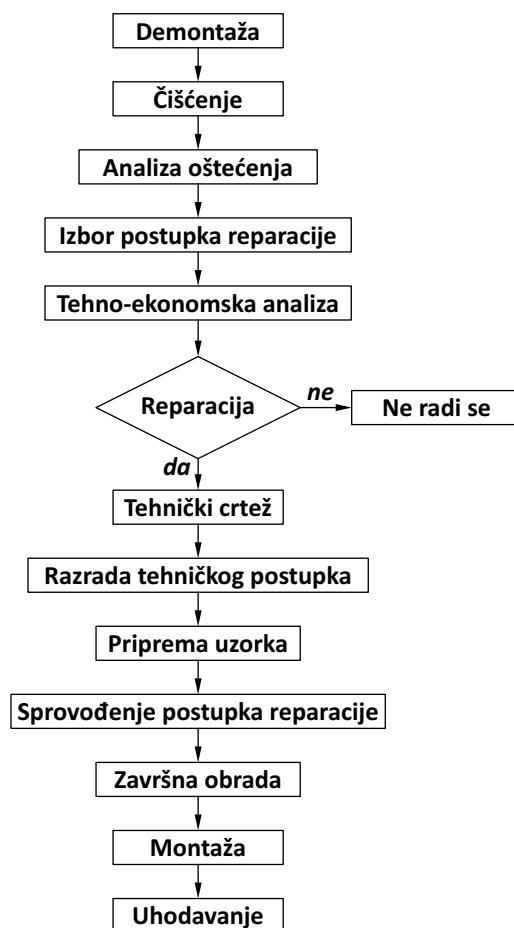


## Algoritam tehnologije reparature mašinskih delova

Reparacija predstavlja tačno propisan redosled operacija koji treba dosledno sprovesti kod oštećenih i razorenih mašinskih delova i/ili konstrukcija u cilju povratka parametara (pokazatelja) radne sposobnosti. Pokazatelji radne sposobnosti mašinskih delova i konstrukcija mogu biti:

- oblik,
- dimenzije,
- kvalitet površine,
- površinska čvrstoća,
- zapreminska čvrstoća,
- buka,
- vibracije,
- potrošnja,
- bezbednost,
- ekološki aspekti.

Da bi se na osnovu tehnoekonomske analize donela odluka o reparaturi mašinskog dela, neophodno je razraditi tehnološki postupak reparature. Tehnološki postupak reparature svakog mašinskog dela ima odgovarajuće specifičnosti. Međutim, opšti algoritam tehnološkog postupka reparature je isti za sve mašinske delove. On se sastoji od niza karakterističnih operacija, prikazanih na Slici 1.



Slika 1 Opšti algoritam reparature mašinskih delova

### Rasklapanje delova – demontaža

Proces demontaže mašinske konstrukcije, sklopa ili podsklopa da bi se došlo do mašinskog dela koji je izgubio radnu sposobnost zbog zapreminskog i/ili površinskog oštećenja, treba sprovesti respektujući sve faze algoritma demontaže. Osnovni cilj ovog algoritma je što kvalitetnija realizacija demontaže sa

tehno-ekonomskog aspekta bez pojave dodatnih oštećenja kod već oštećenih i/ili neoštećenih delova.

Na osnovu uputstva proizvođača, odnosno tehničke dokumentacije (sklopnih crteža) mašinske konstrukcije, sklopa ili podsklopa treba definisati algoritam tehnološkog postupka demontaže:

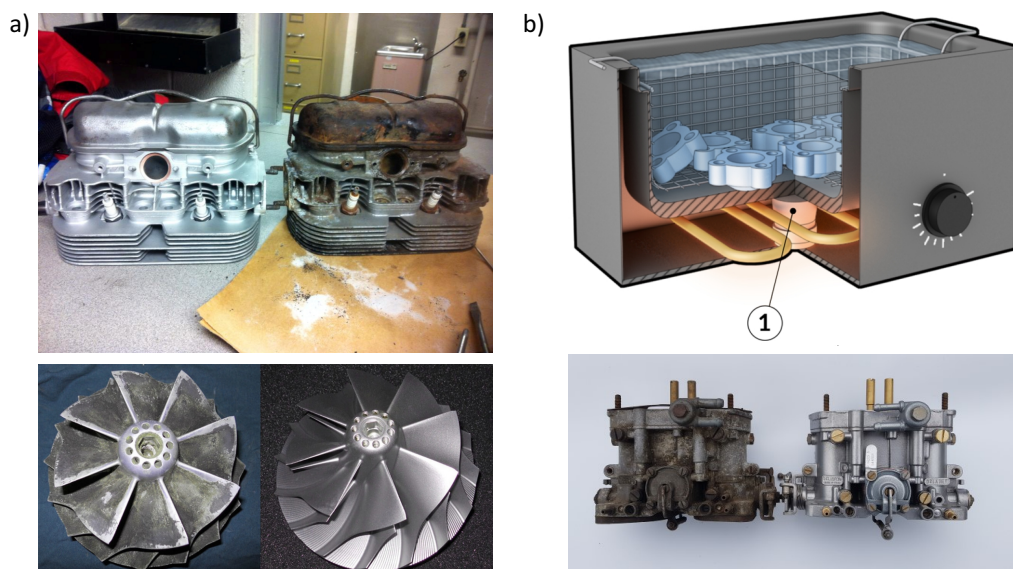
- Izbor obima/stepena demontaže. Posebno treba sagledati mogućnost reparacije „na licu mesta”, bez demontaže ili uz minimalnu demontažu;
- Izbor alata i pribora;
- Izbor potrebnog stručnog i pomoćnog kadra;
- Izbor mera bezbednosti. Proces demontaže mora biti bezbedan i siguran;
- Ekološke mere. Proces demontaže ne sme da ugrožava životnu i radnu sredinu;
- Ergonomija. Uslove rada treba prilagoditi čoveku sa psihološkog, fiziološkog i anatomskog aspekta.

### Čišćenje mašinskih delova

Da bi se sagledalo stanje oštećenih površina u pogledu vrste i količine oštećenja, iste treba prvo očistiti. Čišćenje mašinskih delova podrazumeva ukljanjanje nečistoća i naslaga sa oštećenih površina, kao i njihovo pranje i odmaščivanje. Najčešće nečistoće i naslage su:

- ostaci ulja i masti;
- metalne čestice, produkti habanja;
- korozija;
- boje;
- garež;
- kamenac;
- stare zaštitne i zaptivne prevlake.

Kvalitet tehnologije reparature značajno zavisi od kvaliteta realizacije operacije čišćenja. Zato se ova operacija mora dosledno sprovesti i kontrolisati. Pranje i odmaščivanje se najčešće obavlja vodom ili različitim hemijskim sredstvima (kiselinama, benzinom, trihlor etilenom ...) potapanjem i/ili premazivanjem. Pored ovog stacionarnog postupka, postoji i vibracioni postupak, tzv. vibraciono pranje i čišćenje pod pritiskom vazduha, čistog ili mešavina sa česticama peska (peskarenje – Slika 2a).



Slika 2 Čišćenje mašinskih delova: a) peskarenje, b) ultrazvučna kada

Veoma često korišćena metoda čišćenja potapanjem je metoda ultrazvučnog pranja (u vodi ili nekom hemijskom sredstvu za odmašćivanje), gde se ceo deo potapa u ultrazvučnu kadu, i gde pod dejstvom ultrazvučnih talasa sredstvo za odmašćivanje udarno deluje na površinu velikom frekvencijom slabe energije – Slika 2b. Ultrazvučna metoda čišćenja je posebno pogodna za delove složene geometrije jer se ultrazvučni talasi prenose u sve otvore i šupljine mašinskih delova. Ako pripremljeni – očišćeni deo mora duže da čeka na sledeću operaciju, isti se mora zaštititi (konzervirati), npr. fosfatiranjem.

