

DK 621.923.001.5

Prispevek k teoriji brušenja

JANEZ PEKLENIK

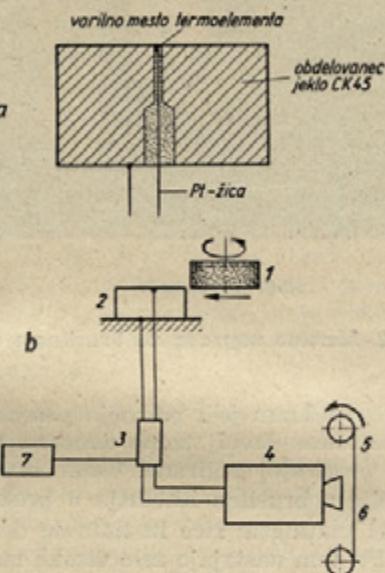
1. K problemu in definiciji brušenja

Tehnološki postopek brušenja dobiva v moderni proizvodnji vedno večji pomen. V množinski in serijski proizvodnji gre težnja za tem, da se nadomešča vnaprejšnja obdelava oz. groba obdelava obdelovancev, ki se sedaj opravlja s struženjem in frezanjem, s plastičnimi preoblikovalnimi postopki, n. pr. z natančnim kovanjem ali stiskanjem. Obdelovanci se pri tem plastično oblikujejo tako, da je potrebna nato samo še končna obdelava z brusilnim postopkom.

Tudi v posamični proizvodnji zavzema brušenje pomembno mesto. Od pravilnih brusilnih pogojev, pravilne izbire brusa za določene materiale obdelovanca itd. je odvisna kvaliteta površine, se pravi njena hrupavost in spremembe v notranjem mejnem sloju, natančnost in druge veličine, ki določajo funkcionalno vrednost obdelovanca.

Iz teh razlogov je potrebna določitev geometričnih in fizikalnih vplivnih veličin pri postopku brušenja. Ta problematika zavzema pri raziskovanju odrezavanja kovin posebno mesto. Zaradi stohastične razdelitve posameznih brusilnih zrn v brusu in njihove raznolike geometrije, ki je ni mogoče determinirati, je teoretična in eksperimentalna obdelava tega tehnološkega postopka zelo otežena. Nadaljnja težava, ki se vedno znova pojavlja pri teh raziskovanjih, je zaznavna pri prenosu laboratorijskih raziskovalnih rezultatov v prakso. Izkušnja kaže, da se priporočila o posameznih pogojih brušenja iz laboratorija le malokdaj ujemajo z onimi iz prakse. Tega so krive nepopolne in deloma napačne predstave o mehanizmu brušenja, zgradbi brusov in njihovem obnašanju med obdelavo, pa tudi zgrešene predstave o geometriji posameznega odrezka, obrabi brusa, silah in temperaturah na posameznih zrnih itd.

Pri dosedanjih raziskovanjih brusilnega postopka [1—4] je bila osvojena predstava, da je brus geometrično določen, in sicer, da so zrna porazdeljena v enakomernih razdaljah drugo od drugega in leže vsa na eni in isti nivojski ploskvi. Nadalje so bili poizkusni pri posameznih pogojih brušenja ponovljeni le enkrat ali dvakrat. Iz teh maloštevilnih poizkusov so izvajali zaključke, ki naj bi imeli splošno veljavo. Veliko število vplivnih veličin pri brušenju terja planiranje raziskav in vrednotenje rezultatov z metodami matematične statistike. Le tako bo mogoče najti splošno veljavne zakonitosti in v praksi določiti optimalne pogoje brušenja glede na kvaliteto in ceno izdelka.



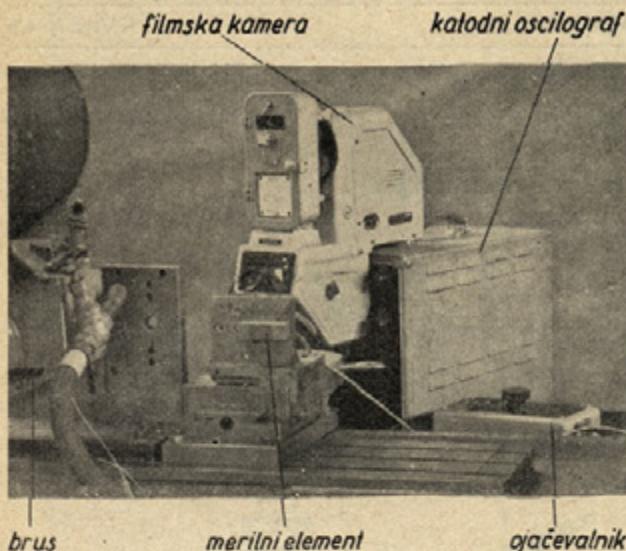
Sl. 1 a. Merilni element za določitev prebrusnega števila in temperatur pri brušenju, b — merilna shema

V tej razpravi bomo obravnavali nekatere novejše izsledke s področja brušenja, ki jih je avtor našel pri eksperimentalnih in teoretičnih raziskovanjih te problematike [5, 6, 11, 12]. S pomočjo posebnih merilnih metod je bilo mogoče izdelati novo sliko o mehanizmu brušenja in s tem natančno določiti eno najvažnejših vplivnih veličin pri brušenju, in sicer debelino odrezka, ki ga odreže eno zrno. Nadalje je bil določen nov kriterij za obrabo glede na obstojno dobo brusa. S temi dognani je dana osnova za nadaljnje raziskovalno delo tega za proizvodnjo tako pomembnega tehnološkega postopka.

2. O mehanizmu brusilnega postopka

2.1 Raziskovalna metodika. Da bi mogli zbrati globlje in pravilnejše predstave o brušenju, je bila uvedena nova merilna metoda [5], ki omogoča merjenje temperatur na posameznih brusilnih zrnih neposredno med brušenjem. Iz časovnega zaporedja temperturnih impulzov je mogoče določiti razdalje zrn, ki prebrusijo eno in isto mesto na obdelovancu pri enem prehodu brusa. Z drugimi besedami, tako je mogoče določiti število zrn, ki prebrusijo obdelovanec pri enem prehodu brusa.

Merilni element je zgrajen takole: v obdelovane je skozi majhno izvrtino vtaknjena platinasta žica, slika 1 a. Premer izvrtine znaša 0,25 mm. Žica



Sl. 2. Merilna naprava na brusilnem stroju

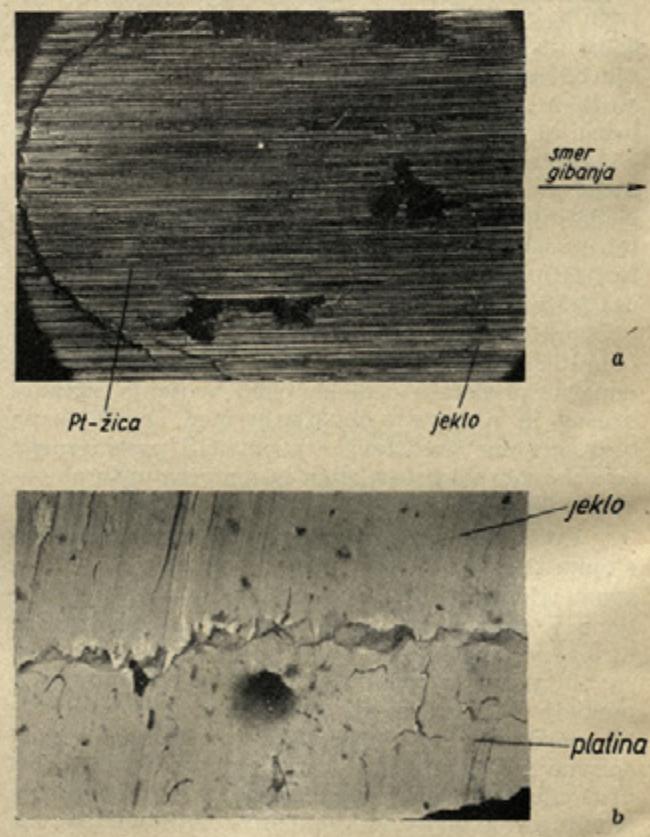
s premerom 0,2 mm je s pomočjo posebnega lepila iz umetne mase dovolj trdno zvezana s steno izvrtine in proti njej izolirana. Vsako brusilno zrno, ki se giblje z brusilno hitrostjo v preko izvrtine, odreže del platinaste žice in nato še dělček obdelovanca. Pri tem nastajajo zelo visoke temperature, ki povzročajo zvarjenje termoelementa platina-jeklo. Termoelektrične napetosti, ki se v trenutku odreza pojavljajo v tej točki, se v baterijskem ojačevalcu ojačijo ter prenašajo na katodni osciloskop, slika 1 b. Potek termoelektričnih napetosti se beleži s pomočjo specialne filmske kamere na zelo občutljivem filmu. Na sliki 2 je prikazana raziskovalna naprava na brusilnem stroju. Zvarjeno mesto na termoelementu platina-jeklo je videti na sliki 3 a, medtem ko kaže slika 3 b elektronsko-mikroskočni posnetek zvarjenega mesta. Iz oblike brusilnih brazd je videti, da je bila pri oranju zrna skozi varilno mesto temperatura višja od 1790 °C, to je tališča platine.

