



### POSTUPAK DIZAJNIRANJA KLIZNIH LEŽAJEVA OD RAR - LEGURA

NINKOVIĆ Rato, *RAR, Beograd*  
BABIĆ Miroslav, *Mašinski fakultet, Kragujevac*

#### **Rezi me**

*RAR cink-aluminijumske legure imaju danas veliku primenu za izradu kliznih ležaja za velika opterećenja i male brzine klizanja. Ove legure, pre svega RAR 12 i RAR 27 su pogodne za zamenu tradicionalnih ležajnih bronzi, i to uz nižu cenu koštanja.*

*U radu je dato uputstvo za dizajniranje kliznih ležaja od RAR Zn-Al legura. Ono sadrži generalne fizičko-mehaničke karakteristike ovih legura, tribološke dijagrame koji se koriste za dizajniranje i proceduru tribološki podržanog dizana za konkretan primer ležaja.*

**Ključne reči:** *Zn-Al legure, tribologija, klizni ležaj, dizajniranje*

#### **1. UVOD**

Zahvaljujući dobroj livkosti, relativno visokoj otpornosti na habanje i pogodnim fizičko-mehaničkim svojstvima pojedine vrste legura na bazi cinka i aluminijuma (Zn-Al legure) poslednjih godina nalaze sve značajniju industrijsku primenu. Porast komercijalne upotrebe ovih legura je rezultat intenzivnih istraživanja koja su obavljena u proteklih dvadeset godina. Nove vrste cink-aluminijumskih legura koje su tim istraživanjima razvijene zadovoljavaju zahteve materijala koji se koriste za izradu mašinskih komponenata, posebno delova izloženih habanju.

RAR, domaći proizvođač Zn-Al legura, je tokom poslednjih 13 godina godina, prateći svetska iskustva ispitivao i istraživao cink-aluminijumske legure pod oznakom RAR12 i RAR27, [3,4]. To je omogućilo njihovu primenu za izradu nosivih i habajućih komponenata, kao što su klizni ležaji, vodjice i razne čaure kod mašina u industriji (za kovačke prese i druge mašine alatke, pumpe, kompresore), u brodarstvu i kod mehanizacije, posebno rudarske (za bušilice, drobilice i drugu opremu) [5].

Povoljna mehanička i tribološka svojstva i laka obradljivost Zn-Al legura omogućuju koriš-

ćenje ovih materijala sa značajnim tehničkim i ekonomskim efektima pri održavanju mašina. Posebno treba naglasiti da dobra nosivost i otpornost na habanje daju prednost ovim materijalima u uslovima graničnog podmazivanja odnosno pri malim brzinama klizanja i relativno velikim opterećenjima.

Na bazi rezultata sistematskih višegodišnjih istraživanja (podržanih i od strane Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj) vršenih u laboratorijskim i proizvodnim uslovima urađeni svi dijagrami i druge informacije potrebne za tribodizajn kliznih ležaja, koji su izloženi u radu. Pored triboloških kriterijumi za projektovanje ležaja od RAR legura dat je i primer dizajniranja konkretnog kliznog ležaja za teške uslove rada, namenjenog za ugradnju u lokomotivu manevarku

#### **2. FIZIČKO - MEHANIČKE KARAKTERISTIKE RAR LEGURA**

Fizičko-mehaničke osobine RAR legura date su tabelarno u tabelama 1 i 2. Ako se uporede RAR legura sa drugim materijalima vidi se da su one znatno lakše od bronze, sivog i temper liva. Tačka topljenja je takođe dosta niža što ukazuje na uštedu energije koja se ostvaruje prili-

kom izrade ovih legura. Čvrstoća RAR legura je u rangu opštih konstruktivnih čelika a tvrdoća je veća od kalajnih i olovo-kalajnih bronzi. Koroziona otpornost, predmetnih legura, je dosta velika za većinu kontaktnih materijala pa se za tečnosti čija je pH od 4 do 11 smatraju korozijono otporne.

