

Mitrović S., Babić M., Živić F., Bobić I.

NANOTRIBOLOŠKA ISPITIVANJA KOMPOZITA SA OSNOVOM OD ZA-27 LEGURE OJAČANE ČESTICAMA Al_2O_3

Rezime: U radu su prikazani rezultati nanotriboloških ispitivanja domaćih kompozitnih materijala sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al_2O_3 veličina $250 \mu m$ u količinama od 3, 5 i 10 mas.%. Tribološka ispitivanja su izvršena na ball on block nano tribometru sa lineranim kretanjem. Tokom ispitivanja varirana su četiri nivoa normalnog kontaktnog opterećenja (10 mN, 50 mN, 100 mN i 120 mN) i tri nivoa brzine klizanja (10 mm/s, 20 mm/s i 30 mm/s), u uslovima bez podmazivanja.

Ispitivani kompozitni materijali sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al_2O_3 dobijeni su kompokasting postupkom. Kao ojačivač korišćen je prah Al_2O_3 veličine čestica $250 \mu m$. Čestice Al_2O_3 su infiltrirane tokom mešanja metalne osnove u poluočvrslom stanju. Čestice su infiltrirane u količinama od 3, 5 i 10 mas.%.

U radu je dat izgled mikrostruktura dobijenih kompozitnih materijala i njihova mikrogeometrija.

Na osnovu sprovedenih triboloških ispitivanja formirane su analitičke i grafičke zavisnosti promene koeficijenta trenja od uslova ispitivanja (brzine klizanja i normalnog opterećenja) za ispitivane materijale.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da je promenom masenog udela čestica ojačivača Al_2O_3 moguće uticati na tribološke karakteristike ispitivanih kompozita sa osnovom od ZA-27 legure.

Ključne reči: Kompoziti, Legura ZA-27, Al_2O_3 , Koeficijent trenja, Nanotribologija

NANOTRIBOLOGY INVESTIGATIONS OF COMPOSITES BASED ON ZA-27 ALLOY REINFORCED BY Al_2O_3 PARTICLES

Abstract: Results of tribological investigations of composites based on ZA-27 alloy, reinforced with Al_2O_3 particles of $250 \mu m$ size, with three different mass shares percentage as follows: 3 %, 5 % and 10 %, are presented in this paper. Tribological investigations are realised on ball on block nanotribometer with linear reciprocating module setup. Four levels of normal contact loads are varied during testing (10 mN, 50 mN, 100 mN and 120 mN) and three levels of speed (10 mm/s, 20 mm/s and 30 mm/s), with no lubrication.

Tested composite materials with ZA-27 alloy base, reinforced with Al_2O_3 particles are obtained by compocasting method. Al_2O_3 powder, with $250 \mu m$ size of particles, is used for reinforcement. Al_2O_3 particles are infiltrated during the mixing of metal base in semi-solid phase. Particles are infiltrated in quantities of 3, 5 and 10 mass percentage.

All the tests were statistically processed and represented by the corresponding diagrams. By analysis of the obtained results of the tribological investigations for the composite materials the correlation dependencies were obtained in the exponential form.

The tested composite materials, reinforced by the Al_2O_3 particles exhibit significantly smaller friction coefficient, with respect to the substrate.

Results of experimental investigations show that by the change of the mass share of Al_2O_3 particles, can positively influence in the sense of improving the tribological characteristics of the tested composites with the ZA-27 alloy as a substrate.

Keywords: Composites, ZA-27 alloy, Al_2O_3 particles, Friction coefficient, Nanotribology

1. UVOD

Poslednjih desetak godina kao jedan od naprednih tribomaterijala sve više se istražuju kompoziti zbog svojih dobrih mehaničkih i triboloških svojstava. Pravilnom supstitucijom materijala sa adekvatnim kompozitnim materijalom, moguće je smanjiti tribološke gubitke, kako direktne tako i indirektno, i na taj način ostvariti uštede, čiji efekti mogu biti značajni.