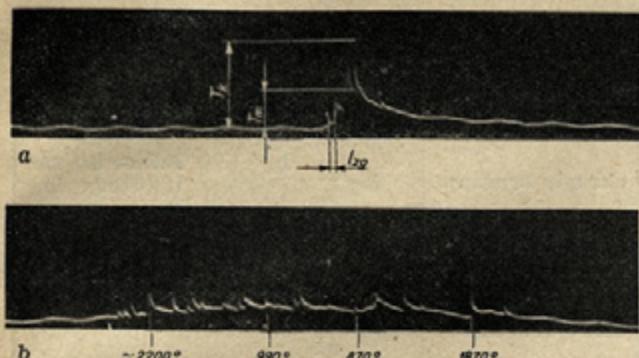
Potek termičnih in s tem tudi mehaničnih obremenitev opazovanega mesta, to je termoelementa platina-jeklo pri enem prehodu brusa preko obdelovanca, je na sliki 4 prikazan kot filmski posnetek. Prvo zrno zadene termoelementa, ki se — natančneje povedano — stvari v trenutku prereza. Pojavlji se prvi električni napetostni impulz, ki mu ustreza temperatura T_k v trenutku prereza tega mesta. Nato temperatura pada po določenem eksponentnem zakonu, in sicer tako dolgo, dokler naslednje zrno, ki sledi v razdalji l_{zg} , ne prereže istega mesta na površini obdelovanca. To se ponavlja tako dolgo, dokler brus ni prebrusil materialne točke na obdelovancu, kjer je nameščen termoelement. Bližnja okolica termoelementa se je pri tem segrela na neko srednjo temperaturo T_m . O višinah trenutnih temperatur na posameznih zrnih je nekaj podatkov v poglavju o obrabi brusov.

Tabela 1.

Zrnatost brusa	Srednji premer brusilnega zrna d_k mm	Korekcijski faktor $\xi = b_s/d_k$	Opombe
46	0,360	0,70	Podatki o procentualni granulometrični sestavi po E. N. Maslovu [4]
60	0,235	1,07	
80	0,175	1,40	
100	0,131	1,90	Po podatkih različnih tvrdk
120	0,110	2,30	
150	0,090	2,80	

K prikazani merilni metodi je potrebnih nekaj pripomemb. Posamezna zrna, ki prerežejo termoelement, nimajo samo ene rezalne konice, marveč večje število, približno 3 do 10. Na filmu se kljub temu registrira samo en impulz, in sicer zategadelj, ker je razdalja med posameznimi konicami zrna premajhna in leži v velikostnem redu med 0,05 do 0,1 mm. Katodni žarek pa je predebel, da bi mogel na filmu ločiti vse te mikroimpulze, vendar je skupina konic na enem brusilnem zrnu v njihovem učinku natanko določena z enim impulzom. Nadaljnje, kar je treba upoštevati pri določitvi efektivne razdalje zrn l_{zg} , pa je, da se za vse zrnatosti brusov, to je od 46 do 150, premer termoelementa.

Sl. 3. a) Merilni element — termoelement Pt-jeklo
b) — merilni element — posnetek zavarjenega mesta v elektronskem mikroskopu



Sl. 4. Potek temperatur na posameznih brusilnih zrnih:
a — brušenje s skledastim brusom,
b — brušenje z valjastim brusom

elementa ni spremenil. Znano je, da znaša premer zrna pri brusu z zrnatostjo 46 približno $d_k \approx 0,36$ mm (srednja vrednost), pri brusih z zrnatostjo 150 pa pri $d_k \approx 0,09$ mm. Ker je bil pri meritvah premer termoelementa konstanten, in sicer 0,25 mm, je bilo potrebno uvesti korekturo glede na razdaljo zrn, ki zaporedoma prebrusijo termo-element. V tabeli 1 so izračunani korekturni koeficienti za različne bruse. Pri uporabi opisanega merilnega elementa je treba to upoštevati pri vrednotenju merilnih rezultatov. Natančnejšo analizo teh raziskav je mogoče najti v delih [5, 6].

2.2 Mehanizem brušenja in definicija prebrusnega števila. Brušenje se opravlja tako, da določeno število zrn, ki so stohastično porazdeljena na ravnih ali valjastih rezalnih ploskvah brusov, v določenem časovnem zaporedju odrezuje posamezne delce na obdelovancu.

Po klasični definiciji pove prebrusno število, kolikokrat se prebrusi materialna točka obdelovanca pri enem prehodu brusa česenj. Po A. Ta-

skinu [13] se izraža prebrusno število z naslednjim matematičnim obrazcem:

$$u = \frac{b}{s} = \frac{b}{v_t} \cdot n_w \quad (1)$$

Iz dosedanjih raziskav H. Opitza [14], E. Saljeja [15] in drugih je razvidno, da je prebrusno število neka vplivna veličina, ki zelo vpliva na hrapavost površine. Čim višje se izbira število prebrušenj, tem boljša je dosežena kvaliteta brušene površine. Ta zaključek pa se v praksi ni potrdil vedno. Hrapavost ploskve je namreč odvisna tudi od drugih vplivnih veličin, kakor n. pr. brusilne nitrosti, podajanja, zrnatosti brusa, geometrije brusa itd. V formuli za hrapavost brušenih površin, ki jo je dognal E. Salje [15], so te vplivne veličine deloma upoštevane, vendar je prebrusno število ostalo definirano v klasični obliki. Iz novejših predstav, ki so podkrepljene z eksperimenti, se je pokazalo, da ta klasična definicija prebrusnega števila ne more vzdržati kritike [5].

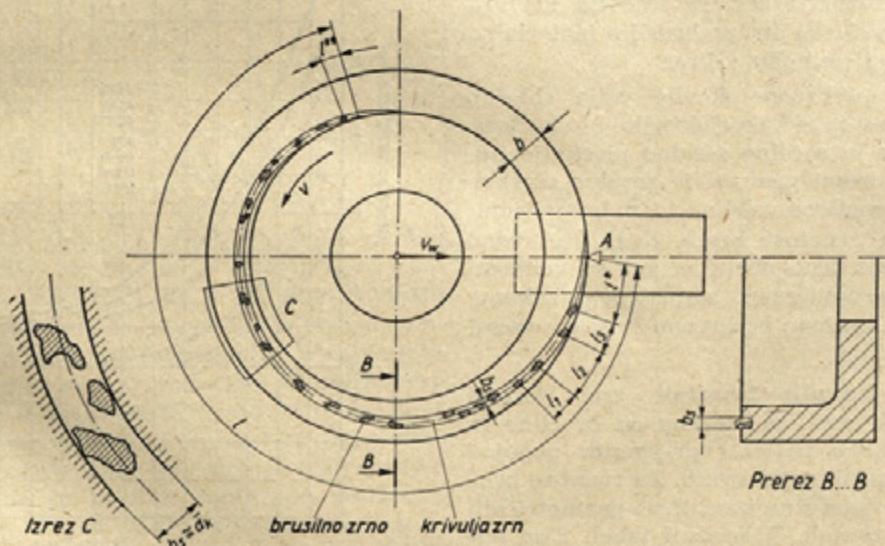
Da bi mogli pri brušenju zajeti pojave z vsemi vplivnimi veličinami, ki se pojavljajo v tem popotku, je bilo neogibno potrebno poiskati za prebrusno število nov matematični izraz, ki naj bi bil veljaven za vse postopke brušenja. Prebrusno število izraža, kolikokrat bo neka točka A mehanično in termično obremenjena pri enem prehodu brusa. To število seveda ne more biti direktni parameter za presojo kvalitete površine.

Iskana funkcija se lahko v splošnem izrazi takole:

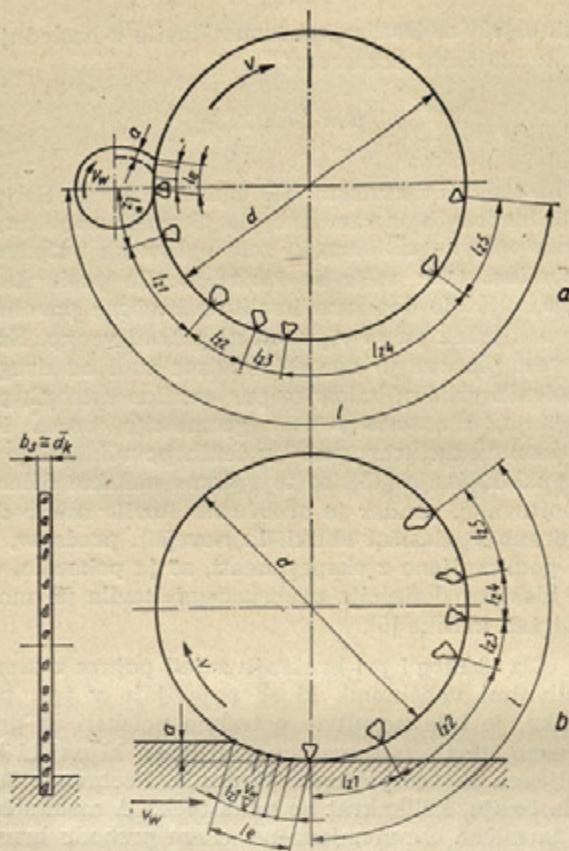
$$u = f(v, v_w, l_{ze}, l_e, l, a) \quad (2)$$

V eksplicitni obliki pišemo prebrusno število takole:

$$u = \frac{l}{l_{ze}} \quad (3)$$



Sl. 5. Prebrušenje ene točke površine obdelovanca pri čelnem brušenju



Sl. 6. a) Prebušenje ene točke površine obdelovanca pri okroglem brušenju, b) prebušenje ene točke površine obdelovanca pri ploskem brušenju

l — dolžina krivulje na rezalni ploskvi brusa, na kateri leže zrna, ki pri enem prehodu brusa preko obdelovančeve ploskve prebrusijo poljubno točko A. Brusilna zrna, ki zadenejo točko A, leže na krivulji s končno širino $b_s = d_k$, slike 5 in 6,

l_{ze} — efektivna razdalja zrn, ki leže na krivulji s širino $b_s = d_k$ in prebrusijo materialno točko A pri prehodu u-krat.

Formula (3) za prebrusno število velja splošno za vse brusilne postopke kakor okroglo, plosko brušenje s periferijo in s čelno rezalno ploskvijo itd. Pri tem so upoštevani geometrija rezalne ploskve brusa (d, b), kinematične veličine (v, v_w), vprijemni pogoji (l_e, a) in zrnatost brusa (l_{ze}). Prebrusno število u ima statistično obeležje, ker so velikosti l_{ze} razdeljene po določenem statističnem zakonu. S to definicijo je izraženo prebrusno število z vsemi vplivnimi veličinami.

