



Pjević, M.¹⁾, Tanović, Lj.²⁾, Mladenović, G.³⁾

UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODİRANJA KOD MIKROREZANJA KRTIH MATERIJALA⁴⁾

Rezime

Poznato je da se kod mikrorezanja krtih materijala javlja režim plastičnog deformisanja, kao i režim krtog loma. Pored geometrije alata, strukture materijala i režima obrade, na kritičnu dubinu prodiranja, koja predstavlja granicu između ova dva režima, utiče i putanja alata. U ovom radu prikazan je uticaj putanje alata na vrednost kritične dubine prodiranja. Pored pravolinijske i lučne putanje alata, predstavljena je i eliptična putanja alata, kao i sistem držača alata koji obezbeđuju eliptično kretanje alata.

Ključne reči: mikrorezanje, krti materijali, kritična dubina prodiranja, putanja alata

1. UVOD

Ukoliko se napravi osvrt na razvoj industrije u proteklih sto godina, može se zaključiti da je fokus bio na povećanju proizvodnosti, sa tendencijom smanjenja cena proizvoda, ali posledičnom povećanju konkurentnosti na tržištu. Sa druge strane, prezasićenost tržišta dovela je do uspostavljanja novih proizvodno/tehnoloških zahteva. Pored toga što se insistira da se proizvod pravi u što većoj seriji, u što kraćem vremenskom intervalu, zadaju se i dodatni uslovi. Jedan on njih je da sam proizvod, kao i način njegove proizvodnje bude energetski efikasniji od prethodne generacije. Minijaturizacijom proizvoda postiže se veća energetska efikasnost, međutim javljaju se i nove prepreke. Da bi se napravili minijaturizovani proizvodi, neophodno je preći iz domena makro u domen mikro obrade. Fenomeni i zakoni koji su nekada važili kod makrorezanja, prelaskom na mikrorezanje više ne važe. Dodatno, ukoliko je reč o mikrorezanju krtih materijala, može se reći da proces stvaranja strugotine kod mikrorezanja nema ni najmanje podudarnosti sa makrorezanjem. Dok se kod makrorezanja za proces stvaranja strugotine vezuju smičuće napone duž ravni smicanja, kod mikrorezanja strugotina nastaje odvaljivanjem materijala u vidu odlomaka, što je posledica razvoja prslina unitar materijala.

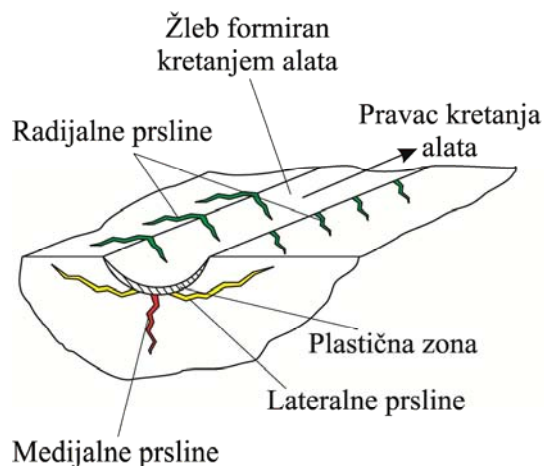
Pre nego što nastane razaranje materijala, na malim dubinama koje su manje od neke kritične vrednosti nije primetno odvajanje materijala. U ovoj fazi, obrada se vrši plastičnim deformisanjem gde su prisutne povratne elastične i plastične deformacije. Povećanjem dubine rezanja iznad kritične vrednosti prelazi se iz režima plastičnog deformisanja u režim krtog loma. Strugotina koja ovde nastaje nije kontinualna. Materijal se odvaja ispred alata, a manjim delom sa njegove bočne strane. Pored ovoga, prisutno je i drobljenje materijala ispod i ispred samog alata. Za odvajanje materijala zaslužne su lateralne prsline koje imaju trend rasta ka površini materijala (slika 1). Pored sistema lateralnih prslina, u zoni rezanja su prisutne i radijalne i medijalne prsline sa tendencijom rasta od bočnih strana alata na samoj obrađivanoj površini, odnosno unutar materijala normalno na obrađivanu površinu. Ove prsline su jednim delom prisutne i u zoni plastičnog deformisanja gde nije prisutno odvajanje materijala. Medijalne prsline se povezuju sa kvalitetom obrađene površine i sa integritetom konstrukcije formiranog dela.

