

DK 621.923.001.2

Raziskave h korelacijski teoriji brušenja

JANEZ PEKLENIK

Povzetek

Rezalni profili na brusilnih orodjih imajo sto-hastične (ali slučajnostne) oblike, ki jih je mogoče opisati s funkcijami aritmetičnih srednjih vrednosti, in korelacijskimi funkcijami oz. s spektri razsipanja. Ta sestavek raziskuje vplive fizikalnih in geometričnih lastnosti brusilnih orodij v na-ostrenem in obrabljenem stanju kakor tudi pri-stavitve brusa k obdelovancu — na obliko teh funkcij s pomočjo informacijske teorije. Prenosne funkcije fizikalnega sistema »brusilno orodje — obdelovanec — brusilni proces — hrapavost po-vršine — obraba orodja« definirajo ta obdelovalni postopek analitično in omogočajo njegovo optimi-ranje. Definirana je tudi rezalna sposobnost brusov glede na prenosno funkcijo sistema.

1. Uvod

Hrapavost brušene površine in obraba brusil-nega orodja pomenita v brusilnem procesu izhodne veličine, ki so za prakso odločujočega pomena. Ta dva parametra sta odvisna od cele vrste vplivnih faktorjev, ki jih je mogoče opisati z znanimi funkcijami, in vsebujeja po navadi tudi slučaj-nostne elemente.

Znano je, da vse doslej še ni uspelo najti za-nesljiv in znanstveno dokazan ter podkrepjen kri-terij za pravilno izbiro vhodnih veličin brusil-nega postopka, tj. za določen material najprimer-nejše brusilno orodje in pogoje brušenja glede na zahtevane izhodne veličine, tj. hrapavost brušene površine in dobo obstojnosti brusilnega orodja. Vzrokov za to je več, in sicer: fizikalno-mehanske lastnosti brusilnih orodij in njihov vpliv na izobli-kovanje rezalnih elementov oz. elementarnih re-zalnih profilov med ostrenjem niso bili znani; prav tako ni bilo niti natančnega in zadovo-ljivega analitičnega opisa rezalnega prostora na brusilnem orodju ne hrapavosti na obdelovancu.

V zadnjih letih je bilo razvitih nekaj novih merilnih in analitičnih metod, ki omogočajo objek-tivno določitev

a) fizikalne trdote brusilnih orodij [11] in

b) oblike elementarnih rezalnih profilov na teh orodjih [5,6].

S tem so bili ustvarjeni pogoji za analitični opis brusilnega orodja.

Pričujoče raziskave upoštevajo vhodno ve-ličino — rezalni prostor brusa — in obe izhodni veličini — hrapavost površine in spremembe v obliki rezalnega prostora zaradi obrabe — kot slučajnostne procese. Te je mogoče opisati s funk-cijami srednjih vrednosti in korelacijskimi funk-cijami, ki so znane iz teorije informacij. Po tej poti je uspelo opisati te slučajnostne procese z zna-

nimi funkcijami in določiti prenosno funkcijo brušenja. To pomeni, da je mogoče opisati proces brušenja analitično, kar omogoča optimiranje tega izredno zapletenega obdelovalnega postopka. Re-šitev teh vprašanj je za prakso zelo velikega pomena.

2. Označbe in simboli

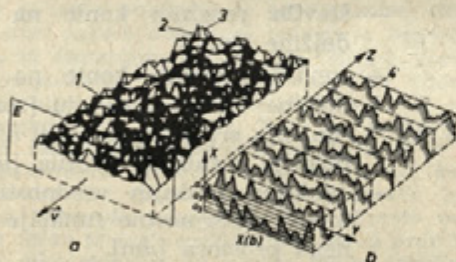
a	— nivo na elementarnem rezalnem profilu ali pristavitev k stroju [μm]
b	— širina rezalnega prostora [mm, cm]
d	— premer brusa [mm]
d_k	— velikost brusilnega zrna [μm]
D_x	— velikost razsipanja elementarnega rezalnega profila [μm^2]
E	— pričakovana vrednost
f	— frekvenca [Hz]
h	— globina brazde [μm]
$K_x(\beta)$	— korelacijska funkcija elementar-nega rezalnega profila [μm]
$K_{pr}^x(\beta)$	— križna korelacijska funkcija rezal-nih profilov p in r [μm^2]
$K_{nz}^x(\beta)$	— korelacijska funkcija vektorske slu-čajnostne funkcije rezalnega pro-stora [μm^2]
K_z	— število rezalnih konic na enoto dolžine [cm^{-1}]
K_{zo}	— število rezalnih konic na enoto dolžine v ničtem nivoju [cm^{-1}]
$m_x(b) = m_x$	— funkcija srednje vrednosti elemen-tarnega rezalnega profila [μm]
$m_k^x(b)$	— funkcija srednjih vrednosti vek-torske slučajnostne funkcije rezal-nega prostora [μm]
P_b	— vezalna sila kot fizikalna karakte-ristika za trdoto brusil. orodij [kp]
n_z	— število rezalnih profilov na enoto dolžine [cm^{-1}]
r	— oblikovni faktor rezalnih konic
s_b	— standardno razsipanje vezalne si-le [kp]
$S_x(\omega)$	— spekter razsipanja elementarnega rezalnega profila
v_w	— hitrost obdelovanja [m/min]
$X(b)$	— stacionarna slučajnostna funkcija, ki pomeni elementarni rezalni pro-fil
$X^o(b) = X(b) - m_x$	— (glej sliko 2) [μm]
$\beta = b - b'$	
δ_e	— elastična deformacija brusilnega orodja [μm]
$ \Phi(i\omega) $	— modul prenosne funkcije procesa
ω	— kotna hitrost [mm^{-1}]

3. Analitični opis rezalnega prostora na brusilnih orodjih

Pri raziskavah o karakteriziranju rezalnega prostora brusilnega orodja so raziskovalci odkrili različne poti, ki so se pokazale za bolj ali manj upoštevanja vredne. Naslednje veličine so bile vzete v poštev za definiranje rezalnega prostora:

razmik med brusilnimi zrnji [1]; število rezalnih konic na enoto ploskve [2, 3, 4] brez upoštevanja prostorske razdelitve rezalnih elementov na brusilnem orodju; število rezalnih konic na enoto dolžine z upoštevanjem njihove prostorske razdelitve [5, 6]. Oblika rezalnih elementov je upoštevana v oblikovnem faktorju r . Ta je definiran kot razmerje med širino w in globino brazde h . Vrednosti za oblikovni faktor r se lahko določajo iz izmerkov hrapavosti brušene površine. G. S. Reichenbach idr. [2] poročajo, da znaša to razmerje $r \approx 15$. Statistične raziskave K. Brücknerja [6] pa kažejo, da je to razmerje odvisno od velikosti zrn v brusilnem orodju. Za zrno 150 ($d_k \approx 95 \mu\text{m}$) je $r = 5$ in se poveča na $r = 18$, če se poveča zrno na st. 36 ($d_k \approx 550 \mu\text{m}$).

