

ZNAČAJ MAKROFRAKTOGRAFIJE KAO DIJAGNOSTIČKE METODE U ODRŽAVANJU INDUSTRIJSKIH OBJEKATA

MACROFRACTOGRAPHY AND ITS IMPORTANCE AS DIAGNOSTIC METHOD IN INDUSTRIAL MAINTENANCE

Prof. dr Vera Šijački Žeravčić¹, doc. dr Biljana Andelić²,
mr Gordana Bakić¹, mr Miloš Đukić¹

¹Mašinski fakultet, Beograd, 27. marta 80, ²Tehnički fakultet, Čačak, Svetog Save 65,

Rezime

U radu je prikazan značaj makrofraktografije kao dijagnostičke metode u održavanju industrijskih objekata. Istaknuta je neophodnost saznanja uzroka razaranja/loma bilo koje strukture kao neželjenog događaja sa različitim, brojnim posledicama. Dat je pregled klasifikacije lomova i njihove osobnosti, kao i faze same makroskopske fraktografije.

Abstract

Importance of macrofractography as a diagnostic method in industrial maintenance is presented in this paper. The necessity of failure/fracture causes determination as a unplanned event with numerous different consequences is also emphasised. Short review of fracture classifications, their characteristics, as well as the macrofractography phases are shown, too

1. UVOD

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 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.

Međutim, čak i kada se uzroci razaranja i ponašanje materijala u uslovima eksploatacije mogu da znaju, merama preventivnog održavanja teško je obezbediti da ne dođe do razaranja. Uobičajeni uzroci razaranja/loma su, pre svega, korelisani sa: neodgovarajućim izborom materijala, neodgovarajućim kvalitetom dobro izabranog materijala, neodgovarajućim projektovanjem neke komponente ili njenom neadekvatnom primenom.

Metode ispitivanja materijala, koji je pretrpeo razaranje/lom, su mnogobrojne, ali jedna od retkih, koja istovremeno daje odgovor i o uzrocima i o mehanizmima narušavanja njegovog kontinuiteta, je fraktografija. Fraktografske metode ispitivanja na makro- i mikro- nivou podrazumevaju nalaženje veze između

građe metala i loma u uslovima deformacije i razaranja, kao i veze između karakteristika prelomne površine i metalografske strukture metala. Oba pristupa se međusobno dopunjavaju i omogućavaju da se pomoću fraktografije spoznaju nepoznanice koje se odnose na utvrđivanje karaktera i uzroka razaranja tokom eksploatacije. Namera u ovom radu je bila da se makrofraktografska metoda predstavi kao dijagnostička metoda, čiji rezultati mogu da budu neophodni u planiranju održavanja bilo kog industrijskog postrojenja.

2. KLASIFIKACIJA LOMOVA I NJIHOVE OSOBENOSTI

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 (1-7). 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. U tabeli 1 je dat pregled najvažnijih i najčešćih klasifikacija lomova.

Tabela 1: Osnovne klasifikacije lomova

Aspekt klasifikacije lomova:	<i>Izgled – Vrsta – Karakteristična osobenost loma</i>			
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				
Lom usled termičkog 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 ($A = 5 \dots 20J$)		Žilav ($A > 20J$)

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. Primenjeni napon može da bude inače statičkog ili dinamičkog karaktera, a po smeru dejstva: zatezni, pritiski, 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.

3. MAKROSKOPSKA FRAKTOGRAFIJA

Makroskopski pregled i utvrđivanje makro-karakteristika 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 koncentratorne 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 povećanja 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 razaranje 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.

Orijentacija prelomne površine je u tesnoj vezi sa karakterom opterećenja, naponskim stanjem i normalnim i tangencijalnim naponima koji dovode do razaranja. U tabeli 2 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 makrokrtom 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.

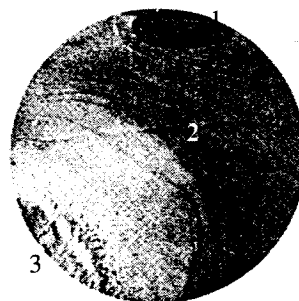
Procena postojanja oblasti sa različitim *makrogeometrijskim izgledom* u okviru jedne prelomne površine, u cilju određivanja makrogeometrijskih karakteristika loma, zauzima značajno mesto u makrofraktografskoj analizi, tabela 1. Homogena makrogeometrija se odnosi na one prelomne površine koje se u celosti 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.

Tabela 2: 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					

Nehomogenost makrogeometrije prelomne površine je veoma upečatljiva kod zamornih lomova, Sl.1. - uobičajeno su prisutne tri osnovne oblasti, oblast inicijacije prsline ("izvor"), oblast širenja (propagacije) prsline i oblast završnog loma ("doloma"), (1-7). 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 prsline 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 1. Karakteristični izgled zamornog 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 krtog, 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.

4. 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. Makrofraktografska 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 uključaka. Makro- i mikrofraktografskim 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. UMESTO ZAKLJUČKA

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 "zalag 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. Kada se dobijeni zaključci implementiraju na pravi način, kroz projektovanje novih struktura i preventivno održavanje postojećih na takav način da se maksimalno smanje mogućnosti za pojavu loma, onda se dobija puni doprinos ove, kod nas unekoliko zanemarene, metode.

6. LITERATURA:

- [1] Metals Handbook, Vo.19, "Fractography and Atlas of Fractography", American Society for Metals, 1974
- [2] Liebowitz H.: "Fracture", Academic Press, New York, 1968
- [3] Vladimirov V.I.: "Fizičeskaja priroda razrušenija metalov", Metalurgija, Moskva, 1984
- [4] Broek D.: "Some Contribution of Electron Fractography to the Theory of Fracture", Internat. Met. Revs., (1974), pp. 135-182
- [5] Larson F.R., Caron F.L.: "How Failure Occure, Topography of Fracture Surfaces", Metal Progr., Vol.85, (1964), pp. 74-78
- [6] Pusch G., Wagner I.: "Mikrofraktografische Bruchflacheuntersuchungen", Neue Hutte, Vol.22, N°7, (1977), pp. 398
- [7] Barralis M.: "Mechanismes des "Different Modes de Rupture: Criteres Principaux", Rev. Prat. Contr. Ind., Vol.18, N°97, (1979), pp. 29-30