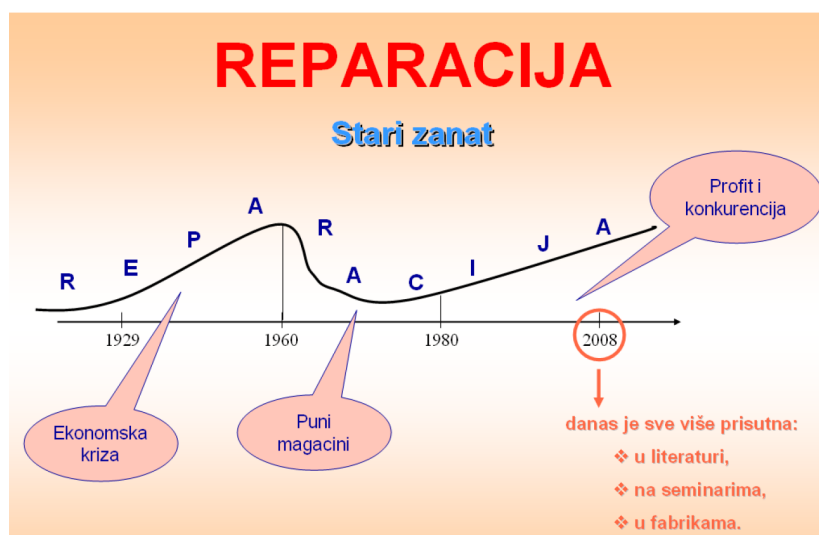


Definicija i značaj reparacije mašinskih delova i konstrukcija

Vekovna težnja čoveka da živi bolje, komfornije, ostvarivala se velikim-nekontrolisanim trošenjem prirodnih resursa i neadekvatnom ekološkom zaštitom životne i radne sredine tj. planete. Ovakav odnos prema prirodi i njenim resursima generisao je u 21. veku tri velike globalne krize: ekonomsku, energetska i ekološka. U cilju njihove redukcije, danas se u svetu traže odgovarajući modeli, parcijalni i opšti. **Parcijalni**, za redukciju samo jedne od navedenih kriza, ili **opšti**, univerzalni modeli za redukciju sve tri krize. Jedan univerzalni, opšti model za redukciju sve tri krize nalazi se u tehnologiji reparature. Umesto da se odlože na deponiju “starih delova” pohabani i polomljeni delovi se posle reparature ponovo ugrađuju u mašinsku konstrukciju umesto novih “rezervnih” delova.

Istorijski tok reparacije prikazan je na Slici 1. Reparatura se prvi put organizovano i masovno primenila 1929. godine, kada se generisala prva velika svetska ekonomska kriza. Tada je primenjena kao parcijalni model za rešavanje samo ekonomske krize. U periodu hladnog rata (1960-te godine), zbog ekonomskih blokada, vlada filozofija „magacini puni rezervnih delova”, primena reparature se smanjuje. Velika konkurencija, borba za što veći profit, ekonomska, energetska i ekološka kriza (od 1980-tih godina), vraća reparaciju ponovo u fabričke hale i radionice. Pored ekonomske efikasnosti reparaturom se mogu ostvariti značajni energetska i ekološka efekti, kao i efekti u domenu zaštite prirodnih resursa.



Slika 1 Istorijski razvoj reparacije

Od samog početka organizovane primene reparature, od vremena velike ekonomske krize, pa do danas, prisutna je dilema “za ili protiv reparature”, tj. reparirani ili novi “rezervni” delovi. Najčešći argumenti protiv reparature su:

- da ona predstavlja “krpljenje” mašinskih delova,
- da ne daje ustaljeni kvalitet,
- da se ne mogu svi materijali kvalitetno tretirati postupcima reparature,
- “imam puno skladište rezervnih delova”, itd.

