

## METODOLOGIJA ANALIZE OTKAZA U CILJU POBOLJŠANJA POUZDANOSTI ELEMENATA

### METHODOLOGY OF ANALYSIS OF FAILURE FOR THE IMPROVEMENT OF RELIABILITY ELEMENTS

**Mustafa Imamović, Sabahudin Jašarević, Fuad Hadžikadunić**  
Univerzitet u Zenici, Zenica  
Zenica B&H

#### **REZIME**

*Otkazi elemenata sistema su mjerilo pouzdanosti. Posebno je značajno utvrditi vrstu i glavne uzroke nastanka otkaza prema cjelovitoj (sveobuhvatnoj) metodologiji. Ove informacije nam mogu poslužiti kako u fazi dizajniranja elemenata, izrade tako i u fazi eksploatacije sistema za određena poboljšanja. Metodologija analize uzroka otkaza treba da bude sveobuhvatna data po fazama sa jasnim rezultatima svake od faza. Rezultati pojedinih faza utvrđivanja glavnih uzroka otkaza mogu koristiti za poboljšanje radne sposobnosti sistema te unapređenje pouzdanosti. U ovom radu je data metodologija po fazama kao dobra praksa, koju mogu koristiti kako održavaoci tako i ostali učesnici (dizajneri, istraživači, korisnici,...)*

**Ključne riječi:** otkazi elemenata, metodologija analize otkaza, faze analize,

#### **SUMMARY**

*The failures system are a measure of reliability. It is particularly important to determine the type and main causes of failure to complete the (comprehensive) methodology. This information can serve us both in the design phase of the elements, in the process of exploitation of the system for certain improvements. The methodology of failure analysis should be comprehensive data in stages with clear results of each of the stages. The results of the individual stages of determining the main causes of cancellation can be used to improve the working the ability of the system and the improvement of reliability. In this paper, the given methodology is in stage as a good practice, which can be used by maintenance and other participants (designers, researchers, users, ...)*

**Ključne riječi:** failure of elements, failure analysis methodology, stage analysis,

#### **1. UVOD**

Pouzdanost je veoma značajna karakteristika tehničkih sistema. Može se definisati na različite načine jer različit standardi je različito definišu. Jedna od definicija je „Pouzdanost je vjerovatnoća, na određenom nivou povjerenja, da će sistem uspješno obaviti funkciju za koju je namijenjen, bez otkaza i unutar specificiranih granica performansi, uzimajući u obzir prethodno vrijeme korištenja sistema, u toku specificiranog vremena trajanja zadatka, kada se koristi na propisani način i u svrhu za koju je namijenjen pod specificiranim nivoima opterećenja.“ Dakle pouzdanost je vjerovatnoća pri čemu su mjerilo pouzdanosti otkazi. Oni

su neminovnost nastajanja u toku životnog vijeka bez obzira koliki stepen sigurnosti uzeli prilikom konstruisanja elemenata sistema.

U cilju unapređenja pouzdanosti neophodno je definisati otkaze te utvrditi glavne uzroke nastajanja otkaza. Ovo je često mukotrpan posao ali je veoma značajan. U praksi postoje različiti pristupi utvrđivanja glavnih uzroka, a u ovom radu se daje jedna metodologija koja može koristiti, kako konstrukterima, tako i održavaocima, te operatorima. Ista se daje po fazama i za različite vrste otkaza nije potrebno istu provoditi u cjelini nego samo neke faze.

Za kompleksne sisteme i otkaze u cilju dobijanja kvalitetnih zaključaka ovu metodu treba provoditi u cjelini. Naprimjer kod otkaza dijelova mašina kod kojih se otkazima ugrožava sigurnost ljudi, sredstava, okoline postupak treba provoditi u cjelini (sredstva transporta, alatne mašine, proizvodne mašine, energetske mašine...).

