

**UNIVERZITET U KRAGUJEVCU
MAŠINSKI FAKULTET U KRAGUJEVCU**

mr Slobodan Mitrović, dipl. ing.

**TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE
KOMPOZITA NA BAZI ZnAl LEGURA**

- Doktorska disertacija -

Kragujevac, 2007.

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU
MAŠINSKI FAKULTET U KRAGUJEVCU

**TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE
KOMPOZITA NA BAZI ZnAl LEGURA**

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Kandidat:

Mr Slobodan Mitrović, dipl. ing.

Mentor:

Prof. Dr Miroslav Babić, dipl. ing.

Kragujevac, januar 2007.

Roditeljima

***"Bez materijala ništa ne postoji,
bez energije se ništa ne dešava,
bez informacija ništa nema smisla."***

(A. G. Öttinger)

*Doktorska disertacija **Tribološke karakteristike kompozita na bazi ZnAl legura** predstavlja pokušaj da se upotpune odgovarajuća tribološka znanja vezana za razvijene kompozitne materijale sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al_2O_3 i grafita, i na taj način stvore uslovi za širu primenu ovih kompozita kao naprednih tribomaterijala u tehničkim sistemima različitih namena. Pravilnom supstitucijom materijala za adekvatan kompozit, moguće je smanjiti tribološke gubitke, kako direktne tako i indirektno, i na taj način ostvariti uštede čiji efekti mogu biti značajni.*

Koristim ovu priliku da izrazim zahvalnost svim profesorima, kolegama i prijateljima od kojih sam imao nesebičnu pomoć i podršku prilikom izrade doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru prof. dr Miroslavu Babiću za svesrdnu pomoć i podršku tokom izrade disertacije, a takođe i u toku mog celokupnog naučno istraživačkog rada.

Korisne sugestije i pomoć oko sagledavanja celokupne problematike vezane za kompozitne materijale pružio mi je dr Ilija Bobić, sa Instituta za nuklearne nauke Vinča, na čemu se zahvaljujem.

Zahvaljujem se prof. dr Branku Tadiću, na pažljivom čitanju radne verzije doktorske disertacije i ispravljanju uočenih grešaka, kao i na korisnim savetima.

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj porodici na podršci, razumevanju i strpljenju tokom svih ovih godina.

*Januar, 2007.
Kragujevac*

Autor

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU
MAŠINSKI FAKULTET U KRAGUJEVCU

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR

Identifikacioni broj:
IBR

Tip dokumentacije:
TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ

Vrsta rada: Doktorska disertacija
VR

Autor: mr Slobodan R. Mitrović, dipl. ing.
AU

Mentor / Komentor: Prof. dr Miroslav Babić, dipl. ing.
MN

Naslov rada: Tribološke karakteristike kompozita na bazi
NR ZnAl legura

Jezik publikacije: Srpski
JP

Jezik izvoda: Srpski / Engleski
JI

Zemlja publikovanja: Srbija
ZP

Uže geografsko područje:
UGP

Godina: 2007.
GO

Izdavač: Reprint autora
IZ

Mesto i adresa: Kragujevac, ul. Josifa Šnersona 2/2-11
MA

Fizički opis rada: FO	(br. poglavlja/ strana/ lit. citata/ tabela/ slika/ priloga) (9 / 179 / 81 / 50 / 230/ 1)
Naučna oblast: NO	Mašinstvo
Naučna disciplina: ND	Tribologija
Predmetna odrednica / ključne reči: PO	Tribologija, kompoziti sa metalnom matricom, ZA-27 legure, Al ₂ O ₃ čestice, grafit, koeficijent trenja, habanje
UDK:	692.533.1, 621.8.031
Čuva se: ČU	U biblioteci Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul. Sestre Janjić br. 6. 34000 Kragujevac
Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IA	

Kompoziti na bazi ZnAl legura zbog niza dobrih svojstava, kao što su niža cena u odnosu na klasične tribomaterijale, dobra mehanička svojstva i dobra obradivost, u svetu se posebno intenzivno istražuju, uvode u proizvodnu praksu i komercijalizuju poslednje decenije.

Legura ZA-27 je već duži niz godina prisutna u svetu kao tribološki materijal veoma dobrih triboloških karakteristika za uslove velikih opterećenja i malih brzina klizanja. Poslednjih godina raste istraživački interes za razvoj kompozita na toj osnovi sa dodavanjem keramičkih čestica kao punilaca.

