

**OŠTEĆENJA I OTKAZI METALNIH KLIZNIH LEŽAJA\***

**IZVOD IZ MONOGRAFIJE: METALNI MATERIJALI KLIZNIH LEŽAJA – FIZIČKO-MEHANIČKA I TRIBOLOŠKA SVOJSTVA, IZDAVAČI: MAŠINSKI FAKULTET BEOGRAD I AKADEMSKA MISAO BEOGRAD, 2004**

Prof. dr Aleksandar Rac<sup>1</sup>, mr Aleksandar Venci<sup>2</sup>  
 Mašinski fakultet, Odeljenje za tribologiju, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd  
<sup>1</sup> [arac@mas.bg.ac.yu](mailto:arac@mas.bg.ac.yu), <sup>2</sup> [avenci@mas.bg.ac.yu](mailto:avenci@mas.bg.ac.yu)

**1. OŠTEĆENJA, OTKAZI I NJIHOVI UZROČNICI**

Ispravnost i pouzdanost mašina i uređaja su, pre svega, funkcija ispravnosti rada pokretnih delova, od kojih su klizni ležaji svakako najvažniji elementi. Zbog toga, oštećenja i otkazi ovih vitalnih elemenata mogu da prouzrokuju znatne materijalne gubitke, pa i zakonsku odgovornost. Zato su istraživanja otkaza kliznih ležaja mnogobrojna i prikazana su u literaturi kroz: različite klasifikacije [1, 2], istraživanja uzroka, manifestacija i korektivnih mera [3, 4, 5, 6], istraživanja uticaja maziva [7] i postupke dijagnostike i ispitivanja [8]. Cilj ovakvih istraživanja je da se predloži metodologija praćenja stanja i postupak dijagnostike oštećenja i otkaza.

Mada je, po pravilu, cena samog kliznog ležaja relativno mala, svako oštećenje ležaja kojim se smanjuje funkcionalna ispravnost sistema ili nastaje otkaz može izazvati velike indirektno troškove. Prema istraživanjima Skota (Scott) gubici nastali u valjaonicama i elektranama zbog otkaza kliznih ležaja su ekstremno visoki, reda veličine od nekoliko stotina dinara (nekoliko funti) na minut do nekoliko desetina hiljada dinara (nekoliko stotina funti) na minut [8]. Na osnovu analize autora, troškovi opravke dizel motora zbog oštećenja ležaja iznose od 20.000 do 40.000 dinara po motoru, ne uzimajući u obzir gubitke zbog isključenja posmatrane jedinice iz procesa rada.

Sa tehničkog aspekta, otkazi kliznih ležaja su po učestanosti, u ukupnim otkazima koji se javljaju kod pojedinih grupa mašina, elementi visokog rizika (tab. 1).

Smatra se da je klizni ležaj neispravan kao posledica nekog oštećenja:

- kada postane potpuno nefunkcionalan (stanje u otkazu),
- kada je još funkcionalan, ali nije sposoban da namenjenu funkciju obavi zadovoljavajuće u svim uslovima rada i
- kada ga ozbiljno oštećenje učini nepouzdanim za kontinualnu upotrebu, što zahteva njegovo uklanjanje iz upotrebe, bilo radi opravke ili zamene.

*Učestanost otkaza kliznih ležaja po grupama mašina  
 Tablica 1*

Vrsta mašine	Učestanost, %	Rang*
Parne turbine	16,7	II
Centrifugalne pumpe	22,0	II
Turbokompresori i ventilatori	37,0	I
Vodne turbine	38,0	I
Stacionarni zupčasti prenosnici	19,0	II
Dizel motori	12,0	III

\* Rang označava mesto koje zauzima otkaz kliznih ležaja u ukupnom otkazu posmatrane grupe mašina

Osnovni uzročnici koji dovode do oštećenja i otkaza kliznih ležaja su mnogobrojni, ali se mogu razvrstati u nekoliko osnovnih grupa koje uključuju aspekte konstruisanja, izbora materijala, nesavršenosti materijala, proizvodnje i procesa obrade, sklapanja, kontrole, ispitivanja, skladištenja, transporta, održavanja, nepredviđenog izlaganja preopterećenju i direktnog mehaničkog ili hemijskog oštećenja u toku rada [9]. Veoma često više uzročnika doprinosi otkazu kliznog ležaja. Učestanost

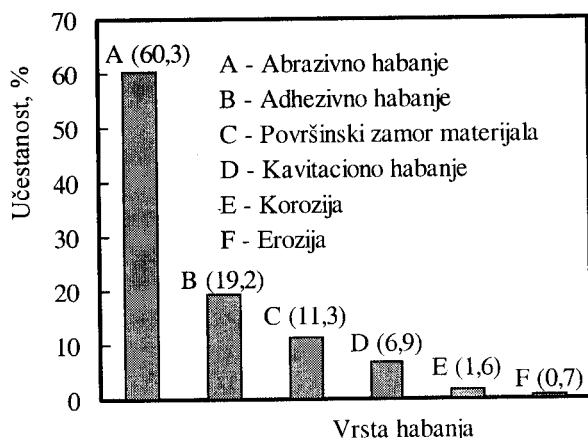
pojedinih uzročnika data u tablici 2 dobijena je praćenjem 530 slučajeva otkaza kliznih ležaja [10].

Otkazi i oštećenja izazvana navedenim grupama uzročnika manifestuju se najčešće kao **habanje, lom i plastična deformacija materijala**. To su istovremeno i osnovni vidovi otkaza, koji se mogu podeliti, u odnosu na svojstva materijala, u dve kategorije. Jedna je povezana i zavisna prevashodno od čvrstoće materijala, a druga je funkcija triboloških procesa na spregnutim površinama ležaj – rukavac. Lom i plastična deformacija su oštećenja u funkciji čvrstoće, dok je habanje sa svim svojim manifestacijama vezano za tribološke procese.