Tehnologija reparature je toliko napredovala da se danas ne primenjuje samo kod mašinskih delova koji su izgubili radnu sposobnost, već se sve više primenjuje i kod novih delova. Naime, za osnovnu masu mašinskih delova se sve više koriste manje kvalitetni materijali, a završni radni – površinski “habajući” sloj se postupcima reparature formira od kvalitetnih materijala.

Delovi mašinskih konstrukcija u toku eksploatacije, izloženi su različitim vidovima **površinskih i zapreminskih** oštećenja i razaranja. Ispitivanja su pokazala da zapreminska razaranja mašinskih delova u 80 – 90% slučajeva nastaju usled zamora materijala. Takođe, pokazano je da mašinski delovi najčešće gube radnu sposobnost usled površinskih oštećenja u vidu prekomernog habanja.

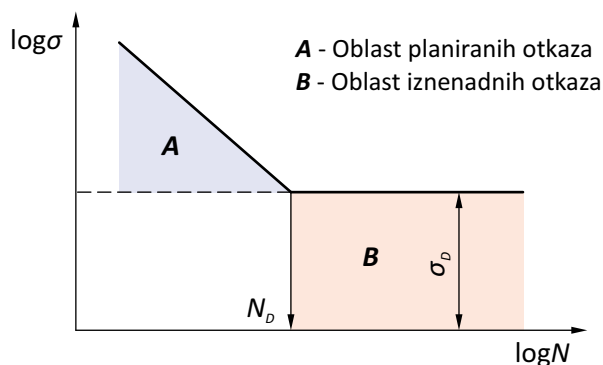
Tačno propisan redosled operacija koji treba dosledno sprovesti kod oštećenih i razorenih mašinskih delova i/ili konstrukcija u cilju povratka parametara (pokazatelja) radne sposobnosti, naziva se **REPARACIJA (reparatura)**. Ovaj termin potiče od latinske reči *reparatio*, koja ima značenje: obnavljanje, popravka (opravka), ponovno uspostavljanje.

Bilo da se radi o toploj (metalurškoj) ili hladnoj (mehaničkoj) reparaciji, njen osnovni zadatak je da površinski oštećenim (pohabanim) i zapreminski razorenim (polomljenim) mašinskim delovima, vrati radnu sposobnost. Umesto da se odlože na deponiju „starih delova“, pohabani i polomljeni delovi se postupcima reparacije ponovo ugrađuju u mašinsku konstrukciju, umesto novih rezervnih delova.

Kod nekih mašinskih delova, kao što su zupčasti parovi i navojna vretena, odnosno mašinskih delova sa dominantno jednim smerom rotacije, radna sposobnost usled površinskih oštećenja se može vratiti i bez primene klasičnih postupaka reparaure (zavarivanje, navarivanje, metalizacija), već samo demontažom, zatim zaokretanjem za 180° oko ose upravne na osu rotacije i ponovnom montažom istih delova. Na ovaj način se vrši aktiviranje do tada neoštećenih slojeva materijala.

Ekonomska efikasnost reparaure

Svaka mašinska konstrukcija sastavljena je od velikog broja različitih mašinskih delova. Zavisno od funkcije koju obavljaju u mašinskoj konstrukciji, radni vek mašinskih delova može biti ograničen, oblast A na Slici 2 ili neograničen, oblast B na Slici 2. Otkazi mašinskih delova ograničenog radnog veka pripadaju grupi **predviđenih** otkaza. Njihov radni vek, vreme kada će doći do gubitka radne sposobnosti tj. otkaza se procenjuje odgovarajućim metodama proračuna. Ovi proračuni uključuju veliki broj uticajnih faktora i mnoge pretpostavke. Usled toga, proračunski-teorijski radni vek može znatno odstupati od stvarnog radnog veka. Saglasno tome, predviđeni–planirani otkazi se, pod određenim uslovima, mogu transformisati u iznenadne otkaze. **Iznenadni** otkazi su otkazi mašinskih delova koji rade u oblasti neograničenog radnog veka.



