

MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA POSTOJANOSTI ALATA UZDUŽNOG STRUGANJA

Mehmed Mahmić, Midheta Arnautović
Tehnički fakultet Bihać, ul. Dr. Irfana Ljubijankića bb, Bihać
e-mail: tfb@bih.net.ba

Ključne riječi: postojanost, modeliranje, tokarski nož, optimizacija, režimi obrade.

SAŽETAK:

U toku procesa obrade odvajanjem strugotine rezni alat se zbog opterećenja kojima je izložen troši. Da bi se postigla produktivnost procesa potrebno je definirati vrijeme postojanosti alata, tačnije, tokarskog noža. Postojanost alata je tehnološko vrijeme rezanja između dva oštrenja alata ili zamjene alata i zavisi od elemenata režima obrade. Osim toga, na postojanost utječe i vrsta materijala tokarskog noža. Pri konstantnim uvjetima obrade i optimalnoj geometriji osnovni parametri procesa obrade koji utječu na postojanost su korak, brzina i dubina rezanja. Određivanjem optimalnih vrijednosti navedenih parametara definirane su optimalne vrijednosti postojanosti reznog alata.. Modeliranjem i optimizacijom postojanosti alata dobivena su pouzdana rješenja potrebna za primjenu u neposrednoj proizvodnji i iz tog razloga navedeni procesi predstavljaju značajan predušlov za uspješnu proizvodnju i postizanje cjelokupne kvalitete proizvoda.

1. UVOD

Projektovanje procesa obrade odvajanjem strugotine kojim će se postići kvalitet i povoljna cijena proizvoda, kao i profitabilna proizvodnja, podrazumijeva definiranje optimalnog procesa obrade odvajanjem strugotine. Pri tome je potrebno krenuti od optimizacije osnovnih elemenata procesa, u ovom slučaju elemenata režima obrade. Međusobni položaj alata i obratka u toku procesa obrade određen je elementima režima obrade. Pri određivanju ovih elemenata se javljaju brojne poteškoće, kao što su nestandardizovanost dokumentacije, korištenje starijih podataka iz literature i kada su alati izrađeni od novih, poboljšanih materijala. Iz tog razloga najpouzdaniji podaci o zavisnosti postojanosti alata o elementima režima obrade se mogu dobiti matematičkim modeliranjem i optimizacijom postojanosti alata uzdužnog struganja. Optimizacija procesa odvajanjem strugotine postiže se kada je poznata jednačina postojanosti alata, koja se koristi i prilikom programiranja obradnog sistema. Matematičkim modeliranjem, primjenom eksperimentalnih vrijednosti postojanosti alata i optimizacijom procesa mogu se definirati optimalne vrijednosti postojanosti alata bez TiN prevlake i sa TiN prevlakom, čije poznavanje je neophodno za uspješan rad obradnog sistema.

2. MODELIRANJE PROCESA

Za određivanje postojanosti alata treba odrediti trenutak kada nastupa zatupljenost oštrice alata. Zavisnost postojanosti alata o parametrima procesa može se prikazati u obliku:

$$T_a = f(v, s, a) \quad (1)$$

Postojanost alata za uzdužno struganje je modelirana u zavisnosti od brzine rezanja - v (m/min), posmaka alata - s (mm/o) i dubine rezanja - a (mm).

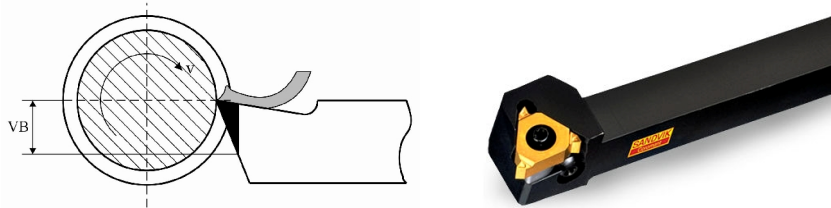
Identifikacija parametara procesa i sistema izvodi se na temelju poznatih teorijskih podataka o procesu obrade na tokarilici. Identifikacija parametara se može izvesti eksperimentalnim putem kada se iz ukupnog skupa identificiranih parametara izabere jedan broj koji se definira kao nezavisno promjenjiva veličina, a ostali se parametri, iako mogu biti nezavisno promjenjive veličine u postupku modeliranja, tretiraju kao konstante. Prema tome, ulazne varijable procesa tokarenja su:

- Brzina rezanja $v_{\min} = 77,6$ m/min; $v_{\max} = 168,4$ m/min,
- Posmak alata $s_{\min} = 0,06$ mm/o; $s_{\max} = 0,49$ mm/o,
- Dubina rezanja $a_{\min} = 0,18$ mm; $a_{\max} = 5,2$ mm.

