



## **EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA UTICAJA GEOMETRIJE ALATA NA BOČNO RAZARANJE MATERIJALA KOD MIKRO REZANJA MERMERA**

**Miloš Pjević<sup>1</sup>, Ljubodrag Tanović<sup>2</sup>, Vladan Ćosović<sup>3</sup>**

*Rezime: Rad predstavlja eksperimentalnu analizu kod mikrorezanja mermera. Kod obrade krutih materijala na bazi kamena, moguće je postići obradu materijala u duktilnom režimu, čime se izbegava nekontrolisano razaranje materijala. Ukoliko se deo obrađuje u režimu krstog loma, postavlja se pitanje kako geometrija alata utiče na intenzitet bočnog razaranja, i da li je moguće izbeći ili smanjiti, što je ujedno i tema ovog rada.*

*Ključne riječi: geometrija alata, kruti materijali, mikro rezanje, optimizacija procesa*

### **EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF THE INFLUENCE OF TOOL GEOMETRY ON THE LATERAL AND RADIAL CRACK GROWTH DURING MICRO CUTTING OF MARBLE**

*Abstract: This paper presents an experimental analysis of micro cutting of marble. In the machining of brittle materials based on stone, it is possible to achieve the cutting of materials in the ductile mode, thus avoiding the uncontrolled destruction of the material. If a part is machined in the regime of brittle fracture, the question is how tools geometry affect the intensity of the lateral and radial cracks, and whether it can be avoided or reduced, which is also the theme of this work.*

*Key words: tool geometry, brittle materials, micro cutting, process optimization*

## **1 UVOD**

Fenomeni koji se javljaju u zoni rezanja tokom procesa mikro obrade krutih materijala još uvek predstavljaju enigm. Postoje različiti pristupi u predstavljanju

---

<sup>1</sup> Asistent, mast. inž. maš, Miloš Pjević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd, Srbija, mpjevic@mas.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Prof. dr Ljubodrag Tanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd, Srbija, itanovic@mas.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Viši naučni saradnik Dr Vladan Ćosović, Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd, Srbija, vlada@tmf.bg.ac.rs

mehanizma mikro rezanja krtih materijala. Dosadašnja istraživanja ih svrstavaju u tri pravca:

1. Uticao načina dejstva sila.

Uticanjem dejstva sila kod statičkog utiskivanja bavili su se Lawn i Swain [1] gde su utvrdili zavisnost između dužine prslina koje nastaju unutar materijala i vrednosti sile utiskivanja. Ueda i ostali [2] primenili su J-integral kako bi objasnili mehanizam koji se javlja u toku plastičnog režima mikro rezanja. Tan i ostali [3] koristili su metod konačnih elemenata kako bi utvrdili vrednosti dužina prslina u zavisnosti od dubine mikro rezanja prilikom obrade aluminijum-oksidge keramike ( $Al_2O_3$ ). U ovom eksperimentu su ustanovili da sa povećanjem dubine nastaje i povećanje intenziteta prslina unutar materijala.

2. Uticao putanje alata.

Istraživanjem mikro rezanja sa vibracionim kretanjem alata, došlo se do zaključka da se ne samo povećava radni vek samog alata (Zhou i saradnici [4], Suzuki i saradnici [5]), već i da se kritična dubina prodiranja povećava u odnosu na konvencionalno mikro rezanje (Liang i ostali [6], Nath i saradnici [7]).

3. Uticao geometrije alata.

Geometrija alata ima važnu ulogu prilikom uklanjanja materijala kod mikro rezanja. Različite vrednosti radijusa zaobljenja alata pri istim uslovima mikro rezanja mogu izazvati različita naponska stanja unutar materijala koja, ili dovode do plastičnog tečenja materijala, ili do nastanka nekontrolisanog rasta prslina unutar istog (Venkatachalam i ostali [8]).

U pregledu literature primećeno je da se niko od istraživača nije fokusirao na zavisnost intenziteta bočnog razaranja u odnosu na geometriju alata prilikom procesa mikro rezanja mermera. Ovaj rad obuhvata objašnjenje predloženog modela mehanizma mikro rezanja, kao i eksperimentalnu analizu pomenute zavisnosti.

