

UDK: 539.42:620.184:693.8(047)=861
COSATI: 20-12, 14-02, 11-06

Značaj fraktografskih ispitivanja u projektovanju metalnih delova i konstrukcija

Ivo Blačić, dipl.inž.¹⁾
Dr Vencislav Grabulov, dipl.inž.¹⁾

Prikazana je primena fraktografskih ispitivanja u projektovanju metalnih delova i konstrukcija, kao i u kontroli kvaliteta materijala. Prikazane su osnovne karakteristike izgleda loma pri makrofraktografskom, mikrofraktografskom i metalografskom pregledu, kao i njihovo korišćenje pri utvrđivanju mesta nastanka loma, date su preporuke za rukovanje, rezanje, čišćenje, čuvanje i otvaranje prelomnih površina.

Ključne reči: Mehanika loma, analiza oštećenja, analiza loma, fraktografska ispitivanja, metalni materijali, čelici.

Uvod

OŠTEĆENJE metalnih delova i konstrukcija odvija se preko jednog ili više mehanizama, u koje spadaju oštećenja površine (npr. korozija i habanje), distorzija (elastična i plastična) i lom. Lom predstavlja kompleksnu pojavu na koju utiče veliki broj faktora:

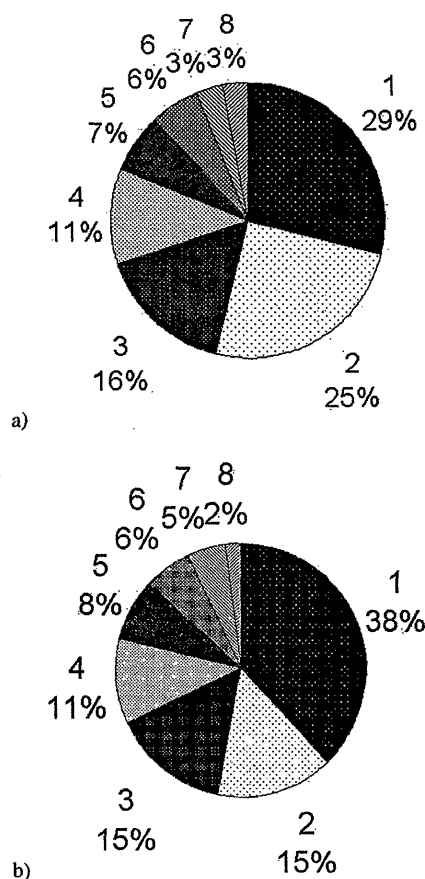
- radni uslovi – mehanički naponi, temperatura, radna sredina;
- oblik i dimenzije dela i konstrukcije;
- struktura metala – makroskopska i mikroskopska i njegova odgovarajuća svojstva i
- kvalitet površine.

Navedeni faktori utiču i na izgled površine loma pa je, samim tim, površina loma nosilac informacije o tim faktorima [1]. Proučavanjem karakteristika izgleda površine loma bavi se fraktografija, koja je kao naučna disciplina definisana 1944. god, mada su iskustva sa tog područja znatno starija. Fraktografska ispitivanja su našla primenu u analizi oštećenja (otkaza) metalne konstrukcije ili njenog dela, koje je izazvalo gubitak njihove radne sposobnosti, kao i u redovnoj kontroli kvaliteta materijala.

Zastupljenost tipova oštećenja

Zastupljenost tipova oštećenja varira zavisno od oblasti primene metalnog dela ili konstrukcije. Pored toga, statistički podaci se iskazuju uz korišćenje različitih klasifikacija oštećenja tako da su u literaturi prisutni različiti statistički podaci o zastupljenosti pojedinih tipova oštećenja. Rezultati jedne od takvih analiza zastupljenosti oštećenja kao i uzroka oštećenja su prikazani na sl. 1.

Jedan od glavnih uzroka oštećenja pre predviđenog veka trajanja je nepravilan izbor materijala. Pravilan izbor materijala zahteva multidisciplinarni pristup konstruktora i metalurga. Metalurzi su, po pravilu, manje upoznati sa eksploatacionim uslovima, a konstruktori sa strukturom metalnih materijala i njihovim odgovarajućim svojstvima.

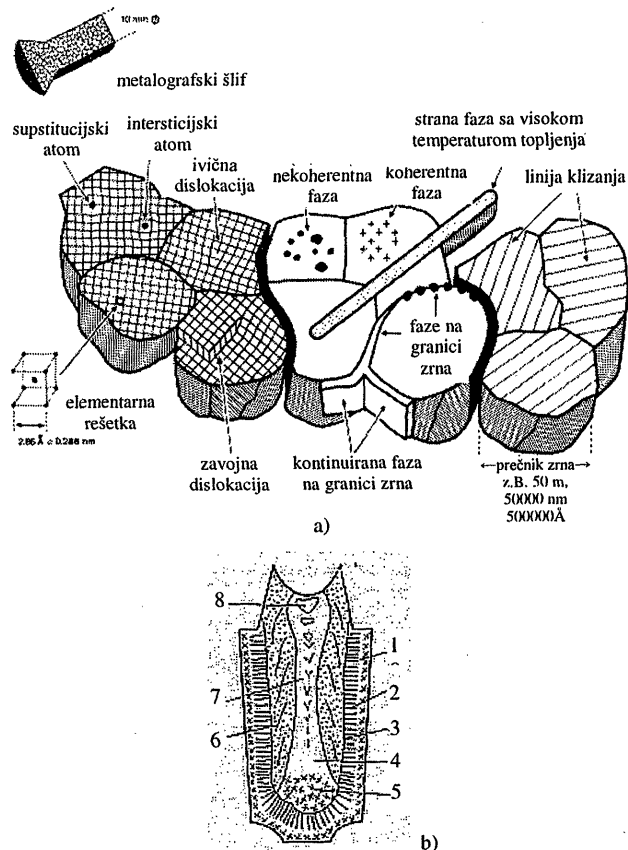


Slika 1. Učestalost pojedinih tipova oštećenja i uzroka nastanka oštećenja: a) 1- korozija, 2- zamor, 3- krti lom, 4- preopterećenje, 5- visokotemperaturna korozija, 6- naponska korozija, korozioni zamor, vodonična krtost, 7- puzanje, 8- habanje, abrazija, erozija; b) 1- nepravilan izbor materijala, 2- fabričke greške, 3-greške u termičkoj obradi, 4- greške u mehaničkom projektovanju, 5-nepredviđeni radni uslovi, 6- neadekvatna kontrola radne sredine, 7- neprikladna (ili odsustvo) kontrola kvaliteta, 8- materijal mešovito

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Mikrostruktura i makrostruktura metalnih materijala

Mikrostruktura i makrostruktura metalnih materijala nije homogena, pa samim tim i svojstva metalnih materijala, uključujući i otpornost ka lomu, nisu izotropna. Šematizovani izgled mikrostrukture metalnih materijala, koja učestvuje u procesima loma, prikazan je na sl.2a [2,3].



Slika 2. Šematizovani prikaz mikroskopske (a) i makroskopske (b) strukture metalnih materijala:

Makroskopske nehomogenosti u ingotu: 1- zona malih ravnosnih kristala, 2- zona stubastih kristala, 3- prelazna zona ravnosnih kristala, 4- zona krupnih ravnosnih kristala, 5- konus taloženja, 6- Λ segregacija, 7- zona poroznosti i V segregacija, 8- luncker

Makroskopska nehomogenost metalnih materijala određena je, pre svega, ali ne isključivo, procesima očvršćavanja metalnih materijala. Kao primer ove nehomogenosti prikazana je na sl.2b makroskopska građa ingota od čelika [4]. Naknadni tehnološki postupci plastične obrade, termičke obrade, mašinske obrade, spajanja zavarivanjem itd. menjaju kvalitativno i kvantitativno makrostrukturu metalnih materijala i u nekim slučajevima su izvor dodatnih nehomogenosti u makrostrukturi i svojstvima metalnih materijala. U praksi projektovanja i izrade metalnih delova, prisustvu makronehomogenosti i mikronehomogenosti u strukturi često se ne poklanja dovoljna pažnja, pa je nehomogenost čest uzrok pojave loma metalnih delova i konstrukcija. Takođe, poznavanje nehomogenosti u mikrostrukturi i makrostrukturi metalnih materijala nužno je pri fraktografskim ispitivanjima, jer navedene nehomogenosti u interakciji sa drugim uticajnim faktorima određuju mehanizam i izgled loma.

