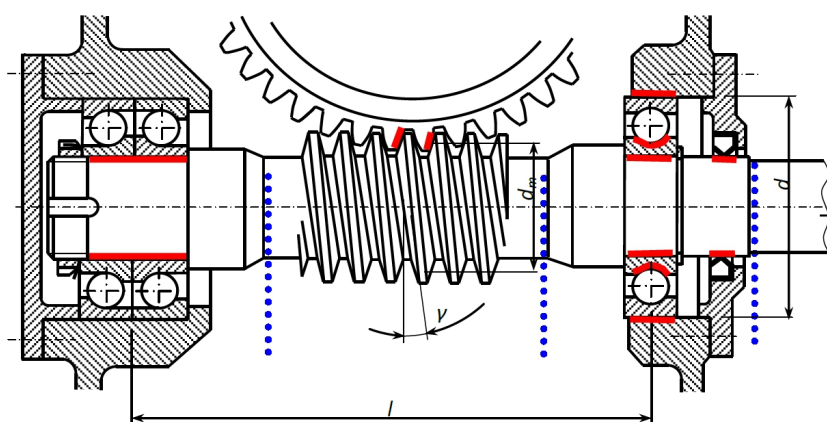


Reparacija vratila i ležaja

Reparacija vratila

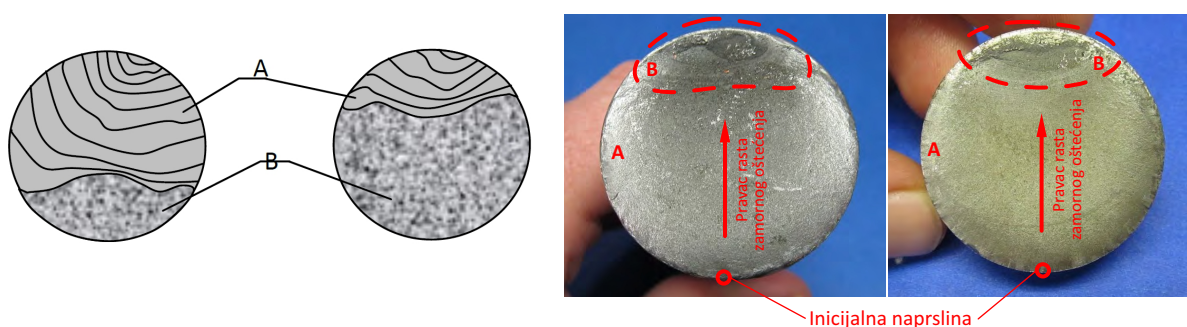
Vratila su vitalni visokoopterećeni mašinski delovi izloženi složenom naponskom stanju, velikom broju različitih izvora koncentracije napona i kontaktima sa drugim mašinskim delovima. Složeno i periodično promenljivo naponsko stanje i jaki izvori koncentracije napona u sadejstvu sa iznenadnim preopterećenjem i/ili greškom u materijalu, mogu dovesti do statičkog ili dinamičkog loma vratila.

Potencijalni kritični preseki se nalaze na prepustu vratila, gde se postavljaju spojnice i zupčanici ili između oslonaca vratila, na mestu spoja vratila i zupčanika, Slika 1. Kritični preseki sa aspekta zapreminskog razaranja označeni su plavom bojom, dok su kritični delovi vratila sa aspekta površinskog razaranja označeni crvenom bojom.



Slika 1 Kritični poprečni preseki vratila

Na osnovu izgleda poprečnog preseka havariisanog vratila, može se sagledati stepen zastupljenosti statičkog i dinamičkog razaranja. Na površini preloma po kojoj je nastalo zapreminsko razaranje usled zamora, mogu se uočiti dve oblasti A i B na Slici 2.



Slika 2 Zone statičkog i dinamičkog razaranja vratila

(A) - Oblast razaranja usled zamora (dinamičkog loma). Osnovna karakteristika ove oblasti je glatka površina preloma i sitnozrna struktura, sa vidljivim linijama zamora.

