

Kovač P\*

ISTRAŽIVANJA HRAPAVOSTI OBRADJENE POVRŠINE  
PRI OBRADI NA STRUGUSURFACE ROUGHNESS INVESTIGATION  
DURING TURNING

## Summary

*The quality of the machined surface after finish machining has the most important influence on the exploitational characteristics of the workpiece (the accurateness and the quality of the surface. The quality of the surface is characterised by many parameters such as geometrical and kinematical parameters, chip deformation the dynamic system state - the machine tool, the fixture, the workpiece and the tool, the state of wear etc.*

*The approaches to the investigations of the machined surface roughness can be divided in to three groups. The first are the geometrical and experimental models for cutting with sharp tool. The second group, the models based on the tool wear the groove wear and the other supporting parameters. The third group, the statistical approaches to the determination of the dependances of the surface roughness based on the response surface methodology.*

---

\*Dr Pavel Kovač, docent, FTN, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

## Rezime

*U radu su prvo prikazani modeli hrapavosti obradjene površine razvijeni na bazi posmatranja geometrijskih oblika alata, njegovog kretanja i tragova obrade. Uz to je data i experimentalna verifikacija modela gde je to moguće.*

*Drugi deo rada tretira modele hrapavosti pri raznim oblicima habanja, koji kao i naslaga, bočno tečenje, ostatak preseka strugotine itd., narušavaju idealni oblik obradjene površine.*

*U trećem delu rada su prikazani modeli koji baziraju na teoriji višefaktornog plana experimenta, koja se u poslednje vreme često upotrebljava u svim oblastima inženjerskih istraživanja.*

## 1.0. Uvod

Odredjena hrapavost se može postići različitim kombinacijama parametara režima obrade, geometrije alata i ostalih uslova rada. Medjutim, nije svejedno s kojom od kombinacija se vrši obrada, budući da od njih zavise troškovi obrade i kvalitet proizvoda.

Geometrija obradjene površine se razlikuje od idealne geometrije, koja je zadata crtežom. Na obradjenoj površini se javljaju mikroneravnine. Usled deformacije i zagrevanja površinskog sloja, pri obradi nastaju naponi, koji menjaju i njegove fizikalno-mehaničke osobine. Pošto sve ovo utiče na funkcionalne osobine obratka, potrebno je stalno pratiti stanje i kvalitet obradjene površine.

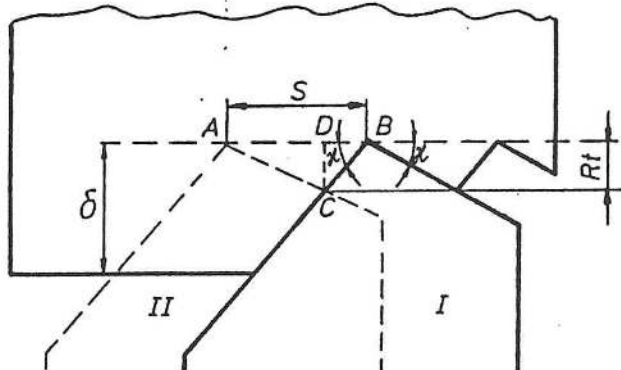
Veoma složeni mehaničko, fizički i hemijski fenomeni u procesu rezanja metala i karakteristični faktori, naročito njihovi medjusobni uticaji su bili predmet mnogobrojnih istraživanja, kod nas i u svetu. Počevši od empirijskih korelacija nalaženih za poslednjih sto godina, u ispitivanju hrapavosti obradjene površine se uključuje teorija plastičnosti, teorija graničnih slojeva i površina, fizička hemija i elektro-hemija, delovi termodinamike i mehanike fluida. Medjutim, u najnovije vreme se javljaju pristupi matematičke statistike i verovatnoće (teorija višefaktornog eksperimenta, teorija stohastičkih procesa i korelaciona analiza).

## 2.0. Pregled istraživanja

### 2.1. Geometrijski i eksperimentalni modeli pri rezanju ostrim alatom

U radovima nekih ruskih [13] i drugih autora [1, 3] mogu se naći modeli prapavosti koji važe za idealizovani oblik noža i obradjene površine.

Ako se posmatra oštar nož bez poluprečnika zaobljenja vrha ( $r=0$ ) slika 2.01. važi jednačina (2.01.)



$$R_t = s \frac{\text{tg}\kappa \cdot \text{tg}\kappa_1}{\text{tg}\kappa + \text{tg}\kappa_1} \quad (2.01.)$$

$\kappa$  - napadni ugao

$\kappa_1$  - pomoćni napadni ugao

$r$  - poluprečnik zaobljenja vrha

$\delta$  - dubina rezanja,

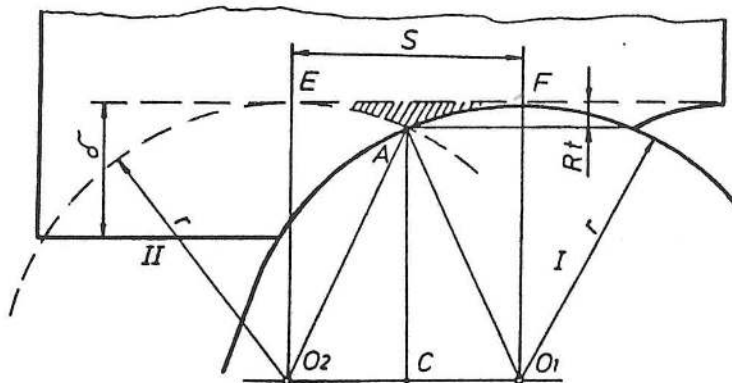
$s$  - pomak,

Sl.2.01. Oštar alat bez radijusa

Fig.2.01. Sharp tool without radius

Za nož poluprečnika zaobljenja  $r>0$  maksimalna visina neravnina  $R_t$  može se naći na osnovu jednačine (2.02.), koja je izvedena na osnovu slike 2.02.

Ako se zanemare veličine drugog reda ova jednačina se pojednostavljuje (Opitz, Mool 1940):



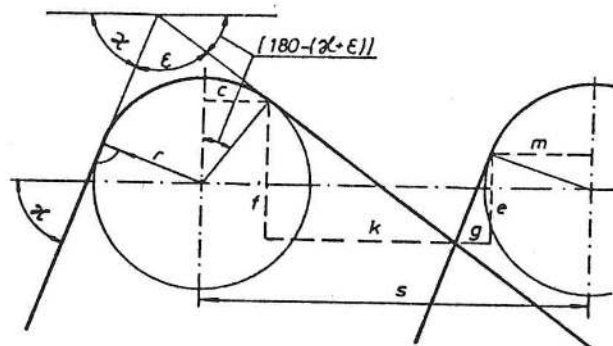
$$R_t = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}} \quad (2.02.)$$

$$R_t = \frac{S^2}{8r} \quad (2.03.)$$

Sl.2.02. Oštar alat sa radijusom

Fig.2.02. Sharp tool without radius

Veza između geometrijskih parametara koji utiču na kvalitet obradjene površine na osnovu dva uzastopna položaja alata posle jednog obrta obratka (S.Sekulić (1970) |15| izvedena je na osnovu slike 2.04.



