

MATERIJAL ZA PREDAVANJA IZ PREDMETA

REPARACIJA MAŠINSKIH DELOVA I
KONSTRUKCIJA

Uzroci oštećenja i razaranja mašinskih
delova i konstrukcija
(Handout 1)

Prof. dr Miloš Đukić

Bograd, 2022

1. Pojam greške i oštećenja mašinskih delova i konstrukcija

Prolazeći kroz sve faze procesa dobijanja, prerade i izrade do poluproizvoda ili finalnog proizvoda, materijal je izložen dejstvu velikog broja činilaca koji utiču na njegovo konačno upotrebno stanje. Iako čitav niz sukcesivnih procesa pri fabrikaciji ima za cilj dobijanje optimalnih osobina materijala, upravo su u tim fazama i mogućnosti za pojavu grešaka i odstupanja od zahtevanih osobina velike.

Dopunski, pojava grešaka je moguća i pri montaži gotovih elemenata opreme, čiji nepovoljan uticaj može da se superponira sa već postojećim greškama iz fabrikacije. Imajući u vidu da integritet bilo koje opreme zavisi od osobina ugrađenog materijala, vrlo je značajno posvetiti pažnju kontroli njegovog kvaliteta i utvrđivanju eventualnog prisustva grešaka. Greške se na mašinskim delovima i konstrukcijama javljaju i tokom eksploatacije pre svega kao rezultat procesa starenja materijala.

2. Hronološka klasifikacija grešaka

Hronološka klasifikacija grešaka, slika 1 i Tabela 1, uključuje sve tipove grešaka koji mogu da se jave na mašinskim delovima i konstrukcijama tokom njihovog celoukupnog radnog veka od faze projektovanja, preko konstruisanja do eksploatacije.



Slika 1. Hronološka klasifikacija grešaka

Tabela 1: Hronološka klasifikacija grešaka - primeri

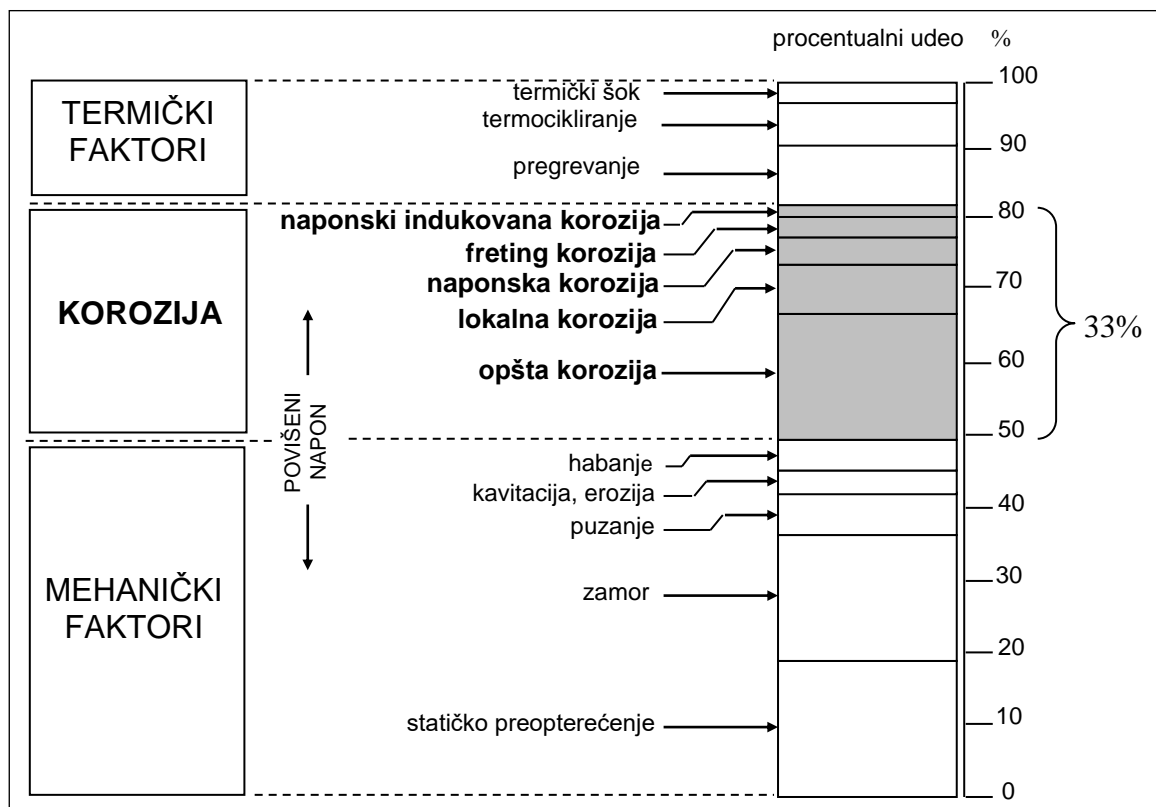
Hronološka klasifikacija grešaka	
Grupe grešaka	<i>primer</i>
1.1 Konstrukcione	<ul style="list-style-type: none">❑ Neodgovarajuća konstrukcija❑ Nepravilni izbor dimenzija elemenata konstrukcije❑ Neodgovarajuća procena radnih uslova❑ Odstupanje dimenzija elemenata konstrukcija u odnosu na projektne dimenzije
1.2 Tehnološke	<ul style="list-style-type: none">❑ Odstupanje od zahtevanog po standardu hemijskog sastava materijala, strukture, mehaničkih osobina , količine uključaka, diskontinuiteta ...❑ Greške zavarivanja❑ Odstupanje u parametrima režima zavarivanja, prethodne i naknadne termičke obrade od projektom predviđenih❑ Odstupanje u kvalitetu i stanju površine od zahteva prema standardu ili projektnoj dokumentaciji
1.3 Montažne	<ul style="list-style-type: none">❑ Mehaničke povrede površine metala u transportu i montaži❑ Nepravilna montaža elemenata konstrukcije❑ Greške zavarivanja na montažnim šavovima❑ Odstupanje u parametrima režima zavarivanja, prethodne i naknadne termičke obrade od projektom predviđenih
1.4 Eksploatacione	<ul style="list-style-type: none">❑ Zamorne prsline, prsline puzanja kao rezultat odstupanja od projektnih radnih parametara❑ Prsline usled koroziono agresivnog dejstva radnog fluida kao rezultat narušavanja vodenohemijskog režima❑ Promena dimenzija i oblika komponenata usled delovanja povišene temperature i pritiska
1.5 Remontne	<ul style="list-style-type: none">❑ Prsline provocirane visokim nivoom zaostalih napona od zavarivanja❑ Greške zavarivanja pri remontu❑ Montažne greške tokom remonta

3. Funkcionalna klasifikacija grešaka i klasifikacija po karakterističnim znacima

Funkcionalni tip klasifikacije grešaka mašinskih delova i konstrukcija u prvi plan ističe uzročnike koji su odgovorni za nastanak pojedinih tipova grešaka, Tabela 2. Kao primer na slici 2 prikazani su procentualni udeli pojedinih uzroka otkaza kod opreme termoenergetskih postrojenja prema podacima i klasifikacije jednog evropskog osiguravajućeg društva.

Tabela 2: Funkcionalna klasifikacija grešaka - primeri

Princip klasifikacije	Cilj	Grupa grešaka	Primeri
Funkcionalni	Određivanje činilaca ili grupe činilaca, odgovornih za nastanak greške	2.1 Greške čiji je osnovni uzrok veće opterećenje (mehaničko, toplotno, kombinovano)	
		2.1.1 Greške kao posledice dejstva samo većeg opterećenja	Zamorne prsline; Prsline puzanja; Prsline od dejstva statičkog opterećenja; Prsline krtog razaranja,...
		2.1.2 Greške kao posledica kombinovanog dejstva opterećenja i drugih činilaca	Prsline usled naponske korozije; Koroziono-zamorne prsline; Krto razaranje usled starenja pod dejstvom napona i temperature; Prsline usled termičkog zamora,...
		2.2 Greške čiji je osnovni uzrok korozioni atak	Opšta korozija; Promena hemijskog sastava metala i okoline; Kiseonična korozija; Interkristalna korozija; Piting korozija; Vodonična krtost;...
		2.2.2 Greške kao posledica kombinovanog dejstva korozione sredine i drugih činilaca	Freting korozija; Kavitaciona korozija; Greške iz 2.1.1 čija je pojava stimulisana delovanjem temperature i napona.
		2.3 Greške čiji je osnovni uzrok temperatura	Starenje pri zagrevanju; Promena strukture (degradacija); Pore (puzanje); Naslage; Zaostali naponi;...



