

# NASVETI

## UPORABA PROFILOMETRA PRI ANALIZI POVRŠIN IN TANKIH PLASTI

Miha Čekada, Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

### 1 Uvod

Pri mnogih procesih površinske obdelave, pa naj bo to znanstvenoraziskovalno delo ali industrijska praksa, se srečamo z vprašanjem hrapavosti površine. Pogosto se zadostimo že z enim podatkom, neredko pa nas zanimajo še razni defekti na površini, njihova oblika in porazdelitev.

Najprimernejše orodje za takšno analizo je profilometer. Tipalo naprave je igla (ponavadi diamantna), ki drsi po površini. Meritev je rutinska in ne zahteva nobene priprave vzorca, rezultat pa je profil površine, tj. odmik v odvisnosti od lege. Sila, s katero igla pritiska na vzorec, mora biti čim manjša, da se površina ne poškoduje med meritvijo. Pri standardnih profilometrih je ta sila reda velikosti nekaj mN, tako da so primerni za analizo večine trdnih snovi.

### 2 Osnovni parametri hrapavosti

Za karakterizacijo profila je definirana vrsta parametrov, ki se uporabljajo kot merilo površinske obdelave. Prvi korak analize je izračun sredinske črte profila z metodo najmanjših kvadratov. Vsa nadaljnja analiza sloni na odklilih od sredinske črte. Najpogosteje uporabljen parameter je srednja hrapavost  $R_a$ , ki je definirana kot povprečje absolutne vrednosti odklila:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$$

kjer je  $L$  referenčna razdalja, na kateri smo izvedli meritev. Pogosto je že ta vrednost dovolj za primerjanje vpliva različnih postopkov obdelave na stanje površine.

Za natančnejšo analizo pa to ne zadostuje, zato se uporablja še vrsta drugih parametrov. Omenimo le najbolj znane. Namesto povprečja absolutne vrednosti se uporablja tudi povprečni kvadrat odklila:

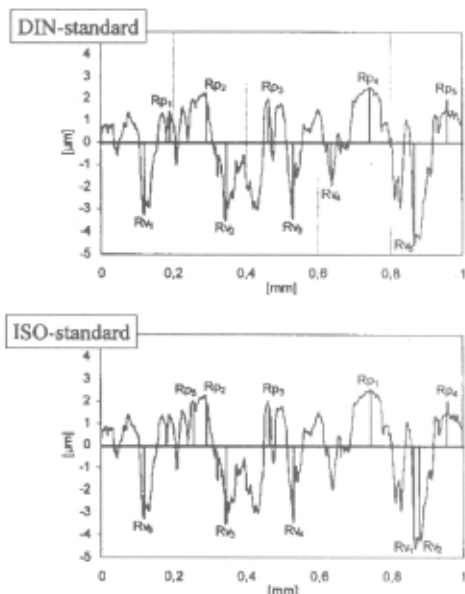
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$$

Srečamo še največji odmik nad sredinsko črto  $R_p$  (»najvišji hrib«) in največji odmik pod njo  $R_v$  (»najgloblja dolina«), večkrat naletimo tudi na njuno vsoto  $R_t = R_p + R_v$ .

Omenimo še parameter  $R_z$ , definiran je kot:

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 R_{p_i} - \sum_{i=1}^5 R_{v_i} \right]$$

Gre torej za razliko med petimi najvišjimi in petimi najnižjimi točkami profila. Pri tem pa je treba biti previden, katerih pet točk je najvišjih oz. najnižjih. Parameter  $R_z$  je namreč malo drugače definiran v DIN- kot v ISO-standardu (glej sliko 1). Pri DIN-standardu profil razdelimo na 5 enakih delov in v vsakem vzamemo najvišjo ter najnižjo točko. Pri ISO-standardu pa izberemo pet najvišjih/najnižjih točk v celotnem profilu. Pomembno vprašanje je tudi, kako izraziti mora biti vrh, da ga priznamo. V uporabi je merilo, da mora biti njegova relativna višina vsaj 1 % najvišjega/najnižjega vrha v profilu.