¹⁾ Asistent Miloš Pjević, master inž. maš., (mpjevic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

²⁾ Prof. dr Ljubodrag Tanović, dipl. inž. maš., (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

³⁾ Asistent dr Goran Mladenović, dipl. inž. maš., (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za Proizvodno mašinstvo, Centar za nove tehnologije

⁴⁾ U ovom radu saopštavaju se rezultati istraživanja koji su realizovani u okviru projekta TR 35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansiraju Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.



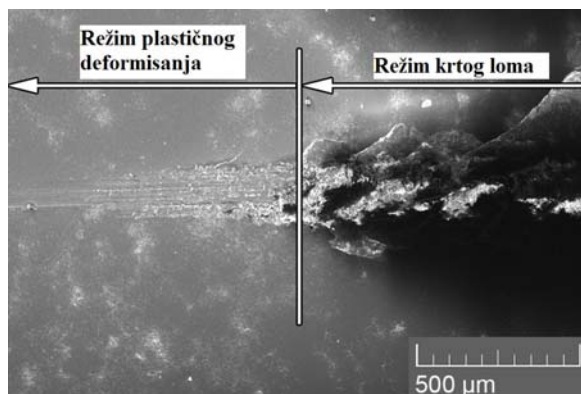
Slika 1. Razvoj sistema prslina unutar obrađivnaog materijala.

Na kritičnu dubinu prodiranja, koja predstavlja granicu između režima plastičnog deformisanja i režima krtog loma, utiče vrsta (svojstvo) materijala koji se obrađuje, režim i uslovi obrade, kao i geometrija alata. U prethodnim istraživanjima koja su sprovedena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Begoradu, pokazano je da usled izrazitog radijusa vrha alata koji se više ne može zanemarivati, grudni ugao je izrazito negativan [1]. Veličina, orijentacija i svojstva zrna unutar materijala takođe imaju dominantan uticaj na vrednost kritične dubine. Na njenu vrednost dosta može uticati i već postojeće prsline unutar materijala.

Pred istraživače se postavlja pitanje potrebe definisanja kritične dubine. Posmatrano sa aspekta kvaliteta obrađene površine, u plastičnom režimu prisutan je znatno manji procentualni udeo prslina, nego u režimu krtog loma. Na ovaj način se obezbeđuje daleko bolji kvalitet obrađene površine, gde se u nekim slučajevima može eliminisati potreba za naknadnim obradama (poliranjem, ...). Takođe, u literaturnim izvorima [2,3], utvrđeno je da je za uklanjanje jedinične zapremine materijala potrebno daleko više energije u režimu plastičnog deformisanja, nego u režimu krtog loma. Ovo predstavlja jednu kontradiktornost, s obzirom da je obrađena zapremina veća u režimu krtog loma. Međutim, kada se izvrši analiza procesa, može se doneti zaključak da je ovo posledica nekontrolisanog rasta prslina unutar materijala koje olakšavaju uklanjanje materijala pri obradi na većim dubinama od kritične vrednosti. Ukoliko je u interesu da se postigne što je moguće veća proizvodnost, potrebno je i znati koje su to kritične dubine na kojima se javlja duktilni prelaz.