Kompoziti sa metalnom matricom (MMC – Metal Matrix Composites) predmet su interesovanja iz razloga što su sposobni da obezbede veću otpornost na habanje, više temperaturne granice od njihovih osnova, povećanu čvrstoću, krutost, toplotnu provodljivost i dimenzijonu stabilnost. Kod kompozita sa metalnom matricom osnovu (matricu) najčešće čini legura, ređe čist metal, a ojačivač se sastoji od ugljeničnih, metalnih ili keramičkih dodataka.

Kao jedna od legura koja se može uspešno koristiti za izradu kompozita sa metalnom matricom jesu i legure cinka sa povećanim sadržajem aluminijuma. Legura ZA-27 smatra se najperspektivnija za dobijanje kompozitnih materijala, jer je pogodna kao osnova za primenu više metoda za dobijanje

kompozita. Pored toga pogodna je za termičku obradu i plastičnu preradu, tako da je moguće naknadno uticati na mehaničke osobine dobijenih proizvoda.

Analizom očvršćavanja ZA-27 legure, utvrđeno je da je kompokasting postupak optimalan način dobijanja kompozita sa osnovom od ZA-27 legure. Ovaj postupak karakterističan je po tome što se keramički ojačivači dodaju tokom mešanja metalne osnove koja je u poluočvrslom stanju. Prednost ovog postupka je u tome što se za njegovo izvođenje čestice ojačivača ne moraju prethodno pripremati, tj. može se ostvariti sa česticama koje nisu kvašljive u rastopima metala. Dalja prerada materijala dobijenih kompokasting postupkom moguća je primenom tehnologija kao što su livenje pod pritiskom, presovanje, valjanje i kovanje [1].

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1 Mikrostruktura i mikrogeometrija

Ispitivani kompozitni materijali sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al_2O_3 dobijeni su kompokasting postupkom koji je izvršen mešanjem u izotermnom režimu.

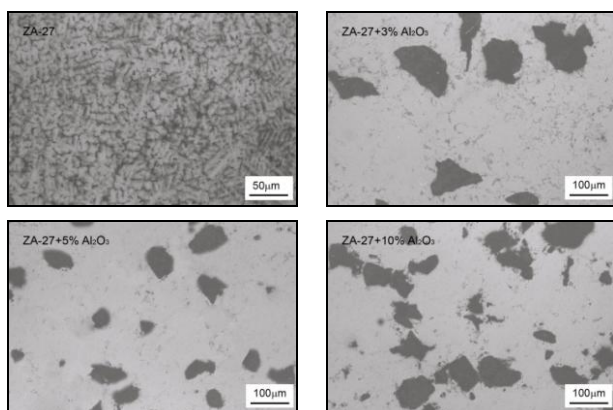
Kao ojačivač korišćen je prah Al_2O_3 veličine čestica 250 μm koji je infiltriran u metalnu osnovu u polučvrstom stanju. Čestice su infiltrirane u količini od 3, 5 i 10 mas.%. Dobijeni uzorci su naknadno tople presovani da bi se umanjila poroznost. Iz otpresaka su zatim, izrađivani uzorci za tribološka ispitivanja.

U tabeli 1 dat je hemijski sastav osnovnog materijala ZA-27 legure.

Osnova	Elementi, %				
	Al	Zn	Cu	Fe	Mg
ZA-27	28.47	67.77	2.51	0.145	0.011

Tabela 1. Hemijski sastav ZA-27 legure

Izgled mikrostrukture ZA-27 legure i dobijenih kompozitnih materijala prikazan je na slici 1.