Slika 1: Izbira petih najvišjih in najnižjih odklilov za izračun parametra  $R_z$ : DIN-standard (zgoraj) in ISO-standard (spodaj)

### 3 Uporaba filtrov

Vsi parametri hrapavosti so definirani glede na sredinsko črto. Pogosto, še posebej pri merjenju daljših profilov, pa vzorec ni več raven. Takrat ne bomo več merili hrapavosti vzorca, temveč njegovo obliko. Potrebujemo torej metodo, ki bo izločila vpliv oblike vzorca in izluščila le hrapavost.

Poglejmo si obliko vzorca nekoliko podrobneje. Glede na značilno širino neravnin (imenujemo jo tudi »valovna dolžina«) razlikujemo tri prispevke k celotni hrapavosti vzorca /1/:

- 1) hrapavost: »valovna dolžina« je velikostnega reda nekaj mikrometrov, amplituda pa je odvisna od stopnje končne površinske obdelave (npr. gradacija polirnega sredstva)

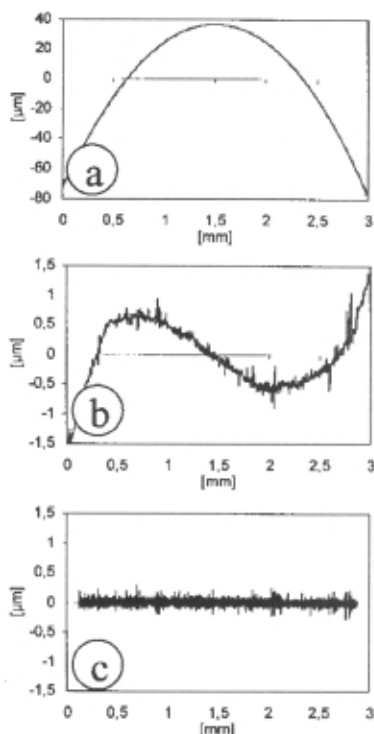
- 2) valovitost je posledica neenakomernosti obdelave; značilna »valovna dolžina« je nekaj desetink milimetra
- 3) oblika: v tem primeru gre za obliko vzorca kot celote; »valovna dolžina« je v centimetrskem področju.

Če je vzorec raven, obliko izločimo z že omenjenim izračunom sredinske črte. Če je vzorec okrogel (ali kakšne druge enostavne oblike), lahko z nelinearno regresijo vzorec »poravnamo«. Takšno prilagajanje pa odpove pri valovitosti, saj je v splošnem ne poznano in bi potrebovali množico parametrov (npr. polinom visokega reda).

Rešitev je v uporabi filtrov. V osnovi gre za podoben problem kot pri frekvenčnem filtriranju signalov. S Fourierovo transformacijo dobimo frekvenčni spekter signala. Le-tega množimo s filtrom, ki pobere npr. le visoke frekvence, prepusti pa nizke. Tako popravljeni spekter transformiramo nazaj in dobimo v tem primeru zglajeni signal.

Na enak način lahko filtriramo profil površine. Če uporabimo filter, ki prepušča nizke frekvence (low-pass filter), pobere hrapavost in obdržimo valovitost. Nasprotno, če filter prepušča visoke frekvence (high-pass filter), pobere valovitost in obliko, obdržimo pa hrapavost. Slednji način je torej primeren za izračun hrapavosti nagubanih vzorcev.

Na sliki 2a je primer profila okroglega vzorca. Ker je hrapavost bistveno manjša od oblike, je iz takega profila izračunan parameter  $R_a$  popolnoma napačen, pa še močno je odvisen od dolžine meritve. Ker je vzorec okrogel, poskusimo s prilagajanjem na obliko krožnice, rezultat je na sliki 2b. Čeprav je hrapavost že lepo razvidna, profil še vedno ni gladek. Gre za prej omenjeno valovitost - vzorec ni popolnoma okrogel. Odmiki od krožnice so dovolj veliki, da še vedno ne moremo



Slika 2: Primer profila realnega okroglega vzorca: a) izmerjeni profil, b) profil, prilagojen na obliko krožnice, c) filtrirani profil

izračunati hrapavosti ( $R_a$ ). Šele uporaba filtra (slika 2c) odpravi to valovitost kakor tudi krožno obliko. Pomembna prednost filtra je tudi ta, da nam oblike niti ni treba poznati.