Slika 2. Procentualni udeli pojedinih uzroka otkaza opreme termoelektrana

3.1 Greške čiji je osnovni uzrok korozioni atak i kombinovano dejstvo radne sredine, napona i materijala

Korozija se definiše kao proces razaranja ili oštećivanja metala pri njegovoj reakciji sa okolnom sredinom, s tim da metal ili komponenta legure prelazi u oksidno (jonsko) stanje. Kao rezultat odvijanja ovog procesa javlja se postepeni, a često i nagli gubitak osnovne funkcije elemenata sistema ili sistema u celini.

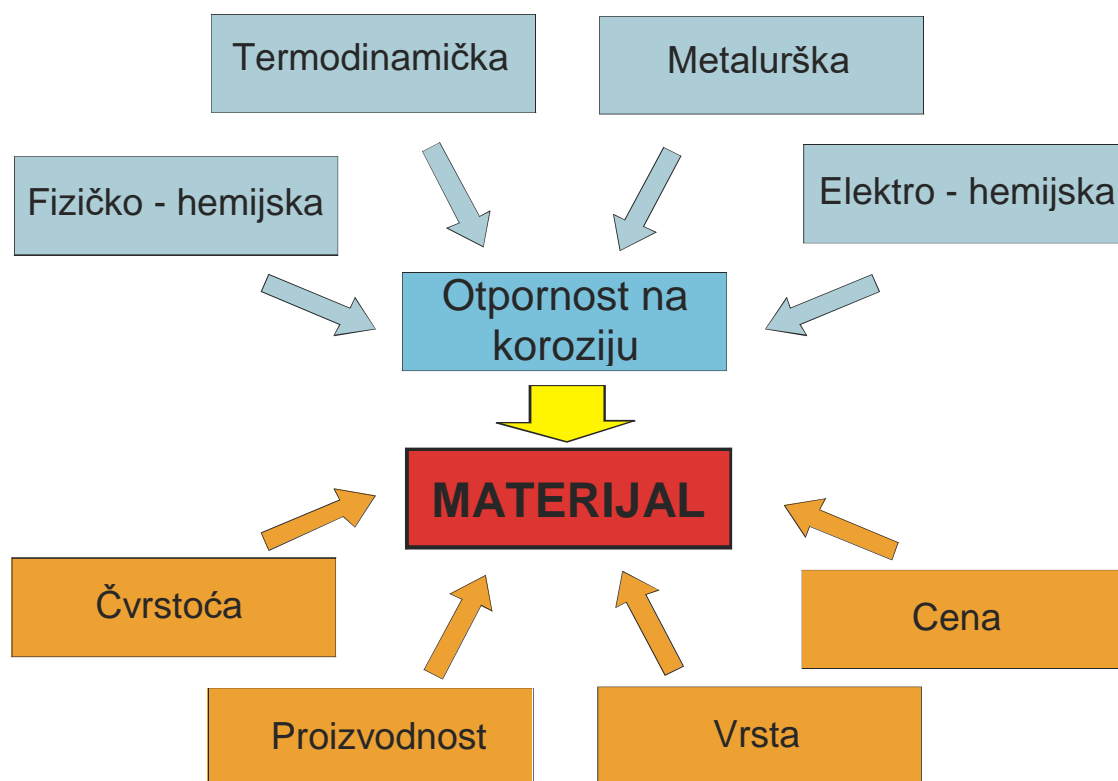
Karakteristični efekti razvoja procesa korozije na različitoj opremi industrijskih postrojenja ogledaju se u sledećem:

- skraćuje vek trajanja opreme,
- značajno poskupljuje njeno održavanje,
- smanjuje proizvodne kapacitete korodirane i s njom povezane opreme,
- utiče na smanjenje pouzdanosti opreme i celog postrojenja
- uzrokuje zastoje u radu, havarije i nesreće.

Ekonomski značaj korozije raste jer se u industriji primenjuje sve više materijala pod uslovima visoke temperature, visokog pritiska i naprezanja, agresivnih hemikalija, zagađene atmosfere, vode i tla. Paralelno se razvija antikorozivna tehnologija, ali je njena primena neadekvatna. Ukupni korozioni gubici se povećavaju, premda se smanjuje udeo neizbežnih gubitaka.

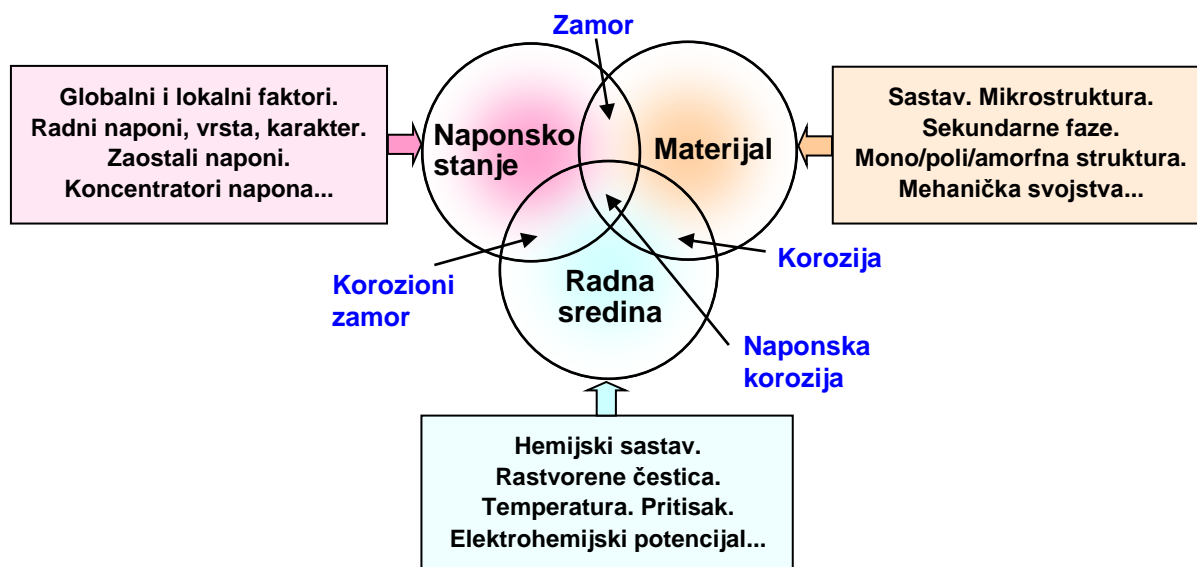
Stvarna šteta zbog korozije jednaka je razlici između ukupnih gubitaka i gubitaka koji su neizbežni uvažavajući nivo razvijenosti antikorozivne tehnologije. Činjenica je da se racionalnom primenom savremenih zaštitnih metoda na svaki uloženi dinar za saniranje korozije štedi tri do šest dinara.

Osnovni činioci koji utiču na izbor materijala izloženog koroziji u radu su prikazani na slici 3.



Slika 3. Šematski prikaz činilaca koji utiču na izbor nekog konstrukcionog materijala izloženog koroziji u radu

Teškoće vezane za definisanje ponašanja opreme industrijskih postrojenja izložene korozionom ataku tokom eksploatacije su uslovljene činjenicom da koroziona otpornost ne predstavlja svojstvo materijala koje može da se, za duži vremenski period, egzaktno okarakterise kvantitativnim pokazateljima, kao što je to slučaj sa mehaničkim svojstvima. Izuzetna složenost korozionih procesa i razaranja metala opreme industrijskih postrojenja pod dejstvom agresivne radne sredine na lokalnom nivou rezultat je interakcije tri osnovna činioca: materijala, radne sredine i termomehaničkih napona, slika 4. Uticaj svakog od navedenih činioca je dalje determinisan čitavim nizom parametara, Tabela 3, čija nepovoljna kombinacija vodi ka pojavi korozije.