Te karakteristične veličine opisujejo rezalni prostor brusa samo v prvi aproksimaciji. Informacije te vrste niso povsem zadovoljive, da bi omogočale dovolj obsežno določitev korelacij med fizikalnimi lastnostmi brusilnega orodja in obliko elementarnih rezalnih profilov za različne pogoje naostrenja z diamantom.



Sl. 1. Rezalni prostor brusilnega orodja z elementarnimi rezalnimi profili

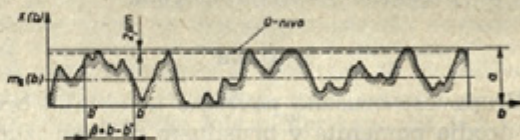
1 — vezalni mostič, 2 — brusilno zrno, 3 — rezalna konica, 4 — elementarni rezalni profil.

Elementarni rezalni profil brusilnega orodja dobimo, če njegov rezalni prostor presekamo z ravnino E , slika 1a. Njena lega je določena s pravokotno lego na vektor rezalne hitrosti $\vec{v}$. Med brušenjem preteče to ravnino določeno število elementarnih rezalnih profilov. Ti povzročajo odrezavanje materiala na obdelovancu, slika 1b.

Elementarni rezalni profil $X(b)$ pomeni slučajnostni proces. To se pravi, da je mogoče njegov potek določati samo z zakoni verjetnosti. Za analitični opis takšnih potekov je potrebno poznati njihove posebne lastnosti, tj. ali je proces stacionaren in ergodičen ter ali je njegova razdelitev v skladu z Gaussovo.

Raziskave elementarnih profilov na brusilnih orodjih z različnimi velikostmi zrn, trdotami, vrstami zrn itd. so pokazale, da je proces $X(b)$ stacionaren in ergodičen. To pomeni, da sta njegovi funkciji srednjih vrednosti $m_x(b)$ in razsipanja $D_x(b)$ po celotni dolžini profila b konstantni. Lastnosti rezalnega profila niso odvisne od lege, v kakršni se začne odbiranje njegove ordinate. Zaradi ergodične lastnosti profilov je potreben na brusu samo en izmerek oz. en posnetek profila. Iz teh informacij je potem mogoče izračunati njegove karakteristične funkcije.

Rezalni profili so samo tedaj ergodični, če uporabljamo pri ostrenju brusov optimalne pogoje in se pri tej pripravi orodja v rezalnem prostoru ne pojavljajo sistematični odstopki. Pri dosedanjih raziskavah ostrenja brusov [8, 9] z diamanti so bili ugotovljeni optimalni pogoji, predvsem velikost ostrilnega podajanja S_A in pristavitve a_A , pri katerih je računati z izpolnitvijo pogoja ergodičnosti.



Sl. 2. Elementarni rezalni profil

Funkcija srednje vrednosti elementarnega rezalnega profila, slika 2, je definirana v naslednji obliki

$$m_x(b) = E[X(b)] = \frac{1}{b} \int_0^b X(b) db \quad (1)$$

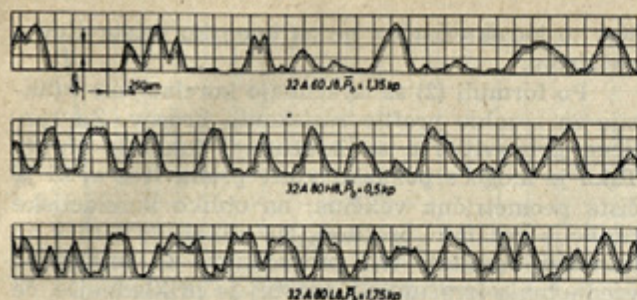
Slučajnostna oblika elementarnega rezalnega profila se opisuje s korelacijsko funkcijo, ki se glasi:

$$K_x(\beta) = E[X^o(b) X^o(b + \beta)] = \frac{1}{b - \beta} \int_0^{b-\beta} X(b) X(b + \beta) d\beta \quad (2)$$

pri čemer je $\beta = b - b'$; če je $\beta = 0$, velja $K(0) = D_x(b)$.^{*} To pomeni, da se spremeni korelacijska funkcija v enem prerezu rezalnega profila v razsipanje. Funkciji, definirani v izrazih (1) in (2), opisujeta v determinističnem smislu slučajnostne oblike rezalnih profilov v celoti in popolnoma.

Rezalne profile je mogoče načrtati s tipalnimi metodami. Z diamantno konico se profil na brusilnem orodju kontinuirano otipava, premiki igle pretvarjajo v analogno električno veličino, ta ojačuje in primerno zabeleži na papirju [5, 10]. Za določanje zanesljivih informacij o zgradbi in obliki rezalnih profilov je potrebno povzeti iz diagrama okrog 6000 ordinat v razmikih po $10 \mu\text{m}$.

^{*} V nadaljnjem bodo srednje vrednosti in razsipanja označene brez (b) .