Sl.2.04. Profil oštrog alata  
Fig.2.04. Profile of the fresch tool

Posmatrana su tri slučaja koja se mogu pojaviti u zavisnosti od veličine pomaka i dubine rezanja:

$$1. \quad s > r |\sin 180-(\kappa+\epsilon)+\cos(90-\kappa)|$$

$$\delta \geq r \cdot (1-\cos\kappa) \quad (2.07.)$$

$$\delta \leq r \{1-\cos|180-(\kappa+\epsilon)|\} = r |1-\cos(\kappa+\epsilon)|$$

Na osnovu slike 2.04. može se naći veličina pomaka izražena preko visine neravnina h:

$$s = h |\operatorname{tg}\kappa - \operatorname{ctg}(\kappa+\epsilon)| + r \{ \sin(\kappa+\epsilon) + |1+\cos(\kappa+\epsilon)| \operatorname{ctg}(\kappa+\epsilon) + \sin\kappa - (1-\cos\kappa) \operatorname{ctg}\kappa \} \quad (2.08.)$$

Ova jednačina, uz uvodjenje novih oznaka, može se napisati:  $s = ah + b \cdot r$

Odredjivanje veličina a i b je predloženo preko nomograma pošto su obe veličine funkcije  $f|\kappa, (\kappa+\epsilon)|$ .

$$2. \quad \text{Ako je nož simetričan važi: } 2\kappa + \epsilon = 180^\circ$$

onda jednačina (2.08.) postaje:

$$s = 2h \cdot \operatorname{ctg}\kappa + 2r(\sin\kappa - \operatorname{ctg}\kappa + \cos\kappa \cdot \operatorname{ctg}\kappa) \quad (2.09.)$$

Grafička interpretacija ove jednačine je još lakša i numeričke vrednosti se još lakše odredjuju iz dijagrama.

3. Ako nisu ispunjeni uslovi pod 1., prvi i drugi, a treći jeste:  $\delta \leq r |1-\cos(\kappa+\epsilon)|$

Pri završnoj obradi čelika brzoreznim alatom Takenaka (1951) je za uzdužnu hrapavost predložio empirijski odnos izmedju teorijske i merene hrapavosti:

$$\eta = \frac{R_z}{R_{zt}} = c \cdot e^{-\xi v} (1/r_0)^{-\mu} s^{-\nu} \delta^{-\lambda} \quad (2.04.)$$

Konstante  $c, \xi, \mu, \nu$  i  $\lambda$  zavise od materijala obratka.

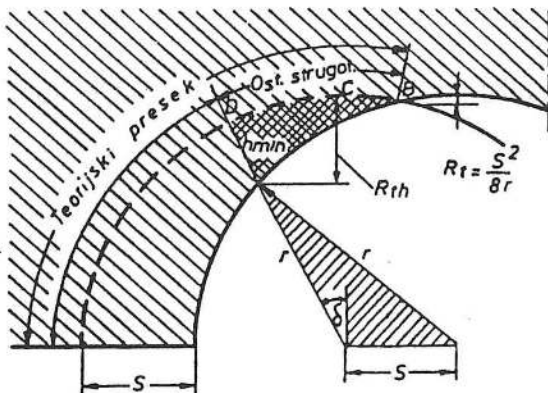
Krivouhov (1958) [6] je predložio za izračunavanje maksimalne hrapavosti pri obradi čelika sa alatom od brzoreznog čelika sledeći obrazac ( $\gamma$  - grudni,  $\alpha$  - ledjni ugao):

$$R_t = \frac{78 \delta^{0,2} \cdot s^{0,7} \cdot k^{0,25} \cdot \kappa_1^{0,25}}{r^{0,5} \cdot \gamma^{0,33} \cdot \alpha^{0,28}} |\mu| \quad (2.05.)$$

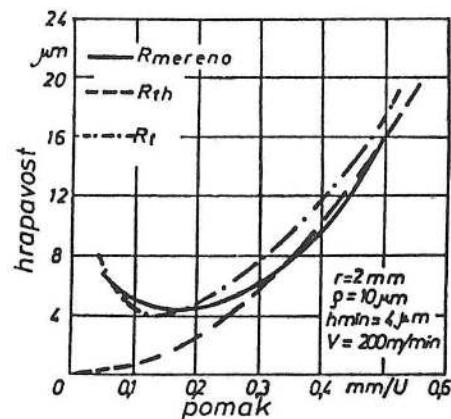
Bramertz je (1961) [5] predložio model za izračunavanje maksimalne hrapavosti, koje se od teorijskog razlikuje za jedan član koji uzima u obzir tzv. ostatak preseka strugotine (spanzipfel) a izveden je na osnovu slike 2.03a.

$$R_{th} = \frac{s^2}{8r} + \frac{h_{min}}{2} \left(1 + \frac{rh_{min}}{s^2}\right) \quad (2.06.)$$

Kao što se može videti na osnovu slike 2.03a, debljina strugotine se menja duž sečiva od maksimalne vrednosti do nule. Istraživanja pokazuju da vrednost debljine nikad ne može biti nula, zbog toga što se materijal obratka podvrgava plastičnim deformacijama. Debljina strugotine dostiže jednu kritičnu najmanju vrednost  $h_{min}$  u tački D a dalje do tačke B se ne odstranjuje sa obratka, već ostaje i podvrgava se elastičnim deformacijama. Veličina  $h_{min}$  zavisi od radijusa noža i pomaka [1].



a)



b)

Sl.2.03. Ostatak preseka strugotine

Fig.2.03. Remainder of tool cross section

Na osnovu generisane površine pri geometrijskom modelu pri oštrom alatu poznata je zavisnost (2.03.). Prof. Šolaja je 1953/54 predložio tačniji i jednostavniji izraz za proračun:

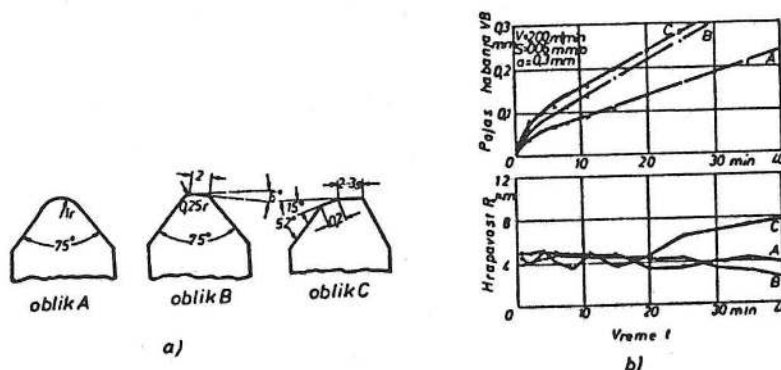
$$R_{zto} = \frac{s^2}{8r_0} + 0,0075 \frac{s^4}{r_0^3} \quad (2.11.)$$

## 2.2. Hrapavost obradjene površine u uslovima koncentrisanog habanja i drugih uticaja

Pri stvarnim uslovima rezanja u produženoj fazi naročiti uticaj na hrapavost obradjene površine ima pohabanost alata, a naročito pri pojavi tzv. koncentrisanog habanja. Odnosno, u zoni kontakta izmedju grudne površine alata i strugotine i ledjne površine alata dolazi do habanja usled čega se menja početni oblik sečiva i njegov položaj u prostoru a to se reprodukuje na obradjenu površinu.

Povećanjem habanja alata povećava se hrapavost obradjene površine, što su utvrdili davno mnogi istraživači Galloway (1945), Akinaci (1949), Pekelharing, Schuerman (1953), Thomson, Scott, Stabler (1953/54) i drugi.

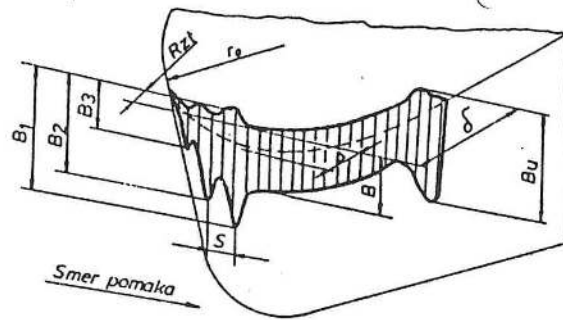
Uticaj oblika vrha noža prema slici 2.05a na hrapavost obradjene površine u funkciji vremena rezanja eksperimentalno je utvrdjen [3] i prikazan na slici 2.05b.



Sl.2.05. Uticaj oblika vrha noža na hrapavost  
Fig.2.05. Influence of tool profil on surface roughness

Pre prelaska na utvrdjivanje korelacije izmedju procesa koncentrisanog habanja reznog alata i kvaliteta površine generisane na obratku Šolaja je identifikovao fizičku suštinu ovog habanja. Na slici 2.06. je dat izgled vrha noža sa polukružnim sečivom i unetim veličinama pri koncentrisanom habanju. [18]





Sl.2.06. Habanje vrha alata  
Fig. 2.06. Wear of the tool nose

i grudne površine alata. Na osnovu toga može se konstatovati sledeće:

- na mestu izlaza sečiva i već obradjene površine, tj. na razmaku  $s/2$  od meridijanske ravni javlja se žljeb čija je dužina  $B_1$ .
- Dubina žljeba merena u projekciji na osnovnu ravan od vrha noža do dna žljeba u pravcu meridijanske ravni utiče na formiranje grebena na obradjenoj površini.
- Žljeb nije stacionaran već se njegovo dno pomera u smeru pomoćnog kretanja.

- U produženom rezanju uz monotono produbljivanje žljeba i njegovo približavanje meridijanskoj ravni dolazi momenat kada greben na obradjenoj površini obradka stupa u dodir sa sečivom na udaljenju  $s$  od prvog žljeba pa se postepeno formira drugi žljeb čija je dubina  $B_2$ . U za to povoljnim uslovima (dovoljno mali  $s$  a dovoljno veliki  $r_0$ ) moguće je da se na ledjnoj površini alata postupno, na razmacima  $s$  od prethodnog formira veći broj žljebova, čija dužina vremenom raste, a kreću se istom brzinom kao i prvi u smeru pomaka.

- Deo varijacije dimenzijske tačnosti obrade, koji se može pripisati habanju alata a jednak je  $2\Delta=2(r_0-r)$ . Ako se meri preko grebenova na obratku ovu meru treba povećati za dvostruku veličinu teorijske hrapavosti.

Šolaja je 1955| predložio obrazac za izračunavanje hrapavosti na osnovu dužine prvog žljeba  $B_1$  i širine pojasa habanja  $B$ :

$$R_{zt} = c' |R_{zto} + (B_1 - B) \operatorname{tg} \alpha| \quad (2.23.)$$

gde je sa  $c'$  označen popravni faktor koji se odnosi na grešku pri uprošćenom geometrijskom razmatranju i na uticaje procesa rezanja,  $\alpha$  je ledjni ugao. Ovde je zanemareno pomeraње žljeba u smeru pomoćnog kretanja. Obrazac ne važi kada žljeb predje meridijansku ravan.

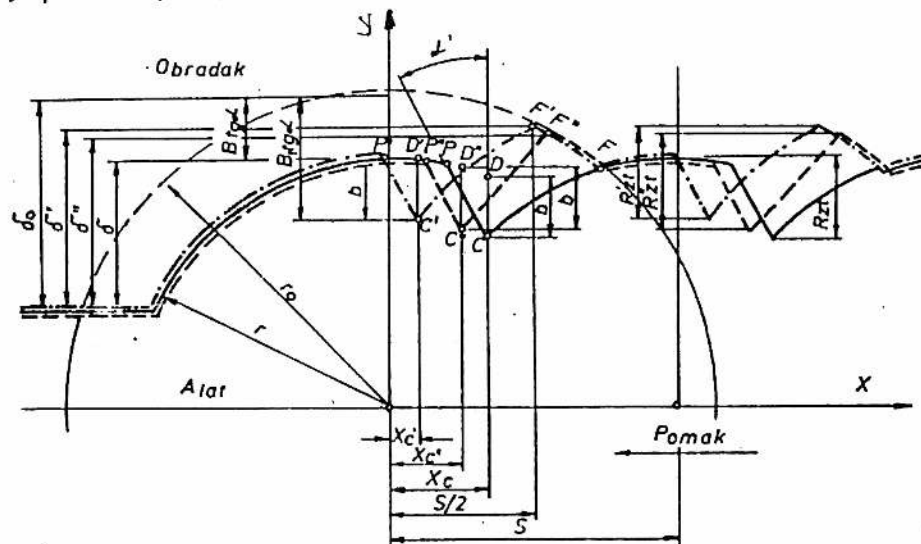
Detaljnjoj analizi podvrgnut fizički model koncentrisanog habanja doveo je 1957. do sledećeg obrasca:

$$R_{zt} = (B_1 - B) \operatorname{tg} \alpha + \frac{B_1^2 - B^2}{D} + \frac{(s - 0,065B_1 \frac{r_0}{s})^2}{8(r_0 - B \operatorname{tg} \alpha)} \Delta R \quad (2.24.)$$

koji uzima u obzir razliku  $(B_1 - B)$ , uticaj prečnika obratka  $D$ , uticaj pomeraња žljeba u smeru pomaka i uticaj žljebova višeg reda  $\Delta R$ . Ovaj model je potkrepljen eksperimentima.

