

ORIGINALNI NAUČNI RAD

P. Kovač*

ODREĐJIVANJE POVRŠINE ODZIVA ZA OTOPORE REZANJA
PRI ČEONOM GLODANJU**

Rezime

U ovom radu je prikazano određivanje otpora rezanja pri čeonom glodanju, merna instrumentacija i korišćenje elektronskog računara pri obradi podataka. Rezultati ispitivanja promene otpora rezanja kad su varirani brzina, pomak i dubina rezanja, su takodje dati.

EXPLORING RESPONSE SURFACE OF CUTTING FORCES FOR
AN END MILLING CUTTER

Summary

This paper deals with the fundamental determination of cutting forces in face milling, describes the measure equipment and computer use. Some results including the variation of cutting forces with feed, speed and depth of cut are presented.

1. UVOD

Obradljivost karakteriše više pokazatelja kao što su intenzitet habanja, odvajanje strugotine, kvalitet obradjene površine, sile rezanja... Tačno poznavanje ovih parametara nije bitno samo za sam proces rezanja, već i pri projektovanju mašine alatke, pribora i alata. U tom cilju su izvedena mnoga ispitivanja naročito pri struganju, počevši sa onim izvedenim od strane F.W. Taylor-a oko 1900. godine. Mnogo manje znanja postoji o glodanju, zbog raznih vrsta glodanja (istosmerno, suprotnosmerno, čeono...).

*) Kovač mr Pavel, dipl. ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

***) Radjeno na NO Institutu za proizvodno mašinstvo, FTN, u Novom Sadu u okviru projekta "Razvoj tehnoloških postupaka i postupaka obrade u mašinstvu" koji finansira SIZ na NR Vojvodine.

prekidnog rezanja, korišćenja mnogozubnog alata i promenljive debljine strugotine.

U ovom radu je obradjeno merenje i nalažanje zavisnosti otpora rezanja pri čeonom glodanju jednozubim alatom, od elemenata režima rezanja. Obrada i ocena izmerenih vrednosti izvršena je pomoću metodologije višefaktornog plana eksperimenta.

Metod višefaktornog plana eksperimenta naziva se još i metodom površine reagovanja ili odziva (RSM), a razradjivana je i dopunjavana u dosta radova [1,3]. Metodološku suštinu površine reagovanja predstavlja izbor modela u kojem je reakcija matematički opisana preko izvesne funkcije nezavisno promenljivih. Na bazi ovog modela formiraju se novi modeli u narednim ciklusima sve do matematičke identifikacije realnog difuznog sistema.

Minimalni skup eksperimentalnih tačaka raspoređenih u eksperimentalnom hiperprostoru, omogućuje višestruko niže troškove i trajanje eksperimentalnih ispitivanja naročito kod prostora sa većim brojem dimenzija (parametara).

2. DEFINISANJE MATEMATIČKOG MODELA

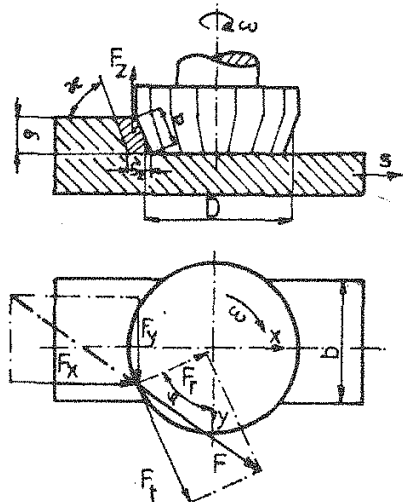
Spomenuta metodologija za obradu i ocenu izmerenih vrednosti primenjena je pri merenju otpora rezanja pri čeonom glodanju. Kao ulazni parametri su izabrani elementi režima rezanja:

- brzina rezanja v kao faktor F_1
- pomak po zubu s_1 kao faktor F_2
- dubina rezanja δ kao faktor F_3 .

Izlazni parametri su bile komponente otpora rezanja pri glodanju. Na slici 1 je prikazan plan sila pri čeonom glodanju sa geometrijskim veličinama.

Nekontrolisane veličine (poremećaji) i konstante su:

- geometrija alata
- habanje alata
- dinamički sistem: mašina-alat-obradak
- sredstvo za podmazivanje i hladjenje.



Slika 1.

2.1 Odredjivanje konstanti u matematičkom modelu

Pri planiranju i izvodjenju eksperimenta korišćena je metodologija trofaktornog plana eksperimenta. Izabrani faktori su se menjali u pet nivoa vrednosti. Na taj način površina odziva je u ispitivanom intervalu u svakoj ravni odredjena sa po pet eksperimentalnih tačaka.