(B) – Oblast razaranja usled statičkog loma. Karakteristika ove oblasti je hrapava površina preloma i krupnozrna struktura (usled čupanja-kidanja materijala).

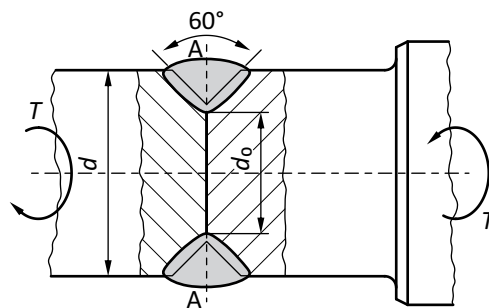
Na osnovu vizuelne i mikroskopske analize stanja površine loma i analitičke i numeričke analize radnog i kritičnog stanja vratila, mogu se sagledati (identifikovati) uslovi koji su imali dominantni uticaj na formiranje zapreminskog razaranja vratila.

Reparatura zapreminski razorenih vratila, u slučajevima gde je to tehnički moguće i ekonomski isplativo, može se sprovesti postupkom zavarivanja (toplotna metoda reparature). Zbog velikog unosa toplote, pojave deformacija i zaostalih napona posle zavarivanja, potrebno je primeniti odgovarajući termički tretman (otpuštanje) i izvršiti kontrolu tolerancija dužinskih mera, oblika i položaja, kao i uravnoteženosti vratila. Površine preloma prethodno treba pripremiti za spajanje postupkom zavarivanja, formiranjem odgovarajućeg kružnog žleba. Dubina žleba – debljina šava, određuje se iz uslova da je radni napon u šavu ne bude manji od odgovarajućeg dozvoljenog. U kritičnom poprečnom preseku (presek A-A), zavareni spoj ima prstenasti poprečni presek, a dinamička čvrstoća vratila je značajno smanjena, jer je zavareni spoj sam po sebi veliki izvor koncentracije napona. Nakon zavarivanja obavezna je završna obrada nadvišenja šava u cilju smanjenja koncentracije napona.

$$\sigma \leq \sigma_{doz} \quad \text{ i } \quad \tau \leq \tau_{doz}$$

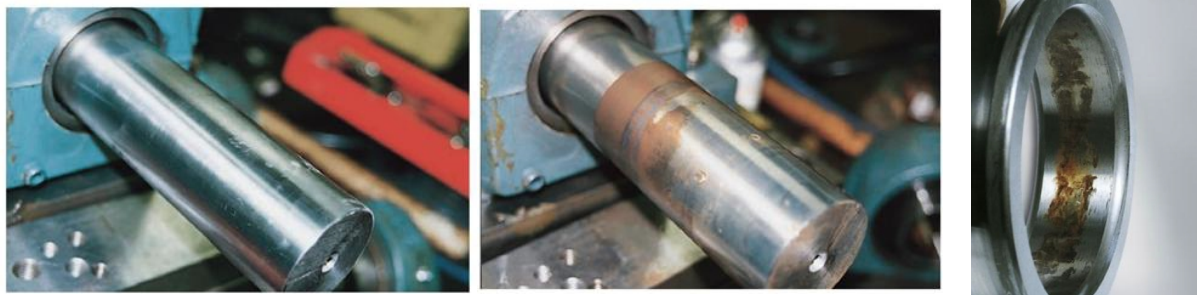
$$\psi \leq \sqrt[3]{1 - \frac{16T}{d^3 \pi \tau_{doz}}}$$