Danas se kovencionalni način čišćenja mašinskih delova sve više zamenjuje savremenim postupkom čišćenja suvim ledom (*Dry Ice Blasting*). Ovaj postupak čišćenja je jednostavan, brz i dosta efikasan, jer istovremeno uklanja naslage i nečistoće sa oštećenih površina i odmašćuje ih. Suvi led je ugljen dioksid ( $\text{CO}_2$ ) u čvrstom agregatnom stanju na temperaturi od  $-79^\circ\text{C}$ . U mnogim industrijskim procesima, kao nusproizvod javlja se ugljen dioksid, koji se skuplja i zatim reciklira u procesu proizvodnje suvog leda. Proizvodi se i od tečnog ugljendioksida pri kontrolisanim uslovima. Pri ovom procesu proizvodnje prvo nastaje suvi sneg, a potom kompresijom dobija se suvi led. Tako nastaju okrugle, čvrste pelete, valjci prečnika 3 mm za potrebe čišćenja, ili pelete prečnika 16 mm.

Čišćenjem sa  $\text{CO}_2$  uspešno se otklanja:

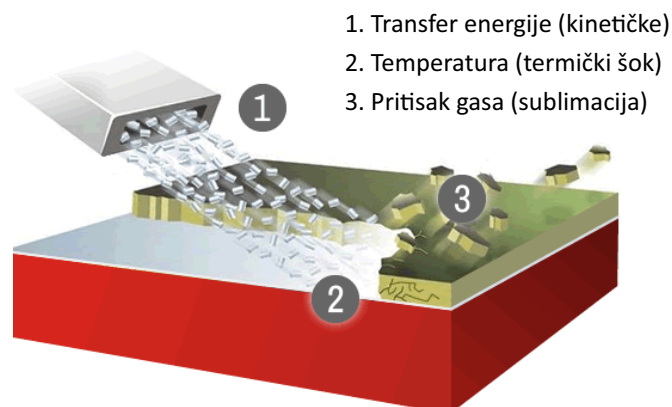
- o boje,
- o naslage,
- o masnoću,
- o laminare,
- o lepak,
- o katran,
- o ulje,
- o vosak,
- o ugljenik.

Površine koje se mogu tretirati postupkom čišćenja sa  $\text{CO}_2$ :

- o čelik,
- o staklo,
- o aluminijum,
- o hromirane površine,
- o plastični delovi,
- o električne instalacije,
- o drvene površine.

Kako se vrši čišćenje suvim ledom?

Pelete u aparatu za čišćenje suvim ledom uz pomoć komprimovanog vazduha pri brzini od oko 300 m/s, usmeravaju se na površinu koju treba čistiti. Pri tome, dolazi do stvaranja efekta termošoka. Usled trenutnog smrzavanja površinskog sloja, dolazi do ukrućivanja i skupljanja sloja koji treba odstraniti i odvojiti od osnovnog materijala. Kinetička energija koja pri tome nastaje skida nečistoće, a pelete suvog leda prelaze u gasovito stanje (osobina  $\text{CO}_2$  u čvrstom stanju da direktno prelazi u gasovito stanje bez faze tečnog – sublimacija), ostavljajući iza sebe čistu i suhu površinu). Pri ovom postupku, ne dolazi do abrazije očišćenog materijala.



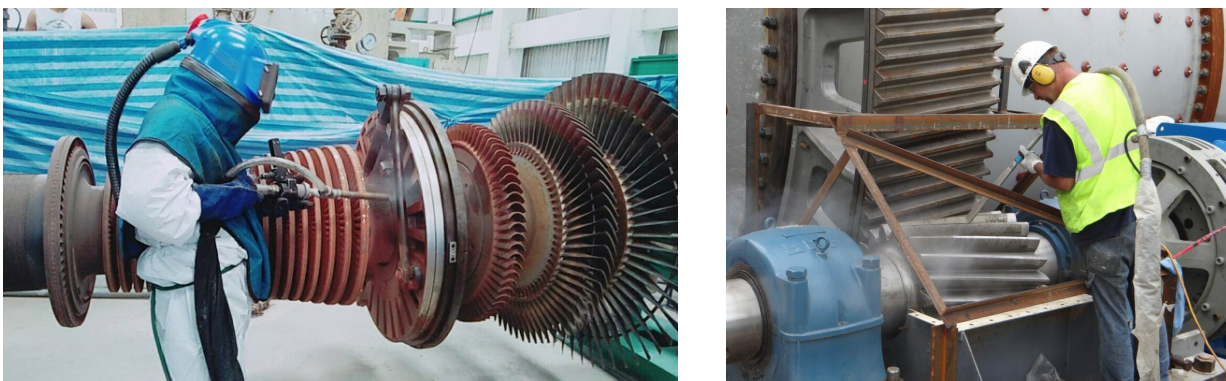
Slika 3 Postupak čišćenja površina suvim ledom

Glavne prednosti čišćenja suvim ledom: Ekološki postupak, kratko vreme čišćenja, neabrazivna metoda (temeljno čišćenje bez oštećivanja tretirane površine), proces je suv (nije potrebno naknadno sušenje), ne postoji sekundarni otpad.