Tabela 1. Fizičke karakteristike RAR legura

	Jedinica	RAR-12	RAR-27
Gustina	kg/m <sup>3</sup>	6030	5000
Oblast topljenja	C	377-432	375-484
Koeficijent lin. izduženja	m/mK	24x10 <sup>-6</sup>	26x10 <sup>-6</sup>
Električna provodljivost	% IACS	28.3	29.7
Toplotna provodljivost	W/mK	116	125.5
Specifična toplota	J/kgK	450	525
Latentna toplota topljenja	kJ/kg	118	128
Skupljanje pri očvršćavanju	%	1-1.3	oko 1.3

Tabela 2. Mehaničke karakteristike RAR legura

Liveno u kokili /liveno stanje/			
	Jedinica	RAR-12	RAR-27
Zatezna čvrstoća	MPa	262-345	358-455
Granica popuštanja pri 0.2% deformacije	MPa	210-275	312-393
Izduženje na 5.08 cm	%	1.50-2.50	2.00-6.00
Young-ov modul	MPa	83x10 <sup>3</sup>	79x10 <sup>3</sup>
Brinell tvrdoća	HB	94	115
Vickers tvrdoća	HV	105-115	144-148
Čvrstoća na smicanje	MPa	250	285
Pritisna čvrstoća pri 0.1 % deformacije	MPa	228-241	330
Brzina puzanja	%/1000 h	0.2	
Poisson-ov odnos		0.30-0.31	0.32-0.33

### 3. TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE RAR LEGURA

U prethodnim radovima [2,5,6,7,10] dati su detaljni detaljniji izveštaji o metodologiji, uslovima i rezultatima istraživanja triboloških svojstava RAR legura. Utvrđeno je da RAR-27 pokazuje najbolje ukupne performanse sa gledišta stepena habanja u poređenju sa svim drugim legurama cinka i bakra. Za potrebe dizajniranja kliznih ležaja utvrđeni su sledeći dijagrami:

- Stribekove krive ( trenje u odnosu na radne uslove ležaja )
- Pritisak - Brzina ( PV ) krive
- Krive stepena habanja
- Krive temperature

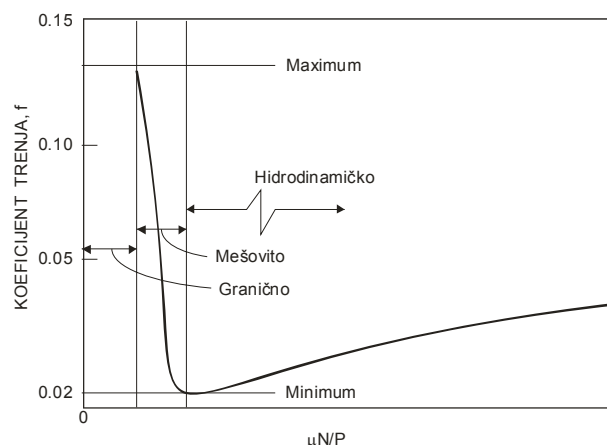
Ovi dijagrami namenjeni za tribodizajn su univerzalni i mogu da se primene na ležaje i manjih većih dimenzija kao i za rukavce različitih tvrdoća.

#### a. Stribekova kriva

Klasičan oblik Stribekove krive za Zn-Al legure dat je na slici br. 1. Ona pokazuje grafik funkcionalne zavisnosti koeficijenta trenja (f) merenog između ležaja i rukavca i funkcije parametara  $\mu N/P$  gde je  $\mu$  (Pas) dinamička viskoznost maziva na radnoj temperaturi ležaja, N (m/s) brzina klizanja i P (MPa) je pritisak pod kojim ležaj radi.

Eksperimenti su pokazali da legura RAR-27 može da podnese veća opterećenja i manje brzine klizanja nego legura RAR-12 u slučajevima kada rukavac ima veću tvrdoću, dok rukavci koji imaju manju tvrdoću daju bolje rezultate sa legurom RAR-12. Performanse RAR-27 opadaju značajno kad se koriste u kombinaciji sa mekšim rukavcima, dok je obrnut slučaj kod RAR-12. Pri dizajniranju ležaja neophodno je proveriti obe kombinacije da bi se dobilo optimalno rešenje.

