

M. Pjević¹, Lj. Tanović²

PREGLED STANJA ISTRAŽIVANJA U DOMENU MIKRO-REZANJA KRTHI MATERIJALA

Rezime

Danas u domenu mašinske obrade, mikro-rezanje predstavlja jednu od atraktivnijih tema istraživanja. Ovaj rad predstavlja pregled stanja istraživanja u ovoj oblasti, ističući najuticajnije faktore, zbog kojih se mikro-rezanje u velikoj meri razlikuje od makro-rezanja. Tu spadaju: uticaj radijusa zaobljenja vrha alata, negativni efektivni grudni ugao, kristalografska struktura materijala, itd. Kako je mikro rezanje moguće izvršiti u režimu plastičnog deformisanja, prikazani su mehanizmi, kojima se definiše granica između krto i duktilnog fenomena.

Ključne riječi: mikro rezanje, krthi materijal, režim plastičnog deformisanja

1. UVOD

Trenutni trend minijaturizacije doveo je do eksponencijalnog rasta tražnje energetski efikasnih minijaturiziranih komponenti. Prilikom pojave prvih Mikro-Elektro-Mehaničkih Sistema (MEMS), krajem osamdesetih godina, postavljeni su visoki zahtevi u domenu tačnosti mera i kvaliteta obrađene površine. Ukoliko se uzme u obzir da se radi o mikro elementima, čije dimenzije ne prelaze nekoliko milimetara, problem postaje još veći. Jedan od osnovnih zahteva koji se postavlja u slučaju mikro obrade, jeste proizvodnost. U prethodnom periodu, način dobijanja mikro elemenata, uglavnom se oslanjao na stereolitografiju. Ovakav način izrade delova je dosta jednostavan i ima veliku proizvodnost, ali i ograničenja. Ograničenja koja susrećemo su vrste materijala koje se mogu obrađivati ovom metodom, kao i to da stereolitografija spada u planarne (2½D) procese [1]. Sa druge strane, primenom mikro-rezanja, otvara se mogućnost izrade velikog spektra materijala, gde praktično nema ograničenja. Ako uzmemo u obzir činjenicu da mikro-rezanje spada u 3D procese, moguća je izrada mikro delova složenih oblika. Iako se mikro rezanje već uveliko primenjuje, njegov mehanizam i dalje nije potpuno razjašnjen. Princip stvaranja strugotine kod konvencijalnog rezanja, gde je u najvećoj meri izraženo smicanje, dosta se razlikuje u odnosu na mikro rezanje [2]. Kod konvencijalnog načina rezanja, radijus zaobljenja vrha noža se mogao zanemariti, dok kod mikro rezanja, on ima veliki uticaj na način stvaranja strugotine. U cilju objašnjavanja mehanizma mikro-rezanja, do sada su korišćena dva pristupa. Prvi je baziran na merenju tvrdoće utiskivačem (*Indentation fracture*), dok drugi na principu mašinske obrade (*Machining*). Kod prvog principa, ideja je da se deo statički optereti

¹ Miloš Pjević, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, e-mail: mpjevic@mas.bg.ac.rs,

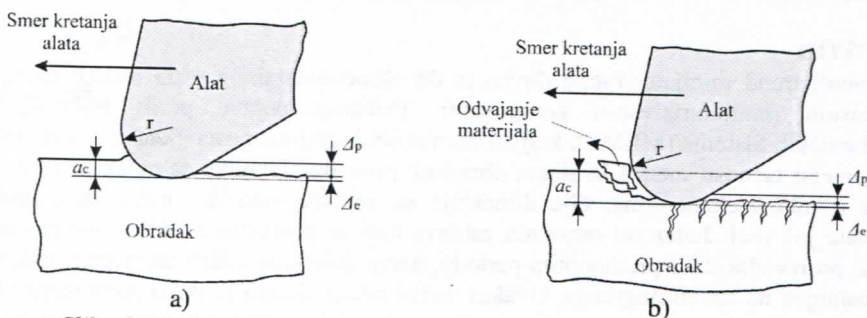
² Prof. dr Ljubodrag Tanović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, e-mail: ltanovic@mas.bg.ac.rs,

utiskivačem i da se analizira razvoj prslina, ili da se pored normalnog kretanja utiskivača ka ispitivanoj površini doda još tangencijalno kretanje, gde se, takođe, prati razvoj prslina. Drugi princip predstavlja obradu materijala jednim dijamantskim zrnom, nakon čega se vrši analiza sila koje su se javile kao i analiza topografije površine koja se dobila.

