika 6.1 b.



Slika 6.1 Morfologija i topografija površine a) SEM snimak površine, b) 3D topografski snimak površine mikroskopijom atomskim silama (AFM)

Svaki deo površine sačinjen je od teksture i hrapavosti koja varira u zavisnosti od načina proizvodnje, kao i strukture dela koji se razmatra. Površina nekog objekta karakteriše se svojom topografijom (slika 6.2 a) i profilom (slika 6.2 b). Dok su ranije najčešće vršena merenja profila, danas se više važnosti pridaje određivanju topografije površine, pri čemu se koristi veliki broj 3D parametara hrapavosti za opisivanje topografije.



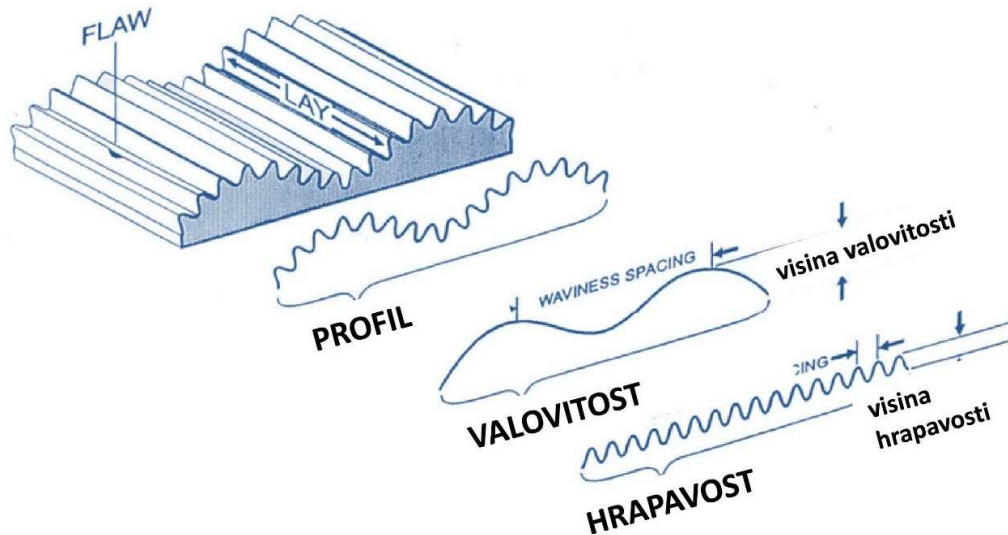
Slika 6.2: a) Topografija dijamanta, b) linija profila u jednom preseku

### OSNOVNI POJMOVI O HRAPAVOSTI TEHNIČKIH POVRŠINA

Osnovni pojmovi o hrapavosti tehničkih površina dati su prema standardu SRPS EN ISO 4287:2014.

**Površinska hrapavost** predstavlja skup mikro-geometrijskih nepravilnosti na površini predmeta, koje su mnogo puta manje od površine celog predmeta. Ove nepravilnosti nastaju tokom obrade radnog predmeta ili mogu biti izazvane drugim uticajima, na primer korozijom površine.

**Profil površine** predstavlja presek stvarne površine sa određenom ravni (vidi Slika 6.2b i Slika 6.3).

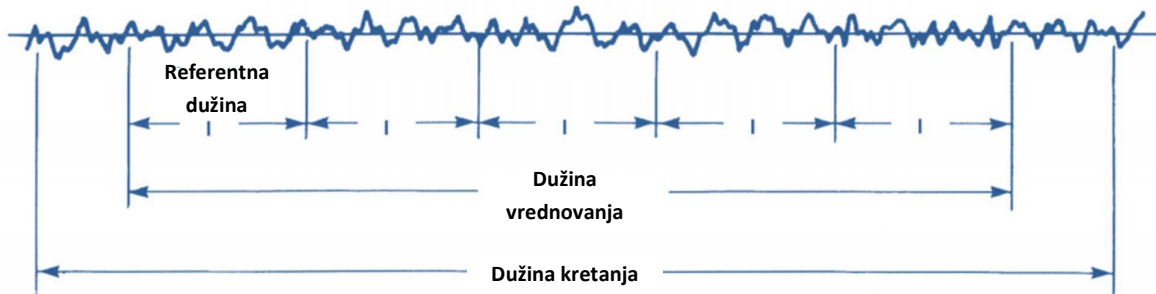


Slika 6.3: Stvarna površina, profil površine, profil valovitosti i profil hrapavosti (1)

**Profil valovitosti** predstavlja profil koji prikazuje nepravilnosti većih talasnih dužina (nepravilnosti koje se javljaju na većim rastojanjima). Ovaj profil dobija se iz osnovnog profila primenom profilnih filtera  $\lambda_f$  i  $\lambda_c$  (vidi Slika 6.3).

