Modeli dinamičkog procesa formiranja strugotine

OBRAD D. ANIČIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

SRĐAN V. JOVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

ALEKSANDAR D. MITKIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

Pregledni rad

UDC: 621.9.013.3

DOI: 10.5937/tehnika1703367A

U ovom radu su analizirani modeli dinamičkog procesa formiranja strugotine. Oscilovanje elemenata obradog sistema u principu je uslovljena dinamičkim karakterom procesa formiranja strugotine. Potrebno je da neka frekvencija sopstvenog oscilovanja elemenata sistema alat – obradak – pribor – mašina bude približno jednaka frekvenciji formiranja segmenata strugotine da bi došlo do pojave samopobudnih oscilacija (Landberg). Istraživanjima je utvrđeno da na proces formiranja strugotine ne utiču karakteristike krutosti mašine (Ferrarezzi). Danas se u svetskoj literaturi susreće veliki broj analitičkih i mehanističkih modela, koji sa većom ili manjom tačnošću realno opisuju realni proces formiranja strugotine. Zadnjih godina, sa pojavom moćnih računara i aplikativnih programa baziranih na metodi konačnih elemenata (MKE) modeliranje dinamičkog procesa formiranja strugotine, kao i drugih procesa koji se odvijaju u zoni rezanja, se vrše numeričkim metodama.

Ključne reči: model, simulacija, proces, dinamički proces

1. UVOD

Proizvodno okruženje 21. veka zahteva neprestani razvoj automatizovanih alatnih mašina koje isključuju čoveka iz procesa proizvodnje. Automatizovana obrada je jedan od osnovnih preduslova za dalji napredak i razvoj metaloprađivačke industrije. Zadnjih decenija ovakav način obrade doživio je procvat iz dva osnovna razloga: nastanak i razvoj sofisticiranih mehanizama, te razvoj elektronike i računara. Razvoj adaptivnog upravljanja je, pored čitavog niza prednosti, umanjilo troškove izrade delova složenih oblika i doprinelo povećanju produktivnosti obrade.

Dinamičke interakcije između alate i obradnog materijala i između obradnog materijala i mašinske konstrukcije mogu značajno uticati na kvalitet završnih delova [1]. Obrada materijala skidanjem strugotine je zahtevan posao zbog različitih nepredvidivih faktora. Formiranje strugotine kod mnogih materijala je još uvek nepoznat proces [2]. Analiza dinamičkog procesa formiranja zupčaste strugotine materijala Ti6Al4V je

izvršena u radu [3] gde je cilj bio da se ustanovi veza između kontaktnih površina alata i strugotine i dužine zubaca.

2. ANALITIČKI MODELI DINAMIČKOG PROCESA FORMIRANJA STRUGOTINE

Analitički i mehanistički modeli dinamičkog formiranja strugotine se baziraju na opisu promene ugla smicanja strugotine u toku obrade i opisu uticaja pomenute obrade na druge parametre obrade. Razvijeni analitički modeli se zasnivaju na teoriji rezanja i eksperimentalnim istraživanjima koje rezultuju empirijskim izrazima. Veliki broj istraživanja se bazira na modeliranju promene sile rezanja u zavisnosti od promene ugla smicanja strugotine, promene debljine strugotine, promene neravnina nastalih prethodnom obradom i slično [4].

Mogu se primetiti dva pravca u izučavanju dinamičkog efekta formiranja strugotine i to: izučavanje uticaja i promene visine strugotine, te izučavanju regenerativnog efekta pri rezanju. Tobias i Fishwick [5] su prvi došli do izraza za dinamičku silu rezanja u zavisnosti od promene debljine strugotine i brzine rezanja. Kainth je postavio model pri čemu je silu rezanja iskazao u zavisnosti od debljine strugotine i promene grudnog ugla. Primenjujući dimenzionu analizu

Adresa autora: Obrad Aničić, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7, e-mail: anicic@gmail.com

Rad primljen: 15.04.2016.

Rad prihvaćen 27.03.2017.

ugala [13] (slika 3 i slika 4), koje zavise od vrednosti promena parametara rezanja: dubine rezanja, grudnog ugla alata i ugao smicanja strugotine.