Primena fraktografskih ispitivanja prilikom analize oštećenja

Fraktografska ispitivanja su najznačajniju primenu našla u analizi oštećenja metalnih delova i konstrukcija. Analiza

oštećenja sastoji se iz više aktivnosti i metoda ispitivanja, koje mogu varirati zavisno od prirode oštećenja, ali zajedničke su sledeće etape:

- prikupljanje osnovnih podataka o radnim uslovima, tehnologiji izrade, montaže itd.;
- preliminarni vizuelni pregled oštećenog dela sa fotografisanjem;
- nedestruktivna ispitivanja;
- metalurška ispitivanja;
- mehanička ispitivanja uključujući ispitivanja mehanike loma;
- fraktografska ispitivanja – makro i mikro;
- hemijska analiza (dela materijala, lokalna, korozionih produkata, prevlaka itd.);
- određivanje mehanizma oštećenja;
- analiza napona;
- ispitivanja u simuliranim uslovima i
- analiza rezultata, formulisanje zaključaka sa davanjem preporuka.

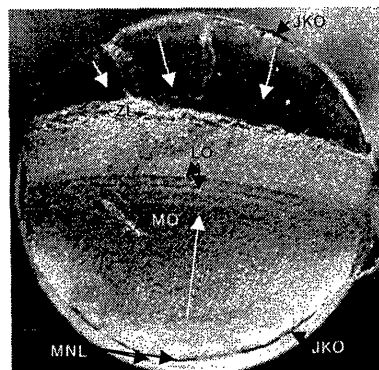
Fraktografska ispitivanja su obavezna, a često predstavljaju dominantnu i temeljnu aktivnost u analizi loma metalnih delova i konstrukcija.

Fraktografski pregled

Pregled izgleda loma obavlja se pri uvećanjima do 50x – makrofraktografija i uvećanjima iznad 50x – mikrofraktografija. Makrofraktografski pregled obuhvata pregled golim okom, ručnim lupama, stereomikroskopom, optičkim mikroskopom ili skening elektronskim mikroskopom (SEM), a mikrofraktografski obuhvata pregled optičkim mikroskopom (OM), transmissionim elektronskim mikroskopom (TEM) i prevashodno skening elektronskim mikroskopom (SEM).

Makrofraktografski pregled

Makrofraktografski pregled predstavlja kamen temeljac analize loma. Cilj makroskopskog pregleda je određivanje svih faza loma i njihovog redosleda, pravca prostiranja prsline i lociranje mesta nastanka loma, procenjivanje tipa loma sa makroskopskog stanovišta – duktilan, krt, zamorni, puzanje itd., procena nivoa napona – nizak, srednji, visok, vrstu opterećenja – zatezanje, pritisak, savijanje, uvijanje itd. (sl.3). Makrofraktografski pregled obavlja se obično u dve faze: preliminarni pregled na mestu loma i u laboratoriji. Preliminarni pregled izvodi se na polomljenom delu u zatečenom stanju, bez prethodnog čišćenja površine, golim

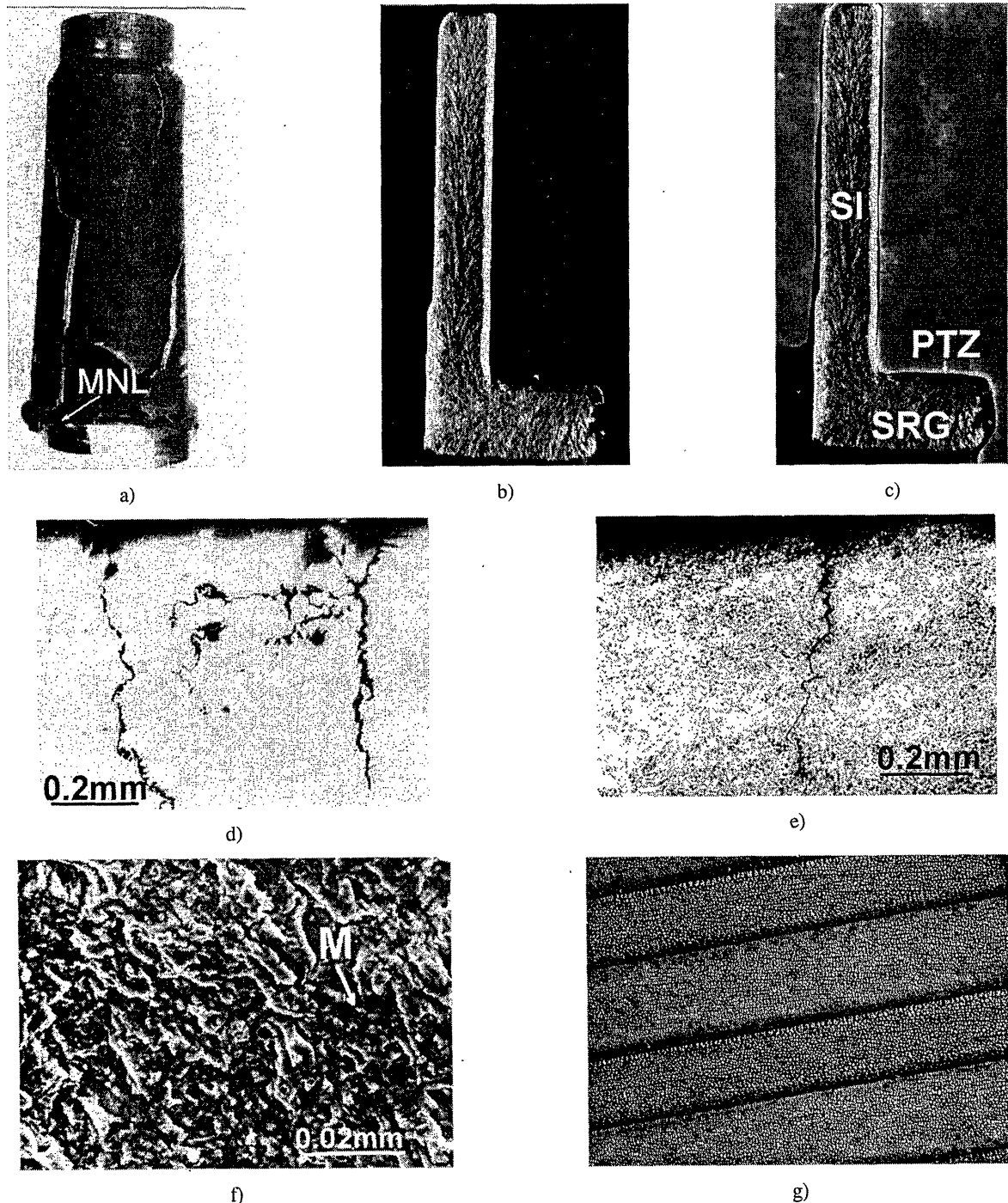


Slika 3. Zamorni lom osovine, naizmenično savijanje, nivo napona nizak, lom nastao u području kružne prskotine na prevlaci (nerdjajući čelik) i osnovnom materijalu (ugljenični čelik), prskotina u osnovnom materijalu je jače korodirana (JKO). Lom se prostirao zamornim mehanizmom (linije odmora LO). Pravac prostiranja prskotina je dat belim strelicama do oblasti završetka loma (ZL). Mesto nastanka loma je označeno sa (MNL), a mehaničko oštećenje sa (MO) (1/16x)