*Uzročnici i učestanost otkaza* *Tablica 2*

Uzročnici otkaza	Učestanost, %
Greške proizvodnje:	23,4
Neadekvatan proračun	9,1
Greške u materijalu	3,6
Nepravilnosti u proizvodnji i montaži	10,7
Greške u eksploataciji	39,1
Habanje tokom dugotrajnog rada	30,5
Ostalo	7,0

Postoji opšta saglasnost da je habanje najčešća pojava manifestacija otkaza kod kliznih ležaja, što potvrđuju i istraživanja koja je izvršio A. Rac [11, 12]. Analiza je rađena na ležajima dizel motora tokom generalnih opravki na uzorku od 616 ležaja, pri čemu je konstatovano da su različite vrste habanja prisutne u 98,5 % slučajeva, dok je plastična deformacija registrovana sa 1 %, a lom ležaja u neznatnom broju (0,5 %). Kako je habanje bilo dominantno, dalja analiza je vršena u cilju utvrđivanja najprisutnijih vrsta habanja (sl. 1).



*Slika 1 Vrste habanja kliznih ležaja po opadajućem redosledu*

Rezultati pokazuju da je najprisutnije abrazivno i adhezivno habanje, zatim habanje usled površinskog zamora, dok su ostale vrste habanje znatno manje zastupljene.

## 2. PRISTUP ANALIZI OTKAZA

Analiza otkaza se može definisati kao logično, sistematsko ispitivanje neke jedinice ili njene konstrukcije, da bi se utvrdila i analizirala verovatnoća, uzroci i posledice realnih i potencijalnih nedostataka u funkcionisanju [13]. Uključuje sve mere koje se izvode na tehničkim sistemima ili njihovim elementima u cilju iznalaženja i vrednovanja otkaza.

Tehnike koje se pri tome primenjuju vezane su za dve osnovne aktivnosti:

- analizu mehanizama i vrsta otkaza sa ciljem njihove klasifikacije i
- procenu načina i posledica otkaza sa ciljem ocene kritičnosti.

Za analizu mehanizama koji dovode do otkaza i ocenu vrste otkaza koriste se dve metode, poznate kao **stablo otkaza** i **Išikava dijagram**. Za ocenu kritičnosti analiziranog elementa i/ili sistema razvijena je **FMEA metoda**. Postoje još i statističke metode kao što su **Pareto**, **Veibul** i druge. Metode stabla otkaza i Išikava dijagram su naročito pogodne kao dopuna i ulaz u FMEA metodu.

Svaka od navedenih tehnika ima svoju funkciju, ali za sve je zajedničko da se zasnivaju na određenim znanjima i iskustvima o uzrocima, manifestacijama i učestanosti otkaza. Drugim rečima, primena pomenutih tehnika zahteva detaljno poznavanje zavisnosti uzrok – posledica i uzrok – manifestacija oštećenja i otkaza.

### 2.1 Osnovne metode

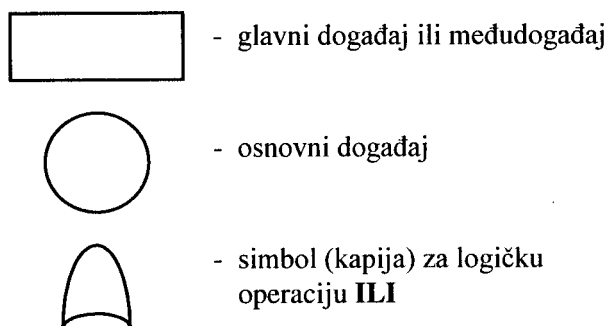
#### Stablo otkaza

Stablo otkaza se bavi identifikovanjem i analizom uslova i faktora koji prouzrokuju definisane, neželjene događaje ili doprinose njihovom nastajanju [14]. Ovi događaji uglavnom značajno utiču na funkcionisanje sistema, ekonomičnost, sigurnost ili neku drugu zahtevanu karakteristiku. Stablo otkaza se često primenjuje prilikom sigurnosne analize sistema, a kao metoda u inženjerstvu dugo je korišćeno u analizi rizika i pouzdanosti. To je logički dijagram sličan “porodičnom stablu”, koji

ukazuje na moguće događaje i pojave koje vode ka glavnom događaju.

Grafički prikaz nekih osnovnih elemenata stabla je dat na slici 2. Ovi elementi su međusobno spojeni linijama koje predstavljaju vezu između njih.

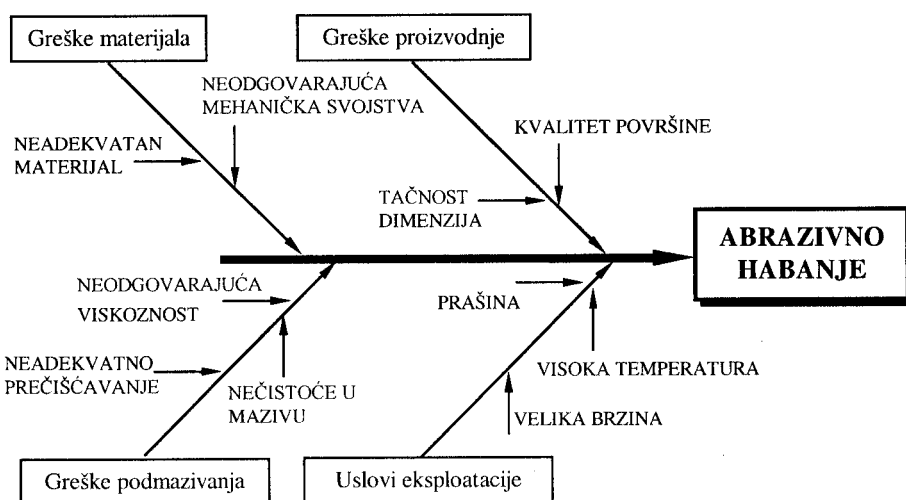
Glavni događaj odnosno međudogađaj jesu stanja samog sistema ili dela sistema, a osnovni događaj je događaj koji ne može dalje da se raščlani. U samim grafičkim simbolima stoje opisi tih događaja.