2. UTICAJNI FAKTORI KOD MIKRO-REZANJA

2.1. Uticaj radijusa zaobljenja vrha alata

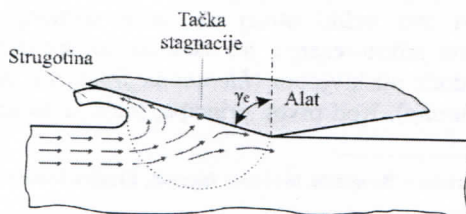
Kod konvencionalnog rezanja, vrednost dubine rezanja je dosta veća od radijusa zaobljenja vrha alata (r), tako da se on može zanemariti, međutim, kod mikro-rezanja, radijus zaobljenja ima veliki uticaj. Prema Fang-u [2], ukoliko se pogleda odnos između dubine rezanja i radijusa zaobljenja (a_c/r), mogu se konstatovati dva tipa rezanja (slika 1). U prvom nema tragova odvajanja materijala, već se rezanje svodi na utiskivanje gde su prisutne povratne elastične (Δ_e) i plastične deformacije (Δ_p). Drugi tip rezanja se odnosi na odvajanje materijala usled razvoja prslina unutar materijala. Kao i u prvom slučaju, pored odvajanja materijala, prisutne su povratne elastične i plastične deformacije. Kai Liu [3] je pomoću metode konačnih elemenata dokazao da vrednost radijusa zaobljenja vrha noža kod rezanja malih dubina dosta utiče na tok materijala. Usled povećanja kontaktne zone između alata i obratka dolazi do povećanja plastičnih deformacija, a istovremeno i do povećanja rasipanja energije.



Slika 1. Model mikro-rezanja: a) a_c/r manji od kritične vrednosti, a_c/r veći od kritične vrednosti.

2.2. Uticaj negativnog grudnog ugla

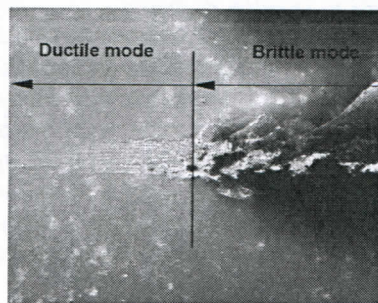
Zbog vrednosti radijusa zaobljenja vrha noža, koja je veća od vrednosti dubine rezanja, efektivni grudni ugao je negativan. Komanduri [4], je odredio minimalnu vrednost efektivnog grudnog ugla (γ_e) pri kom će doći do procesa rezanja. On je takođe predstavio model gde se tok materijala grana u dva pravca, sa postojanjem tačke stagnacije (slika 2).



Slika 2. Tok materijala prilikom obrade sa izrazito malim (negativnim) grudnimuglom[4]

2.3. Kristalografski efekti

Kod mikro-rezanja, dubina rezanja igra bitnu ulogu. Jedan od razloga je taj što dubina rezanja kod polikristalnih materijala može biti manja od srednje veličine zrna [5]. Kod mikro rezanja, alat prodire unutar zrna i seče granice zrna. *Moriwaki* [6] je pokazao da osnovni mehanizam procesa rezanja zavisi od svojstva i strukture materijala. Jasno je da mehanizam obrade kod monokristalnih materijala zavisi od orijentacije u odnosu na pravac rezanja, a kod polikristalnih materijala zavisi od individualnih zrna i kristalografske orijentacije. U zavisnosti od svojstva materijala, mogu se javiti dva tipa rezanja: plastični (duktilni) i krti. Prilikom rezanja malih dubina, koje mogu biti i ispod jednog mikrometra, javlja se režim plastičnog deformisanja, gde nema tragova odvajanja materijala. Sa porastom dubine rezanja, prelazi se u krti režim rezanja, gde se materijal u najvećoj meri odvaja razaranjem. Na slici 3, jasno se može uočiti prelaz između ova dva tipa rezanja.

