

## OBRADA GLODANJEM PODRŽANA ULTRAZVUKOM MILLING MACHINING SUPPORTED BY ULTRASONIC

Boban Stanić, Borislav Savković, Nenad Kulundžić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – MAŠINSTVO

**Kratak sadržaj** – Spoj konvencionalnog glodanja i ultrazvučne obrade, tačnije ultrazvučnih vibracija su rezultovale hibridnoj obradi pod nazivom ultrazvukom podržano glodanje. U ovom radu je pored opisa svake tehnologije, priložen niz eksperimenata u kojima se pored izlazne karakteristike dobijene konvencionalnim glodanjem i ultrazvukom podržanim glodanjem.

**Ključne reči:** Obrada glodanjem, obrada ultrazvukom, ultrazvukom podržano glodanje.

**Abstract** – The combination of conventional milling and ultrasonic machining, more precisely ultrasonic vibrations, resulted in a hybrid machining technology called ultrasonic assisted milling. In addition to the description of each technology, this paper is accompanied by a series of experiments comparing the output characteristics obtained by conventional milling and ultrasonic assisted milling.

**Keywords:** Milling, Ultrasonic Machining, Ultrasonic Assisted Milling.

### 1. UVOD

U savremenoj mašinskoj industriji, koja se rapidno razvija, iz dana u dan je sve veća potražnja za kvalitetnijim proizvodima, sa što kraćim vremenom izrade. Pod tim se podrazumeva, pored tačnosti izrade, kvaliteta obrađene površine i drugih izlaznih karakteristika, sam izbor materijala. Savremeni mašinski materijali koji poseduju vrhunske mehaničke osobine, poput Inconel 718, AISI 420 nerđajućeg čelika, staklo-keramike, titanijumovih legura, superlegure na bazi nikla i sl. se masovno koriste vazduhoplovnoj, raketnoj (svemirskoj), automobilskoj i drugim industrijama, pretežno u ekstremnim radnim uslovima, poput povišene temperature, korozione sredine, za odgovorne delove, delove pod konstantnim opterećenjem itd.

Naravno, tako dugovečni i kvalitetni materijali se veoma teško obrađuju, i samim tim predstavljaju ogroman problem konvencionalnim postupcima obrade. Ovaj problem je uslovio inteziviranje hibridne obrade, dakle spoj konvencionalnih postupaka obrade sa nekonvencionalnim postupcima. Jedan od mnogih hibridnih postupaka obrade, koji je i bio tema ovog rada, jeste ultrazvukom podržano glodanje. Suština ove obrade jeste ta, da se na alat ili obratak dovede ultrazvučna vibracija, male amplitude, reda veličine  $\mu\text{m}$  ili  $\text{nm}$ , i velike frekvencije, reda veličine  $\text{kHz}$ .

### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio docent dr Borislav Savković.

Mnoga eksperimentalna istraživanja, od kojih su neka i izložena, ukazala su na pogodnost i unapređenje izlaznih karakteristika ove obrade u poređenju sa konvencionalnim glodanjem.

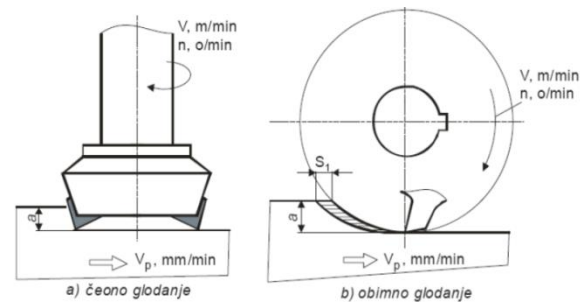
### 2. OBRADA GLODANJEM

Obrada glodanjem je zbog svoje univerzalnosti i produktivnosti jedna od najzastupljenijih tehnologija obrade rezanjem. Obrada glodanjem je postupak obrade ravnih površina, profilisanih kontura, žlebova, površina složenog i specijalnog oblika [1].

