



8th International Tribology Conference

Osma internacionalna konferencija o tribologiji
Beograd, 8. - 10. oktobra 2003.

PRAĆENJE STANJA I DIJAGNOSTIKA OTKAZA KLIZNIH LEŽAJA

Aleksandar RAC

*Mašinski fakultet, Centar za tribologiju
27 Marta 80, 11120 Beograd*

Rezime

Otkazi kliznih ležaja imaju najveći uticaj na pouzdanost rada i vek kod mnogih mašina i uređaja. Značaj ispitivanja otkaza je s toga dobro poznat. Ono ukazuje na moguće uzročnike i na potrebne mere koje treba preduzeti za smanjenje i eliminaciju otkaza. Iz tih razloga su u ovom radu analizirani mogući uzročnici otkaza kliznih ležaja, dat je predlog za metodologiju dijagnostike, kao i predlog za praćenje stanja, imajući u vidu predominantne uzročnike otkaza.

CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS OF SLIDING BEARING FAILURES

Aleksandar RAC

*University of Belgrade, Dept. of Mech. Eng., Tribology Center
27 Marta 80, 11120 Belgrade*

Summary

Failures of sliding bearing have a major influence on the reliability and life of many machines and equipments. The importance of the examination of sliding bearing failures is well known. They point to the possible causes and to the necessary treatment for its reduction or elimination. This paper discusses the main causes of bearing failures and their manifestations. In addition, the methods of failure diagnosis and monitoring system are proposed.

1. UVOD

Moderno inženjerstvo zavisi u velikoj meri od ležaja i progres u mašinogradnji je bitno povezan sa progresom u oblasti kliznih ležaja. Činjenica je takodje, da je ispravnost i pouzdanost rada mašina i uređaja funkcija ispravnosti 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. To je i razlog da su istraživanja otkaza kliznih ležaja mnogo-brojna i prikazana u literaturi kroz različite klasifikacije /1,2/, istraživanja uzroka,

manifestacija i korektivnih mera /3,4,5,6/, istraživanja uticaja maziva /7/, postupaka dijagnostike i ispitivanja /8/.

I ovaj rad razmatra problematiku otkaza kliznih ležaja sa idejom da se predloži metodologija praćenja stanja i postupak dijagnostike oštećenja i otkaza.

2. OTKAZI KLIZNIH LEŽAJA, NJIHOVI UZROČNICI I MANIFESTACIJE

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 indirektne troškove. Prema istraživanjima Skota (Scott) gubici nastali u valjaonicama i elektranama zbog otkaza kliznih ležaja su ekstremno visoki, reda veličine od nekoliko funti na minut do nekoliko stotina funti na minut /8/. Na osnovu analize autora, troškovi opravke dizel motora zbog oštećenja ležaja iznose od 20000 do 40000 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).

Tablica 1: Učestanost otkaza kliznih ležaja po grupama mašina

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

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

Klizni ležaj se smatra da je 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 ukljanjanje iz upotrebe, bilo radi opravke ili zamene.

Osnovni uzročnici koji dovode do oštećenja i otkaza kliznih ležaja uključuju mnoge aspekte konstruisanja, izbora materijala, nesavršenosti materijala, proizvodnje i procesa obrade, sklapanja, kontrole, ispitivanja, skladištenja, transporta, održavanja, nepredvidjenog izlaganja preopterećenju, direktnom mehaničkom ili hemijskom oštećenju 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/.

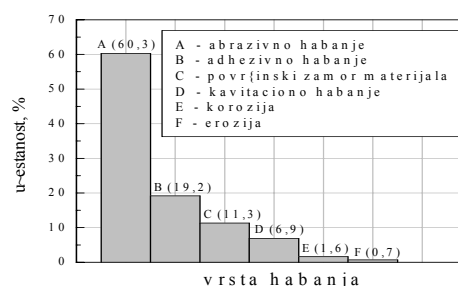
Otkazi i oštećenja izazvana navedenim grupama uzročnika manifestuju se najčešće kao **habanje, lom i plastična deformacija materijala.**

To su istovremeno i osnovni vidovi otkaza, koji se mogu podeliti, u odnosu na svojstva materijala, u dve kategorije. Jedna koja je povezana i zavisna prevashodno od čvrstoće materijala i druga koja 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.