Koristeći Merčantov model [14] za vrednost silu u pravcu x ose formira se model koji opisuje promene vrednosti sile u zavisnosti od promene parametara.

Slika 2 - Promena sile rezanja u toku vremena

Slika 3 - Geometrija zone nastanka strugotine

Promene u zoni rezanja se mogu opisati relativnom promenom visine u pravcu x ose (x) i karakterističnim uglom (ξ) koji zavisi od brzine rezanja i promene visine neravnina u vremenu (slika 3):

$$\xi = \arctg\left(\frac{-\dot{x}}{v}\right) \quad (7)$$

Prema Nigm-u i Sadek-u, koji su karakteristični ugao ξ opisali korišćenjem polinoma trećeg stepena,

uticaj relativne promene visine u pravcu x ose na grudni ugao (oznaka α – primedba) može se izraziti kao:

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{\dot{x}}{v} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^3 \quad (8)$$

dok se trenutna vrednost ugla smicanja strugotine može iskazati kao:

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\dot{x}}{v} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^3 \quad (9)$$

Koristeći se Merčantovom formulom za vrednost sile F_x , koja je direktno proporcionalna dubini rezanja, širini rezanja i smičućem naponu u ravni smicanja, promenjivu vrednost sile se može opisati kao linearna kombinacija parametara:

$$F_x = F_{x0} - A_1 x - (B_1 + C_1) \frac{\dot{x}}{v} + \frac{E_1 + G_1 + J_1}{2} \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{B_1 + C_1}{3} - \frac{L_1 + M_1}{6} - \frac{Q_1 + S_1}{2}\right) \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^3 + (H_1 + I_1) \frac{\ddot{x}}{v} - \left(\frac{P_1 + R_1}{2} + T_1\right) x \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^2 - \frac{H_1 + I_1}{3} x \left(\frac{\dot{x}}{v}\right)^3, \quad (10)$$

u kojoj egzistiraju koeficijenti od A_1 do T_1 , a koji zavise od geometrijskih parametara obrade, tehnoloških uslova obrade i promenljivog ugla smicanja strugotine.

Slika 4 - Promena sile rezanja za različite kombinacije ulaznih parametara

Byrne i Cotterell [15] su ispitivanja vršili na teško-obradivoj titanijumskoj leguri, na povišenim brzinama rezanja, gde se javljaju velike vrednosti ugla smicanja. Istraživanja su usmerili u pravcu proučavanja energetske pojave u zoni nastanka strugotine, a njihov model se zasniva na uslovu paralelnosti granice zone smicanja [7, 11].

Primitili su da numeričke simulacije, prilikom modeliranja dinamičkog procesa formiranja strugotine, daju kontinualnu strugotinu, što u realnosti nije slučaj. Vođeni ovom činjenicom, razvijaju model koji razmatra različite faze deformacije strugotine, što će kasnije biti iskorišćeno u radovima Ozela i drugih.

Proces nastanka strugotine su posmatrali kroz dve faze: plastično deformisanje i pojava segmentiranja strugotine na grudnoj površini alata kao što je prikazano na slici 5.

Slika 5 - Model segmentisanja strugotine

Druga faza se može opisati preko geometrijskih parametara prikazanih na slici 6, a koje je moguće meriti preko mikrografskih snimaka.

Za svaku od fazu se definiše odgovarajući ugao smicanja: inicijalni (homogeni) ugao smicanja (Φ) i ugao smicanja segmenata strugotine (Φ_{seg}), koji se još naziva i ugao katastrofalnog smicanja. Inicijalni ugao smicanja u toku obrade poprima vrednost od minimalne do maksimalne koji je jednak uglu katastrofalnog smicanja.

Ukupna deformacija se definiše kao zbir inicijalne deformacije pri smicanju u ravni smicanja i deformacije prilikom klizanja koje se javlja između segmenata:

$$\gamma_{sb} = \gamma_{seg} + \gamma_c = \gamma_{seg} + \frac{P_{sb}}{\delta_{sb}} \quad (11)$$

Smicanje segmenata strugotine na grudnoj površini alata se može opisati preko ugla vrha segmenata koji su formirani na grudnoj površini alata.