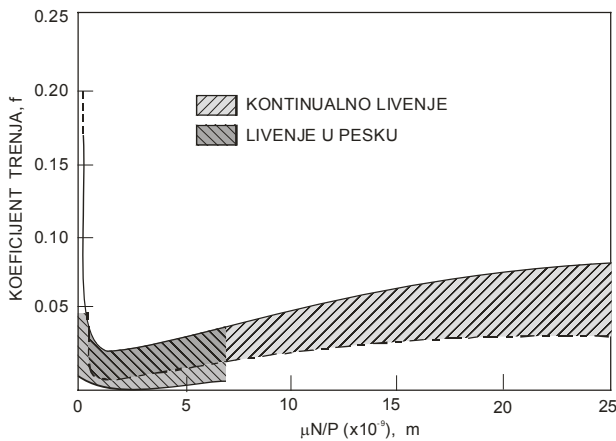
Osim tipa legure na tribološka svojstva cink-aluminijumskih legura znatan uticaj ima i način livenja. Odnos Stribekovih krivih za RAR legure kontinualno livene i liven u pesku dat je na slici 2 spregnut sa rukavcom tvrdoće 20 - 25 HRC.



Slika 1. Opšti oblik Stribekove krive [1]

#### b. PV krive

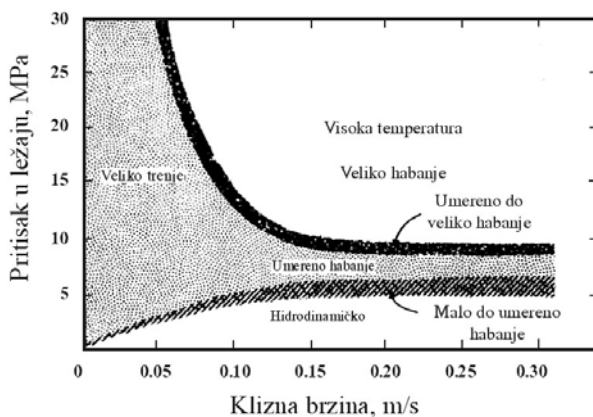
Osnovne podatke za dizajniranje ležaja obezbeđuju PV krive, koje pomažu da se odredi maksimalno opterećenje koje ležaj može da podnese pri zadatim radnim brzinama klizanja. Krive predstavljaju funkcionalnu zavisnost jediničnog pritiska ležaja od zadate brzine klizanja u režimu graničnog i mešovitog trenja. Svaka kriva može da pomogne da se približno razdvoje područja koja odgovaraju velikom trenju (normalno f do 0,1), visokoj radnoj temperaturi (oko 120 °C) i relativnom stepenu habanja (visok, srednji ili nizak).



Slika 2. Stribekove krive za RAR legure livene u pesku i kontinualno livenje

Pozicija specifičnih granica između različitih područja zavisi od stanja rukavca, što je prikazano kao rasponi koji daju sliku normalnih razlika u performansama ležaja. Na primer, smanjenje hrapavosti rukavca pomera i hidrodinamičku granicu i moć nošenja ka većim pritiscima, pod kojim ležaj radi pri manjim kliznim brzinama.

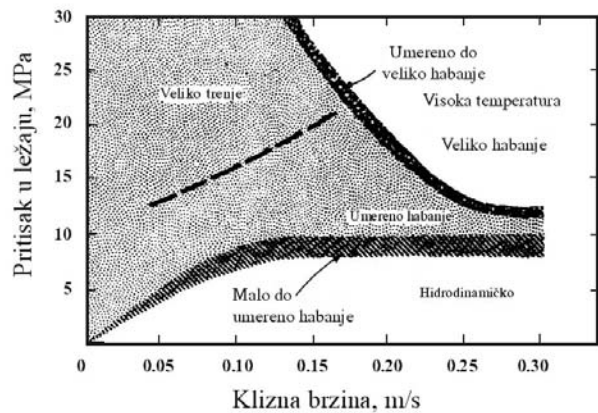
PV krive prikazane na slikama br. 3, 4 odnose se na kombinacije RAR legura u zavisnosti od tvrdoće rukavca (mekan ili tvrd). Kriva moći nošenja koja definiše hidrodinamičko-umereno habanje pomerena je ka većim pritiscima kod RAR-27. Moć nošenja i RAR-12 i RAR-27 a koji su liveni u pesku, je iznad one koje se dobijaju drugim metodama livenja a razlog ovome leži u povećanoj otpornosti na puzanje legure livene u pesku.



