

<https://doi.org/10.24867/JPE-1994-11-043>

PREGLEDNI RAD

Kovač P. \*

## PARAMETRI OBRADLJIVOSTI PRI JEDNOZUBOM I VIŠEZUBOM ČEONOM GLODANJU

## MACHINABILITY PARAMETERS OF SINGLE-TOOTH AND MULTI-TOOTH FACE MILLING

### Summary

*Because of the higher amount of material waste, most tool life tests in face milling process are done with a single-tooth tool and the results are used for multi-tooth tool life prediction. The total tool life of a multi-tooth cutter by multiplying the values of tool life a single tooth cutter by number of teeth, is obtained. But there the phenomenon of tool life reduction in the case of multi-tooth cutter in comparison with single tooth cutter, during constant cutting conditions was observed.*

*The later experimental investigations carried out in milling showed that the phenomenon of run-out of the cutting edges in milling cutter yield influence on the tool life of cutter, surface roughnes, cutting forces and cutting temperature.*

---

\* Dr. Pavel Kovač, vanredni profesor., FTN, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, Vladimira Perića - Valtera br. 2.

## Rezime

*Prilikom ispitivanja postojanosti alata pričeonom glodanju zbog velike potrošnje materijala ispitivanja se vrše sa jednozubim alatom a rezultati se primenjuju za određivanje postojanosti više zubog glodala. Ukupna postojanost višezubog glodala se određuje množenjem vrednosti postojanosti jednozubog glodala sa brojem zuba. Medjutim primećeno je da je postojanost manja pri jednozubom glodalu u odnosu na postojanost više zubog glodala određenu na osnovu jednozubog glodala pri rezanju konstantnim režimom rezanja*

*Eksperimentalna istraživanja izvedena u poslednje vreme su pokazala da fenomen bacanja zuba glododala ima veliki uticaj na postojanost alata, hrapavost obradjene površine, otpore pri rezanju i temperaturu rezanja.*

## 1.0. UVOD

Čeono glodanje je vrlo efikasan proces obrade zato što je količina skinute strugotine mnogo veća u odnosu na jednosečni alat. Zbog velikih količina materijala koji se troše pri ispitivanjima, većina ispitivanja se vrši sa jednosečnim alatom a rezultati se onda primenjuju i za višesečne alate. Pokazalo se medjutim da neki parametri kod višezubog alata se ne mogu jednostavno odrediti množenjem vrednosti koje su dobivene pri jednosečnom alatu sa brojem zuba.

Eksperimentalna istraživanja izvedena u poslednje vreme pokazuju da fenomen bacanja zuba glodala ima veliki uticaj na parametre obradljivosti.

Kod glava za glodanje razlikuju se dve vrste bacanja aksijalno bacanje  $\Delta A$  (u pravcu ose glodala) i radijalno bacanje  $\Delta R$  (u pravcu normalnom na osu alata). Ova bacanja imaju različit uticaj na proces rezanja. Aksijalno bacanje direktno utiče na kvalitet obradjene površine a ne utiče na postojanost alata. Radijalno bacanje uzrokuje variranje debljine strugotine. Kako su odstojanja pojedinih sečiva od ose rotacije različita, to su i trajektorije svih sečiva različite. Usled toga javljaju se razlike u presecima strugotine a samim tim i razlike u otporima i temperaturi rezanja. Znači da zub koji "viri" izvan neke srednje vrednosti bacanja ustvari radi sa većom debljinom strugotine, što rezultira u povećanom habanju tog zuba.