**Profil hrapavosti** predstavlja profil koji prikazuje nepravilnosti manjih talasnih dužina (nepravilnosti koje se nalaze na kraćem rastojanju). Dobija se iz osnovnog profila zanemarivanjem komponenti većih talasnih dužina, a primenom profilnog filtera  $\lambda_c$  (vidi Slika 6.3).

**Profilni filter** razdvaja osnovni profil na komponente kratkih talasnih dužina (hrapavost) i velikih talasnih dužina (valovitost). Definiše se standardom SRPS EN ISO 11562:20092.



Slika 6.4: Značajne dužine pri merenju profila površine (1)

**Srednja linija profila** - definiše se posebno za osnovni profil, profil valovitosti i profil hrapavosti. Za osnovni profil dobija se metodom najmanjih kvadrata, tada srednja linija profila deli profil tako da je unutar neke dužine  $l$  zbir kvadrata svih odstupanja profila  $Z$  od te linije najmanji (vidi Slika 6.2b). U slučaju profila valovitosti i profila hrapavosti upotrebljavaju se profilni filteri  $\lambda_c$  i  $\lambda_f$ .

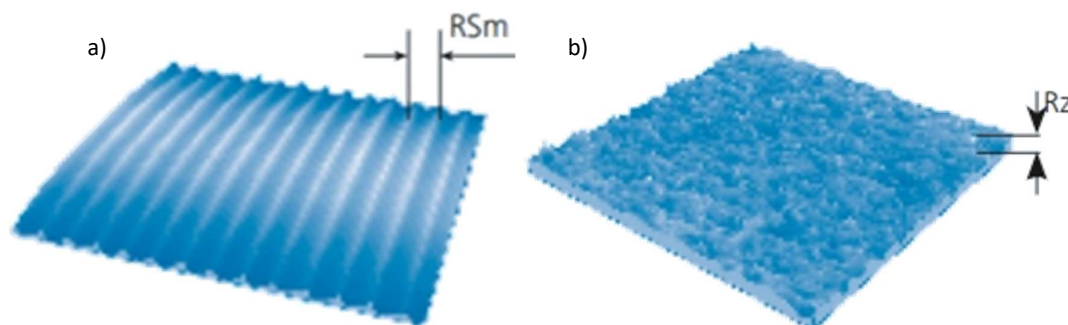
**Referentna dužina** predstavlja dužinu na kojoj se vrše merenja (vidi Slika 6.4). Razlikuje se za osnovni profil, profil valovitosti i hrapavosti. Referentna dužina za profil valovitosti  $l_w$  i hrapavosti  $l_r$  brojačno je jednaka karakterističnoj talasnoj dužini profilnih filtera  $\lambda_f$  i  $\lambda_c$ . Referentna dužina osnovnog profila  $l_p$  jednaka je dužini vrednovanja.

**Dužina vrednovanja**  $L_r$  predstavlja deo dužine kretanja koji se koristi za vrednovanje profila koji se meri. Može da sadrži jednu ili više referentnih dužina (Tabela 6.1). Da bi merenje hrapavosti bilo po standardu dužina vrednovanja se određuje naspram hrapavosti površine na kojoj se vrše merenja iz tabele 6.1, uzimajući u obzir da li se radi o površini sa periodičnim profilom ili sa neperiodičnim profilom, slika 6.5. Hrapavost koja je potrebna za određivanje dužine vrednovanja se određuje probnim merenjem hrapavosti (koje neće biti po standardu).

**Dužina kretanja** predstavlja ukupnu dužinu koja se prelazi u toku snimanja profila.

Tabela 6.1: Profilni filter (Cutoff)  $\lambda$  prema ISO4288 (DIN 4768)

Periodični profili	Neperiodični profili		Granična talasna dužina	Referentna dužina / dužina vrednovanja
širina elemenata $X_s$ (mm)	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$ (mm)	$L_r/l_n$ (mm)
> 0,01 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08	0,08/0,4
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25	0,25/1,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8	0,8/4
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5	2,5/12,5
> 1,3 do 4,0	> 50	> 10	8	8/40