$$\psi = \frac{d_0}{d}$$



Slika 3 Metalurška metoda reparature (zavarivanja) zapreminski razorenog vratila

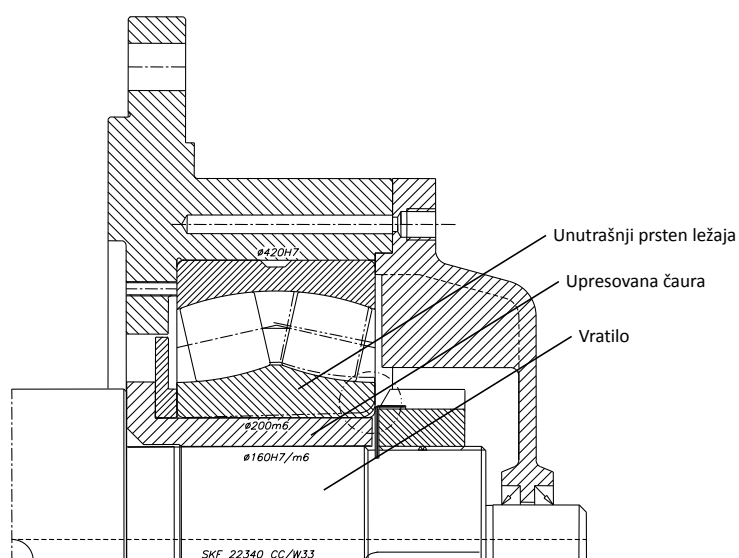
Kod vratila se pored zapreminskih razaranja, javljaju i površinska oštećenja na mestima kontakta podglavka vratila i glavčina obrtnih delova (zupčanika, spojnice, kaišnika). Takođe, oštećenja se javljaju na mestima kontakta rukavca vratila i unutrašnjeg prstena kotrljajnih ležaja ili rukavca vratila i čaure (posteljice) kliznog ležaja. Ova oštećenja se manifestuju u vidu habanja, usled dejstva sile trenja ili used pojave *fretting-a*. Fretting, Slika 4, je proces habanja koji se javlja u zoni kontakta dva tela koja se oscilatorno kreću sa malim amplitudama



Slika 4 Fretting oštećenja vratila i unutrašnjeg prstena kotrljajnog ležaja

Freting korozija je vrsta fretting habanja kod koga korozija ima osnovni uticaj na razvoj procesa. U zoni kontakta formiraju se jamice ispunjene oksidom koji posle odvajanja deluje kao abrazivna čestica. Zato površine oštećene frettingom imaju korodirani (braonkast) izgled.

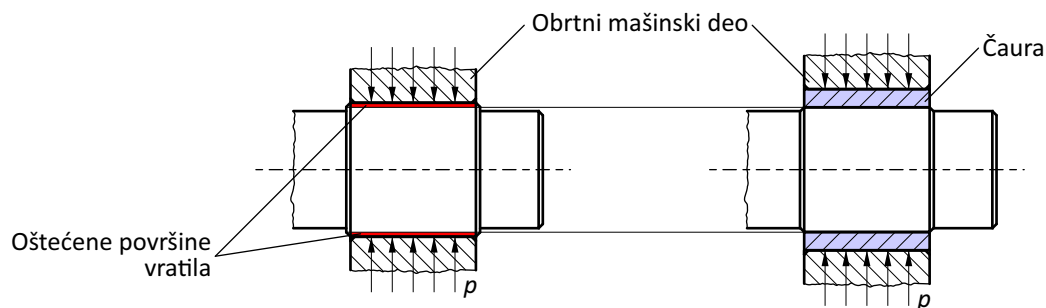
Reparatura oštećenih površina vratila, podglavka ili rukavca, može se sprovesti primenom toplotne metode reparature (navarivanje ili metalizacija) ili primenom mehaničke hladne reparature, postavljanjem posrednika – čaure odgovarajućih dimenzija između podglavka vratila i glavčine obrtnih delova ili između rukavca vratila i unutrašnjeg prstena ležaja.



Slika 5 Reparacija rukavca vratila višeslojnim presovanim slojem

Ako se reparacija izvodi toplotnom metodom, nakon grubog struganja, odgovarajućim postupkom (navarivanje ili metalizacija) se nanosi novi sloj. Zatim se fino obrađuje na tačno propisanu tolerisanu meru i propisani kvalitet površina (IT) u skladu sa tehničkom dokumentacijom.