Nedostaci ovog obrasca su u sledećem: 1. izvodjenje trećeg člana jednačine je pod uslovom da je  $B = 0,75B_1$ , što veliki broj docnijih opita nije potvrdio, nije dovoljno pouzdana ni veličina  $\Delta R$  baš zbog te primedbe. Ne dozvoljava se da žljeb predje meridijansku ravan.

Sa polazom od konstatovanog napredovanja koncentrisanog habanja na osnovu ranijih razmatranja dat je nov teorijski model koncentrisanog habanja prikazan na slici 2.07., preko projekcije sečiva na osnovnu ravan.



Sl.2.07. Koncentrisano habanje na pomoćnoj ledjnoj površini  
Fig.2.07. The groove wear in the minor cutting edge



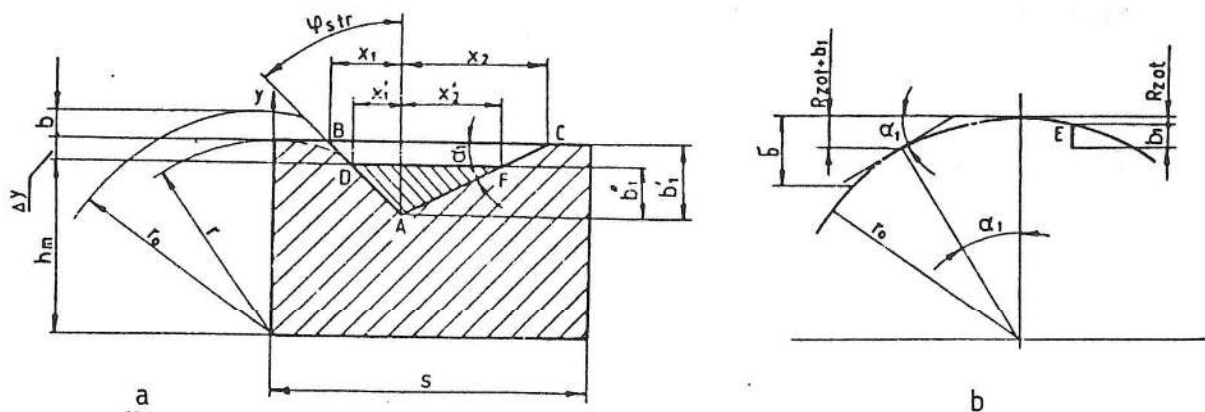
1) Primarno habanje proteže se duž sečiva izvan predela koncentrisanog habanja a odgovara mu širina pojasa habanja B.

2) Sekundarno habanje (poteg  $\overline{PC}$ , odnosno  $\overline{P'C'}$  ili  $\overline{P''C''}$  nagnut pod uglom  $\alpha'$  u odnosu na meridijansku ravan).

3) Tercijarno habanje (luk CF odnosno  $C'F'$  ili  $C''F''$  u varijantnim slučajevima)

Sekundarno habanje se odvija duž prave nagnute pod uglom  $\alpha'$  u odnosu na meridijansku ravan.

Nastavljanje istraživanja veze izmedju koncentrisanog habanja i hrapavosti obradjene površine nalazimo u [14].



Sl.2.08. Uprošćeni model koncentrisanog habanja  
Fig.2.08. Simplified model of groove wear

Ugao  $\alpha_1$  određuje se prema sl.2.08b, i predstavlja ugao koji zaklapa tercijarno sečivo sa pravcem pomoćnog kretanja, a određuje ga tangenta na radijusu u tački čiji je položaj u funkciji dubine žljeba  $b_1$ :

$$\alpha_1 = \arccos \left( 1 - \frac{R_{zto} + b_1}{r_0} \right) \quad (2.25.)$$

Dobijene vrednosti za ugao  $\alpha_1$  po ovom izrazu poklapaju se sa izmerenim vrednostima na alatima.

Ugao koji sekundarno sečivo zaklapa sa y-pravcem (pravcem meridijanske ravni) sl 2.08a, usvojen je kao konstanta, a odgovara uglu odvodjenja strugotine  $\phi_{str}$ .

Veća šrafirana površina na sl.2.08a određuje se:

$$A = s(r_0 - b) - (x_1 + x_2)b'_1/2 \quad (2.26.)$$

gde je:

$$\begin{aligned} x_1 &= b'_1 \operatorname{tg} \phi_{\text{str}}, \\ x_2 &= b'_1 / \operatorname{tg} \alpha_1, \\ b'_1 &= (Rz_{\text{to}} + b_1) - b, \end{aligned} \quad (2.27.)$$

zamenom ovih elemenata u izraz (2.27) i sredjivanjem dobija se:

$$A = s(r_0 - B \cdot \operatorname{tg} \alpha) \frac{|Rz_{\text{to}} + \operatorname{tg} \alpha \cdot (B_1 - B)|^2}{2} \cdot \left( \operatorname{tg} \phi_{\text{str}} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \quad (2.28.)$$

Srednja linija profila određuje se:

$$h_m = A/s \quad (2.29.)$$

pa je veličina površine manjeg šrafiranog trougla ADF (2.08.)

$$A_1 = (x'_1 + x'_2)b''_1/2 \quad (2.30.)$$

U ovom izrazu je:

$$\begin{aligned} x'_1 &= b''_1 \operatorname{tg} \alpha_{\text{str}} \\ x'_2 &= b''_1 / \operatorname{tg} \alpha_1 \\ b''_1 &= b'_1 - \Delta y, \text{ a} \\ \Delta y &= (r_0 - b) - h_m. \end{aligned}$$

Zamenom u izraz (2.30) i sredjivanjem, dobija se:

$$A_1 = \frac{(Rz_{\text{to}} + B_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha - r_0 + h_m)^2}{2} \left( \operatorname{tg} \phi_{\text{str}} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \quad (2.31.)$$