Slika 3. PV kriva za RAR 12

Povećanje tvrdoće rukavca obezbeđuje poboljšanu otpornost na habanje kada se koristi RAR - 27, ali je obrnut slučaj kada se koristi RAR-12. Razlike u stepenu habanja zabeležene su do deset puta za RAR-12 kada se kombinuje sa tvrdim rukavcem u odnosu na kombinaciju sa mekim

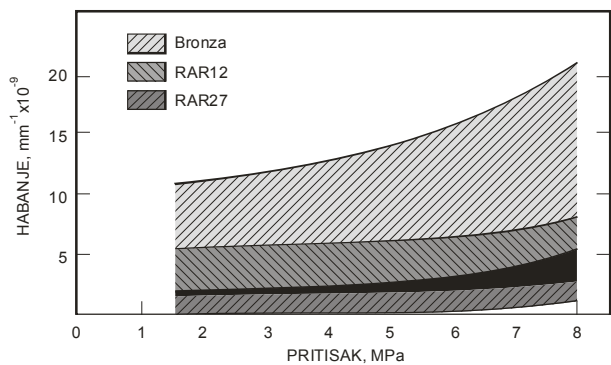
rukavcem. Hrapavost rukavca je takođe izuzetno važna promenljiva pa se preporučuje da bude u granicama ne većim od 0.4 - 0.6 mikrometara.



Slika 4. PV kriva za RAR 27

### c. Krive habanja

Vrednosti stepena habanja za RAR legure i za olovo-kalajne bronzе prikazane su na slici 5 pri najčešćim opterećenjima u praksi od 1.5 - 8 MPa. Dati dijagram je univerzalan za sve kombinacije ležaja i rukavca. Povećanje tvrdoće rukavca, hrapavosti i klizne brzine daje veći stepen habanja u prikazanim rasponima. Habanje je mereno kao smanjenje debljine zida ili dubine habanja u funkciji puta klizanja. Razlika u stepenu habanja je mala između RAR-12 i RAR-27, dok je kod bronzе veća pri istim radnim uslovima.



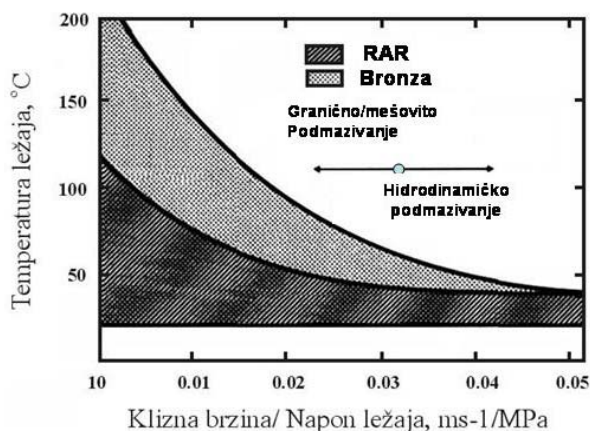
Slika 5. Habanje u funkciji pritiska

### d. Krive temperature

Dijagrami na slici 6 mogu da se koriste za održavanje očekivane radne temperature ležaja u zavisnosti od klizne brzine i pritiska u kliznom ležaju za RAR legure i olovo-kalajne bronzе.

Korišćenjem ovog dijagrama dobijamo podatak o maksimalno očekivanoj temperaturi ležaja u toku eksploatacije. Iz dijagrama može se zaključiti da je radna temperatura kod RAR legura

za teške uslove rada (mala klizna brzina - veliko opterećenje) znatno niža pri istim uslovima eksploatacije što se pripisuje visokoj toplotnoj provodljivosti cink-aluminijumskih legura.