Slika 1. Mikrostrukture kompozita ZA-27+ Al_2O_3

Struktura uzorka ZA-27 legure livenog u čeličnoj kokili je tipično dendritna. Velika usitnjenost dendritnih grana posledica je znatnog termalnog pothlađenja tokom procesa livenja. Primetna je izrazita ravnomernost dendritne strukture, što ukazuje na povoljan odnos mehaničkih osobina. Takođe, međudendritna faza bogata cinkom ravnomerno je raspoređena u strukturi (bez pojave ostrvaca, većih zona i sl.) što obično ukazuje na dobar kako površinski, tako i zapreminski raspored centara kristalizacije u fazi očvršćavanja, odnosno na dobro postavljen proces očvršćavanja.

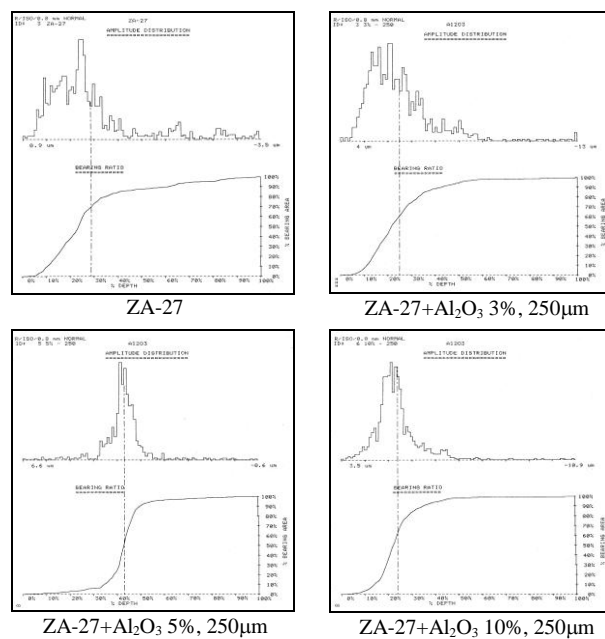
Strukture uzoraka kompozita su morfološki slične. Osnovni razlog ovakve morfologija je u izmeni režima očvršćavanja usled parametara primenjenog kompokasting postupka. Naime, u zonu poluočvrlog stanja, tačnije u temperaturni interval radnih temperatura primenjenog kompokasting postupka, rastop ZA-27 legure doveden je veoma laganim hlađenjem (brzina hlađenja od 5°C/minuti). Da rastop nije podvrgnut procesu mešanja u poluočvrstom stanju, struktura na sobnoj temperaturi bi se sastojala od grubih, veoma izraslih dendrita. Međutim, zbog dejstva sila smicanja tokom kompokasting postupka došlo je do stvaranja krupnih, eliptičnih primarnih čestica, oblika velikih zrna. Drugim rečima, došlo je do transformacije dendritne u nedendritnu strukturu.

Sam raspored ojačivača, koji se može uočiti kada se sagledaju mikrostrukture, ukazuje na tendenciju da se veća količina čestica smešta u oblast međudendritne faze. To je razumljivo, budući da se izvodi mešanje poluočvrlog rastopa ZA-27 legure koji na radnoj temperaturi postupka ima dosta tečne faze, koja pruža manji otpor infiltraciji ojačivača. Pri hlađenju čestice ostaju zarobljene. Interesantno je da ima dosta čestica ojačivača koje su smeštene unutar primarnih dendrita, što ukazuje i na njihovu relativno veliku energiju koju su primile od mešača.

Mikrogeometrija kontaktnih površina ispitivanih kompozitnih materijala predstavljena je u radu preko osnovnih parametara hrapavosti (R_a , R_z , R_{max}), tabela 2, i krivih nošenja profila, slika 2.