## 2 MODEL PROCESA MIKRO REZANJA

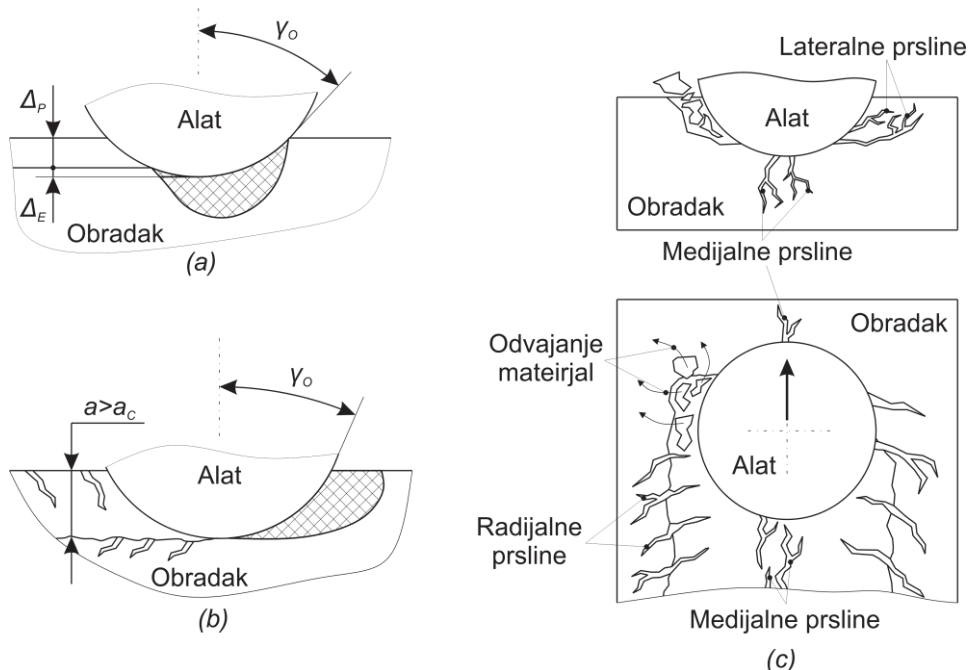
Pri mikro rezanju krtih materijala, proces odvajanja materijala je složeniji u odnosu na proces prisutan kod makro rezanja materijala sa izraženim plastičnim svojstvima. Odvajanje materijala nije moguće prepisati stvaranju strugotine usled smičućih napona. Zapravo, tokom mikro rezanja krtih materijala, u zoni rezanja moguće je uočiti dve različite faze obrade. Prva je režim plastičnog deformisanja, a druga režim krtog loma.

Od početka interakcije između alata i obratka, pa sve do neke kritične vrednosti dubine rezanja ' $a_c$ ', nije prisutno odvajanje materijala i reč je o režimu plastičnog deformisanja. Kada se pristupi analizi geometrije alata, ne sme se zanemariti činjenica da se kod mikro rezanja alat može smatrati zatupljenim (sa zaobljenjem vrha). Usled zaobljenja vrha, vrednost grudnog ugla je promenljiva u funkciji od dubine rezanja i radijusa zaobljenja. Opseg vrednosti efektivnog grudnog ugla kreće se u granicama izrazitno negativnih vrednosti koje mogu biti i do  $-85^\circ$ . Ovakve vrednosti grudnog ugla izazivaju naponsko stanje povišenog pritiska unutar materijala, usled čega je prisutan fenomen povratnih elastičnih i plastičnih deformacija.

Sa porastom dubine rezanja ' $a$ ' preko kritične vrednosti ' $a_c$ ', dolazi do promene efektivne vrednosti grudnog ugla usled koje se smanjuju pritiski naponi unutar materijala. Promena naponskog stanja dovodi do porasta faktora intenziteta napona iznad kritične vrednosti. Na ovaj način se stvara uslov za inicijalizaciju i nekontrolisani rast prslina unutar materijala, prema sličnom modelu koje je predstavio Orowan [9].