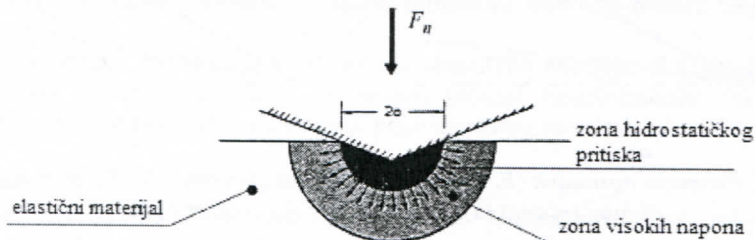


Slika 3. Plastični i krti režim mikrorezanja keramike [7].

3. RAZVOJ MEHANIZMA KOD MIKRO-OBRADE

3.1. Objašnjavanje mehanizma na principu mehanike loma

Merenjem tvrdoće utiskivačem, može se porediti interakcija između alata i obratka koji je „krt“ (razne vrste keramike, staklo, ...). Prilikom normalnog dejstva utiskivača (*Vickers*) na obradak, javlja se plastična zona i razvoj dva sistema prslina, koje se mogu analizirati. Prema *Bernardino*-u [8], ispod utiskivača se mogu uočiti tri različite zone (slika 4). Neposredno ispod kontakta utiskivača i obratka, nalazi se zona *hidrostatičkog pritiska* (*hydrostatic core*), koja pretenduje drobljenju. Nju okružuje zona visokih napona, koji se javljaju kao posledica sabijanja materijala, u okviru koje se mogu javiti prve prsline unutar materijala, koje kasnije mogu dovesti do njegovog odvajanja. Izvan zone visokih napona, materijal se ponaša elastično, pa se sa slobodom može reći da ovde važe zakoni linearno elastične mehanike loma.



Slika 4. Utiskivanje utiskivača u krti materijal: formiranje zone hidrostatičkog pritiska, kao i zone visokih napona [8].

Malkin [9] je predstavio dva sistema prslina koje se javljaju unutar materijala. Primenom teorije iz mehanike loma, Lawn [10] je za piramidalni utiskivač, predstavio odnos između dubine prslina i vrednosti sile kojom je deo opterećen.

Ukoliko se pored normalnog dejstva utiskivača, doda još i tangencijalno, može se detaljnije opisati uticaj prslina. Iz ovoga se može zaključiti da medijalne/radijalne prslina najveći uticaj imaju na degradaciju čvrstoće materijala, dok lateralne na količinu uklonjenog materijala.

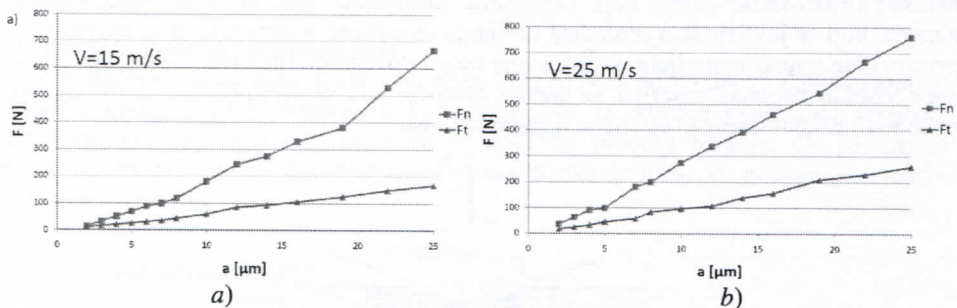
3.2. Objašnjavanje mehanizma na principu mašinske obrade