U realnim uslovima ugao smicanja segmenata strugotine nije konstantna vrednost, pa su Byrne i Cottarell kao izraz za vrednost napona smicanja između segmenata uzeli izraz:

$$\gamma_{seg} = \frac{1}{\zeta \cdot \sin \phi_{seg}} \cdot \sqrt{\zeta^2 - \frac{2 \cdot \zeta}{\sin(\phi_{seg} + \rho_{seg})} + \frac{1}{\sin^2(\phi_{seg} + \rho_{seg})}} \quad (12)$$

gde je ζ stepen sabijanja strugotine, čime su upotpunili izraz za opis ukupnog deformisanja strugotine.

Predstavljenim modelom se mogu produbiti druga istraživanja u oblasti dinamičkog procesa formiranja strugotine, jer proces segmentiranja strugotine opisuju sa nekoliko novih parametara podeljenih po fazama formiranja i segmentiranja strugotine.

Tokom izrade studije istraživali su uticaj tehnoloških parametara na parametre kojima su opisali dinamički proces segmentacije strugotine, te su dobili značajnije rezultate u pogledu sila rezanja, specifičnog pritiska rezanja i drugih bitnih veličina.

Slika 6 - Vrednosti uglova smicanja i segmentisanja (levo) i stepena deformacije (desno)

Slika 7 - Dinamički model formiranja segmenata strugotine po Albreht-u [4]

Albrecht [16] je postavio model formiranja segmenata strugotine (slika 7), vršeći eksperimente sa kame-rom koja ima mogućnost snimanja velikog broja snimaka u sekundi. Modelom je utvrdio frekvenciju i amplitudu cikličnog formiranja strugotine.

Sledi kretanje reznog klina, materijal se u zoni smicanja neposredno iznad vrha reznog klina, pomera brzinom koja je jednaka brzini rezanja. Na drugom kraju odnosno na gornjoj granici zone deformisanja, zbog dinamičkog karaktera formiranja strugotine, materijal se kreće nekom drugom brzinom (v_0). Pri tome se zona smicanja ograničava uglovima Φ_1 i Φ_2 . U vremenu T , slobodni kraj ravni smicanja se relativno pomera za dužinu l pri brzini $(v - v_0)$:

$$l = T \cdot (v - v_0)$$

odnosno

$$l = \delta \cdot (ctg \phi_1 - ctg \phi_2) \quad (13)$$

Na osnovu čega se dobije frekvencija obrazovanja strugotine:

$$f_{st} = \frac{1}{T} = \frac{v - v_0}{\delta} \cdot \frac{1}{ctg \phi_1 - ctg \phi_2} \quad (14)$$

Amplituda oscilovanja debljine strugotine može se odrediti analizom slike 9., a predstavlja se izrazom:

$$\delta_A = \delta_{\max} - \delta_{\min} = \delta \cdot \cos \gamma \cdot (ctg \phi_1 - ctg \phi_2) \quad (15)$$

Kombinacijom matematičkih modela može se efikasnije modelirati proces nastanka strugotine kao i dinamički karakter tog procesa.

Proces nastanka strugotine prvenstveno treba posmatrati kao proces sabijanja materijala ispred reznog klina i proces smicanja materijala ispred vrha reznog klina i na kraju kao proces smicanja materijala u ravni smicanja.

Proces deformisanja i sabijanja materijala prvenstveno je određen promenljivim naponima na pritisak i smicanje koji zavise od puta reznog klina alata (x).