Konstante procesa su:

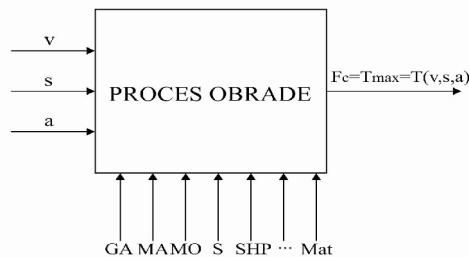
- Geometrija alata,
- Materijal alata,
- Mašina,
- Sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

Uvjete eksperimenta određuju materijal obratka Č.1530, dva alata od kojih je jedan sa izmjenjivom pločicom od tvrdog metala, tokarski nož sa TiN prevlakom TNMA160412P15 (Sandvik Coromant) i drugi tokarski nož bez TiN prevlake SV – 25. Obrada se izvodi na numeričkoj tokarilici TG – 125 CNC, proizvođač Prvomajska.



Slika 1: a) Istrošenost oštrice alata kod tokarenja b) Tokarski nož Sandvik Coromant

Blok shema prikazuje ulazno-izlazne parametre procesa obrade sa skidanjem strugotine, gdje je manji broj nezavisno promjenljivih ulaznih veličina od broja konstantnih veličina procesa.



Slika 2: Shema modeliranja postojanosti alata, GA-geometrija alata, MA-materijal alata, MO-materijal obratka, SHP-sredstvo za hlađenje i podmazivanje, S-stroj

Tabela 1: Fizikalne i kodirane vrijednosti ulaznih veličina

Utjecajne veličine		Vrijednosti ulaznih veličina				
Fizikalne veličine	$x_1=v$ m/min	77,6	96	123	150	168,4
	$x_2=s$ mm/o	0,06	0,145	0,27	0,4	0,49
	$x_3=a$ mm	0,18	1,2	2,7	4,2	5,2
Kodirane veličine	X_i	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$

Obradni procesi spadaju u višefaktorne procese kod kojih treba pronaći model koji adekvatno opisuje stanje procesa obrade. Matematičkim modelom i primjenom centralnog kompozicijskog rotabilnog plana treba modelirati postojanost alata uzdužnog struganja. Ukupan broj pokusa iznosi:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 8+6+6 = 20 \quad (2)$$

Tabela 2: Matrica kodiranih varijabli i rezultata eksperimenta za tokarski nož bez TiN prevlake i tokarski nož sa TiN prevlakom

Broj pokusa	Kodirane varijable procesa											Postojanost alata [min]	
	T_i^E	T_{in}^E											
N	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$T_j = Y_j$	$T_{in} = Y_j$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	45,6	106,3
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	28,0	59,5
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	34,7	83,1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	15,1	42,3
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	40,9	96,9
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	23,5	55,2
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	27,4	62,1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9,9	31,5
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9	59,2
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,5	60,8
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,2	57,0
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,5	59,5
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,0	60,0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,0	63,3
15	1	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	α^2	0	0	39,8	93,0
16	1	α	0	0	0	0	0	0	α^2	0	0	20,0	45,0
17	1	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	α^2	0	30,5	75,0
18	1	0	α	0	0	0	0	0	0	α^2	0	25,0	60,1
19	1	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	0	α^2	34,8	82,7
20	1	0	0	α	0	0	0	0	0	0	α^2	18,0	44,2

Postojanost alata uzdužnog struganja modelirana je polinomom drugog reda:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3)$$

Homogenost eksperimentalnih rezultata po Cochranovu kriteriju, za određeni nivo pouzdanosti, pokazuje da je disperzija homogena. Tako za tokarski nož bez TiN prevlake (u daljem tekstu **I**) kriterij homogenosti zadovoljava, kao i za tokarski nož sa TiN prevlakom (u daljem tekstu **II**).