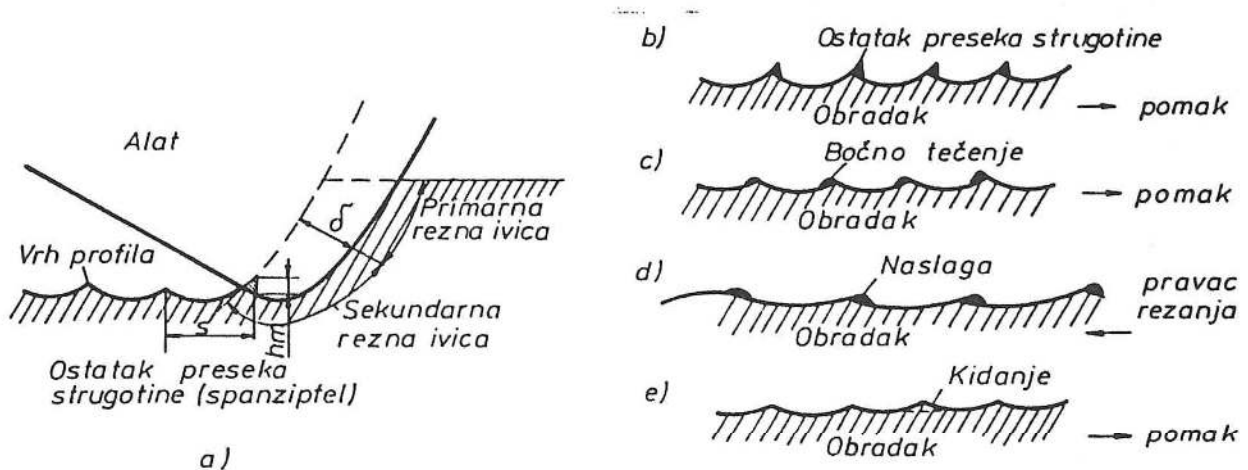
Srednje odstupanje profila može da se iskaže prema definiciji ovog parametra sa:

$$\operatorname{Rat}' = 2A_1/s \quad (2.32.)$$

U seriji svojih radova dva indijska istraživača Selvan i Radhakrishnan su pokušala da nadju uticaj bočnog tečenja, naslage na sečivu, efekta ostatka strugotine, koncentri-

sanog habanja, kidanja materijala i drugog na hrapavost obradjene površine pri obradi na strugu, slika 2.09.

Da bi se utvrdio uticaj pomenutih faktora na hrapavost obradjene površine i na pomeranje profila (straightness of the ridge)  $S_{xy}$  izvršeni su eksperimenti [16]. Merena je hrapavost  $R_a$  u funkciji pomeranja profila  $S_{xy}$  i to u pravcu rezanja i normalno na taj pravac.

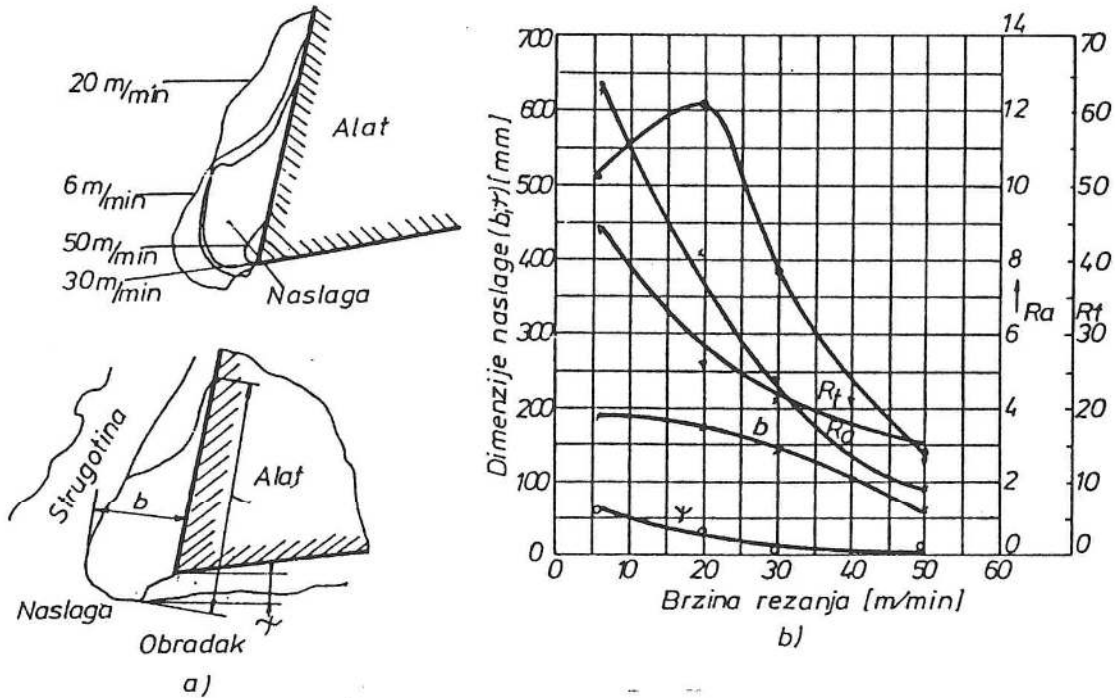


Sl.2.09. Uticaj parametara na hrapavost obradjene površine  
Fig.2.09. Influence of parameters on surface roughness

Na osnovu rezultata eksperimenta izvučeni su sledeći zaključci: na  $S_{xy}$  utiče bočno tečenje, vibracije alata i naslaga. Rasipanje položaja  $S_{xy}$  se smanjuje sa povećanjem brzine rezanja i suprotno.  $S_{xy}$  se smanjuje sa grudnim uglom za negativne uglove, a povećava se za uglove veće od  $5^{\circ}$ . Korelacija između  $S_{xy}$  i hrapavosti površine je bolja ako se varira pomak i brzina rezanja, a slabije je kad se varira grudni ugao.

Dubina rezanja, kao što se vidi sa slike 2.9 a, je konstantna samo uzduž primarne rezne ivice a varira od maksimuma do nule uzduž sekundarne rezne ivice a pri obradi ostaje jedan deo preseka strugotine u obliku trougla, na mestu gde je dubina rezanja manja nego  $h_m$ , to se zove ostatak strugotine

Oblik i dimenzije naslage za razne brzine rezanja su prikazane na slici 2.10a. Na osnovu rezultata ispitivanja može se videti da se naslage formiraju i dasu veće pri manjim brzinama rezanja za ispitivani ugljenični čelik i brzorezni čelik kao materijal alata. Sa povećanjem brzine rezanja elementi naslage i hrapavost  $R_a$  i  $R_t$  u pravcu rezanja se takodje smanjuju, slika 2.10b.