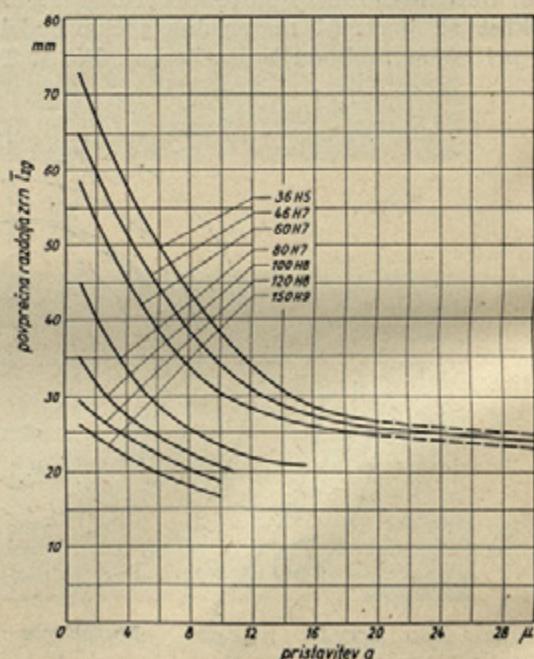
2,3 Dolžina krivulje brusilnih zrn. Dolžina krivulje brusilnih zrn l je odvisna od brusilne in podajalne hitrosti v in v_w , vprijemnih pogojev (l_e, a) in širine brusilne ploskve b . Za različne brusilne postopke jo je možno izraziti po geometričnih in kinematičnih zvezah. V spodnji tabeli 2 so podane formule za izračun dolžine krivulje brusilnih zrn za različne postopke pri brušenju.

Tabela 2.

Brusilni postopek	Formula	Opombe
okroglo brušenje	$l = \frac{v}{v_w} \cdot \frac{b}{s} l_e$	faktor b/s se upošteva le, kadar brus večkrat prebruša obdelovanec
plosko brušenje z valjasto rezalno ploskvijo	$l = \frac{v}{v_w} \cdot l_e$	
čelno brušenje	$l = \frac{v}{v_w} \cdot b$	

Iz zgornjih formul je razvidno, kako se računsko določa dolžina krivulje, na kateri leže brusilna zrna, ki prebrušajo neko točko A na površini obdelovanca. V resnici pa se ta teoretična dolžina praktično ne dosega. Zaokroženi robovi brusa povzročajo zmanjšanje njegove širine, elastične deformacije brusa, spremembe vprijemne dolžine itd. Teh vplivov pa ni mogoče določiti kar tako in bodo zato v tej smeri potrebne še določene raziskave.

2,4 Raziskave o efektivni razdalji zrn. Efektivna razdalja zrn l_{ze} , ki leže na krivulji zrn, je v splošnem odvisna od zgradbe brusa, velikosti pristavljanja, podajalne in rezalne hitrosti ter od elastičnih deformacij brusa, ki se pojavljajo zaradi njegove obremenitve. Efektivna razdalja zrn pri enem prebrušenju seveda ni konstantna, temveč se ravna po nekem statističnem zakonu o porazdelitvi. Ta veličina ima poseben pomen, ker dopušča zaključke o mehanizmu brušenja, geometriji odrezkov, zgradbi brusa, obrabi zrn, mehaničnih in ter-



Sl. 7. Odvisnost merjene razdalje zrn l_{sg} od pristavitve a

Sl. 8. Vpliv pristavitve a na razdaljo zrn l_{zg}

mičnih obremenitvah ter o elastičnosti oziroma trdoti brusa glede na njihov kvalitativni in kvantitativni potek.

Prej omenjene vplivne veličine so bile obširno raziskane z opisanim merilnim elementom. Pri tem je bila merjena razdalja med zrni, ki jo je bilo treba pri končnem vrednotenju preračunati s posebnim korekturnim koeficientom ξ , omenjenim že zgoraj (tabela 1). Vsi merilni rezultati so bili vrednoteni s statističnimi metodami, pri čemer so bila ugotovljena naslednja statistična števila: srednje vrednosti, razsipanja, korelacije in statistične porazdelitve.

2.41 Pogoji raziskav in merilni rezultati. Pri številnih raziskavah so menjavali naslednje vplivne veličine: zrnatost brusa, obliko rezalne površine brusa in brusilne pogoje, kakršne so razvidne iz tabele 3.

Tabela 3: Pogoji raziskav

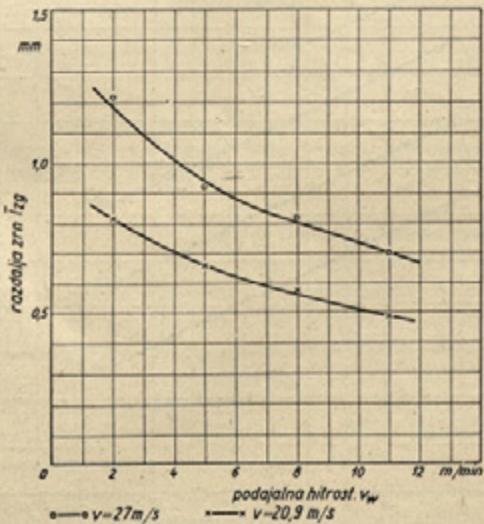
Oblika rezalne ploskve	Zrnatost brusa	Brusilni pogoji			Opombe
		v m/s	v_w m/min	a μ/gib	
ravna ploskev	EK 46 H7				
	EK 60 H7				
	EK 80 H7			2, 4, 6	
	EK 100 H8	21	3	8, 10	
	EK 120 H8			15, 20	
	EK 150 H9				
	EK 46 H7-A				kontrolna merjenja
	EK 46 H7-B	21	3	2 ... 50	
	EK 46 H7-C				
	EK 46 H7	27, 21	3, 6, 9 12	5, 10, 15 20	

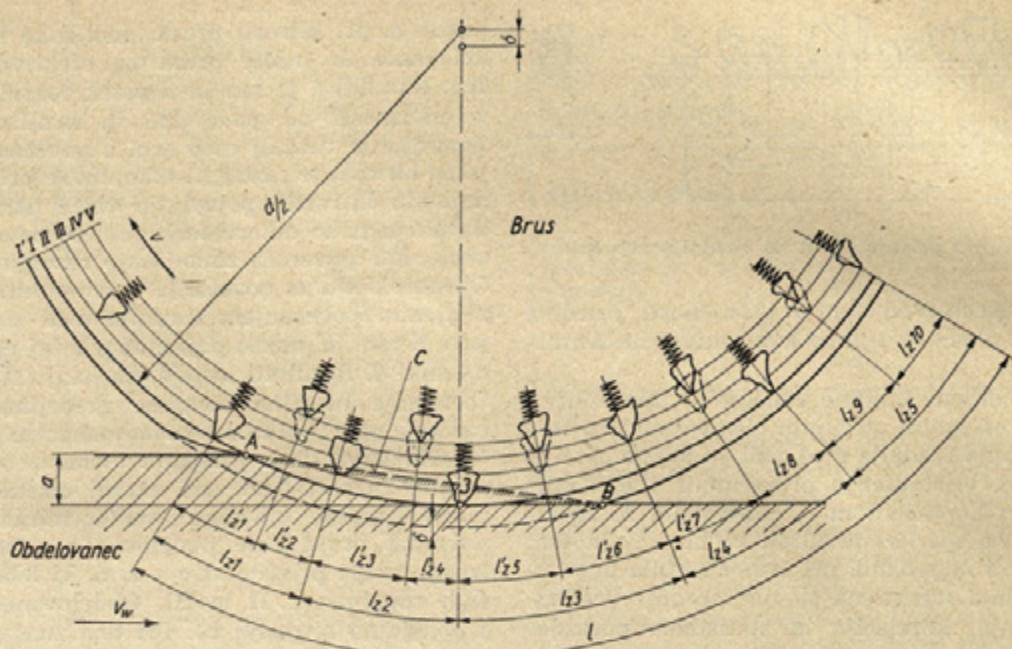
Na sliki 7 je prikazan potek merjenih razdalj zrn kot funkcije pristavljanja brusa, $l_{zg} = f(a)$. Potek srednjih vrednosti kaže za vse zrnatosti brusa, da se z naraščajočo pristavitvijo v sicer konstantnih pogojih brušenja razdalje zrn zmanjšujejo. Ta potek je podan zaradi prostorske razdelitve zrn v brusu. S čedalje večjo pristavitvijo prihajajo nova zrna do rezanja, slika 8. Po določeni pristavitvi $a > 20 \mu/\text{gib}$ se njen vpliv na razdalje zrn zmanjša. To dokazuje, da so rezalne konice na zrnih porazdeljene tako, da pri večjih globinah od 20μ ne prihaja do dodatnih vprijemov novih zrn [5]. Enako so bili eksperimentalno določeni vplivi veličin,

kakor n. pr. hitrosti brusa, podajalne hitrosti obdelovance in trdote brusa na efektivno razdaljo zrn. Na sliki 9 je razviden potek razdalj med zrni v odvisnosti od podajalne in brusilne hitrosti. Zmanjšanje razdalj med zrni s povečanjem podajalne hitrosti je razlagati tako, da se pri večjih podajalnih hitrostih pojavljajo večje normalne sile. Zaradi tega so deformacije rezalne površine brusa večje, kar povzroča zmanjšanje razdalje med zrni. Obratno velja za povečanje brusilne hitrosti. Tu se z njenim povečanjem razdalje med zrni povečujejo. S tem je možno pojasniti položaj obeh krivulj na sliki 9. Rezultati kažejo, da imajo elastične deformacije brusilne površine precejšen vpliv na razdalje med zrni in s tem na mehanizem brušenja.