	Maseni udeo, %	Veličina čestica, μm	R_a , μm	R_z , μm	R_{max} , μm
Osnova	ZA-27		0.59	1.46	3.12
Ojačivač	Al_2O_3	3	0.83	2.39	6.03
		5	0.43	1.78	3.48
		10	0.93	3.32	6.51

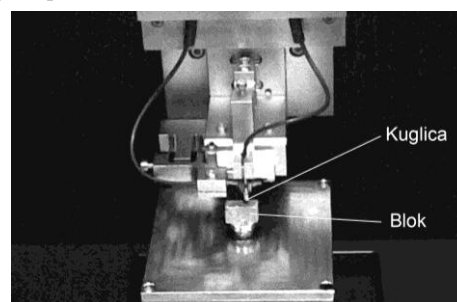
Table 2. Parametri hrapavosti kompozita ZA-27+ Al_2O_3



Slika 2. Krive nošenja i dijagrami raspodela amplituda ispitivanih kompozita

2.2 Tribološka ispitivanja

Tribološka ispitivanja izvršena su na ball-on-block nanotribometru (slika 3), u uslovima bez podmazivanja na sobnoj temperaturi.

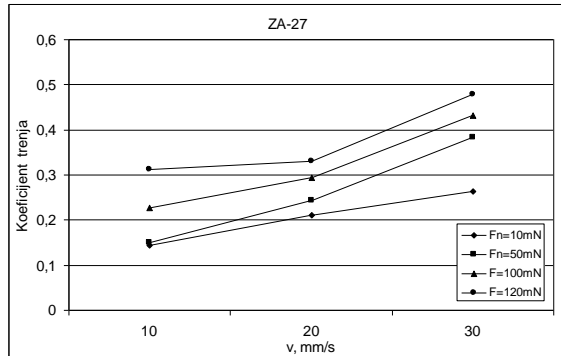


Slika 3. Nanotribometar ball-on-block

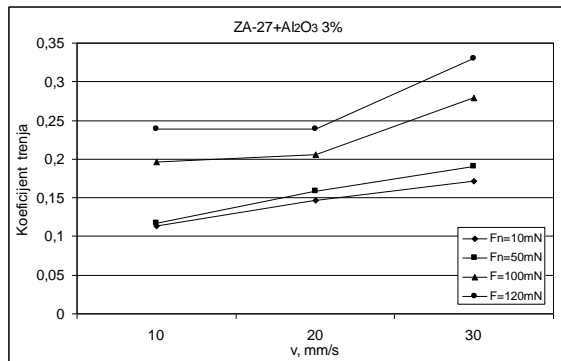
Ispitivanja su vršena sa linernim oscilatornim kretanjem. Kontaktni par sastojao se od kuglice prečnika $D_b=1.5$ mm i bloka širine $b_b=6.35$ mm, dužine $l_b=15.75$ mm i visine $h_b=10.16$ mm. Kuglica je izrađena od čelika, a blokovi od ispitivanih ZA-27 + Al_2O_3 kompozita. Ispitivanja su vršena uz variranje četiri nivoa normalnog kontaktnog opterećenja (10 mN, 50 mN, 100 mN i 120 mN) i tri nivoa brzine klizanja (10 mm/s, 20 mm/s i 30 mm/s), u uslovima bez podmazivanja. Tokom triboloških ispitivanja meren je samo osnovni tribološki parametar: sila, odnosno koeficijent trenja.

3. REZULTATI TRIBOLOŠKIH ISPITIVANJA

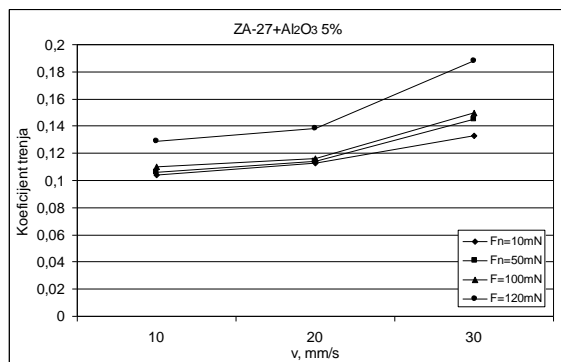
Na osnovu sprovedenih triboloških ispitivanja formirane su dijagramske zavisnosti promene koeficijenta trenja od uslova ispitivanja, slike 4-7. Dijagrami pokazuju postojanje znatnog uticaja parametara uslova kontakta (v i F_n) na frikciono ponašanje svih ispitivanih kontaktnih parova. Kod svih ispitivanih materijala izražen je sličan karakter tih uticaja ali na različitim nivoima. Sa porastom brzine klizanja i normalnog kontaktnog opterećenja raste koeficijent trenja.