Ako se reparacija izvodi mehaničkim hladnim postupkom, nakon grubog skidanja strugotine do dubine oštećenja, vratilo se fino obrađuje na tačno propisanu tolerisanu meru i propisani kvalitet površina (IT) u saglasnosti sa merama čaure (umetka) i željenim čvrstim naleganjem. Ovaj proces se popularno naziva „biksnovanje”.



Slika 6 Šematski prikaz reparacije vratila umetanjem čaure

Dimenzije čaure i tolerancije dužinskih mera u cilju postizanja odgovarajućeg preklopa između spojenih delova određuju se iz uslova, da u svim tačkama delova spoja vladaju elastične deformacije i iz uslova relativnog mirovanja spojenih delova, tj. bez pojave proklizavanja. Granične vrednosti preklopa (minimalne i maksimalne) određuju se na osnovu graničnih vrednosti pritiska na dodirnim površinama:

$$p_{\max} = \frac{\sigma_{TM}}{S \cdot K_e} \quad \text{i} \quad p_{\min} = \frac{F \cdot S_{\mu}}{A \cdot \mu}$$

gde su:

σ_{TM} – kritični napon, napon tečenja materijala delova čvrstog spoja,

S – stepen sigurnosti protiv pojave plastičnih deformacija,

S_μ – stepen sigurnosti protiv pojave proklizavanja delova spoja,

F – radno opterećenje koje prenosi presovani spoj (tangencijalno i/ili aksijalno),

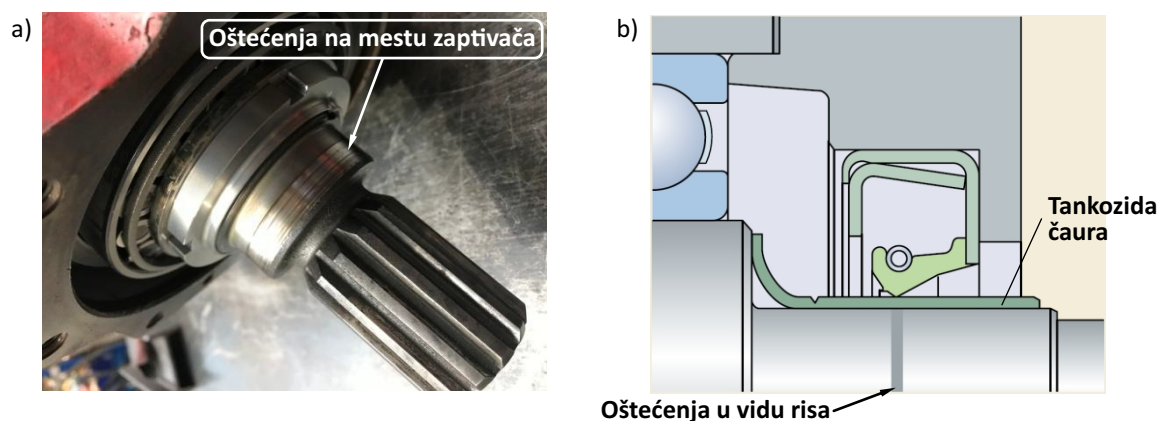
A – dodirna površina delova u spoju,

μ – koeficijent trenja,

K_e – faktor geometrijskih i elastičnih karakteristika delova spoja.

