

Jovanović Pešić, Ž., Džunić, D., Pešić, M., Milenković, S., Kostić, S., Kočović, V.

**UTICAJ BRZINE ALATA NA KARAKTERISTIKE MATERIJALA KOD POVRŠINSKE  
OBRADE TRENJEM - PREGLED**

**Rezime:** Površinska obrada trenjem (eng. Friction Stir Processing - FSP) je jedna od vodećih tehnika za proizvodnju površinskih kompozita. FSP se koristi za poboljšanje mehaničkih, triboloških, korozionih i drugih svojstava materijala kao što su aluminijum, magnezijum, bakar, čelik, itd. U ovom preglednom radu analiziran je uticaj brzine alata (rotacione brzine i transverzalne brzine) na mikrotvrdocrnu kompozitnih materijala dobijenih postupkom površinske obrade trenjem.

**Ključne reči:** površinska obrada trenjem, brzina alata, kompozitni materijali

**1. UVOD**

Površinska obrada trenjem, kao varijacija friкционog zavarivanja mešanjem (eng. Friction Stir Welding - FSW) razvijena je 1999. godine [1]. Značajan broj istraživača analizira i ispituje formiranje površinskih kompozita procesom površinske obrade trenjem. U prvoj deceniji dvadeset prvog veka broj radova iz ove oblasti bio je manji od 50 radova po godini, dok je u poslednjih pet godina taj broj veći od 350 rada po godini (slika 1.).

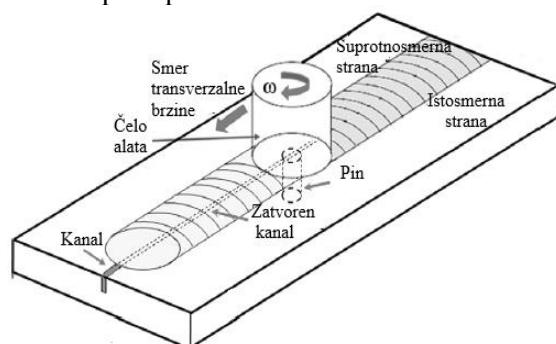


Sl. 1. Broj publikovanih radova na temu površinske obrade trenjem

Prednost površinske obrade trenjem se ogleda u tome što je temperatura obrade niža od temperature topljenja osnovnog materijala [2, 3]. FSP se primenjuje za poboljšanje mehaničkih, triboloških, korozionih i drugih svojstava materijala poput aluminijuma, magnezijuma, bakra i drugih [4]. Površinska obrada trenjem koristi se i za uklanjanje površinskih defekata, poput pukotina i pora [5]. Sa druge strane, karakteristike prevlaka dobijenih FSP postupkom zavise od vrste i svojstava ojačavača, kao i od samih parametara procesa.

**2. FSP PRINCIP RADA**

FSP radi na osnovnom principu FSW [6]. Na radnom komadu koji se obrađuje površinskom obradom trenjem razlikujemo istosmernu i suprotnosmernu stranu [7, 8]. Kod FSP postupka koriste se dve vrste alata: alat sa pin-om i alat bez pin-a. Alat koji vrši rotaciono kretanje, prodire u radni komad dok čelo alata i radni komad ne ostvare kontakt. Kao posledica kontakta čela alata i radnog komada dolazi do trena između alata i radnog komada usled čega dolazi do lokalnog zagrevanja [7-9]. Kada se dostigne odgovarajuća temperatura, alat započinje transverzalno kretanje u željenom pravcu. Rotaciono i transverzalno kretanje alata omogućava mešanje ojačavača i osnovnog materijala, na taj način formirajući površinski kompozit. Na slici 2 prikazan je princip rada FSP postupka.

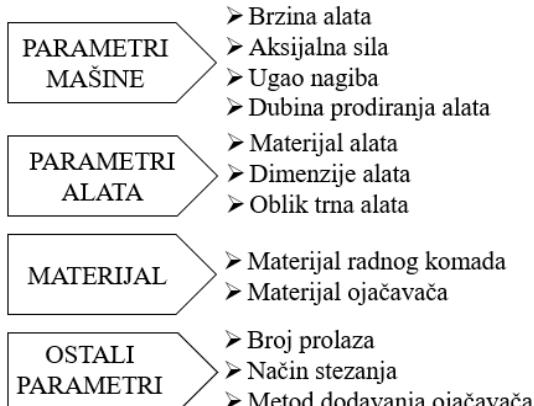


Sl. 2. FSP postupak – princip rada

**3. FSP PARAMETRI PROCESA**

Kod površinske obrade trenjem, različiti parametri utiču na kvalitet finalnog kompozita. FSP parametre procesa možemo podeliti u četiri celine: parametre mašine, parametre alata, materijala i ostale parametre. Asadi i ostali [10] u svom radu su proučavali uticaj različitih