Slika 4. Uticajni faktori i promenljive veličine odgovorne za razvoj korozionih oštećenja

Tabela 3: Parametri tri osnovna činioca odgovorna za razvoj korozije

Materijal	Radna sredina	Termo-mehanički naponi
Hemijski sastav Mikrostruktura Lokalni hemijski sastav Metalurški faktori Mehanička svojstva Stanje površine Karakteristike zaštitnog sloja na površini metala	Hemijski sastav Vrsta i količina rastvorenih čestica Temperatura Pritisak Elektrohemijski potencijal Sadržaj kiselonika pH vrednost Provodljivost, Tvrdća Brzina i režim strujanja/ ključanja	Statički naponi Dinamički naponi Termički indukovani naponi Karakter napona Frekvencija Koncentratori napona Vibracije Zaostali naponi

Raznovrsnost korozionih procesa na lokalnom nivou kod opreme industrijskih postrojenja je uslovljena različitim kombinacijama parametara tri osnovna činioca odgovorna za razvoj korozije.

3.2 Klasifikacija grešaka prema karakterističnim znacima

Klasifikacija grešaka prema karakterističnim znacima omogućava kategorizaciju grešaka prema vrsti, odnosno tačnije opisivanje greške sa aspekta odstupanja od zahtevanih geometrijskih, fizičkih, hemijskih i mehaničkih karakteristika, Tabela 4.

Tabela 4: Klasifikacija grešaka po karakterističnim znacima - primeri

Princip klasifikacije	Cilj	Primeri
Po karakterističnim znacima	Tačnije opisivanje greške	3.1 Greške u geometriji (odstupanje od prečnika i debljine zida u odnosu na projektne dimenzije); 3.2 Greške zavarivanja; 3.3 Greške u hemijskom sastavu (odstupanje sadržaja legirajućih elemenata od standardom predviđenih vrednosti, razugljeničenje površinskih slojeva); 3.4 Greške mikrostrukture (odstupanje veličine zrna, sadržaja feritne faze, sadržaja perlitne faze, ... u odnosu na standardom predviđene vrednosti); 3.5 Greške u mehaničkim svojstvima (odstupanje od standardom predviđenih vrednosti); 3.6 Greške nehomogenosti (nemetalni uključci-sulfidi, oksidi, silikati i šljaka u količini i veličini iznad dopuštenih vrednosti, likvacija, nehomogenost u veličini zrna,...); 3.7 Greške neprekidnosti (pore i gasne šupljine, neprovori svih oblika, mreža prslina,...);

Pod pojmom nepravilnog (nesavršenog) zavarenog spoja podrazumeva se bilo koji vid odstupanja od idealnog zavarenog spoja. Opšti pregled mogućih kategorija grešaka koje se odnose na **odstupanja** od idealnog zavarenog spoja, pri čemu greške zavarenog spoja predstavljaju samo jednu od kategorija odstupanja, prikazan je u Tabeli 5.

Tabela 5: Kategorije odstupanja od kvaliteta zavarenog spoja

ODSTUPANJA OD IDEALNOG ZAVARENOG SPOJA			
GREŠKE ZAVARENOG SPOJA	NEDOSTATCI U OSOBINAMA ZAVARENOG SPOJA	ODSTUPANJA USLED KONSTRUKTIVNIH PROPUSTA	ODSTUPANJA U PROCESU IZRADE I PRERADE
a) ravanske greške b) zapreminske greške c) greške oblika	a) prevelika koncentracija napona b) preveliki zaostali naponi c) neodgovarajuće mehaničke osobine c) nedovoljna sposobnost deformacije d) neodgovarajuća koroziona postojanost e) nehomogen i neodgovarajući hemijski sastav f) neodgovarajuće mikrostrukturne karakteristike	a) neodgovarajući izbor i kvalitet osnovnog i dodatnog materijala b) neodgovarajuća konstrukcija - tehnologičnost - dimenzionisanje - oblici c) neodgovarajuća procena radnih uslova - vrsta, karakter i promena opterećenja - temperatura i promena temperature - uticaj vetra, opterećenje snežnog pokrivača - seizmički potresi - koroziono dejstvo medijuma i okoline - posebni uslovi	a) neodgovarajuća priprema za zavarivanja b) neodgovarajuća tehnologija zavarivanja b) neodgovarajući tehnološki postupak oblikovanja b) neodgovarajuća naknadna termička obrada

4. Vidljive i skrivene greške

Predložene klasifikacije, principijelno, obuhvataju sve moguće vrste grešaka koje mogu da se jave kod mašinskih delova i konstrukcija od projekta, montaže do bilo kog stadijuma eksploatacije. Određen broj grešaka može u relativno kratkom vremenu eksploatacije da se otkrije, pre svega iz grupe konstruktivnih, a delimično i iz grupe montažnih. Međutim, greške iz grupe tehnoloških grešaka u materijalu se javljaju kao skrivene, koje se vremenom, čak i u uslovima optimalne eksploatacije, aktiviraju i u zavisnosti od veličine, mogu da prouzrokuju manji ili veći stepen oštećenja a nekada i razaranje mašinskog dela i konstrukcije.

Stoga je od izuzetnog značaja analiza i utvrđivanje raspodele broja grešaka po uzrocima i po vremenu njihove pojave tokom eksploatacije za različite mašinske delove i konstrukcije.

Međutim, praksa je pokazala da u analizi rezultata određivanja uzroka pojave greške, ako se ona uopšte i sprovodi, ima mnogo nedostataka, iako je poznato da ona predstavlja jednu od karika u lancu mera koje se preduzimaju u cilju povećanja pouzdanosti delova, konstrukcija kao i celoukupnog postrojenja, zato što:

- često nije moguće sa sigurnošću odrediti uzrok pojave greške;
- umesto uzroka pojave ističe se karakter, kao npr. zamorna prslina, naponska korozija, itd.
- skoro u svim slučajevima analize uzroka pojave greške/oštećenja mašinskih delova i konstrukcija odsustvuje kvantitativna analiza udela dejstva različitih činilaca u pojavi oštećenja. Ovakav pristup, kao i odsustvo razrađene metodologije u analizi pronalaženja uzroka pojave oštećenja dovodi do subjektivizma pri utvrđivanju uzroka.

Najčešće greške, istovremeno i najopasnije sa veoma teškim posledicama, iz grupe tehnoloških grešaka u materijalu koje se svojim dejstvom javljaju kao "zakasnele" odnose se na:

- ⇒ odstupanje od zahtevanog, po standardima, hemijskog sastava, strukture, mehaničkih osobina, i
- ⇒ pojavu grešaka pri montaži i spajanju (montažne greške; greške zavarivanja...)

5. Nastanak oštećenja, lomova i otkaza mašinskih delova i konstrukcija

5.1 Pojam oštećenja i loma

Projektanti se često sreću sa zahtevom da minimalizuju mogućnost pojave razaranja/loma pri projektovanju različitih konstrukcija. Da bi mogli da ispune ovaj zahtev neophodno je da razumeju osnovne mehanizme oštećenja i razaranja materijala u određenim (eksploatacionim) uslovima, kao i da poznaju odgovarajuće projektantske principe koje treba primeniti da ne dođe do loma nekog dela tokom eksploatacije. Lom inženjerskih materijala je uvek neželjen događaj, pre svega, zbog: mogućnosti ugrožavanja ljudskih života, direktnog ekonomskog gubitka, zastoja neizvesnog trajanja i mogućeg pada raspoloživosti postrojenja.