Slika 6. Temperatura ležaja u funkciji radnih uslova

## PRIMER

Zadatak: " Projekat lokomotive manevarke zahteva da opterećenje od  $F = 1200,00$  kN bude raspoređeno na 4 osovine prečnik rukabca  $d = 156$  mm. Svaka osovina ima dve točka prečnika  $D = 950$  mm. Lokomotiva će raditi prosučinom brzinom od  $v_l = 5$  km/h, približno 3000 h godišnje što se smatra lakim režimom rada. Habanje ležaja treba da bude ograničeno na manje od 1% prečnika ležaja u okviru programa održavanja od jedne godine. Odrediti dimenzije ležaja i izabrati leguru za ovu namenu."

## REŠENJE

### a. Određivanje radne temperature ležaja

Da bi se izračunala maksimalno moguća radna temperatura ležaja, prvo mora da se odredi klizna brzina ležaja a potom i pritisak po jedinici projektovane površine. Pošto se izračuna odnos klizne brzine i pritiska u ležaju iz dijagrama slika br.8 očitava se temperatura ležaja.Pre početka rada usvajamo dužinu ležaja a prema preporukama da je dužina jednaka prečniku od  $l = 156$  mm.

Brzina klizanja

$$V_k = (d * v_l) / D = 0,22 \text{ m/s}$$

Pritisak u ležaju

$$F_l = F / 8 = 150,00 \text{ kN}$$

$$P = F_l / (d * l) = 6,16 \text{ MPa}$$

Odnos  $V_k / P = 0,035$

Za izračunati odnos 0,035 iz dijagrama slika br. 6 očitava se da će maksimalna radna temperatura ležaja biti 40 C.

### b. Provera uslova podmazivanja

Provera uslova podmazivanja vrši se tako što se u Stribekovoj krivoj odredi režim podmazivanja i odredi koeficijent trenja.Pošto smo već odredili  $V_k / P$ , dabi odredili Stribekovu funkciju parametra ležaja treba da usvojimo mazivo i odredimo za radnu temperaturu dinamičku viskoznost. Pod pretpostavkom da će se koristiti ulje tip FAMHIDO HV 100 čija je gustina  $\rho = 890 \text{ kg/m}^3$  a kinematska viskoznost na radnoj temperaturi od 40° C je  $\nu = 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Dinamička viskoznost je  $\mu = \nu * \rho = 89 * 10^{-3} \text{ Pa s}$

Parametar ležaja  $\mu V_k / P = 3,17 * 10^{-3}$

Pozivajući se na odgovarajuću Stribekovu krivu slika br.2 /1/ pri brzini lokomotive od 5 km / h ležaj će raditi u mešovitom režimu podmazivanja, Za RAR 27 ležaje koeficijent trenja je  $f = 0,005 - 0,01$

### c. Provera parametara moći nošenja i habanja

Moć nošenja proverava se u odgovarajućim PV dijagramima, slika br. 3, 4, kombinacijom pritiska i klizne brzine pod kojom ležaj radi. Analizom predloženih dijagrama najbolje uslove ima legura RAR - 27 pa će ona kao materijal biti usvojena za izradu ležajeva.

Habanje se proverava na dijagramu slika br. 6, pa se može konstatovati da bi RAR - 27 podneo malo do umereno habanje. Pri pritisku od 6,16 MPa raspon stepena habanja je od 0,23 do 3.8 u zavisnosti od završne obrade i tvrdoće rukavca.

Za RAR-27 leguru preporučuje se rukavac tvrdoće od 40 - 45 HRC čija je hrapavost oko 0,4 mikrometra, takođe se predlaže da odlivak kliznog ležaja bude iz peska onda se može sa sigurnošću usvojiti stepen habanja  $0,23 * 10^{-9} \text{ m/m}$ .

Put klizanja ( L ) za godišnji rad od 3000 h iznosio bi pri brzini lokomotive od 5 km / h:

$$L = 3000 * 60 * 60 * 0,22 = 2,376 * 10^6 \text{ m}$$

Ako usvojimo faktor sigurnosti 2 veličina habanja ( k ) na svakom ležaju izrađenom od RAR-27 livenog u pesku iznosiće :

$$k = 2,376 * 10^6 * 0,23 * 10^{-9} * 2 = 1,09 \text{ mm}$$

procentualno habanje prečnika kliznog ležaja za godinu dana iznosi :

$$100 * k / d = 0,7 \% \quad \text{što je manje od zadate vrednosti } 1 \%$$

### d. Zaključak

Na osnovu proverenih triboloških parametara za zadate uslove eksploatacije usvaja se legura RAR-27 livena u pesku za izradu kliznih ležaja, dužine ležaja  $L = 156$  mm, hrapavost obrade 0,4 mm.