Slika 6.5 Površina sa: a) periodičnim profilom, b) neperiodičnim profilom

### Parametri hrapavosti

Počeci merenja topografije površina datiraju iz 1930. godine, kada su merenja vršena takozvanim profilometrima kod kojih se meri vertikalno pomeranje sonde (igle) prilikom njenog povlačenja po ispitivanoj površini. Prilikom takvih merenja dobijeni su profili površina u obliku dijagrama u kojima je svaka tačka profila definisana sa svojim koordinatama u x, z koordinatnom sistemu. Na osnovu tih profila karakterisala se hrapavost površine. Da bi se brojčano mogle okarakterisati površine sa različitim profilima osmišljene su desetine različitih parametara hrapavosti koji se koriste za te namene. Do danas je razvijeno i više vrsta tehnika kojima se može izmeriti topografija površine u tri dimenzije te su stoga trodimenzionalna merenja danas mnogo zastupljenija. Parametri hrapavosti se mogu podeliti na više načina a osnovina podela je: ako su korišćeni profili za određivanje parametara onda se radi o linijskim (2D) parametrima hrapavosti a ako su korišćena 3D topografska merenja onda su to površinski (3D) parametri hrapavosti (2). Linijski parametri hrapavosti se označavaju sa salovom „R“ a površinski parametri hrapavosti se označavaju sa slovom „S“.

Dalja podela parametara kojima se vrši opis stanja površine je izvršen naspram vrste geometrijskih karakteriska za čiji opis se oni koriste a to su:

- Amplitudni parametri (amplitude parameters) – odnose se na vertikalne karakteristike devijacije površine;
- Parametri razmaka (spacing parameters) – odnose se na horizontalne karakteristike devijacije površine;
- Hibridni parametri (hybrid parameters) – predstavljaju kombinaciju parametara amplitude i parametara razmaka;
- Funkcionalni parametri (functional parameters) – primenjuju se za ocenu nosivosti i sposobnosti zadržavanja fluida.

### **Linijski (2D) parametri hrapavosti – amplitudni parametri**

**R<sub>a</sub> - Prosečna hrapavost, aritmetička srednja hrapavost:** Najčešći parametar za opisivanje hrapavosti, predstavlja aritmetičku sredinu odstupanja profila od srednje linije

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx$$

Ukoliko se na tehničkom crtežu navodi hrapavost, a nije upisano o kom se parametru radi u pitanju je aritmetička srednja hrapavost R<sub>a</sub>. Ovaj parametar ima dobru primenljivost kod nasumičnih površina (*eng. random type surfaces*) kod kojih nema ponavljanja posebne šeme ili izražene usmerenosti. Parametar je koristan za kontrolisane procese kod kojih su uslovi uvek isti. Na primer prilikom kontrole delova koji se obrađuju primenom istog alata, iste brzine rezanja i istog sredstva za podmazivanje i hlađenje. Dodatno, parametar ne može pokazati razliku za različite tipove površina (slika 6.5) jer njegove vrednosti ne zavisi od talasne dužine neravnina, nema razlike u vrednosti za pikove i doline.

**R<sub>q (rms)</sub> - Srednja vrednost kvadratnog odstupanja:** Prosečna vrednost kvadratnog odstupanja profila od srednje linije.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx}$$

Ovaj parametar je osetljiviji na postojanje visokih vrhova (pikova) i dolina od parametra R<sub>a</sub> jer se vrednosti odstupanja dižu na drugi stepen. Primena je slična kao za R<sub>a</sub> s tim da se R<sub>q</sub> češće upotrebljava za opšte slučajeve.

**R<sub>10z</sub> - Srednja vrednost rastojanja između najviše i najniže tačke profila:** Definiše se kao prosečna vrednost rastojanja pet najviših i pet najnižih tačaka.

$$Rz = \frac{P1 + P2 + \dots + P5 - V1 - V2 - \dots - V5}{5}$$

Ovaj parametar je osetljiviji na promene kvaliteta površine jer uzima u obzir najveća, a ne prosečna odstupanja. Sa ovim parametrom često se kombinuje parametar R<sub>max</sub>. R<sub>max</sub> se koristi kada nije dozvoljeno postojanje nijedne greške, npr. ogrebotina na glatkoj površini. Ova dva parametra se kombinuju za praćenje promene kvaliteta površine u toku proizvodnog procesa. Slične vrednosti R<sub>z</sub> i R<sub>max</sub> označavaju ujednačen kvalitet površine, dok značajnije razlike ukazuju na postojanje defekata na površini.