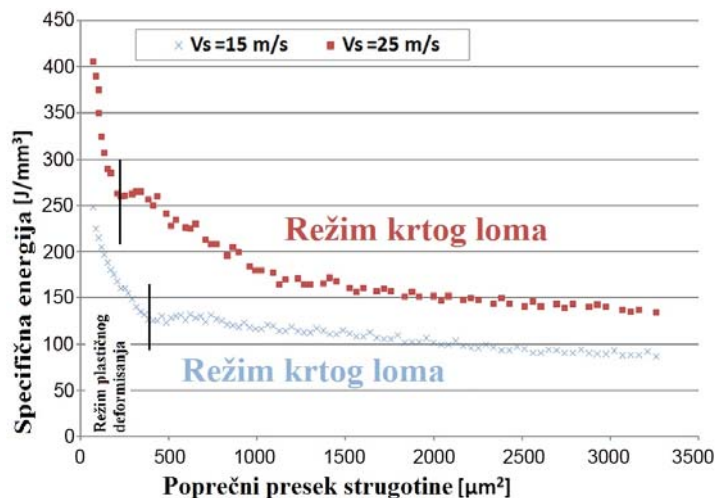
2. ODREĐIVANJE KRITIČNE DUBINE PRODIRANJA

Potreba za detaljnim poznavanjem vrednosti kritične dubine prodiranja alata u ispitivani materijal, povukla je za sobom pitanje na koji način je odrediti. Jedan od načina određivanja kritične dubine prodiranja je pomoću utiskivanja alata (utiskivači tipa Rokvel, Vickers i Brinell) normalno u ispitivani materijal na određenu dubinu, a zatim posmatranjem utisnutog traga uz pomoć mikroskopa, kako bi se utvrdilo da li su prisutne prsline na generisanoj površini. Ovaj princip nije u potpunosti merodavan jer je prisutno dejstvo samo normalne sile. Dodavanjem još jednog kretanja čime se formira dejstvo i tangencijalne sile, dobija se verodostojnija slika o dva režima koja su prisutna. Primer traga u kome se jasno vidi prisustvo plastičnog režima i režima krtog loma prikazan je na slici 2.



Slika 2. Prikaz plastičnog režima i krtog režima rezanja [2].

U radu [2], objašnjava se postupak kako da se pomoću geometrije dođe do kritične dubine prodiranja u slučaju kada se dijamantski alat nalazi na obrtnom disku. Takođe, kao i što je pomenuto, na dijagramu specifične energije prodiranja (slika 3), jasno se može uočiti granica između ova dva režima.



Slika 3. Specifična energija rezanja u funkciji od dubine rezanja [2].

3. UTICAJ PUTANJE ALATA NA KRITIČNU DUBINU PRODİRANJA

Neke od korišćenih putanja alata u dosadašnjim istraživanjima su linearne, gde se obrada vrši rendisanjem. Na drugoj strani, brušenje karakteriše kretanje alata po kružnici. Osnovna razlika ova dva tipa kretanja alata jeste u brzini rezanja koja se ostvaruje. Kod linearne putanje alata, brzina rezanja se kreće do 10 m/min [4], dok kod kretanja alata po kružnici može ići i preko 30 m/sek.

U prethodnim istraživanjima koja su sprovedena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, dokazano je da sa povećanjem brzine rezanja, vrednost kritične dubine prodiranja se smanjuje (Slika 3).

U oba ova slučaja, alat je u stalnom kontaktu sa obratkom. U poslednje vreme, istraživači su stavili akcenat na prekidno rezanje, obezbeđujući na taj način uslove rezanja pri kojima alat nije u stalnom kontaktu sa obratkom, takozvana obrada potpomognuta vibracijama. Iz ovoga su proistekla dva tipa rezanja gde alat pored glavnog kretanja ostvaruje još i vibraciono [5]. Prvo je 1D VAM (“Vibration – Assisted Machining”), a drugo je 2D VAM. Ovakav tip obrade ne samo da obezbeđuje manje habanje alata, već dovodi do povećanja vrednosti kritične dubine prodiranja.