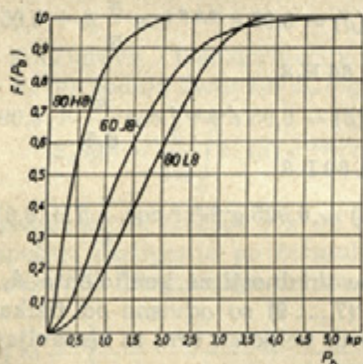
Sl. 3. Elementarni rezalni profili za različne bruse pogoji naostrenja $s_A = 0,1 \text{ mm/vrt}$, $a_A = 0,03 \text{ mm}$

Raziskave elementarnih profilov so bile izvedene na brusih z naslednjimi karakteristikami: vrsta zrna — beli Al_2O_3 ; velikost zrn — 60 in 80; trdota brusov po Nortonu — H, J in L; struktura št. 8. Na sliki 3 so prikazani posnetki rezalnih profilov. Fizikalna trdota brusov je bila določena s pomočjo nove merilne metode, ki jo je razvil avtor [11]. Kumulativne funkcije statistične razdelitve vezalnih sil $F(P_b)$ za zgoraj omenjene bruse kaže slika 4. Srednje vrednosti vezalnih sil P_b in njihova standardna odstopanja s_b so tudi podana na sliki 4.

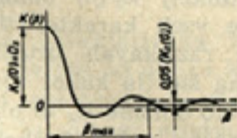
Pri določanju dolžine posnetega profila b mora biti izpolnjen naslednji pogoj, slika 5

$$K_x(\beta) \leq 0,05 |K_x(0)| \quad (3)$$

To pomeni, da je treba izbirati takšno dolžino profila, da pri izračunanju korelacijske funkcije, pri $\beta = \beta_{\max}$, le-ta ne bo nihala okoli abscise za več kakor 10 % razsipanja $D_x = K_x(0)$. Ker frekvence v profilu niso znane vnaprej, je potrebno opraviti proračune za različne dolžine b . Numerična vrednost ordinat se po posebnem ključu prenaša na



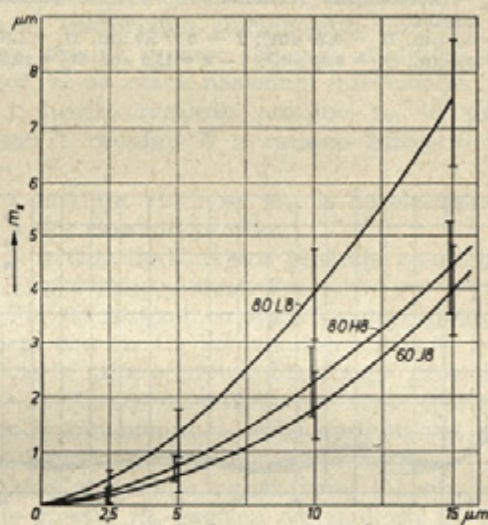
Sl. 4. Karakteristike trdote brusov
 $F(P_b)$ — kumulativna funkcija razdelitve, P_b — vezalna sila.



Sl. 5. Zveza med parametrom $\beta_{\max}$ in korelacijsko funkcijo $K_x(\beta)$ za stohastični proces

trak in nato z digitalnim računskim strojem izračunajo vrednosti za m_x in $K_x(\beta)$. Pri teh raziskavah je bil v rabi računski stroj »Bendix — G-20«.

Pomembna vplivna veličina pri brušenju je velikost pristavitve a [μm] oz. pristavljalna hitrost v_a [$\mu\text{m/vrt}$], ki bistveno vpliva na obliko karakterističnih funkcij rezalnega profila. Za različne pristavitve oz. nivoje rezalnih profilov ($a = 2,5; 5,0; 10,0$ in $15,0 \mu\text{m}$) so bile izračunane vrednosti za funkcije m_x in $K_x(\beta)$. S tem je bilo mogoče dobiti boljši vpogled v postopek brušenja glede na vsakokratne prereze odrezkov, obremenitve posameznih rezalnih konic itd.



Sl. 6. Potek srednjih vrednosti rezalnih profilov m_x v odvisnosti od pristavitve in karakteristik brusa
 m_x — srednja vrednost rezalnega profila, a — nivo rezalnega profila (ali pristavitve).

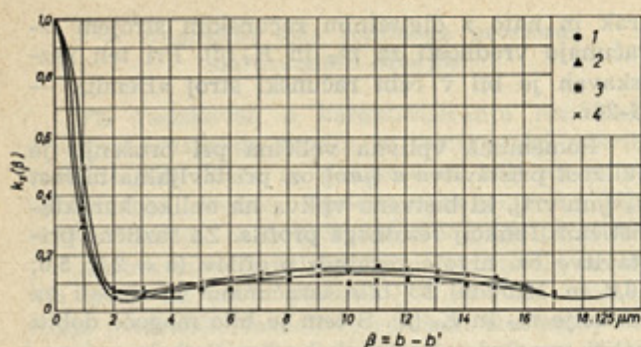
Potek srednjih vrednosti $m_x = f(a, P_b)$ je prikazan za raziskane bruse na sliki 6. Izračunavanje zanje se opravlja po formuli (1). V prvi aproksimaciji obstaja med pristavitvijo a in srednjo aritmetično vrednostjo profila m_x naslednja zveza

$$m_x = \frac{a}{K_{z0}} (a^{n-1} - 1) \quad (4)$$

Izraz (4) potrjuje, da se srednja vrednost profilne višine lahko določa s štetjem števila rezalnih konic K_{z0} na enoto dolžine. Številčne vrednosti za K_{z0} so priobčene v razpravi [5]. Za bruse, ki so bili v rabi pri teh raziskavah, so vrednosti eksponentov n med 1,5 in 1,9.

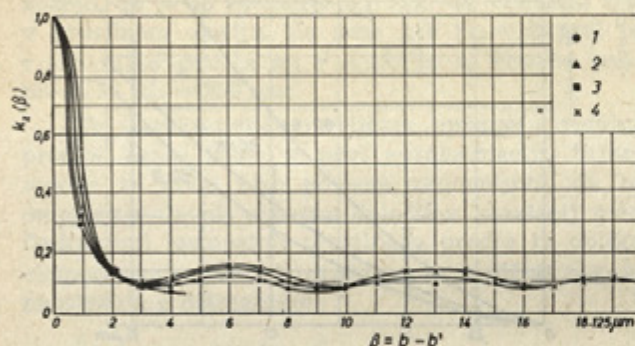
Te ugotovitve kažejo, da karakteristika srednje vrednosti m_x rezalnega profila upošteva trdoto brusa, velikost zrn in še pogoje pri naostrenju brusa z diamantom.