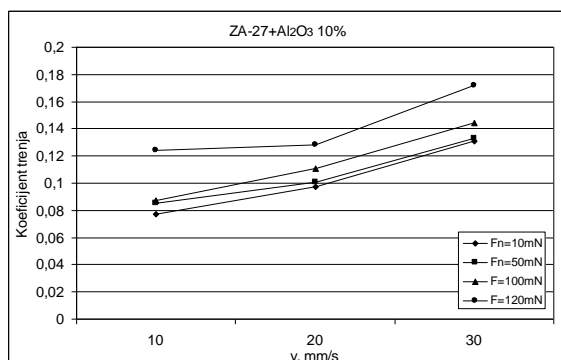
Slika 4. Koeficijent trenja, ZA-27



Slika 5. Koeficijent trenja, ZA-27+Al₂O₃ 3%



Slika 6. Koeficijent trenja, ZA-27+Al₂O₃ 5%



Slika 7. Koeficijent trenja, ZA-27+Al₂O₃ 10%

Uticaj parametara uslova kontakta (brzine klizanja i normalnog opterećenja) na koeficijent trenja može se iskazati analitičkim zavisnostima (regresionom funkcijom) u obliku:

$$f = C \cdot F_n^x \cdot v^y$$

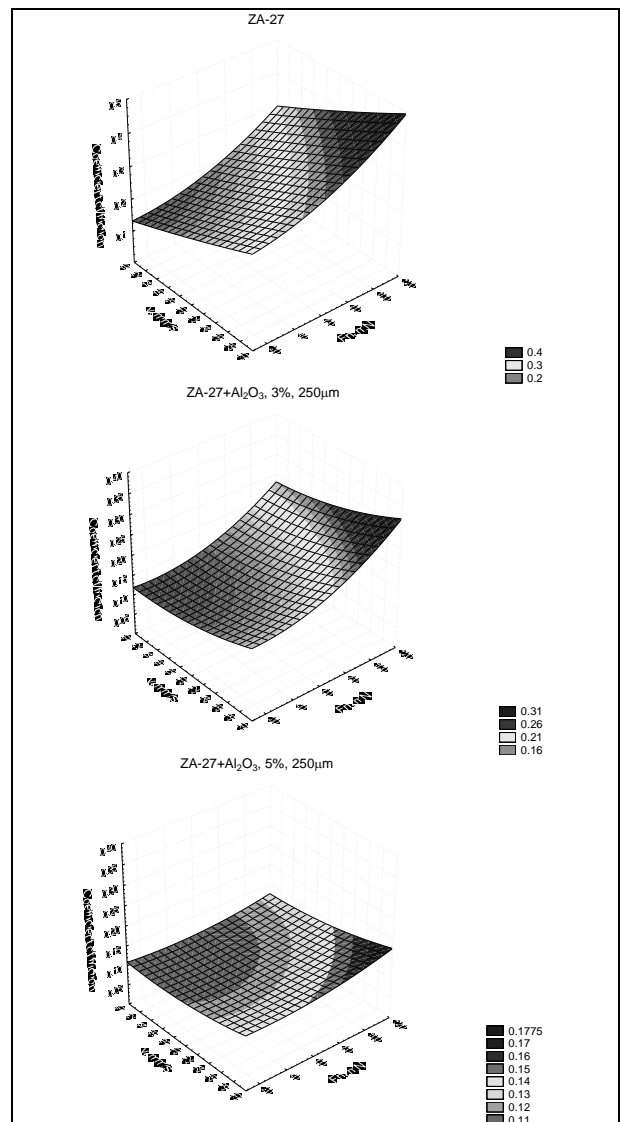
Konstante C i eksponente x i y uz koeficijente korelacije date su u Tabeli 3.