Posebej je treba opozoriti na to, da filtriranje delno vpliva tudi na hrapavost. Zato ne smemo nikoli primerjati filtriranih rezultatov z nefiltriranimi. Še več. Obstaja več vrst filtrov, pa tudi mejno frekvenco lahko spreminjamo. Večina meritev hrapavosti je primerjalne narave, npr. s spreminjanjem parametrov obdelave želimo hrapavost zmanjšati na minimum. Pri tem je ključno, da smo naredili vse meritve pri enakih pogojih (enaka referenčna razdalja, enak tip filtra, enaka mejna frekvenca), sicer rezultati med seboj niso primerljivi.

### 4 Posredne meritve s profilometrom

Na kratko si pogledjmo še nekaj drugih možnosti uporabe, ki nam jih daje profilometer.

Za merjenje debeline tankih plasti ni univerzalne metode /2/. Eden od načinov je ta, da pred nanosom tanke plasti del podlage zastremo z masko. Med nanosom tako nastane stopnica, ki jo s profilometrom zlahka izmerimo. Metoda je sicer enostavna, slaba stran pa je v tem, da moramo vzorec predhodno pripraviti. Dodatne težave se lahko pojavijo zaradi neostre stopnice. Kombinacija preveč oddaljene maske, neenakomerne rasti plasti in ukrivljenosti vzorca lahko privede do tega, da je stopnica zelo neizrazita, kar onemogoča ponovljivo meritev debeline. To pride še posebej do izraza pri tanjših plasteh (pod  $1 \mu m$ ).

Prej omenjeno težavo – ukrivljenost vzorca pa lahko s pridom uporabimo za merjenje notranjih napetosti v plasti /3/. V tankih plasteh so pogosto visoke notranje napetosti, kar lahko privede do pokanja ali celo luščenja plasti. Vzrok za to je razlika v temperaturnih koeficientih raztezka plasti in podlage (če poteka nanos pri višjih temperaturah) in veliko število točkovnih napak (velja predvsem za vakuumске postopke nanašanja). Zaradi notranjih napetosti še vzorec ukrivi, kar lahko izmerimo s profilometrom. Če je plast veliko tanjša od podlage (kar pri tankih plasteh skoraj vedno drži), za izračun notranjih napetosti ( $\sigma$ ) uporabimo Stoneyjevo enačbo:

$$\sigma = \frac{1}{6R} \frac{d_s^2}{d_f} \frac{E_s}{1 - \nu_s}$$

$E_s$ ,  $\nu_s$  in  $d_s$  so elastični modul, Poissonovo število in debelina podlage,  $d_f$  debelina plasti,  $R$  pa radij ukrivljenosti. Zelo ugodno je, da ne potrebujemo elastičnih konstant plasti, ki jih pogosto ne poznamo.

Na koncu omenimo še možnost snemanja 3D-topografije površine. Standardni profilometri merijo le v eni smeri, toda če naredimo niz vzporednih meritev in jih zložimo skupaj, dobimo približno 3D-sliko površine. Zmogljivejši profilometri to naredijo avtomatsko, kar je že nekakšna »konkurenca« mikroskopu na atomsko silo (AFM).

### Literatura

/1/ H. Dagnall M.A., Prüfung von Oberflächen, Rank Taylor Hobson, Leicester, 1996  
 /2/ M. Čekada, Vakuumbist 20 (2000) 1, 16-19  
 /3/ M. Čekada, P. Panjan, I. Urankar, B. Navinšek, Materiali in tehnologije (v tisku)