Domen primene: Termoenergetska postrojenja, automobilska industrija, poljoprivredna mehanizacija, livnice, prehrambena industrija, farmaceutsko-hemijska industrija, štamparije i čišćenja postrojenja u radu i remontu...



Slika 4 Mašinski sklopovi pre i posle čišćenja metodom suvog leda



Slika 5 Čišćenje velikih delova metodom suvog leda

U poslednje vreme sve je češća upotreba laserskog čišćenja oštećenih i zaprljanih površina mašinskih delova. Iako je sama instalacija skuplja, veća početna investicija u sistem za lasersko čišćenje vrlo brzo se isplati. Npr. u poređenju sa čišćenjem suvim ledom, trošak u eksploataciji je umanjen za oko 80%, sa vremenom otplate investicije od odprilike godinu dana u slučaju rada u dve smene. Laserski sistemi su veoma efikasni, ekonomični, i ekološki prihvatljivi u poređenju sa ostalim postojećim konvencionalnim metodama za čišćenje. Ne zahtevaju hemikalije i abrazivne materijale, niti skladište za odlaganje otpada, ekološki su prihvatljivi, imaju dugačak vek upotrebe, i lako se integrišu u postojeće proizvodne linije. Sa ovim postupkom efikasno se može ukloniti smola, uljna kontaminacija, mrlje, prljavština, rđa, premazi, obloge i boje na površini metalnih predmeta različitog oblika, površine gumenog kalupa (ostaci gume). Uglavnom se koristi u preradi kalupa, proizvodnji automobila, brodogradnji, preradi hrane, tretmanu otpadnih voda, gumarskoj i petrohemijskoj industriji.



Slika 6 Čišćenje korodiranog vratila sa zupčanicom laserskom metodom

### Analiza oštećenja

Ova analiza se sprovodi u cilju utvrđivanja osnovnog uzroka loma ili oštećenja mašinskih delova. Posle čišćenja oštećenih površina sledi analiza:

- nastalih oštećenja u pogledu vrste, količine oštećenja i njihovog položaja (lokacije);
- uslova izrade;
- uslova montaže;
- uslova eksploatacije;
- konstrukcionih uslova (na osnovu tehničke dokumentacije).

Na osnovu ove analize treba sagledati koji uslovi su imali dominantni uticaj na formiranje nastalih oštećenja mašinskih delova. U cilju zaštite mašinskih delova od narednih razaranja iste vrste (istog mehanizma razaranja), treba predložiti odgovarajuću rekonstrukciju u pogledu konstrukcionih uslova, uslova izrade, montaže i eksploatacije.

Da bi se ove analize sprovele, neophodno je prikupiti sledeće podatke:

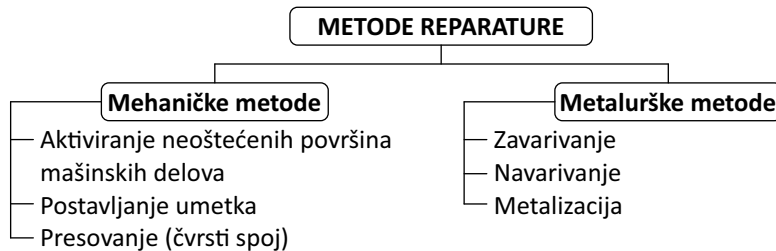
- stepen pohabanosti;
- tolerancije dužinskih mera;
- tolerancije oblika i položaja;
- hrapavost površina;
- prsline, vidljive i skrivene;
- delimični ili potpuni lomovi;
- tvrdoća i struktura materijala;
- vrsta osnovnog materijala.