Glavno kretanje je obrtno kretanje alata definisano brzinom rezanja  $v$  [m/min]. Pomoćno kretanje je pravolinijsko kretanje predmeta obrade i/ili alata i određeno je brzinom pomoćnog kretanja ( $v_p = n \cdot s$  [mm/min] - aksijalnim pomeranjem u jedinici vremena), a može biti definisano korakom po zubu ( $s_f$  [mm/z] - aksijalnim pomeranjem za jedan zub alata) i korakom ( $s$  [mm/o] - aksijalnim pomeranjem za jedan obrt alata).

Prema rasporedu reznih elemenata alata razlikuju se dva postupka obrade glodanjem, koja su prikazana na slici 1:

- čeoно glodanje i
- obimno glodanje.

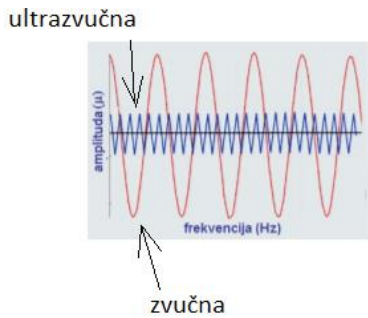


Slika 1. a) obimno glodanje, b) čeoно glodanje [1]

### 3. OBRADA ULTRAZVUKOM

Obrada ultrazvukom (*Ultrasonic Machining* -USM) je nekonvencionalni postupak obrade, a svoju primenu je pronašla za dimenzionalnu obradu tvrdih i krutih materijala. Pored toga, ultrazvučna obrada se koristi i za otklanjanje tragova prethodne obrade – poliranje, zaobljavanje oštih ivica, čišćenje delova i dr. Ultrazvuk se uspešno koristi i za inteziviranje drugih procesa obrade poput: ultrazvukom podržanog glodanja, bušenja, zavarivanja, livenja, plastičnog deformisanja i dr [2].

Ultrazvuk predstavlja elastične talase koji se prostiru određenom brzinom kroz gasovitu, tečnu i čvrstu sredinu, određenom amplitudom oscilacija i talasnom dužinom. Ultrazvuk je zvuk generisan iznad dometa ljudskog sluha, čija frekvencija je obično preko 20 kHz. Na slici 2 je data komparacija frekvencije i amplitude zvuka i ultrazvuka.



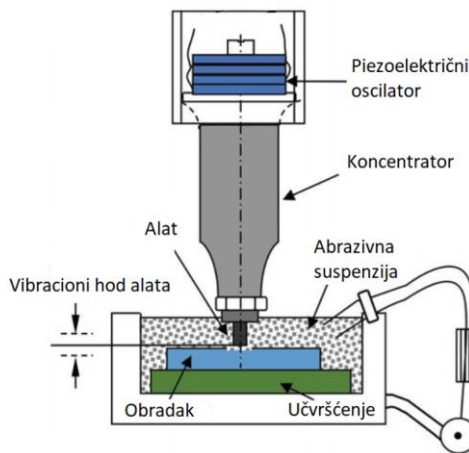
Slika 2. Frekvencija i amplituda kod ultrazvučne obrade

Brzina prostiranja zvučnih oscilacija  $c$ , zavisi od frekvencije oscilovanja  $f$  i dužine zvučnog talasa  $\lambda$ , tj. periode oscilovanja  $T$ , izražava se:

$$c = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

Pod ultrazvukom se smatraju mehaničke oscilacije visokih frekvencija, koje se dobijaju pomoću elektroakustičnog pretvarača – oscilatora. U oscilatoru se električna energija dobijena od visokofrekventnog generatora pretvara u zvučnu energiju, tj. u mehaničko oscilatorno kretanje. Postoje dve vrste oscilatora, magnetostriksijski i piezoelektrični oscilator.

Na slici 3 prikazana je šema osnovnih elemenata USM uređaja. Visokofrekventna električna energija može se pretvoriti u mehaničke vibracije s rezonantnom frekvencijom putem pretvarača. Pobuđena vibracija se potom prenosi kroz pojačivač ultrazvučnih oscilacija – koncentrator, kako bi se pojačala amplituda vibracije i dovela na vrh alata. Abrazivna suspenzija koja sadrži abrazivne čestice u fluidu konstantno se nalazu u zoni obrade. Tokom obrade u radnoj površini dolazi do velikog broja sitnih udara koji dovode do uklanjanja materijala.