Veći broj savremenih tehnika merenja togografije površina mogu veoma brzo izvršiti 3D merenja velikih zona jedne površine. Za razliku od linijskih (2D) merenja, na osnovu površinskih merenja (3D) se mogu doneti mnogi zaključci o stanju površine kao što su valovitost površine, nagib površine, uvid u detalje na površini kao što su postojanje ogrebotina, brazdi ili kratera. Na početku razvoja oblasti merenja hrapavosti (topografioje) iz površinskih merenja su se proračunavali isti parametri koji se koriste u slučaju linijskih merenja, samo su bili prilagođeni za tri dimenzije. Takvi su na primer parametri S<sub>a</sub>, S<sub>q</sub> i S<sub>z</sub> koji se isto definišu i znače kao i R<sub>a</sub>, R<sub>q</sub> i R<sub>z</sub> ali se odnose na celu površinu.

### **Površinski (3D) parametri - amplitudni parametri**

**S<sub>a</sub> - Prosečna hrapavost, aritmetička srednja hrapavost (eng. average roughness)**

Predstavlja prosečnu vrednost odstupanja profila od „srednje“ ravni, cilindra ili sfere. Za površinu sa N tačaka, određuje se prema izrazu (4):

$$Sa = \sum_{n=1}^N \frac{|Zn - \bar{Z}|}{N}$$

Gde su:  $\bar{Z}$  - srednja visina neravnina; Z<sub>n</sub> - visina n-te tačke.

Aritmetička srednja hrapavost je jedan od prvih parametara korišćen za opisivanje stanja površine. U većini slučajeva se koristi kao glavni faktor za opisivanje stanja površine ili kao referenca. Nažalost, parametar S<sub>a</sub> nije pouzdan, jer površine različitih profila, oblika i frekvencija mogu imati iste vrednosti pomenutog parametra. Odnosi se samo na odstupanje visine i ne zavisi od prostornog rasporeda visina. Pored toga, ne zavisi od „polariteta“

teksture, što znači da će površine sa visokim vrhovima sa jedne i dubokim dolinama sa druge strane imati istu vrednost  $S_a$ . Najviše se koristi za klasifikaciju površina izrađenih istim postupkom.

#### $S_q$ - Srednja vrednost kvadratnog odstupanja - RMS (eng. root mean square roughness)

Za površinu koja se sastoji od  $N$  tačaka, određuje se prema sledećem izrazu:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Z_n - \bar{Z}|^2}$$

Kao i u slučaju  $S_a$ ,  $S_q$  ne zavisi od prostornog rasporeda visina, niti od „polariteta“ teksture. Jedina razlika u odnosu na  $S_a$  jeste da se vrši kvadriranje odstupanja pre određivanja prosečne vrednosti. Ovo znači da se velika odstupanja od srednje vrednosti mogu bolje detektovati primenom  $S_q$  nego  $S_a$ , ali iz istog razloga manja odstupanja utiće manje na  $S_q$  nego na  $S_a$ . Veliki broj teorija povezuje način rasejavanja svetla od površine sa parametrom  $S_q$ , pa se isti najčešće koristi u optici za specifikaciju završnog kvaliteta površine.

#### $S_{sk}$ - Asimetrija površine (eng. surface skewness)

Definiše se sledećim izrazom (5):

$$S_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} |Z_n - \bar{Z}|^3$$

Ovaj parametar predstavlja meru asimetrije površine. Pošto se vrednosti visine tačaka dižu na treći stepen pre usrednjavanja, može se dobiti informacija o „polaritetu“ površine. Površine sa izraženim dubokim dolinama odlikuju se negativnom asimetrijom  $S_{sk} < 0$ , dok se površine sa izraženim pikovima odlikuju pozitivnom asimetrijom  $S_{sk} > 0$ . Za vrednost  $S_{sk} = 0$  kaže se da visine tačaka imaju simetričnu raspodelu kao što je npr. Gausova raspodela. Pošto se vrednosti visina tačaka dižu na treći stepen nekoliko veoma visokih ili veoma niskih tačaka značajno utiće na vrednost parametra. Stoga ponovljivost merenja može biti slaba i potrebno je izvršiti dovoljan broj merenja koji obezbeđuje statistički značajne vrednosti merenog parametra.