Upravo zahvaljujući prslinama, dolazi do odvajanja materijala u vidu odlomaka u režimu krtog loma.

Prsline koje se javljaju unutar materijala mogu se svrstati u tri grupe. U prvu spadaju medijalne prsline koji imaju trend rasta vertikalno unutar materijala. Njihova pojava prisutna je i ispred samog vrha alata. Zatim slede radijalne prsline koje se kreću od ivice formiranog žljeba sa trendom rasta od njega. U odnosu na pravac kretanja alata, radialne prsline su pod određenim uglom, a nastaju usled pojave zatežućih napona. Lateralne prsline imaju tendenciju rasta od korena žljeba ka površini obratka.



Slika 1. Šematski prikaz a) naponskog stanja unutar materijala koji dovodi do režima plastičnog deformisanja, b) režima krtog loma i c) sistema prsline unutar materijala.

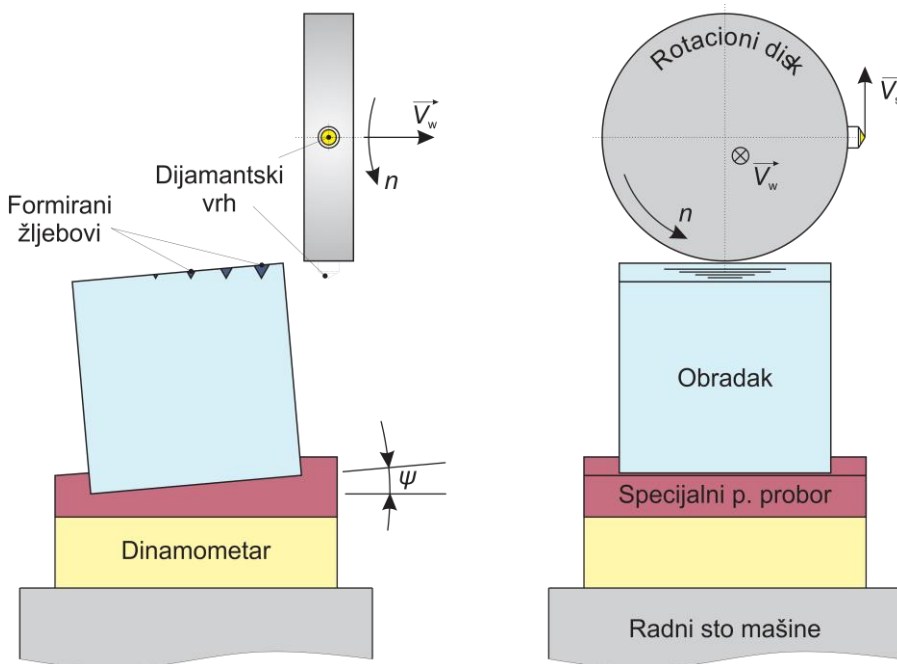
Intenzitet bočnog razaranja materijala takođe se može povezati sa radijusom alata. Može se očekivati da će pri obradi alatom većeg radijusa u režimu krtog loma, intenzitet bočnog razaranja biti veći. Objašnjenje se nalazi u tome što je poprečni presek zahvaćenog materijala veći, pa samim tim i smičući naponi u lateralnom pravcu.

### 3 EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Tokom eksperimenta, proces mikro rezanja izveden je na obradnom centru ILR HMC-500. Postavljanje i stezanje prizmatičnog priprema na radni sto mašine ostvaren je preko dinamometra i specijalnog pomoćnog pribora. Specijalni pomoćni pribor za funkciju ima stezanje dela i obezbeđivanje potrebnog ugla nagiba ' $\psi$ ', kojim se definiše promena dubine obrade u svakom novom prolazu (slika 2).