Na sliki 10 je prikazan mehanizem pri spremembah razdalj med zrni zaradi elastičnih deformacij brusilne površine. Nedeformirana brusilna površina brusa reže obdelovanec z brusilno hitrostjo v pri pristavitvi a z zrni, ki leže na nivojskih ravninah I, II in III. Obdelovanec se giblje s podajalno hitrostjo v_w . Pri tem znašajo razdalje med zrni l_{z1}, l_{z2}, l_{z3} . Zaradi elastične sploščitve na rezalni površini brusa v kontakti coni (krivulja C, A in B) prihajajo do rezanja tudi zrni, ki leže na nivojskih ravninah IV in V. Kot rezultat se pojavljajo manjše razdalje med zrni, in sicer l_{z1}, l_{z2}, l_{z3} . Rezalna površina brusa se je deformirala za iznos δ . Dokaz za ta pojav kaže slika 9. Posebne raziskave o tem problemu so navedene niže.

2.42 Statistično vrednotenje eksperimentalnih rezultatov. Stohastične odvisnosti med posameznimi karakteristikami brusa in brusilnega postopka terjajo statistično vrednotenje in preverjanje merilnih rezultatov. Splošno veljavne zakonitosti med razdaljo zrn, pristavljanjem, podajalno in rezalno hitrostjo ter geometrično zgradbo brusa so našli s pomočjo matematične statistike. Kontrola diferenc dveh srednjih vrednosti za razdaljo med zrni pri

Sl. 9. Ovisnost merjene razdalje zrn l_{zg} od brusilne oz. podajalne hitrosti

Sl. 10. Vpliv elastične deformacije brusa na razdaljo zrn l_z

različnih pristavljanjih, podajalnih in rezalnih hitrostih kaže, ali res obstajajo razlike ali pa so samo slučajno. Iz tega izhaja, ali gre to določeno vplivno veličino pri raziskavah nadalje upoštevati ali ne. Enako se ravna pri analizi in sintezi pojavov, ki nastajajo pri brušenju. Vsi vplivi, ki so samo slučajni, se ne upoštevajo, v nasprotju s tistimi, ki bistveno vplivajo na rezultate. Če se pokaže, da so

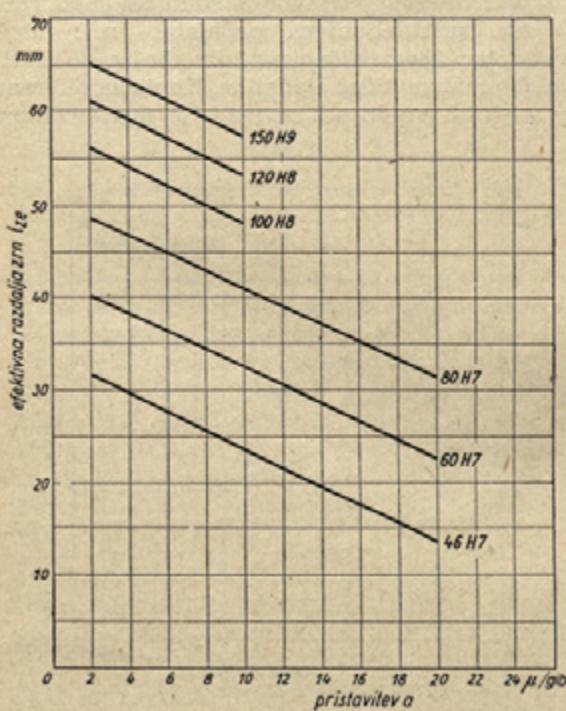
razlike bistvene, je potrebno raziskovati, po katerih zakonitostih potekajo. V našem primeru se je pokazalo, da so razsipanja zelo velika in imajo korelacije med posameznimi vplivnimi veličinami linearne obležje. Kontrola, kako pogosto se pojavljajo posamezne razdalje med zrni v različnih pogojih, potrjuje njihove verjetnosti. Ti računi so lahko osnova za določanje verjetnostnih debelin odrezkov, vprjemnih dolžin, storilnosti topotnih virov pri brušenju itd.

Ker ni mogoče podati vsega številčnega materiala niti ne celotnih proračunov, naj se tu omejimo le na objavljanje statistično vrednotenih rezultatov. Obširni proračuni in kontrole so navedeni v avtorjevem delu [5], v katerem so podani tudi matematični postopki, ki so bili uporabljeni pri vrednotenju eksperimentalnih rezultatov.

Kontrola razlik srednjih vrednosti pri razdaljah med zrni pri pristavitvi $a = 2 \mu$ in 20μ oziroma 2 in 15μ ter 2 in 10μ za posamezne zrnatosti brusov se izvaja s pomočjo t. i. t-porazdelitev [7]. Računi kažejo, da se te diference bistveno razlikujejo med seboj, in sicer pri vseh zrnatostih brusov. To pomeni, da ima pristavljanje brusa na efektivno razdaljo zrn l_{ze} bistven vpliv. S tem je dokazana tudi prostorska razdelitev brusilnih zrn v brusu.

Kontrola razlik pri razdaljah med brusilnimi zrni v odvisnosti od podajalne hitrosti, od brusilne hitrosti in od trdote brusa je prinesla enake rezultate. Razlike niso slučajne, temveč bistvene. To pomeni, da vse tri veličine vplivajo na potek brusilnega postopka in jih je treba pri analizi brušenja upoštevati.

Korelativni odnos med razdaljo brusilnih zrn l_{ze} in posameznimi vplivnimi veličinami (a , v , v_w ,

Sl. 11. Korelativna zveza med efektivno razdaljo zrn l_{ze} in pristavitvijo a za različne zrnatosti brusa

zrnatost brusa), ki naj bi bila veljavna za vse postopek brušenja, se izraža z linearno korelacijo. Natančna kontrolna analiza je potrdila, da je ta zveza dopustna. Enačba linearne regresije med merjenim l_{sg} in pristavitvijo se glasi:

$$l_{sg} = \bar{l}_{sg} - b(a - \bar{a}) \quad (4)$$

\bar{l}_{sg} — srednja vrednost razdalje med zrni iz vseh merjenih vrednosti,

a — srednja vrednost pristavljanja iz vseh merjenih vrednosti,

b — regresijski koeficient.

Izrazi za linearno korelativno zvezo za zgoraj navedene zrnatosti brusov so zbrani v tabeli 4.

Regresijski koeficient b se za različne zrnatosti razlikuje samo slučajno in lahko za vse bruse izbiramo enakega, $b = -0,024$. Glede na razmerje med merjenimi in dejanskimi razdaljami zrn, ki smo ga že omenili, je s proračuni možno pokazati korelativno zvezo med l_{sg} in a grafično na sliki 11.

Nadaljnje raziskave korelativnih zvez med efektivno razdaljo zrn l_{sg} ter podajalno in brusilno hitrostjo za valjaste rezalne ploskve brusov so podane na slikah 12 in 13. Na sliki 14 je videti vpliv trdote brusa na razdaljo zrn oz. prebrusno število u . Nad pristavljanjem je naneseno relativno število impulzov, ki jih beleži elektronski števec pri prehodu brusa preko merilnega elementa. To število je v določeni odvisnosti od prvega prebrusnega števila, ki je odvisno od koeficiente ojačitve števca.

Iz korelativne zveze za trdote brusov H, L in N je razvidno, da se rezalne ploskve trdih brusov manj deformirajo kakor pa mehkejših. Merjeno relativno število impulzov je pri mehkejših brusih večje. Statistične kontrole merjenih rezultatov so pokazale, da so razlike bistvene in ne slučajne.

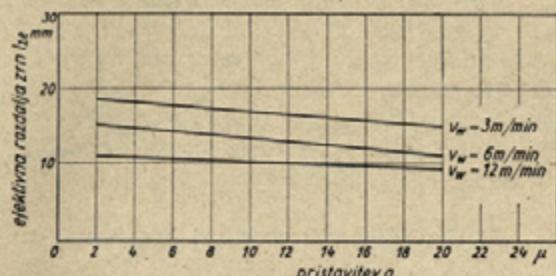
Iz teh raziskav je razvidno, katere veličine bistveno vplivajo na potek brusilnega postopka. Ena najvažnejših dognanj je, da so razdalje med zrni, ki zaporedno prebrusijo eno in isto mesto na površini obdelovanca, za dva velikostna reda večje od tistih, ki so bile v veljavi do sedaj.

Tabela 4.