Ovaj način planiranja eksperimenta omogućuje da se ispita širi interval, matematički model je pouzdaniji a neznatno se produžava izvodjenje i troškovi eksperimenta.

Regresiona analiza

Ako se pretpostavi funkcionalna zavisnost izmedju odabranih nezavisno promenljivih F_i i zavisno promenljive R_i u obliku

$$R = C \cdot F_1^{P_1} \cdot F_2^{P_2} \cdot F_3^{P_3} \quad (1)$$

regresionu analizu možemo izvršiti na sledeći način. Logaritmovanjem ove jednačine dobijamo sledeću:

$$\ln R = \ln C + p_1 \ln F_1 + p_2 \ln F_2 + p_3 \ln F_3 \quad (2)$$

koja se može predstaviti sledećim linearnim matematičkim modelom:

$$y - \epsilon = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

gde je: y - logaritmovana vrednost merene veličine sa greškom merenja ϵ

$$x_0 = 1$$

x_i - su logaritmovane vrednosti F_i

b_i - koeficijenti koji se odredjuju.

Ako je potrebno, ova jednačina se može predstaviti i modelom drugog reda:

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (4)$$

gde su: b_i , b_{ij} , b_{ijn} - parametri koji se odredjuju.

Za odredjivanje ovih parametara koristi se metoda najmanjih kvadrata na osnovu formule u matricnom obliku:

$$B = (x^T \cdot x)^{-1} x \cdot y \quad (5)$$

gde je: B - matrica koeficijenta b_i , b_{ij} ... b_{ijnm} koji se odredjuje

x - matrica plana eksperimenta

x^T - transponovana matrica matrice x ,

$(x^T x)^{-1}$ - inverzna matrica matrice $(x^T x)$

y - matrica logaritmovanih vrednosti merene veličine.

Kodiranje i izbor parametara eksperimenta

Da bi se pojednostavila obrada podataka pomoću jednačine (5), vrši se kodiranje parametara pomoću jednačine:

$$x_i = 1 + 2 \frac{\ln F_{i1} - \ln F_{i5}}{\ln F_{i2} - \ln F_{i5}} \quad (6)$$

gde je: F_{i5} - kodirano $x_i = -\alpha$ najniža vredn.fakt.

F_{i2} - $x_i = -1$ niža " "

F_{i3} - $x_i = 0$ srednja " "

F_{i1} - $x_i = +1$ viša " "

F_{i4} - $x_i = +\alpha$ najviša " "

$$F_{i3}^2 = F_{i1} \cdot F_{i2}$$

Broj eksperimenata N uključujući tačke izvan kuba n_α , i srednji nivo n_0 zbog provere tačnosti $K=3$ faktornog eksperimen-

ta iznosi:

$$N = 2^k + n_\alpha + n_0 = 8 + 12 + 4 = 24.$$

Na osnovu toga plan matrica eksperimenta X će biti:

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
3	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
6	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
7	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 X=	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0	0	0
14	1	α	0	0	α^2	0	0	0	0	0
15	1	0	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0	0
16	1	0	α	0	0	α^2	0	0	0	0
17	1	0	0	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0
18	1	0	0	α	0	0	α^2	0	0	0
19	1	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0	0	0
20	1	α	0	0	α^2	0	0	0	0	0
21	1	0	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0	0
22	1	0	α	0	0	α^2	0	0	0	0
23	1	0	0	$-\alpha$	0	0	α^2	0	0	0
24	1	0	0	α	0	0	α^2	0	0	0

(7)

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{123} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{24} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dekodiranje modela

Računski model u kodiranim koordinatama ima oblik:

1. Model bez medjusobnih uticaja

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (9)$$

2. Model drugog reda

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (10)$$

Ako se u ove jednačine zamene vrednosti za kodirane faktore x_i , prema jednačini (6), uz uvođenje oznaka

$$A_i = \frac{2}{\frac{F_{i1}}{F_{i2}}} \quad a_i = 1 - A_i \quad \sum_{i=1}^k F_{ij} \quad (11)$$

dobijaju se vrednosti eksponenta $p_i, p_{ii}, \dots, p_{ij}$.

1. Model bez medjusobnih uticaja:

$$p_0 = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i a_i$$

$$p_i = A_i \cdot b_i$$

2. Model drugog reda

$$p_0 = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot a_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} a_i^2 + \sum_{i < j}^k b_{ij} a_i a_j$$

$$p_i = A_i (b_i + 2 \cdot b_{ii} \cdot a_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} \cdot a_j)$$

$$p_{ii} = A_i^2 \cdot b_{ii}$$

$$p_{ij} = A_i A_j \cdot b_{ij}$$

Nakon antilogaritmovanja, dobija se računska vrednost u stvarnim koordinatama.