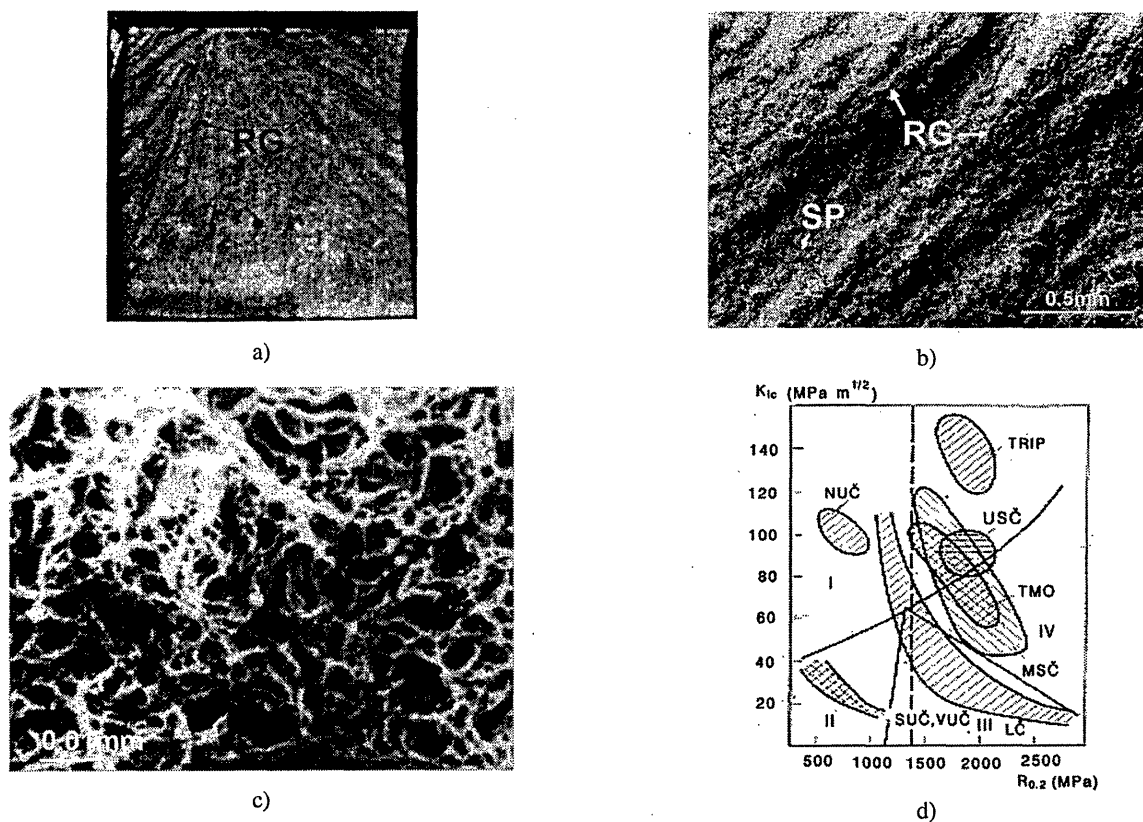
okom ili ručnom lupom. Regstruju se površine sa karakterističnim izgledom, prisustvo plastične deformacije uz površinu loma, npr. smanjenje poprečnog preseka, promene boje, prisustvo nečistoća i zemlje, prisustvo prslina i njihov raspored na drugim površinama itd., pogodnim postupkom meri se dužina primarne prsline, vrši pogodno obeležavanje i fotografisanje. Makrofraktografski pregled u laboratoriji izvodi se golim okom, ručnom lupom, stereomikroskopom, ređe optičkim ili skening mikroskopom. Laboratorija pruža više uslova za fraktografski pregled i fotografisanje, jer se mogu menjati uslovi osvetljenja, podloga itd. i pregled je detaljniji. Primer uticaja podloge na uočljivost mesta nastanka loma prikazan je na sl.4b i c. Prsline termičkog

zamora, sa nanosima od sagorevanja baruta crne boje, uočljivija je na svetloj podlozi.

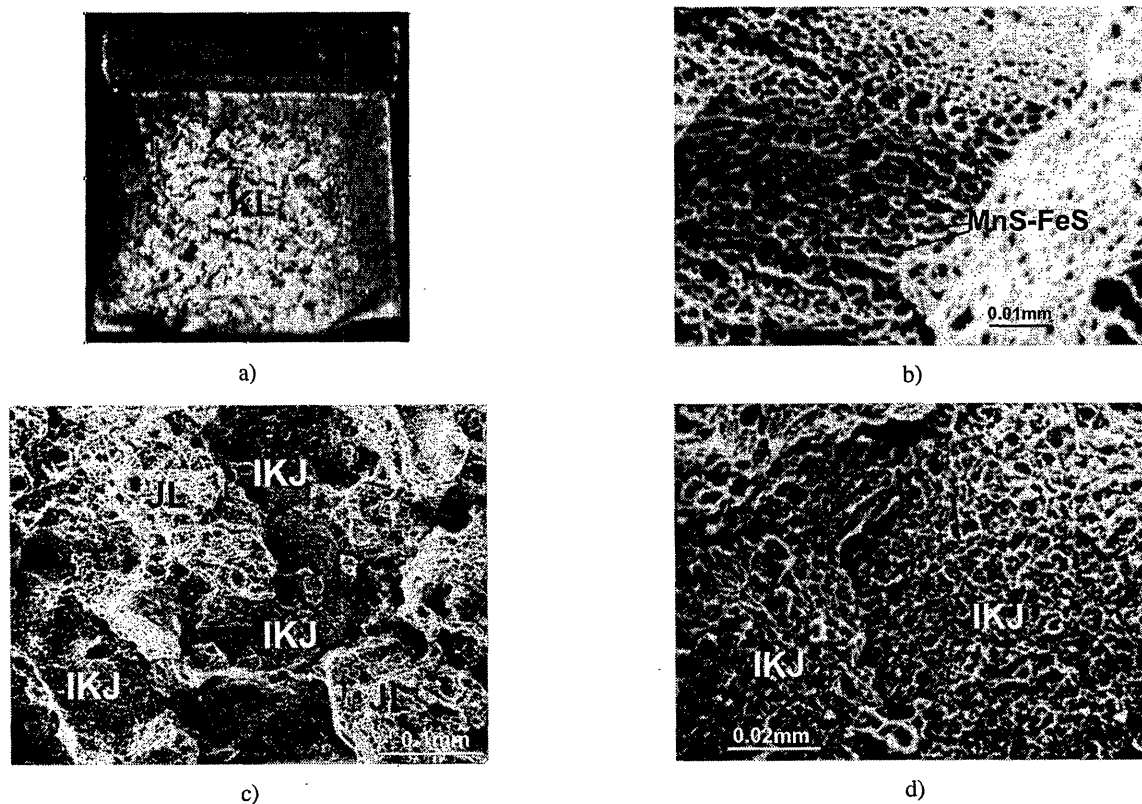
Makroskopske karakteristike izgleda loma su mnogobrojne. Neke od njih, koje se koriste u oceni tipa loma i mehanizma loma, date su u tabeli 1 [1], a neki od primera na sl.4a,b; 5a,b; 6a; 7a; 8a,b; 9a. Pojmovi sjajan, kristaličan, zrnovit, gruba tekstura, ravan (ravno stanje deformacije), koriste se da označe obično makroskopski krt lom, a pojmovi mat (siv), vlaknast, kos (ravno stanje napona), označavaju obično makroskopski duktilan (žilav) lom. Pri ocenjivanju tipa loma, treba koristiti više navedenih kriterijuma. Oba loma, krt (sl.4a) i duktilan (sl.5a), su mat i imaju veća područja ravnog loma. Dodatni kriterijumi za pod-



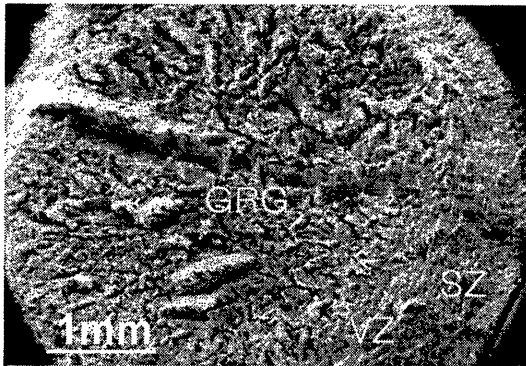
Slika 4. a) Lom komore orudja Č.5481. b) i c) makroizgled iz područja nastanka prsline sa različitim uslovima snimanja; d) prsline od termičkog zamora sa poprečnim povezivanjem (polirani šlif); e) interkristalni karakter prostiranja prskotine termičkog zamora (nagriženo u nitalu); f) transkristalni mikromehanizam prostiranja zamorne prskotine na epruveti za K_{Ic} ($\Delta K < 0.67K_{Ic}$). Ostaci tragova mastila-crno (M) posle pranja; g) izgled unutrašnje površine cevi art. orudja (endoskop)