Alat u vidu dijamantskog vrha, postavljen je na rotacioni disk. Rotacioni disk ostvaruje glavno obrtno kretanje definisanog broja obrtaja ' $n$ ' i pomoćno pravolinijsko kretanje brzinom  $V_w$ . Ovakvim kretanjem ostvaruje se složeno kretanje dijamantskog

vrha (zavojno), čime je omogućeno ostvariti više prolaza na jednoj površini. U toku eksperimenta korišćena su tri dijamantska vrha sa različitim geometrijom, odnosno različitim radijusom zaobljenja vrha (R0.2, R0.15, R0.06).



Slika 2. Eksperimentalna postavka.

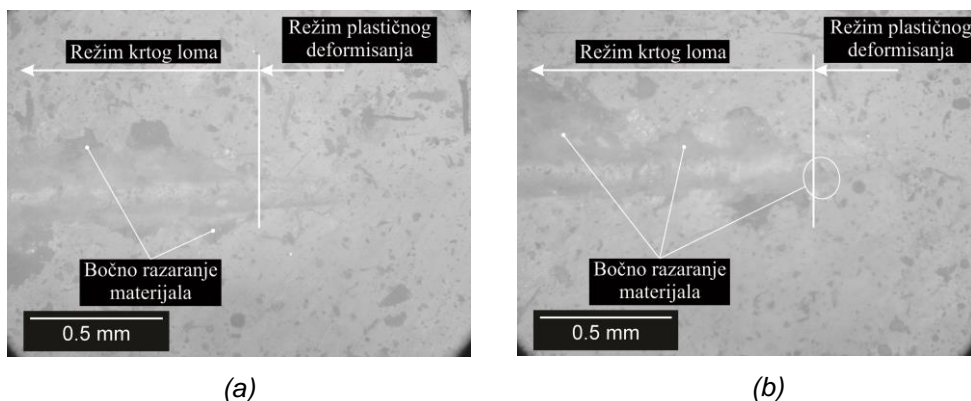
Brzina rezanja koju ostvaruje alat usvojena je prema preporukama koje se koriste za obradu mermera, a koje se kreću u granicama  $V_s=10\div30$  m/s.

Nakon završene obrade, sve obrađene površine su skenirane uz pomoć mikroskopa LEICA DM ILM, kako bi se utvrdio uticaj geometrije (radijusa) alata na bočno razaranje materijala.

#### 4 ANALIZA REZULTATA

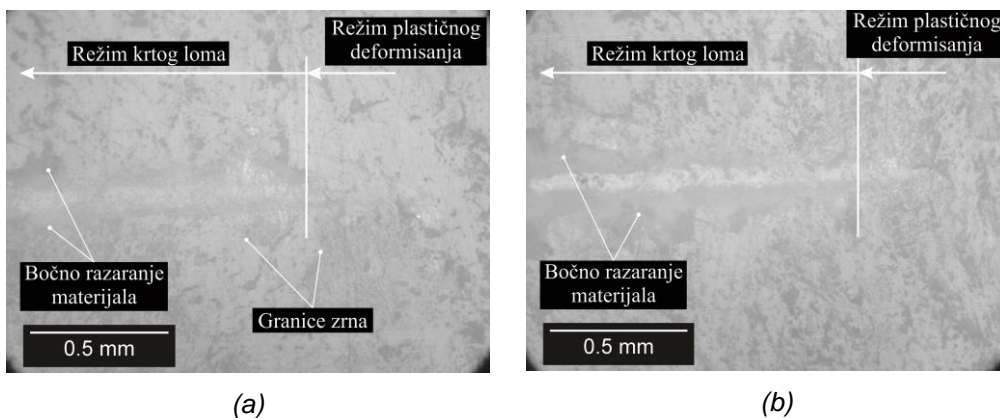
Intenzitet bočnog razaranja određen je osmatranjem obrađenih površina. Na slikama 3, 4 i 5, prikazani su žljebovi koji su obrađeni alatima radijusa R0.2, R0.15, R0.06, retrospektivno.