1. Model bez medjusobnih uticaja

$$R = C \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 \\ F_1 & F_2 & F_3 \end{matrix}$$

2. Model drugog reda

$$R = C \cdot F_1^{P_1} F_2^{P_2} F_3^{P_3} \exp \left[\sum_{i=2}^k P_{ii} (\ln F_i)^2 + \sum_{i < j} P_{ij} \ln F_i \ln F_j \right]$$

$$C = \exp(p_0) \quad R = \exp(y)$$

Disperziona analiza

Postupak izračunavanja disperzionih odnosa potrebnih za ocenu signifikantnosti parametara i adekvatnosti modela je sledeći:

Za ocenu signifikantnosti suma kvadrata i disperzioni odnosi će biti:

$$S_{bo} = \frac{1}{C_{00}} b_0^2$$

$$F_{ro} = \frac{S_{bo}}{S_{E2}}$$

$$S_{bi} = \frac{1}{C_{11}} b_i^2$$

$$F_{ri} = \frac{S_{bi}}{S_{E2}}$$

$$S_{bii} = \frac{1}{C_{55}} b_{ii}$$

$$F_{rii} = \frac{S_{bii}}{S_{E2}}$$

$$S_{bij} = \frac{1}{C_{88}} b_{ij}$$

$$F_{rij} = \frac{S_{bij}}{S_{E2}} \quad j < i$$

pošto su svi stepeni slobode $f_1 = f_i = 1$.

C_{ij} - su koeficijenti na dijagonali u matrici $(x'x)^{-1}$.

Disperzija u eksperimentalnim tačkama gde ima ponavljanja se računa:

$$S_{EA} = \sum_{u=9}^{12} (y_u - y_{SR})^2$$

$$y_{SR} = \frac{\sum_{u=9}^{12} y_u}{4}$$

$$S_{EB} = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{y_{12+i} - y_{18+i}}{2} \right)^2$$

stepen slobode jeste: $f_E = n_0 - 1 + 3(n_a - 1) = 4 - 1 + 3(2 - 1) = 6$, pa je disperzija:

$$S_{E2} = \frac{S_{EA} + S_{EB}}{f_E}$$

Rezidualna suma je:

$$S_R = \sum_{u=1}^k (y_u - y_{Ru})^2 \quad y_{Ru} = z_n R_{Ru} \quad u = 1, 2, 4$$

disperzija i stepen slobode je

$$S_{R2} = \frac{S_R}{f_R} \quad f_R = N - \frac{(k+1)(k+2)}{2} = 24 - \frac{(3+1)(3+2)}{2} = 14$$

za adekvatnost modela disperzija je:

$$S_{LF2} = \frac{S_{R2} - S_{E2}}{f_{LF}} \quad f_{LF} = f_R - f_E = 14 - 6 = 8.$$

Parametar je signifikantan ako je $F_{ri} > F_t$. Prema Fišeru $F_t(f_1, f_2)$ se nalazi za dati prag značajnosti α i stepene slobode $f_1 = f_i = 1$ $f_2 = f_E$. $F_t(1, 6) = 5,99$

Model je adekvatan ako je $F_{RLF} < F_t$, gde je $F_{RLF} = \frac{S_{LF2}}{S_{E2}}$, a $F_t(f_1, f_2)$ iz tablice za dati prag značajnosti α i stepene slobode $f_1 = f_{LF}$ i $f_2 = f_E$. $F_t(8, 6) = 4,15$

Ocena tačnosti matematičkog modela vrši se preko intervala poverenja:

$$y \pm t_{\alpha R} \sqrt{\sigma(y)^2}.$$

Koeficijent $t_{\alpha R}$ je odredjen prema Studentovoj raspodeli za nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i stepen slobode $f = f_R$.