Brus	Formula regresijske linije	Veljavno območje
46 H7	$l_{sg} = 0,77 - 0,024(a - 14,6)$	2 ... 20
60 H7	$l_{sg} = 0,73 - 0,024(a - 12,9)$	2 ... 20
80 H7	$l_{sg} = 0,67 - 0,024(a - 9,93)$	2 ... 15
100 H8	$l_{sg} = 0,61 - 0,024(a - 6,57)$	2 ... 10
120 H8	$l_{sg} = 0,55 - 0,024(a - 4,77)$	2 ... 10
150 H9	$l_{sg} = 0,46 - 0,024(a - 8,03)$	2 ... 10

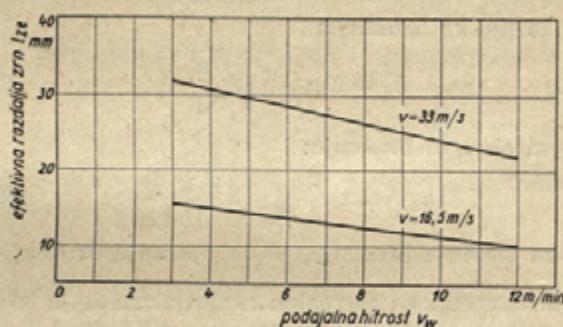
3. Debelina odrezka pri brušenju

Debelina odrezka pri brušenju je ena najvažnejših karakteristik brusilne tehnike. Določitev njene velikosti je bil predmet obširnih raziskav



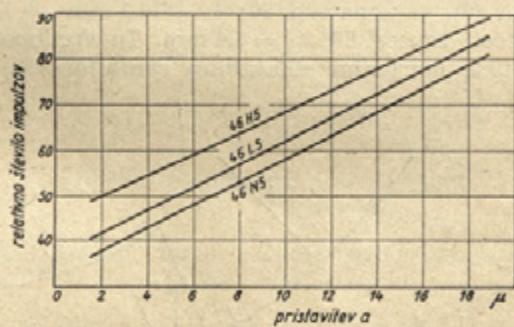
Sli. 12. Efektivna razdalja zrn l_{sg} v odvisnosti od pristavitve brusa a pri različnih podajalnih hitrostih v_w (linearna regresija)

Valjasta rezalna ploskev EK 46 Jot 7, $v = 16,5 \text{ m/min}$, $d = 240 \text{ mm}$



Sli. 13. Efektivna razdalja zrn l_{sg} v odvisnosti od podajalne hitrosti v_w pri različnih brusilnih hitrostih v (linearna regresija)

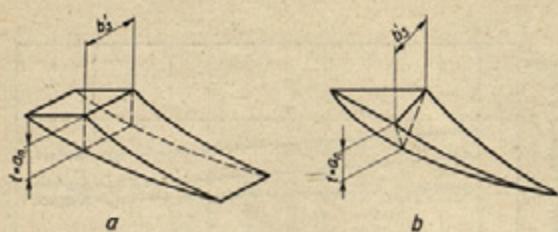
Valjasta rezalna ploskev EK 46 Jot 7, $d = 240 \text{ mm}$, $a = 10 \mu/\text{gib}$.



Sli. 14. Relativno število prebrušenj u v odvisnosti od pristavitve za različne trdote brusov (linearna regresija), $d = 200 \text{ mm}$, $v = 20 \text{ m/s}$, $v_w = 6 \text{ m/min}$

[1, 2, 3, 4, 8, 9, 10]. Težave, na kakršne so zadeli pri reševanju tega problema, so v tem, da brus ni zgrajen po strogih geometričnih zakonih. Kakor smo ugotovili že poprej, so zrna v brusu porazdeljena neenakomerno. Za določitev najverjetnejše debeline odrezka je treba upoštevati, da so zrna v brusu razdeljena po nekem statističnem zakonu.

Raziskave o problemu debeline odrezkov pri brušenju so tekle v dveh smereh. Prva in starejša smer je izhajala iz domneve, da so brusilna zrna v brusu porazdeljena v enakih realnih razdaljah λ_k . Te imajo približno enako velikost kakor srednji premeri zrn $\bar{d}_k \approx \lambda_k$.



Sl. 15. Oblike odrezkov pri brušenju

Iz kinematičnih in geometričnih pogojev in z upoštevanjem omenjene približne enačbe sta G. Pahlitzsch in H. Helmerdig [3] dognala izraze za idealno debelino odrezka h_g pri različnih postopkih brušenja:

za plosko brušenje:

$$h_g = 2 \lambda_k \frac{v_w}{v} \sqrt{\frac{a}{d}} \quad (5)$$

za okroglo brušenje:

$$h_g = 2 \lambda_k \frac{v_w}{v} \sqrt{a \frac{d \pm d_w}{d \cdot d_w}} \quad (6)$$

(+ za zunanje brušenje; — za notranje brušenje).

Srednje vrednosti za realno razdaljo zrn λ_k je izračunal E. N. Maslov [4], in sicer za različne zrnatosti in strukture brusov. Te leže med $\lambda_k = 0,49$ mm za zrnatost 36 in $\lambda_k = 0,225$ mm za zrnatost 80. Novije raziskave K. Satoja [9] kažejo, da so te vrednosti premajhne. Po njegovih meritvah in proračunih znašajo λ_k , ki jih je treba vstaviti v enačbi (5) in (6), za zrnatosti 30: $\lambda_k = 18,1$ mm — in za zrnatosti brusov 80: $\lambda_k = 7,4$ mm. Te vrednosti so že bližje merjenim efektivnim razdaljam l_{ze} , ka-

kršne je ugotovil avtor [5, 6]. Prvo zanesljivo in natančnejšo formulo za dejansko debelino odrezka so ugotovili W. R. Backer, E. R. Marshal in M. C. Shaw [8]. Za osnovo so jim bile raziskave mikrogeometrije brušene površine.

Pri tem je bilo definirano razmerje r med srednjim širinom in srednjim globino brusilne brazde, slika 15:

$$r = \frac{2 b'}{t} \quad (7)$$

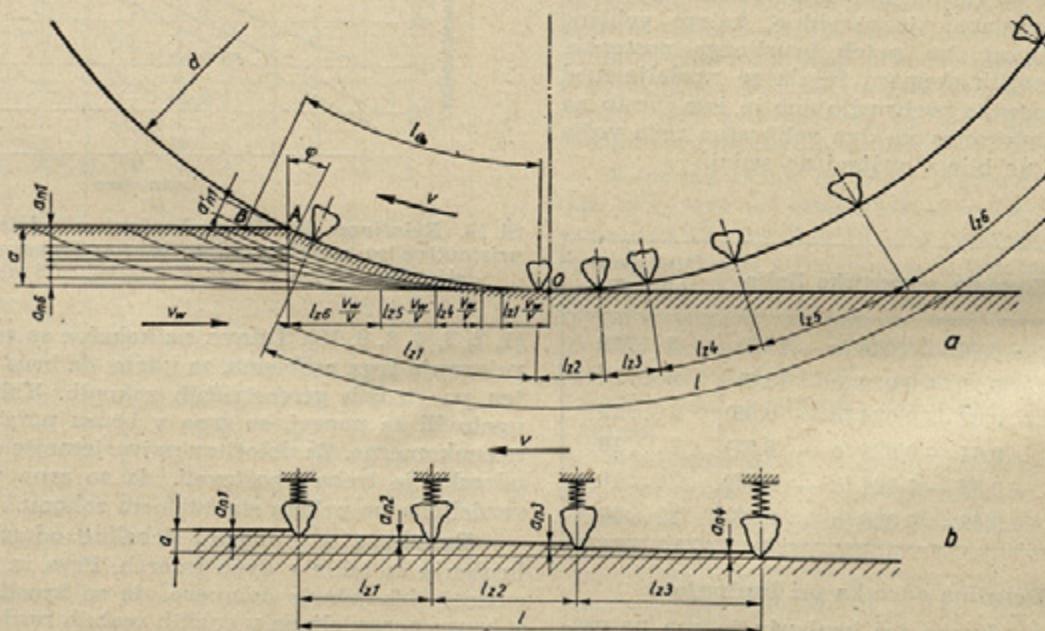
S tako imenovano metodo poševnega reza so dognali vrednosti za $r = 20 \dots 100$.

Izraz za srednjo normalno debelino odrezka se glasi:

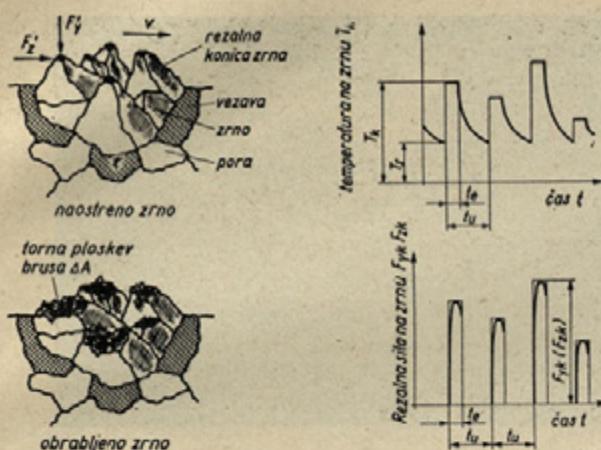
$$a_n = \left[\frac{4 \cdot v_w}{v \cdot k_z \cdot r} \sqrt{a \frac{1 - d/d_w}{d}} \right]^{1/2} \quad (8)$$

K diskusiji o izrazih (5), (6) in (8) je pripomniti naslednje: Vrednosti za idealno debelino odrezka po formulah (5) in (6) so premajhne. Velikosti $\lambda_k = d_k$ pri brušenju ne prihajajo v poštev, ker je efektivna razdalja zrn, ki zaporedoma prebrusijo eno točko na površini obdelovanca, dva velikostna reda večja od λ_k . Tudi vrednosti za λ_k po K. Satoju [9] so še vedno premajhne in ne jemljejo v poštev, da se s spremembijo pogojev brušenja spreminja tudi efektivna razdalja l_{ze} . Nadalje ima, kakor je prikazano zgoraj, velik pomen trdota brusa. Vse te vplivne veličine pa niso obsegene v objavljenih formulah.

V izrazu (8) efektivna razdalja ni podana neposredno, vendar je iz kontrolnih računov razvidno, da je ta veličina v izrazu za r . Kritične ugotovitve, ki so navedene zgoraj, pa veljajo tudi za to formulo.



Sl. 16. Debelina odrezka pri brušenju: a) plosko brušenje z valjasto brusilno ploskvijo, b) plosko brušenje z ravno brusilno ploskvijo



Sl. 17. Mehanične in topotne obremenitve zrna med brušenjem

Po raziskavah mehanizma brušenja, prebrusnega števila in efektivnih razdalj med zrni je bil dognan nov izraz za srednjo normalno debelino odrezka a_n [5, 11], ki se glasi (sliki 16 a in b) za vse vrste brusilnih postopkov:

$$a_n = \frac{a}{u} = a \frac{l_{ze}}{l_e} \cdot \frac{v_w}{v} \quad (9)$$

Gornja formula (9) vsebuje vse elemente, ki vplivajo na velikost srednje normalne debeline odrezka a_n . Pri znanih verjetnostih efektivnih razdalj med zrni l_{ze} je možno določiti verjetne debeline odrezkov.