Slika 2 Osnovni grafički simboli stabla otkaza

Ovo su samo osnovni simboli, a međunarodnim standardom CEI IEC 1025/90 su određeni svi mogući simboli. Standard obuhvata:

- osnovne principe analize stabla otkaza kao i njenu primenu,
- korake neophodne da bi se analiza izvela,
- odgovarajuće pretpostavke, događaje i otkaze i



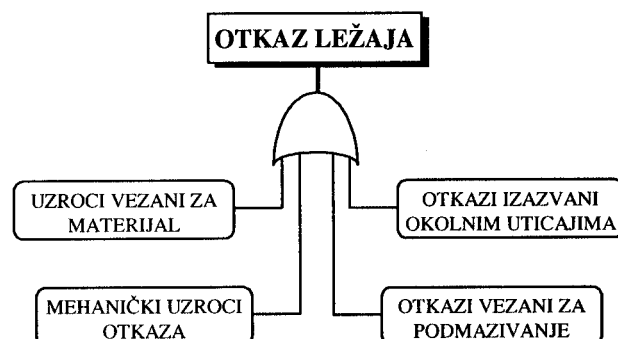
Slika 4 Išikava dijagram za zaptivni element prenosiča snage [16]

U dijagram se unose svi glavni uzročnici, a strelicama se označavaju mehanizmi i pojave koje dovode do posmatranog uzroka. Ovakav način

- određena pravila označavanja i simbole.

Kao ilustracija na slici 3 dato je stablo otkaza za ležaj. Na ovoj slici su prikazani samo osnovni uzroci koji se dalje granaju na druge međudogađaje i osnovne događaje.

Za sve komponente posmatranog sistema treba pretpostaviti moguće uzročnike funkcionalne neispravnosti i otkaza i analizirati njihovu međuzavisnost. Metoda je pogodna za kompleksne sisteme jer omogućuje njihovo pojednostavljenje i analitičan pristup.



Slika 3 Vrste događaja koji uzrokuju otkaz ležaja [15]

### Išikava dijagram

Išikava (Ishikawa) dijagram ima sličnu funkciju kao i stablo otkaza. To je dijagramski prikaz uzroka koji dovode do pojave otkaza (sl. 4).

prikazivanja je pregledan i uvek lako dopunjiv dodavanjem strelice, ako se tokom vremena uoči neki novi faktor.

## FMEA metoda

FMEA metoda je razvijena u SAD šezdesetih godina prošlog veka u okviru programa kosmičkih letova, a kasnije je korišćena i u industriji, pre svega u automobilskoj [17].

Analiza načina i posledica otkaza (**Failure Mode and Effects Analysis**) je analitička i sistematska kvalitativna analiza mogućih otkaza koja omogućuje ocenu kritičnosti svakog posmatranog pojedinačnog dela ili podsistema i njihov uticaj na sistem. Odvija se paralelno sa procesom konstruisanja, od preispitivanja idejnog rešenja do preispitivanja definitivnih rešenja. Parametri analize se numerički vrednuju, pa je i konačna ocena rešenja data numerički, što omogućuje međusobno upoređivanje projektnih rešenja [18].

Ova metoda obuhvata analizu potencijalnih načina otkaza, procenu uzročnika koji utiču na mogućnost da se otkaz pojavi, procenu važnosti na osnovu posledica i mogućnost da se otkaz registruje na osnovu predviđenih mera kontrole [17, 19].

Analiza je zasnovana na iskustvu stečenom u praksi konstruisanjem i praćenjem rada, kombinovanim sa teorijom verovatnoće. Primena ove analize povećava pouzdanost i kvalitet proizvoda kao i tehnologije njegove izrade, smanjuje troškove testiranja i usavršavanja tehnologije proizvodnje, odnosno obezbeđuje optimalne troškove tokom proizvodnje.

Ukoliko je sistem jednostavan po svojoj strukturi, mogu se direktno definisati posledice i pomoću Analize posledica otkaza (**Failure Effects Analysis**) proceniti neophodne izmene. Međutim, najveći broj mašinskih sistema je složen i zahteva, najčešće, FMEA metodu. Ona se pretežno koristi za verifikaciju projekta složenih mašinskih sistema, sastavljenih od velikog broja pojedinačnih delova od kojih svaki može da otkaze, potpuno ili delimično, na razne načine.

U cilju realizacije FMEA metode neophodno je formirati dokument prikazan u tablici 3 pomoću koga se sprovodi analiza. Prvi korak u analizi je anotacija projektovanog mašinskog sistema (blok šeme, definisanje podsistema i označavanje svakog bitnog elementa čiji se kvalitet prati). Nakon toga sledi definisanje svih potencijalnih načina, posledica i uzroka otkaza, kao i njihovo procenjivanje. Na osnovu izvršenih procena, izračunava se indeks prioriteta rizika definisan izrazom:

$$IPR = P \cdot T \cdot U$$

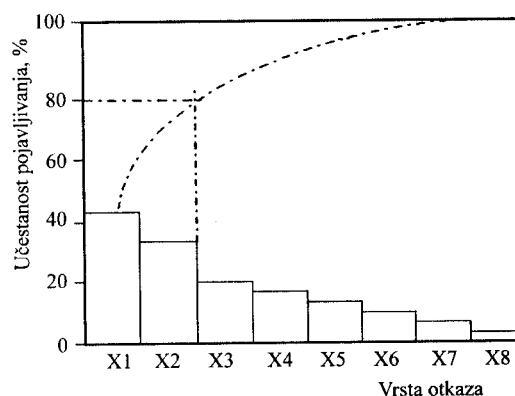
gde je: P – verovatnoća da će se otkaz pojaviti, T – težina otkaza i U – mogućnost uočavanja otkaza.

Za klizne ležaje osnovni potencijalni otkazi, njihove potencijalne posledice kao i potencijalni uzroci definisani su standardom ISO 12132/99 [20].

## Pareto metoda

Pareto (Pareto) metod analize spada u statističke metode praćenja i rešavanja problema uzroka i posledica otkaza kod uređaja i njihovih elemenata. Sastoji se u praćenju pojava otkaza u toku nekog vremenskog perioda, na osnovu čega se dolazi do najuticajnijih otkaza prema učestanosti pojavljivanja. Ova metoda se još naziva i pravilo 80:20, zato što pokazuje da se određene vrste otkaza (20 %) javljaju u 80 % slučajeva. Otklanjanjem uzroka samo ovih 20 % otkaza moguće je drastično smanjiti ukupan broj otkaza [21, 22].

Podaci se prikazuju putem dijagrama tako što se na apscisi beleže opadajućim redosledom prema učestanosti otkazi, a na ordinati njihova učestanost (sl. 5).