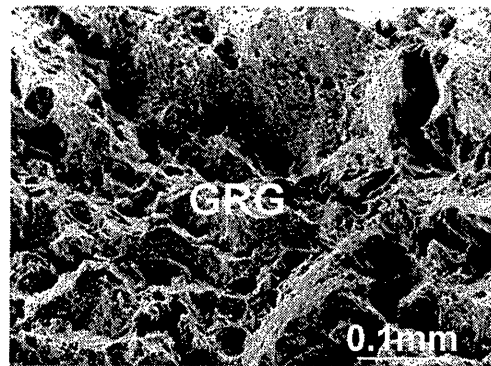
Slika 6. Makro i mikroskopski izgled krtog loma sa finim radijalnim grebenima nastao pri statičkom savijanju epruvete sa V zarezom, čelik 0.35C-2Ni-Mo-V pretopljen pod troskom, kaljeno stanje HRc 52: a) makroskopski izgled, fini radijalni grebeni koji započinju neposredno uz zarez, b) makroskopski izgled radijalnih grebena, prisutna sekundarna prslina, c) mikroskopski izgled, mešoviti tip loma-niskoenergetski jamičasti i "kvazicepanje", d) dijagram konstrukcione čvrstoće (NUČ, SUČ, VUČ - nisko, srednje i visokouglenični čelici, MSČ - martenzitno stari čelici, USČ - ultrasitnozrni čelici, TMO - termomehanička obrada, LC- legirani čelici; I- koalescencija mikrošupljina, II- cepanje, III- interkristalni krti lom, IV- "kvazicepanje"), RG- radijalni grebeni, SP- sekundarna prslina



Slika 7. Izgled krtog-kamenog loma usled pojave pregrevanja čelika: a) makroskopski izgled kamenog loma kod epruvete za energiju udara iz otkovka od čelika 0.18C-2Cr-4Ni-Mo u niskopopuštanom stanju HRc 38, b) mikroskopski izgled loma sa slike pod a; kameni lom-interkristalni jamičasti lom nastao po granicama zrna austenita u toku kovanja, pri čemu je došlo do izdvajanja sulfida MnS-FeS, c) interkristalni jamičasti lom i jamičasti lom kod epruvete za energiju udara od Č. 57302-T popuštenog na 300 °C, d) uvećani interkristalni jamičasti lom sa slike pod c., priroda faza na granici zrna nije mogla biti utvrđena EDS-analizom

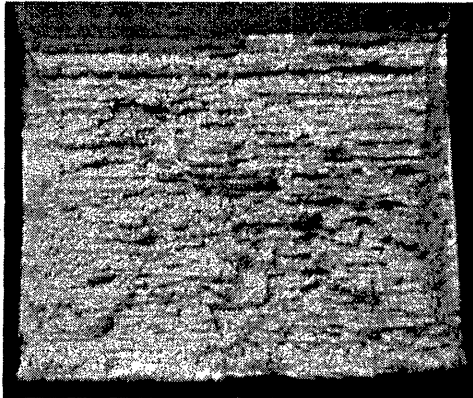


a)



b)

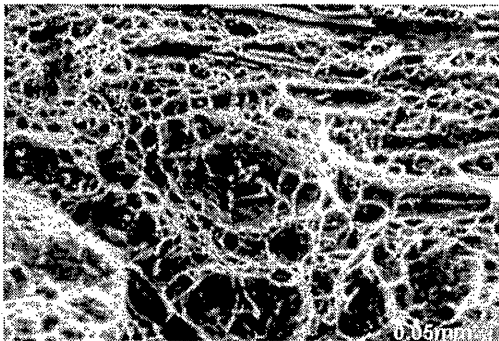
Slika 8. Lom jonski nitrirane epruvete u uzdužnom pravcu od čelika 0.18C-2Cr-4Ni-Mo: a) lom je nastao pucanjem nitriranog sloja pri 0.8 $R_{0.2}$ pri čemu se epruveta dalje ponašala kao epruveta sa koncentраторom napreznja; mesto nastanka loma u području vlaknaste zone (VZ) da bi prslina prešla u nestabilan rast-zona grubih radijalnih grebena (GRG); b) mikroskopski izgled grubih radijalnih grebena (GRG)



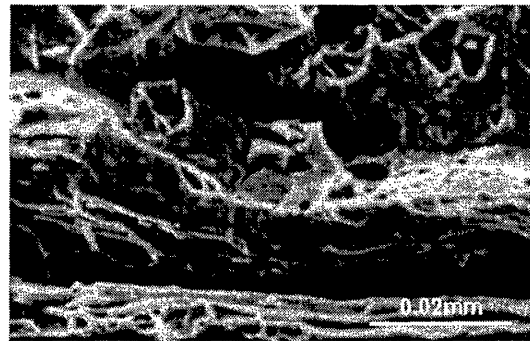
a)



b)



c)

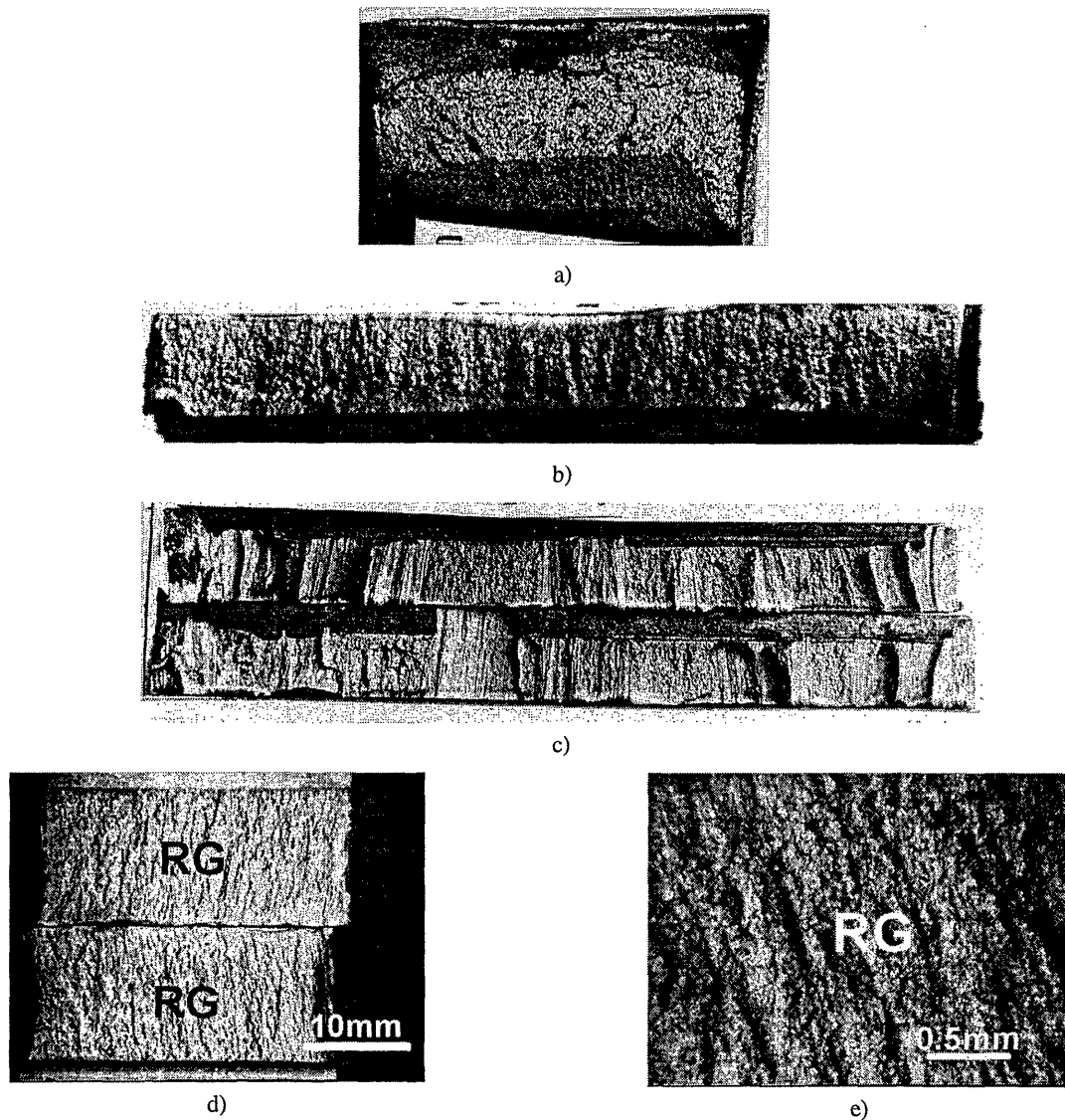


d)