Za medsebojno primerjavo formul (5 oz. 6), (8) in (9) naj navedemo računski primer:

Določiti je normalno debelino odrezka pri zunanjem okroglem brušenju z brusom 60 H7, ($\lambda_k = 0,26$ mm po Maslovu). Pogoji brušenja: $v = 24$ m/s, $v_w = 0,286$ m/s, $d_w = 100$ mm, $d = 390$ mm, $a = 2 \mu$.

Idealna debelina odrezka po formuli (6) je enaka:

$$h_g = 2 \lambda_k \frac{v_w}{v} \sqrt{a \frac{d + d_w}{d \cdot d_w}} = 2 \cdot 0,26 \cdot \frac{286}{24000} \cdot \sqrt{0,002 \frac{390 + 100}{390 \cdot 100}} = 0,03 \mu$$

Proračun normalne debeline odrezka a_n po formuli (9):

$$l_{ze} = 30 \text{ mm}, l_e = 0,75 \text{ mm}$$

$$a_n = \frac{a}{u} = a \frac{l_{ze}}{l_e} \cdot \frac{v_w}{v} = 0,002 \cdot \frac{30}{0,75} \cdot \frac{286}{24000} = 0,95 \mu$$

Po formuli (8) izračunana debelina odrezka da približno enake vrednosti. Pri večjih pristavitvah pa se pojavlja vpliv prostorske razdelitve zrn in elastične deformacije brusa. Zato se izračunane vrednosti po formulah (8) oz. (9) razlikujejo v večji meri. Iz rezultata pri proračunu idealne debeline odrezka h_g je razvidno, da je ta veliko premajhna.

Prikazana formula (9) za normalno debelino odrezka popolnoma ustreza praktičnim zahtevam in je v primerjavi z ostalimi izrazi natančnejša.

4. Obraba brusilnih orodij in kriterij zanjo

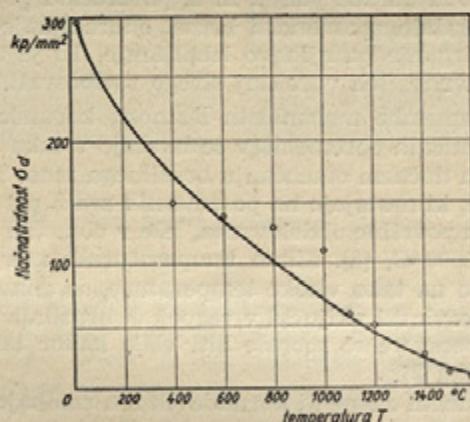
4.1 Vrste obrabe na brusih. Brusilna zrna so med brušenjem izpostavljena menjajočim se mehaničnim in topotnim obremenitvam, slika 17. Razmerje med dolžino vprijema l_e in dolžino krivulje gibanja zrna pri enem vrtljaju brusa l' se giblje pri različnih postopkih brušenja v območjih:

zunanje okroglo brušenje $\xi = 0,0006 \dots 0,009$

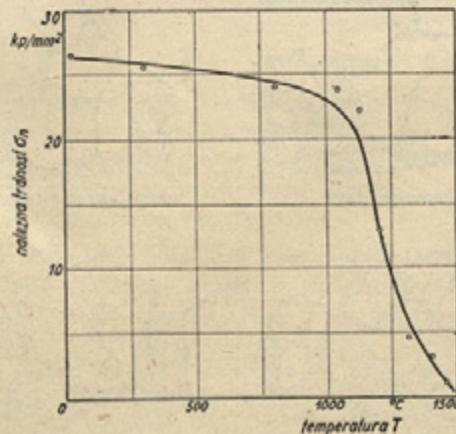
plosko brušenje (z valjem) $\xi = 0,002 \dots 0,02$

notranje okroglo brušenje $\xi = 0,02 \dots 0,135$

Samo pri ploskem brušenju s skledastim brusom znaša to razmerje $\xi \leq 0,5$.



Sl. 18. Odvisnost tlačne trdnosti sintranega kosa od temperature [17]



Sl. 19. Natezna trdnost sintranega kosa v odvisnosti od temperature [17]

Za pravilno analizo obrabe pri brušenju je potrebno na kratko osvetliti najvažnejše fizikalne lastnosti rezalnega materiala Al_2O_3 (a — korunda), iz katerega so zgrajena zrna. Tlačna trdnost korundovega kristala znaša po A. Smekalu [16] — $\sigma_m = 20\,000 \text{ kp/cm}^2$. Za sintrani Al_2O_3 je našel E. Ryschkewitsch [17] precej večje vrednosti, in sicer — $\sigma_m = 30\,000 \text{ kp/cm}^2$ pri 20°C . S povišanjem temperature pa se te vrednosti spreminja. Na sliki 18 je prikazan potek tlačne trdnosti v odvisnosti od temperature. Tudi natezna trdnost σ_m se s povišanjem temperature zmanjša, slika 19. Podobno vpliva temperatura na modul elastičnosti. Te tri karakteristike bistveno oblikujejo obrabo v njenem kvalitativnem kakor kvantitativnem poteku. Pomembna lastnost je tudi drobljenje zrn, vendar o tem ni še nobenih objektivnih podatkov.

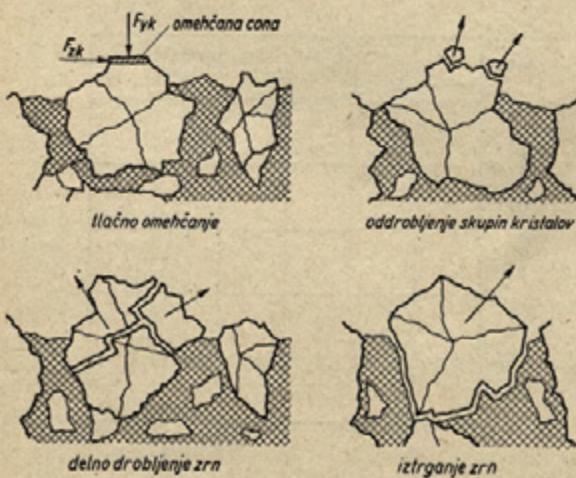
Brus se obrablja zaradi:

1. tlačnega omehanja brusilnih zrn, spričo temperaturnih in mehaničnih vplivov,
2. oddrobljenja posameznih kristalov od zrna,
3. delnega oddrobljenja večjih delcev zrn in
4. iztrganja celih zrn iz rezalne ploskve [12], slika 20.

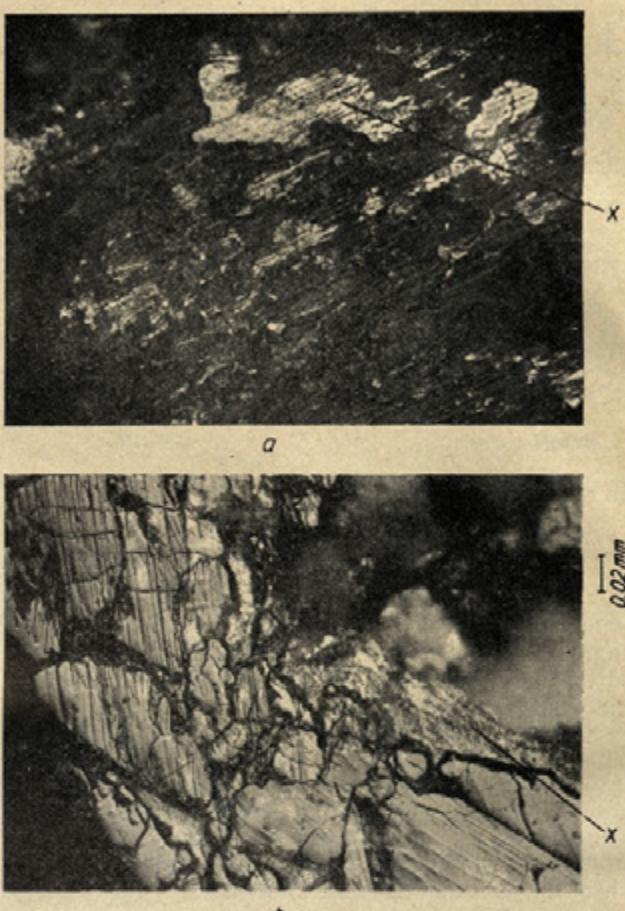
Vzroka obrabe pod 1. in 2. povzročata poslabšanje rezalnih sposobnosti brusa, oddrobljenje oziroma iztrganje pa njihovo izboljšanje. To je treba pri obravnavi teh vprašanj strogo razločevati.

Spremembe mehaničnih lastnosti korunda zaradi termičnih obremenitev se izražajo v tako imenovanem tlačnem omehanju brusilnega zrna. Temperature, ki nastajajo na posameznih zrnih pri prebrušenju površine obdelovanca, leže v območju med 500 in 2000°C , [5]. Mimo temperaturnih merjenj, ki kažejo na tako visoke temperature, so dokaz za to tudi kovinski vključki v razpokah brusilnih zrn. Te temperature so morale biti višje kakor tališče jekla, slika 21.

Gradbeni elementi korundovih zrn zanahajo pri tako visokih temperaturah s takšno intenzivnostjo, da enostransko delujejoče rezalne sile plastično de-



Slika 20. Vrste obrabe na rezalni ploskvi brusa



Slika 21. Torna ploskev na brusilnem zrnu: a) ploskev v nepoliranem stanju z jeklenimi vložki (X), b) ploskev v poliranem in telkanem stanju z jeklenimi vložki (X)

formirajo segrete plasti korundovega zrna, in sicer že pri temperaturah pod 1200°C [17]. Zaradi mehaničnih obremenitev se na tornih ploskvah zrn odnašajo tanki sloji, ki povzročajo nastajanje teh ploskev na posameznih zrnih, slika 22.