## 2. OTKAZI TEHNIČKIH SISTEMA

Pod otkazom, u smislu pouzdanosti, podrazumijeva se prestanak radne sposobnosti sistema da vrši zahtijevanu funkciju u toku eksploatacije sistema i uređaja i njihovih sastavnih dijelova (elemenata) i mogu se naći u jednom od dva moguća stanja: ispravnom i neispravnom. U ispravnom stanju sistema (elementa) njegove karakteristike zadovoljavaju propisane zahtjeve, kako radne, tako i sporedne, kao što su: izgled, pogodnost za eksploataciju i sl. Svako odstupanje od propisanih radnih zahtjeva može se smatrati otkazom ili neispravošću.

Otkaz je događaj koji dovodi do prelaska iz ispravnog stanja (stanje radne sposobnosti) u neispravno stanje. Dakle, otkaz predstavlja potpuni ili djelomični gubitak radne sposobnosti sistema.

Kod sistema se mogu sresti i druge neispravnosti – defekti koji ne narušavaju njihov ispravan rad i sistemi se mogu koristiti i poslije te vrste neispravnosti, bez bojazni za ispravno obavljanje zadatka. Takve neispravnosti su, na primjer, greška na uzemljenju (pri čemu sistem/uređaj i dalje radi) ili prestanak rada signalnih sijalica itd.

Može se reći da poremećaj u radu sistema i mogućnost pojave otkaza nastaju zbog promjena početnih svojstava materijala dijelova od kojih je sistem izgrađen.

Uzroci slabljenja i smanjenja radnih karakteristika sistema nalaze se u fizičko-hemijskim promjenama, koje se odvijaju po određenim zakonima vjerovatnoće. Uzimajući u obzir nepredviđene utjecaje okoline na promjenu stanja, povećava se stohastičnost takvih pojava.

Proces nastanka otkaza predstavlja kinetički proces u nekom vremenu, čiji unutrašnji mehanizam i brzina zavise od svojstava materijala, opterećenja, režima rada, temperature i niza drugih faktora.

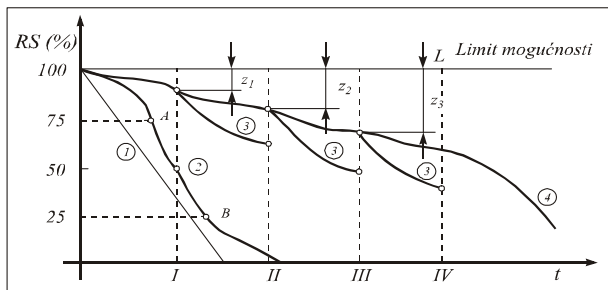
Proces slabljenja sistema i dijelova sistema je vrlo kompleksan. Na njega istovremeno djeluje više faktora, pojedinačno i u interakciji: vrsta materijala, mjesto odvijanja, vid energije, unutrašnji mehanizmi fizičko-hemijskih procesa (starenje, trošenje, korozija, zamor, puzavost), uslovi i način eksploatacije i održavanja.

Ako se u određenom vremenskom intervalu  $t$  promatra promjena radne sposobnosti sistema RS (I, II; III; IV), uočavaju se karakteristični zakoni slabljenja, slika 1. [1]

- 1 – idealan zakon, kada se proces slabljenja odvija progresivno i vrlo kratko traje,
- 2 – realan zakon, kada se pojavljuju segmenti, gdje između tačaka  $A$  i  $B$  dolazi do ubrzanog slabljenja sistema, uz pretpostavku da nije bilo intervencija održavanja,
- 3 – prekidi kontinualnog slabljenja sistema, uslijed intervencija održavanja, sa zaostalim oštećenjima ( $z_1, z_2, \dots, z_n$ ),
- 4 – zakon umanjivanja radne sposobnosti sistema u vijeku ekonomičnog korištenja do izdvajanja iz procesa, sa uspješnom funkcijom održavanja.