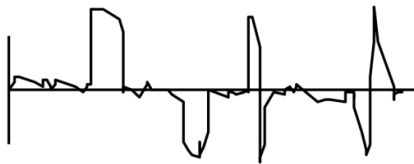
#### $S_{ku}$ - Zaobljenost (eng. kurtosis)

Definiše se sledećim izrazom (5):

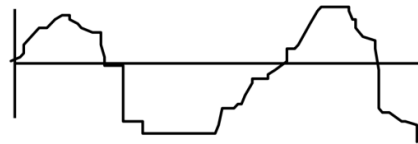
$$S_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} |Z_n - \bar{Z}|^4$$

Može se reći da je „zaobljenost“ mera nasumičnosti i oštine površine. Potpuno nasumična površina odlikuje se faktorom zaobljenosti  $S_{ku} = 3$ . Što je vrednost  $S_{ku}$  dalja od broja 3 površina je manje nasumična. Faktor zaobljenosti imaće vrednost veću od 3 kod površina sa visokim vrhovima ili dubokim dolinama koji odstupaju od normalne raspodele (Slika 6.6a). Površinu koju sačinjavaju „brežuljci“ odlikuje faktor zaobljenosti  $S_{ku} < 3$  (Slika 6.6b).

a)

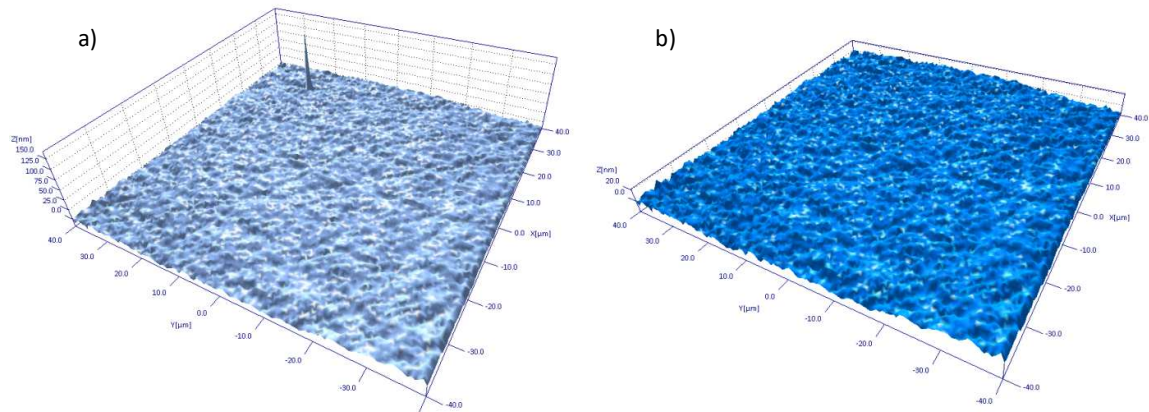


b)



Slika 6.6: Profil a) površine sa izraženim vrhovima/dolinama ( $R_{ku} = 10$ ); b) sporo varirajuće površine ( $R_{ku} = 1.5$ )

Ovaj faktor može da se iskoristi za određivanje površinskih defekata i neuobičajenih vrhova i dolina. Tipičan primer prikazan je na slici Slika 6.7. Slika 6.7a predstavlja tek snimljenu topografiju površine, a Slika 6.7b topografiju nakon uklanjanja visokog vrha koji najverovatnije predstavlja grešku merenja. Za površinu prikazanu na slici Slika 6.7b može se reći da je nasumična i faktor zaobljenosti ima vrednost  $S_{ku} = 3.84$ , dok je vrednost  $S_{ku} = 144.45$  za površinu prikazanu na slici Slika 6.7a, što ukazuje na prisustvo visokog vrha.



Slika 6.7: Topografija površine poliranog čelika: a) tek snimljena, b) nakon uklanjanja visokog vrha

Pošto se vrednosti visina tačaka poddižu na četvrti stepen nekoliko veoma visokih ili veoma niskih tačaka značajno utiče na vrednost parametra. Stoga ponovljivost merenja može biti slaba i potrebno je izvršiti dovoljan broj merenja koji obezbeđuje statistički značajne vrednosti merenog parametra.

#### **S<sub>10z</sub> - Visina deset tačaka (eng. ten point height)**

Definiše se sledećim izrazom:

$$S_{10z} = \frac{1}{5} \left( \sum_{n=1}^5 |z_{pn}| + \sum_{n=1}^5 |z_{vn}| \right)$$

Predstavlja prosečnu visinu pet najviših i pet najnižih tačaka posmatrane površine. Primenjuje se u slučaju zaptivnih površina i na polju prevlaka.