Tabela 6: Osnovne klasifikacije lomova

Aspekt klasifikacije lomova:	Izgled – Vrsta – Karakteristična osobenost loma				
Karakter opterećenja	Jednostavan lom				
	Lom usled dugotrajnog statičkog opterećenja	Lom usled puzanja			
		Lom usled naponske korozije			
		Lom usled usporenog razaranja			
	Zamorni lom	Lom usled sopstvenog zamora			
		Lom usled niskocikličnog zamora			
		Lom usled korozionog zamora			
Orijentacija loma	Ravan lom	Ravan lom sa kosim ivicama	Kosi lom	Kupast lom	
Makrogeometrija prelomne površine	Homogena makrogeometrija		Nehomogena makrogeometrija		
	Sa različitim šarama		Složena makrogeometrija		
Mikrogeometrija prelomne površine, odsjaj, boja	Kristalast (zrnasti) – primarna klasifikacija		Jamičasti		
	Vlaknasti - primarna klasifikacija		Mešoviti		
	Naftalinski, kamenasti, porcelanski		Sjajni, mat, plavi, crni, itd.		
Stepen plastične deformacije pre loma	veći od 15 % žilav lom		do 1,5% krt lom	do 15 % kvazikrt lom	
Mikromehanizam razaranja	Žilav	Krt	Kvazikrt	Zamorni	
Veza sa elementima mikrostrukture	Transkristalni lom		Interkristalni lom	Mešoviti lom	
Energija razaranja	Krt (A<5J)		Kvazikrt (A=5.....20J)	Žilav (A>20J)	

U Tabeli 6 je dat pregled najvažnijih i najčešćih klasifikacija lomova. Lom materijala od koga je neka struktura (mašinski element, komponenta postrojenja, konstrukcija) izrađena je relativno česta i, kao što je već istaknuto, neželjena pojava, pa joj je, stoga, posvećena značajna naučna i istraživačka pažnja. Zbog velikog broja različitih uzroka čijim delovanjem mogu da se stvore uslovi za pojavu loma, ne iznenađuje činjenica da postoje i brojne različite klasifikacije lomova. Klasifikacija lomova može da se izvrši sa aspekta: složenosti, karaktera i vrste delujućeg naponskog

stanja, izgleda i karakteristika prelomne površine, stepena plastične deformacije pri lomu, mikromehanizama razaranja, veze sa elementima mikrostrukture materijala, itd.

Inače, prema složenosti, lom može da bude **jednostavan (prost)** i **složen**.

Jednostavan lom je razdvajanje tela na dva ili više delova koje je usledilo kao odgovor tela na delujući napon koji je statičkog karaktera (konstantan ili lagano promenljiv sa vremenom) i temperaturu koja je relativno niska u odnosu na temperaturu topljenja.

U svim ostalim uslovima napona i temperature, lom koji se javlja je složenog karaktera. Primljeni napon može da bude inače statičkog ili dinamičkog karaktera, a po smeru dejstva: zatezni, pritisni, smicajni, uvojni, savojni i kombinovani.

Kod inženjerskih materijala su moguća **dva osnovna moda razaranja: žilav i krt** - čija je pojava u funkciji sposobnosti materijala da se pre loma plastično deformiše. Duktilni materijali se odlikuju značajnom sposobnošću plastičnog deformisanja uz apsorbovanje velike energije pre loma – žilav lom, dok je mala ili zanemarljiva plastična deformacija sa malom apsorbovanom energijom karakteristična za krti lom.

Svaki lom uključuje dve faze razvoja kao odgovor na delujući napon:

1. fazu nukleacije prsline i
2. fazu širenja prsline.

5.2 Makroskopska fraktografija lomova

Makroskopski pregled i utvrđivanje makrokarakteristika loma je prva, neophodna a često i ključna faza fraktografske analize uopšte. U zavisnosti od toga sa kojom pažnjom i preciznošću se sprovedi makrofraktografska analiza, zavise i krajnji rezultat i tačnost izvođenja zaključaka pri utvrđivanju stvarnog uzroka razaranja neke strukture. Makroskopska fraktografija se sastoji od nekoliko faza koje uključuju:

1. Prikupljanje podataka iz eksploatacione istorije dela koji je pretrpeo razaranje a koji se odnose npr. na vrstu materijala, parametre rada kao što su vrsta opterećenja, temperatura i vreme, kvalitet radne sredine, itd. (faza sakupljanja podataka – I faza);
2. Makrofotografisanje svih delova koji su neposredno i posredno učestvovali u razaranju, po mogućnosti na licu mesta i bez njihove bilo kakve pripreme (faza zatečenog stanja – II faza);
3. Vizuelnu karakterizaciju prelomnih površina u odnosu na eventualne koncentratore napona, orijentaciju, makrogeometriju, stepen plastične deformacije, a po mogućnosti i u odnosu na mikrogeometriju i preliminarno, mikromehanizam razaranja (faza vizuelne karakterizacije – III faza);
4. Makrofotografisanje svih prelomnih površina koje treba da budu "sveže", bez tragova mehaničkih oštećenja, oksidnih i masnih naslaga, korozije, itd. se izvodi lupom, pri povećanju od 5-10 puta, a zatim stereolupom sa povećanjima 20-120 puta. Ugao osvetljavanja se bira u zavisnosti od makroreljefa i potrebe da se na makrofotografiji zabeleže detalji prelomne površine. U slučaju da su razaranja i ova faza ispitivanja vremenski pomerene, neophodno je prethodno očistiti prelomne površine u odgovarajućem sredstvu i osušiti ih strujom toplog vazduha. Sredstvo za čišćenje i odmašćivanje se bira prema vrsti materijala vodeći računa da ne sme hemijski da ošteti površinu, niti da obrazuje novi reljef (faza makrosnimanja karakteristika površina loma – IV faza);

Kada su svi podaci prikupljeni pristupa se njihovoj analizi, a zatim se na osnovu podataka iz II, III i IV faze i njihove sinteze utvrđuje šta se stvarno dogodilo.

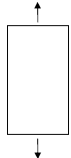
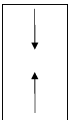
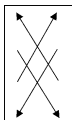

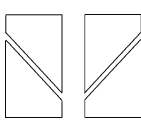
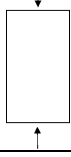
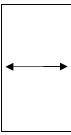
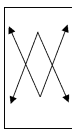

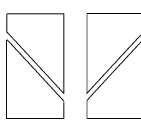
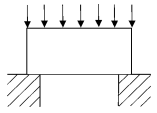
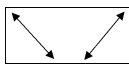
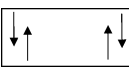
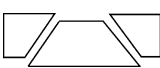
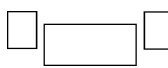
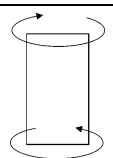
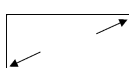
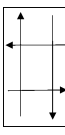

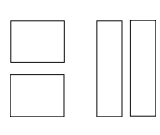
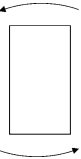
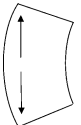
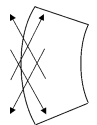

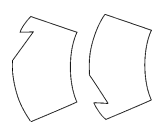
Makrofraktografska analiza predstavlja moćno sredstvo u *post mortem* analizama razaranja, ne samo stoga što pruža mogućnost saznavanja uzroka koji su doveli do loma neke strukture već, pre svega, što ta saznanja mogu da budu "zalog budućnosti". Sama metoda je relativno jednostavna u

smislu da ne zahteva skupu i komplikovanu aparaturu ali predstavlja pravi izazov za istraživača – kako na pravi način izvršiti analizu površine loma, a zatim sintezu relevantnih podataka koja će da dovede do ispravnog zaključka.

Orijentacija prelomne površine je u tesnoj vezi sa karakterom opterećenja, naponskim stanjem i normalnim i tangencijalnim naponima koji dovode do razaranja. U tabeli 7 su šematski prikazani neki primeri orijentacije loma materijala u zavisnosti od vrste kratkotrajnog statičkog opterećenja. Kao što je u tabeli 1 navedeno, lom po orijentaciji može da bude ravan, ravan sa kosim ivicama, kos i kupast. Za ravan lom je karakteristično da su prelomne površine normalne na pravac najvećih zateznih (normalnih) napona a obično se javlja pri makrokrutom razaranju. Ravan lom sa kosim ivicama (poznat i kao lom čaša-kupa oblika) se najčešće javlja kod cilindričnih uzoraka izrađenih od konstrukcionih legiranih čelika – razaranje započinje u ravni koja je normalna na osu uzorka, a zatim, zbog promene naponsko-deformacionog stanja, prslina u površinskim slojevima menja svoj pravac, tangencijalni naponi postaju dominantni a razaranje se završava obrazovanjem glatkih kosih površina.

Razaranje anizotropnih materijala sa ograničenom sposobnošću plastičnog deformisanja i otpora ka razaranju, kao što su npr. legure aluminijuma i magnezijuma za gnječenje, se odvija smicanjem u ravnima najvećih tangencijalnih napona a lom je po orijentaciji kos. Za razliku od ravnog loma, poslednja dva su karakteristika makrožilavog razaranja. Kod materijala koji se odlikuju velikom sposobnošću plastičnog deformisanja i otpora ka razaranju, u zoni razaranja tokom delovanja zateznih napona se obrazuju potpuno kose ivice, odnosno javlja se kupast lom.