Treba napomenuti da promjena radnog stanja može biti definisana sa gornjom i donjom granicom. Dakle, treba da se kreće u nekom tolerantnom polju. Pri tome se pod pojmom

otkaza podrazumijeva događaj koji se dešava u trenutku kada vrijednost nekog parametra dostigne jednu od kritičnih vrijednosti ili ako iziđe izvan njih.



Slika 1. Grafička interpretacija zakona slabljenja radne sposobnosti sistema

Zavisno od namjene sistema, eksploatacionih uslova zahtijeva prema kvalitetu funkcionisanje itd, definicija otkaza treba da bude precizna i usklađena između naručioca i proizvođača sistema. Ovo je neophodno jer promjena nekog parametra van određenih granica ne mora uvijek da ima za posljedicu gubljenje radne sposobnosti sistema.

### 3. STRUKTURA UTICAJA NA POJAVU OTKAZA

Osnovna stanja sistema (stanje u radu i stanje u otkazu) su uslovljena pogonskim, radnim i upravljačkim mehanizmima sistema. Stanje sistema u otkazu je uvijek uslovljeno u otkazu dijela sistema (elementa ili podsistema). Za slučaj sistema u mašinstvu stanje sistema u otkazu može biti uzrokovano: potpunim otkazom dijelova sistema i djelimičnim otkazom dijelova sistema. [2]

Struktura uticaja, koji za slučaj sistema u mašinstvu dovodi do pojave otkaza, može biti različita i to:

- Sistemski otkazi/uticaji.
- Slučajni uticaji.
- Monotono djelujući uticaji.

Sistemski otkazi/uticaji mogu nastati usljed: greške izrade elemenata, greške montaže i greške postavljanja (lokacije), dovode do otkaza sistema obično u početnoj fazi rada u periodu dječijih bolesti.

Slučajni uticaji mogu biti: nestabilnost konstrukcionih parametara, nestabilnost tehnoloških parametara, nestabilnost uslova okoline, uslovljavaju otkaze koji su rezultat nestabilnosti konstrukcionih, tehnoloških, te parametara uslova okoline.

Monotono djelujući uticaji su: procesi habanja u dijelovima, procesi zamora i izmjene svojstava materijala, te procesi razlegularnosti elemenata sistema. Oni vode inteziviranju određenih procesa u vremenu, kao što su procesi u habanju, nedovoljne reguliranosti elemenata, čestice i prvljaština na kliznim površinama, zamor materijala, te izmjene fizičkih i hemijskih karakteristika materijala.

### 4. METODE ANALIZE UZROKA OTKAZA

Tehnički sistemi su proizvedeni kako bi zadovoljili neku funkciju čovjeka. I pored svega uloženog truda nakon proizvodnje u upotrebi nastaju otkaz sistema. Kako bi poboljšali performanse sistema neophodno je izvršiti analizu glavnog uzroka nastajanja otkaza. Sa tim informacijama se vraćamo kod konstruktora (dizajnera), u proizvodnju i montažu te korisniku kako bi analizom uzroka poboljšali performanse a time povećali pouzdanost. U praksi su

metode veoma različite, a često i površne, tako da se nama prava slika o uzrocima nastanka otkaza, te na takav način i nije moguće poboljšati performanse sistema.

Metode analize glavnog uzroka otkaza mogu se podijeliti po fazama kao: prikupljanje podataka i informacija, preliminarno istraživanje, ispitivanja bez razaranja, mehanička ispitivanja, metalografska ispitivanja, mehanika loma, te testiranje sličnog ili istog elementa.