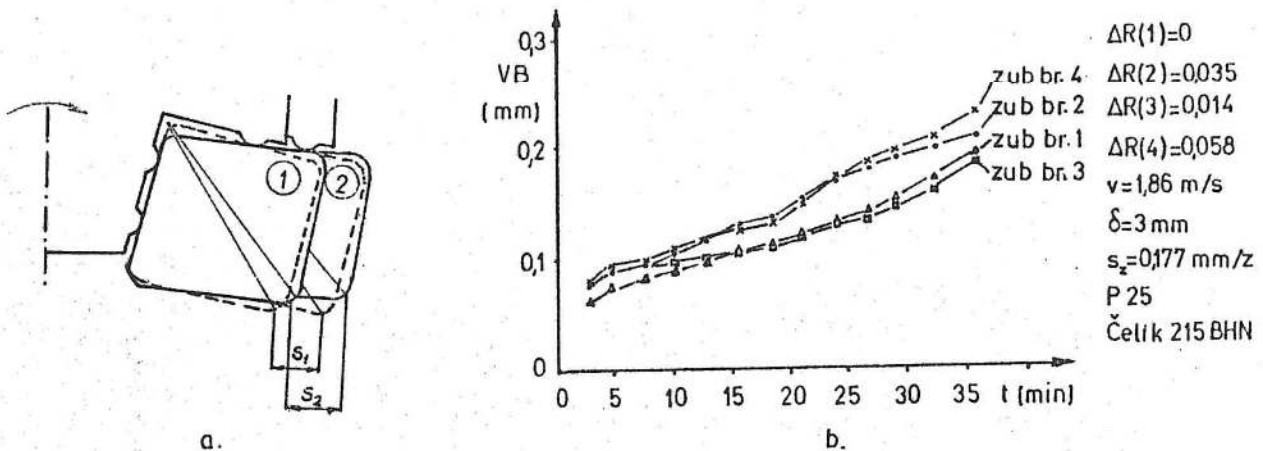
## 2.0. PARAMETRI OBRADLJIVOSTI JEDNOZUBOG I VIŠEZUBOG GLODALA

### 2.1. POSTOJANOST

Više istraživača se bavilo istraživanjem razlike u postojanosti alata pri glodanju sa jednim i više zuba. Pretpostavljalo se da se smanjenje postojanosti po jednom zubu kod višezubog glodala javlja usled dinamičkog efekta, ili je posledica povišene temperature alata. U istraživanjima koja je sproveo Kuljanić [ 10 ], pokazano je da postojanost glodala opada kada se povećava broj zuba u zahvatu do 4 zuba a posle je približno konstantna. Ovo smanjenje postojanosti od oko 50% pri prelasku sa višezubog na jednozubo glodanje se objašnjava zagrevanjem tela glodala.

Ova razlika u postojanosti uspela se jedino objasniti kada se u obzir uzme bacanje zuba glodala. Rezultati ispitivanja koje je izveo Ber i Feldman [ 1 ], pokazuju da zubi, koji imaju veće radijalno bacanje  $\Delta R$  ( slika 1. ) više se habaju.

Ovo povećanje habanja objašnjava se time da zub koji ima veće radijalno bacanje radi sa većom vrednošću pomaka po zubu  $s_z$ , slika 2. a. Neki autori [ 1 , 8 ] predlažu i složene jednačine za izračunavanje habanja alata na svakom zubu u zavisnosti od radijalnog bacanja  $\Delta R$  pri konstantnim režimima rezanja.

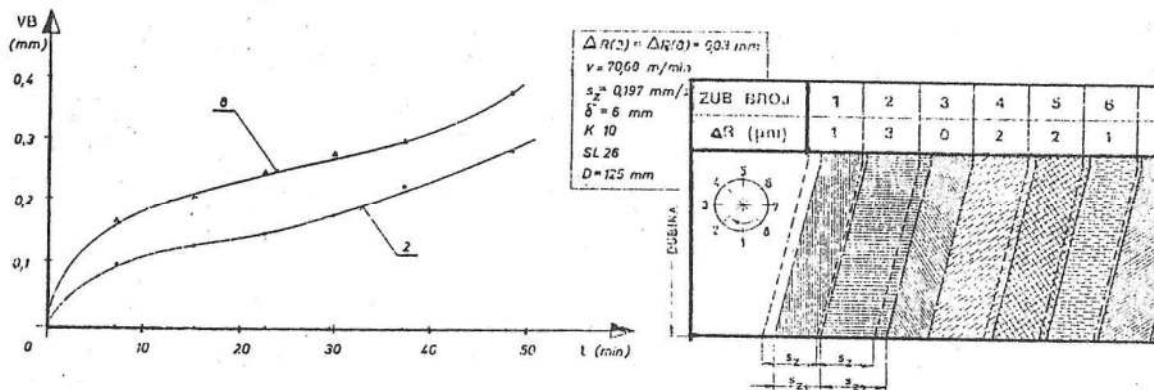


Slika 1. Merena vrednost habanja 4 zuba [ 1 ]

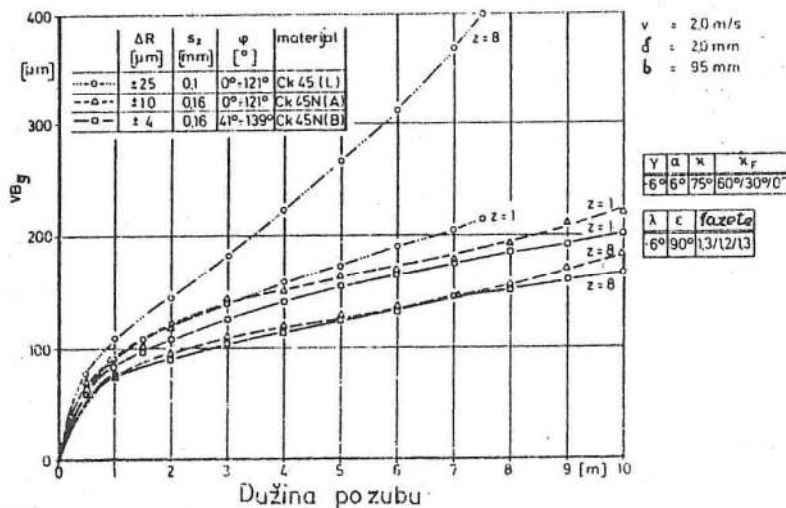
Fig. 1. Measured wear of 4 tooth [ 1 ]

U seriji ispitivanja koja je izveo Kam [ 7, 8 ], koja se slažu sa ispitivanjima koje je izveo Dimitrić [ 3 ], takodje se objašnjava razlika u habanju bacanjem zuba. Ispitivanja su izvršena pri rezanju sa različitim radijalnim bacanjem u toku vremena rezanja pa je utvrđen porast habanja na zubu kada je bacanje veće i obrnuto. Pri radijalnom bacanju  $\Delta R$  u dijapazonu  $\pm 4 \mu\text{m}$  krive habanja pojedinih zuba pri glodanju sa 8 zuba su sasvim bliske.