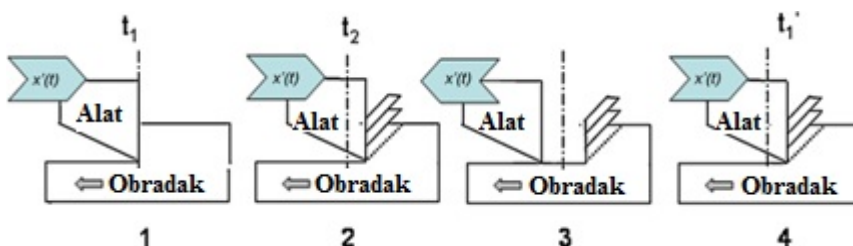
U prvom slučaju, alat pored glavnog kretanja ostvaruje i linearno oscilatorno kretanje (slika 4). Kako bi se ostvarilo prekidno kretanje alata, relativna pozicija i brzina alata u odnosu na obradak mora biti:

$$x(t) = A \sin(\omega t) + Vt, \quad (1)$$

$$x'(t) = \omega A \cos(\omega t) + V, \quad (2)$$

gde je t vreme, A amplituda oscilovanja alata i f frekvencija oscilovanja. Da bi se ostvarilo prekidno rezanje, iz jednačine (2), može se izvesti kritična brzina koju alat mora da ostvari:

$$V_{krit} = 2\pi f \cdot A. \quad (3)$$



Slika 4. 1D VAM [5].

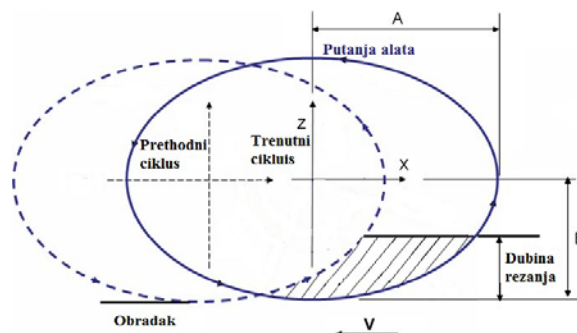
Bez obzira na brzinu kretanja alata, grudni ugao je uvek konstantan. Ovim vidom obrade, gde alat ostvaruje pravolinijsko oscilatorno kretanje, ostvaruje se duži radni vek alata. Ovo je posledica manjih sila koje se javljanju u zoni rezanja.

Kod 2D vibraciono potpomognute obrade, alat ostvaruje oscilatorno kretanje po elipsi. Ovo se ostvaruje dodavanjem vibracija po još jednoj ravni. Sumiranjem vibracija u dva pravca, nastaje eliprično kretanje alata. Relativne brzine alata u dva pravca u odnosu na obradak mogu se predstaviti kao:

$$x'(t) = \omega A \cos(\omega t) + V, \quad (4)$$

$$z'(t) = -\omega B \cos(\omega t), \quad (5)$$

gde A i B predstavljaju poluprečnike ose elipse, a ostali parametri su isti kao i kod 1D obrade.



Slika 5. 2D VAM [5].

Pravac kretanja alata više nije konstantan i može se predstaviti izrazom:

$$\chi(t) = \arctan\left(\frac{-\omega B \cos(\omega t)}{\omega A \sin(\omega t) + V}\right), \quad (6)$$

Što, takođe, dovodi do promene vrednosti grudnog ugla tokom procesa rezanja:

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \chi(t). \quad (7)$$

Promena efektivne vrednosti grudnog ugla, usled složenog kretanja alata, može se objasniti smanjenjem preseka strugotine. Sa smanjenjem njegove vrednosti, postiže se povećanje pritisnih napona, koji utiču na smanjenje faktora intenziteta napona K_I . Njegovim smanjenjem, smanjuje se verovatnoća nastanka prslina u zoni rezanja (razlog $K_I < K_{IC}$), a povećava se udeo dislokacija, što dovodi do povećanja kritične dubine proditanja.

1D vibraciono potpomognuta obrada može se koristiti, kako kod obrade sa dijamantskim zrnom gde se zahteva izuzetna mala hrapavost obrađene površine, tako i kod konvencionalne obrade gde dubine rezanja idu i do 1 mm. 2D vibraciono potpomognuta obrada može se koristiti samo u slučajevima kada dubina rezanja ne prelazi 50 μm .