#### **4.1. Prikupljanje informacija i podataka**

U ovoj fazi (Data&Simple collection) utvrđivanja glavnog uzroka otkaza se sakupljaju svi podaci i informacije o otkazu. To su informacije o izradi elementa, o procesu, kao i servisu. Neophodno je personalno upoznati operatora mašine kao i održavaoca pod čijom je odgovornosti ista. Cilj je rekonstrukcija nastanka događaja koji su prethodili otkazu. Ova faza podrazumjeva i skupljanje sve dokumentacije od proizvođača, distributera te korisnika. Podaci se mogu skupljati od projekatanta, proizvođača, operatora, serviseri, itd. Zapisi i fotografije su veoma bitne za ovu fazu za istragu o uzrocima. Zbog toga, neophodno je sve fotografisati kao i skupiti sve dijelove ukoliko ih ima više nakon nastanka otkaza. Oštećeni element može se porediti sa istim neoštećenim. U pripremi ove faze neophodno je formirati listu provjera (checklist) jer to čini metodu preglednom i efikasnom.

#### **4.2. Preliminarno istraživanje**

Ovo istraživanje (Preliminary Examination) je veoma bitno prije bilo koje druge aktivnosti. Na osnovu podataka i informacija u prethodnoj fazi se vrši preliminarno istraživanje glavnog uzroka nastanka otkaza. Veoma bitna faza jer ona može odrediti sljedeće faze. Ovo istraživanje se vrši na osnovu prikupljenih podataka. Ovo je u osnovi vizuelna inspekcija kako oštećenja tako i mjesta nastanka istog. Na ovakav način se može utvrditi pukotine kao i korozija ukoliko je prisutna. Podaci se trebaju registrovati, fotografisati stanje, shematski prikazati pukotine na oštećenom dijelu kao i na ostatku elementa (konstrukciji). Oblici uočene pukotine su veoma značajni za ocjenu stanja i na osnovu oblika istih se može utvrditi uzrok otkaza.

#### **4.3. Ispitivanje bez razaranja**

Ova faza (Nondestructive testing) podrazumjeva ispitivanje bez razaranja. Može se provoditi kao magnetna, ispitivanje penetrantima, vrtložnim strujama, ultrazvučna, te radiografska. U osnovi ispituju se mjesta neposredno na mjestima pukotina. Koja će se metoda primjeniti zavisi od vrste materijala kao i dostupnosti pojedine metode. Često to može biti kombinovana metoda.

Ispitivanje materijala bez razaranja je široka grupa metoda tehničke analize koja se upotrebljava u industriji za procjenjivanje osobina materijala, elemenata ili sistema bez uzrokovanja oštećenja na ispitivanom dijelu. Upravo zbog te činjenice te su metode visoko cijenjene, otklanjanju problema u istraživanju uzroka otkaza.

Ispitivanje magnetnim česticama - koristi jedno ili više magnetskih polja za lokaliziranje površinskih i potpovršinskih diskontinuiteta kod isključivo feromagnetičnih materijala. Diskontinuiteti, odnosno greške u materijalu, se otkrivaju i lokaliziraju zbog njihovog stvaranja polova ili narušavanja magnetskog polja induciranom u ispitivanom materijalu. Primjenjuje se kod ispitivanja odljevaka, zavara, zupčanika, cijevi, u postupku utvrđivanja uzroka otkaza.

Ispitivanje penetrantskim tekućinama - provodi se nanošenjem tekućine na ispitivani materijal kako bi se vizualno otkrile greške koje su upile tekućinu (često tekućinu sa dodanim fluorescentnim bojama radi bolje vidljivosti pod ultraljubičastim svjetlom). Koristi se kod neporoznih materijala, pri ispitivanju zupčanika, cijevi, diskova, pregleda komponenti mlaznih motora.

Ispitivanje vrtložnim strujama - slično kao i kod ispitivanja magnetnim česticama, vrtložne struje (električna struja) se generiraju u električno provodljivim materijalima promjenom magnetskog polja, dok diskontinuiteti u ispitivanom materijalu uzrokuju prekide u toku vrtložnih struja. Primjenjuje se na metalima i legurama, kao i za određivanje debljine premaza ili električne vodljivosti materijala.

Radiografsko ispitivanje - koristi penetrirajuće gama ili rendgenske zrake pri otkrivanju grešaka i strukturnih osobina materijala. Kao izvor zračenja se koristi rendgen ili radioaktivni izotop. Koristi se za ispitivanje širokog dijapazona materijala poput metala, polimera, kompozita, radioaktivnih materijala, gume.