Istraživanja uticaja radijalnog bacanja reznih elemenata na postojanost glava za glodanje u proizvodnim uslovima izvršena su u radu [15]. Pri konstantnim režimima rezanja praćen je razvoj širine pojasa habanja na lednoj površini pojedinih zuba glave za glodanje. Odredjene su krive habanja pojedinih zuba i njihovo radijalno bacanje. Na osnovu radijalnog bacanja određena je stvarna vrednost pomaka po zubu svakog zuba. Zubi koji su radili sa stvarnim pomakom većim od nominalnog imali su manju postojanost i obrnuto (slika 2. ).



Slika 2. Kriva habanja i radijalno bacanje [ 15 ].  
 Fig. 2. Tool wear curve and radijal throw [ 15 ].



Slika 3. Radijalno bacanje  $\Delta R$  i habanje zuba  $VB_g$  [ 8 ]  
 Fig. 3. Radial throw and  $VB_g$  tool wear [ 8 ]

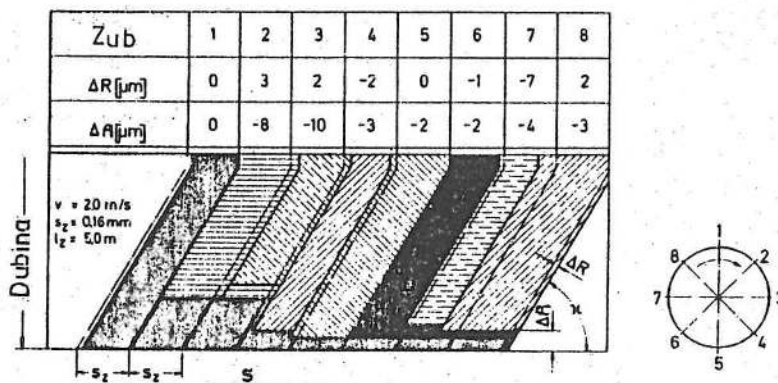
Na slici 3. [ 8 , 16 ] su prikazani rezultati praćenja habanja na glavnoj ledjnoj površini pri glodanju sa jednim i osam zuba. Iz dijagrama se vidi razlika u habanju pri bacanju zuba  $\pm 25 \mu\text{m}$  a male razlike kad je habanje  $\pm 10$  i  $\pm 4 \mu\text{m}$

Na osnovu ovih ispitivanja nameće se zaključak da se rezultati habanja pri glodanju sa jednim zubom mogu, primeniti na glodala sa više zuba, ako je radijalno bacanje  $\Delta R$  manje od  $\pm 10 \mu\text{m}$  [ 7 , 11 ]. Ova mala razlika u postojanosti objašnjava se povećanjem temperature obratka pri glodanju sa  $z = 8$  [ 3 , 7 ].

## 2.2. OTPORI REZANJA

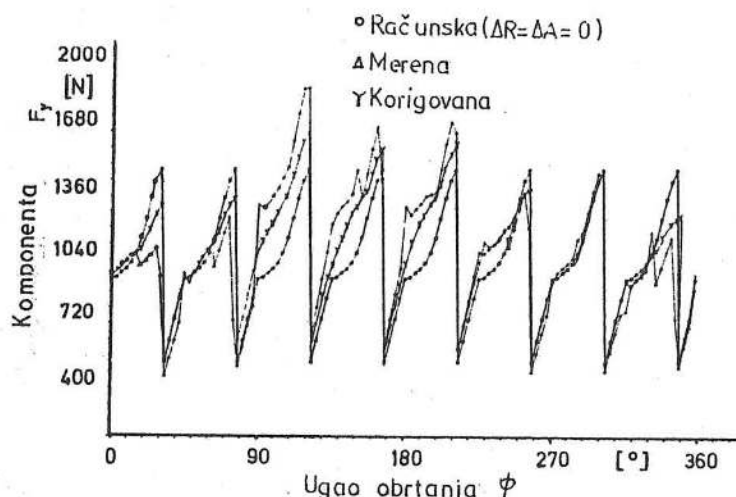
Na osnovu rezultata istraživanja otpora rezanja dobijenih pri jednozubom glodanju pokušano je određivanje otpora pri višezubom glodanju. Ukoliko se uporede rezultati eksperimenta sa jednozubim alatima preračunati na višezubo, sa stvarno izmerenim otporima pri višezubom glodanju, nastaju znatne razlike [ 3 , 7 , 13 ].