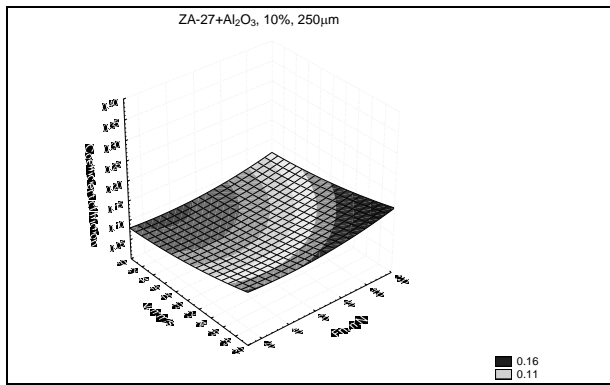
Koeficijent trenja $f = C \cdot F_n^x \cdot v^y$		C	x	y
ZA-27		0.0189	0.2642	0.5705
Reinforcer	Al ₂ O ₃ 3%	0.0237	0.2760	0.3450
	Al ₂ O ₃ 5%	0.0391	0.0825	0.2951
	Al ₂ O ₃ 10%	0.0229	0.1034	0.4107

Tabela 3. Koeficijent trenja, $f = C \cdot F_n^x \cdot v^y$

Dobijene analitičke zavisnosti ukazuju, još jasnije, na prikazane odnose frikcionih karakteristika kontaktnih parova. U cilju sagledavanja uticaja brzine klizanja i normalnog kontaktnog opterećenja na koeficijent trenja legure ZA-27 i kompozitnih materijala sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al₂O₃ formirani su 3D dijagrami zavisnosti koeficijenta trenja od brzine klizanja i normalnog opterećenja. Ovi dijagrami su prikazani na slici od 8.

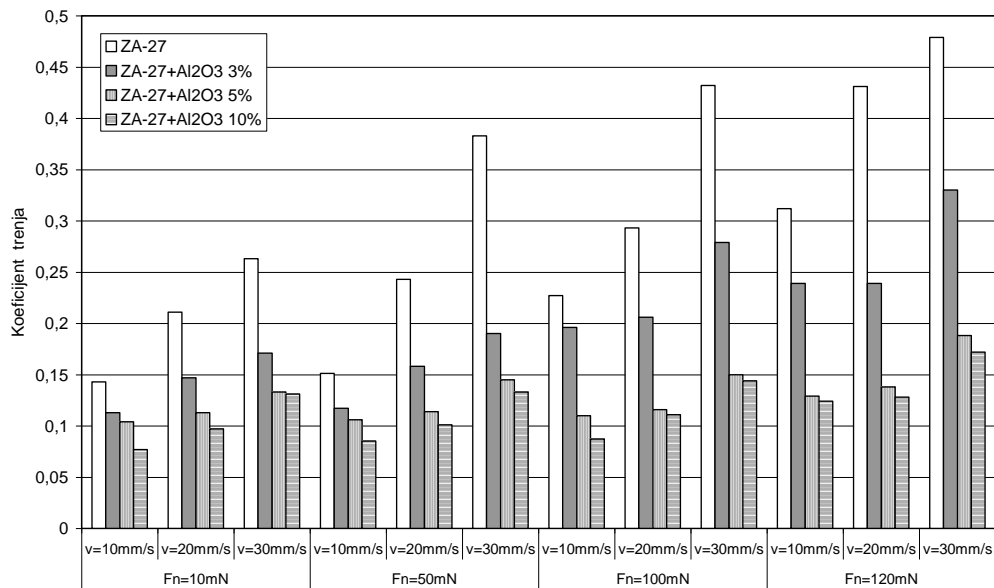
Grafičke zavisnosti promene koeficijenta trenja od brzine klizanja i normalnog opterećenja aproksimirane su eksponencionalnim regresionim funkcijama.