Površinska razaranja vratila na mestu zaptivnih elemenata

Za efikasno zaptivanje, radijalne zaptivke vratila moraju da rade naspram glatke, cilindrične površine. Ako se površina na koju naleže gumeni deo zaptivača ošteti, Slika 7a, zaptivač neće moći da ispunjava svoju funkciju, a to je da spreči isticanje maziva, odnosno spreči prodor kontaminanata u mazivo. Obično kontaktna površina koja se zaptiva postane oštećena kada se čestice kontaminacije nađu zarobljene ispod gumenog prstena, pri čemu vrše abrazivno habanje metalne površine vratila pri njegovoj rotaciji. Na ovom segmentu vratila pojavljuju se oštećenja u vidu brazde (risa). Sa razvojem procesa razaranja, omogućen je prodor ili nalepljivanje sve veće količine čestica kontaminacije, što dalje dovodi do otkaza komponente čije je podmazivanje zaptivač trebao da zaštiti. Zamena zaptivača ne daje zadovoljavajući rezultat jer su oštećene metalne površine koje naležu na gumeni prsten zaptivača, a da bi se izvršila reparatura (npr. navarivanjem ili metalizacijom) oštećene površine vratila najčešće je neophodno demontirati čitav sklop. Za potrebe vraćanja elementarne funkcije zaptivnoj površini vratila osmišljena su rešenja u vidu specijalnih tankozidih čaura (SKF Speedi-Sleeve¹), kojima se može ponovo uspostaviti funkcija zaptivanja bez demontaže sklopa vratila, ili promene dimenzija zaptivača (ukoliko se prečnik vratila obrađuje na manju meru zbog uklanjanja površinskih oštećenja). Izrađuju se od nerđajućeg materijala, posebnim postupkom izrade, čime se dobija optimizovana dodirna površina koja umanjuje habanje gumenih delova zaptivke i tankozide čaure. Neprimetni džepovi za podmazivanje omogućuju prodor maziva do spoljašnje površine čaure, čime se izbegava rad zaptivnog prstena na suvo, i značajno smanjuje habanje. Čaure su tankozide (debljina zida 0,28 mm), sa boljim parametrima tolerancija oblika i položaja i površinske hrapavosti nego što je moguće postići na vratilu.

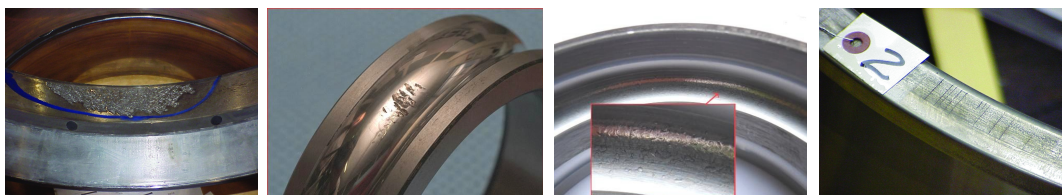


Slika 7 Reparacija površinski oštećenog vratila na mestu zaptivke primenom tankozide čaure

¹SKF Speedi-Sleeve NEW GENERATION

Reparacija ležaja

Kotrljajni ležaji su standardni mašinski elementi koji se ne konstruišu već se kupuju kao gotovi proizvodi. Konstrukciono rešenje ležaja, izabrano na osnovu tehničkih i ekonomskih kriterijuma je takvo da ležaj uspešno može obavljati svoju elementarnu funkciju samo u ograničenom vremenskom periodu. U ovom vremenskom periodu (radnom veku ležaja) nastala površinska oštećenja, najčešće na stazama unutrašnjeg prstena i kotrljajnom telu, dovode do generisanja toplote, buke i vibracija. Površinska oštećenja se manifestuju pojavom habanja i pitinga, Slika 8, usled čega dolazi do povećanog radijalnog zazora ležaja.



Slika 8 Površinska oštećenja kotrljajnih ležaja

Kod ležaja velikih dimenzija, Slika 9^a, koji se ne proizvode serijski, već pojedinačno – namenski, na osnovu tehnioekonomske analize treba konstatovati da li je celishodnije praviti novi ležaj, ili reparirati postojeći. Reparatura kotrljajnih ležaja sastoji se u skidanju oštećenog površinskog sloja sa staze kotrljanja unutrašnjeg prstena i zamenom svih kotrljajnih tela – novim kotrljajnim telima. Svakako, repariraju se samo ležaji velikih dimenzija, odnosno gde je reparacija ekonomski isplativa. Pored ovoga, nisu svi tipovi kotrljajnih ležaja podesni za reparaturu. Na Slici 9, dati su tipovi industrijskih ležaja najpodesniji za primenu postupaka reparature u zavisnosti od spoljašnjeg prečnika ležaja.