parametara procesa kao što su menjanje broja prolaza i smera rotacije alata i utvrdili su da promena smera rotacije alata dovodi do smanjenja veličine zrna kompozita kod kog je ojačavač AZ91. Isti autori su otkrili da promena parametara procesa dovodi do povećanja tvrdoće materijala sa 63 HV na 98 HV. Arora i ostali [11] su proučavali kako brzina rotacije i broj prolaza tokom površinske obrade trenjem utiču na svojstva materijala. Kod legure AE42 (legura na bazi magnezijuma) promena parametara procesa dovele je do povećanja tvrdoće. Slika 3 prikazuje različite parametre FSP procesa.



Sl. 3. Uticajni parametri FSP procesa

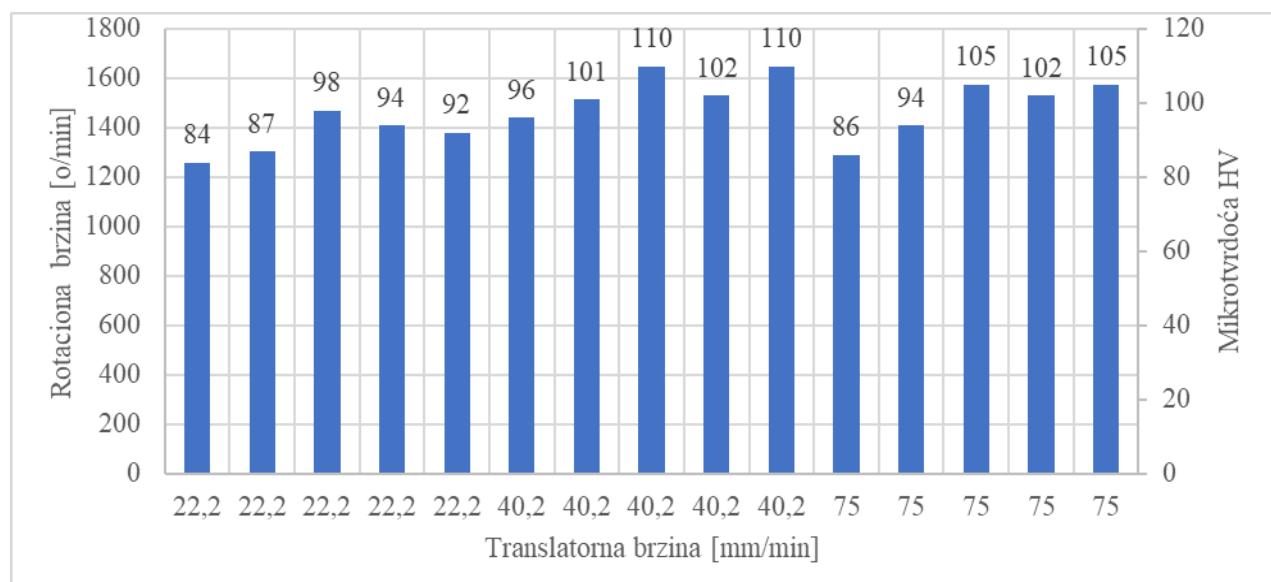
#### 4. BRZINA ALATA

Postoje dve vrste brzina koje se mogu menjati tokom postupka površinske obrade trenjem: brzina rotacije alata i transverzalna brzina [12]. Brzina

rotacije je brzina kojom alat rotira oko svoje ose, dok transverzalna brzina sluzi za kretanje alata duž ose radnog komada. Rotacija ili brzina rotacije mogu biti u smeru kazaljke na satu ili suprotno smeru kazaljke na satu. Kod FSP postupka, pravilan izbor brzine rotacije alata i transverzalne brzine je veoma bitan. Povećanjem brzine rotacije i smanjenjem transverzalne brzine, stvara se više topote u zoni obrade što može dovesti do rasta zrna i daljeg omekšavanja materijala [13]. S druge strane, smanjena brzina rotacije alata i povećana transverzalna brzina uzrokuju nedovoljnu količinu generisane topote. Dakle, obe brzine treba izabrati u odgovarajućim granicama da bi se proizvela dovoljna količina topote, a da pritom ne dođe do prevelikog omekšavanja materijala. Uticaj različite kombinacije brzine rotacije i transverzalne brzine na svojstva materijala biće razmatrani dalje u radu.

#### 4.1 Uticaj brzine na tvrdoću

U radu [14] autori su površinskom obradom trenjem obrađivali ploču koja je dobijena livenjem legure A319. Prilikom obrade varirali su vrednosti za tri translatorne i pet rotacionih brzina alata. Vrednosti translatornih brzina bile su: 22.2 mm/min, 40.2 mm/min i 75 mm/min. Dok su vrednosti brzina rotacije bile u opsegu od 800 do 1600 o/min (slika 4.).