I. Kriterij homogenosti eksperimentalnih rezultata (bez TiN prevlake):

$$K_h = 0,4875 < K_{t(f_0, n_0)} = K_{t(5, 6)} = 0,520 \quad \text{za} \quad \alpha = 0,01 \quad (4)$$

f_0 – stepen slobode u centralnoj tački plana $f_0 = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$,
 n_0 – broj tačaka ponavljanja u centru plana $n_0 = 6$.

II. Kriterij homogenosti eksperimentalnih rezultata (sa TiN prevlakom):

$$K_h = 0,519 < K_{t(f, n_0)} = K_{t(5, 6)} = 0,520 \quad \text{za } \alpha = 0,01 \quad (5)$$

Nakon određivanja koeficijenata modela dobiven je kodirani matematički oblik modela.

I.
$$Y = 26,7698 - 7,715X_1 - 4,4029X_2 - 3,6565X_3 - 0,2625X_1X_2 + 0,2875X_1X_3 - 0,4125X_2X_3 + 0,97188X_1^2 + 0,2163X_2^2 - 0,2597X_3^2 \quad (6)$$

II.
$$Y = 60,17548 - 17,6145X_1 - 9,0742X_2 - 8,0708X_3 + 2,1375X_1X_2 + 1,9125X_1X_3 - 2,2625X_2X_3 + 2,7916X_1^2 + 2,2815X_2^2 + 0,839X_3^2 \quad (7)$$

Provjera signifikantnosti koeficijenata izvedena je prema t – kriteriju Studenta.

I. Kodirani matematički model ima slijedeći oblik:

$$Y = 26,7698 - 7,715X_1 - 4,4029 X_2 - 3,6565 X_3 + 0,97188 X_1^2 \quad (8)$$

Koeficijent višestruke regresije $R=0,9542$, odnosno 95,42% varijabiliteta se pripisuje djelovanju varijabli X_i .

Tabela 3: Pregled eksperimentalnih rezultata i izračunatih vrijednosti postojanosti alata prema matematičkom modelu

Redni broj pokusa N_i		Varijable			Numerički rezultati postojanosti alata	
		v(m/min)	s(mm/ob)	a(mm)	Eksp. $Y_i=T_i$	Rač. $Y_{JR}=T_{iR}$
1	Skup tačaka plana prvog reda 2^k	96	0,145	1,2	45,6	43,5
2		150	0,145	1,2	28,0	28,08
3		96	0,4	1,2	34,7	34,71
4		150	0,4	1,2	15,1	19,2
5		96	0,145	4,2	40,9	36,2
6		150	0,145	4,2	23,5	20,7
7		96	0,4	4,2	27,4	27,39
8		150	0,4	4,2	9,9	11,9
9	Skup središnjih tačaka plana $n_0=2^k$	123	0,27	2,7	26,9	26,77
10		123	0,27	2,7	26,5	26,77
11		123	0,27	2,7	27,2	26,77
12		123	0,27	2,7	26,5	26,77
13		123	0,27	2,7	26,0	26,77
14		123	0,27	2,7	27,0	26,77
15		Skup tačaka na središnji m osama $n_\alpha=2k$	77,6	0,27	2,7	39,8
16	168,4		0,27	2,7	20,0	16,54
17	123		0,06	2,7	30,5	34,17
18	123		0,49	2,7	25,0	19,37
19	123		0,27	0,18	34,8	32,92
20	123		0,27	5,2	18,0	20,6

Za izbor analitičkog modela potrebno je definirati jednačine stanja procesa ili sistema sa primjenom potrebnih pojednostavljenja, u cilju dobijanja odgovarajućeg modela za inženjersku primjenu. Unošenjem kodiranih veličina dobija se matematički model postojanosti alata u fizikalnim veličinama.

$$X_1 = (v-123) / 27 \quad X_2 = (s-0,27) / 0,13 \quad X_3 = (a-2,7) / 1,5$$

$$T = 98,36 - 0,6127v + 33,8685s - 2,4377a + 0,00133v^2 \quad (9)$$

II. Kodirani matematički model ima slijedeći oblik:

$$Y=60,17548-17,6145X_1-9,0742X_2-8,0708X_3+2,1375X_1X_2+2,7916X_1^2+2,2815X_2^2 \quad (10)$$

Koeficijent višestruke regresije $R=0,97$ pokazuje dobru uzajamnu zavisnost promjenjivih X_i i $Y_j=F_j$, a model adekvatno opisuje postojanost alata. 97% varijabiliteta se pripisuje djelovanju varijabli X_i . Matematički model postojanosti alata u fizikalnim veličinama.