Podela ležaja na osnovu dimenzija, prečnika provrta d :

“mali” ležaji: $d < 80$ mm;

“srednji” ležaji: $80 \text{ mm} < d < 200$ mm;

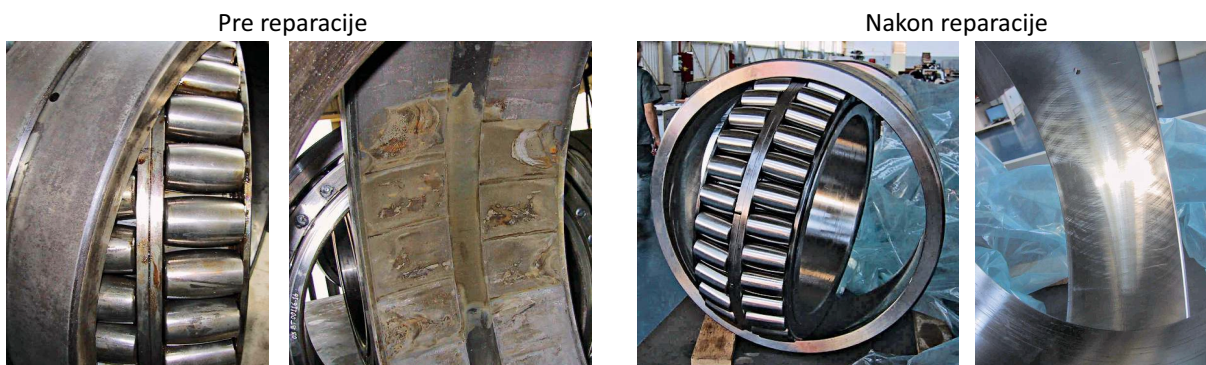
“veliki” ležaji: $d > 200$ mm.

^aSCHAEFFLER – Repair and Reconditioning of Rolling Bearings

Design	Outside diameter min. mm	Figure
Deep groove ball bearings	620	
Angular contact ball bearings	620	
Four point contact bearings	620	
Cylindrical roller bearings, single row	140	
Cylindrical roller bearings, multiple row	180	
Tapered roller bearings	180	
Spherical roller bearings	120	
Axial deep groove ball bearings	620	
Axial spherical roller bearings	500	
Crossed roller bearings	620	
Bearings for screw drives	620	
Slewing rings	220	
TAROL bearings	150	
Spherical plain bearings	160	

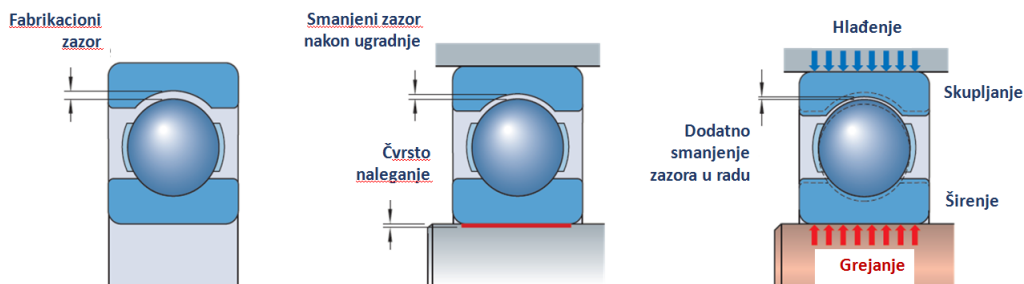
Slika 9 Tipovi kotrljajnih ležaja kod kojih se primenjuje reparatura

Staza kotrljanja unutrašnjeg prstena se reparira toplotnim postupcima navarivanjem ili metalizacijom, zavisno od dubine oštećenog sloja. Na osnovu standardne veličine prečnika novih kotrljajnih tela, dubine površinskih oštećenja na stazi kotrljanja unutrašnjeg prstena i veličine potrebnog radijalnog zazora, propisuju se dubina skidanja oštećenog površinskog sloja. Uklonjeni materijal sa staza kotrljanja se može nadomestiti umetanjem standardnih kotrljajnih tela većeg prečnika ili nanošenja novog – zdravog površinskog sloja i naknadnom obradom. Na Slici 10 dat je izgled oštećenog i repariranog dvoredog buričastog kotrljajnog ležaja. Izvršena je reparacija staza kotrljanja i kaveza, i ubacivanje novih kotrljajnih tela.