Da bi se dobilno veće poklapanje računskih i izmerenih vrednosti uzeta je u obzir efektivna veličina preseka strugotine  $a_{ef}$  i  $h_{ef}$ , koje se izračunavaju na osnovu teorijskih vrednosti razlika aksijalnog  $\Delta A$  radijalnog odstupanja  $\Delta R$  posmatranog i prethodnih zuba [ 3 , 7 ]. Na slici 4. prikazan je uticaj bacanja zuba na presek strugotine [ 7 ]. Sa slike se vidi da aksijalno bacanje zuba ima veliki uticaj na hrapavost obradjene površine. Sve dok je fazeta koja klizi po obradjenoj površini veća od pomaka po obrtaju samo jedno sečivo je merodavno za hrapavost obradjene površine, ono koje je najniže [8]. Ovo sečivo pored sopstvenog preseka skida i ostatak od drugih sečiva .



Slika 4. Uticaj radijalnog i aksijalnog bacanja na presek strugotine [8]  
 Fig.4. Influence of radial and axial throw on the chip cross section [8]

Rezultati izračunavanja otpora rezanja kad se uzme u obzir bacanje zuba nalaze se u [3 8] Uporedjenje računskih vrednosti sa i bez bacanja i izmerenih vrednosti, za komponentu  $F_y$  prikazano je na slici 5. u [8]. Vrednosti otpora rezanja su date za jedan obrtaj glave za glodanje u zavisnosti od ugla obrtanja  $\phi$ .



Slika 5. Vrednosti otpora  $F_y$  pri glodanju sa 8 zuba uz uvođenje bacanja zuba [8].  
Fig. 5. Cutting force  $F_y$  during milling with 8 teeth and run out [8]

Odstupanja, koja se javljaju između izmerenih i računskih vrednosti, objašnjavaju se rasipanjem rezultata merenja i porastom temperature rezanja pri glodanju sa 8 zuba [3, 8].

Koristeći specifični otpor rezanja  $k_s$  i presek strugotine, izračunavani su otpori  $F_1$  i  $F_2$  na pojedinim zubima "i" u funkciji ugla obrtanja glave za glodanje  $\phi$  [5, 8]:

$$F_1(i, \phi) = k_s s_z \sin \theta(\phi) \quad (1)$$

$$F_2(i, \phi) = k_{sz} F_1(i, \phi) \quad (2)$$

Za preračunavanje ovih otpora u pravouglom koordinatnom sistemu  $x, y, z$  korišćene su jednačine (2.1) i (2.2) uz uvođenje ugla  $\theta(\phi)$ , koji predstavlja položaj zuba i pri uglu obrtanja glodala ( $\phi$ ) [9].

Pomenute jednačine važe za jednozubo glodanje. Da bi se izračunale komponente na zubima pri višezubom glodanju potrebno je sabrati sile na zubima,

grudnih uglova, napadnog ugla, radijusa vrha a zubi imaju malo bacanje.

Pošto u realnom procesu rezanja u praksi nije moguće zanemarivanje ovih uticaja autori [4] su u model sistema otpora pri čeonom glodanju uveli sledeće uticaje:

(a) Uticaj greške postavljanja reznih pločica u telo. Greške u postavljanju su uzete u obzir preko odstupanja od nominalne vrednosti pomaka po zubu  $s_{zi}$ .

(b) Uticaj napadnog ugla. Pravac rezultante otpora rezanja se, ne može odrediti direktno pomoću napadnog ugla zbog postojanja radijusa vrha pločice  $r$ . Ovaj uticaj je uzet u obzir sistemom jednačina (5) u [4],

(c) Uticaj geometrije obradka na otpore rezanja je uzet pomoću sistema jednačina (6) u [4]. Razlikuju se sledeće faze: ulazni rez, pun rez i izlazni rez. Postojanje rupa i žljebova na obradku uzima se u obzir preko variranja ulaznih i izlaznih uglova i broja ulazno izlaznih parova. Položaj glodala u odnosu na obradak je uzet preko ulaznih i izlaznih uglova.

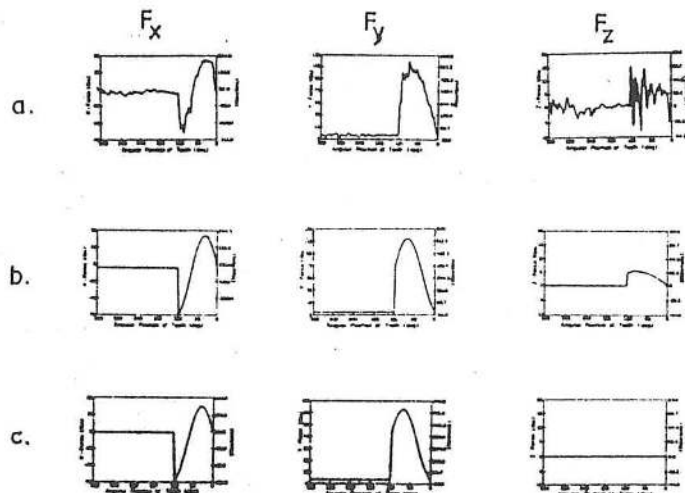
(d) Uticaj naginjanja vretena, koje se vrši sa ciljem da se izbegne rezanje zuba pri povratnom hodu uzet je u obzir povećavanjem nominalnog napadnog ugla i korišćenjem efektivne dubine rezanja  $\delta(\theta_i(\phi))$ , pomoću jednačine (7) u [4].