Slika 2 Velerov dijagram sa oblastima ograničenog (A) i neograničenog (B) radnog veka mašinskih delova

Sa aspekta uticaja otkaza mašinskih delova na sigurnost i bezbednost rada mašinskih konstrukcija, postoje dve grupe mašinskih delova. Mašinski delovi čiji otkazi direktno utiču na sigurnost i bezbednost mašinskih konstrukcija. Ovi delovi se moraju eliminisati iz eksploatacije pre nego što izgube radnu sposobnost. Drugoj grupi pripadaju delovi čiji otkazi (gubitak radne sposobnosti) najviše utiču

na promenu tehničkih karakteristika mašinske konstrukcije u pogledu: nosivost, protoka, potrošnje goriva, generisanja buke i vibracija itd. Ovi delovi, i posle gubitka radne sposobnosti mogu raditi još neko vreme, u cilju usklađivanja vremena njihove zamene sa vremenom zamene drugih delova mašinske konstrukcije, odnosno redovnim remontnom.

U cilju preciznijeg sagledavanja opravdanosti primene reparature u rešavanju iznenadnih i planiranih otkaza, neophodno je sprovesti odgovarajuću tehnno-ekonomsku analizu. Ekonomski pokazatelji najčešće se sagledavaju na osnovu jedinične cene novog C_n i repariranog dela C_r . Na primer, kod cilindričnog zupčanika od sivog liva, Slika 3, odnos cene novog zupčanika C_n i troškova reparacije (izrada) C_r zapreminski razorenih (polomljenih) zubaca, iznosi približno 7: $\frac{C_n}{C_r} \approx 7$.

Nanešeni materijal neophodno je ponovo obraditi na mašini za izradu ozubljenja, čime se izbegava skupocena i dugotrajna izrada čitavog zupčanika, i postižu značajni energetske, ekološki i ekonomski benefiti. Karakteristike dodatnog materijala mogu biti iste, ili čak bolje od karakteristika osnovnog materijala.



Slika 3 Reparacija cilindričnog zupčanika sa pravim zupcima

Zbog stohastičke prirode otkaza mašinskih delova i različitih funkcija (elementarnih ili parcijalnih) koje izvršavaju, veoma je teško pri procesu konstruisanja obezbediti potpunu sinhronizaciju vremena otkaza svih mašinskih delova mašinske konstrukcije. Da bi se smanjio broj zastoja mašinske konstrukcije zbog zamene mašinskih delova koji su otkazali, novim "rezervnim" delovima, pri generalnim i/ili parcijalnim remontima, vrši se zamena velikog broja delova i pre isteka predviđenog radnog veka. Mašinski delovi koji imaju ograničeni radni vek, oblast A na Slici 2, moraju se nabaviti-kupiti pre gubitka radne sposobnosti. U ovu grupu delova spadaju kotrljajni ležaji, kaiševi, zaptivni elementi, itd. Veoma je rizično ovu aktivnost (nabavke novih delova) sprovoditi u trenutku pojave otkaza mašinskih delova, zbog mogućih administrativnih i tehničkih problema. Takođe, kod nabavke novih delova javlja se i problem njihove originalnosti. Da sagledamo koje resurse je potrebno obezbediti za nabavku novih "rezervnih" delova :