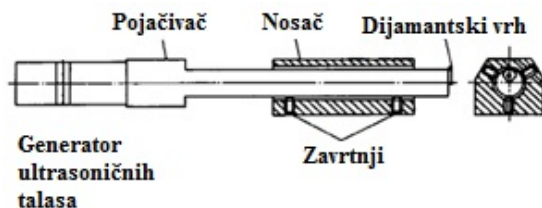
4. TIPOVI DRŽAČA ALATA ZA MIKROREZANJE VIBRACIONIM KRETANJEM ALATA

Vibraciono kretanje alata nije moguće ostvariti interpolacijom osa mašine, već je neophodno imati dodatni mehanizam. U ovom slučaju to je držač alata, koji omogućava takvo kretanje. U zavisnosti od tipa putanje alata koji taj mehanizam obezbeđuje, vibracione mehanizme za vibraciono mikrorezanje delimo na 1D VAM sisteme i na 2D VAM sisteme.

4.1 1D VAM sistemi

1D VAM sistemi se koriste kod mikrorezanja potpomognutog vibracijama u slučaju kada se zahteva oscilovanje alata po lineranoj putanji, kao što je to prikazano na slici 4. On se obično sastoji od generatora

ultrasoničnih talasa, sonde u obliku trube koja služi da pojača vibracije, i osnove na kojoj se sve to nalazi. Alat se postavlja na kraj pojačivača talasa. Jedan takav sistem razvijen je od strane T. Moriwaki-a i E. Shamoto-a [6], a prikazan je na slici 6. Frekvencija oscilovanja ovakvog tipa sistema kreće se u granicama od 20 do 40 kHz, dok amplituda oscilovanja obično iznosi do 20 μm . Ono što je bitno naglasiti je da ovakav tip vibracionog sistema nije rezonantan, odnosno krajnje kretanje vrha alata nije posledica poklapanja više modova oscilovanja dela senzora.

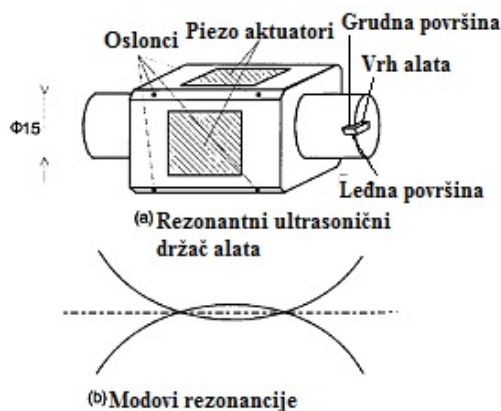


Slika 6. Šematski prikaz 1D VAM sistema [6].

4.1 2D VAM sistemi

Kako bi se ostvarilo eliptično vibraciono kretanje alata, neophodno je da držač alata ima kretanje u dva pravca. Odatle su i proistekla dva tipa 2D VAM vibracionih sistema.

U prve spadaju rezonantni sistemi. Vibraciono kretanje vrha alata kod ovakvih sistema ostvaruje se kada se poklopi više modova oscilovanja alata. Obično se kao pogonski sistem koriste piezo aktuatori. Jedan ovakav sistem razvijen je ponovo od strane T. Moriwaki-a i E. Shamoto-a [7], slika 7. Kao i kod prethodno pomenutog 1D VAM sistema, frekvencija oscilovanja se kreće u rasponu od 20 do 40 kHz, dok operativna vrednost amplituda u dva pravca može biti i duplo veća od 1D VAM sistema. Ovo je samo jedan tip ovakvog sistema, što znači da se u literaturnim izvorima mogu naći i drugačije konstrukcije 2D rezonantnih VAM sistema.



Slika 7. Šematski prikaz 2D rezonantnog VAM sistema [7].

Za razliku od 2D VAM sistema, na Pusan Univerzitetu razvijen je nerezonantni 2D VAM sistem [8] (slika 8). Ovakav sistem se pogoni pomoću piezo aktuatora koji se kontrakuju i ekspanduju. Specijalnom konstrikcijom tela držača, omogućeno je eliptično kretanje vrha alata koje je posledica kretanja piezo aktuatora. Bitno je napomenuti da frekvencija oscilovanja aktuatora mora biti manja od prvog moda oscilovanja, u suprotnom, može doći do rezonantnog oscilovanja cele konstrukcije, potencijalno prouzrokujući neželjenu putanju alata. Frekvencija oscilovanja se kreće oko 1 kHz, dok je vrednost amplitude oko 5 μm . Od strane drugih istraživača razvijeni su slični sistemi, koji rade na većoj frekvenciji oscilovanja.