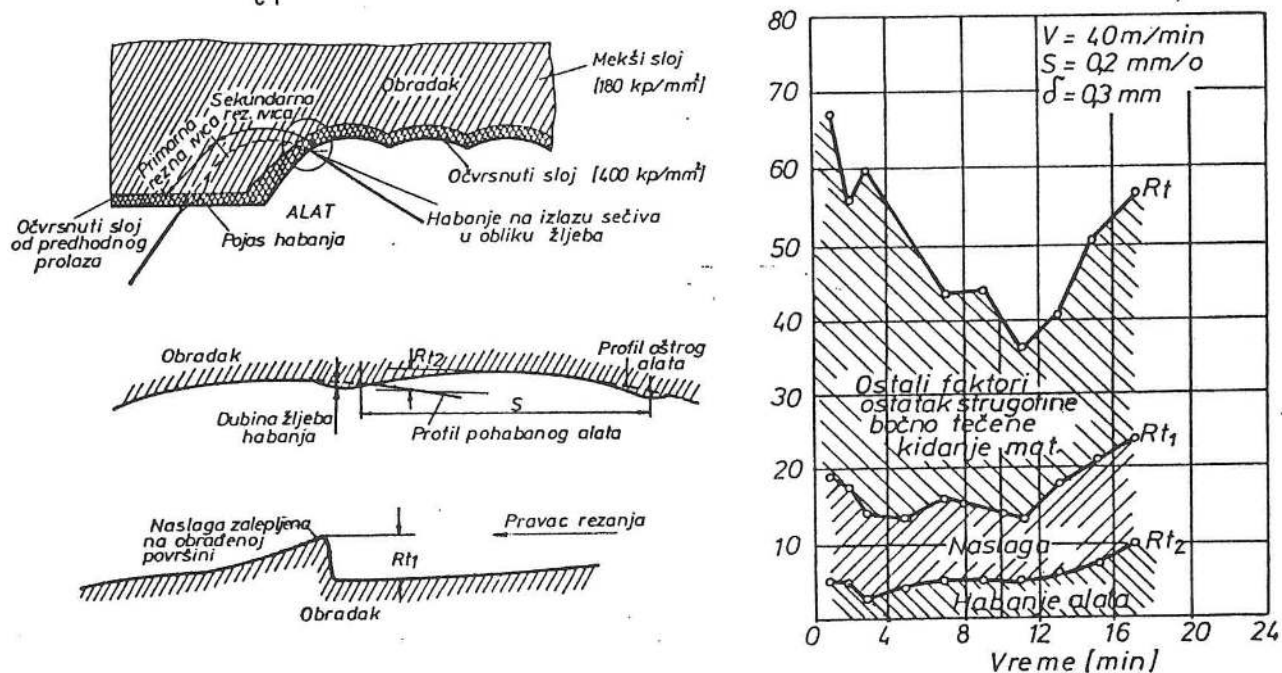
Sl.2.10. Uticaj naslage na hrapavost obradjene površine  
Fig. 2.10. Influence of built up edge on surface roughness

Zapremina metala koja se istisne na stranu se takodje povećava sa zapreminom habanja u obliku žljeba na izlaz sečiva. U radu [17] je razmatran uticaj habanja u obliku žljeba i naslage na hrapavost obradjene površine, sl. 2.11.

Eksperimenti su izvedeni na ugljeničnom čeliku alatom od brzoreznog čelika konstantne geometrije.

Habanje je mereno preko mikrofotografija radijusa vrha alata i uvećavano na profilprojektoru i na slikama je prikazan njegov razvoj u funkciji vremena. Hrapavost usled habanja u obliku žljeba  $R_{t2}$ , slika 2.11a. merena je na putu 0,2 mm (pomak) na mestu gde se ono javlja.

Hrapavost usled lepljenja naslage na obradjenu površinu  $R_{t1}$  praćena je u pravcu rezanja.



Sl.2.11. Uticaj parametara na hrapavost obradjene površine  
Fig.2.11. Influence of parameters on surface roughness

Odredjivanje direktnog i indirektnog uticaja habanja na pomoćnoj ledjnoj površini i naslage na hrapavost obradjene površine pri struganju pomoću statistike upotrebljavajući mnogostrukom korelacijonu tehniku izvršeno je u radu [ 17 ] .

Na modelu habanja prema slici 2.11. a može se primeniti i sloj očvrnutog materijala posle jednog prolaza.

Regresiona jednaćina za  $R_a$  ili  $R_t$ , koje su obeležene sa Y u funkciji habanja na izlazu sećiva  $R_{t2}$  i hrapavosti usled formiranja naslage na reznom ivici  $R_{t1}$  pretpostavljena je u obliku:

$$Y = a_{123} + b_{123} R_{t2} + b_{132} R_{t1} \quad (2.33.)$$

Eksperimenti su potvrdili da ovakva regresiona jednaćina sa koeficijentom korelacije  $r=0,681$  važi za  $R_a$  a sa  $r=0,882$  važi za  $R_t$ . Koeficijenti mnogostrukom korelacije pokazuju da uticaj habanja na izlazu iz sećiva i naslaga objašnjavaju 47% varijacije  $R_a$  i 78% varijacije  $R_t$ .

Zapaženo je i korišćenje hrapavosti kao kriterijuma za postojanost alata [4]. U tom smislu praćena je aritmetička hrapavost  $R_a$ , maksimalna hrapavost  $R_t$ , sile rezanja  $F_j$  širina pojasa habanja VB i dubina kratera KT u funkciji vremena rezanja. Obrada je vršena na čeliku konstantnom brzinom rezanja dubinom i geometrijom alata. Zapaženo je da se svi parametri sa vremenom menjaju dosta sporo, tako i hrapavost, do određenog momenta zatupljenja kada se primeti nagli skok hrapavosti i ostalih veličina. Karakter svih ovih zavisnosti posmatran je i u T-v dijagramu.

Hrapavost obradjene površine prema Leonardu je rezultat dejstva kinematske hrapavosti i hrapavosti procesa [8]. Kinematska hrapavost je definisana geometrijom alata i pomakom dok hrapavost procesa zavisi od mnogo faktora i zbog toga je nepredvidiva.

Hrapavost procesa bez obzira na koji način nastaje na neki način utiče na kinematsku hrapavost. Ovo se matematički može izraziti kao neka periodična ili slučajna veličina  $\epsilon(x)$ , koja se sabira sa osnovnom periodičnom funkcijom  $Y(x)$  koja pretstavlja kinematsku hrapavost.