Ovi podaci se dobijaju ispitivanjem – merenjem, korišćenjem odgovarajućih metoda (vizuelna kontrola, magnetna, ultrazvučna, pneumatska, penetrantska... ). Stepem uspešnosti reparature zavisi od pouzdanosti prikupljenih podataka. Zato je važno da se pohabano područje ili lom (prelomna površina) detaljno analiziraju radi donošenja prave odluke „kako sprovesti reparaturu na najbolji način”.

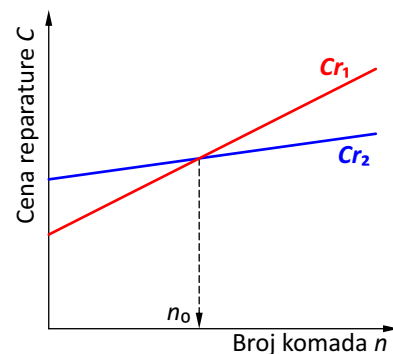
### Izbor postupka reparature

Na osnovu sprovedene analize nastalih oštećenja u kvalitativnom i kvantitativnom pogledu, vrste osnovnog materijala, funkcije i domena primene mašinskog dela, vrši se izbor metode reparature. Generalno, reparatura zavisno od načina ozvođenja može biti **mehanička (hladna)** i **metalurška (topla)**. Mehanička reparatura se izvodi bez unosa toplote. Toplotnu reparaturu (najčešće) prati unos velike količine toplote, što se reflektuje na pojavu deformacija i zaostalih napona, pa su neophodne

dodatne termohemijske obrade. I pored ovih problema toplotna reparatura je dominantna u reparaturi mašinskih delova. Najnovija istraživanja usmerena su na razradi tehnološkog postupka za primenu dodatnih materijala koji ne zahtevaju veliki unos toplote.



Ekonomska opravdanost postupka reparacije često zavisi od broja uzoraka koji treba reparirati. Na primer, za dva izabrana postupka reparacije (R1 i R2), treba definisati broj uzoraka  $n_0$  pri kome izabrani postupci imaju isti ekonomski efekat. Potom se definišu oblasti primene izabranih postupaka, saglasno broju repariranih uzoraka i troškovima reparacije ( $Cr_1$  i  $Cr_2$ ).



Na osnovu primera sa Slike 6:

$n > n_0$  – merodavan je postupak reparacije R2

$n < n_0$  – merodavan je postupak reparacije R1

Slika 7 Uticaj broja uzoraka na efektivnost postupka reparacije R1 i R2

Izborom metode reparature, stekli su se uslovi za sprovođenje tehnoekonomske analize o opravdanosti primene propisane tehnologije reparature. Sledeće faze tehnologije reparature se sprovode samo ako su tehnoekonomski kriterijumi pokazali opravdanost primene usvojene tehnologije. U suprotnom nabavlja se novi deo.

### Tehnoekonomska analiza

U cilju preciznijeg sagledavanja opravdanosti primene reparature u rešavanju iznenadnih i planiranih otkaza, neophodno je sprovesti odgovarajuću tehno-ekonomsku analizu. Ekonomski pokazatelji sagledavaju se na osnovu jedinične cene novog ( $C_n$ ) i repariranog dela ( $C_r$ ), a tehnički pokazatelji na osnovu broja ciklusa (radni vek) repariranog ( $N_r$ ) i novog dela ( $N_n$ ). Varijantna rešenja tehno ekonomske analize mogu se prikazati u obliku matrice date na Slici 8. Na osnovu ove matrice može se sagledati stepen tehno-ekonomske opravdanosti ili neopravdanosti primene tehnologije reparature u rešavanju iznenadnih ili planiranih otkaza mašinskih delova.

Broj ciklusa Cena	$N_n < N_r$	$N_n = N_r$	$N_n > N_r$
$C_n < C_r$	DTEA	NE	NE
$C_n = C_r$	DA	???	NE
$C_n > C_r$	DA	DA	DTEA

Slika 8 Matrica tehno-ekonomske analize za odlučivanje: Reparacija DA ili NE

Kod varijantnih rešenja:

$$\frac{C_n}{C_r} > 1, \quad \frac{N_n}{N_r} > 1 \quad \text{i} \quad \frac{C_n}{C_r} < 1, \quad \frac{N_n}{N_r} < 1,$$

neophodno je sprovesti detaljnu tehno-ekonomsku analizu (DTEA).