Slika 3. Šema USM uređaja

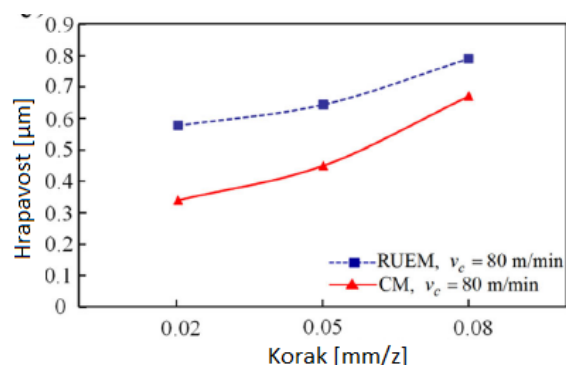
#### 4. ULTRAZVUKOM PODRŽANO GLODANJE

U mašinskoj industriji, tehnologija obrade glodanjem je zbog niza pogodnosti najzastupljeniji proces skidanja materijala. Kako se teži za što tačnijom obradom, potrebno je povećati vrednosti parametara obrade, poput brzine rezanja, pomaka i dubine rezanja. Sa povećanjem vrednosti parametara obrade, generiše se i veća toplotna energija tj. temperatura. Visoka temperatura rezanja nepovoljno utiče na kvalitet obrađene površine kao i na postojanost alata.

Ultrazvukom podržano glodanje (UPG) je napredni proces obrade koji kombinuje ultrazvučne vibracije kao pomoćni mehanizam u procesu glodanja. Razna istraživanja su pokazala da ultrazvukom podržano rezanje doprinosi smanjenju temperature i sile rezanja, zbog manjeg kontaktnog trenja između alata i obratka. Samim tim se postiže veća postojanost, koje može biti čak i do 40% veća, dok se hrapvost obrađene površine može smanjiti i do dva puta. Danas, vibracioni mehanizam se može instalirati direktno na rezni alat ili na radni sto. Vibracija je jedan od mehanizama koji se može koristiti za potpomaganje procesa obrade. Vibracija je oscilacija nekog tela oko njegovog statičkog tj. ravnožežnog položaja. Kada se vibracija male amplitude primeni na rezni alat ili obradak, to pozitivno utiče na proces obrade u poređenju sa istim, konvencionalnim postupkom. Piezoelektrični aktuator je jedan od uređaja koji mogu da proizvedu preciznu amplitudu vibracije (red veličine  $\mu\text{m}$  ili  $\text{nm}$ ) visoke frekvencije (red veličine  $\text{kHz}$ ) [3]. Neki od eksperimenata su uključili sledeće materijale: legure titanijuma, staklo-keramika, Inconel 718, AISI 420 nerđajući čelik, legure aluminijuma, staklo, od kojih će nekoliko biti priloženi u nastavku [4-9].

#### 4.1. Uticaj rotacionog ultrazvučnog eliptičnog bočnog glodanja (RUEM) na integritet površine Ti-6Al-4V

Legura titanijuma Ti-6Al-4V je izuzetno atraktivan materijal koji se koristi u vazduhoplovnoj industriji zbog odnosa snage-prema-težini, otpornosti na koroziju i zamor. Međutim, zbog slabe obradivosti, Ti-6Al-4V je podložan površinskom oštećenju i ima malu snagu zamora tokom mašinske obrade. Integritet površine ima važan uticaj na performanse, pouzdanost i trajnost proizvedenih komponenti. U radu [4] eksperiment je izvršen na četvorosnoj CNC glodalici (BV100) opremljenu držačem alata sa ultrazvučnim eliptoidnim vibracijama. Uticaj brzine rezanja i pomaka na hrapvost obrađene površine prikazan je na slici 4. Sa slike se vidi da se dobija bolja hrapvost obrađene površine tokom konvencionalnog glodanja (CM).