Pri raziskavah odrezovalnega postopka pri brušenju, dalje temperatur, sil, storilnosti pri odrezavanju, obrabe orodja itd. je treba jemati v po-



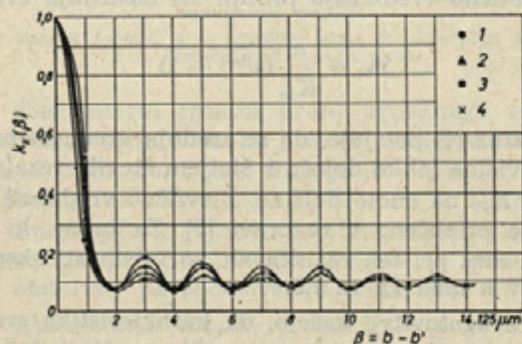
Sl. 7. Korelacijske funkcije za brus 32 A 60 J 8, $\bar{P}_b = 1,35 \text{ kp}$ in različne pristavitve a

$k_x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter.
 Brus 32 A 60 J 8
 1 — $a = 2,5 \mu\text{m}$, $D_x = 0,38 \mu\text{m}^2$; 2 — $a = 5,0 \mu\text{m}$, $D_x = 1,86 \mu\text{m}^2$;
 3 — $a = 10,0 \mu\text{m}$, $D_x = 9,80 \mu\text{m}^2$; 4 — $a = 15,0 \mu\text{m}$, $D_x = 24,30 \mu\text{m}^2$.



Sl. 8. Korelacijske funkcije za brus 32 A 80 H 8, $\bar{P}_b = 0,5 \text{ kp}$ in različne pristavitve a

$k_x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter.
 Brus 32 A 80 H 8
 1 — $a = 2,5 \mu\text{m}$, $D_x = 0,45 \mu\text{m}^2$; 2 — $a = 5,0 \mu\text{m}$, $D_x = 2,25 \mu\text{m}^2$;
 3 — $a = 10,0 \mu\text{m}$, $D_x = 11,75 \mu\text{m}^2$; 4 — $a = 15,0 \mu\text{m}$, $D_x = 23,45 \mu\text{m}^2$.



Sl. 9. Korelacijske funkcije za brus 32 A 80 L 8, $\bar{P}_b = 1,75 \text{ kp}$ in različne pristavitve a

$k_x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter.
 Brus 32 A 80 L 8
 1 — $a = 2,5 \mu\text{m}$, $D_x = 0,8 \mu\text{m}^2$; 2 — $a = 5,0 \mu\text{m}$, $D_x = 3,6 \mu\text{m}^2$;
 3 — $a = 10,0 \mu\text{m}$, $D_x = 15,2 \mu\text{m}^2$; 4 — $a = 15,0 \mu\text{m}$, $D_x = 29,2 \mu\text{m}^2$.

štev to karakteristiko, ne pa imensko pristavitve a na stroju.

Po formuli (2) se izračunajo korelacijske funkcije za rezalne profile raziskanih brusov. Za različne pristavitve a se izračunajo funkcije $K_x(\beta)$. Tako je mogoče pokazati vpliv pristavitve a , ki je čista geometrična veličina, na obliko korelacijske funkcije rezalnih profilov. Na slikah 7, 8 in 9 so razvidni rezultati teh proračunov. Za analitično vrednotenje izračunanih krivulj je prikladnejše, če se te normalizirajo. Posamezne vrednosti za $K_x(\beta)$ se delijo z velikostjo razsipanja D_x :

$$k_x(\beta) = \frac{K_x(\beta)}{D_x} \quad (5)$$

Na ordinati, kjer je $\beta = 0$, je vrednost normalizirane korelacijske funkcije enaka $k_x(\beta) = 1$.

Primerjava posameznih korelacijskih funkcij za bruse različnih trdot, velikosti zrn in pristavitve izkazuje velik vpliv na njihovo obliko, slika 10. Spričo slučajnostne narave rezalnih profilov bi se njihove lastnosti ne dale opisati brez korelacijskih funkcij, ki pa so hkrati znane funkcije v determinističnem smislu.

Analitično je mogoče izraziti prikazane korelacijske funkcije v naslednji splošni obliki

$$k_x(\beta) = A e^{-\alpha\beta} \cos \gamma \beta + B \beta (\beta^{n+1} + C)^{-1} [1 - \cos \delta (\beta - D)] + E \quad (6)$$

$A, \dots, E, \alpha, \gamma, \delta$ in n so konstante, ki so izračunljive iz meritev. Pri praktičnih proračunih funkcij $k_x(\beta)$ se lahko zanemari drugi člen na desni strani enačbe (6). Iz vrednotenja izračunanih krivulj za raziskana orodja in pri pristavitvi $a = 10 \mu\text{m}$ izhajajo takile izrazi za korelacijske funkcije:

za brus 32 A 60 J 8

$$k_x(\beta) = 0,95 e^{-0,9\beta} \cos \frac{\pi}{5} \beta + 0,05 \quad (7)$$

za brus 32 A 80 H 8

$$k_x(\beta) = 0,95 e^{-0,91\beta} \cos \frac{\pi}{6,5} \beta + 0,09 \quad (8)$$

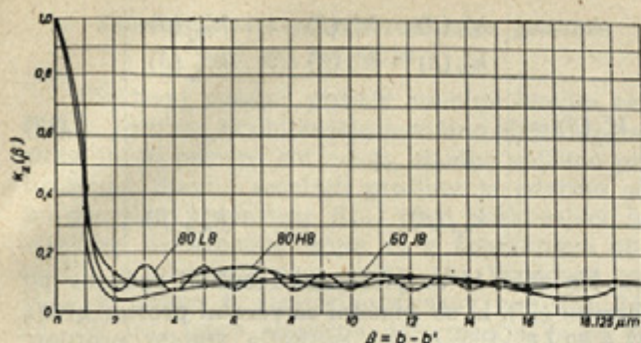
za brus 32 A 80 L 8

$$k_x(\beta) = 0,925 e^{-0,65\beta} \cos \frac{\pi}{4} \beta + 0,075 \quad (9)$$

Številčne vrednosti za koeficiente A, E, α in γ v formulah (7...9) so odvisne od fizikalnih lastnosti brusov in velikosti zrn, ki sestavljajo rezalne elemente brusa.