Sl. 4. Prikaz vrednosti mikrotvrdoće u zavisnosti od brzine

Kao što se može videti sa slike 4, kada je translatorna brzina 22.2 mm/min, najveća vrednost mikrotvrdoće je pri rotacionoj brzini od 1200 o/min. Ta zakonitost se može uočiti i kod druga

dva slučaja promene translatorne brzine. Sa aspekta produktivnosti najbolja kombinacija translatorne brzine i rotacione brzine je 75 mm/min i 1200 o/min, pri tome da vrednost

mikrotvrdoće iznosi  $105 \text{ kg/mm}^2$ .

Kwon i ostali su dokazali da smanjenje brzine rotacije alata sa 1840 o/min, preko 1350 o/min i 980 o/min do 560 o/min, uz konstantnu vrednost translatorne brzine (155 mm/min) dovodi do povećanja tvrdoće od 40% [15].

Kod legure aluminijuma A1050 koja je ojačana SiC, uz optimalne vrednosti brzina dolazi do povećanja tvrdoće četiri puta u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala. Autori su u radu [16] varirali 3 vrednosti translatorne brzine (15, 20 i 30 mm/min), kao i tri brzine rotacije (500, 700 i 1000 o/min). Najbolje vrednosti tvrdoće dobijene su pri brzinama od 15 mm/min i 1000 o/min. Vrednost tvrdoće je sa 37 HV (legura A1050), porasla na 150 HV (legura A1050 ojačana SiC i tretirana postupkom površinske obrade trenjem).

Parametri procesa su jedan od glavnih faktora koji utiču na proces obrade. Uticaj parametara procesa pri proizvodnji AZ91/SiO<sub>2</sub> kompozita ispitivan je u radu [17]. Brzina rotacije je konstantna i iznosi 1250 o/min uz variranje tri translatorne brzine (20, 40, 63 mm/min). Debljina ploče od legure magnezijuma je 8 mm. Rezultati pokazuju da je povećanjem translatorne brzine, veličina zrna značajno smanjena i tvrdoća porasla. Maksimalna tvrdoća postignuta u ovom eksperimentu bila je 124 HV i minimalna veličina zrna od 8 mm.

Površinska obrada trenjem legure AZ31, povećaće tvrdoću obrađenog materijala 2 puta u odnosu na osnovni materijal [18].

Obrada trenjem sa mešanjem je korišćena za proizvodnju AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanokompozita [19]. Povećanjem brzine rotacije, kao rezultat većeg unosa toplote, povećana je veličina zrna osnovne legure uz bolju distribuciju nanočestica. Prosečna veličina zrna matrice kompozita bila je u rasponu od 1–5 μm, a njihova mikrotvrdoća je bila 85–92 HV.

Fuleren je uspešno deponovan u A5083 obradom trenjem sa mešanjem [20]. Tvrdoća je značajno povećana. Parametri obrade: brzina rotacije 500–2000 o/min i translatorna brzina 50 mm/min.

## 5. ZAKLJUČAK

Izbor parametara brzine povećava tvrdoću kompozitnih materijala dobijenih površinskom obradom trenjem. Optimalnim izborom brzine rotacije i translatorne brzine može se i do 20%, povećati vrednost mikrotvrdoće kod legura poput A319.

Smanjenjem brzine rotacije 3 puta dovodi do povećanja tvrdoće za 40%.

U radu je pokazano da pored uticaja na tvrdoću

i mikrotvrdoću brzina rotacije i translatorna brzina utiču na veličinu zrna i na pravilnu distribuciju čestica ojačavača u osnovni materijal.