Ako se zaobiđe reparatura, mašinski delovi koji su izgubili radnu sposobnost, se mogu reciklirati, a za izvršavanje njihove elementarne funkcije koriste se novi delovi. Za izradu novih delova potrebno je obezbediti odgovarajuće sirovine –rude koje se u železarama transformišu u odgovarajući polufabrikat. Trošenjem sirovina za izradu novih delova direktno se utiče na smanjenje rudnog bogatstva na Planeti. Za rad železara potrebno je obezbediti i odgovarajuće energetske resurse. Trošenjem energetske resursa za rad železara, uvećava se postojeća energetska kriza, a istovremeno produkti procesa sagorevanja uvećavaju ekološku krizu na Planeti. Prema tome,svaki pokušaj da se mašinskim delovima izgubljena radna sposobnost vrati postupkom reparature ima, veliki, ne samo ekonomski značaj na nivou kompanije (preduzeća), već i veliki globalni značaj, koji se reflektuje na povećanje ekološke i energetske efikasnosti.

Imajući ovo u vidu u matrici prikazanoj na Slici 8, varijantno rešenje:

$$\frac{C_n}{C_r} = 1 \quad \text{i} \quad \frac{N_n}{N_r} = 1,$$

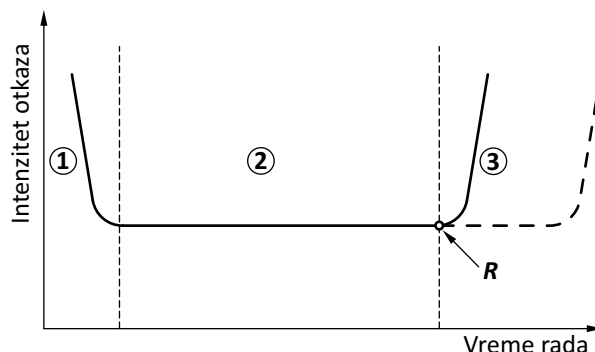
treba realizovati postupkom reparature, a ne nabavkom novih delova.

### Tehnička dokumentacija

Ako oštećeni mašinski deo nema prateću tehničku dokumentaciju, ista se mora izraditi na osnovu snimanja – merenja potrebnih geometrijskih, kinematskih i mehaničkih karakteristika. Ako se reparatura izvodi nekim od toplih postupaka, posebnu pažnju treba obratiti na definisanje tehnologije zavarivanja: kvalitet dodatnog materijala, broja i redosleda prolaza, parametre struje, brzina zavarivanja... Na Slici 9 dat je primer prateće tehničke dokumentacije reparature vratila koje je izrađeno izjedna sa zupčanikom, primenom metalurškog (toplog) postupka reparacije. Centralni otvor  $\varnothing 48$  mm služi za pozicioniranje delova 1 i 2, pre početka zavarivanja. Žleb koji je formiran pod uglom od  $60^\circ$  stepeni treba da bude popunjen dodatnim, rastopljenim materijalom. Obratiti pažnju na to da su u datom primeru spojeni delovi izrađeni od različitog materijala: deo 1 (zupčanik) – SCN 22, deo 2 (dodatak) – 30CrMoV9. Ukupna masa repariranog vratila sa zupčanikom iznosi 125 kg. Može se pretpostaviti količina energije, vremena i ostalih resursa neophodna za izradu ovakvog novog dela.



Na ovaj način može se produžiti koristan radni vek (isprekidana kriva na Slici 10), i dopunski odložiti porast intenziteta otkaza u trećoj oblasti. Postupak reparacije se može ponavljati veći broj puta u cilju produženja korisnog radnog veka, odnosno tehnoekonomske pokazatelji treba da ukažu do kog trenutka je reparacija isplativa, a kada treba da se nabavi novi deo.



Slika 10 Opšti dijagram intenziteta otkaza mašinskih konstrukcija

Ukoliko se, prilikom procesa reparacije, demontira veći deo mašine (veći broj elemenata, podsklopova i sklopova), povećava se i rizik pojave otkaza prilikom ponovnog puštanja u rad. Iz ovog razloga je preporučljivo izvršiti uhodavanje repariranih mašinskih delova i konstrukcija.

## 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) **Zupčnici 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;