(e) Uticaj bacanja zuba. Bacanje zuba nastaje usled različitih uzroka: aksijalno bacanje zuba  $\Delta A$  ima mali uticaj na otpore rezanja pošto je relativno mnogo manje nego dubina rezanja. Ako postoji radijalno bacanje analiza otpora rezanja je složenija zato što zubi trpe različito opterećenje (slika 4.). Nominalni pomak  $s_{zi}$  na  $i$ -tom zubu se povećava ili smanjuje zbog radijalnog bacanja  $i$ -tog zuba ili prethodnog zuba. Ovo je opisano jednačinom (10) u [4].

Eksperimentalna verifikacija predloženog matematičkog modela izvršena je pri čeonom glodanju legure aluminijuma. Otpori su mereni pomoću trokomponentne merne platforme Kistler, uz korišćenje računara za prikupljanje podataka.

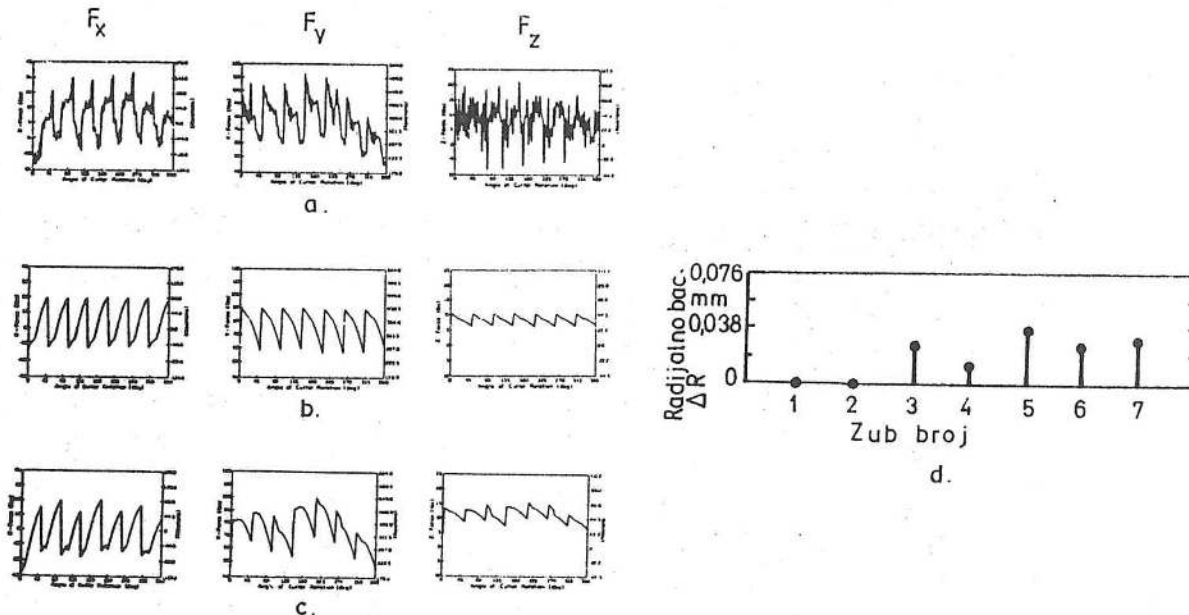
Eksperimenti su izvedeni pri jednozubom glodanju uz variranje brzine rezanja, pomaka i dubine rezanja (dva nivoa).

Profili izmerenih i računskih vrednosti komponenata otpora rezanja prikazani su na slici 6 (a) i (b). Profili otpora na slici 6 (c) su izračunati pri zanemarivanju bacanja zuba glodala, komponenta  $F_z$  je na slici zbog toga nestala.



Slika 6. Komponente otpora pri jednozubom glodanju [4].  
Fig. 6. Cutting forces during single - tooth milling [4].

Eksperirmenti rezanja sa mnogozubim alatom su izvedeni kada je u glavu za glodanje sa 14 zuba postavljeno 7 zuba. Na slici 7 (a) su prikazane izmerene vrednosti za jedan od eksperimenata. Slika 7 (b) pokazuje računске vrednosti promene profila otpora bez uzimanja u obzir bacanja zuba. Na slici 7 (c) su dati računski profili otpora rezanja kada je u obzir uzeto i bacanje zuba. Na slici 7 (d) je prikazano bacanje pojedinih zuba. Sa slike 7 se vidi da radialno bacanje ima značajan uticaj na karakteristike otpora rezanja. Sa smanjenjem pomaka  $s_z$  ovaj uticaj je još izraženiji.