Opis elementarnih rezalnih profilov na brusilnih orodjih s pomočjo srednjih vrednosti m_x in korelacijskih funkcij $k_x(\beta)$ omogoča deterministično določanje vseh karakteristik, ki naj bodo upoštevane pri raziskavah brusilnih postopkov. Dosedanja opisna števila kakor npr. število rezalnih konic na enoto dolžine K_x in oblikovni faktor r so seveda zaobsežena v obeh funkcijah m_x in $k_x(\beta)$.

Frekvenčna karakteristika elementarnega rezalnega profila je definirana kot spekter razsipanja



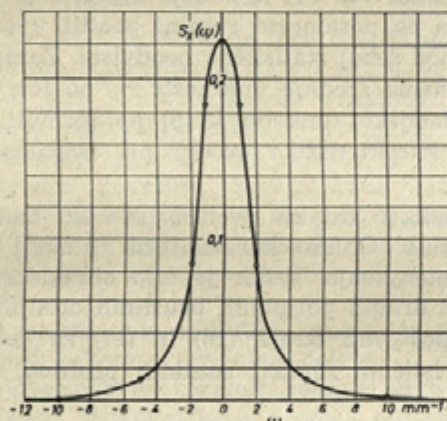
Sl. 10. Primerjava korelacijskih funkcij brusov z različnimi geometričnimi in fizikalnimi karakteristikami za pristanitev $a = 10 \mu\text{m}$

$k_x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter.
Nivo $a = 10 \mu\text{m}$.

Brus 32 A 60 J 8: $m_x = 1,8 \mu\text{m}$, $D_x = 9,8 \mu\text{m}^2$,

Brus 32 A 80 H 8: $m_x = 2,3 \mu\text{m}$, $D_x = 11,8 \mu\text{m}^2$,

Brus 32 A 80 L 8: $m_x = 3,9 \mu\text{m}$, $D_x = 15,2 \mu\text{m}^2$.



Sl. 11. Spekter razsipanja za brus 32 A 60 J 8,
 $P_b = 1,35 \text{ kp}$, $a = 10 \mu\text{m}$
 ω — frekvenca

$S_x(\omega)$. Fourierova transformacija korelacijske funkcije $k_x(\beta)$ podaja funkcijo $S_x(\omega)$

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k_x(\beta) e^{-i\omega\beta} d\beta \quad (10)$$

Z upoštevanjem izrazov (7), (8) in (9) se izračunajo spektri razsipanja po formuli (10) za raziskane bruse. Po integriranju dobimo

$$S_x(\omega) = \frac{A}{2\pi} \left\{ \frac{a}{a^2 + (\omega + \gamma)^2} + \frac{a}{a^2 + (\omega - \gamma)^2} + \frac{2E}{\pi\omega} \sin \gamma\omega \right\} \quad (11)$$

Frekvenčna karakteristika rezalnega profila je zelo močno odvisna od oblike korelacijske funkcije in izraža s tem prav tako fizikalne in geometrične lastnosti brusilnega orodja.

Slika 11 kaže spekter razsipanja $S_x(\omega)$ v odvisnosti od frekvence za brus 32 A 60 J 8.

Ta funkcija je vhodna funkcija za izračun brusilnega procesa. Enako bomo opisali tudi izhodne veličine tj. hrapavost brušene površine in spremembe oblik rezalnih profilov zaradi obrabe. Ta vprašanja bomo raziskali v nadaljnjih izvajanjih podrobneje.

4. Definicija in lastnosti rezalnega prostora na brusilnem orodju

Rezalni prostor na brusilnem orodju je definiran z večjim številom elementarnih rezalnih profilov, ki jih je imeti za slučajnostne funkcije, kakor je bilo prikazano v dosedanjih izvajanjih. Celotno število rezalnih profilov $X_1(b)$, $X_2(b) \dots X_{n_z}(b)$ pomeni vektorialno slučajnostno funkcijo, ki definira rezalni prostor. Njegov analitični opis je mogoč, če so znane naslednje informacije:

1. število rezalnih profilov n_z , ki pretečejo v času t ravnino E z rezalno hitrostjo v (glej sliko 1);

2. srednja vrednost m_x in korelacijska funkcija $k_x(\beta)$ rezalnih profilov;

3. križne korelacijske funkcije rezalnih profilov, ki pretečejo ravnino E .

Število rezalnih profilov n_z z zadovoljivim približanjem ustreza številu rezalnih konic K_z na enoto dolžine v ničtem nivoju brusilnega prostora (glej sliko 2). Zaradi neenakomerne razdelitve rezalnih konic v tem nivoju je treba opraviti več meritev, da dobimo statistično zanesljive rezultate.

Med prejšnjimi raziskavami [5] smo dognali, da je število K_z odvisno od velikosti in žilavosti brusilnih zrn, trdote brusa in pogojev pri naostrenju brusa z diamantom.

Korelacijska zveza med trdoto brusa, definirano s srednjo vrednostjo vezalnih sil $\bar{P}_b$ in številom rezalnih konic K_z oz. n_z za ničti nivo pri brusu 32 A 60 J 8 se glasi

$$n_z = K_z + b_z(P_b - \bar{P}_b) \quad (12)$$

$\bar{K}_z$ — celotna srednja vrednost rezalnih konic

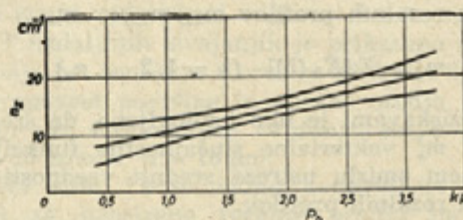
($\bar{K}_z = 14 \text{ cm}^{-1}$)

b_z — regresijski koeficient ($b_z = 4 \text{ cm}^{-1} \text{ kp}^{-1}$)

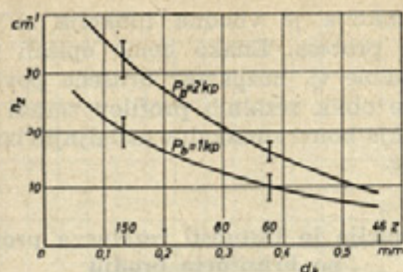
$\bar{P}_b$ — celotna srednja vrednost vezalnih sil

($\bar{P}_b = 1,75 \text{ kp}$)

Številčni podatki se nanašajo na vrednosti na sliki 12. Zaupanja vredne meje regresijske pre-



Sl. 12. Korelacija med trdoto P_b in številom rezalnih konic $K_{z0} = n_z$ v ničtem nivoju, zrnatost 60
 n_z — število rezalnih profilov, P_b — trdota.
Zrnatost 60 EK bel. 0-ni nivo rezalnega prostora.