Na slici 3a (alat R0.2 mm), u toku režima plastičnog deformisanja nije prisutno bočno razaranje materijala. Sa druge strane na slici 3b se mogu uočiti blagi tragovi krzanja obrađene površine ispred samog prelaza iz plastičnog u režim krtog loma. U režimu krtog loma jasno je uočljivo prisustvo bočnog razaranja materijala, gde je, zapravo, formirani žljeb veće zapremine od idealnog traga koji bi stvario alat. U ovom eksperimentu, pri obradi alatom R0.2 mm, izmerene dužine bočnog razaranja kreću se u rasponu od 0.11 do 0.27 mm.



Slika 3. Izgledi žljebova generisanih uz pomoć alata radijusa R0.2 mm.

Sa smanjenjem radijusa alata sa R0.2 mm na R0.15 mm, ostvareno je i smanjenje intenziteta bočnog razaranja, koje se u ovom slučaju kreće od 0.05 od 0.19 mm (slika 4). Na slikama 4a i 4b, bočno razaranje uočljivo je samo u toku režima krtog loma.

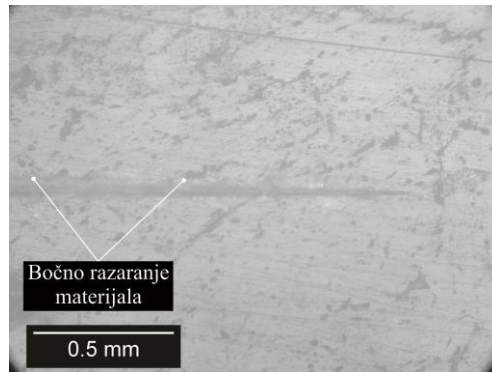


Slika 4. Izgledi žljebova generisanih uz pomoć alata radijusa R0.15 mm.

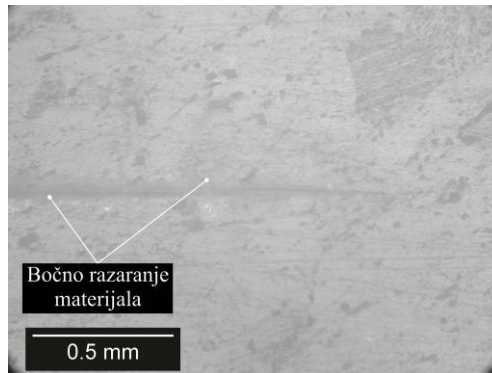
Tokom izvođenja ovog eksperimenta alat sa najmanjim radijusom koji je korišćen bio je radijusa R0.06 mm. Na slici 5 prikazani su žljebovi formirani ovim alatom. Lako se dolazi do zaključka da je intenzitet prslina znatno manji od prethodna dva alata, a kreće se od nekoliko  $\mu\text{m}$  pa do 0.09 mm.

Analizom svih sumiranih rezultata sa dijagrama na slici 6, može se reći da je porast dužine bočnih prslina/razaranja povezan sa porastom vrednosti radijusa alata. Ona nije linearna, već je primetan blagi rast u odnosu na vrednost radijusa alata.

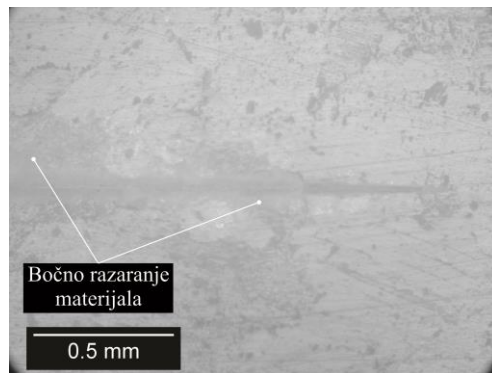
Iako su bočna razaranja manja prilikom korišćenja alata sa manjim radijusom vrha, gledano proporcionalno u odnosu na vrednosti radijusa, u slučaju kada je korišćen alat R0.06 veća su nego pri upotrebi alata R0.02 mm.