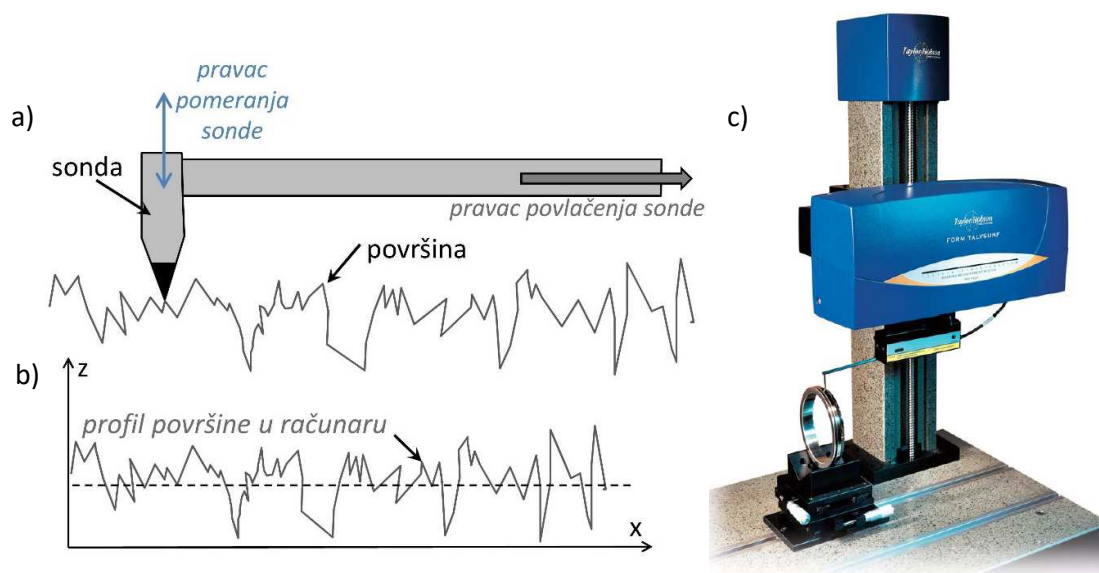
## UREĐAJI ZA MERENJE TOPOGRAFIJE POVRŠINE

Bez obzira na to da li se uređaji koriste samo za dvodimenzionalna (linijska) ili trodimenzionalna (površinska) merenja topografije površine ovi uređaji se zovu profilometri. Ovi uređaji se mogu podeliti u dve grupe u mehaničke i optičke profilometre. Ovi uređaji se koriste za merenje na mikro nivou i na nano nivou. Osim nabrojanih vrsta uređaja, posebna vrsta uređaja koja može da vrši visoko-precizna merenja topografije površina na nano i na atomsku nivou mikrokopi za merenje na principu atomskih sila (AFM, eng. *Atomic force microscopy*).

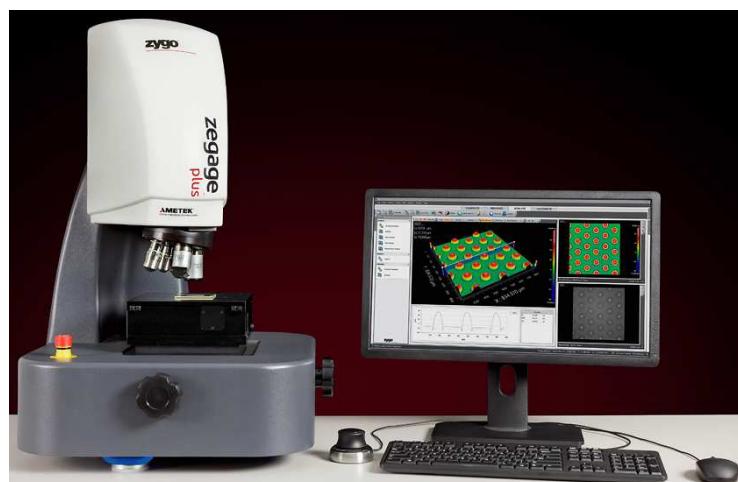
Mehanički profilometar radi tako što se veoma oštra dijamantska igla (sonda) oblika kupe prevlači preko merene površine pri čemu se beleže njena vertikalna pomeranja na tom putu koji prelazi, slika 6.8 a. Podaci koji su izmereni u tom procesu se šalju u računar a kao izlaz iz ovog merenja se dobija jedan profil odnosno dijagram u X-Z koordinatnom sistemu slika 6.8 b. „Z“ koordinate se odnose na visinu neravnina a „X“ određuje njihovu lokaciju na izmerenoj liniji. Uzastopnim merenjem linije po liniji koja se nalazi na međusobnom malom razmaku dobija se niz profila površine. Pravac u kojem se vrši odmicanje za vršenje sledećeg merenja je praktično „Y“ pravac koji će se koristiti za trodimenzionalno predstavljanje merenja u X-Y-Z koordinatnom sistemu. Sastavljanjem niza profila dobija se trodimenzionalna topografska slika. Mehaničkim profilometrima mogu da se vrše merenja na površinama čije su dimenzije i do desetina milimetara velike, jer dužina linija koje se mere mogu da prelaze i 20 do 30mm. Mehanički profilometri mogu imati veoma visoku visinsku rezoluciju od svega nekoliko nanometara (nm), dok im je prostorna rezolucija od 0,5 µm pa na više. Primer mehaničkog profilometra je prikazan na slika 6.8.