Slika 5 Pareto dijagram

Dobijeni otkazi na apscisi (X1 do Xn) se grupišu prema uticajnosti, tako što se, počevši od najuticajnijeg X1 retrospektivno, sabiraju njihove učestanosti dok zbir ne bude 80 % i oni čine grupu čestih otkaza. Iza te grupe, na sličan način, grupišu se podaci o otkazima u grupu manje čestih otkaza sa kumulativnom vrednošću 20 % uticajnosti (učestanosti).

Ovako grupisani otkazi se upoređuju sa listom otkaza kod FMEA metode i proverava se da li smo FMEA metodom predvideli otkaze iz grupe čestih otkaza (vrste X1 i X2 – abrazivno i adhezivno habanje kod kliznih ležaja) i da li smo za njih dobili najveći faktor rizika. Ukoliko se podaci ne slažu, treba proveriti FMEA analizu, a ukoliko neki od otkaza nismo predvideli, potrebno ga je dodati u listu kod FMEA metode i obraditi ga.

### 2.2 Dijagnostika uzroka i načina otkaza

Sve prethodno pomenute metode imaju za cilj da otklone ili smanje verovatnoću nastajanja uzroka otkaza odnosno samog otkaza, a primenjuju se, pre

Naziv firme		FMEA - Analiza načina i posledica otkaza						Naziv proizvoda:		Broj dela / crteža:					
		<input type="checkbox"/> Kompletno nova ili novo korišćena komponenta			<input type="checkbox"/> Postojeća komponenta koju treba poboljšati			Model / Sistem / Obrada:		Tehničko stanje izmene:					
		Odgovoran		Pogon / Isporučilac		Pogon / Isporučilac									
		Datum:		Datum izmene:		Strana:									
Komponenta / sistem	Klasa funkcionalnosti *	Potencijalni načini otkaza	Potencijalne posledice (efekti) otkaza	Potencijalni uzroci otkaza	Postojeće stanje				Korektivne mere			Poboljšano stanje			
					Predvidene mere kontrole	V	T	U	IPR	Predvidene mere poboljšanja	Odgovornost i dinamika realizacije	Preduzete mere i dinamika realizacije	V	T	U
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">           V - verovatnoća pojave otkaza            T - težina otkaza            U - uočljivost otkaza            IPR - indeks prioriteta rizika         </div>															
Verovatnoća pojave otkaza		Težina otkaza (uticaj na korisnika)			Uočljivost otkaza		Indeks prioriteta rizika (IPR)		Učesnici		Zainteresovane službe				
Procena	Poeni	Procena	Poeni	Ekvivalentna greška	Procena	Poeni	Procena	Rezultujući broj poena							
Zanemarljiva	1	Zanemarljiva	1		(3) (6) (20) (50)	Velika			1	Mali	1...50				
Mala	2...3	Mala	2...3	Srednja		2...5	Srednji	50...100							
Srednja	4...6	Srednja	4...6	Mala		6...8	Veliki	100...200							
Velika	7...8	Velika	7...8	Vrlo mala		9	Veliki	200...1000							
Vrlo velika	9...10	Vrlo velika	9...10	Zanemarljiva		10	Vrlo veliki	200...1000							

\* 1 se odnosi na vitalne delove (utiču na bezbednost), 2 na odgovorne delove koji utiču na obavljanje funkcije i 3 na delove bez posebne odgovornosti

svega, u fazi konstruisanja za čije potrebe su i nastale, ali su kasnije počele da se primenjuju i u fazama proizvodnje kao i održavanja mašinskih sistema.

Ovakve analize se, po pravilu, vrše kod sistema kod kojih je veliki uticaj održavanja na proizvodnost, sigurnost u radu ili uticaj na okolinu, ili kod sistema koji imaju visoke troškove održavanja, česte otkaze ili zahtev za često korektivno održavanje.

U datim istraživanjima, osnovno je locirati problem, zatim ustanoviti glavne uticajne parametre, pre nego što se donese odluka koje veličine i karakteristike treba da se menjaju, normalno na

najteftiniji i najcelishodniji način. Nije dovoljno, što je čest slučaj u praksi, da se označi da je neki klizni mašinski deo oštećen ili da se utvrdi samo učestanost otkaza, već je primarno da se utvrdi osnovni uzrok njegovog nastajanja.

Poznavanje relevantnih parametara koji dovode do otkaza smanjuje uticaj nepoznatih i slučajnih faktora i omogućuje racionalnu primenu savremenih tehnika za analizu i ocenu kritičnosti sistema i njegovih elemenata.

U slučaju sličnih ili istih oštećenja kliznih ležaja masovne produkcije može da se ukaže, relativno jednostavnim analizama, da li su greške u konstrukciji, materijalu, podmazivanju ili neadekvatnim uslovima rada. Pojedinačno ili maloserijski proizvedeni klizni ležaji i neuobičajena oštećenja

zahtevaju često kompleksnija istraživanja, a ponekad i reprodukciju takvih oštećenja u laboratorijskim uslovima da bi se utvrdio mehanizam oštećenja.

Dijagnostika otkaza kliznih ležaja uključuje proučavanje svih relevantnih parametara kliznog ležaja, kao i analizu oštećenih kliznih ležaja.

Pod relevantnim parametrima kliznog ležaja se podrazumevaju:

- radne karakteristike sistema (vrsta kretanja, opterećenje, brzina, temperatura, vreme rada i druge),
- struktura sistema (ležaj, rukavac, mazivo, atmosferski uticaji) i svojstva elemenata sistema,
- interakcije elemenata sistema (proces kontakta, postupak i vrste podmazivanja, hemijski aspekti interakcije mazivo – materijal – okolina) i
- proces trenja i habanja (moguće vrste i uticajne veličine).

Analiza oštećenih kliznih ležaja podrazumeva:

- uopšteno stanje ležaja,
- specifično stanje ležaja,
- utvrđivanje vida oštećenja i vrste habanja,
- određivanje uzroka otkaza i
- matematičku interpretaciju koristeći zakonitosti matematičke statistike.

Utvrđivanje uzroka oštećenja i otkaza se obično radi procenom, na osnovu već uspostavljenih klasifikacija uzrok – manifestacija. Pri tome je poznato da pojava otkaza nastaje uz određene pravilnosti, bez obzira što se u praksi kao uzrok može javiti više mehanizama koji deluju simultano. Takođe, treba imati u vidu da složena kombinacija konstrukcije, primenjenog materijala i uslova rada i održavanja, često čine teškoće u utvrđivanju

primarnog uzroka otkaza. U tim slučajevima, znanja o uslovima rada i istorija održavanja kliznog ležaja imaju veoma važnu ulogu.