Slika 9. Izgled "drvenog" loma kod poprečne epruvete za energiju udara valjane gređice od čelika 0.18C-2Cr-4Ni-Mo, niskopopušteno stanje HRC 38, poprečni pravac, energija širenja 10J: a) makroskopski izgled "drvenog" loma; b) opšti izgled loma sa grebenima normalnim na pravac prostiranja prsline, a koji se prostiru u pravcu plastične deformacije; c) plitke, niskoenergetske jamice oko niza globularnih oksida i izduženih uključaka, sa prisutnim površinama "kvazicepanja" na dnu grebena; d) ravne površine sa tragovima plastične deformacije, tzv. "duktilno cepanje", prisutne jamice čupanja

Pored uobičajenih izgleda loma u praksi se sreću i slučajevi gde izrazita nehomogenost u strukturi i anizotropija u svojstvima metalnog materijala menjaju navedene makroskopske izgleda loma. Prisustvo grebena normalnih na generalni pravac prostiranja prsline, a u potpunosti u pravcu prostiranja vlakana, odnosno odstupanje od zaobljenog fronta prostiranja prsline, koji je posledica tzv. tunelskog efekta pri prostiranju prsline [1], ukazuje da je uticaj makrostrukture na prostiranje prsline izrazit, sl.8a,b. Lom raz-

dvajanjem na sl.10e takode je posledica izrazite anizotropije svojstava prouzrokovane hladnom deformacijom bešavne cevi postupkom rotacionog valjanja. Iskustva sa područja makroskopskog izgleda loma i njegove zavisnosti od makronehomogenosti strukture, iskorišćena su kod redovne kontrole kvaliteta materijala otkovaka od poboljšanih čelika, sl.9. Makrofraktoografska ispitivanja, uzimajući u obzir kriterijume kristalčnosti, vlaknatosti itd., koriste se za ocenju nužnosti dodatnih ispitivanja energije udara na sniženim temperaturama, sl.9d,e.



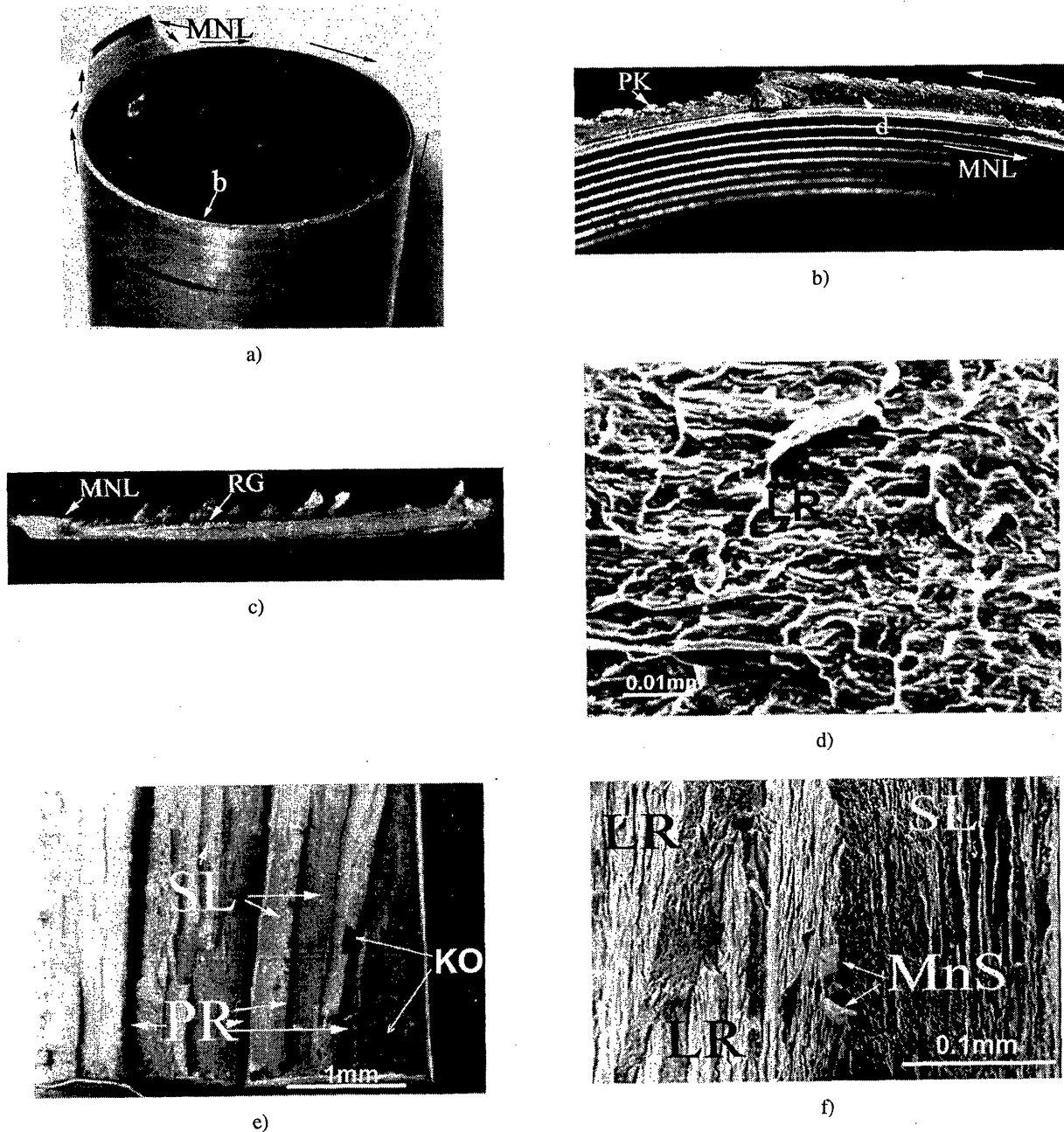
Slika 10. Deo skale za ocenu makroloma otkovaka: a) kriterijum kristaličnosti, b) kriterijum vlaknatosti, c) "drveni" lom usled izrazitog prisustva segregacija, d) izgled loma iz redovne kontrole poboljšanog otkovka od čelika Č. 57302-T sa prisutnim radijalnim grebenima (RG), kod koga je nužno ispitivanje energije udara na sniženim temperaturama, e) uvećan izgled radijalnih grebena (RG) sa slike pod d, kristaličnost se mogla uočiti tek pri većim povećanjima na stereomikroskopu

Lociranje mesta nastanka loma primarni je cilj fraktografije i od vitalnog je značaja za uspešnu analizu loma. U pronalaženju mesta nastanka loma koristi se topografski izgled površine loma i promene boje. Površine sa promenjenom bojom najčešće odgovaraju ranije postojećim prslinama, koje su bile korodirane, oksidisane ili imaju nanose, sl.3, 11c. Topografske karakteristike koje se koriste u lociranju mesta nastanka prsline su: skup radijalnih grebena, sl.11c., streličast izgled (radijalni grebeni na površini loma sa velikim odnosom dužine i širine) sl.11c. i ređe vlaknasta zona - normalni grebeni koji opkoljavaju mesta nastanka loma, sl.7a. Kos lom (smicajne usne, područje ravnog stanja napona) nije prisutan na mestu nastanka prsline locirane na površini, što je slučaj kod zamora, naponske korozije itd. Linije odmora kod zamornog loma (sl.12a) predstavljaju front prsline i opkoljavaju mesta nastanka loma. Linije zadržavanja kod naponske korozije imaju izgled sličan linijama odmora kod zamora, o čemu treba voditi računa za vreme analize loma (sl.12a). Uopšteno, mehaničko ciklično opterećenje formira jednu prslinu, dok su kod korozionog zamora i naponske korozije prisutne dodatne nezavisne prsline na površini dela, udaljene od glavne prsline. Pored vi-

zuelnog pregleda, za otkrivanje dodatnih prsline koriste se i nedestruktivna ispitivanja, npr. penetranti ili raniji rezultati nedestruktivnih ispitivanja (npr. iz periodične kontrole).