$$Y = T = 261,792-0,124v-217,6s-5,38a+0,609vs+0,003829v^2+135s^2 \quad (11)$$

3. OPTIMIZACIJA PROCESA

Režimi obrade rezanjem određuju međusobni položaj alata i obratka u toku procesa obrade. Određuju se za svaku operaciju, pa se tako za jednu operaciju ili za jedan zahvat mogu primijeniti dvije ili više različitih kombinacija režima obrade. Optimalne vrijednosti režima obrade mogu se odrediti na osnovu iskustva tehnologa, preporuka proizvođača alata ili primjenom metoda optimizacije. Metode optimizacije su najpouzdanije, jer se može postići da u toku procesa obrade ne dođe do loma alata, nepredviđenih zastoja ili nekvalitetne obrade, a podrazumijevaju određivanje postojanosti alata pri kojoj se može postići maksimalni tehno-ekonomski učinak. Optimizacija matematičkog modela se izvodi tako da funkcija cilja $Ta = f(v, s, a)$ dobiva maksimalnu vrijednost kada je postojanost alata maksimalna, a izvedena je pomoću klasične matematičke analize. Optimalne vrijednosti režima obrade tokarskog noža bez TiN prevlake se dobiju diferenciranjem matematičkog modela ($i = 1, 2, 3$).

I. Optimalne vrijednosti režima obrade su određene na osnovu poznatih jednačina:

$$v = v_{opt} = 163,80 \text{ m/min}, \quad s = s_{opt} = 1,50 \text{ mm/obrt.}, \quad a = a_{opt} = 5,80 \text{ mm}$$

Za optimalne vrijednosti elemenata režima obrade dobije se postojanost alata:

$$T=98,36-0,6127v+33,8685s-2,4377a+0,00133v^2 \quad (12)$$

$$T = T_{opt} = 69,54 \text{ min.}$$

Matematički modeli postojanosti alata određeni jednom kodiranom i jednom fizikalnom veličinom:

$$\begin{aligned} T_{X1} &= 137,54-3,36125X_1+0,97188X_1^2 & T_v &= 173,0232-0,453v-0,001333v^2 \\ T_{X2} &= 9,5-5,65865X_2+0,2163X_2^2 & T_s &= 22,186-50,5035s+12,799s^2 \\ T_{X3} &= 42,1743-2,24225X_3+0,25 & T_a &= 37,297+2,11796a-0,1154a^2 \end{aligned} \quad (13)$$

II. Optimalne vrijednosti režima obrade su određene na osnovu poznatih jednačina:

$$v = v_{opt} = 144,36 \text{ m/min}, \quad s = s_{opt} = 0,69 \text{ mm/obrt.}, \quad a = a_{opt} = 7,5 \text{ mm}$$

Za optimalne vrijednosti elemenata režima obrade dobije se postojanost alata:

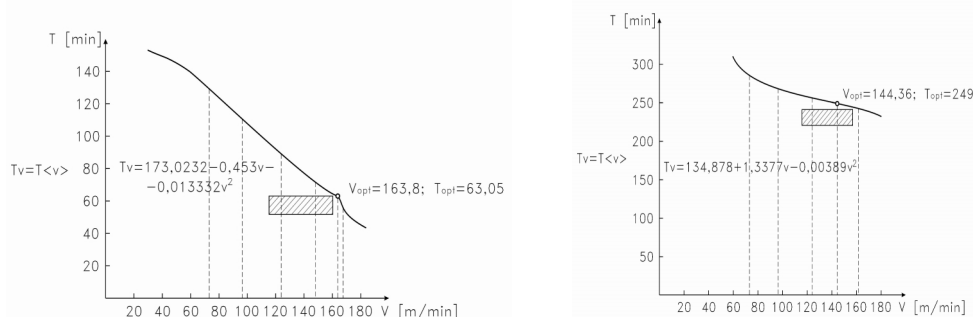
$$Y = T = 261,792-0,124v-217,6s-5,38a+0,609vs+0,003829v^2+135s^2 \quad (14)$$

$$T = T_{opt} = 258,09 \text{ min.}$$

Matematički modeli postojanosti alata određeni jednom kodiranom i jednom fizikalnom veličinom:

$$\begin{aligned} T_{X1} &= 28,2698-10,6858X_1+2,7916X_1^2 & T_v &= 134,878-1,3377v-0,003829v^2 \\ T_{X2} &= 35,5-14,8X_2+2,2815X_2^2 & T_s &= 85,9-186,75s+135s^2 \\ T_{X3} &= 48,027-13,89X_3+0,839X_3^2 & T_a &= 75,747-11,274a+0,3729a^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Dobiveni rezultati pokazuju da je matematički model postojanosti alata adekvatan za optimizaciju elemenata režima obrade. Krivulje optimizacije brzine rezanja prikazane su na slijedećoj slici.



Slika 3:Krivulja optimizacije brzine rezanja:a)Tokarski nož SV-25,b)Tokarski nož TNMA160412P15

Rezultati dobiveni eksperimentalnim i računskim putem daju nam podatke koji se mogu primjeniti u praktičnom radu sa ciljem postizanja ekonomičnosti, produktivnosti rada i kvaliteta proizvoda. Matematičkim modeliranjem i korištenjem eksperimentalnih vrijednosti postojanosti alata određeni su računski pokazatelji, a optimizacijom procesa određena je optimalna vrijednost postojanosti alata za uzdužno struganje bez TiN prevlake i alata za uzdužno struganje sa TiN prevlakom.

4. ZAKLJUČAK

Modeliranje i optimizacija procesa obrade rezanjem strugotine izvodi se zbog postizanja produktivnosti, ekonomičnosti i kvaliteta cjelokupnog procesa ili njegovih pojedinih dijelova. U proizvodnom mašinstvu veoma mnogo su zastupljene obrade rezanjem strugotine, pa tako i obrada na tokarilici. Optimizacija postojanosti alata kod ove obrade doprinosi efikasnijem odvijanju procesa, manjem vremenu obrade, smanjenju troškova. Postojanost alata zavisi od elemenata režima obrade, a to su brzina rezanja, posmak i dubina rezanja, kao i od materijala alata i obratka, geometrije alata, sredstva za hlađenje i podmazivanje, mašine. Režimi obrade utječu na postojanost alata i to u najvećoj mjeri brzina rezanja, zatim posmak obrade, dok dubina rezanja ima najmanji utjecaj. Različiti utjecaji elemenata režima obrade dešavaju se zbog okolnosti u kojima se odvija proces obrade, naprimjer toplota alata i obratka značajno utječe na postojanost alata. Dobiveni podaci ukazali su na veću postojanost alata sa izmjenjivom pločicom od tvrdog metala, dakle tokarskog noža sa TiN prevlakom *TNMA160412P15* u odnosu na drugi tokarski nož bez TiN prevlake *SV – 25*. Savremeni brzorezni čelici sa prevlakama Titan Nitrida (TiN) povećavaju postojanost alata i do nekoliko puta. Takve rezultate pokazuje matematičko modeliranje i optimizacija postojanosti alata uzdužnog struganja. Tako je optimalna postojanost alata sa TiN prevlakom 258,08 minuta, a optimalna postojanost alata bez TiN prevlake 69,54 minuta. Tvrdi metal kao materijal za rezu pločicu tokarskog noža ima visoku postojanost, te se može postići brzina rezanja dva do tri puta veća nego kod alata od brzoreznog čelika. Iako imaju veću cijenu u odnosu na alate bez TiN prevlake njihova upotreba obezbjeđuje efikasan rad, što na kraju rezultira postizanjem ekonomskih ciljeva proizvodnje.

5. LITERATURA

- [1] Jurković M.: *Matematičko modeliranje inženjerskih procesa*, Mašinski fakultet Bihać, 1999.
- [2] Jurković M., Tufekčić Dž.: *Tehnološki procesi-projektiranje i modeliranje*, Mašinski fakultet Tuzla, 2000.
- [3] Jurković M.: *Reinženjering proizvodnih poduzeća*, Univerzitet u Bihaću, Grafičar Bihać, 2011.
- [4] Cukor G.: *Proračuni u obradi skidanjem strugotine*, Tehnički fakultet Rijeka, 2006.
- [5] Hriješik A., Jurković M.: *Primjena matematičkih modela višefaktornog eksperimenta u obradi odvajanjem čestica*, Zbornik radova Svibor, Zagreb, 1994.