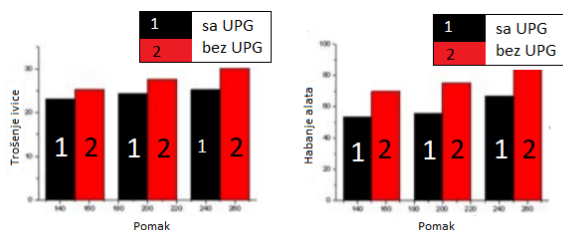


Slika 4. Uticaj pomaka na hrapvost obrađene površine

Pored ovog negativnog efekta u pogledu hrapavosti obrađene površine, autori su prikazali i pozitivan doprinos RUEMA. Vrednosti zaostalih pritisnih napona kod rotacionog ultrazvučnog eliptičnog glodanja (*Rotary Ultrasonic Elliptical Milling* – RUEM) mogu se menjati u uskom opsegu variranjem frekvencije vibracija i niži su nego kod CM.

## 4.2. Uticaj ultrazvukom podržanog glodanja pri obradi stakla-keramike

U procesima rezanja staklo-keramike, visoka temperatura se brzo nakuplja oko rezne ivice alata zbog samog kontakta između obratka i alata kao i zbog vrlo loše toplotne provodljivosti obratka. Slika 5 pokazuje poređenje trošenja ivice i habanja alata nasuprot pomaka sa i bez UPG, pri korišćenju reznog fluida rastovrljivog u vodi [5].

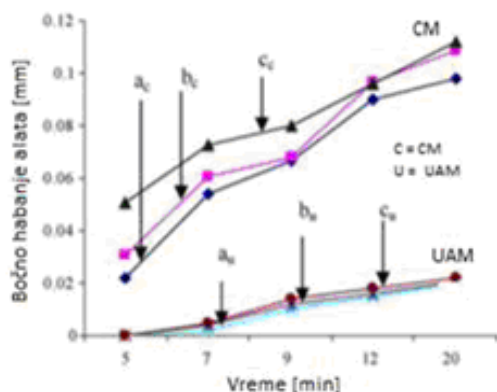


a) Trošenje ivice i pomak b) Habanje alata i pomak

Slika 5. Poređenje trošenja ivice i habanja alata

## 4.3. Izvodljivost ultrazvukom podržanog glodanja za obradu komponenti u vazduhoplovnoj industriji

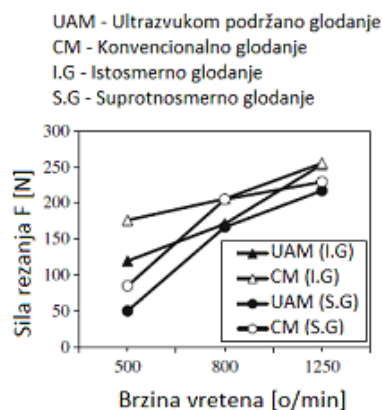
Superlegure su našle svoju primenu za izradu delova namenjenim za rad u ekstremnim uslovima. 80 % upotrebe superlegura kao što su Inconel 718 i titanijum su pronašli u vazduhoplovnoj industriji [6]. Sila rezanja je ključna promenljiva koja se primenjuje kao indikator habanja alata među indirektnim metodama praćenja habanja putem interneta. Rezultati eksperimenta su prikazani na slici 6.



Slika 6. Habanje alata u zavisnosti od vremena za CM i UAM procese pri pomaku od 0,1 mm/o

## 4.4 Uticaj ultrazvučnih vibracija na bočno glodanje AISI 420 nerđajućeg čelika

AISI 420 martenzitni nerđajući čelik se široko koristi na mestima za koje je kombinacija otpornosti na koroziju i velike čvrstoće neophodna, poput lopatica turbina, vratila, propelera i hirurških instrumenata [7]. U ovom eksperimentu model sile rezanja jednosmernog UAM-a je predstavljen i ultrazvukom podržano glodanje je primenjeno za ispitivanje sile rezanja i kvaliteta obrađene površine u različitim uslovima rezanja. Sa slike 7 se vidi da su sile rezanja kod UAM manje nego kod CM, i to za pomak  $afz = 0.05 \text{ mm/z}$  iznosi 19 %.