Prisustvo otvrdnutih površinskih slojeva - cementirani, nitrirani, indukciono kaljeni ili prevlaka koje izazivaju krtost površinskih slojeva - prouzrokuje promene u izgledu loma i rasporedu zona. Prisustvo elektrolitičke prevlake hroma kod glavčine prikazane na sl.15a, prouzrokovalo je vodoničnu krtost u površinskom sloju osovine, što je dalje izazvalo promenu u rasporedu zona kosog i ravnog loma. Umesto uobičajenog rasporeda, zona kosog loma uz spoljašnje površine, a zona ravnog loma u sredini, zona kosog loma se nalazila u sredini i zone ravnog loma uz spoljašnju površinu. Mesto nastanka loma je locirano na osnovu radijalnih grebena koji su u potpunosti bili pomereni na površinu, odnosno vrh grebena se nalazio u samoj prevlaci hroma, gde je ujedno bila i najveća brzina prostranja prsline (sl.15b).

Promene debljine poprečnog preseka ili prisustva koncentratora napona izazivaju promene u izgledu loma, npr. pojavu reverzibilnog streličastog izgleda i mogu biti uzrok pogrešnog zaključka. Posebno težak slučaj određivanja



Slika 11. Lom komore raketnog motora od Č.4734. (rotaciono valjanje u poboljšanom stanju) i njezine epruvete za energiju udara: a) makroskopski izgled polomljene komore sa pravcem prostiranja prsline (označen strelicama) i mestom nastanka loma (MNL); b i d) promenjen izgled radijalnih grebena usled delovanja koncentratore napreznja (navojna veza) i izrazite anizotropije svojstava materijala (posledica hladne deformacije) koja je uzrokovala razdvajanje ispred fronta prskotine (vidi sl.3.); c) područje nastanka prskotine-žleb preostalog dela navoja, na površini vidljivi tragovi loma razdvajanjem.; e) makroskopski izgled loma sa grebenima u pravcu prostiranja prsline na kojima je prisutan smicajni lom (SL) i prslinama razdvajanja (PR); f) mikroskopski izgled jednog grebena smicanja sa površinom razdvajanja (LR) i površinom smicajnog loma (SL) i uključkom MnS, koji je uticao na pojavu razdvajanja

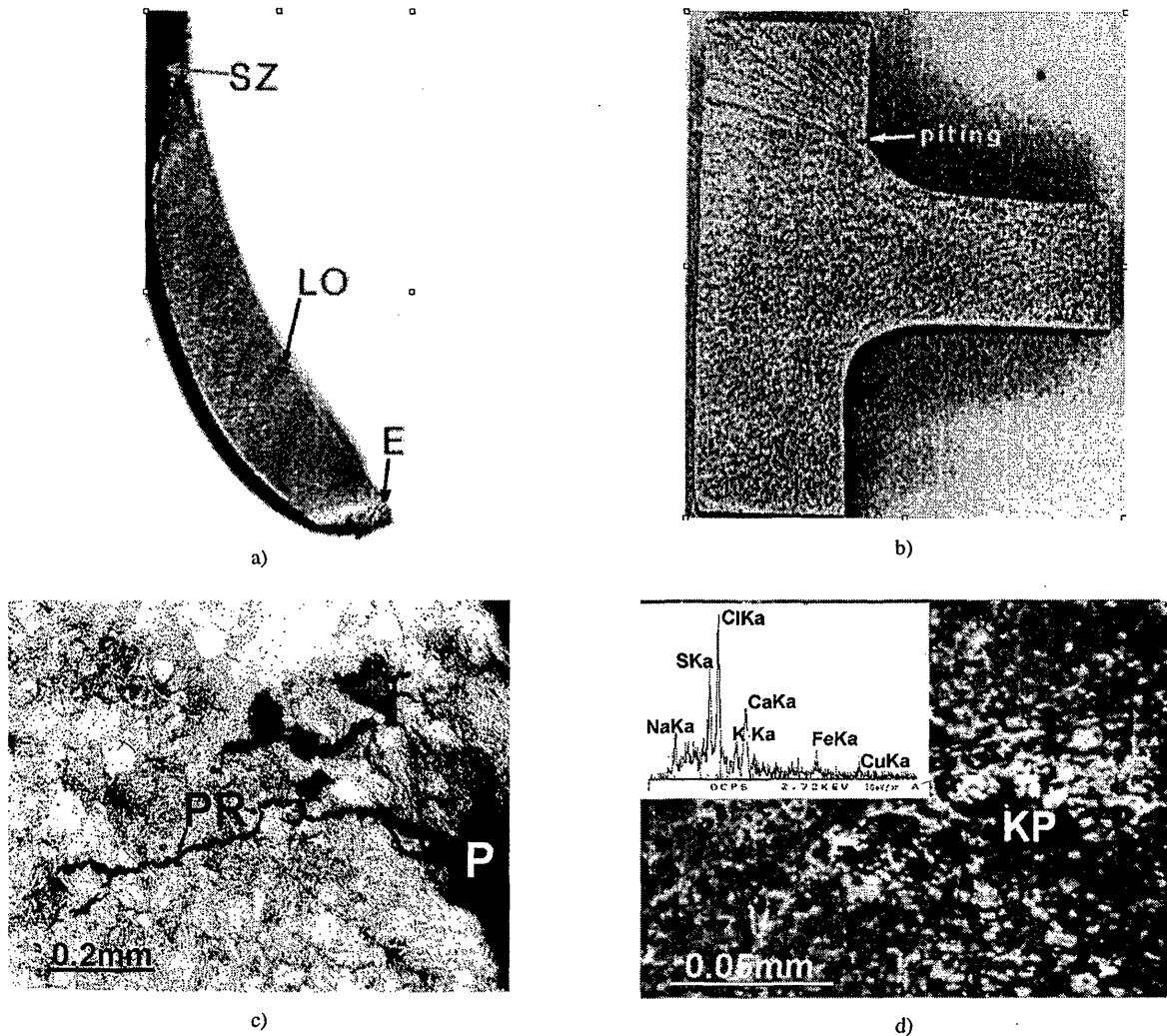
mesta nastanka loma je slučaj loma komore raketnog motora prikazan na sl.10a, b, c. Određivanje mesta nastanka loma u ovom slučaju bilo je otežano malom debljinom zida komore, a time i odsustvom područja ravnog loma, prisustvom navojne veze-koncentratora napona, kao i izrazitom anizotropijom osobine komore uslovljenom korišćenjem hladne deformacije rotacionim valjanjem. Izgled "petlove kreste", sl.10b, od pomoći je kod tankozidnih konstrukcija gde je površina loma kosa, i omogućio je lociranje mesto nastanka loma u području navojne veze komore. Radijalni grebeni koji su se nalazili na površini loma u području navojne veze, sl.10c, nisu se smeli koristiti za lociranje tačnijeg mesta nastanka, kako zbog prisustva koncentratora, tako i zbog usmeravanja prostiranja grebena izrazito nehomogenom makrostrukturom komore. Mesto nastanka loma loci-

rano je na osnovu veličine plastične deformacije – smanjenja debljine zida komore, koja je u tom području najveća.

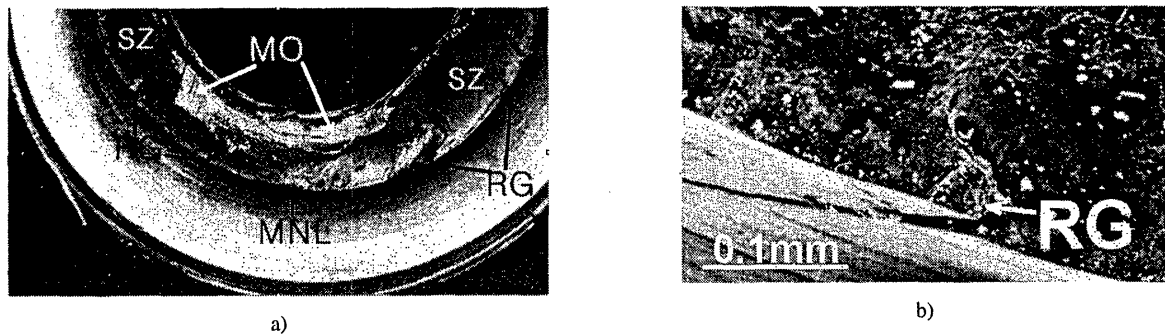
Posle završenog makrofraktografskog pregleda najčešće je potrebno naknadno iseći uzorke sa izabranim mestima za mikroskopski pregled na SEM-u, ili eventualno izraditi replike za pregled na TEM-u i ređe na SEM-u. Takođe, sečenje se primenjuje za izradu metalografskih uzoraka sa presekom kroz prslinu.