Tablica 2: Uzročnici i učestanost otkaza

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 pojavna manifestacija otkaza kod kliznih ležaja, što potvrđuju i istraživanja realizovana od strane autora /11, 12/. Analiza je radjena 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 u opadajućem redu

Rezultati pokazuju da je najprisutnije abrazivno i adhezivno habanje, zatim habanje usled površinskog zamora, dok su ostale vrste habanje znatno manje zastupljene. To su istovremeno i pokazatelji koje treba imati u vidu kada se definiše program monitoringa stanja ležaja tokom eksploatacije.

3. DIJAGNOSTIKA UZROKA OTKAZA KLIZNIH LEŽAJA

Dijagnostika 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. Uključuje sve mere koje se izvode na tehničkim sistemima ili njihovim elementima u cilju iznalaženja i vrednovanja otkaza.

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 najjeftiniji i najcelishodniji način. Nije dovoljno, što je čest slučaj u praksi, da se označi da je neki klizni element 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 se relativno jednostavnim analizama da ukaže 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.

Metodologija istraživanja otkaza kliznih ležaja uključuje:

1. Proučavanje svih relevantnih parametara kliznog ležaja kao što su:

- radne karakteristike sistema (vrstu kretanja, opterećenje, brzinu, temperaturu, vreme rada i druge);
- struktura sistema (ležaj, rukavac, mazivo, atmosferski uticaji), svojstva elemenata sistema;
- interakcije elemenata sistema (proces kontakta, načini i vrste podmazivanja hemijski aspekti interakcije mazivo-materijal-okolina);

d. proces trenja i habanja (moguće vrste i uticajne veličine).

2. Analizu oštećenih kliznih ležaja i to:

- Uopšteno stanje ležaja;
- Specifično stanje ležaja,
- Utvrđivanje vida oštećenja i vrste habanja;
- Odredjivanje uzroka otkaza i
- Matematičku interpretaciju koristeći zakonitosti matematičke statistike.

Utvrđivanje uzroka oštećenja i otkaza obuhvata i analizu oštećenih delova. Procena se obično radi 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. Ali, treba imati, takodje, u vidu da složena kombinacija konstrukcije, primenjenog materijala, uslovi 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. One se prikazuju kao **Atlas otkaza ili kroz nacionalne ili internacionalne standarde**.

Po pravilu sva pomenuta dokumenta i tehničke informacije su orjentisane 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 navednih problema neophodna baza podataka o već utvrđenim uzročnicima, mestu pojave i manifestaciji za svaki element ili mehanizam sistema.

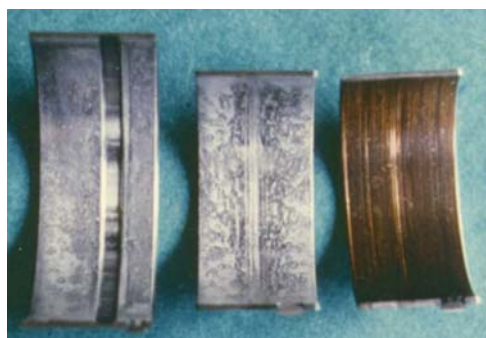
Vrste otkaza klizni ležaja u funkciji najčešćih uzročnika vezanih za greške konstruisanja, materijala, proizvodnje, montaže, eksploatacije i neminovno grešaka podmazivanja prikazane u tablici 3. treba da posluže kao smernice pri analizi otkaza koja se sprovodi u praksi i omogućuju da se definiše odnos uzrok-manifestacija. Očigledno je da se često više uzročnika vezuje za jednu manifestaciju otkaza.

Tablica 3: Uzroci i manifestacije oštećenja i otkaza kliznih ležaja

UZROCI	MANIFESTACIJE					
	Greške materijala	Greške konstrukcije	Greške proizvodnje	Greške montaže	Neadekvatna eksploatacija	Greške podmazivanja
HABANJE PRI KLIZANJU						
1. Normalno habanje	•	••	•	•••	••	•••
2. Abrazivno habanje		•		•	••	•••
3. Adhezivno habanje		••		•••	••	•••
4. Habanje pri uhodavanju			•	•		••
HABANJE USLED ZAMORA						
1. Prskotine	•••	•	•	•••	•••	
2. Izbijanje materijala	•••	•	•	•••	•••	
HABANJE USLED KOROZIJE						
1. Hemijska korozija	•					••
2. Freting					•	•
DEFORMACIJA						
1. Trag nošenja				•	•	
2. Promena oblika	•	•		••		•
3. Utiskivanje						•
PREGREVANJE						
1. Prskotine		••	•	•	•••	•••
2. Topljenje materijala		••	•	•	•••	•••
3. Promena boje		••	•	•	•••	•••
OSTALO						
1. Kavitaciona erozija			•		••	
2. Erozija			•		••	•
3. Odvajanje sloja lež. materijala			•		•••	
ČELIČNA PODLOGA						
1. Freting korozija	•			•	•	
2. Deformacija		•		••	•	
3. Lom		•		••	•	
4. Gubitak prednaprezanja		•		•	•	