Cilj rada je tribološka evaluacija domaćih kompozita sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al₂O₃ i grafita različitih krupnoća i zapreminskog sadržaja čestica. Osnovni deo rada realizovan je kroz obiman tribometrijski program eksperimentalnih istraživanja kompozita na bazi ZA-27 legura, kako bi se uspostavile relacije od tehnologije dobijanja materijala, preko hemijskih, strukturnih i mehaničkih karakteristika osnovnog materijala i kontaktnih slojeva do frikcionih karakteristika i otpornosti na habanje.

Na osnovu sprovedenih triboloških ispitivanja definisani su optimalni maseni udeli i veličine čestica ojačivača Al₂O₃ i grafita sa tribološkog aspekta.

Ovom disertacijom učinio se pokušaj da se upotpune odgovarajuća tribološka znanja vezana za razvijene kompozitne materijale sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al₂O₃ i grafita i na taj način stvore uslovi za širu primenu ovih kompozita kao naprednih tribomaterijala u tehničkim sistemima različitih namena.

Datum prihvatanja teme od strane Veća MFK-a: 7. 7. 2005.

DP

Datum odbrane:

DO

UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN KRAGUJEVAC

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type:
DT

Type of record: Textual printed article
TR

Contents code: Ph. D. Thesis
CC

Author: Slobodan R. Mitrović, M. Sc.
AU

Menthor / Comenthor: Miroslav Babić, Ph. D., Full Time Professor
MN

Title: Tribological Properties of ZnAl Alloy
TI Composites

Language of text: Serbian
LT

Language of abstract: Serbian / English
LA

Country of publication: Serbia
CP

Locality of publication:
LP

Publication year: 2007.
PY

Publisher: Author's reprint
PU

Publisher place: Kragujevac, Josifa Šnerzona 2/2-11
PP

Physical description:: (chapters/ pages/ literature/ tables/ figures/ additional lists)
FD (9 / 179 / 81 / 50 / 230/ 1)

Scientific field: Mechanical engineering
SF

Scientific discipline: Tribology
SD

Subject / Key words: Tribology, metal matrix composites, ZA-27 alloy,
SKW Al₂O₃ particle, graphite particle, coefficient of friction, wear behaviour

UC: 692.533.1, 621.8.031

Holding data: Library of the Faculty of Mechanical
HD Engineering, S. Janjić 6.
34000 Kragujevac

Note: None
N

Abstract:
AB

Composites based on ZnAl alloys have been intensively researched and introduced into production practice and also commercialized during the last decade, due to their good features, such as lower price compared to classical tribomaterials, good mechanical characteristics and good machinability. ZA-27 alloy have been present for years in a world, as a tribomaterial having very good tribological characteristics for conditions of heavy loads and small sliding velocities. During the last years, research interest grows for development of composites based on it with addition of ceramic particles as loaders.

Objective of this work is tribological evaluation of domestic composites based on ZA-27 alloy, with Al₂O₃ particles and with graphite, also with different sizes and particle content. Basic part of the work was realized through comprehensive tribometric program of experimental research of composites based on ZA-27 alloys, in order to establish relation from material production technology, over chemical, structural and mechanical characteristics of base material, up to the frictional characteristics and wear resistance.

Based on realized tribological characteristics, optimal content and sizes for Al₂O₃ and graphite particles have been defined from tribological aspect.

This disertation represents an attempt to integrate appropriate tribological knowledge in connection to developed composite materials based on ZA-27 alloys, with Al₂O₃ particles and with graphite, thus creating conditions for wider use of these composites, as modern tribomaterials, at technical systems for different applications.

Accepted by the Scientific Board on: July 7th 2005.
ASB

Defended on:
DE

Spisak korišćenih oznaka i skraćenica

- α - koeficijent termičkog širenja
 τ - vreme infiltracije
 δ - prosečna veličina čestica ojačivača
 η - dinamička viskoznost
 b_b - širina bloka
 b_d - širina diska
 D_d - prečnik diska
 f - koeficijent trenja
 F_n - normalna sila
 $F_n(sr)$ - srednja vrednost normalne sile
 f_{sr} - srednja vrednost koeficijenta trenja
 F_t - sila trenja
 $F_t(sr)$ - srednja vrednost sile trenja
 G - maseni udeo čestica
 h - širina traga habanja
 h_b - visina bloka
 h_{sr} - srednja vrednost širine traga habanja
 K - kalibraciona konstanta
 l_b - dužina bloka
 n - broj obrtaja diska
 p - kontakti pritisak
 R - koeficijent korelacije
 R_a - srednje aritmetičko odstupanje profila na dužini ocenjivanja
 R_{max} - maksimalna visina profila na dužini ocenjivanja
 $R_{p0,2}$ - granica razvlačenja
 R_z - srednja visina profila na dužini ocenjivanja
 T - radna temperatura rastopa
 t - vreme trajanja kontakta
 v - brzina klizanja
- MMC* - (Metal Matrix Composites) kompoziti sa metalnom matricom
SHS - (Self-Propagating Synthesis) visokotemperaturna sinteza
HP - (Hot Pressing) toplo presovanje
PM - (Powder Metallurgy) metalurgija praha
RSP - (Rapid-Solidification Processing) brzo očvršćavanje
PVD - (Physical Vapour Deposition) fizičko taloženje iz gasovite faze