Danas postoje jasno definisane klasifikacije oštećenja i otkaza za pojedine i najvažnije mašinske elemente [12, 23]. One se prikazuju kao “Atlas otkaza” ili posredstvom nacionalnih ili internacionalnih standarda [24].

Po pravilu sva pomenuta dokumenta i tehničke informacije orjentisane su na dva objekta:

- identifikaciju načina otkaza i
- utvrđivanje uzroka otkaza.

Način otkaza se definiše kao fizički i/ili hemijski proces koji dovodi do gubitka zadate funkcije i pojava ili simptoma koji su prouzrokovani procesom otkaza. Uzroci otkaza su inženjerski uslovi (inženjerski nedostaci) koji dovode do registrovanog otkaza.

Sumirajući izneto, očigledno je da je za rešavanje navedenih problema neophodna baza podataka o već utvrđenim uzročnicima, mestu pojave i manifestaciji za svaki element ili mehanizam sistema. Vrste otkaza kliznih ležaja u funkciji najčešćih uzročnika vezanih za greške konstruisanja, materijala, proizvodnje, montaže, eksploatacije i grešaka podmazivanja prikazane u tablici 4 treba da posluže kao smernice pri analizi otkaza koja se sprovodi u praksi i omogućuju da se definiše odnos uzrok – manifestacija. Očigledno je da se često više uzročnika vezuje za jednu manifestaciju otkaza.

Vizuelno prepoznavanje pojavnih oblika otkaza je, takođe, važan element pri dijagnostici otkaza, i to je detaljnije obrađeno u tački 3.

*Uzroci i manifestacije oštećenja i otkaza kliznih ležaja*

*Tablica 4*

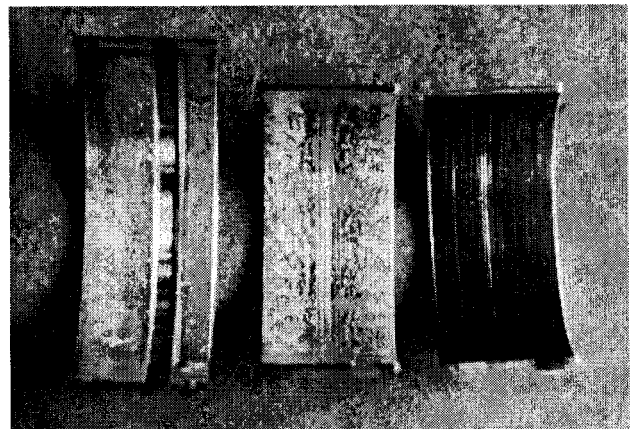
Uzroci	Greške materijala	Greške konstrukcije	Greške proizvodnje	Greške montaže	Neadekvatna eksploatacija	Greške podmazivanja
<b>Manifestacije</b>						
<b>Habanje pri klizanju</b>						
1. Normalno habanje	•	••	•	•••	••	•••
2. Abrazivno habanje		•		•	••	•••
3. Adhezivno habanje		••		•••	••	•••
4. Habanje pri uhodavanju			•	•		••
<b>Habanje usled zamora</b>						
1. Prskotine	•••	•	•	•••	•••	
2. Izbijanje materijala	•••	•	•	•••	•••	

<b>Habanje usled korozije</b>						
1. Hemijska korozija	•					••
2. Freting					•	•
<b>Deformacija</b>						
1. Trag nošenja				•	•	
2. Promena oblika	•	•		••		•
3. Utiskivanje						•
<b>Pregrevanje</b>						
1. Prskotine		••	•	•	•••	•••
2. Topljenje materijala		••	•	•	•••	•••
3. Promena boje		••	•	•	•••	•••
<b>Ostalo</b>						
1. Kavitaciona erozija			•		••	
2. Erozija			•		••	•
3. Odvajanje sloja ležišnog materijala			•		•••	
<b>Čelična podloga</b>						
1. Freting korozija	•			•	•	
2. Deformacija		•		••	•	
3. Lom		•		••	•	
4. Gubitak prednaprezanja		•		•	•	

Značajnost uzročnika: • mala, •• srednja i ••• velika

### 3. VRSTE I MANIFESTACIJE OTKAZA METALNIH KLIZNIH LEŽAJA

Dati pregled oštećenja kliznih ležaja načinjen je prema manifestacijama oštećenja uz navođenje najčešćih uzročnika i mera koje treba preduzeti da bi se ona eliminisala ili smanjila [24, 25], i predstavlja ilustraciju oštećenja koja se najčešće javljaju u praksi. Ovakav prilaz se čini najadekvatnijim s obzirom da su uzroci pojedinih vrsta oštećenja i otkaza mnogobrojni i da jedan uzročnik u datim uslovima može imati različite manifestacije.



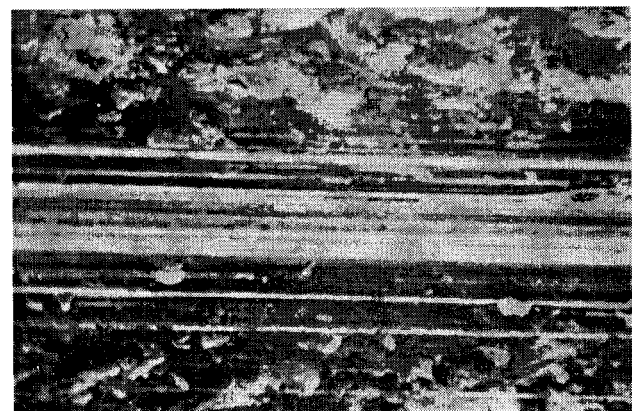
Slika 6 Površina ležaja oštećena abrazijom

#### 3.1 Oštećenja ležaja abrazijom

**Uzroci:** Nastaje usled prisustva čvrstih materija (nečistoća) u ležaju. Te nečistoće mogu dospeti u ležaj tokom proizvodnje ili montaže i tokom rada. Pri tome se razlikuju:

- abrazivne materije dospele u ležaj iz spoljašnje sredine i
- abrazivne materije nastale habanjem delova sklopa ležaja.