Sl. 13. Korelacija med velikostjo zrna d_k in številom rezalnih konic $K_z = n_z$
 n_z — število rezalnih profilov, z — zrnatost, d_k — velikost zrna.
 EK bel. 0-ni nivo rezalnega prostora.

mice kažejo, v kakšnih mejah je pričakovati nihanja števila rezalnih profilov n_z za posamezne trdote brusov.

Vpliv velikosti zrna na število rezalnih profilov kaže slika 13. Pri konstantni trdoti brusov $P_b = \text{konst}$ dobimo naslednjo zvezo za $n_z = f(d_k)$

$$n_z = \frac{1}{A d_k^n} + C \quad (13)$$

Koeficienti A , C in n so določljivi iz merilnih podatkov. Nadaljnji izsledki in podatki v teh vprašanjih so razvidni iz dela [5].

Kakor smo že omenili, se izračunavajo korelacijske funkcije rezalnih profilov po formuli (2) oz. (7) do (9). Korelacijska funkcija dveh zaporedno ležečih rezalnih profilov je tako imenovana križna korelacijska funkcija $K_{pr}(\beta)$. Za dvoje stacionarnih rezalnih profilov $X_p(b)$ in $X_r(b)$ velja

$$K_{pr}(\beta) = \frac{1}{b - \beta} \int_0^{b-\beta} X_p(b) X_r(b + \beta) db \quad (14)$$

Za udobnejše vrednotenje se (14) normira tako:

$$k_{pr}^x(\beta) = \frac{K_{pr}^x(\beta)}{\sqrt{D_p^x D_r^x}} \quad (15)$$

D_p^x in D_r^x — razsipanja rezalnih profilov p in r

Vektorialna slučajnostna funkcija, ki definira rezalni prostor brusilnega orodja, se opisuje s srednjo vrednostjo m_h^x in korelacijsko funkcijo $k_{nz}^x(\beta)$.

Srednja vrednost vektorialne slučajnostne funkcije se izračunava iz srednjih vrednosti posameznih rezalnih profilov $m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{x n_z}$

$$m_h^x = E[X_h(b)] \quad (h = 1, 2, \dots, n_z) \quad (16)$$

Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da srednja vrednost m_h^x vektorialne slučajnostne funkcije v statističnem smislu ustreza srednji vrednosti posameznih rezalnih profilov.

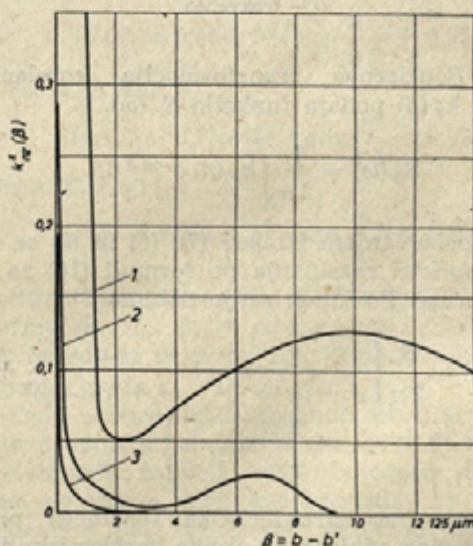
Korelacijska funkcija rezalnega prostora $k_{nz}^x(\beta)$ se izraža z matrico, ki vsebuje vse korelacijske in križne korelacijske funkcije rezalnih profilov (glej formuli (2) in (14))

$$k_{nz}^x(\beta) = \begin{vmatrix} k_{11}^x(\beta) & k_{12}^x(\beta) & \dots & k_{1 n_z}^x(\beta) \\ k_{21}^x(\beta) & k_{22}^x(\beta) & \dots & k_{2 n_z}^x(\beta) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n_z 1}^x(\beta) & \dots & \dots & k_{n_z n_z}^x(\beta) \end{vmatrix} \quad (17)$$

Na sliki 14 so prikazani rezultati računov po formuli (17), ki so značilni za rezalni prostor brusov 32 A 60 J 8. Parametre sestavlja število profilov, ki pretečejo ravnino E , tj. $n_z = 1$; $n_z = 1 + 1 = 2$; $n_z = 1 + 1 + 1 = 3$. Proračuni veljajo za nivo $a = 10 \mu\text{m}$.

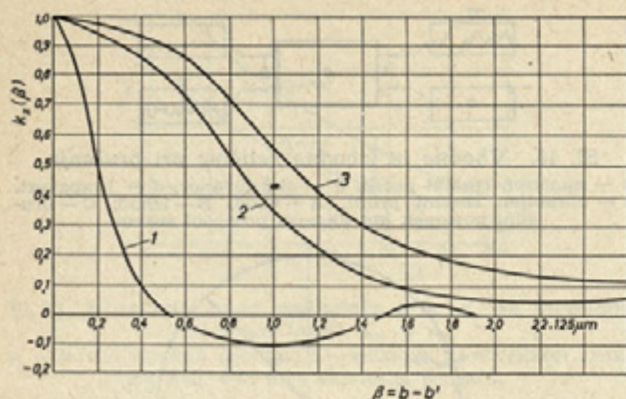
Iz poteka korelacijske funkcije rezalnega prostora je razvidno, da se s povečanjem števila rezalnih profilov korelacijski momenti med profili zelo zmanjšujejo (primerjaj krivulje za dva oz. tri profile, slika 14). Pri $n_z > 3$ je $k_{nz}(\beta) = 0$. To pomeni, da so posamezni rezalni profili v teh primerih med seboj statistično neodvisni. Zaradi tega lahko imamo srednje vrednosti m_x po formuli (4) in korelacijsko funkcijo $k_x(\beta)$ po formuli (6) za vhodne karakteristike orodja pri brusilnem postopku.