Posledice te vrste obrabe brusov so: povečanje intenzivnosti topotnih virov (v dotiku med zrni in površino obdelovanca). S tem se uvaja v površino več toplotne, zaradi česar se povišuje temperatura obdelovanca. Tako prihaja do znanih topotnih žigov, ki se pokažejo na površini v obliki temnih ploskev. Nadalje povzročajo obrabljenia zrna spremembe normalnih sil in s tem določena nihanja, ki onemogočajo nadaljnjo obdelavo.

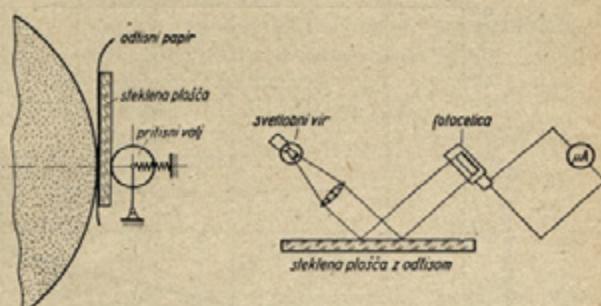
Raziskave so pokazale, da je ta vrsta obrabe posebno pri finem in preciznem brušenju največjega pomena. Zavoljo tega je bilo potrebno najti meritne metode za številčno določitev te obrabe in definirati zanjo kriterij, ki omejuje obstojno dobo brusa.

4.2 Merilna metoda za določanje obrabe brusa. Pri dosedanjih raziskavah o obrabi brusov je bila v rabi posredna metoda, [14, 15]. Pri tej se meri zmanjšanje premora brusa po določenem obdelo-

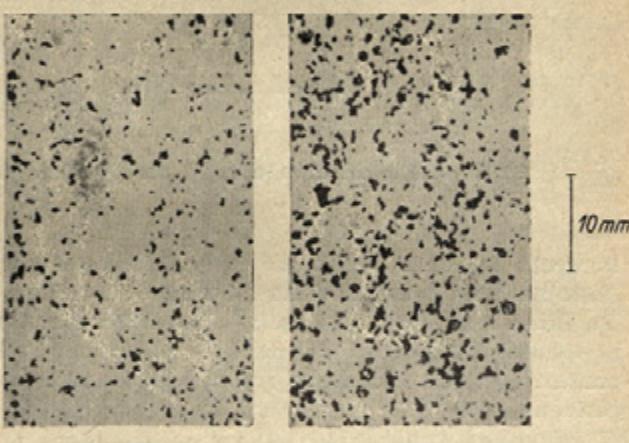
valnem času. Natančnost te metode znaša $\pm 2 \mu$ [18]. Njena pomanjkljivost je v tem, da ne vsebuje nicensar o dejanskih vzrokih obrabe, t. j. o nastajanju in velikosti tornih ploskev brusov.

Velikost tornih ploskev se lahko določa tako, da se obrabljen rezalna ploskev brusa fotografira. Tornе ploskeve se nato planimetrično izmerijo in tako določijo njihova velikost, statistična razdelitev itd. Ker je to zelo dolgotrajen postopek in za prakso neuporaben, je avtor iznašel praktično metodo za določitev vsakokratne obrabe na rezalnih ploskvah brusov, [12].

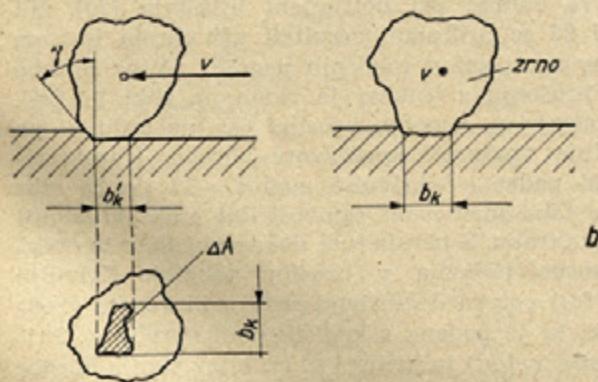
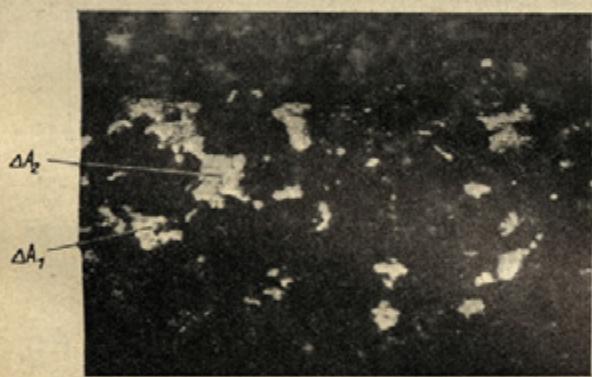
Za prakso ni potrebno natančno poznanje velikosti in porazdelitve posameznih tornih ploskev na zrnih. Rezalna ploskev brusa z določeno obrabo se s kontaktnim pritiskom odkotali po ravni stekleni plošči, na katero je položen karbonski papir, slika 23 a. Pri tem se tornе ploskvice odtsnejo na stekleni plošči, slika 24. Čim večja je obraba, tem večji je delež črnih odtsisov na njej. Izmeritev teh odtsisov se opravlja fotoelektrično, slika 23 b. Osveljena steklena plošča odbija v odvisnosti od počrnitve različne količine svetlobe, ki se v foto celici pretvarja v električni tok. Ta se izmeri in s tem določi delež tornih ploskev glede na celotno rezalno ploskev brusa, ki jo opazujemo.



Sl. 23. Merilna metoda za obrabo na brusu: a) posnetje odtisov tornih ploskev na steklene plošči, b) fotoelektrično merjenje odtisov tornih ploskev na stekleni plošči



Sl. 24. Odtisi tornih ploskev na stekleni plošči



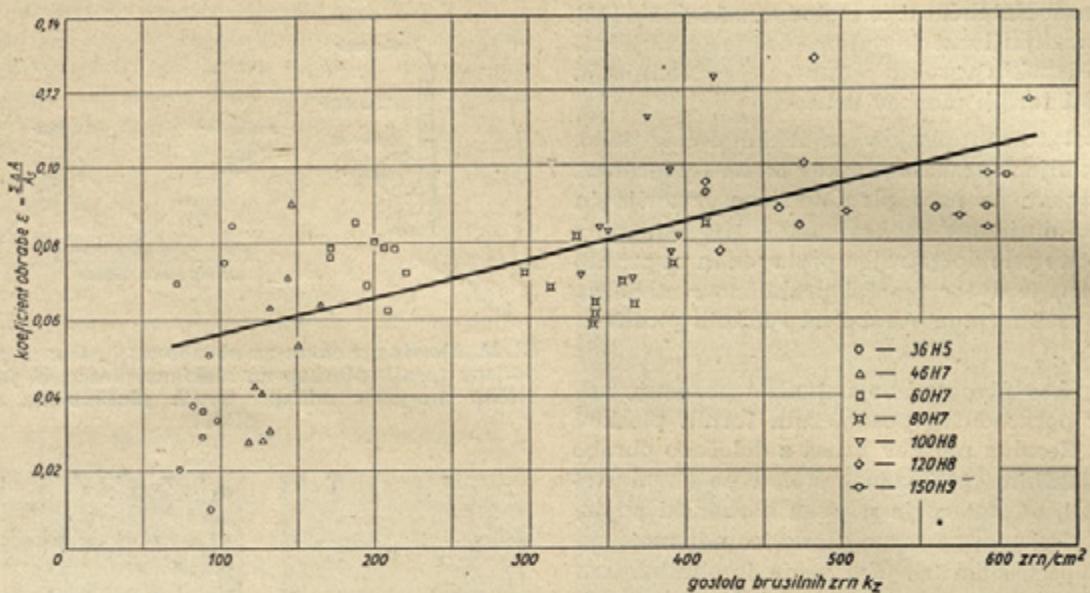
Sl. 22. Tornе ploskeve na zrnih brusa: a) rezalna ploskev brusa v obrabljenem stanju (brus EK 60 H 7), b) torna ploskev na zrnu

4.3 Kriterij za obrabo brusa. Za karakteriziranje stanja obrabe in določanje objektivne obstojne dobe brusa je bil definiran brezdimenzijski koeficient obrabe ε , [5]. Ta se glasi naslednje:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_i}{A_s} \quad (10)$$

Pri tem pomeni $\sum_{i=1}^n \Delta A_i$ — vsoto vseh tornih ploskev zrn na opazovani velikosti rezalne ploskeve A_s . Pomembno je, da se izbira ploskev A_s dovolj velika. Vrednosti za ε so namreč potem zanesljivejše. Pri določeni vrednosti koeficiente obrabe ε_s je dosežena obstojna doba brusa.