Slika 7 Komponente otpora rezanja pri višezubom glodanju [4].  
Fig. 7 Cutting forces components during multi - tooth milling [4].



Na osnovu rezultata prikazanih na slici 7 (a) i (c) se vidi da su rezultati slični po veličini sile i obliku profila. Upoređenje sa rezultatima izvedenim pri različitim režimima rezanja, pokazuju da se rezultati i spitivanja bazirani na jednozubom glodanju mogu uspešno primeniti i na višezubom glodanje [4].

### 2.3. HRAPAVOST OBRADJENE POVRŠINE

Pri glodanju sa višezubim glodalom dolazi do povećanja valovitosti obradjene površine, što je uzrokovano:

- aksijalnim bacanjem pojedinih zuba,
- nejednakim habanjem zuba,
- nepravilnim odvođenjem strugotine.

Logičke osnove za razvijanje matematičkog modela koji opisuje generisani profil pri čeonom glodanju nalazi se u [17]. Razvojem matematičkog modela koji uzima u obzir radijalno i aksijalno bacanje zuba, nepravilno postavljanje pločica, radijus vrha pločice i režime rezanja za određivanje profila površine pri čeonom glodanju uz korišćenje računara, nalazi se u [6].

Pločice sa fazetama koje su paralelne sa obradjenom površinom, širine 3-10 puta veće od pomaka po zubu daju bolji kvalitet obradjene površine nego one sa zaobljenim vrhom. To je zbog toga što najniže postavljena pločica skida ostatke profila obradjene površine od prethodnih pločica.

Da bi se dobio što bolji kvalitet obradjene površine potrebno je da je fazeta, koja je paralelna sa obradjenom površinom bude što šira. Suviše velike fazete uzrokuju vibracije, što ograničava širinu fazete.

Aksijalno bacanje pločice utiče najviše na hrapavost. Tako ako je širina paralelne fazete četiri puta veća od pomaka po zubu, svaka četvrta pločica treba da je u istoj ravni. Smanjenje hrapavosti pri višezubom glodalu postiže se i rasporedom zuba koje imaju isto bacanje. Najbolje je da su zubi sa istim bacanjem ravnomerno raspoređeni po glodalu. Onda najniži zubi stignu da skinu neravnine, koje ostave prethodni zubi. Kad su zubi sa istim bacanjem grupisani onda oni pri okretanju preskoče te neravnine. Ovakve zaključke je moguće doneti i na osnovu ostataka preseka strugotine prikazanog na slici 4.

Da bi se smanjila hrapavost i valovitost obradjene površine glodala sa određenim aksijalnim bacanjem, preporučuje se [14] korišćenje pločice sa velikom fazetom (do 10  $\mu\text{m}$ ) paralelnom sa obradjenom površinom. Ova pločica se postavlja

najniže (0,02 -0,10 mm ispod prethodne pločice). Ona će se najviše habati, češće menjati ali time i štititi ostale pločice.

#### 2.4. TEMPERATURA REZANJA

Dosadašnja istraživanja temperature rezanja izvršena su pri rezanju sa jednozubim glodalom pa se postavlja pitanje da li je moguće rezultate dobivene pri rezanju jednozubim glodalom primeniti i na višezuba glodala. U cilju provere, u glavu za glodanje je postavljeno svih osam pločica od tvrdog metala, zatim je izvršeno njihovo podešavanje, tako da je radijalno i aksijalno bacanje zuba bilo  $\pm 0,002$  mm. Kada je došlo do slučajnih pomeranja pločica pri obradi primećeno je odstupanje u temperaturi [ 14 ] .

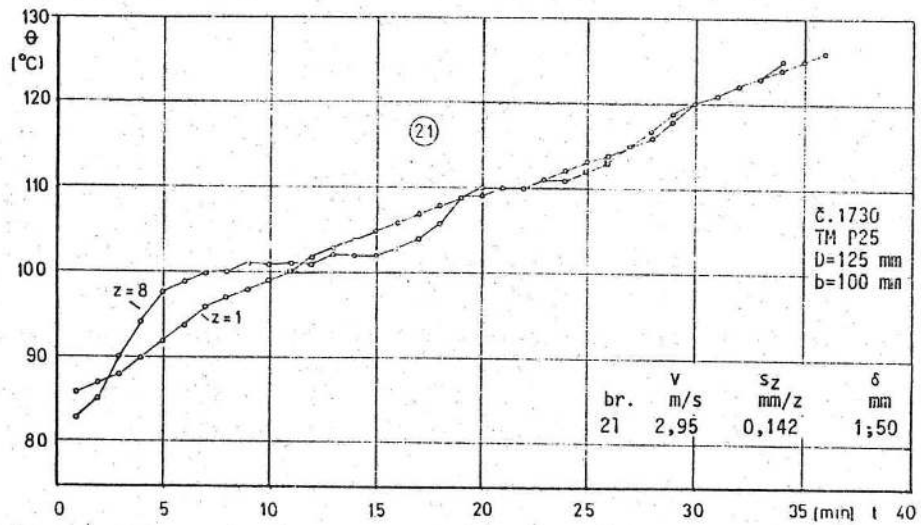
Metodologija merenja temperature sa višezubim glodalom je bila ista kao i pri jednozubom, pomoću veštačkog termopara ugrađenog ispod rezne ploče. U glodalo su bile postavljene sve pločice a merena je temperatura samo na jednoj pločici.