Dejstvo procesa formiranja strugotine na alat se može predstaviti sa vrednostima odgovarajućih sila u zoni rezanja, i to: sile deformisanja na pritisak (F_p, F_1), smičuće sile u ravni rezanja (F_r, F_2) i sile smicanja u ravni klizanja (F_s, F_3), koje zavise od zatezne čvrstoće materijala (R_m), čvrstoće materijala na smicanje (τ_s), širine rezanja (b) i dubine rezanja (δ) (slika 8):

$$F_p = R_m \cdot b \cdot x \cdot tg \phi \cdot \frac{\cos \phi \cdot \cos \gamma}{\cos(\gamma - \phi)}$$

$$F_r = \tau_s \cdot b \cdot x \quad F_s = \tau_s \cdot \frac{\delta \cdot b}{\sin \phi} \cdot \cos \gamma \quad (16)$$

Smicanje materijala u ravni klizanja nastaje kada zbir sila F_p i F_r dostigne vrednost sile F_s u pravcu dejstva sila:

$$F_p + F_r = F_s \cdot \cos \phi \quad (17)$$

Za to vreme vrh klina alata pređe put $x = x_{\max}$ na osnovu čega se dolazi do vrednosti puta:

$$x_{\max} = \frac{\delta \cos \gamma}{tg \phi \left[1 + \frac{R_m}{\tau_s} \cdot tg \phi \cdot \frac{\cos \gamma \cos \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \right]} \quad (18)$$

Slika 8 - Dinamički model formiranja segmenata strugotine [4]

Dinamički proces rezanja je direktno posledica dinamičkog karaktera nastanka strugotine. Dinamički karakter nastanka strugotine zavisi od uslova obrade odnosno tehnoloških i geometrijskih parametara obrade. Modelom dinamičkog procesa formiranja strugotine uglavnom se definišu amplitude oscilovanja sa odgovarajućim frekvencijama.

Dejstvo dinamičkog procesa strugotine na alat može se predstaviti modeliranjem sile rezanja u pravcu brzine u funkciji puta. Pri tome se uvode poznate relacije $x = v \cdot t$ odnosno $T_0 = x_{\max} / v$:

$$F_1 = A \cdot b \cdot v \cdot (t - k \cdot T_0) + B \cdot b \cdot \delta \left| \frac{(k+1) \cdot T_0}{k \cdot T_0} \right|$$

za

$$k = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

gde su koeficijenti A i B konstante za određene kombinacije uslova obrade, a koji iznose:

$$A = R_m \cdot \tan \phi \cdot \frac{\cos \phi \cdot \cos \gamma}{\cos(\gamma - \phi)} + \tau_s$$

odnosno

$$B = \tau_s \cdot \frac{\cos \gamma \cdot \cos \phi}{\sin \phi} \quad (20)$$

Analizom izraza za vrednost sile F_1 , koji predstavlja periodičnu funkciju, zaključuje se da model ne odgovara realnom sistemu, jer u toku vremena nije moguća trenutna promena vrednosti sile (slika 9). Da bi se model približio realnom sistemu, periodična funkcija se zamenjuje sinusnom sa istim periodom oscilovanja (T_0) i istom frekvencijom (f_{st}), pa kružna frekvencija ima vrednost $\Omega_{st} = 2\pi f_{st} = 2\pi v/x_{max}$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot b \cdot v \cdot T_0 \cdot \sin(\Omega_{st} \cdot t + \theta) + B \cdot b \cdot \delta + A_{F_1} \quad (21)$$

Slika 9 - Simulacija sila rezanja [4]

3. ZAKLJUČAK

Modeliranje procesa formiranja strugotine numeričkim metodama uglavnom se zasniva na metodi konačnih elemenata (MKE). Mali deo radova iz oblasti numeričkog modeliranja pomenutog procesa se odnose na primenu veštačke inteligencije (veštačke neuronske mreže, genetski algoritmi i sl.). Što se tiče modeliranja zasnovanog na MKE, u literaturi se može primetiti nekoliko pravaca istraživanja koji se odvijaju u cilju dobijanja što realnijih rezultata simulacije. Prvi pravac je istraživanje procesa formiranja mreže konačnih elemenata (Langranžova ili Ojlerova tehnika, ALE tehnika). U okviru ovog pravca istražuju se i procesi vezani za promenu strukture mreže u toku vremena, pri čemu se modelira proces razdvajanja mreže, proces pomeranja čvornih tačaka usled delovanja alata, kao proces optimizacije mreže konačnih elemenata. Drugi pravac modeliranja zasnovanog na MKE odnosi se na proces

modeliranja toplotnih pojava u zoni deformacije, modeliranje ponašanja materijala te modeliranje triboloških pojava u zoni nastanka strugotine. Veliki broj radova iz oblasti numeričkog modeliranja procesa formiranja strugotine odnosi se na kombinovanje modela kojim se opisuju procesi.