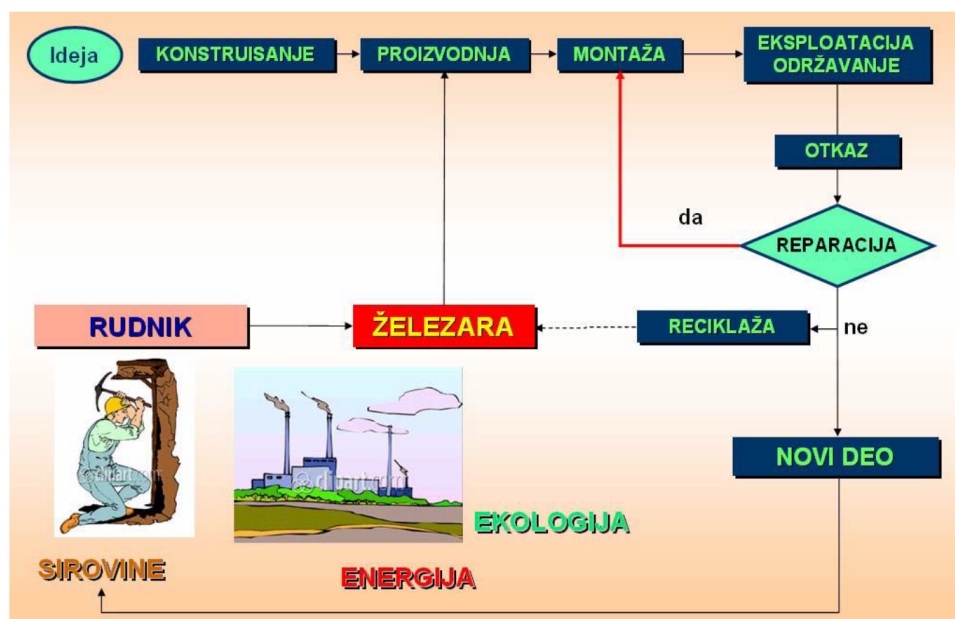
- finansijska sredstva za kupovinu rezervnih delova,
- najpovoljniju ponudu sa aspekta originalnosti mašinskih delova i sa ekonomskog aspekta,
- transport nabavljenih mašinskih delova od tržišta do magacina,
- magacinski prostor,
- odgovarajuće uslove skladištenja,
- unutrašnji transport,
- bazu podataka za sve rezervne delove,
- ljudske resurse.

Zbog psihološkog efekta i obaveze proizvođača rezervnih delova da iste proizvode samo u ograničenom vremenskom periodu, obično se nabavlja količina rezervnih delova koja je veća od stvarno potrebne količine. Ova razlika između stvarnih i nabavljenih količina rezervnih delova najčešće ostaje neiskorišćena, u potpunosti ili delimično. Takođe, za mašinske delove koji su izgubili radnu sposobnost treba obezbediti adekvatan prostor "deponiju". Zbog svih gore navedenih aktivnosti, koje treba sprovesti u slučaju postojanja rezervnih delova, ekonomska efikasnost kompanije se znatno smanjuje.

Reparatura kao proces ponovnog uspostavljanja radne sposobnosti površinski oštećenim-pohabanim i zapreminski razorenim-polomljenim mašinskim delovima, omogućuje njihovo osposobljavanje za izvršavanje elementarnih ili parcijalnih funkcija sa minimalnim finansijskim sredstvima. Postupcima hladne i tople reparature (zavarivanjem, navarivanjem i metalizacijom) smanjuju se deponije "starih" delova i istovremeno redukuju magacini rezervnih delova. Reparacijom se mnoge havarije mogu preduprediti ili rešiti na "licu mesta" bez demontaže cele mašinske konstrukcije ili nekog njenog sklopa. Time su izbegnuti veliki gubici zbog prekida proizvodnog procesa angažovanja velikih resursa, materijalnih i ljudskih.

Ekološka i energetska efikasnost reparature

Zvanične procene ekološke i energetske ugroženosti naše planete su alarmantne. Nju generišu male i velike zemlje, bogati i siromašni, a sve u cilju postizanja odgovarajućeg profita. Visoko razvijene zemlje ustupaju manje razvijenim zemljama tehnologiju neadekvatnu sa ekološkog aspekta, takozvana "prljava tehnologija". Istovremeno visoko razvijene zemlje i pored savremenih tehnologija i kvalitetnijih procesa prečišćavanja, zbog mnogo većeg obima proizvodnje znatno više doprinose ekološkoj i energetskej ugroženosti planete. Tehnologijom reparacije mašinskih delova, sklopova i podsklopova, pored ekonomskog efekta mogu se ostvariti i značajni ekološki efekti i efekti u cilju zaštite prirodnih resursa, energetskih i rudnih. Oni se najbolje mogu sagledati analizom životnog ciklusa proizvoda prikazanog na Slici 4.