Temperatura je merena posle svakog minuta rezanja pa je proces prekidan i registrovana je najviša temperatura. Rezanje je nastavljeno tek kada se temperatura na mernom mestu izjednačila sa temperaturom okoline. Praćenje habanja pločica u vremenu rezanja vršeno je da bi se utvrdilo da razlika u temperaturi jednozobog i višezubog glodala ne nastaje zbog porasta habanja pločice. Na taj način je određena zavisnost temperature rezanja na površini oslanjanja rezne pločice u funkciji vremena rezanja pri rezanju sa jednim i svih osam zuba. Ove zavisnosti su prikazane na slici 8.

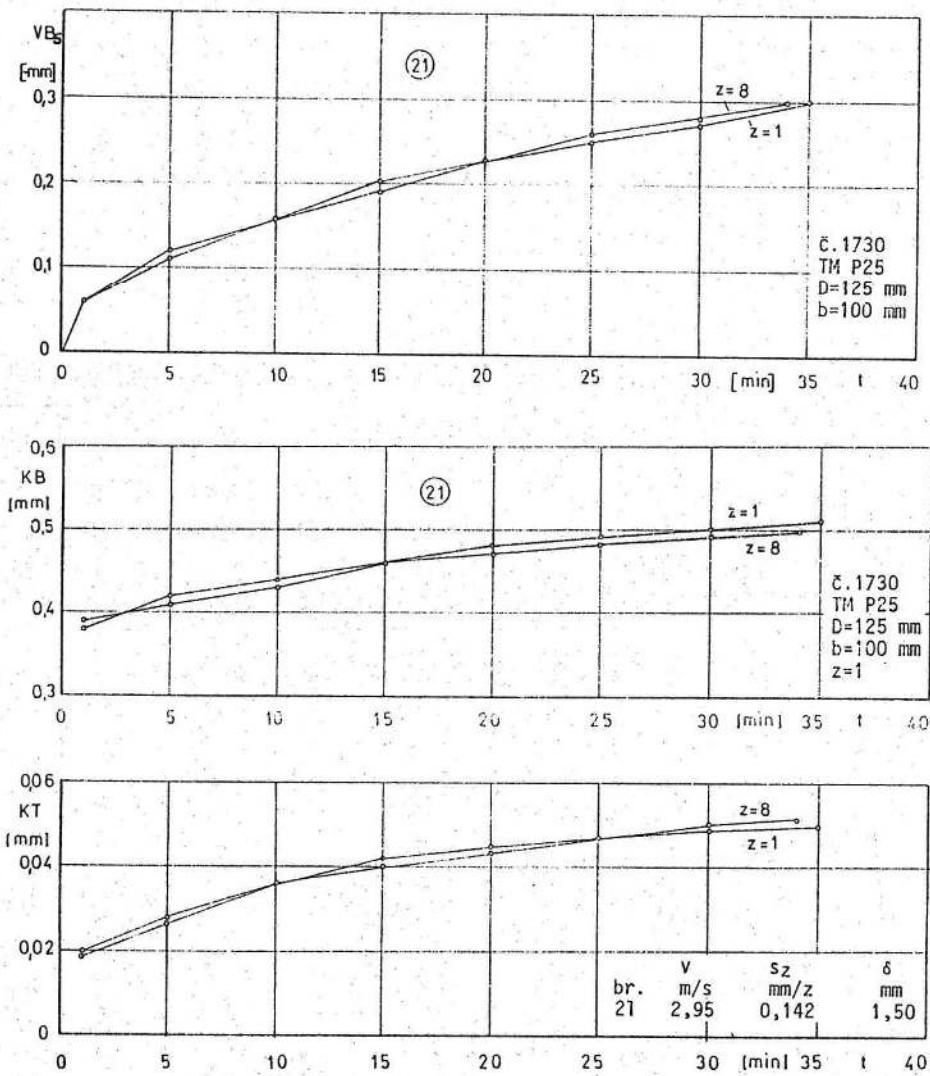
Zavisnosti širine pojasa habanja na lednoj površini na fazetama VBg i VBs i širine kratera KB kao i dubine kratera KT u funkciji vremena rezanja, pri rezanju jednozubim i glodalom sa svih osam zuba, prikazani su na slici 9.