Mikrofraktografski pregled

Mikrofraktografski pregled predstavlja nadogradnju na makrofraktografski pregled. Cilj mikrofraktografskog pregleda je utvrđivanje mikromehanizma loma, utvrđivanje veze između mikrostrukture materijala i mikromehanizma



Slika 12. Lom i oštećenja lopatica turbina, lom korozionim zamorom lopatice turbine od čelika 20H13 (E – erozija na mestu nastanka loma usled odvajanja stielne pločice, LO – linije odmora, SZ – smicajna zona); b) pitting na mestu nastanka prskotine, nepovoljan tok vlakana u otkovku; c) prsline (PR) inicirane od pitinga (P), inter i transkristalno prostiranje; d) korozioni produkti (KP) sa prisutnim Cl na lopatici turbine od čelika 20H13



Slika 13. a) Makroprelom dela sa prevlakom hroma. Mehanička oštećenja – sjajno. Maksimalna brzina prostiranja prskotine po površini usled elektrolitičke prevlake hroma i njome izazvane vodonične krtosti (dubine oko 1mm) uslovia je pojavu smicajne zone (SZ) u sredini dela. Mesto nastanka loma (MNL) locirano pomoću radialnih grebena (RG) uz površinu dela; b) promenjen karakter radialnih grebena (RG), na površini loma prisutne nečistoće

loma i utvrđivanje eventualnog prisustvo diskontinuiteta (grešaka) u strukturi metala na mestu nastanka loma ili pri prostiranju prsline.

Mikrofraktofski pregled najpogodnije je izvoditi sa skening elektronskom mikroskopu (SEM) kombinovanim sa analizatorom raspodele intenziteta X-zračenja po energijama (EDS-analiza). SEM sa EDS-analizatorom je potisnuo sa ovog područja druge metode, analizu replika na TEM-u i optičku mikroskopiju, ali ih nije u potpunosti isti-

snuo (vidi sl.6d). SEM sa EDS-analizom nametnuo se u mikrofraktofskim ispitivanjima zbog lake promene povećanja (od 10x do maksimalnog korisnog povećanja 20 000 - 40 000x), velike dubinske oštine (2 mm pri povećanju 10x, 1 μm pri povećanju 10000x), kvalitativne hemijske analize na hrapavoj površini, sa lokalnošću do $\approx 1 \mu\text{m}$, elementa sa atomskim brojem $Z \geq 11$ (standardni detektor) ili $Z \geq 6$ (ECON detektor).

Mikrofraktografske karakteristike izgleda loma su, kao i makrofraktografske, mnogobrojne i neke osnovne su prikazane u tabeli 2 [1].

Tabela 2. Karakteristike izgleda loma i drugih oštećenja

TREKUTNI OBLICI OŠTEĆENJA

DUKILNO PREOPTEREĆENJE

- Mikrošupljine izdužene u pravcu opterećenja
- Jedna prslina bez grananja
- Prisustvo traka klizanja na površini

KRTO PREOPTEREĆENJE

- Cepanje ili interkristalni lom
- Oblast nastanka prsline sadrži greške ili koncentratore naprezanja

PROGRESIVNI OBLICI OŠTEĆENJA

ZAMOR

- Zona propagacije; ima pohaban izgled; ravna; mogu biti prisutne zamorne brazde (strije) pri povećanjima većim od 500x
- Zona preopterećenja može biti duktilna ili krta

KOROZIJA

- Put prostiranja može biti nepravilan, interkristalan, ili sa prisustvom korozivnih produkata na pojedinim fazama
- EDS može pomoći u indentifikaciji korodenaata

HABANJE

- Produkti habanja i/ili abrazije karakterističnog izgleda i sastava
- Kontaktni zamor pri kotrljanju može izgledati slično habanju u ranim stadijumima

PUZANJE

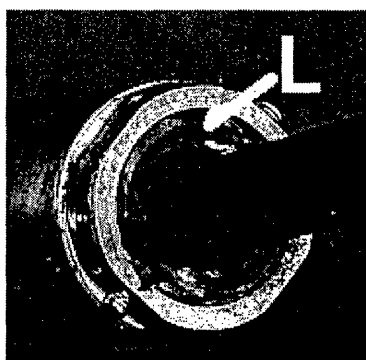
- Višestruke interkristalne prsline sa reakcionim slojem
- Poroznost (kaviteti) na površini zrna

Na mikroskopskom nivou lomovi se prema putu prostiranja prsline mogu podeliti na transkristalne - mirkomeha-

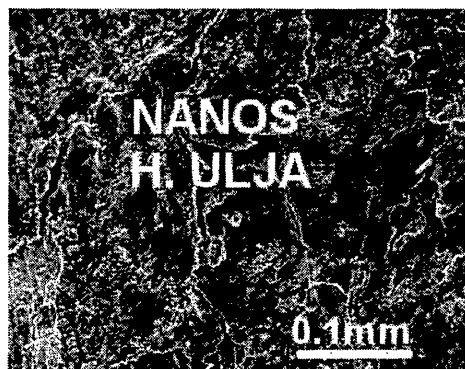
nizmi stvaranja i spajanja mikrošupljina, cepanje i "kvazicepanje" i interkristalni - mirkomehanizmi dekohezije granice zrna i razdvajanje granica mehanizmom koalescencije šupljina, sl.4d; 5c; 6b,c,d; 8c,d; 14d; 18a,b. Prostiranje prsline najčešće se odvija sa dva i, eventualno, više mikromehanizama loma istovremeno, sl.5c; 6c; 7c,d; 14d; 16a; 18a,b. Prisustvo četiri mikromehanizma prostiranja u okviru jednog vidnog polja (sl.18b), posledica je promene mikrostrukture u zavarenom spoju (osnovni materijal, ZUT, metal šava), koja se dešava u relativno maloj zapremini materijala. Upravo zbog ovakvog promenljivog ponašanja materijala, do sada nijedna metoda za određivanje žilavosti loma kod zavarenog spoja nije standardizovana [6].

Orijentaciona područja pojave pojedinih mikromehanizama loma na dijagramu konstrukcione čvrstoće data su na sl. 5d [7]. Dijagrami konstrukcione čvrstoće nam omogućavaju sagledavanje reda veličine kritične dužine prsline $a_{kr} - (K_{Ic} / R_{o,2})^2$. Niske vrednosti žilavosti loma K_{Ic} ili K_{ISSC} u korozionim uslovima ne dozvoljavaju da se visoka vrednost granice razvlačenja, kod čelika ultravisoke čvrstoće, valorizuje kroz visok radni napon u konstrukcijama, jer se dobijaju male kritične veličine prsline, koje se ne mogu pouzdano otkrivati metodama bez razaranja [8].

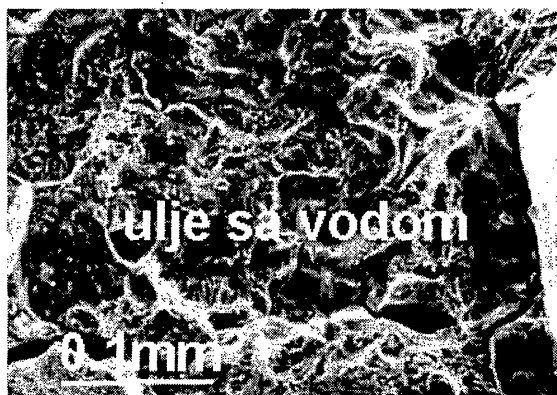
Zamorni lom se na mikroskopskom nivou karakteriše prisustvom zamornih brazdi, koje se javljaju kod pov. c.k. metala (austenitni čelici, Al, Ni itd) i ređe kod prost. c.k. metala (feritni čelici itd.). Put zamorne prsline je normalno transkristalan (sl.11f), ali u prisustvu čestica sekundarnih faza na granici zrna može biti i interkristalan. Kod korozionog zamora i naponske korozije prsline može propagirati transkristalno, interkristalno ili kombinacijom oba mehanizma. Za naponsku koroziju je karakteristično grananje gla-