**Manifestacije:** Vidljivo brazdanje površine ležaja ili utisnuti delići abrazivnih čestica (sl. 6). Pored brazdi, na slici 7 vide se utisnute čestice po celoj površini.



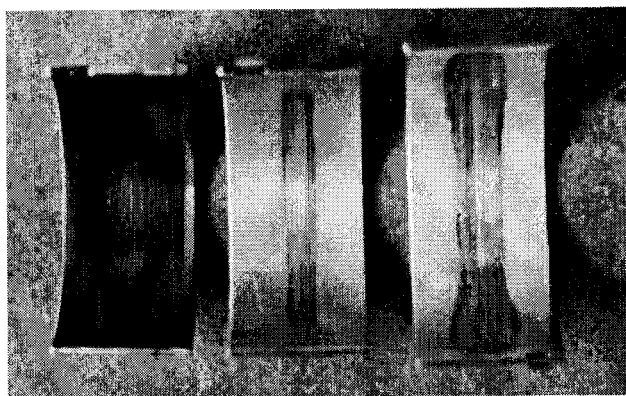
Slika 7 Detalj ležaja oštećen abrazijom

**Korektivne mere:** Ležaj oštećen abrazivnim habanjem treba demontirati i ugraditi novi, posle detaljnog čišćenja sistema za podmazivanje i ugradnje novih i poboljšanih filtera, uz istovremenu zamenu maziva u sistemu.

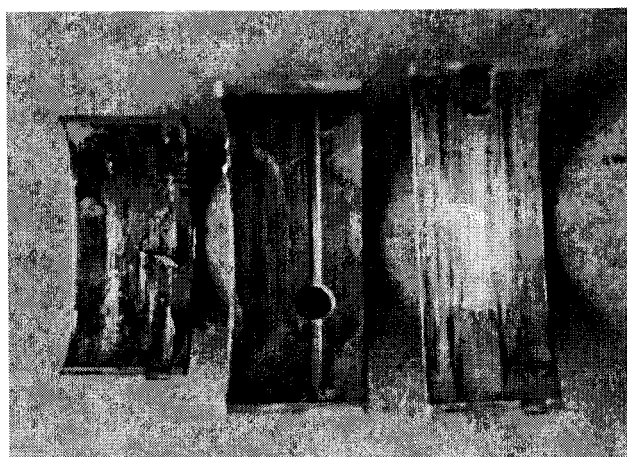
### 3.2 Oštećenja ležaja adhezivnim habanjem

**Uzroci:** Najčešći razlozi za pojavu adhezivnog habanja kod kliznih ležaja su neadekvatan zazor, bilo zbog greške konstrukcije ili montaže, neadekvatno snabdevanje ležaja mazivom ili neodgovarajuće karakteristike maziva. Tokom rada ležaja, prekid uljnog sloja izazvan ekstremnim opterećenjem ili vibracijama, kao i loše uravnoteženje mogu biti uzrok adhezivnog habanja.

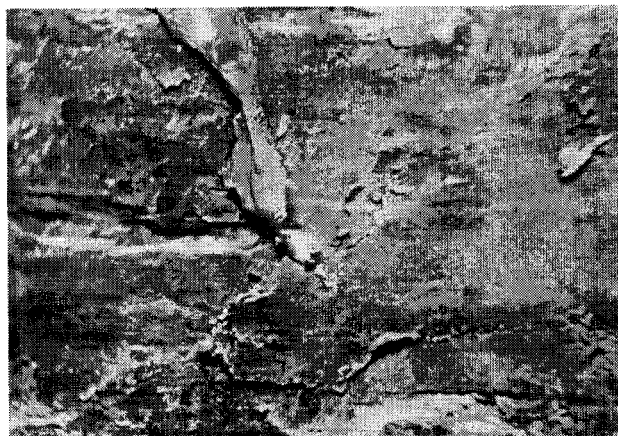
**Manifestacije:** Adhezivno habanje se manifestuje od blagog otiranja materijala sa površine (sl. 8), praćeno često promenom boje površine zbog zagrevanja i povlačenjem materijala zbog omekšavanja, pa do zaribavanja (sl. 9 i 10).



*Slika 8 Površina ležaja oštećena otiranjem – lakim adhezivnim habanjem*



*Slika 9 Teško adhezivno habanje i zaribavanje*



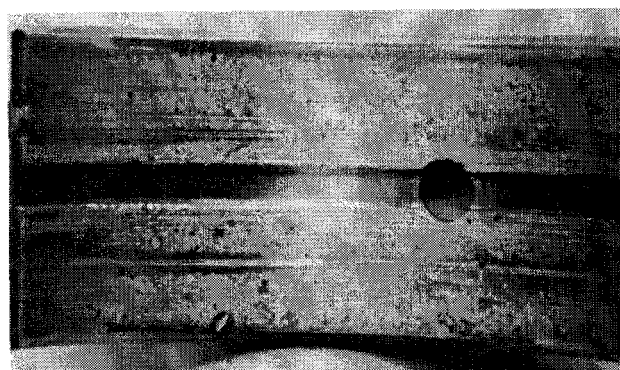
*Slika 10 Razaranja ležišnog materijala usled zaribavanja (detalj)*

**Korektivne mere:** U slučaju pojave neznatnog otiranja materijala, ležaj se može ponovo koristiti ukoliko se otklone uzroci (povećanjem zazora, odstranjivanjem vibracija i sl.). Ako su na površini ležaja, istovremeno zapažene prskotine, takav ležaj treba zameniti.

### 3.3 Oštećenja ležaja usled površinskog zamora

**Uzroci:** Ova vrsta habanja nastaje pri dinamičkom opterećenju kliznih ležaja. Međutim, površinski zamor može da se javi i u slučaju preopterećenja ili vibracija, kao i pri povišenim radnim temperaturama, što kod pojedinih vrsta materijala (npr. belih metala) može značajno da smanji čvrstoću na zamor. Otpornost na zamor menja se inverzno sa tvrdoćom, a srazmerno sa debljinom antifrikcionog sloja.

**Manifestacije:** U početnom periodu površinski zamor se manifestuje pojavom prskotina koje se tokom daljih naprezanja proširuju, međusobno spajaju, što dovodi do odvajanja materijala (sl. 11).