## 6. LITERATURA

- [1] Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFadden, S.X., Mara, N.A., Mukherjee, A.K.: *High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy*. Scripta Materialia, Volume 42, p.p. 163–168, 1999.
- [2] Zykova, A.P., Tarasov, S.Yu., Chumaevskiy, A.V., Kolubaev, E.A.: *A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials: Process, Properties, and Methods*. Metals, Volume 10, p.p. 772, 2020.
- [3] Mishra, R.S., De, P.S., Kumar, N.: *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [4] Rathee, S., Maheshwari, S., Siddiquee, A.N.: *Issues and strategies in composite fabrication via friction stir processing: A review*. Materials and Manufacturing Processes, Volume 33, p.p. 239–261, 2018.
- [5] Bharti, S., Ghetiya, N.D., Patel, K.M.: *A review on manufacturing the surface composites by friction stir processing*. Materials and Manufacturing Processes, Volume 36, p.p. 135–170, 2021.
- [6] Węglowski, M.S.: *Friction stir processing – State of the art*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 18, p.p. 114–129, 2018.
- [7] Rathee, S., Maheshwari, S., Siddiquee, A.N.: *Issues and strategies in composite fabrication via friction stir processing: A review*. Materials and Manufacturing Processes, Volume 33, p.p. 239–261, 2018.
- [8] Heydarian, A., Dehghani, K., Slamkish, T.: *Optimizing Powder Distribution in Production of Surface Nano-Composite via Friction Stir Processing*. Metall Mater Trans B, Volume 45, p.p. 821–826, 2014.
- [9] Nelaturu, P., Jana, S., Mishra, R.S., Grant, G., Carlson, B.E.: *Influence of friction stir processing on the room temperature fatigue cracking mechanisms of A356 aluminum alloy*. Materials Science and Engineering: A, Volume 716, p.p. 165–178, 2018.
- [10] Asadi, P., Givi, M.K.B., Parvin, N., Araei, A., Taherishargh, M., Tutunchilar, S.: *On the role of cooling and tool rotational direction on microstructure and mechanical properties of friction stir processed AZ91*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 63, p.p.

- 987–997, 2012.
- [11] Arora, H.S., Singh, H., Dhindaw, B.K.: *Parametric Study of Friction Stir Processing of Magnesium-Based AE42 Alloy*. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 21, p.p. 2328–2339, 2012.
- [12] Mishra, R.S., De, P.S., Kumar, N.: *Fundamental Physical Metallurgy Background for FSW/P*, in: *Friction Stir Welding and Processing*. Springer International Publishing, Cham, p.p. 59–93, 2014.
- [13] Sathiskumar, R., Murugan, N., Dinaharan, I., Vijay, S.J.: *Effect of Traverse Speed on Microstructure and Microhardness of Cu/B4C Surface Composite Produced by Friction Stir Processing*. Transactions of the Indian Institute of Metals, Volume 66, p.p. 333–337, 2013.
- [14] Karthikeyan, L., Senthilkumar, V.S., Padmanabhan, K.A.: *On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy*. Materials & Design, Volume 31, p.p. 761–771, 2010.
- [15] Kwon, Y.: *Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process*. Scripta Materialia, Volume 49, p.p. 785–789, 2003.
- [16] Kurt, A., Uygur, I., Cete, E.: *Surface modification of aluminium by friction stir processing*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 211, p.p. 313–317, 2011.
- [17] Khayyamin, D., Mostafapour, A., Keshmiri, R.: *The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO<sub>2</sub> composite fabricated by FSP*. Materials Science and Engineering: A, Volume 559, p.p. 217–221, 2013.
- [18] Chang, C.I., Du, X.H., Huang, J.C., 2007. *Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by friction stir processing*. Scripta Materialia, Volume 57, p.p. 209–212, 2007.
- [19] Azizieh, M., Kokabi, A.H., Abachi, P.: *Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites fabricated by friction stir processing*. Materials & Design, Volume 32, p.p. 2034–2041, 2011.
- [20] Morisada, Y., Fujii, H., Nagaoka, T., Nogi, K., Fukusumi, M.: *Fullerene/A5083 composites fabricated by material flow during friction stir processing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 38, p.p. 2097–2101, 2007.

**Autori:** Istr. sar. Živana Jovanović Pešić<sup>1</sup>, Vanr. Prof. Dr Dragan Đžunić<sup>1</sup>, Istr. sar. Miloš Pešić<sup>2</sup>, Istr. sar. Strahinja Milenković<sup>1</sup>, Prof. strukovnih studija dr Sonja Kostić<sup>3</sup>, Doc. dr Vladimir Kočović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija, Telefon: +381 34 335 990, Fax: +381 34 333 192;

<sup>2</sup>Univerzitet u Kragujevcu, Institut za informacione tehnologije, Jovana Cvijića bb, 34000 Kragujevac, Srbija, Telefon: +381 34 6100195;

<sup>3</sup>Akademija strukovnih studija Šumadija, Kosovska 8, 34000 Kragujevac, Telefon: +381 34 381418.

E-mail: [zixi90@gmail.com](mailto:zixi90@gmail.com)

[dzuna@kg.ac.rs](mailto:dzuna@kg.ac.rs)

[milospesic@uni.kg.ac.rs](mailto:milospesic@uni.kg.ac.rs)

[strahinja.milenkovic@fink.rs](mailto:strahinja.milenkovic@fink.rs)

[skostic@asss.edu.rs](mailto:skostic@asss.edu.rs)

[vladimir.kocovic@kg.ac.rs](mailto:vladimir.kocovic@kg.ac.rs)