Buduća istraživanja će se u velikoj meri, sasvim sigurno, zasnivati na korišćenju metode konačnih elemenata. Istraživanje će se odvijati u pravcu realnijeg opisa procesa ponašanja materijala, preciznijem opisu toplotnih, triboloških i drugih pojava u zoni nastanka strugotine. Razvoj moćnih računarskih sistema i aplikativnih softvera će biti dobra osnova za navedene pretpostavke.

LITERATURA

- [1] Kumar K. S, Paulraj G. Analysis and optimization of fixture under dynamic machining condition with chip removal effect. *Journal of Intelligent Manufacturing*; 25(1):85-98, Feb 1. 2014.
- [2] Denkena B, Stiffel JH, Hasselberg E, Nesper D. Chip formation and modeling of dynamic force behavior in machining polycrystalline iron-aluminum. *Production Engineering*; 8(3):273-82, Jun 1. 2014.
- [3] Li PN, Qiu X. Y, Tang S. W, Tang L. Y. Study on dynamic characteristics of serrated chip formation for orthogonal turning Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 86(9-12):3289-96, Oct 1. 2016.
- [4] Nedić B „Dinamika procesa rezanja“, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2006.
- [5] Tobias S. A, Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The engineer*; 205(7):199-203, Feb 1958.
- [6] Nigm M. M, Sadek M. M, Tobias S. A. Prediction of dynamic cutting coefficients from steady-state cutting data. In *Proceedings of the Thirteenth International Machine Tool Design and Research Conference* (pp. 3-12). Macmillan Education UK, 1973.
- [7] Lin JS, Weng C. I. A nonlinear dynamic model of cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*; 30(1):53-64, Jan 1. 1990.
- [8] Globočki G. L. „Obrada rezanjem - teorija, modeliranje i simulacija“, Mašinski fakultet Banja Luka, BiH, 2010.
- [9] Lazić M, Nedić B. „Obrada metala rezanjem“, Mašinski fakultet Kragujevac, Srbija, 2007.
- [10] Astakhov V. P. Tribology of metal cutting. *Mechanical Tribology*, New York: Marcel Dekker. 22:307-46, Apr. 2004.
- [11] Oxley PL. *Mechanics of Machining, An Analytical Approach to Assessing Machinability*, 1989.

- [12]Kusnezov V. D, Physik des Zerspanens und Reibung der Metalle und Kristalle. Wissenschaft, Moskau, 310 S, 1977.
- [13]Zorev NN, Granovskiy GI, Larin MN, A Development of cutting metal science. Moscow, Machinery, 1967.
- [14]Merchant ME. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of applied physics.;16(5):267-75, May 1945.
- [15]Cotterell M, Byrne G. Dynamics of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti-6Al-4V. CIRP Annals-Manufacturing Technology; 57(1):93-6, Dec 31, 2008.
- [16]Albrecht P. New developments in the theory of metal cutting process. J. Eng. Ind.;82(4):348-58, Nov. 1960.

SUMMARY

MODELS OF DYNAMIC PROCESS OF FORMING STUGOTINE

The oscillating elements obradog system in principle is conditional on the dynamic character of the process of formation filings. It is necessary to let the frequency of natural oscillation elements of the system tool - workpiece - accessories - machine is approximately equal to the frequency of forming segments filings to lead to the emergence of chatter (Landberg). Studies have found that the process of forming filings do not affect the characteristics of rigidity machines (Ferrarezzi). Today the world litereturi meets a large number of analytical and mechanistic models, with more or less accuracy realistically describe the real process of forming filings. In recent years, with the advent of powerful computers and application programs based on the finite element method (FEM) modeling of the dynamic processes of formation filings, as well as other processes that take place in the cutting zone, are the subject of numerical methods.

Key words: *model, simulation, process, dynamics process*