Narušavanje tragova od pomaka najviše je proučavao Pekelharing, Bramertz i drugi. Za vreme rezanja dolazi do pomeranja tragova od pomaka u suprotnom smeru od rezanja. Ova greška u površini se manifestuje kao habanje na izlazu sečiva (tercijarno habanje Prof. Šolaja) u obliku kanala. Razradjeno je nekoliko teorija oko toga usled čega se javlja: (a) usled ojačanja obradjene površine u odnosu na površinu koja će se tek rezati, (b) habanje u obliku kratera na grudnoj površini se lomi na kraju pomoćne ledjne površine, (c) usled oksidacije jer je vruć alat, radni predmet i atmosfera su tu u kontaktu, (d) Pekelharing predlaže da gnječenje metala u procesu stvaranja strugotine uzrokuje podizanje vrhova tragova pomaka a ovo opet utiče da se habanje u obliku kanala javi, posle dostizanja određene dubine se stabilizuje a sledeći kanali se javljaju na udaljenosti za vrednost pomaka od prvog kanala.



### 2.3. Statistički prilazi na osnovu višefaktornog plana eksperimenta

Ovi prilazi se karakterišu principom posmatranja hrapavosti obradjene površine kao izlaznom veličinom u zavisnosti od ulaznih parametara, koji utiču na hrapavost ne ulazeći u suštinu ovog procesa, dakle, princip crne kutije. Posmatra se uticaj uglavnom više faktora odjednom uz umanjeni broj eksperimenata primenu metoda savremene statistike i računara.

Primenu multiregresione analize i planiranja eksperimenta za odredjivanje zavisnosti hrapavosti od uticajnih parametara srećemo u radu [7]. Od uticajnih parametara ispitivani su: brzina rezanja  $v$ , pomak  $s$ , dubina rezanja  $\delta$  i radijus zaobljenja vrha noža  $r$ . Posmatraju se znači četiri varijable, ako ih variramo u tri nivoa potpuni plan eksperimenta ima broj eksperimenata:

$$3^4 = 81$$

Obrada je vršena oštrim alatom bez hladjenja, na materijalu obradka mesing Cu60Zn, sa mehanički pričvršćenom trouglastom pločicom kvaliteta K10.

Pretpostavljena je eksponencionalna zavisnost između aritmetičke hrapavosti  $R_a$ , režima obrade i radijusa zaobljenja vrha noža  $r$ , u linearizovanom obliku jeste:

$$\log R_a = \log C + b_1 \log s - b_2 \log r \pm b_3 \log v \pm b_4 \log \delta \quad (2.34.)$$

Za koeficijente kojima se ne zna da li utiču, smanjujući ili povećavajući hrapavost pretpostavljena su oba znaka + i -. Multiregresionom analizom pomoću elektronskog računara dobijene su vrednosti za konstantu i koeficijente. Koeficijent korelacije ove multiregresije je visok  $r=0,95302$ .

Testiranje signifikantnosti koeficijenata regresije pomoću T-testa pokazalo je da koeficijenti  $b_3$  i  $b_4$  nisu signifikantni. Ovo znači da brzina rezanja i dubina ne utiču značajno na hrapavost u ispitivanom intervalu.

Kad se odbace nesignifikantni faktori dobije se zavisnost samo izmedju dva faktora:

$$R_a = \frac{1,533 \cdot s^{0,444}}{r^{0,655}} \quad (2.35.)$$

Za potrebe optimizacije obradnog procesa na strugu potrebna je bila veza izmedju aritmetičke hrapavosti  $R_a$  i uticajnih faktora [12]. Ova zavisnost je potražena u obliku eksponencionalne jednačine:

$$R_a = C_r s^\alpha r^\beta T^\gamma v^\delta \quad (2.36.)$$

gde su:  $C_r$  - konstanta a  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  su eksponenti koji se traže.

Da bi se našla ovakva veza izvršeno je 88 eksperimenata po planu a nalaženje ove korelacije je izvršeno na elektronskom računaru. Faktori su varirani u dijapazonu.

v - brzina rezanja	100÷400 m/min
s - pomak	0,10÷0,20 mm/o
r - radijus vrha noža	0,4÷1,2 mm
T - vreme rezanja	0÷40 min

Rezanje je vršeno na čeliku sa pločicom od tvrdog metala P01.

Obrada eksperimentalnih podataka je pokazala da za interval poverenja od 95% brzinu rezanja možemo zanemariti, tako da jednačina (36) sada glasi:

$$R_a = 2,95 \cdot s^{0,7} r^{-0,4} T^{0,13} \quad (2.37.)$$

Korišćenje Box Wilson-ovog metoda [2] je najpre počelo u drugim oblastima a tek kasnije u mašinstvu

U oblasti hrapavosti obradjene površine [19] ovaj metod je takodje našao svoju primenu.

Model za aritmetičku hrapavost  $R_a$  u funkciji uticajnih parametara je pretpostavljen u obliku:

$$R_a = C v^p s^m \delta^n \quad (2.38.)$$

Veza između ulaznih i izlaznih parametara je potražena u obliku modela drugog reda čiji je linearizovani oblik:

$$Y = b_0x_0 + b_1y_1 + b_2y_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2.39.)$$

Pošto je broj ulaznih faktora bio 3 broj eksperimenata jeste:  $2^3=8$ , i još 4 eksperimenta proširenja u srednjem nivou zbog određivanja eksperimenta. Na taj način je definisan model prvog reda. Još 12 eksperimenata je dodato da bi se našao model drugog reda.

Faktori eksperimenta su varirani u pet nivoa sa kodovima  $-\sqrt{2}$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $1$ ,  $\sqrt{2}$ .

Na osnovu disperzione analize i model prvog reda se pokazao adekvatan u stvarnim koordinatama bi bio:

$$R = 872,467 v^{-0,366} s^{1,258} \delta^{0,185} \quad (2.40.)$$

Model drugog reda je pokazao još veću adekvatnost.

Prvo je pretpostavljen model prvog reda u obliku eksponencijalne funkcije:

$$R = C \cdot s^{\beta} r^{\gamma} v^{\delta} \quad (2.42.)$$

Da bi se olakšala obrada eksperimentalnih podataka i nalaženje regresione jednačine izvršeno je kodiranje faktora. Pošto su nadjene konstante za sve izlazne veličine ocenjena je signifikantnost svakog parametra.