Tabela 7: Šematski prikaz razaranja u zavisnosti od vrste delujućeg opterećenja

Vrsta opterećenja		Napon		Vrsta razdvajanja	
		normalni, σ_{\max}	tangencijalni, τ_{\max}	prekid	smicanje
Zatezno					
Pritisno					
Smicajno					
Uvojno					
Savojno					

Procena postojanja oblasti sa različitim *makrogeometrijskim izgledom* u okviru jedne prelomne površine, u cilju određivanja makrogeometrijskih karakteristika loma, zauzima značajno mesto u makrofraktografskoj analizi, tabela 5. Homogena makrogeometrija se odnosi na one prelomne površine koje se u celosti odlikuju homogenim površinskim makrogeometrijskim karakteristikama – veoma retko se javlja, najčešće kod potpuno krutih materijala i to na niskim temperaturama. Prelomne površine su uglavnom nehomogene i složene makrogeometrije, sa oblastima različite orijentacije, kristalnosti, vlaknastosti, sa različitim šarama, bojom i odsjajem. Dva osnovna uzroka determinišu pojavu nehomogene makrogeometrije prelomne površine:

- kvalitet materijala od koga je izrađena neka struktura, odnosno nehomogenost materijala u hemijskom sastavu, mikrostrukturi i osobinama, kao i stanje površine i kvalitet propisane i izvedene mašinske obrade (ako je ima), i
- osobenosti procesa razaranja koje su u sprezi sa nehomogenim i promenljivim naponskim i deformacionim stanjem, promenom tog stanja, kao i često neočekivanim, ali vrlo prisutnim, stanjem i kvalitetom radne sredine.

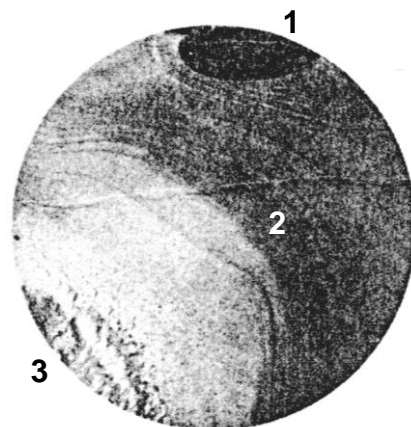
Nehomogenost makrogeometrije prelomne površine je veoma upečatljiva kod zamornih lomova, slika 5. - uobičajeno su prisutne tri osnovne oblasti:

1. *oblast inicijacije prsline* ("izvor"),
2. *oblast širenja (propagacije) prsline* i
3. *oblast završnog loma* ("doloma").

Međutim, u svakoj od ovih oblasti makrogeometrija ne mora, i najčešće i nije, homogena. Oblast inicijacije prsline je mesto gde se zbog delovanja koncentratora napona kao uzroka (oštri prelazi, koroziona oštećenja, površinske greške, greške u mikrostrukturi površinskih slojeva,...) stvara početna prslina koja dalje može da se širi. Veličina oblasti širenja prsline zavisi od naponsko-deformacionog stanja materijala, s tim što u okviru nje najčešće postoje bar dve zone: zona koja je bliža oblasti inicijacije prsline a koja se odlikuje sjajnom sitnozrnastom strukturom i malom hrapavosti i zona sopstvenog zamornog razaranja sa disperznom strukturom, glatkom mat površinom i linijama zamaranja.

Slika 5. Karakteristični izgled zamorog loma

- 1 – oblast inicijacije prsline
- 2 – oblast širenja zamorne prsline
- 3 – oblast završnog loma



Primarna klasifikacija lomova prema *mikrogeometriji prelomne površine* na kristalast i vlaknast istovremeno ukazuje i na mikromehanizam razaranja – kristalast karakter loma je osobenost krkog, a vlaknasti žilavog mikromehanizma razaranja.

Poznavanje svih specifičnosti prelomnih površina, od kojih je relativno mali broj naveden u ovom radu, odnosno loma kao pojave, moguće je već na osnovu makrofraktografske analize doneti validne zaključke o uzrocima koji su delovali, a svakako i odrediti preventivne mere kojima ti uzroci mogu da se svedu na najmanju moguću meru.

5.3 Primena makrofraktografije u oceni kvaliteta materijala

Pored neprocenjive uloge koju makrofraktografija ima u *post mortem* analizama i njenog direktnog uticaja na propisivanje preventivnih mera čijim se sprovođenjem direktno utiče na produžetak radnog veka neke strukture, značajna je i njena primena u oceni kvaliteta materijala. Najčešća primena makrofraktografije u oceni kvaliteta materijala odnosi se na:

- određivanje kritične temperature prelaza u krto stanje
- ocenu uticaja uključaka na razaranje

Poznato je iz literature da se žilavost materijala menja sa temperaturom, što znači da se i vlaknast i kristalast lom, u zavisnosti od temperature ispitivanja, mogu da pojave kod istog materijala. Temperaturni interval u kome dolazi do promene karaktera razaranja je poznat kao **temperaturni interval prelaza u krto stanje**. Uobičajeno se za kritičnu temperaturu prelaza u krto stanje usvaja ona temperatura na kojoj je jasno izražena smena mehanizama razaranja na određenoj prelomnoj površini. S obzirom na značaj ove temperature ne samo za projektovanje i izbor materijala neke strukture, već i za praćenje ponašanja materijala tokom eksploatacije, neophodno je za svaki materijal pojedinačno poznavati njenu vrednost.

Makrofraktofska metoda određivanja kritične temperature prelaza u krto stanje kod metalnih materijala se zasniva na određivanju procentualnog udela žilavog loma na seriji uzoraka istih dimenzija koji su napravljeni od istog materijala i koji su ispitivani na različitim temperaturama. Žilava komponenta loma predstavlja oblasti prelomne površine koje se vizuelnom karakterizacijom (tačka 2) opisuju kao vlaknaste.

Nemetalni uključci prisutni posebno u čelicima utiču na karakter procesa razaranja izazivajući pojavu i žilavih i krutih oblasti u zavisnosti od vrste uključka. Makro- i mikrofraktofskim metodama moguće je odrediti geometrijske parametre uključaka i udeo razaranja po uključcima, kao i izvršiti njihovu grubu identifikaciju na osnovu oblika, veličine i boje.

5.4 Otkazi mašinskih delova i konstrukcija

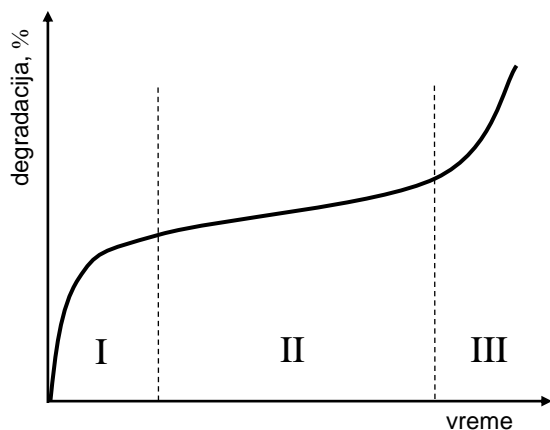
Uslov za ostvarivanje visoke pouzdanosti mašinskih delova i konstrukcija je mali broj oštećenja i otkaza.

Otkaz se uopšteno može definisati na više načina: kao prekid mogućnosti dela da obavlja zahtevanu funkciju – funkciju cilja, ili kao nemogućnost dela da radi u prethodno zadatim granicama.

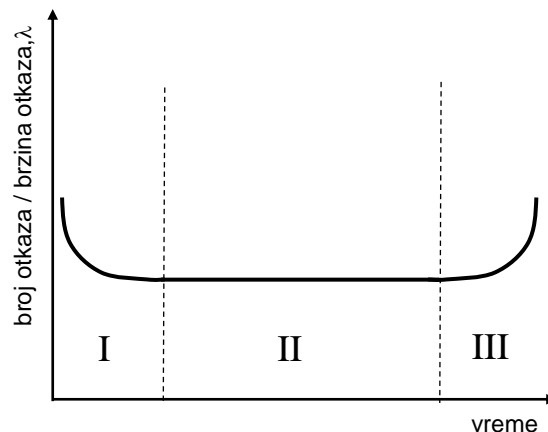
Pojavu otkaza tokom eksploatacije mašinskih delova i konstrukcija nemoguće je izbeći stim što se tokom vremena broj i brzina otkaza menjaju.