Raziskave ostalih dveh brusov so dale analogne izide. Oblike korelacijskih funkcij pa se seveda menjavajo, kakor je bilo obrazloženo poprej. Pri drugih poljubnih brusilnih orodjih pa je treba upoštevati izraza (16) in (17) za določanje karakterističnih funkcij rezalnih profilov.

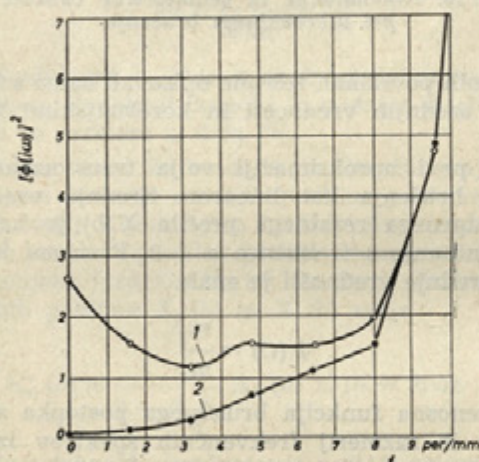


Sl. 14. Korelacijska funkcija vektorialne slučajnostne funkcije rezalnega prostora za brus 32 A 60 J 8,
 $a = 10 \mu\text{m}$

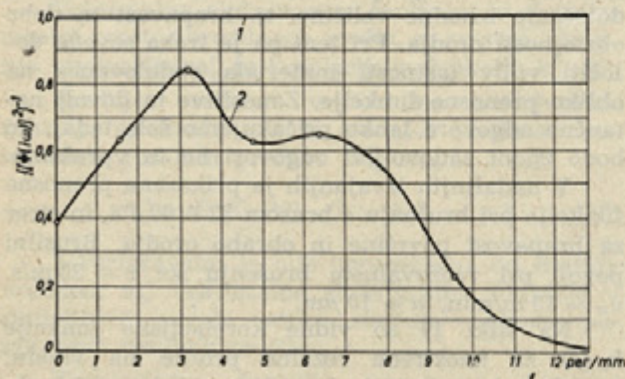
$k_{nz}^x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter,
 1 — 1. profil, 2 — 2. profil, 3 — 3. profil.



Sl. 17. Primerjava korelacijskih funkcij rezalnih profilov v naostrenem stanju (vhod) z obrabljenimi profili (izhod) in korelacijsko funkcijo brušene površine $k_x(\beta)$ — korelacijska funkcija, $\beta = b - b'$ — parameter. 1 — hrapavost obdelovanca $k_{yR}(\beta)$, 2 — naostreni rezalni profili $k_x(\beta)$, brus 32 A 60 J 8, 3 — obrabljeni rezalni profili $k_{yR}(\beta)$.



Sl. 18. Prenosne funkcije za hrapavost in obrabo $[\Phi(i\omega)]^2$ — prenosna funkcija, f — frekvenca
1 — prenosna funkcija hrapavosti, 2 — prenosna funkcija obrabe.



Sl. 19. Funkcija rezalne sposobnosti brusa 32 A 60 J 8 $[\Phi(i\omega)]^2$ — rezalna sposobnost, f — frekvenca.
1 — maksimalna rezalna sposobnost brusa, 2 — rezalna sposobnost obrabljenega brusa.

Za hrapavost dobimo naslednjo korelacijsko funkcijo:

$$k_{yR} = e^{-2,32\beta} \cos \pi \beta \quad (21)$$

Ta površina je bila oblikovana s približno $n_x = 90$ rezalnimi profili. Z upoštevanjem izrazov (7), (10), (20) in (21) izračunamo prenosno funkcijo hrapavosti $|\Phi(i\omega)|^2_R$. Na sliki 18 je ponazorjen njen potek nad frekvenco $f = \omega/2\pi$ (perioda/mm). Pri izračunu so bila upoštevana razsipanja rezalnih profilov $D_x = 9,8 \mu m^2$ in hrapavosti $D_{yR} = 3,4 \mu m^2$.

Prenosni koeficient srednjih vrednosti m_x in m_{yR} se določa po formuli (19). Za raziskan primer velja:

$$\Phi_R(0) = \frac{m_{yR}}{m_x} = \frac{1,25}{2,75} = 0,455$$

Podobno se izračunava prenosna funkcija za obrabo rezalnih profilov. Zaradi velikih mehaničnih in termičnih obremenitev rezalnih elementov se med brušenjem menjava njihova oblika. Te spremembe se kažejo v spremenjeni obliki korelacijske funkcije rezalnih profilov k_{yR} in njihove srednje vrednosti m_{yR} . Pri zmanjšanju premera brusa za $\Delta r = 8 \mu m$ se srednja vrednost poveča od $m_x = 2,75 \mu m$ (naostreni profili v začetku brušenja) na $m_{yR} = 4,35 \mu m$ (obrabljeni rezalni profili po določenem brusilnem času). Prenosni koeficient je v tem primeru enak

$$\Phi_w(0) = \frac{m_{yR}}{m_x} = \frac{4,35}{2,75} = 1,58$$

Korelacijska funkcija za obrabljene rezalne profile $k_{yR}(\beta)$ je razvidna s slike 17. Njena analitična oblika se glasi:

$$k_{yR}(\beta) = 0,91 e^{-0,8\beta} \cos \frac{\pi}{8} \beta + 0,09 \quad (22)$$

Prenosna funkcija obrabe $|\Phi(i\omega)|^2_w$ pri brušenju je prikazana na sliki 18.

Pomen analitičnega opisa brusilnega postopka glede na oblikovanje površine in obrabo je predvsem v tem, da imamo poslej možnost poiskati optimalne rešitve za izbiro orodja, brusilnih pogojev, itd. z matematičnimi metodami. Teorija stohastičnih procesov nam daje pri tem potrebno orodje.

Rezalna sposobnost brusa je ena najpomembnejših lastnosti pri praktični uporabi. Znano je, da se rezalna sposobnost orodja z njegovo obrabo zmanjšuje. Nedvoumna definicija te lastnosti pa do sedaj še ni znana.