*Slika 11 Površina ležaja oštećena zamorom materijala*

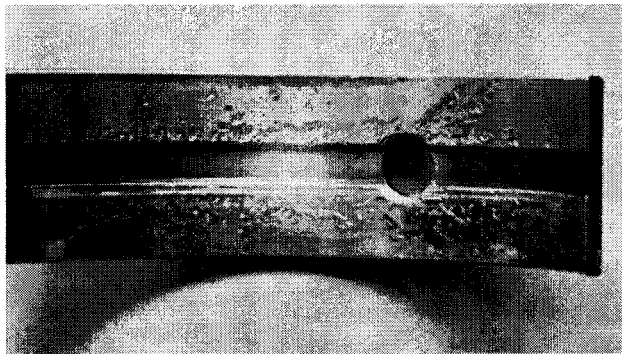


**Korektivne mere:** Otkloniti uzrok pojave površinskog zamora ili koristiti materijal za ležaj sa visokom otpornošću na zamor.

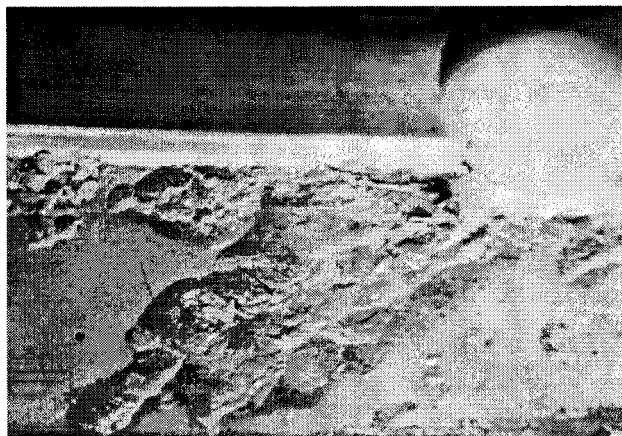
### 3.4 Oštećenja ležaja kavitacionom erozijom

**Uzroci:** Fluktuacija pritiska u ležaju, vibracije rukavca, neadekvatno strujanje maziva kroz otvore i kanale. Tipična pojava kod ležaja izloženih visokom opterećenju, vibracijama i velikom broju obrtaja.

**Manifestacije:** Oštećenja kavitacionom erozijom karakterišu pojave razaranja materijala uvek na istim ili sličnim mestima ležaja i pojave prskotina kao kod zamora materijala. Razlikujemo usisnu, izlaznu, strujnu i udarnu kavitacionu eroziju (sl. 12 i 13).



*Slika 12 Oštećenje materijala ležaja izazvano izlaznom kavitacionom erozijom*



*Slika 13 Detalj ležaja oštećen kavitacionom erozijom*

**Korektivne mere:** Poboljšanje konstrukcije ležaja, povećanje pritiska ulja u sistemu za podmazivanje, smanjenje zazora, izbor materijala sa većom otpornošću na kavitacionu eroziju, itd.

### 3.5 Oštećenja ležaja usled erozije fluidom

**Uzroci:** Strujanje maziva velikom brzinom i udari kapi tečnosti ili tvrdih čestica koje nosi mazivo o površinu ležaja.

**Manifestacije:** Razaranje materijala blizu otvora i kanala direktnim odnošenjem materijala ili zamorom (sl. 14).

**Korektivne mere:** Smanjenje brzine strujanja maziva i/ili povećanje tvrdoće materijala ležaja.

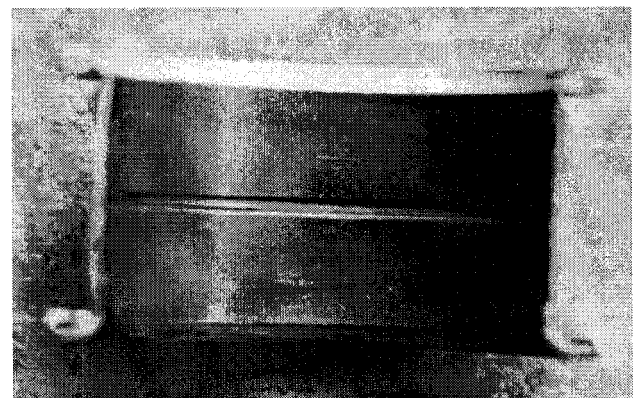


*Slika 14 Površina ležaja oštećena udarom mlaza ulja za podmazivanje*

### 3.6 Oštećenja ležaja korozijom

**Uzroci:** Koroziono delovanje materija koje su kontaminirale mazivo (voda, antifriz i dr.) ili nastale u mazivu tokom upotrebe, kao rezultat oksidacije.

**Manifestacije:** Vidljive korodirane površine materijala (sl. 15).



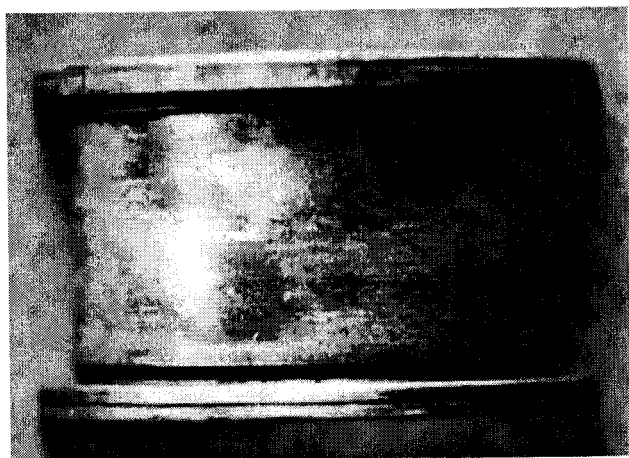
*Slika 15 Korozija ležaja izazvana produktima oksidacije maziva*

**Korektivne mere:** Izmene u karakteristikama maziva ili izbor materijala ležaja sa poboljšanim svojstvima u odnosu na koroziju. Eliminirati mogućnost prodora kontaminanata.