Degradacija – starenje materijala delova direktno se odražava na povećanje broja otkaza tokom eksploatacije, slika 6. Na slici 7 prikazana je teorijska kriva promene broja otkaza u zavisnosti od vremena eksploatacije – tzv. kriva u obliku kade na kojoj uočavano tri stadijuma eksploatacije: I – stadijum uhodavanja (stadijum "dečijih bolesti"); II – stadijum stabilnog rada i III – stadijum nestabilnog rada.

Prvi stadijum – I fazu eksploatacije karakteriše velika brzina otkaza koja postepeno opada. Stadijum stabilnog rada – II fazu u kome se postrojenje nalazi najveći deo svog projektovanog radnog veka se odlikuje relativno konstantnom brzinom otkaza. Poslednju III fazu eksploatacije – fazu nestabilnog rada karakteriše nagli porast broja/brzine otkaza postrojenja koji je praćen ostrim padom pouzdanosti.

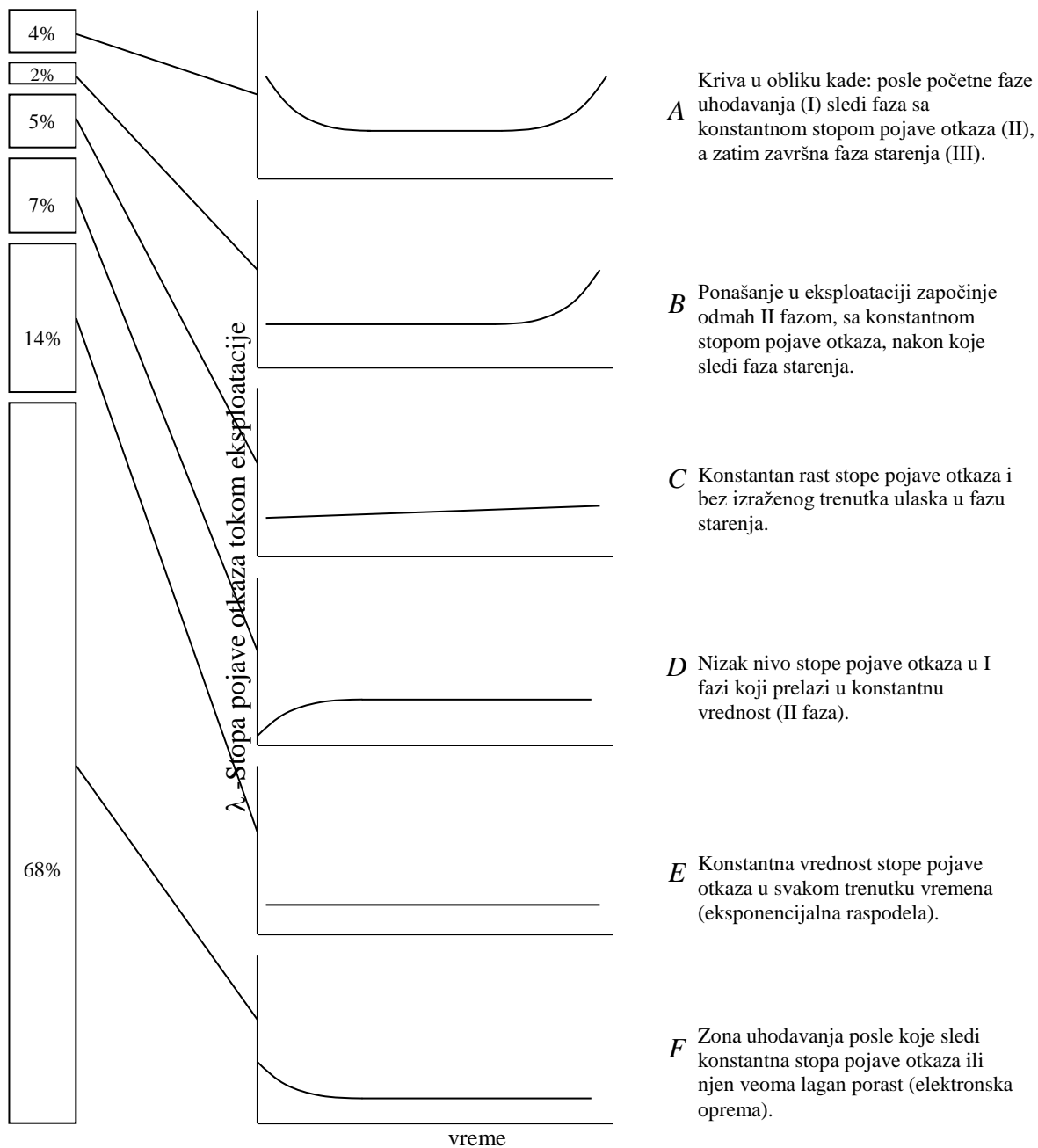


Slika 6. Tok procesa degradacije materijala mašinskih delova



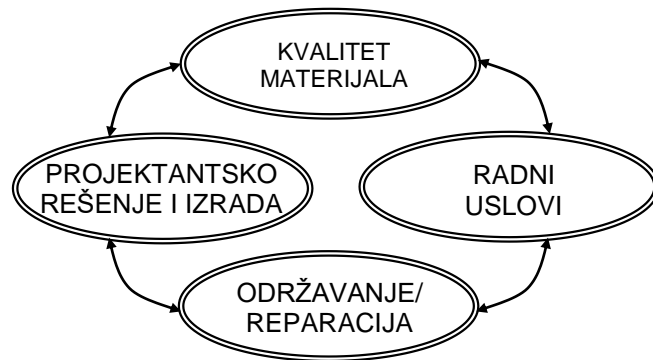
Slika 7. Teorijska promena broja otkaza / brzine otkaza mašinskih delova i konstrukcija

Na osnovu brojnih ispitivanja i statističke obrade ogromnog broja podataka pokazalo se da različita postrojenja, konstrukcije, i mašinski delovi pokazuju određene zakonitosti u ponašanju u toku eksploatacije a koja se odnosi na broj otkaza. Sistemtizacijom podataka se iskristalisalo šest mogućih tipova ponašanja, slika 8. Konkretni podaci navedeni na slici 8 su dobijeni obradom podataka sistema i podsistema iz avio-industrije. Za sisteme/podsisteme ostalih industrijskih grana važe ponašanja opisana dijagramima ali je procentualno učešće ponašanja po tipičnom dijagramu različito.



Slika 8. Tipovi dijagrama ponašanja sistema/podsistema sa aspekta stope otkaza tokom eksploatacije

Integritet mašinskih delova, odnosno broj otkaza tokom eksploatacije uslovljen je međusobnom interakcijom četiri uticajna faktora, slika 9.

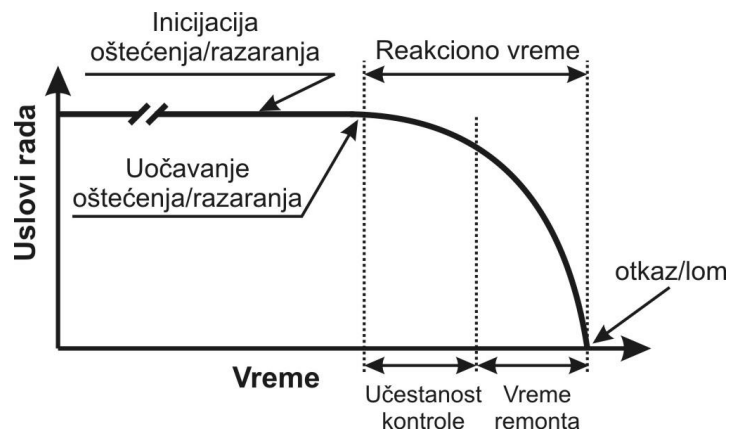


Slika 9. Faktori odgovorni za pojavu otkaza

Važno je istaći da jedino sistemski pristup koji obuhvata sagledavanje kompleksne interakcije navedenih uticajnih faktora omogućava verodostojnu spoznaju kako integriteta mašinskih delova tako i najefikasnijih mera njihovog održavanja i reparacije.