#### 4. SUGESTIJE PRI DIZAJNIRANJU

Pri remontu opreme koja ima tradicionalne ležajeve treba obratiti pažnju i detaljno snimiti obim oštećenja triboelemenata opreme ili uređaja koji se remontuju dobro proučiti režime rada i aktivirati sistem proaktivnog održavanja. Prikazan primer u ovom radu pomoći će vam da sigurno i kvalitetno odaberete najbolje za vašu opremu. Pored napred navedenog pri dizajniranju ležaja obratite pažnju ina izbor zazora ležaja, razmotrite način podmazivanja pogotovo mogućnost nestanka maziva, izbor debljine zida ležaja, problem prilagodljivosti i sposobnosti apsorpcije nečistoća kao i aspekt korozije.

#### 5. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući postignutom nivo triboloških karakteristika RAR Zn-Al legure se danas svrstavaju u respektabilne tribološke materijale, posebno pogodne za izradu kliznih ležaja koji rade u uslovima graničnog podmazivanja pri relativno malim brzinama klizanja i velikim opterećenjima.

Tribološki zasnovan dizajn kliznih ležaja od RAR legura podrazumeva procenu temperaturnog režima rada ležaja na bazi brzine klizanja i pritiska, a zatim proveru sposobnosti nošenja i otpornosti na habanje izabranog materijala. Ova procedura bazirana je na odgovarajućim Stribeck-ovim krivim, PV dijagramima, dijagramima habanja i dijagramima temperature ležaja u funkciji odnosa brzine klizanja i pritiska.

Prikazani rezultati triboloških karakteristika RAR Zn-Al legura, kao i odgovarajuća procedura izložena na primeru predstavljaju potrebnu osnovu za tribodizajn ležaja od ovih legura.

#### ZAHVALNOST

Veliki deo eksperimentalnih istraživanja triboloških karakteristika RAR ZnAl legura obavljen je uahvaljujući finansijskoj podršci Ministarstva za nauku, tehnologije i razvoj u okviru

odgovarajućeg projekta sa evidencionim brojem MNT 2.02.0012.B.

#### LITERATURA

- [1] Barnhurst R.J., Designing Zinc Alloy Bearings, Mater. Eng. (1999) 12, 279 – 285
- [2] Babić M., Ninković R., Rac A., ZnAl legura RAR 27 -iskustva iz istraživanja i održavanja tehničkih sistema, YUMO 2002.
- [3] Goodwin F., Ponikvar A., Engineering properties of zinc alloys, Third edition, ILZRO, 1989.
- [4] Calayag T.S., The practicality of using Zinc-Aluminium alloys for friction-type bearings, 25th Annual Conference of Metallurgists, 1986., 305-313.
- [5] Ninković R., Babić M., Rac A., Yugoslav Zn-Al Alloys as a Bearing Material, Tribology in Industry, Vo. 22, No ½, 2000.
- [6] Rac A., Nikcevic V., Ninković R., Tribological Study of Zinc-Aluminum Alloys as Bearing Materials, INSYCONT 98, Cracow
- [7] Rac A., Babić M., Ninković R., Theory and practice of Zn-Al sliding bearings, BALKANTRIB'99, Romania, 1999.
- [8] Risdon T.J., Barnhurst R.J., Comparative Wear rate evaluation of Zinc Aluminum (ZA) and bronze alloys through block on ring testing and field application, SAE Technical paper series 860064
- [9] Savaskan T., Murphy S., Comparative wear behavior of Zn-Al -based alloys in an automotive engine application, Wear, 98, 1984, 151-161
- [10] Ninković R., Babić M., Tribološki aspekt dizajniranja ležaja od RAR legura, Zbornik radova, Železničko mašinstvo, Niš, 24 – 25. Oktobar, 2002. str. 213 – 216.
- [11] Savaskan T., Murphy S., Mechanical properties and lubricated wear of ZnAl - based alloys, Wear, 116, 1987, 211-224