Slika 7. Uticaj brzine vretena i smera glodanja na silu rezanja pri pomaku od  $afz = 0.05 \text{ mm/z}$

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

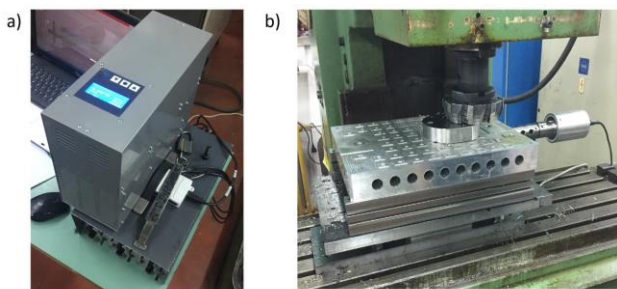
Praktični deo ovog rada predstavlja eksperiment koji je izvršen u laboratoriji za procese obrade rezanjem, smeštene na Departmanu za proizvodno mašinstvo. U ovom eksperimentu je usvojena izvedba UAM-a, gde se vibracija dovodi na radni predmet, leguru titanijuma. Cilj eksperimenta je bio da se uporede izlazne karakteristike, srednja aritmetička hrapavost i maksimalna hrapavost merena u deset tačaka, između konvencionalnog glodanja i ultrazvukom podržanog glodanja.

Eksperiment je izvršen na vertikalnoj glodalici "PRVOMAJSKA" FSS-GVK-3. Korišćena glava za čeonu glodanje "JUGOALAT" G.715  $\phi 125 \text{ mm}$ , sa mehanički pričvršćenim reznim pločicama, sledećih karakteristika: broj zuba  $z = 8$ , napadni ugao  $\kappa = 75^\circ$ , grudni ugao  $\gamma = 7^\circ$  i ledni ugao  $\alpha = 18^\circ$ . Kao rezni alat korišćene su rezne pločice kompanije TaeguTec, oznake SPKR 1203 EDR – EM TT8020, presvučene TiCN. Svi eksperimenti su izvođeni sa jednozubim alatom, tj. sa jednom reznom pločicom ( $z = 1$ ). Obradak je legura titanijuma, a njen hemijski sastav i mehaničke osobine su date u Tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav i mehaničke osobine legure titanijuma

Hemijski element	C	N	H	Al	V	O
Udeo [%]	0.10	0.05	0.015	5.5÷6.75	3.5÷4.5	0.20
Osobina	Zatezna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]		Pritisna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]		Elongacija 4D	Smanjenje površine
Vrednost	895		828		18	25

Generator koji je korišćen za ovaj eksperiment je proizvođača MPI, snage 2 kW, prikazan na slici 8a). Visokofrekventni generator šalje osilatorsku električnu energiju, koja se pomoću pretvarača i sonotrode pretvara u mehaničku vibraciju i dovodi na obradak. Između radnog stola i obratka se nalazi vibraciona ploča, koja je prvenstveno dizajnirana za rad na erozimat, slika 8b). Vrednosti su praćene pomoću softvera Ultrasonic Cleaning Generator DSS.



Slika 8. a) visoko-frekventni generator i b) vibraciona ploča

Pored vibracione ploče (izrađena od Al7075) u prikazanom sklopu centralno mesto zauzimaju i vibracioni nosači (izrađeni od 316L prohm) koji imaju za cilj da spreče dalji prenos vibracija ka stolu glodalice.

Vrednost parametara generatora se mogu kontrolisati pomoću softvera Ultrasonic Cleaning Generator DSS, koji je prikazan na slici 9.



Slika 9. Ultrasonic Cleaning Generator DSS

Za potrebe ovog istraživanja, tj. merenja hrapavosti obrađene površine, korišćen je uređaj MarSurf PS1, sa mernim rasponom od 350  $\mu\text{m}$  (-200  $\mu\text{m}$  do 150  $\mu\text{m}$ ).