Stadijumi širenja razaranja su prikazani na slici 10. Suma vremena između kontrola, učestanosti kontrola i vremena koje je neophodno za izvođenje popravke, treba da bude kraće od reakcionog vremena koje se završava lomom, s tim što učestanost kontrole zavisi od vrste komponente.

Veoma je važno istaći da je, kada dođe do razaranja neke komponente, neophodno utvrditi uzroke tog oštećenja kao i mehanizme razaranja u cilju sprečavanja ponovljenih razaranja iz istog razloga, slika 11.



Slika 10. Stadijumi širenja razaranja



Slika 11. Pristup u analizi mehanizama i uzročnika oštećivanja i razaranja

6. Održavanje industrijskih postrojenja

Iskustva iz eksploataciji industrijskih postrojenja – složenih sistema, ukazuje, da i pored svih sprovedenih mera, planiranja i obezbeđenja kontrole kvaliteta, u različitim fazama eksploatacione istorije postrojenja, javljaju se otkazi na pojedinim delovima postrojenja, što rezultira prinudnim zastojsima postrojenja i sniženjem radnih parametara, uslovljavajući pad raspoloživosti i pouzdanosti postrojenja, velike ekonomske gubitke i nepovoljne ekološke efekte.

Jedan od glavnih uzročnika ovih neželjenih pojava su oprema, delovi i konstrukcioni elementi primenjeni u izgradnji jednog industrijskih postrojenja. Kako je praktično nemoguće da proizvođač radi testiranja u svojoj proizvodnoj hali napravi i instalira jedan složeni sistem kao što je na primer termo-energetsko postrojenje (niti se jedan takav složeni sistem izrađuje u jednoj fabrici), tako je i nemoguće unapred, pre puštanja u rad, znati kako će se sistem ponašati nakon određenog vremenskog perioda eksploatacije. Zato se često primenjuje koncept periodičnog održavanja u unapred određenim vremenskim intervalima koji bi trebalo da obezbedi sledeće:

- Kvalitetno i pouzdano ponašanje instalirane opreme, odnosno materijala u dužem vremenskom intervalu posredstvom unapred određenih ispitivanja/provera komponenti sistema i eventualnim zamenama ili reparacijama.
- Najveću moguću iskorišćenost opreme uz najmanji broj prekida rada, tako da nivo oštećenja bilo koje komponente (λ - Stopa pojave otkaza) bude u dozvoljenim granicama tokom celokupnog projektnog radnog veka. Planirane periodične obustave rada postrojenja se obavlja tako da se izbegnu dugotrajni prinudni zastoji postrojenja.
- Eliminaciju i izbegavanje ponovne pojave problema u eksploataciji pravovremenom analizom uzroka problema i zamenom kratkoročnih mera održavanja sa merama koje su kvalitetnija i dugoročne.

6.1 Tipovi održavanja

Postoji 7 osnovnih tipova (koncepta-pristupa) održavanja industrijskih postrojenja, od toga su prva tri u funkciji vremena nastajanja otkaza, a preostala četiri spadaju u kategoriju koncepte održavanja prema stanju. Razlikuju se pre svega po tome kada želimo ili moramo da delamo u odnosu na trenutak pojave kritičnog stepena oštećenja, odnosno otkaza. Tradicionalni koncepti održavanja se zasnivaju na periodičnom ispitivanju stanja opreme tokom planiranih zastoja i remonata, detekciji oštećenja (ako se nađu) i, shodno nalazu, propisivanju mera održavanja. Savremeni koncept održavanja mora da definiše tehno-ekonomski najefektivnije mere održavanja i da obezbedi povećanje protita.

1. Reaktivno održavanje

Ovaj tip održavanja se još zove i krizno održavanje. Ovo je dugo bio najzastupljeniji vid održavanja (u raznim delovima sveta je i dalje najzastupljeniji) i troškovi primene ovog tipa održavanja su relativno visoki zbog neplaniranog zastoja izazvanih oštećenjem opreme. i sveopštih troškova koji se ovakvom prilikom javljaju. Zasniva se na zameni dela-komponentne koja je otkazala sa novim, rezervnim delovima-komponentama iz magacina. Reaktivno održavanje treba da igra malu i sporednu ulogu u modernom pristupu održavanja postrojenja.

2. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje predstavlja planirano održavanje opreme i postrojenja. Zamišljen je tako da produži životni vek opreme i da se izbegnu neplanirani zastoji postrojenja i dodatne aktivnosti vezane za održavanje. Ovaj tip održavanja podrazumeva ispitivanje, zamenу i/ili reparaturu bilo kog dela ili elementa postrojenja na osnovu procene njegovog stanja i konstrukcijsko-eksploatacionih karakteristika u cilju produžetka radnog veka opreme, odnosno postrojenja.

3. Prediktivno održavanje

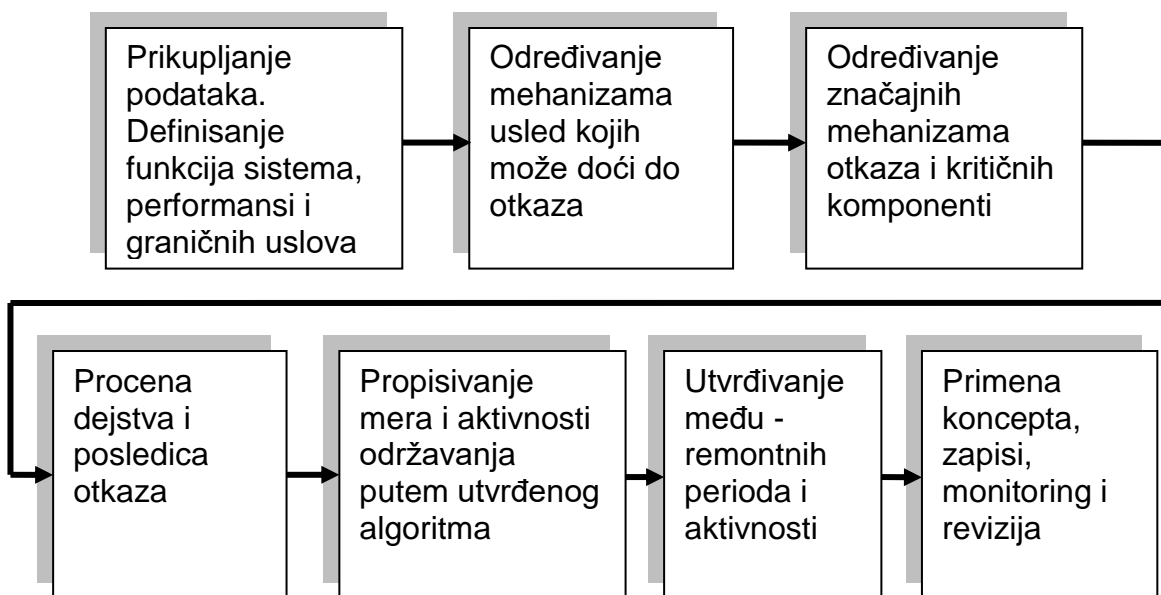
Ovaj tip održavanja pruža sposobnost da se proceni kada će određeni element otkazati i da se zameni pre nego što se to desi. To obično zahteva neki oblik ispitivanja i analizu u cilju pretpostavljanja vremenskog trenutka pojave otkaza. Prediktivno održavanje se može koristiti zajedno sa preventivnim. Kod različitih industrijskih postrojenja postoje brojne tačke nadgledanja radnih parametara koje se mogu iskoristiti da bi se procenila mogućnost nastajanja problema u radu, kao i eventualnih otkaza. Tu spada nadgledanje stepena vibracija, temperature, pritiska, opterećenja, stepen korisnosti postrojenja, curenja radnog fluida i maziva itd. Svi ovi parametri se mogu pratiti i dokumentovati putem računarskih sistema. Analizom svih ovih podataka se može pratiti i oceniti pouzdanost rada postrojenja kao i blagovremeno isplanirati i sprovesti mere održavanja.