Slika 10 Primer reparacije „velikog“ dvorednog buričastog kotrljajnog ležaja

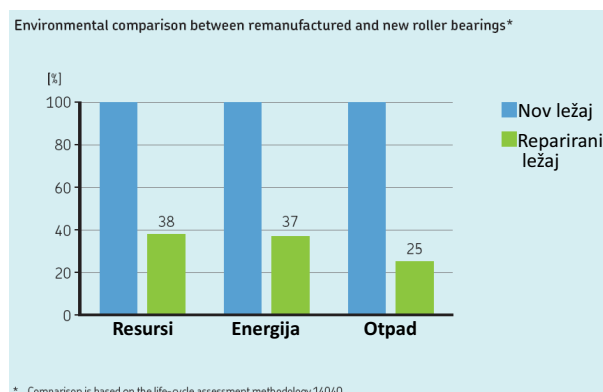
Ukoliko se vrši nanošenje novog materijala, on se mašinski obrađuje na definisanu meru i kvalitet hrapavosti. Pri tome se ne sme zaboraviti na minimalni radijalni zazor između kotrljajnih tela i staze kotrljanja, koji bezuslovno mora da postoji, Slika 11.



Slika 11 Smanjenje fabrikacionog zazora ležaja usled montaže i radnih uslova

Reparacijom ležaja, kao i svakom drugom reparacijom, se produžava radni (životni) vek proizvoda, ostvaruju velike uštede prirodnih resursa (rude), energije, smanjenje otpada, što ima veliki pozitivan uticaj na očuvanje životne okoline (voda, vazduh). Na dijagramu sa Slike 12, vidi se studija uticaja reparacije ležaja na gore pomenuto^a. Takođe, ne treba izgubiti iz vida velike ekonomske uštede u vremenu zastoja rada mašine (ne čeka se novi deo, tako da se mašina brže vraća u funkciju). Kod rotacionih bagera na otvorenim kopovima rude i uglja, sat vremena zastoja iznosi i do nekoliko stotina hiljada evra.

^aSKF Remanufacturing-brochure-tcm-12-325032.pdf



Slika 12 Ekonomske i energetske uštede primenom reparature ležaja

Korišćena literatura

1. Ristivojević M. (2021) **Reparacija mašinskih delova i konstrukcija**, izvodi sa predavanja;
2. Ristivojević M. (2013) **Reparatura – Imperativ u XXI veku**, Procesna tehnika;
3. Ristivojević M. (2009) **Reparatura u funkciji ekonomske, energetske i ekološke efikasnosti**, Mašinstvo 58;
4. Vaserman R. (2012) **Kako se štede milioni tehnikom reparaturnog zavarivanja**, Messer Tehnogas.
5. Ristivojević M. (2005) **Zupčanci 1– kinematika i kontrola**, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Beograd;
6. Marković S. (1994) **Regeneracija zupčastih i ožlebljenih sprega**, Vojnotehnički glasnik 2;
7. Albertini H. (2017) **Repair of large, surface-degraded industrial gears – a new approach**, Gear Technology;
8. Mayo P.A. (1987) **Gear Repair**, ASSCT;
9. TIMKEN (2016) **Using bearing repair to extend bearing life – for heavy industries**;
10. SKF (2018) **Remanufactured by SKF**;
11. FAG Industrial Services (2007) **Reconditioning and Repair of Rolling Bearings**;
12. Gostović N. (2007) **Reparatura turbinskog vratila A8 na HE Đerdap II**, Castolin Eutectic;