Optička profilometrija je metoda koja se zasniva na interferenciji bele svetlosti. Kod te metode se svetlost različitih karakteristika usmerava se kroz veći broj okulara na površinu koja se ispituje i vrši se njeno kontinualno snimanje. Ovim uređajem se momentalno vrši merenje (snimanje) cele površine od interesa a dobijaju se topografske slike kao i metodama mehaničke profilometrije. Najsavremeniji uređaji omogućavaju karakterizaciju površine od 50 mm<sup>2</sup> u jednom merenju. Mogu se detektovati površinski detalji veličine od 0,1 nm pa do 8 mm (3). Za razliku od mehaničkih profilometara optički profilometri znatno brže rade iako se ubrzavanjem procesa merenja smanjuje

kvalitet merenja, što je uopšteno važi i za sve tehnike merenja topografije. Konstrukciono ovaj uređaj je veoma sličan optičkom mikroskopu, a primer optičkog profilometra je prikazan na slici 6.9 .



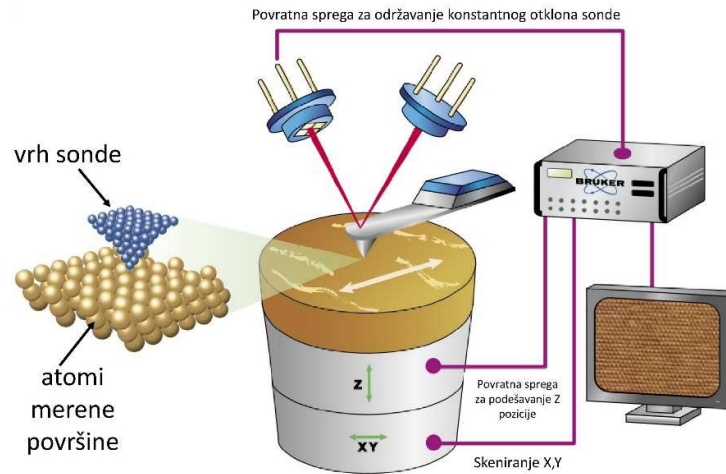
Slika 6.8 Mehanička profilometrija, a) šema rada, b) profil koji se dobija u računaru, c) mehanički profilometar



Slika 6.9 Izgled optičkog profilometra, Zygo, Zegage

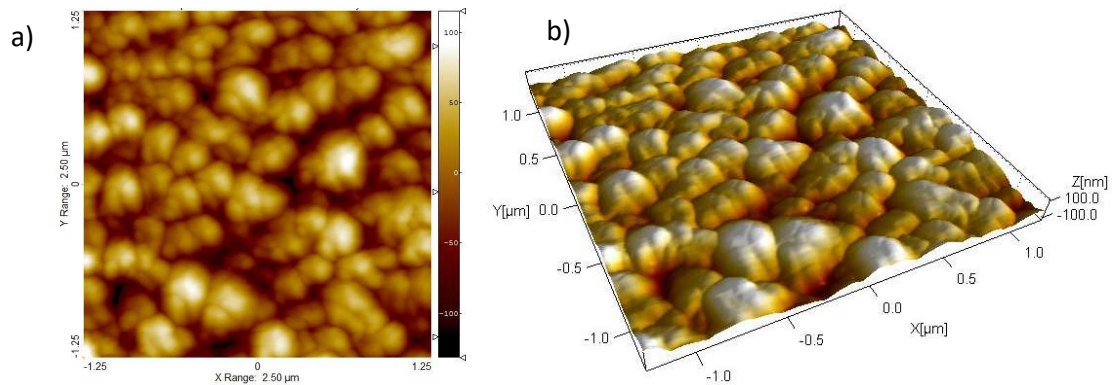
Mikroskopija atomskih sila (AFM) je tehnika koja služi da bi se mogla odrediti topografija površine na nano nivou i na nivou atoma, odnosno angstema ( $\text{\AA}$ ). Principijelno ova tehnika je slična mehaničkoj profilometriji sa tom razlikom što se za ostvarivanje kontakta oštre sonde i merene površine koriste principi privlačnih i odbojnih atomskih sila kako bi se merna sonda održavala u bliskom kontaktu sa površinom. Kod ovog metoda sonda za merenje je veoma oštra piramida, na čijem vrhu postoji samo jedan atom, a koja je smeštena elastičnoj konzoli slika 6.1 . Prilikom prilaska sonde površini kada ona dođe na međuatomsko rastojanje od površine počinju da deluju atomske sile (privlačne ili odbojne) koje će konzolu sonde saviti ili izviti na gore. S obzirom na to što laserski snop deluje na gornji deo konzole i reflektuje se ka detektorima, savijanja konzole će se moći detektovati usled promene lokacije tačke refleksije na detektoru. Da bi merenje topografije započelo piezoelektrični element na koji je postavljen uzorak započinje oscilacije u jednom pravcu (X ili Y), u pravcu u kojem se vrši merenje sondom. U procesu merenja sila koja deluje na sondu se zadržava konstantnom i to odbojna sila u kontaktnom načinu rada a privlačna sila u beskontaktnom načinu rada. Usled prelaska sonde po neravninama površine dolazi do savijanja sonde koje indukuje pomeranje piezoelektričnog elementa (na kojem je uzorak) koji vrši pomeranje uzorka gore ili dole (Z) a to pomeranje zapravo predstavlja visinu neravnina elemenata površine (npr. uzvišenja). Na ovaj način vrši se skeniranje linije po linije (profila) na površini što kasnije obradom podataka u računaru