4. Proaktivno održavanje

Ovaj, četvrti tip održavanja, spada u kategoriju savremenih koncepta održavanja, a koristi tehniku zvanu „analiza izvornog uzroka otkaza“. U ovom tipu održavanja se dijagnostifikuje primarni uzrok otkaza, a zatim primenom različitih mera održavanja potpuno uklanja ili smanjuje njegovi efekti.

5. Održavanje usmereno ka pouzdanosti

Ovaj tip održavanja (RCM – Reliability-Centered Maintenance) se definiše kao „proces radi utvrđivanja zahteva pri održavanju bilo kog fizičkog sistema u operativnom smislu“. To je kontinualan proces koji definiše kombinaciju reaktivnih, preventivnih i proaktivnih tehnika i mera održavanja, koje u praksi pružaju visoku pouzdanost u rada postrojenja uz minimalne troškove održavanja, slika 12. Svi elementi u sistemu nisu od iste važnosti za proizvodnju i sigurnost postrojenja. Dizajn i namena svakog zasebnog elementa se razlikuje i stoga se mogućnost otkaza različitog tipa opreme razlikuje. Ovim postupkom se ocenjuje kada je komponenta pred otkazom, kada se treba zameniti i definišu se tehno-ekonomski optimizovane mere održavanja. Ovde je glavni motiv eliminacija skupih, neplaniranih zastoja kritične opreme i smanjenje preventivnog održavanja, a manje važne aktivnosti u održavanju se rešavaju primenom mera reaktivnog održavanja.



Slika 12. Hronološki pregled aktivnosti u sprovođenju koncepta održavanje usmereno ka pouzdanosti

6. Održavanje zasnovano na riziku

Ovaj tip održavanja (RBM – Risk-Based Maintenance) podrazumeva da se svaki deo industrijskog postrojenja – složenog sistema posmatra pojedinačno. Komponentne unutra sistema se dele na kritične i nekritične na osnovu procene stepena rizičnosti, Slika 13. Stepenn rizičnosti se definiše kao proizvod dve komponentne, (verovatnoća pojave oštećenja) x (posledice oštećenja). Radi pojednostavljenja, stepenn rizičnosti svih komponenti složenog sistema se gradi, najčešće od 1 – 10. Postupak se izvodi tako što se identifikuju komponentne sa najvećim rizikom, utvrde mehanizmi oštećivanja za rizične i nerizične komponentne na osnovu čega se propisuju odgovarajući program inspekcije-isptivanja zasnovan na riziku (RBI – Risk Based Inspection), tehnologije i mere održavanja. Program inspekcije i kontrole zasnovan na riziku treba da bude takav da smanji rizik ili putem smanjenje verovatnoće pojave oštećenja ili putem smanjenje posledica od oštećenja ili kroz smanjenje oba faktora.



Slika 13. Hronološki pregled aktivnosti u sprovođenju koncepta održavanje zasnovanog na riziku

7. Upravljanje integritetom postrojenja

Upravljanje integritetom postrojenja (Asset Integrity Management – AIM) može se definisati kao način razmišljanja i delanja koji ima za cilj iznalaženje i unapređivanje načina da neko postrojenje ili sistem radi što bolje i efikasnije, slika 14. U svetu se ovaj savremeni princip koristi već duži niz godina, dok je na ovim prostorima retko zastupljen. Kratka i uprošćena definicija koncepta upravljanje integritetom postrojenja moglo bi da glasi: "popravljanje nečega što nije pokvareno". Imajući ovu šturou definiciju u vidu, može se razumeti zašto je u nas ovakav pristup redak. Međutim, imajući istu definiciju u vidu, može se zaključiti da popravljanje, tj. unapređivanje nečega što već funkcioniše može samo pozitivno uticati na tu funkciju koju sistem, odnosno postrojenje, obavlja.

Upravljanje integritetom postrojenja predstavlja, po opšteprihvaćenoj definiciji, sposobnost nekog pogona da funkcioniše efektivno i efikasno istovremeno štiteći zdravlje, bezbednost i okolinu kao i mogućnost da taj pogon uz pomoć svojih zaposlenih, svojih resursa i procesa štiti svoj integritet.

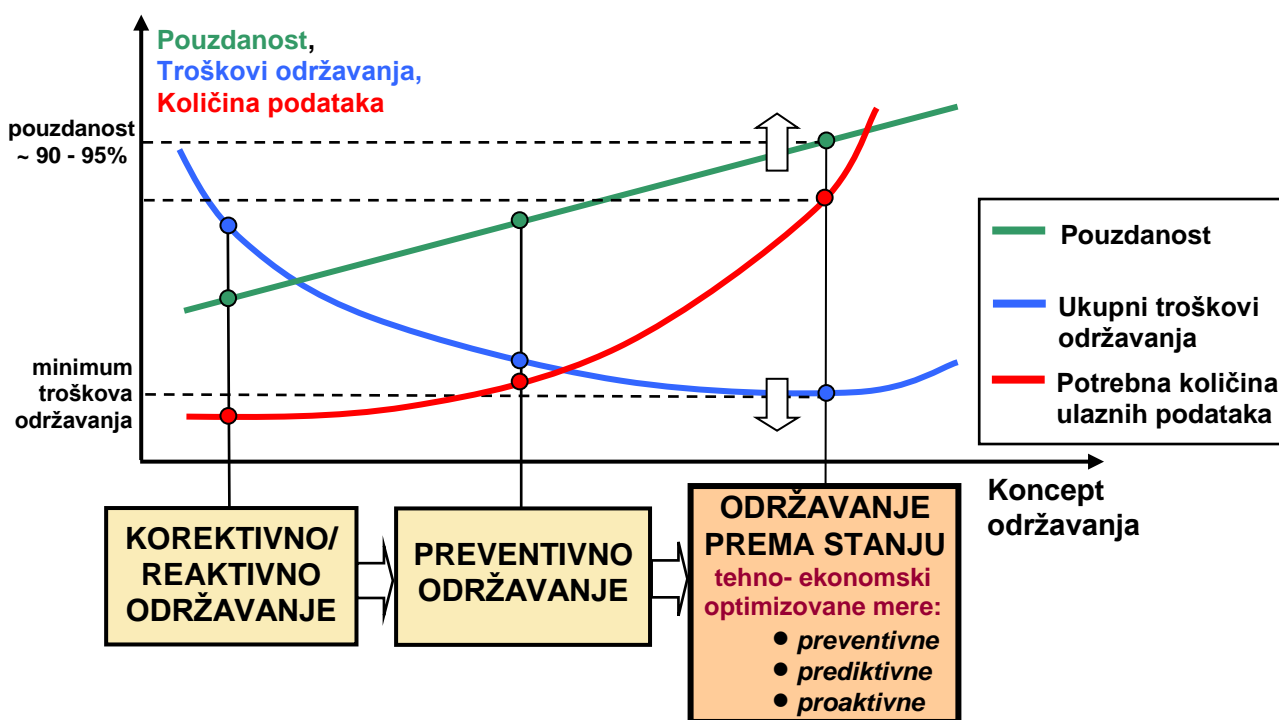
To se postiže odgovarajućim načinom održavanja koji ne podrazumeva samo rešavanje nastalih kvarova ili smanjenih radnih kapaciteta, već preventivno održavanje kao i svakodnevno praćenje radnih parametara u cilju što efikasnije i dugotrajnije eksploatacije kao i stvaranja znanja koje može pružiti uvid u buduće radne karakteristike i sposobnosti okruženja u kome se radi.

Upravljanjem integriteta funkcionisanja pogona se obraća pažnja na svaki stadijum životnog ciklusa pogona od dizajniranja, preko održavanja do zaključivanja radnog veka.



Slika 14. Sprega osnovnih principa pri upravljanju integritetom postrojenja

Poređenje ostvarenog nivoa pouzdanosti industrijskog postrojenja, troškova održavanja i potrebne količine podataka neophodne pri primeni različitih koncepata održavanja prikazan je slici 15. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je za dostizanje zahtevane visoke pouzdanosti u radu (~90-95%) složenih i konkurentnih postrojenja, neophodno primeniti savremene koncepte održavanja prema stanju u koje spadaju: Održavanje usmereno ka pouzdanosti, Održavanje zasnovano na riziku i najsavremeniji koncept Upravljanje integritetom postrojenja.



Slika 15. Poređenje performansi pojedinih tipova održavanja