Slika 8. Koeficijenti trenja, ZA-27+Al₂O₃

Na slici 9 dat je uporedni prikaz nivoa koeficijenata trenja kompozitnih materijala za različite uslove kontakta, koji jasno odlikava rang frikcionih svojstava ispitivanih materijala.



Slika 9. Koeficijent trenja ZA-27+Al₂O₃ u zavisnosti od brzine klizanja i normalnog opterećenja

4. ZAKLJUČAK

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da je promenom masenog udela čestica ojačivača Al₂O₃ moguće uticati na tribološke karakteristike ispitivanih kompozita sa osnovom od ZA-27 legure.

Ispitivanjem triboloških karakteristika kompozitnih materijala sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al₂O₃ dolazi se do zaključaka:

- Svi ispitivani kompozitni materijali imaju znatno niži koeficijent trenja u odnosu na osnovu ZA-27 leguru za sve uslove ispitivanja.
- Povećanje masenog udela čestica ojačivača Al₂O₃ pozitivno utiče na frikционе karakteristike. Ovo je posebno izraženo pri većim brzinama klizanja i većem normalnom opterećenju.
- Najbolje frikционе karakteristike uočene su kod kompozita sa najvećim masenim udelom čestica Al₂O₃ od 10 mas.%

5. LITERATURA

[1.] *Bobić I., Jovanović M. T., Ilić N.*, Microstructure and Strength of ZA 27-Based Composites Reinforced with Al₂O₃ Particles. Materials Letters, 2003.

Prikazani dijagram pokazuje jednoznačan uticaj normalnog kontaktnog opterećenja na koeficijent trenja kod svih ispitivanih materijala. Generalno, koeficijent trenja raste sa porastom brzine klizanja i normalne sile. Razlike u nivoima koeficijenata trenja ispitivanih materijala za sve uslove imaju isti karakter.

Najveće vrednosti koeficijenata trenja odgovaraju najvećoj brzini klizanja ($v=30\text{ mm/s}$) i najvećim vrednostima normalnog opterećenja ($F_n=120\text{ mN}$). Pri najmanjoj brzini klizanja ($v=10\text{ mm/s}$) zabeležene su najniže vrednosti koeficijenata trenja za sve ispitivane materijale.

Povećanjem masenog udela čestica ojačivača Al₂O₃ pozitivno utiče na frikционе karakteristike. Ovo je naročito izraženo pri većim brzinama klizanja i većem opterećenju, kada je moguće povećanjem masenog udela čestica ojačivača Al₂O₃ smanjiti koeficijent trenja i do 60% u odnosu na osnovu - leguru ZA-27.

Uočljivo je da u svim ispitivanim uslovima najbolje frikционе karakteristike pokazuje kompozitni materijal sa česticama Al₂O₃ veličina 250 µm u količini od 10 mas.%.

[2.] *Mitrović S., Babić M., Bobić I.*, ZA-27 Alloy Composites Reinforced with Al₂O₃ Particles, Tribology in industry, vol. 29, No. 3&4, 2007.

[3.] *Mitrović S.*, Tribological Properties of Composites With Base Matrix of The Za-27 Alloy, Ph.D. Dissertation, Kragujevac, 2000.

[4.] *Babić M., Mitrović S.*, Tribološke karakteristike kompozita na bazi ZnAl legura, Monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2007.

[5.] *Ashby M. F., Jones D.R.H.*, Engineering Materials 1&2, An Introduction to their Properties and Applications, Elsevier Science, 2002.

[6.] *Kok M.*, Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle reinforced 2024 aluminium alloy composites, Journal of Materials Processing Technology 161, 381-387, 2005.

Autori: Doc. dr Mitrović Slobodan, Prof. dr Babić Miroslav, Mr Živić Fatima, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, dr Bobić Ilija, Institut za nuklearne nauke „Vinča“.

E-mail: boban@kg.ac.yu, babic@kg.ac.yu, zivic@kg.ac.yu, ilijab@vin.bg.ac.yu