Eksponencijalni model (2.42.), koji je prilično jednostavan, nije dovoljno adekvatno opisao ispitivane veličine pa je pridjeno nalaženju modela višeg reda u obliku:

$$R = a_0 + a_1s + a_2r + a_3v + a_4sr + a_5sv + a_6rv + a_7s^2 + a_8r^2 + a_9v^2 + a_{10}s^2r + a_{11}s^2v + a_{12}r^2s + a_{13}r^2v + a_{14}v^2s + a_{15}v^2r + a_{16}srv \quad (2.43.)$$

Jednačina koja vezuje aritmetičku hrapavost  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] kao izlaznu veličinu i faktore ulaza: brzina  $v$  (m/min), pomak  $s$  (mm/o), dubinu rezanja  $\delta$  (mm) i vreme rezanja  $t$  (min) eksperimentalno je određeno [9] pri rezanju običnog mesinga. Ova jednačina u logaritmovanom obliku glasi:

$$\log R_a = 52,291 \log v - 4,951 \log s - 0,271 \log \delta + 0,071 \log t - 10,6809 (\log v)^2 - 2,3639 (\log s)^2 - 67,071 \quad (2.44.)$$

Da bi se dao prilog proučavanju kvaliteta obradjene površine primenjena je metodologija višefaktornog plana eksperimenta u radu [5] se prišlo primeni više modela, od dvofaktornog do petofaktornog modela bez i sa medjusobnim uticajima. Pri tome je razradjena opšta metodologija nezavisno od broja faktora.

Kompletan model je obuhvatio sledeću zavisnost  $R=F(r,s,\delta,v,t)$ , medjutim u toku ispitivanja išlo se postepeno i prvo je potražena zavisnost  $R=f_1(r,s)$  koja se javlja u geometrijskim modelima, zatim  $R=f_2(r,s,v)$  pa  $R=f_3(r,s,v,\delta)$  koje su poslužile i kao preliminarna ispitivanja za konačnu zavisnost koja sadrži i tekuće vreme rezanja  $t$ .

Ovakvi modeli su se pokazali adekvatni. Uvodjenje medjusobnih uticaja nezavisnog broja faktora se pokazalo efikasnim jer se sa istim brojem eksperimenata postiže bolja adekvatnost.

Uvodjenje u matematičke modele vremena rezanja preko kog se uvodi uticaj stanja reznog klina koji se pogoršava sa vremenom rezanja se pokazalo opravdanim jer je vreme signifikantno i model je adekvatan.

### 3.0. Zaključak

- Geometrijski modeli za profil neravnina su odredjeni na osnovu geometrijskih parametara vrha alata (radijus, napadni uglovi) i kinematskih parametara pri rezanju.
- Drugi pristup iverdijivanju hrapavosti obradjene površine uzima u obzir habanje alata, naslage, vibracije, bočno tečenje itd. Ovde se najviše ističu radovi u kojima se hrapavost obradjene površine odredjuje na osnovu tzv. koncentrisanog habanja.
- Treći pristup istraživanjima se karakteriše da je hrapavost obradjene površine posmatrana kao izlazna veličina u zavisnosti od ulaznih veličina, bez ulaženja u suštinu procesa. Kao ulazni parametri uzimani su radijus vrha alata, elementi režima rezanja i vreme rezanja.

## Literatura

1. Böttger H.Ch. Untersuchungen über den Einfluß der Spanungsbedingungen auf die Gestaltsabweichungen beim Innenfeindrehen von Stahl mit Hartmetall. Wiss. Z.Tech.Hochsch. Karl-Marx-Stadt, 1969, 11, No.5 663-670.
2. Box G.E.P., Wilson K.B.: On the Experimental attainment of optimum conditions, J.R.Stat.Soc.B, 13, 1, 1951.
3. Brammertz P.H.: Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen, Industrie-Anzeiger, Essen, Nr.2, Jan, 1961.
4. Hänzel W.: Oberflächenkennwerte als werkstückbezogene Standzeitkriterien. Ind.-Anz. 1973, 95, No 97.
5. Kovač P., Sekulić S.: Sistemski prilaz primeni višefaktornog plana eksperimenta na kvalitet obradjene površine pri završnoj obradi na strugu. VI ICPR, Novi Sad, 1981.
6. Krivouhov V.A.: Obrabotka metalov rezanjem, OBRONGIZ, 1958.
7. Kuljanić E.: Primena planiranja pokusa i multiregresione analize za određivanje zavisnosti hrapavosti površine o najutjecajnijim faktorima. Zbornik saopšt. VII Savet.proizv.maš., Novi Sad, I knjiga, str. OR 25.01, 1971.
8. Lonardo P.M.: Relationships Between the Process Roughness and the Kinematic Roughness on Turned Surfaces. Annals of the CIRP, Vol. 25/1/1976.
9. Lorenz G.: On the Machining Behaviour of Free-cutting High-tensile Brass. Proc.Int. Conf.Prod.Eng., Tokyo, 1978, Part I, 561-565.
10. Meshcheriakov G.N., Morgyn B.A., Shevsky A.M., Buiukly I.M.: Technological Fundamentals and Prospects of Application of the In-plate Cutter with Stable geometry. Proc.of the CIRP Sem. Vol.7, No 2, 1978.
11. Ramachandran R.V., Radhakrishnan V.: Influence of Surface finish on interference fits. Int.J.Prod.Res., 1974, Vol.12, No.6, 705-719.
12. Rasch F.O., Rolstadas A.: Selection of Optimum Feed and Speed in Finish Turning., Annals of the CIRP. Vol. XIV, pp 787-792, 1971.
13. Reznikov N.I.: Učenje o rezanji metalov, MAŠGIZ, 1947.
14. Radonjić S., Šolaja V.: Novi model korelacije habanja alata i kvaliteta površine pri obradi na strugu. 22 Jugoslovensko savetovanje proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1989.
15. Sekulić S.: Nomogram za određivanje elemenata koji utiču na veličinu geometrijske hrapavosti pri obradi na strugu za opšti slučaj rezanja, Zbornik radova, Maš.fak., Novi Sad, br. 5, 1970.
16. Selvam M.S., Radhakrishnan V.: Influence of Side-flow and Built-up Edge on the Roughness and Hardness of the Surface Machined with Single Point Tool, Wear 26 (1973), 393-403.
17. Selvam M.S., Radhakrishnan V.: Groove Wear, Built-up Edge and Surface Roughness in Turning., Wear, 30 (1974), 179-188.
18. Šolaja V.: Prilog teoriji završne obrade na strugu. Doktorski rad, Maš.fakult. Beograd, 1972.
19. Tamaman K., Lambert B.: A Surface Roughness Model for Turnign Operation. Int.J.Prod.Res., 1974, Vol. 12, No 6, 691-703.