Slika 4 Životni ciklus proizvoda

Poznato je da se embrion svakog proizvoda nalazi u ideji koja se kroz proces konstruisanja razvija i transformiše u vidu tehničke dokumentacije, koja dalje predstavlja bazu za proces proizvodnje. Posle proizvodnje slede montaža, eksploatacija i održavanje. U toku eksploatacije, usled gubitka radne sposobnosti mašinskih delova, sklopova i pod-sklopova, može doći do planiranih ili iznenadnih otkaza. Saniranje, otklanjanje ovih otkaza, može se realizovati na dva načina. Primenom tehnologija reparacije ili nabavkom (kupovinom) novih delova. Ako se odustane od reparature mašinskih delova koji su izgubili radnu sposobnost, isti se moraju zameniti novim delovima. Za oštećene mašinske delove se moraju obezbediti adekvatni uslovi (deponija) za skladištenje.

Za izradu novih delova potrebno je obezbediti odgovarajuće sirovine-rude. Eksploatacijom ovih sirovina direktno se utiče na smanjenje već znatno redukovanog rudnog i energetskeg bogatstva na planeti. Za kopanje rude i njen transport od rudnika do železare, gde se vrši prerada ruda, zatim do proizvodne hale gde se oblikuje mašinski deo, pa sve do magacina rezervnih delova, troše se značajne količine energetske resursa, i to za sledeće aktivnosti:

- eksploataciju rude (kopanje, čišćenje i transport do deponije),
- transport rude do železare,
- preradu rude u železari u cilju dobijanja polufabrikata odgovarajućeg oblika i kvaliteta,
- transport formiranog polufabrikata do proizvodne hale,
- oblikovanje polufabrikata u odgovarajući oblik mašinskog dela, primenom mehaničke i termičke obrade,
- transport gotovih delova do tržišta i
- njihov transport do magacina rezervnih delova.

Energija potrebna za realizaciju gore navedenih aktivnosti dobija se korišćenjem prirodnih-fosilnih energetske resursa, uglja, prirodnog gasa i tečnog goriva, zatim alternativnih izvora energije, energije vetra, vode, sunca, energije biomase i nuklearne energije. Usled sve veće potrošnje fosilnih goriva, rapidno se smanjuju njihove, znatno ograničene rezerve. Istovremeno, usled prekomerne potrošnje ove vrste goriva, generišu se veliki ekološki problemi. Sagorevanjem fosilnih goriva nastaju štetni produkti sagorevanja. Gasovi, ugljen dioksid, azotni i sumporni oksidi, zatim čađ i leteći pepeo odlaze u atmosferu. Njihovim sagorevanjem nastaju tečni i čvrsti otpadi. Buka je takođe stalni pratilac procesa sagorevanja fosilnih goriva. Azotni i sumporni oksidi u sadejstvu sa vlagom iz vazduha generišu "kisele kiše". Sagorevanje fosilnih goriva predstavlja jedan od najvećih uzroka globalnog zagrevanja, efekta staklene bašte. Ovaj efekat dovodi do promene klimatskih uslova koji predstavljaju jednu od najvećih opasnosti za ekološki sistem naše planete. Učestale velike prirodne katastrofe, poplave, suše, požari, zemljotresi, razorne oluje, potvrđuju da se klima na planeti drastično menja. Klimatske promene su problem celog sveta.

Alternativni izvori energije nisu dovoljno zastupljeni da bi se značajnoj meri redukovala upotreba fosilnih izvora energije. Istovremeno, upotreba nuklearne energije, posle teških havarija u Japanu i već legendarnom Černobilu, stalno opada i u fokusu je permanentnog preispitivanja. Čak i da su potpuno tačni argumenti zagovornika ove energije, da je to najčistiji vid energije koji ne zagađuje planetu, ostaje nerešen problem nuklearnog otpada. Kako rešiti njegovo pouzdano skladištenje?