Princip mašinske obrade se zasniva na merenju sila koje se javljaju u toku procesa obrade i istovremenim posmatranjem topografije površine koja se dobila. Usled malih dubina rezanja, vrednosti sila nisu velike, ali zahteva se specifična oprema za njihovo identifikovanje (dinamometri). Kako bi se ovaj problem prevazišao, uveden je fundamentalan parametar koji je izveden iz merenja sila - specifična energija rezanja. Ona predstavlja neophodnu energiju koja je potrebna da se ukloni jedinična zapremina materijala. Wang [11] je predstavio odnos između dubine rezanja i specifične energije za više različitih materijala (svi imaju svojstva krih materijala). Sa povećanjem dubine rezanja u plastičnom (duktilnom) režimu, vrednost specifične energije rezanja naglo opada. Nakon prelaska u režim krtoeg rezanja, vrednost specifične energije ostaje približno konstantna. Zaključuje se da se najveći deo utrošene energije gubi na savladavanje plastičnih deformacija, a najmanje na odvajanje materijala, iako je zapremina uklonjenog materijala dosta veća u krtoem režimu rezanja. I naša istraživanja sprovedena pri obradi keramike potvrđuju ovaj fenomen.

Mikro-rezanje je sprovedeno na tople presovanoj aluminijum-oksidnoj keramici CM332, koja ima sledeća svojstva: gustina 3850 kg/m^3 , tvrdoća HRA 91, savojna čvrstoća $3 \div 3,5 \text{ MPa}$, koeficijent termalnog širenja $7,9 \div 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Eksperiment je izvršen sa brzinama rezanja 15 m/s i 25 m/s [12].

Analizom dobijene površine i vrednosti dužine tragova (slika 3), određena je kritična dubina rezanja od $6 \mu\text{m}$, u slučaju da vrednost brzine rezanja iznosi $V_s = 15 \text{ m/s}$ i $4 \mu\text{m}$ kada je njena vrednost $V_s = 25 \text{ m/s}$. Ovo znači da se sa povećanjem brzine rezanja, smanjuje kritična granica dubine rezanja, nakon koje nastaje režim krtoeg rezanja.

Promena normalne (F_n) i tangencijalne (F_t) komponente sile, u funkciji od dubine rezanja (a), pod navedenim režimima obrade prikazana je na slici 5.

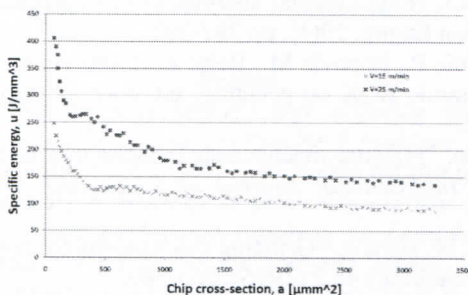


Slika 5. Promena normalne (F_n) i tangencijalne komponente sile (F_t), u funkciji od dubine rezanja (a): a) $v=15\text{m/s}$; b) $v=25\text{m/s}$ [12].

U režimu plastičnog deformisanja, normalna i tangencijalna sila rastu linerno sa porastom dubine rezanja sve do početka krtoeg razaranja. Ovo ukazuje da su sile i

energija rezanja uvećane uglavnom zbog plastičnog tečenja, čak i ako se veći deo materijala odstranjuje krtim lomom. Povećanjem brzine rezanja od 15 ÷ 25 m/s dovodi do porasta normalne sile za 15 ÷ 30% a tangencijalne za 40 ÷ 60%.

Rezultati za specifičnu energiju brušenja u funkciji prosečne površine poprečnog preseka prikazani su na slici 6. Pri tome se uočavaju dva različita režima. Ispod površine preseka od oko 380 μm^2 , što odgovara kritičnoj dubini od 6 μm , dolazi do naglog povećanja specifične energije pri manjim dubinama ($V_s=15$ m/s). Povećanjem površine preseka specifična energija opada sporije, odnosno veličina strugotine raste. Trend promene je istovetan i u slučaju brzine rezanja $V_s=25$ m/s, ali je veća specifična energija rezanja.



Slika 6. Specifična energija rezanja po jedinici zapremine odstranjenog materijala. [12].

Negativni efekat kod rezanja u krtom režimu je degradacija čvrstoće materijala, usled prodiranja prslina ispod dubine rezanja. Variranjem režima obrade, kao što su dubina rezanja i brzine rezanja, može se smanjiti, pa čak i eliminisati prodiranje prslina u dobijenu površinu. Arif [13] je odredio analitički model za određivanje kritične vrednosti brzine po zrnju, ispod koje neće doći do kritičnog rasta prslina.