(a)

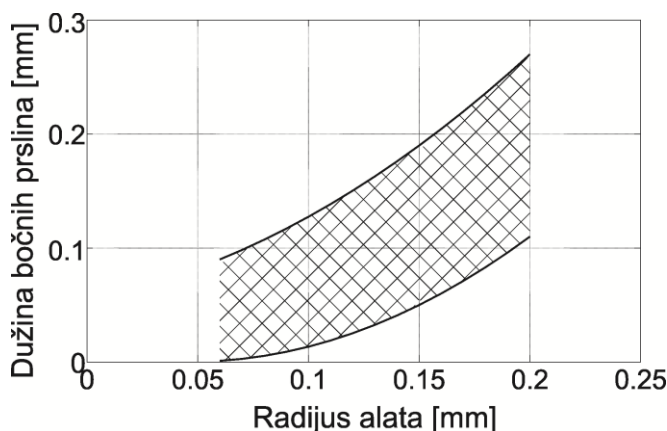


(b)



(c)

Slika 5. Izgledi žljebova generisanih uz pomoć alata radijusa  $R0.06$  mm.



Slika 6. Promena dužine bočnih prslina u zavisnosti od vrednosti radijusa alata.

## 5 ZAKLJUČAK

Zbog svojih fizičko/mehaničkih svojstava, mermer ima sve veću primenu u industriji, međutim, njegova teška obradivost predstavlja problem. Zaostle prsline unutar materijala bitno mogu uticati na integritet cele konstrukcije, samim tim poznavanje fenomena koji se javljaju u procesu mikro obrade je neophodno.

Promena vrednosti radija alata dovodi do promene vrednosti intenziteta bočnog razaranja materijala. Smanjenje vrednosti radijusa sa R0.2 na R0.15 mm, odnosno 25%, dovodi do smanjenja intenziteta bočnog razaranja za oko 30÷55%. Daljim smanjenjem radijusa alata na R0.06 mm (za 60% manji u odnosu na R0.15 mm), smanjuje se intenzitet bočnih prslina od 53 do 98% u odnosu na vrednosti prslina koje nastaju usled obrade alatom R0.15 mm. Smanjenjem radijusa ostvaruje se smanjenje intenziteta bočnog razaranja.

Ukoliko se pogleda proporcionalnost između vrednosti radijusa alata i bočnih prslina, može se reći da je nepovoljniji slučaj kada se koriste alati sa manjim radijusom. U tom slučaju vrednosti bočnih prslina mogu biti znatno veće od idealne širine žljeba koji bi trebalo da formira alat.

## LITERATURA

- [1] Lawn, B. R., and M. V. Swain. (1975). Microfracture beneath point indentations in brittle solids, *Journal of materials science*, 10/1, p.p. 113-122.
- [2] Ueda, K., Sugita, T., Hiraga, H., & Iwata, K. (1991). A J-integral approach to material removal mechanisms in microcutting of ceramics. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 40/1, p.p. 61-64.
- [3] Tan, Y., Yang, D., & Sheng, Y. (2008). Study of polycrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> machining cracks using discrete element method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48/9, p.p. 975-982.
- [4] Zhou, M., Ngoi, B. K. A., Yusoff, M. N., & Wang, X. J. (2006). Tool wear and surface finish in diamond cutting of optical glass. *Journal of Materials Processing Technology*, 174/1, p.p. 29-33.
- [5] Suzuki, N., Haritani, M., Yang, J. B., Hino, R., & Shamoto, E. (2007). Elliptical vibration cutting of tungsten alloy molds for optical glass parts. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56/1, p.p. 127-130.

- [6] Liang, Z., Wang, X., Wu, Y., Xie, L., Jiao, L., & Zhao, W. (2013). Experimental study on brittle–ductile transition in elliptical ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire using single diamond abrasive grain. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 71, p.p. 41-51.
- [7] Nath, C., Rahman, M., & Neo, K. S. (2009). A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 209/9, p.p. 4459-4464.
- [8] Venkatachalam, S., Li, X., & Liang, S. Y. (2009). Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials. *Journal of materials processing technology*, 209/7, p.p. 3306-3319.
- [9] Orowan, E. (1955). Energy criteria of fracture. *Welding Journal. Res. Sup.* 34/3, p.p. 157-160.