Značajnost uzročnika: • manja; •• srednja; ••• velika

Vizuelno prepoznavanje pojava oblika otkaza je, takodje, važan element pri dijagnostici otkaza. Kao ilustracija na narednim slikama (sl. 2 i sl.3) dati su primeri izgleda oštećenja površina kliznih ležaja koja se najčešće javljaju u praksi.



Slika 2. Abrazivno habanje



Slika 3. Teško adhezivno habanje (zaribavanje)

4. MONITORING STANJA LEŽAJA – PROAKTIVNI PRISTUP

Da bi se oštećenja i otkazi kliznih ležaja sveli na najmanju moguću meru i time obezbedila visoka pouzdanost rada opreme, monitoring stanja ležaja se pokazuje neophodan. Prvi korak pri tome je identifikacija sistema sa najvećim rizikom. Nakon toga sledi definisanje programa i metoda monitoringa.

Pored praćenja temperature ležaja i ulja za njegovo podmazivanje, sistema koje proizvođači mašina i opreme često koriste kao kontrolne, savremene tehnike monitoringa uključuju pre svega praćenje kontaminanata u ulju i vibracije sistema.

Analize ulja i vibracija su proaktivne komplementarne metode monitoringa /13/. One su normalno i tehnike za procenu nastalih oštećenja. Program koji uključuje pomenute monitoring metode daje mogućnost utvrđivanja osnovnih uzročnika (root causes), što je prikazano u tablici 4.

Tablica 4: Uzročnici i program monitoringa

Zapažanja	Osnovni uzročnik	Aktivnosti
Abrazija	Kontaminacija maziva	Program kontrole kont.
Adhezija	Mala viskoznost	Program podmazivanja
	Velika opterećenja	Program analize vibrac.
	Mala brzina	Program podmazivanja
Zamor	Velika opterećenja	Program analize vibrac.
Korozija	Kontaminacija maziva	Program kontrole kont.

Originalna ideja za analizu produkta habanja kao kontaminanta ulja, ostvarena je prvo kod kliznih ležaja /14/. To je i razumljivo ako se ima u vidu

da je abrazivno habanje najprisutniji uzročnik otkaza. Za ocenu količine, oblika i veličine produkata habanja razvijen je poseban program poznat pod nazivom SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program). On omogućuje da se ostvari uvid u stanje spregnutih komponenti i progres oštećenja, što vodi ka njegovom ranom otkrivanju.

5. ZAKLJUČAK

Metodologija dijagnostike otkaza prikazana u ovom radu omogućuje saznanja koja mogu da doprinesu smanjenju i/ili eliminaciji oštećenja i otkaza kod kliznih ležaja.

Poznavanje i korišćenje proaktivnih metoda monitoringa kliznih ležaja, takodje, ima svoju tehničku i ekonomsku opravdanost, koja se ogleda u manjem broju zastoja i višoj produktivnosti opreme.

6. 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., *Failures and Failure Analysis of Lubricated Machine Elements-Gears, Roller Bearings and Journal Bearings*, EUROTRIB81, Warszawa, 1981.
8. Scott, D., *Bearing Failure Diagnosis and Investigation*, Wear, 25, 1973, 199-213
9. Bartz, W., *The Influence of Lubricants on Failures of Bearings and Gears*, Tribology, 9, 5, 1976
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*, dok. disertacija, Mašinski fakultet, 1981
12. Rac, A., *Eksploataciona istraživanja učestanosti i vrsta trošenja materijala ležaja motora SUS*, Međunarodni naučno-stručni skup »Izvor i prenos snage«, Titograd, 1985.
13. Garvey, R., *Wear Rates Impact Maintenance Priorities*, Machinery Lubrication, March-April, 2003, 42-48
14. *Condition Monitoring*, Tribology Int. 11, 1, 1978, 29-33