postane 3D topografska slika. Kontaktni način rada služi za merenje tvrdih materijala a beskontaktni način rada služi uglavnom za merenje topografije površina mekih materijala. Inače, postoji preko 25 tehnika rada mikroskopije atomskih sila od kojih ima nekoliko sa atomskom rezolucijom i nekih koje osim topografije mogu da vrše i merenja magnetnih i električnih osobina na površinama. Osim toga postoje i AFM metode za nanolitografiju i nanomanipulaciju atoma po površini materijala.

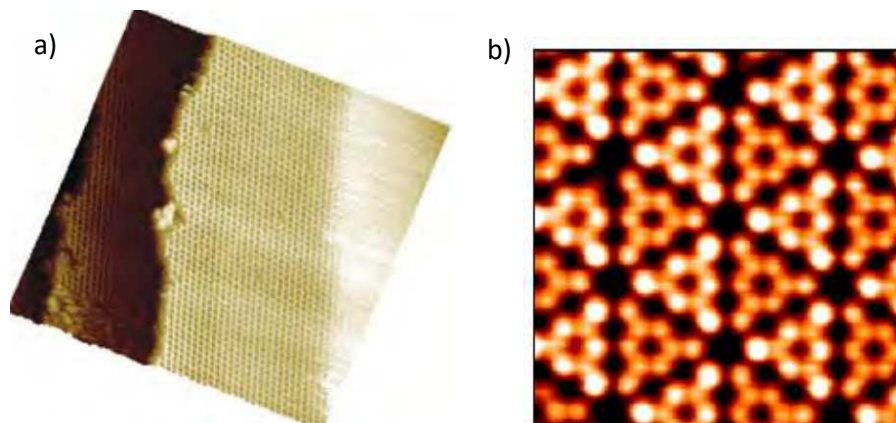


Slika 6.10 Princip rada mikroskopije atomskih sila (AFM)

Maksimalne veličine površina koje se mogu meriti sa mikroskopijom atomskih sila su oko  $100\mu\text{m}^2$  a najmanje mogu biti veličine svega nekoliko atoma odnosno nekoliko  $\text{\AA}^2$ . AFM-om se mogu dobiti veoma velike prostorne rezolucije koje se kreću ispod delova angstroma ( $\text{\AA}$ ) a isto tako i visinske rezolucije. Na slikama 6.11 i 6.12 dati su primeri merenja koji su načinjeni sa AFM mikroskopima. Na slikama 6.11 okrugli ili elipsasti elementi koji se vide na površini su vrhovi stubića prevlake kao tipične strukture koja se javlja kod PVD prevlaka.



Slika 6.11 Površina  $2,5 \times 2,5 \mu\text{m}$  TiSiN prevlake snimljena AFM-om, a) 2D topografska slika, b) 3D topografska slika



Slika 6.12 AFM merenja sa atomskom rezolucijom 2D topografske slike, a) atoma Cu na Au podlozi, b) atoma Si