Na osnovu rezultata istraživanja temperature rezanja u vremenu može se zaključiti da je temperatura jednozobog i višezubog glodala ista, ako je radijalno i aksijalno bacanje malo ( $\pm 0,002$  mm). Rezultati za temperaturu rezanja dobiveni pri jednozubom glodanju mogu se koristiti za određivanje temperature višezubog glodala ako je ispunjen pomenuti uslov, što se slaže i sa istraživanjima drugih parametara rezanja, kao što su habanje alata i sile pri rezanju i od strane drugih autora [ 14 ] .

Objašnjavanje fenomena temperature rezanja se zasniva na sledećem. Kada se reže jednim zubom postoji samo jedan toplotni izvor a kada se reže sa više zuba ima više toplotnih izvora. Zbog toga temperatura tela višezubog glodala raste, međutim ta temperatura nikad ne može da dostigne temperaturu "tačke" u zoni rezanja ( ili vrlo blizu), koja je merena minijaturnim termoparom kao najviša



Slika 8. Temperatura rezanja [10]  
Fig. 8 Cutting temperature [10]



Slika 9. Parametri habanja alata [10]  
Fig. 9. Parameters of the tool wear [10]

temperatura. Povećanje temperature tela glodala ne dovodi do povećanja temperature rezanja tj. izvora temperature, zbog same prirode temperature.

### 3. ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetog može se zaključiti

◆ U zavisnosti od vrednosti bacanja zuba glodala zbog promene preseka strugotine menjaju se:

1. na pojedinim zubima: habanje, temperatura i sile rezanja
2. na obradku hrapavost obradjene površine

◆ Da bi se rezultati istraživanja parametara procesa pri obradi jednozubim glodalom mogli koristiti i pri višezubom glodalu, neophodno je održavati vrednosti aksijalnog i radijalnog bacanja u odredjenim granicama .

### 4. LITERATURA

- [1] Ber, A., Feldman, D. : The Influence of Radial Location on the Wear Behavior of Multi - Tooth Face Milling Cutter. Annals of the CIRP, Vol. 25/1/1977.
- [2] Dammer, L. : Ein Beitrag zur Processanalyse und Schnittwertvorgabe beim Messerkopfstirnfräsen. Dissertation TH Aachen, 1982.
- [3] Dimitrić, M. : Primena kontinualnog habanja višesečnog alata za vreme procesa rezanja. Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1985.
- [4] Fu, H., DeVor, R. E., Kapoor, S.G. : A Mechanistic Model for the Prediction of Force Systems in Face Milling Operations. Journal of Eng. for Ind. Vol. 106/81. 1984.
- [5] Gather, M. : Adaptive Grenzregelung für das Stirnfräsen. Dissertation, TH Aachen, 1977.
- [6] Ikezaki, Y., Takuechi, Sakamoto, M. : Cutting Force Measurement of a Rotating Tool by Means of Optical Data Transmission. Annals of the CIRP, Vol. 33/1/1984.
- [7] Kamm, H. : Beitrag zur Optimierung des Messerkopffräsens. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1977.
- [8] Kamm, H., Verschleiss und Lerspankrafte beim Ein - und Mehrzahnfräsen, Zweiter Teil : Zerspankrafte beim Mehrzahnfräsen. Werkstatttechnik, 69, No 7, 1979.

- [9] Kovač, P. : Istraživanje podloga za upravljanje procesom čeonog glodanja. Doktorska disertacija, FTN, IPM, Novi Sad, 1987.
- [10] Kovač, P. : Temperature and Wear of Single and Multi - tooth Milling Cutter . Proceeding of 11-th International Conference on Production Research ICPR' 91, Hefei, China, 1991.
- [11] Kovač, P., Milikić, D. : Postojanost pri čeonom glodanju sa jednim i više zuba u zavisnosti od elemenata režima rezanja. Zbornik radova FTN, Novi Sad, 14, 1983.
- [12] Kuljanić, E.: An Investigation of Wear in Single - tooth and Multi - tooth Milling. Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 14, 1974.
- [13] Müller, M. : Zerspankraft, Werkzeugbeanspruchung und Verschleiss beim Fräsen mit Hartmetall. Dissertation, Universität, Karlsruhe, 1881.
- [14] Sandvik Coromant : Milling Handbook. 1975.
- [15] Vasić, S., Milikić, D., Kovač, P. : Ispitivanje uticaja radijalnog bacanja reznih elemenata na postojanost glava za glodanje. Zbornik radova IPM, 4, 1987.
- [16] Victor, H. : Computer-Aided Measurement of Cutting Tool Forces Applied to the Wear of an End Milling Cutter. Wear, 62/185 - 195, 1980.
- [17] Villa, a., Rosseto, S., Levi, R. : Surface Texture and Machining Conditions. Part 1: Model Building Logic in View of Process Control. Trans. ASME, Journal of Eng. for Ind. Vol. 105, No. 3, 1983.