### 3.7 Oštećenja ležaja usled fretinga

**Uzroci:** Mala pomeranja i vibracije ležaja u kućištu. Vibracije stacionarnog rukavca u ležaju tokom transporta.

**Manifestacije:** Pomeranje ležaja u kućištu dovodi do oštećenja ledne strane ležaja (sl. 16). Vibracije rukavca manifestuju se pojavom prskotina i adhezivnim habanjem površine ležaja. Često je prisutna i korozija.



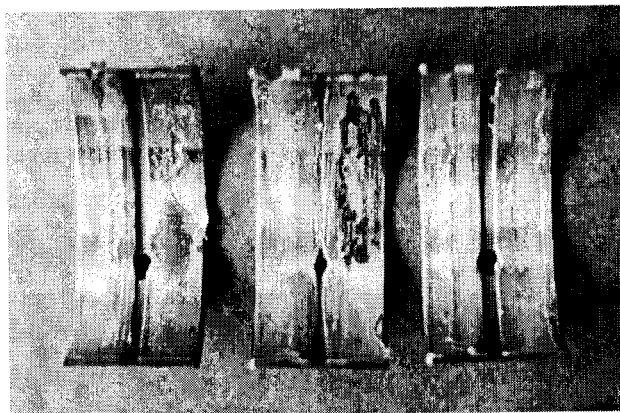
*Slika 16 Oštećenje ležaja fretingom usled vibracija*

**Korektivne mere:** Eliminacija vibracija. Pravilna ugradnja ležaja. Provera čvrstoće kućišta.

### 3.8 Oštećenja ležaja plastičnom deformacijom materijala

**Uzroci:** Nepravilnosti u sistemu podmazivanja, neodgovarajući sloj maziva.

**Manifestacije:** Topljenje materijala ležaja na površini i plastično strujanje (sl. 17). U težim slučajevima pojava zaribavanja.



*Slika 17 Oštećenje ležaja plastičnom deformacijom usled neodgovarajuće viskoznosti maziva*

**Korektivne mere:** Izmene u sistemu podmazivanja ili karakteristika maziva.

### 3.9 Oštećenja ležaja usled loma

**Uzroci:** Preopterećenja, udarna opterećenja ili, kod višeslojnih ležaja, neodgovarajuća veza ležišnog materijala i osnove.

**Manifestacije:** Gubitak ležišnog materijala sa većih površina (sl. 18).



*Slika 18 Lom ležaja zbog loše veze ležišnog materijala sa osnovom*

**Korektivne mere:** Poboljšanje tehnologije proizvodnje. Otklanjanje mogućih preopterećenja ili izrazitih udarnih opterećenja.

## LITERATURA

- [1] --, *Plain Bearing Failures*, Lubrication, 20, 1, 1965
- [2] Paine B. and Cambell B., *Examples of Damage which Can Occur in Automobile Engine Bearings*, Glacier Metal Co., TA 100/2, 1969
- [3] Melish P., *Failures of Automobile Plain Bearings*, Tribology, 2, 2, 1969
- [4] --, *Bearing Damage*, Glacier Metal Co., 248/70
- [5] Klumpp G., *Bearings: Types and Damage*, KS-Dienst, 7/76, No 28
- [6] Rac A., *Uzroci i manifestacije oštećenja kliznih ležaja motora SUS*, MVM, Kragujevac, maj 1982
- [7] Bartz W. J., *Failures and Failure Analysis of Lubricated Machine Elements-Gears, Roller Bearings and Journal Bearings*, EURO-TRIB81, Warszawa, 1981
- [8] Scott D., *Bearing Failure Diagnosis and Investigation*, Wear, 25, 1973, 199-213
- [9] Bartz W. J., *The Influence of Lubricants on Failures of Bearings and Gears*, Tribology, 9, 5, 1976, 213-224
- [10] Grupa autora, *Handbook of Loss Prevention*, Springer-Verlag, 1978
- [11] Rac A., *Proučavanje oštećenja hidrodinamičkih radijalnih kliznih ležaja sa posebnim osvrtom na kavitaciona trošenja*, Mašinski fakultet, Beograd, 1981, Doktorska disertacija
- [12] Rac A., *Eksploataciona istraživanja učestanosti i vrsta trošenja materijala ležaja motora SUS*, Naučno-stručni skup "IPS85", Titograd, 1985, Zbornik radova
- [13] Ball P. G., *Machine Wear Analysis – A Rational Approach to Methods Integration for Maximum Benefits*, Lub. Eng., 54, 3, 1998, 18-22
- [14] --, CEI IEC 1025:1990, *Fault tree analysis (FTA)*
- [15] Strauss B. M., *Fault Tree Analysis of Bearing Failures*, Lub. Eng., 40, 11, 1984, 674-680
- [16] Jeremić Đ., *Savremene metode obezbeđivanja kvaliteta tribomehaničkih sistema ocenjivanjem i vrednovanjem projekata*, Mašinski fakultet, Beograd, 1996, Specijalistički rad
- [17] Ehnest R., und Althans K., *Die Fehlermöglichkeits - und Einfluss - Analyse (FMEA) - eine Methode zur Qualitätssicherung*, Wissenschaftliche Zeitschrift, Technische Universität Chemnitz-Zwickau, 4, 1992, 197-205
- [18] Vukčević T. i Rajić Z., *FMEA - priručnik za praksu*, Evropa jugoinspekt, Beograd, 1994
- [19] Rac A., Klarin M., Nikčević V., Predić Z. i Jeremić Đ., *Obezbeđenje kvaliteta proizvoda aplikacijom metoda "FMECA"*, Naučno-stručni skup "IRMES 95", Niš, 1995
- [20] --, ISO 12132:1999, *Plain bearings - Quality assurance of thin-walled half bearings - Design FMEA*
- [21] Logan N., *Pareto Analysis: When Quality-Control Demands Decisions*, 2002, <http://www.freequality.org/beta%20freeequal/fq%20web%20site/Training/Classes%20Fall%202002/Pareto%20Analysis.doc>
- [22] Leavengood S. and Reeb J., *Statistical Process Control, Part3: Pareto Analysis and Check Sheets*, Oregon State University, 2002
- [23] Neale M. J., *Tribology Handbook*, part E, Butterworths, London, 1973
- [24] --, ISO 7146:1993, *Plain bearings - Terms, characteristics and causes of damage and changes in appearance*
- [25] Rac A. *Metalni materijali za klizne ležaje*, Mašinski fakultet, Beograd, jun 1998