U tabeli 2 su dati konstantni parametri eksperimenta. Eksperiment je izvršen bez sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Tabela 2. Parametri eksperimenta

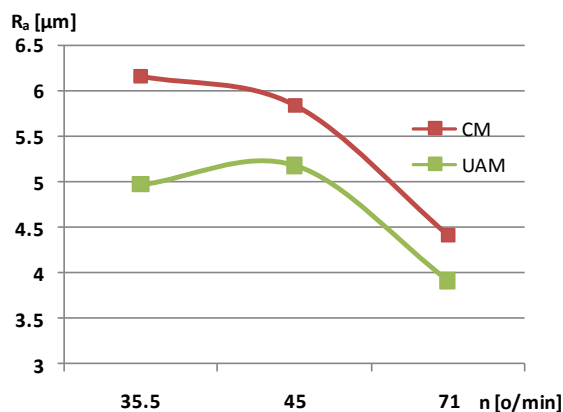
Parametar	Vrednost
Dubina rezanja [mm]	0.5
Pomak [mm/min]	25
Snaga [kW]	1.6
Amplituda [ $\mu\text{m}$ ]	10÷15
Frekvencija [kHz]	20.85

## 5.1. Rezultati i diskusija

U tabeli 3 su prikazane dobijene vrednosti hrapavosti. Na slici 10 je prikazana vrednost srednje aritmetičke hrapavosti  $R_a$  pri različitim brojevima obrtaja vretena dobijena konvencionalnim glodanjem (CM) i ultrazvukom podržanim glodanjem (UAM).

Tabela 3. Vrednosti srednje aritmetičke hrapavosti

Broj obrtaja [o/min]	Srednja aritmetička hrapavost [ $\mu\text{m}$ ]	
	CM	UAM
35.5	6.157	4.965
45	5.838	5.171
71	4.404	3.906



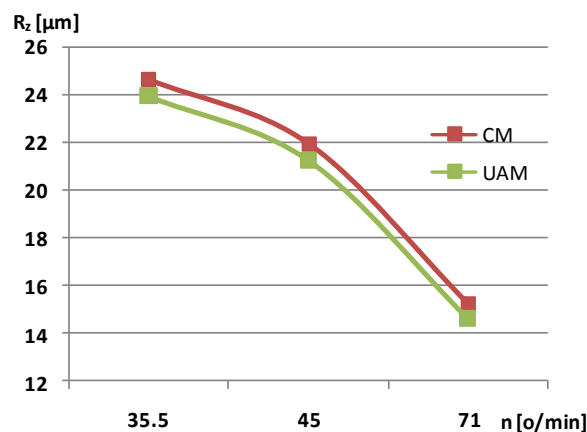
Slika 10. Srednja aritmetička hrapavost  $R_a$

Sa slike se jasno vidi da se postižu bolje vrednosti hrapavosti pri UAM-u, a generalno se hrapavost smanjuje sa povećanjem broja obrtaja vretena.

U tabeli 4 su date vrednosti dobijene maksimalne hrapavosti merene u deset tačaka. Slika 11 prikazuje vrednost maksimalne hrapavosti merene u deset tačaka  $R_z$  pri različitim brojevima obrtaja vretena, dobijena konvencionalnim glodanjem (CM) i ultrazvukom podržanim glodanjem (UAM).

Tabela 4. Vrednosti maksimalne hrapavosti merene u deset tačaka

Broj obrtaja [o/min]	Maksimalna hrapavost merena u deset tačaka [ $\mu\text{m}$ ]	
	CM	UAM
35.5	24.6	23.9
45	21.9	21.2
71	15.2	14.6



Slika 11. Maksimalna hrapavost merena u deset tačaka  $R_z$

Sa slikom 10 i 11 vidi se da je postignuta manja hrapavost kod UAM obrade u odnosu na CM. U eksperimentu su varirane samo minimalne brzine rezanja iz razloga što pri višim brzinama dolazi do oštećenja rezne pločice usled povišenih temperatura rezanja. Može se zaključiti da eksperimentalna izvedba donosi nižu hrapavost pri obradi navedene legure titanijuma, što nije bio slučaj u radu [4].

## 6. ZAKLJUČAK

Sa razvojem mašinske industrije, rastu i apetiti kupaca. Ne samo u pogledu potrebnog vremena za izradu željenog proizvoda i kvaliteta izrade, već i pri izboru materijala. Novi materijali se pojavljuju na tržištu sa sve boljim mehaničkim osobinama, što otežava njihovu obradivost. Teško obradivi materijali zahtevaju pojačane radne uslove koji se stavljaju pred mašinu, i to u vidu povećanih sila rezanja, pomaka i brzina rezanja. Povećanje radnih uslova rezultira povećanoj radnoj temperaturi što veoma nepogodno utiče na izlazne karakteristike obrade. Stoga, teži se ka inteziviranju hibridnih procesa obrade.