Prethodno opisanim složenim oscilatornim kretanjem alata, može se postići povećanje kritične vrednosti prodiranja alata, ali u slučaju da se brzine rezanja kreću u opsegu do 1 m/min. Ovo je posledica frekvencije oscilovanja vrha alata. Da bi se postiglo vibraciono rezanje gde se brzine kreću do 30 m/sek, neophodno je razviti novi sistem generisanja vibracija čije će brzine oscilovanja daleko prelaziti dosadašnja ograničenja. U skladu sa navedenim, otvara se novi problem koji se prvenstveno odnosi na mernu opremu. Odnosno, postojanje mernog sistema koji može da evidentira sve promene koje nastaju u malom vremenskom intervalu.



Slika 8. Šematski prikaz 2D ne-rezonantnog VAM sistema [8].

5. ZAKLJUČAK

1. Složenim oscilatornim kretanjem alata, povećava se vek trajanja alata usled redukcije vrednosti sila u zoni rezanja.
2. U slučaju da se koristi 2D VAM sistem gde alat ostvaruje eliptičnu putanju relativno na obradak, postiže se promena vrednosti grudnog ugla, koja može dodatno uticati na vrednost kritične dubine prodiranja, usled smanjenja faktora intenziteta napona K_I .
3. U zavisnosti od tipa pogona i putanje alata, postoji više tipova VAM sistema (1D, 2D – rezonantni i nerezonantni). U ovom trenutku svi oni postavljaju ograničenje da brzina rezanja ne prelazi 1 m/min.

6. LITERATURA

- [1] Pjević, M., Tanović, Lj., "Pregled stanja istraživanja u domenu mikro-rezanja krutih materijala", XIII Međunarodna konferencija Održavanje i proizvodni inženjering "KODIP - 2015", Zbornik radova, ISBN 978-9940-669-01-0, s.21-s.26, Inženjerska akademija Crne Gore, Budva, 24-28 juna, 2015.
- [2] Mladenovic, G., et al. "Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Oxide Ceramic CM332 Grinding." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137.3 (2015): 034502.
- [3] Tanovic, L. J., et al. "Experimental investigation of microcutting mechanisms in marble grinding." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 131.6 (2009): 064507.
- [4] Nath, C., M. Rahman, and K. S. Neo. "A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide." *Journal of Materials Processing Technology* 209.9 (2009): 4459-4464.
- [5] Brehl, D. E., and T. A. Dow. "Review of vibration-assisted machining." *Precision engineering* 32.3 (2008): 153-172.
- [6] Moriwaki, Toshimichi, and Eiji Shamoto. "Ultraprecision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 40.1 (1991): 559-562.
- [7] Moriwaki, Toshimichi, and Eiji Shamoto. "Ultrasonic elliptical vibration cutting." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 44.1 (1995): 31-34.
- [8] Ahn, Jung-Hwan, Han-Seok Lim, and Seong-Min Son. "Improvement of micro-machining accuracy by 2-dimensional vibration cutting." *Proc ASPE*. Vol. 20. 1999.

Pjević, M., Tanović, Lj., Mladenović, G.

INFLUENCE OF THE TOOL MOTION ON THE UNDEFORMED CHIP THICKNESS WHEN PERFORMING MICRO CUTTING BRITTLE MATERIALS

Abstract: It is well known that during micro cutting brittle materials, there is two types of regimes. One where is dominant plastic deformation, and other where chip is formed due to crack propagation. Along the tool geometri, structure of material and cutting regimes, undeformed chip thickness depends on tool path motion. This paper presents how type of tool's path motion effects on value of undeformed chip thickness. Moreover, beside straight and arched tool paths, it is shown elliptical tool path motion, and also tool holder systems that provides such motion, that is used by researchers.

Key words: micro cutting, brittle materials, undeformed chip thickness, tool path motion