4. ZAKLJUČAK

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu realizuju se istraživanja u oblasti mikro mašina i mikro-rezanja krtih materijala: keramike, mermera i granita.

U izvedenim istraživanjima rezanja keramike korišćen je pristup mašinske obrade koji nudi mogućnost opisivanja procesa odstranjivanja materijala i može se uspešno iskoristiti na kvantitativni način za realne operacije procesa brušenja. Za ispitivane keramike, utvrdjene su granične dubine prodiranja iznad kojih dolazi do krtog razaranja materijala. Poznavajući ugao razvoja radialnih prskotina za odgovarajuće dubine rezanja, može se upravljati procesom rezanja kako bi se ostvarilo ukrštanje prskotina a time i odvaljivali blokovi strugotine manjih dimenzija, odnosno postići bolji kvalitet površina.

Uporedo su merene sile rezanja i određivala specifična energija. Smanjenje u stopi odstranjivanja materijala rezultuje u manjoj količini nedeformisane (ne rezane) strugotine, uzrokujući veće tečenje a manje prisustvo krtog loma.

5. LITERATURA

- [1] Chae, J., S. S. Park, and T. Freiheit. "Investigation of micro-cutting operations." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46.3 (2006): 313-332.

- [2] Fang, F. Z., H. Wu, and Y. C. Liu. "Modelling and experimental investigation on nanometric cutting of monocrystalline silicon." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45.15 (2005): 1681-1686.
- [3] Liu, Kai, and Shreyes N. Melkote. "Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process." *International Journal of Mechanical Sciences* 49.5 (2007): 650-660.
- [4] Komanduri, R. "Some aspects of machining with negative rake tools simulating grinding." *International journal of machine tool design and research* 11.3 (1971): 223-233.
- [5] Tanovic Lj., *Aktuelna istraživanja u oblasti mikro-brušenja*, Budva, 2014.
- [6] Moriwaki, T., 1995, "Experimental analysis of ultra-precision machining," *Int. J. Japan Soc. Precision Engng*, 29(4), pp 287-290.
- [7] Tanovic Lj., Bojanic P., Popovic M., Belic Z., Trifkovic S., 2011, Mechanisms in oxide- carbide ceramic BOK 60 grinding, *Int. Jour. of Advanced Manufacturing Technology*, 133/2.
- [8] Chiaia, Bernardino. "Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter." *International Journal of Solids and structures* 38.44 (2001): 7747-7768.
- [9] Malkin, S., and T. W. Hwang. "Grinding mechanisms for ceramics." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 45.2 (1996): 569-580.
- [10] Lawn, Brian R., A. G. Evans, and D. B. Marshall. "Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system." *Journal of the American Ceramic Society* 63.9 10 (1980): 574-581.
- [11] Wang, Jiunn-Jyh Junz, and Yong-Yuan Liao. "Critical depth of cut and specific cutting energy of a microscribing process for hard and brittle materials." *Journal of Engineering Materials and Technology* 130.1 (2008): 011002.
- [12] Mladenovic, Goran, et al. "Experimental Investigation Of Micro-Cutting Mechanisms In Oxide Ceramic CM332 Grinding." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 137(3)-034502 (2015): 1-5
- [13] Arif, Muhammad, Mustafizur Rahman, and Wong Yoke San. "Analytical model to determine the critical feed per edge for ductile–brittle transition in milling process of brittle materials." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.3 (2011): 170-181.

STATE OF THE ART OF MICRO-CUTTING OF BRITTLE MATERIAL

Abstract

In the field of manufacturing technology, micro-cutting represents one of the most attractive subjects in nowadays. This paper presents an overview of research's in this field, highlighting the most influential factors, due to which the micro-cutting is different from the macro-cutting. These include: the impact of the tool edge radius, the effective negative rake angle, crystallographic structure of the material, etc. As the micro-cutting can be made in regime of ductile flaw, it is also presented the mechanisms by which one can determine the boundaries between brittle and ductile phenomenon.

Keywords: micro cutting, brittle material, brittle ductile transition