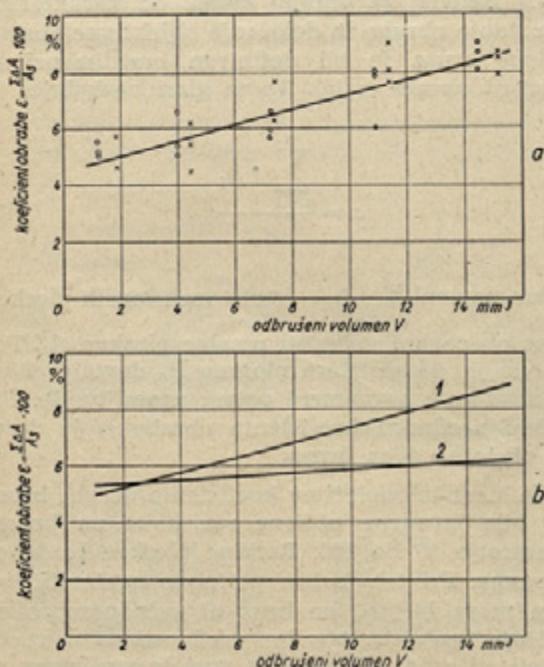
Za številčno določitev koeficiente obrabe brusa ε so bile izvedene obširne raziskave na brusih z zrnatostjo 36 do 150. Rezalne ploskeve brusa so bile ravne. Pri teh je bilo potrebno ugotoviti, kolikšen mora biti ε_s , ko brus ni več sposoben za nadaljnje brušenje. Merilne vrednosti za ε_s v odvisnosti od zrnatosti oziroma gostote zrn brusa so na sliki 25. Zaradi velikih razsipanj je bilo potrebno izvesti večje število ponovitev. Statistične



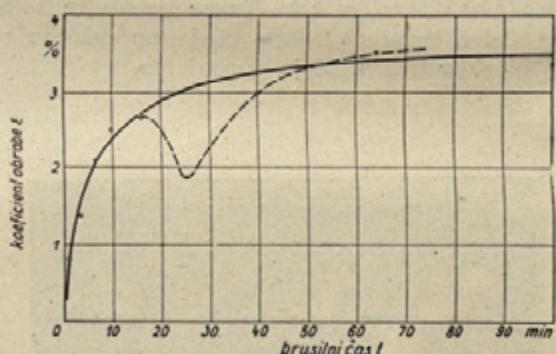
Sl. 25. Koeficient obrabe ε_s pri dosegu obstojne dobe brusa v odvisnosti od zrnatosti (36 do 150)

kontrole merilnih rezultatov so pokazale, da je obstojna doba brusa odvisna od njegove zrnatosti. Za bruse z zrnatostjo 36 oz. $k_2 \sim 100$ zrn/cm² znaša $\varepsilon_s \sim 0,055$. Za zrnatost 150 oz. $k_2 \sim 600$ zrn/cm² pa znaša $\varepsilon_s \sim 0,105$. Razlike v srednjih vrednostih so bistvene.

Raziskave o korelaciji med ε_s in zrnatostjo k_s so dale naslednjo enačbo [5]:



Sl. 26. Določitev koeficiente obrabe ε_s pri notranjem brušenju



Sl. 27. Potek koeficiente obrabe ε pri brušenju titana s trakovi

$$\varepsilon_s = 0,077 + 9,55 \cdot 10^{-5} (k_s - 312) \quad (11)$$

Glede na te ugotovitve so bile izvedene raziskave obrabe pri notranjem brušenju [20]. Na sliki 26 so prikazani rezultati pri obrabi brusov, ki so naostreni v različnih pogojih. Ptek obrabe pri brušenju s trakovi je viden na sliki 27 [21]. Na abscisi je nanesen brusilni čas, na ordinati pa srednje vrednosti koeficiente obrabe. Karakteristični padec ε — krivulje med $t = 17$ do 25 min kaže tako imenovani samostrilni efekt brusilnih zrn na traku. S tem je tudi dokazano, da se ta efekt dejansko pojavlja v brusilni tehniki. Krivulja $\varepsilon = f(t)$ poteka degresivno proti neki končni vrednosti, ki je podana s koeficientom obrabe ε_s . Prikazana metoda in kriterij za ocenitev stanja obrabe pri brušenju podajata to stanje objektivno z dovolj popolno natančnostjo. Merilna naprava pa je namenjena za praktično uporabo v delavnici.

5. Povzetek

S specialno merilno metodo je bilo mogoče ugotoviti in dokazati hipotezo o mehanizmu brušenja. Ena bistvenih vplivnih veličin pri brušenju je efektivna razdalja zrn, ki prebrušajo pri enem prehodu brusa zapovrstjo materialno točko na površini obdelovanca. Raziskave in statistična obdelava merilnih vrednosti so pokazale, da vplivajo na efektivno razdaljo zrn povrh zrnatosti brusa tudi kinematični brusilni pogoji (podajalna in obodna hitrost brusa), pristavitev in elastične deformacije rezalne površine brusa. Vse te veličine vplivajo na tako imenovano prebrusno število, ki karakterizira število termičnih in mehaničnih obremenitev opazovane točke na površini obdelovanca kakor tudi brusilnih zrn samih.

Po raziskavah mehanizma brušenja je bil doznan nov izraz za debelino odrezka pri brusilnem postopku. Ta veličina je glede na obrabo brusov, sile, temperature pri brušenju in kvaliteto površine eden najvažnejših parametrov, ki bistveno oblikujejo potek brusilnega postopka. Dobljena formula upošteva v primerjavi z drugimi izrazi vse faktorje, ki sodelujejo med brušenjem.

Raziskave o obrabi brusov so pokazale, da se lahko pojavljajo med brušenjem štiri različne obrabe. Največjega pomena je oblika tako imenovanega tlačnega omehčanja toplotno in mehanično obremenjenih konic korundovih zrn. Kot kriterij za obrabo je definirano razmerje med vsoto tornih ploskev na zrnih in velikostjo rezalne površine brusa. Z mejno vrednostjo koeficiente obrabe je omejena in podana obstojna doba brusa. Za kvantitativno določitev stanja obrabe je bila razvita posebna fotoelektrična merilna metoda, ki omogoča hitro in objektivno ocenitev rezalnih sposobnosti brusilnih orodij.

Prikazani rezultati eksperimentalnih in teoretičnih raziskav brusilnega postopka pomenijo prispevek k teoriji brušenja in obeležujejo razvojne smeri na tem področju.

6. Označbe veličin

<i>a</i>	— pristavitev brusa	mm, μ
<i>b</i>	— širina rezalne ploskve brusa	mm
<i>d</i>	— premer brusa	mm
<i>d_w</i>	— premer obdelovanca	mm
<i>d_k</i>	— velikost zrna	mm
<i>A_s</i>	— velikost rezalne ploskve brusa	mm ² , cm ²
<i>h_g</i>	— idealna debelina odrezka	mm
<i>a_n</i>	— normalna debelina odrezka	mm
<i>k_s</i>	— gostota brusilnih zrn	zrn/cm ²
<i>l</i>	— dolžina krivulje zrn na rezalni ploskvi brusa	mm
<i>l_e</i>	— vprijemna dolžina med brusom in obdelovancem	mm
<i>l_{sg}</i>	— merjena razdalja zrn	mm
<i>l_{ze}</i>	— efektivna razdalja zrn	mm
<i>n</i>	— vrtilna hitrost brusa	vrt./min
<i>n_w</i>	— vrtilna hitrost obdelovanca	vrt./min
<i>s</i>	— podajanje	mm/vrt., mm/gib

<i>v</i>	— brusilna hitrost	m/s
<i>v_l</i>	— vzdolžna podajalna hitrost	mm/s, m/min
<i>v_w</i>	— podajalna hitrost obdelovanca	m/min
<i>u</i>	— prebrusno število	—
<i>ΔA</i>	— velikost torne ploskve na brusilnem zrnu	cm ² , mm ²
<i>λ_k</i>	— realna razdalja zrn	mm
<i>ε</i>	— koeficient obrabe	—

7. Literatura

- [1] Alden, G. J.: Operation of Grinding Wheels in Machine Grinding. Trans ASME 1914, S. 451.
- [2] Krug, C.: Beiträge zur Kenntnis des Schleifens. Maschinenbau-Betrieb, 1925, s. 875—882.
- [3] Pahlitzsch, G., Helmerding, H.: Bestimmung und Bedeutung der Spandicke beim Schleifen. Werkstattstechnik der Betriebe 1943, s. 397.
- [4] Maslov E. N.: Osnovi teorii šlifovanja. Mašgis 1952.
- [5] Peklenik, J.: Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. Disertacija T. H. Aachen, 1957.
- [6] Peklenik, J.: Der Mechanismus der Schleifens und die Überschliffzahl. Industrie-Anzeiger, 1958, s. 20—26.
- [7] Linder, A.: Statistische Methoden. Birkhäuser-Verlag, Zürich, 1952.
- [8] Backer, W. R., Marshal, E. R., Shaw, M. C.: The Size Effect in Metal Cutting, Trans. ASME, 1955, s. 1325—1329.
- [9] Sato, K.: On the Surface Roughness in Grinding. The Technologie Reports of the Tokohu University, Sendai, Japan, 1955, Nr. 1, S. 59.
- [10] Orioka, T.: On the Grinding Geometrie for the Random Spacing of Abrasive Grains on Wheel Surface. Reports of the Faculty of Engineering Yamabashi University 1957, Nr. 8.
- [11] Peklenik, J.: Beitrag zur Bestimmung der Spandicke beim Schleifen. 8. Forschungsbericht des Laboratoriums für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der T. H. Aachen, Girardet Verlag 1958.
- [12] Peklenik, J.: Untersuchungen über das Verschleißkriterium beim Schleifen. 8. Forschungsbericht des Laboratoriums für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der T. H. Aachen, Girardet Verlag 1958.
- [13] Taskin, A.: Untersuchungen des Rundschleifverfahrens und die Schleifscheibe. Disertacija T. H. Aachen, 1944.
- [14] Opitz, H.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beim Außenrundschleifen. Westdeutscher Verlag Köln und Opladen 1954.
- [15] Salje, E.: Grundlagen des Schleifvorganges. I. und II. Teil. Werkstatt und Betrieb, H. 2 und 4, 1953.
- [16] Smekal, A.: Die Fertigkeits-eigenschaften spröder Körper. Ergebnisse exakter Naturwissenschaft, 1946, S. 106—188.
- [17] Ryschkewitsch, E.: Bericht der Deutschen Keramik-Gesellschaft, 1941, S. 54—65.
- [18] Pahlitzsch, G., Ernst, H. O.: Untersuchungen über das Verschleißverhalten von Schleifscheiben. Industrie-Anzeiger, 1957, Nr. 80, S. 1193—1199.
- [19] Opitz, H. in drugi: Untersuchungen beim Rundschleifen, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1959.
- [20] Rupprecht, B.: Wirtschaftliches Bandschleifen von Titan. Industrie-Anzeiger, 1958, Nr. 19, S. 280—284.

Avtor: dr. ing. Janez Peklenik, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der T. H. Aachen