Ultrazvučno ispitivanje - diskontinuiteti se otkrivaju i lociraju na temelju promjena odaslanih ultrazvučnih zraka koje diskontinuiteti prouzrokuju. Metoda ima primjenu pri ispitivanju odljevaka, otkivaka, zavara, cijevi i raznih drugih profila.

Za ultrazvučnu metodu i radiografsku metodu neophodno je imati kvalitetno obučene zaposlenike, opremu kao i jasne standarde koje treba da slijedimo. Za radiografiju je potrebno imati posebno visoko stručno osoblje.

#### **4.4. Mehanička ispitivanja**

Ova faza (Mechanical testing) ispitivanja uzroka nastanka otkaza podrazumjeva ispitivanja mehaničkih osobina materijala od kojeg je element izrađen. Za određene osobine neophodno je pripremiti ispitne epruvete, a za neke nije. Utvrđene osobine se mogu porediti sa osobinama datim u atestima koje su pribavljeni u prethodnim fazam. Često se puta epruvete izrađuju i od neoštećenog preostalog materijala jer su bitne osobine u blizini oštećenja.

#### **4.5. Metalografska ispitivanja**

Svrha je metalografskih ispitivanja utvrđivanje mikrostrukture elemenata te interpretacija i povezivanje mikrostrukture s proizvodnim postupcima, osobinama. Metalografija se, dakle, bavi kvalitativnim i kvantitativnim ispitivanjem materijala i to ponajprije tehnikama optičke, elektronske i ionske mikroskopije, a tijesno je povezana s rendgenskom strukturnom analizom, toplinskom i dilatometrijskom analizom, određivanjem mikrotvrdoće i dr.

Metalografska ispitivanja obuhvaćaju pripremu uzorka te makroskopska i mikroskopska ispitivanja njegove strukture. Struktura uzorka koja se može vidjeti prostim okom naziva se grubom, struktura vidljiva svjetlosnim mikroskopom finom, a ona vidljiva samo elektronskim mikroskopom ultrafinom strukturom. Strukturne komponente veličine oko milimetra (10–3m) ili veće čine makrostrukturu, komponente veličine između  $10^{-3}$  i  $10^{-7}$ m čine mikrostrukturu, a komponente veličine manje od  $10^{-7}$ m nanostrukturu; uobičajeno je, međutim, da se pod mikrostrukturu u širem smislu podrazumijeva i nanostruktura. Mikrostruktura materijala zavisi o veličini, obliku, raspodjeli i zapreminskim udjelima različitih mikrostrukturnih komponenata, što je određeno vrstom, veličinom i raspodjelom njihovih atoma, ali ovisi i o vrsti, veličini, gustoći i raspodjeli nepravilnosti kristalne rešetke koje nisu u termodinamičkoj ravnoteži.

Makroskopsko ispitivanje obavlja se na odgovarajuće pripremljenoj površini metalnog uzorka ili na njegovu prijelomu, a uzorak se promatra golim okom te povećalom pri povećanju do približno 20 puta.

Za mikroskopsko ispitivanje potrebno je površinu metalnog uzorka pomnjivo izbrusiti i polirati te nagristi hemijskim reagensima, čime se dobiva izbrusak. S pomoću svjetlosnoga mikroskopa može se postići povećanje od približno 2000 puta i razlučivanje od 250 nm, što omogućava analizu faza koje nastaju pri otvrdnjavanju ili kao posljedica promjena u čvrstom stanju, te opažanje mnogih detalja, odnosno elemenata mikrostrukture, na primjer granice zrna malog i velikoga kuta, granice faza, plinsku mikromjehuravost, mikrousahline, fizikalne nečistoće (uključici) itd. Za još detaljniju mikroanalizu upotreblava se elektronski mikroskop,

koji zbog male talasne dužine elektrona omogućava vrlo veliko razlučivanje od samo nekoliko desetina nanometra, što odgovara veličini parametara metalnih rešetki.