Sadržaj

1. UVOD	1
2. KOMPOZITI KAO TRIBOLOŠKI MATERIJALI	5
2.1 Razvoj novih materijala	5
2.2 Kompozitni materijali	9
2.3 Primena kompozita	14
2.4 Kompoziti sa metalnom matricom	15
2.5 Postupci dobijanja kompozita sa metalnom matricom	16
2.6 Podela kompozita sa metalnom matricom	26
2.6.1 Kompoziti sa aluminijumskom matricom	26
2.6.2 Kompoziti sa magnezijumovom matricom	32
2.6.3 Kompoziti sa titanijumovom matricom	32
2.6.4 Kompoziti sa bakarnom matricom	33
2.6.5 Kompoziti sa matricom superlegura	33
3. AKTUELNO STANJE RAZVOJA KOMPOZITA NA BAZI ZnAl LEGURA ...	35
3.1 Legure cinka sa povećanim sadržajem aluminijuma	35
3.2 Kompoziti sa osnovom od legura cinka	40
4. ISTRAŽIVANJE TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA DOMAĆIH KOMPOZITA NA BAZI ZnAl LEGURA	52
4.1 Domaći kompoziti na bazi ZnAl legura	52
4.1.1 Aparatura za dobijanje kompozita	53
4.1.2 Tehnološki postupak dobijanja uzoraka kompozita	55
4.1.3 Presovanje dobijenih uzoraka kompozita	57
4.1.4 Struktura dobijenih uzoraka kompozita	57
4.2 Tribološka istraživanja dobijenih kompozita	62
4.2.1 Uređaj za tribološka istraživanja dobijenih kompozita	62

4.2.2 Merni sistem	64
4.2.3 Kontaktni elementi	70
4.2.4 Mikrogeometrija kontaktnih površina	72
4.2.5 Podmazivanje kontaktnih elemenata	78
4.2.6 Plan i uslovi triboloških ispitivanja	79
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	82
5.1 Krive habanja	82
5.2 Rezultati ispitivanja sa podmazivanjem	97
5.3 Rezultati ispitivanja bez podmazivanja	108
6. ANALIZA REZULTATA	119
6.1 Tribološke karakteristike domaćih kompozita sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama Al ₂ O ₃	119
6.1.1 Koeficijent trenja	120
6.1.1.1 Ispitivanja sa podmazivanjem	120
6.1.1.2 Ispitivanja bez podmazivanja	125
6.1.2 Habanje	130
6.1.2.1 Ispitivanja sa podmazivanjem	130
6.1.2.2 Ispitivanja bez podmazivanja	135
6.2 Tribološke karakteristike domaćih kompozita sa osnovom od ZA-27 legure ojačane česticama grafita	138
6.2.1 Koeficijent trenja	138
6.2.1.1 Ispitivanja sa podmazivanjem	138
6.2.1.2 Ispitivanja bez podmazivanja	141
6.2.2 Habanje	144
6.2.2.1 Ispitivanja sa podmazivanjem	144
6.2.2.2 Ispitivanja bez podmazivanja	147
6.3 Upporedni prikaz triboloških karakteristika ispitivanih kompozita sa osnovom od ZA-27	149
7. ZAKLJUČCI	154
8. LITERATURA	158
9. PRILOZI	163
9.1 Signali koeficijenta trenja ZA27 legure	164
9.2 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Al ₂ O ₃ 3%, 250μm	165
9.3 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Al ₂ O ₃ 5%, 250μm	166
9.4 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Al ₂ O ₃ 10%, 250μm	167
9.5 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Al ₂ O ₃ 3%, 12μm	168
9.6 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Grafit 1.5%, 20μm	169
9.7 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Grafit 1%, 35μm	170
9.8 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Grafit 2%, 35μm	171
9.9 Signali koeficijenta trenja ZA27 + Grafit 3%, 100μm	172