Standardna devijacija $(y)^2$ se izračunava prema sledećoj tabeli:

Tačke na rogljevima Model bez uticaja	Aksijalne tačke	Centralne tačke
$(\frac{1}{24} + 3 \frac{1}{16}) S_R^2$	$(\frac{1}{24} + 3 \cdot \frac{1}{16}) S_R^2$	$\frac{1}{24} S_R^2$

2.2 Uslovi pri eksperimentalnom ispitivanju

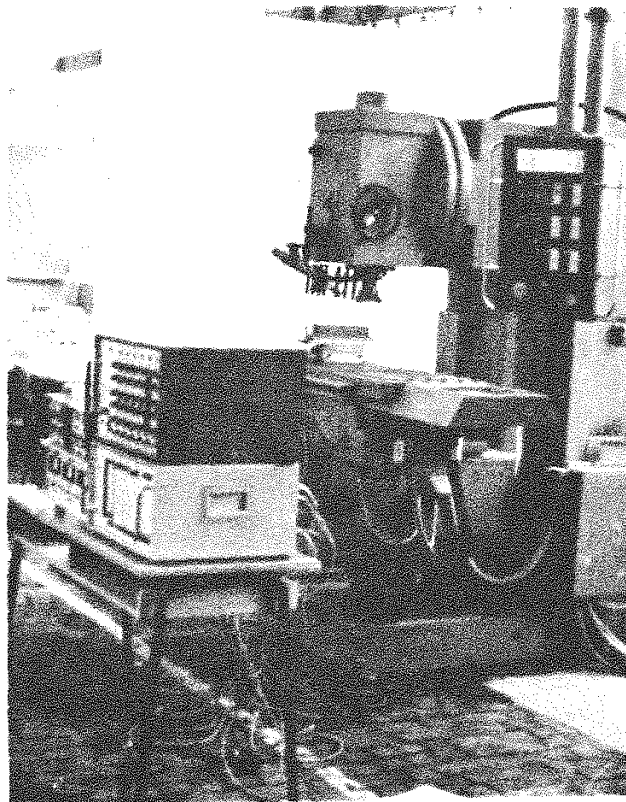
Merenja su vršena na čeliku za poboljšanje č.1730, koji je bio pripremljen u obliku paralelopipeda 100x80x280, da se može

stegnuti na mernu platformu. Zatezna čvrstoća materijala je $90 \cdot 10^7$ Pa.

Rezanje je vršeno na vertikalnoj glodalici "PRVOMAJSKA" FSS-GVK-3, snage pogonskog elektromotora $P=11$. Pri izvođenju eksperimenta korišćena je glava za glodanje JAL G-750 ϕ 125 mm, sa umetnutim zubima od pločica sa tvrdim metalom kvaliteta P 25 oznake SPAN 12 03 ER proizvođača "Prvi partizan".

Merenje komponenti otpora rezanja vršeno je pomoću trokomponentalnog dinamometra na piezoelektričnom principu firme "KISTLER" tipa 9257A, koji ima sledeće karakteristike: maksimalno merno područje $F_x=5000$ N, $F_y=5000$ N, $F_z=10\ 000$ N, moguće preopterećenje 50%, inertnost 1%.

Signali su od dinamometra vodjeni preko kapacitivnih pojačavača "KISTLER" tip CA 5001 i galvanometarskih pojačivača "KIESTLER" tip GA 5221 A, na analogni pokazivač i na tri kanala svetlosnog oscilografa "August Fischer" KG tip AF-8UVG. Merna aparatura i mašina alatka prikazani su na slici 2.



Slika 2.

3. MERENJE I OBRADA IZMERENIH VREDNOSTI

Prema planu eksperimenta i na opisanoj aparaturi izvršeno je merenje komponenti otpora rezanja. Vrednosti su očitavane sa zapisa na pisaču. Izmerene vrednosti, računске vrednosti i vrednosti pojedinih faktora, prikazane su u tabeli I. Faktori su varirani u pet nivoa kao što je prikazano u prilogu ispred tabele I, pri tome koef. $\alpha = 2$.

Obrada eksperimentalnih podataka je izvršena na elektronskom računaru prema razradjenim programima na osnovu postupka prikazanog u tački 2.1. Najpre je izvršena obrada podataka kada je model bio u obliku jednačine (1), a zatim kada je matematički model bio u obliku modela drugog reda.

U tabeli II su prikazani koeficijenti u računskim modelima. Najpre je model u obliku jednačine (1), a zatim koeficijenti za model drugog reda.