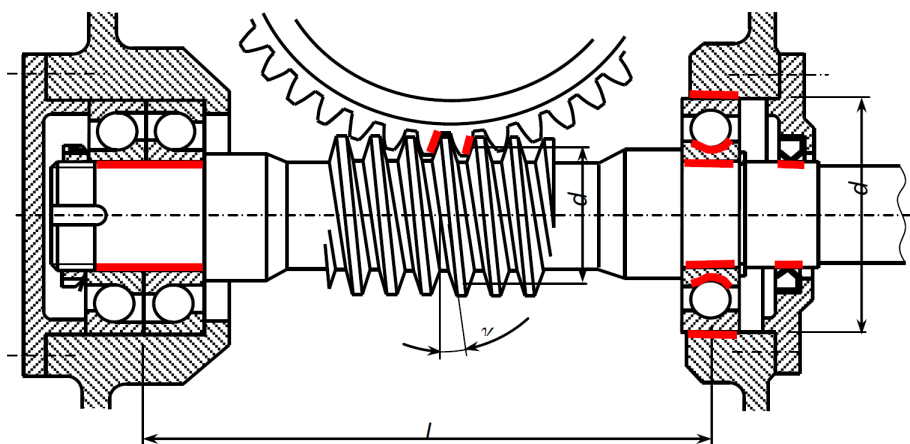
Ovde nije kraj ekološke ugroženosti naše planete ako se odlučimo za nabavke novih delova, a odrekemo reparature pohabanih delova. Transport rudnih i energetske resursa, zatim polufabrikata do proizvodnih hala i gotovih proizvoda (mašinskih delova) do magacina rezervnih delova, najčešće se obavlja drumskim saobraćajem. Tom prilikom, usled kotrljanja i klizanja pneumatika po podlozi (asfaltu), dolazi do njihovog habanja-trošenja. Sva potrošena guma nalazi se u obliku sitnih finih čestica koje se sputa spiraju i odvođe u rečne tokove. Ovim efektom povećava se stepen kontaminacije zemljišta i vode.

Da bi se stepen zastupljenosti tehnologije reparature oštećenih mašinskih delova u različitim granama privrede povećao, potrebno je istovremeno sprovoditi nekoliko aktivnosti. Pre svega, neophodno je raditi na osvajanju novih tehnologija reparacije i na osposobljavanju velikog broja kvalitetnog stručnog i naučnog kadra za realizaciju reparature. Zatim, formirati odgovarajuće regulative, i zakonske okvire, kako odluka, da li oštećeni mašinski deo reparirati ili nabaviti novi – rezervni deo ne bi zavisila od "nečije dobre volje". Takođe, treba permanentno raditi na edukaciji svih struktura društva o globalnom i internom značaju reparature u rešavanju generisanih kriza.

Domen primene reparature mašinskih delova i konstrukcija

Reparacija se primenjuje u svim granama industrije (prehrambena, mašinska, tekstilna, procesna, energetika, livnice, alatnice ...). U svakoj grani industrije primenjuju se mehanički prenosnici snage, tj. posrednici između pogonskih i radnih mašina.

Kod **mehaničkih prenosnika snage - reduktora** ima dosta pokretnih delova: vratila, ležaji, zupčanici, lančanici... Radna sredina može biti agresivna ili sa visokom radnom temperaturom. Najčešći vidovi razaranja su zamor materijala i površinska oštećenja u vidu habanja. Zato mehanički prenosnici snage predstavljaju dobre kandidate za primene svih metoda reparature, Slika 5. Crvenom (tamnom) debljom linijom na Slici 5 su označena mesta na kojima se javljaju površinska oštećenja.