Obrada savremenih materijala konvencionalnim glodanjem je moguća, ali po cenu dužeg vremena izrade, intezivnog habanja alata, smanjene tačnosti i kvaliteta obrađene površine, povećanih sila rezanja i još mnogo faktora. Da bi se ovi faktori smanjili, došlo je do spoja dva, konvencionalna i nekonvencionalna postupka obrade, glodanje i ultrazvučna obrada, u jednu funkcionalnu celinu nazvanu ultrazvukom podržano glodanje (Ultrasonic Assisted Milling – UAM).

Neki od savremenih materijala koji su bili obrađeni ultrazvukom podržanim glodanjem su Inconel 718, AISI 420 nerđajući čelik, legure titanijuma, superlegure na bazi nikla, staklo-keramika i dr. su dali jasne rezultate kako konstantan dovod vibracije može pozitivno uticati na njihovu obradivost i same izlazne karakteristike. Razlog tome je što vibracija utiče na učestalije odvajanje kontaktne površine alat – obradak, a samim tim dolazi do boljeg protoka sredstva za hlađenje i podmazivanje i odvođenja akumulirane radne toplote.

Može se zaključiti da je glodanje podržano ultrazvukom dobra tehnologija obrade i da se najbolji rezultati postižu u eksperimentima u kojima je predmet obrade bilo staklo. Iz ovoga se može zaključiti da je UAM najpogodniji za obradu tvrdih i krutih materijala.

## 7. LITERATURA

- [1] D. Milikić, M. Gostimirović, M. Sekulić: *Osnove tehnologije obrade rezanjem*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [2] M. Gostimirović: *Nekonvencionalni postupi obrade*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2009.
- [3] A. Latif: *Experimental study of biomedical stainless steel 316L vibration assisted milling using retrofittable 1D UVAM worktable*, Faculty of Mechanical and Manufacturing Engineering, Johor, 2017.
- [4] J. Liu, X. Jiang, X. Han, Z. Gao, D. Zhang: *Effects of rotary ultrasonic elliptical machining for side milling on the surface integrity of Ti-6Al-4V*, School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing, 2018.

- [5] S. Lin, C. Kuan, C. She, W. Wang: *Application of Ultrasonic Assisted Machining Technique for Glass-Ceramic Milling*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol:9, No:5, 2015.
- [6] M. Hafiz, M. Kawaz, W. Mohamad, M. Kasim, R. Izamshah, J. Saedon, S. Mohamed: *A review on feasibility study of ultrasonic assisted machining on aircraft component manufacturing*, Faculty of Manufacturing Engineering, Malaysia, 2017.
- [7] M. M. Abootorabi Zarchi, M. R. Razfar, A. Abdullah: *Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel*, Faculty of Mechanical Engineering, Teheran, 2012.
- [8] J. Zhang, H. Li, J. Wang, X. Wang, X. Shen: *Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy*, Department of Mechanical Engineering, Jinan, 2012.
- [9] J. Xiaoliang, X. Bouyan: *Experimental study on surface generation in vibration-assisted micro-milling of glass*, Oklahoma State University, Stillwater, 2015.

### Kratka biografija:



**Boban Stanić** rođen je u Vrbasu 1994. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka, smer Proizvodno mašinstvo 2017. god. Master studije upisao je iste godine na usmerenju CIM.



**Borislav Savković** rođen je u Novom Sadu 1982. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2015. god. gde je i zasnovao radni odnos u zvanju docenta. Oblast interesovanja su procesi obrade skidanjem materijala, simulacije kao i ekološko tehnološki sistemi.



**Nenad Kulundžić** rođen je u Kraljevu 1988. god. Diplomski-master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Proizvodnog mašinstva iz predmeta Visokoproduktivne obrade odbranio je 2013.god. Od 2018. je u zvanju istraživača saradnika.