3.1 Analiza rezultata obrade izmerenih vrednosti

Analiza adekvatnosti, signifikantnosti i računosti matematičkih modela ukazuje:

- da su predloženi modeli adekvatni
- da matematički model (1) zadovoljava u pogledu adekvatnosti, jednostavniji je za primenu, a model drugog reda je složeniji ali bolji u pogledu adekvatnosti
- izabrani parametri režima značajno utiču na veličinu otpora rezanja
- da tačnost predloženih matematičkih modela za zadati koeficijent rizika zadovoljava.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu unapred izloženog mogu se doneti sledeći zaključci:

- predloženi matematički modeli otpora rezanja F_j mogu poslužiti za odredjivanje istog pri čeonom glodanju
- oba predložena modela zadovoljavaju u pogledu adekvatnosti i tačnosti
- svi parametri su uticajni za prag značajnosti $\alpha = 0,05$ a neuticajne interakcije faktora su obeležene zvezdicom u tabeli II

Tabela I

Red. br.	Faktori			Merene vrednosti			Model bez.medj.ut.			Model drugog reda		
	$\frac{V}{m \cdot \min}$	$\frac{S}{mm}$ o	δ mm	F_x N	F_y N	F_z N	F_x N	F_y N	F_z N	F_x N	F_y N	F_z N
1	139	0,178	1,00	170	180	170	163	165	162	163	168	158
2	220	0,178	1,00	190	220	200	194	189	182	182	191	199
3	139	0,280	1,00	190	190	190	210	226	203	191	208	198
4	220	0,280	1,00	220	240	200	224	260	227	210	245	199
5	139	0,178	2,25	410	400	200	448	403	243	420	381	213
6	220	0,178	2,25	500	480	260	478	463	272	435	426	265
7	139	0,280	2,25	680	600	310	575	553	304	628	612	331
8	220	0,280	2,25	600	620	290	614	635	340	612	646	331
9	177	0,223	1,50	320	340	220	317	325	236	329	329	247
10	177	0,223	1,50	340	320	240	317	325	236	329	329	247
11	177	0,223	1,50	310	330	250	317	325	236	329	329	247
12	177	0,223	1,50	360	340	250	317	325	236	329	329	247
13	110	0,223	1,50	290	320	230	296	281	210	245	316	222
14	279	0,223	1,50	320	380	300	339	372	263	280	419	279
15	177	0,142	1,50	260	220	200	247	237	189	223	204	191
16	177	0,351	1,50	380	410	300	407	446	295	367	382	295
17	177	0,223	6,70	180	170	150	116	133	158	139	134	128
18	177	0,223	3,37	700	600	320	907	792	352	1031	791	285
19	110	0,223	1,50	280	310	240	296	281	210	245	316	222
20	279	0,223	1,50	280	360	260	339	372	263	280	419	279
21	177	0,142	1,50	240	220	210	247	237	189	223	204	191
22	177	0,351	1,50	360	400	310	407	446	295	367	382	295
23	177	0,223	6,70	180	180	170	116	133	158	139	134	128
24	177	0,223	3,37	660	590	310	867	792	352	1031	791	285

Tabela II

		F_x	F_y	F_z
Model (1)	C	208,949	125,176	113,964
	P_1	0,1436	0,3005	0,2446
	P_2	0,5516	0,6976	0,4920
	P_3	1,2408	1,1006	0,4944
Model drugog reda	C	$1,5514 \cdot 10^{-10}$	$2,8497 \cdot 10^7$	$3,9365 \cdot 10^5$
	P_1	10,5537	-5,0403	-1,6579
	P_2	-0,2214	-0,5571	5,1023
	P_3	3,7371	3,6945	1,8301
	P_{11}	-1,0381	0,4880	0,0315 *
	P_{22}	-0,6769	-0,8052	-0,2048
	P_{33}	0,2157 *	-0,0149 *	-0,3943
	P_{12}	-0,2955	-0,2803	-1,0584
	P_{13}	-0,3246	-0,2943	-0,0244 *
	P_{23}	0,6636	0,7082	0,5937

- predložena metodologija za obradu i ocenu izmerenih vrednosti pokazala se vrlo pogodnom sa stanovišta ekonomičnosti i pouzdanosti rezultata.

LITERATURA

- [1] Box, G.E.P., Hunter, J.S.: Multifactor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces. Ann.math.Stat. 28, 195, 1957.
- [2] Dammer, L.: Ein Beitrag zur Prozessanalyse und Schnittwertvorgabe beim Messerkopfstirnfräsen, Dissertacion, LTF Aachen, 1982.
- [3] Kovač, P., Sekulić, S.: Sistemski prilaz primeni višefaktornog plana eksperimenta na kvalitet obradjene površine pri završnoj obradi na strugu, Zbornik radova ICPR-81, Novi Sad
- [4] Taraman, K., Lambert, B.: A Surface Roughness Model for Turning Operation, Int.J.Prod.Res., Vol.12, No.6, 1974.
- [5] Victor, H.: Computer-aid Measurement of Cutting Forces Applaid to the Wear of an End Milling Cutter, Wear 62, 185-195, 1980.