Slika 5 Potencijalna oštećenja mehaničkih prenosnika snage

Kod **železničkog saobraćaja** šine, skretnice i vagoni točkovi, zbog agresivne sredine, velikih kontaktnih napona i prisustva kotrljanja i klizanja, izloženi su velikim površinskim oštećenjima, habanju. Kada debljina venca točka dostigne kritičnu vrednost usled površinskih oštećenja, točak se ne odlaže na deponiju, već se postupkom reparacije – navarivanjem i naknadnom završnom obradom skidanja strugotine, vraćaju parametri radne sposobnosti, Slika 6.



Slika 6 Reparacija površinski oštećenog – pohabanog venca točka postupkom navarivanja

Brodski saobraćaj. Brodski propeleri rade u složenim radnim uslovima. Složeno naponsko stanje i agresivna sredina dovode do zamora materijala i površinskih oštećenja u vidu korozije i erozije (kavitacije). Ova oštećenja, Slika 7, mogu se efikasno sanirati primenom metoda reparacije, čime se gubi potreba za izradom novog dela komplikovanih geometrijskih karakteristika.



a) Oštećenja u vidu kavitacije



b) Navarivanje propelera od bronce



c) Završna obrada

Slika 7 Reparacija broskog propelera

Hemijska i Procesna industrija. Industrija koja proizvodi boje, kiseline, lakove, smole, derivate goriva, farmaceutska industrija. U ovoj industriji:

- ima malo pokretnih delova,
- veliki broj cevovoda, sudova pod pritiskom, rezervoara, ventila, pumpi ...
- radna sredina je agresivna sa visokim temperaturama i pritiscima,
- najčešća razaranja su: zamor materijala i površinska oštećenja u vidu korozije i erozije (kavitacije).



Slika 8 Oštećeni delovi u procesnoj industriji

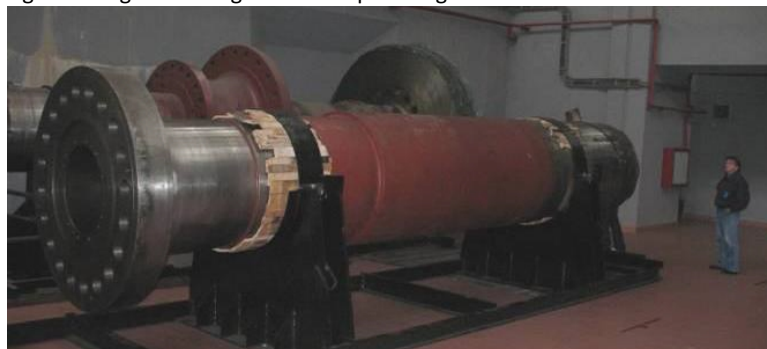
Teška mehanizacija, rudarska i poljoprivredna oprema. Oprema i mašine koje se primenjuju u teškoj mehanizaciji (rudarske i mašine na kopovima, poljoprivredna oprema, obrada rude i kamena, ...), Slika 9, izložene su velikim naprezanjima usled dejstva impulsnih (udarnih) opterećenja tokom rada. U ovakvim uslovima česta su kratkotrajna preopterećenja i zapreminska razaranja (lomovi) njihovih vitalnih delova. Pored lomova, delovi izloženi dejstvu materije koja se obrađuje se habaju, te se reparacija nameće kao veoma efikasna metoda za saniranje posledica ovih radnih uslova jer se kod ovakve opreme najčešće može realizovati na licu mesta sa minimalnim zastojem u proizvodnji.