Kadar koli se oblika rezalnih profilov med brušenjem ne menja, ostaneta spektra razsipanja na vhodu in izhodu nespremenjena. Nad vsem frekvenčnim območjem je razmerje spektrov razsipanja konstantno. Rezalna sposobnost brusa je v tem primeru maksimalna in enaka 1, slika 19.

Zaradi obrabe se spektri razsipanja spreminjajo, rezalna sposobnost brusov pa se zmanjša pod 1. Ta lastnost se da izraziti kot inverzna prenosna funkcija obrabe, in sicer:

$$\{[\Phi(i\omega)]^{-1} = \frac{S_x(\omega)}{S_{y_{gr}}(\omega)} \cdot \frac{D_x}{D_{y_{gr}}} \quad (23)$$

Spremembo rezalne sposobnosti brusa 32 A 60 J 8 nad frekvenco kaže slika 19. Doba obstojnosti brusa je funkcija oblike krivulje za rezalno sposobnost. Vsakokratni prerezi odrezkov so — kakor kažejo raziskave — bistveno odvisni od tega, kakšne oblike je prenosna funkcija brusilnega postopka oz. njena inverzna funkcija obrabe.

Prenosne funkcije za hrapavost in obrabo omogočajo vpogled v transformacije spektrov razsipanj. Tako je mogoče opisati postopek brušenja, ki je karakteriziran z izrazito stohastičnimi lastnostmi vhodnih in izhodnih veličin, s prenosno funkcijo, ki jo je mogoče optimirati. Za določanje optimalnih pogojev brušenja ne bodo več potrebni dolgotrajni in dragi eksperimentalni poskusi, temveč bo možno reševati ta vprašanja z analognimi računskimi stroji.

8. Literatura

1. Pahlitzsch, G. und Helmerdig, H., Bestimmung und Bedeutung der Spandicke beim Schleifen, Der Betrieb Nr. 11/12, 1943.
2. Reichenbach, G. S., Mayer, J. E., Kalpakcioglu, S. and Shaw, M. C., The Role of Chip Thickness in Grinding, Trans. ASME 1956, S. 847—859.
3. Sato, K., On the Surface Roughness in Grinding, The Technology Reports of the Tohoku University, Vol. XX, 1955, No. 1.
4. Orioka, T., On the Grinding Geometry for the Random Spacing of Abrasive Grains on Wheel Surface, Report of the Faculty of Eng., Yamanashi University, No. 8, July, 1957.
5. Peklenik, J., Versuchsergebnisse zur Ausbildung der Schneidelemente an Schleifwerkzeugen, Ind. Anz. 1961, Nr. 97, S. 1929—1936.

6. Brückner, K., Der Schleifvorgang und seine Bewertung durch die auftretenden Schnittkräfte, Dissertation T. H. Aachen, 1962.

7. Pugačev, V. S., Theorie der Zufallsfunktionen und ihre Anwendung in der Regelungstechnik, Mašgiz Moskau, 1957.

8. Pahlitzsch, G. und Appun, J., Einfluß der Abrichtbedingungen auf Schleifvorgang und Schleifergebnis beim Rundschleifen, Werkstattstechnik und Maschinenbau 53/9, S. 396.

9. Schwartz, K. E., Zerspanungsablauf und Schleifergebnis beim Außenrundschleifen, Dissertation T. H. Aachen, 1959.

10. Brückner, K., Betrachtungen zum Verschleißvorgang beim Schleifen, Industrie-Anzeiger, 1960, p. 553—558.

11. Peklenik, J., Neue statische und dynamische Prüfmethode der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Schleifkörpern, Industrie-Anzeiger 1960, Nr. 28, S. 425—430.

12. Peklenik, J., Opitz, H., Testing of Grinding Wheels, Proc. 3rd Int. Prod. Conf. in Birmingham, 1962 September, S. 163—177, Pergamon Press, Oxford, London 1963.

13. Opitz, H. und Saljé, E., Wesen und Bedeutung der Rauhtiefe beim Außenrundschleifen, Ind. Anz. 52/1, S. 8.

14. Saljé, E., Grundlagen des Schleifvorganges, I. Teil: Die Rauhtiefe beim Schleifen. Wt. u. Betr. 53/2, 45.

15. Pahlitzsch, G., Über die Wirtschaftlichkeit stufenloser Einstellbarkeit von Schleifscheiben- und Werkstückdrehzahl beim Rundschleifen, Microtecnic, 1956, Nr. 6, S. 276—282.

16. Opitz, H. und Frank, H., Richtwerte für das Außenrundschleifen, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 965, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1961.

17. Peklenik, J., Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process, Journal of Engineering for Industry, Trans ASME, Series B, vol. 86, 1964, pp. 97—106.

18. Peklenik, J., Grundlagen zur Korrelations-theorie technischer Oberflächen. Industrie-Anzeiger 1965, 30. III.

Avtorjev naslov: Prof. dr. ing. Janez Peklenik, University of Birmingham, Anglija

DK 621.951.002

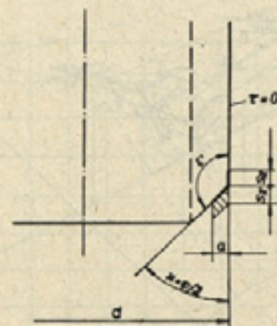
Prispevek h geometriji povrtala

EVGEN MAREK

Povrtalo je orodje za fino izdelavo površine v luknji. Luknja mora biti izdelana navadno v ozki toleranci, vrhu tega pa mora biti površina gladka. Ze velikost dodatka vpliva na kvaliteto obdelane ploskve. Premajhen dodatek po nepotrebnem utrjuje površino, prevelik dodatek pa čezmerno obremenjuje povrtalo; oba pogoja pa slabita obstojnost povrtala.

Po geometriji je povrtalo navidezno enostavno orodje. Povrtalo reže samo z označenim rezalnim robom na površini in v dolžini podajanja na zob s_z na valjastem delu rezalnega roba (slika 1). Ker je aktivni del konice majhen, mnogokrat pozabljajo na najvažnejše elemente.

Slika 1 prikazuje tri kote v konvencionalni obliki. S skice je razvidno, da je prednji nastavni kot $\alpha = \frac{\varphi}{2}$.



Slika 1