#### **4.6. Mehanika loma**

Mehanika loma je posebna naučna disciplina, pomoću koje se može procijeniti otpornost materijala na nastanak loma, kao i preostali vijek trajanja pri pojavi pukotine. Bitna je metoda za ocjenu utjecaja različitih zarezna na mogućnost nastanka otkaza elemenata. Za primjenu ove metode neophodno je posjedovati visoku stručnu osposobljenost ljudstva, kao i odgovarajuću opremu, te je to relativno skupo ispitivanje. Ova metoda se koristi kod utvrđivanja otkaza značajnih elemenata sistema.

#### **4.7. Testiranje/eksperimentalno ispitivanje**

Ova metoda utvrđivanja uzroka nastanka otkaza ima veoma značajno mjesto u postupku ispitivanja. U osnovi testira se ponašanje elemenata sistema pri realnim radnim uslovima i pri realnim opterećenjima. Prati se ponašanje elemenata, a pri tome se mogu vršiti i određena mjerenja (mjerenje napona, deformacija, frekvenci oscilovanja). Ova metoda omogućava da se izvrši ocjena ponašanja u radu sistema, kao i eventualni uzroci nastanka otkaza. Kod ove metode problemi su obezbjeđenje istog ili sličnog testnog modela, to je dosta skupo, ali su rezultati pouzdani.

Nakon završetka svake od metoda utvrđivanja uzroka nastanka otkaza moguće je donijeti određene zaključke, ali je ponekad potrebno provesti cjelokupnu lepezu ispitivanja. Često je puta na osnovu vizuelnog pregleda preloma elementa ili epruvete moguće ocjeniti vrstu naprezanja koja je dovela do otkaza, ali je to potrebno potvrditi i sa ostalim metodama. To može biti putokaz ka kvalitetnom zaključku.

Nakon provedenih ispitivanja neophodno je donijeti zaključke u pisanoj formi koji nedvosmisleno ukazuju na uzroke nastanka otkaza elementa ili cijelog sistema. Napominjemo da se svi rezultati trebaju pismeno registrirati.

Jasno poslije zaključaka neophodno je dati preporuke. To je veoma bitna faza jer to očekuju i proizvođači, dizajneri kao i korisnici. Na osnovu ovoga svako u svojoj djelatnosti može izvršiti određena poboljšanja, kako bi se u budućnosti izbjegla ili smanjila mogućnost nastanka istih ili sličnih otkaza. Napominjem da preporuke moraju biti jasne, jer često puta se iste daju prilično konfuzno, te da istraživanja gube smisao.

### **5. ZAKLJUČCI**

U ovom radu su date metode utvrđivanja uzroka nastanka otkaza elemenata tj tehničkih sistema. Data je definicija pouzdanosti te naznačena podjela otkaza kao struktura nastanka otkaza. Metodologija utvrđivanja otkaza je data po fazama koje bi trebalo slijediti u toku utvrđivanja uzroka nastanka otkaza. Za određene otkaze neophodno je provesti sve faze, a za neke je dovoljno djelomično, jer ćemo imati dovoljno informacija o nastanku otkaza. Posebno je značajan pismeni izvještaj, kao i preporuke za daljnji rad. Ovaj rad je rezultat učešća autora u utvrđivanju uzroka nastanka mnogih otkaza, kao i dobrih praksa koje se primjenjuju u razvijenim tehnološkim sredinama. Rezultati i preporuke mogu poslužiti inženjerima kao dobar putokaz u radu.

### **6. LITERATURA**

- [1] Imamović M.: Teorija pouzdanosti. IPI Zenica, 2010.
- [2] Faber M.H.: Risk and Safety in Engineering, ETH Zürich, 2009.
- [3] Vujanović N.: Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Vojno izdavački i novinski centar Beograd, 1987.