Slika 9 Oštećenja opreme u teškoj mehanizaciji

Termoenergetska postrojenja. Neprekidan i pouzdan rad termoenergetskih postrojenja je imperativ svakog organizovanog društva (države). Oprema koja se koristi u ovoj oblasti vrlo često je izložena dejstvu agresivne sredine, kontaminaciji i visokim temperaturama. S obzirom da su dugotrajni otkazi ovakve opreme nedopustivi jer generišu milionske ekonomske gubitke na dnevnom nivou, reparacija predstavlja efikasnu metod za njihovo saniranje i preventivnu zaštitu, sa minimalnim vremenom zastoja. U nastavku teksta dat je primer sanacije oštećenja vratila turbine na hidroelektrani Đerdap, sa osnovnim pokazateljima tehno ekonomske analize: cena novog dela 800 000 – 1 400 000 \$, izrada i transport novog vratila 6 – 9 meseci, gubici usled zastoja proizvodnje električne energije 3 500 000 \$, vreme izrade reparacije 24 dana bez demontaže, cena 10 do 30 puta manja u odnosu na nabavku novog dela. Oštećenja vratila su se javila nakon 163 411 radnih sati, odnosno 24 godine rada turbine.

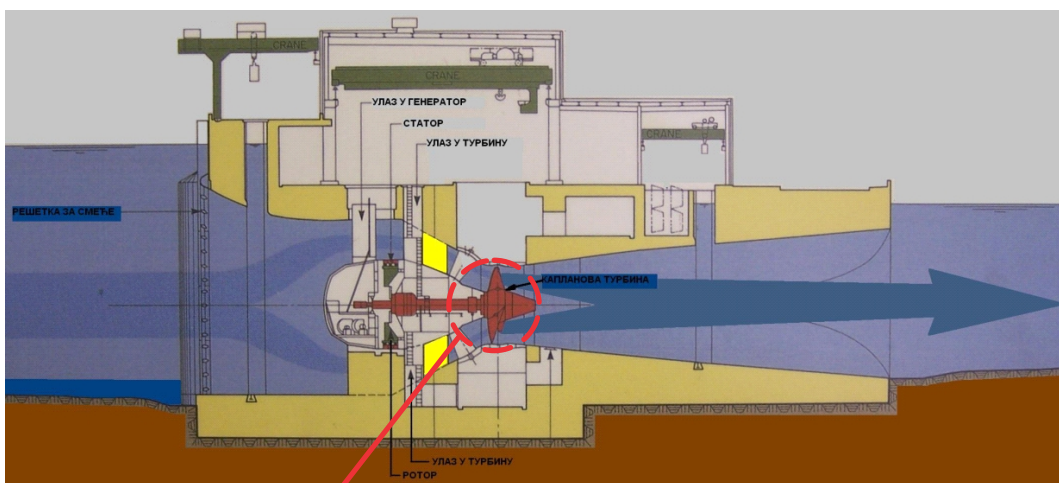
Izgled novog turbinskog vratila A6 spremnog za montažu



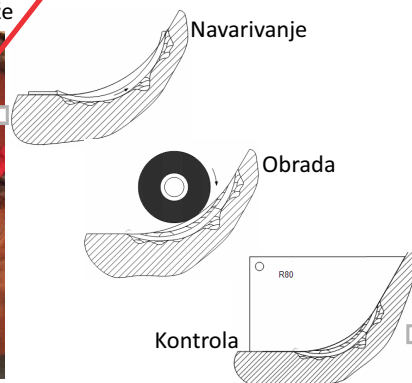
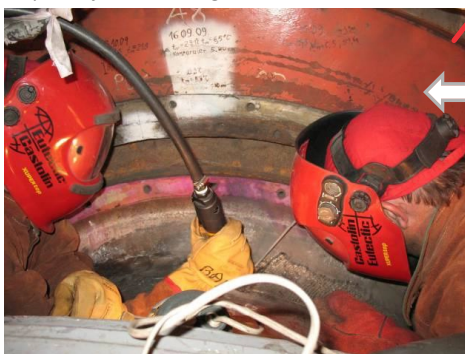
Naprslina na prelaznom radijusu R80



Presek elektrane i turbine A8



Reparacija turbinskog vratila A8 bez demontaže



Slika 10 Reparacija turbinskog vratila u HE Đerdap

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) **Zupčanici 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;