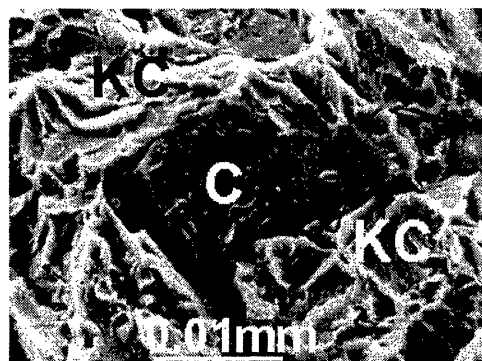
a)



b)

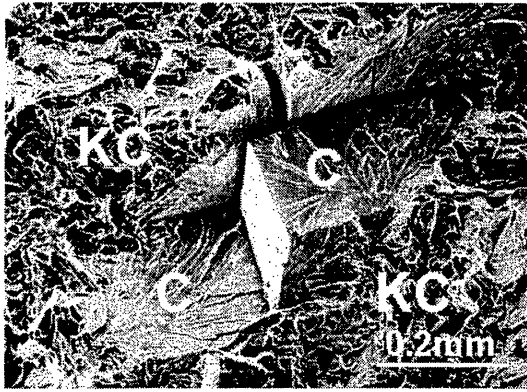


c)

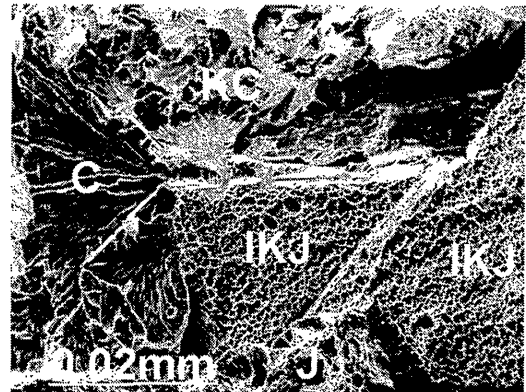


d)

Slika 14. a) i b) lom hidrauličnog klipa (L) sa nanosom ulja; c) lom sa nanosom vode i ulja (komora od čelika Č.4734.poboljšano stanje) i d) mesto bez nanosa ulja i vode (uzorak pod c.) sa mikromehanizmima cepanja (C) i "kvazicepanja" (KC)

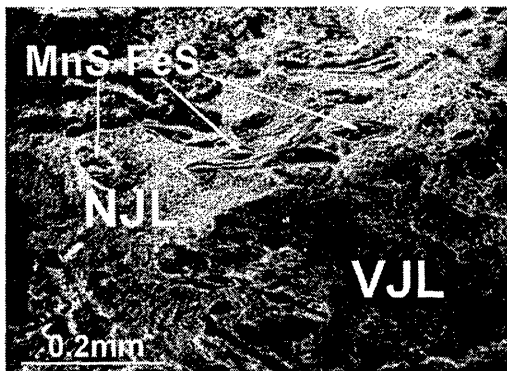


a)

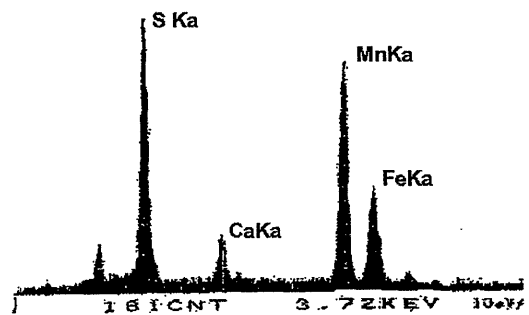


b)

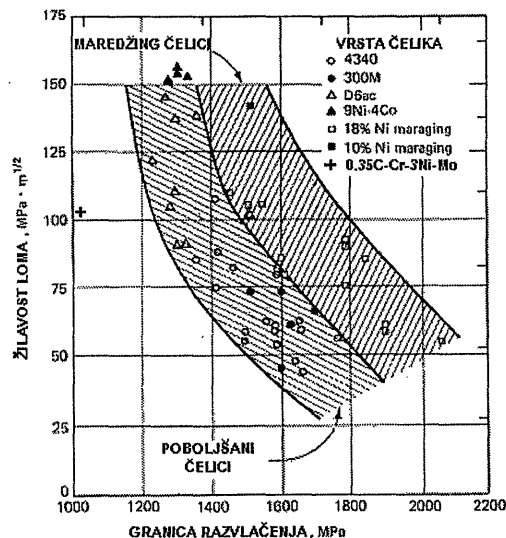
Slika 15. Lom u zavarenom spoju čelika Č.4730: a) kruti lom-prisutni mikromehanizmi cepanja i "kvazicepanja", b) mešoviti tip loma-mikromehanizmi cepanja (C), "kvazicepanja" (KC), jamičastog loma (J), interkristalnog jamičastog loma (IKJ)



a)



b)



c)

Slika 16. Lom na epruveti za K_{Ic} iz područja sa Λ -segregacijom i povećanim sadržajem nemetalnih uključaka MnSFeS (II tipa) kod čelika 0.35C-Cr-3Ni-Mo (sadržaj S-0.014%, Mn-0.46%): a) mikromehanizam loma - kombinacija dva tipa koalescencije šupljina, nisko (plitke jamice) i visokoenergetska (duboke jamice). Oblast niskoenergetskog loma uzrokovana je lokalnim visokim sadržajem sulfida; b) EDS-analiza sulfidnih uključaka; c) položaj čelika u dijagramu konstrukcione čvrstoće (oznaka +)

vne prsline. Korozioni produkti i piting na površini loma su prisutni kod sporog rasta prsline.

Primena EDS-analize u analizi loma je veoma korisna, sl. 16a,b; 12d,e. Gnezda sulfidnih uključaka (sl.16a), čiji je tip uvrđen EDS-analizom (sl.16b), pripadaju području Λ -segregacije u ingotu, sl.2b. Ova gnezda sulfidnih uključaka su nastala i pored sadržaja sumpora u čeliku od 0.014% (tzv. "plemeniti" čelici prema JUS standardu) i uzrokovala

da se navedena šarža čelika nalazi ispod savremenog tehnološkog nivoa u dijagramu konstrukcione čvrstoće, sl.16c.

EDS-analizom korozivnih produkata na površini lopatice parne turbine (sl.11d) utvrđeno je prisustvo hlora, iz čega se može izvesti zaključak da hlorni jon izaziva pojavu pitinga, koji služi kao inicijalno mesto za stvaranje prsline pri naponskoj koroziji i korozionom zamoru.

Metalografski pregled

Metalografski pregled preseka kroz primarnu prslinu, sekundarne prsline ili mesta nastanka prsline, česta je metoda kod fraktografskog pregleda, a kod velikih oštećenja površine loma jedino moguća. Karakteristike izgleda oštećenja pri metalografskom pregledu su date u tabeli 3 [1].

Tabela 3. Karakteristike izgleda loma i drugih oštećenja pri metalografskom pregledu

TREKUTNI OBLICI OŠTEĆENJA

DUKILNO PREOPTEREĆENJE

- Distorzija i tečenje u blizini loma
- Neregularan, transkristalni lom

KRTO PREOPTEREĆENJE

- Očigledna je mala distorzija
- Interkristalan i transkristalan
- Povezanost sa zarezima na površini i unutrašnjim krtim fazama

PROGRESIVNI OBLICI OŠTEĆENJA

ZAMOR

- Zona propagacije: obično transkristalna sa malim prisustvom distorzije
- Zona preopterećenja duktilna ili krta

KOROZIJA

- Opšti ili lokalizovani napad na površinu (piting, prsline)
- Selektivni napad na pojedine faze
- Debljina i morfologija korozionih produkata

HABANJE

- Lokalizovana distorzija na površini u pravcu kretanja
- Identifikacija odgovarajućih čestica

PUZANJE

- Mikrostrukturne promene tipične za pregrevanje
- Višestruke interkristalne prsline
- Šupljine formirane na granici zrna ili prsline klinastog oblika na granici tri zrna
- Reakcioni sloj ili unutrašnja precipitacija
- Niskotemperaturno tečenje u kasnijim etapama

Primeri korišćenja metalografskog pregleda u analizi loma prikazani su na slikama 11d,e i 12 b,c. Metalografskim pregledom isečka sa komore bestrzajnog oruđa utvrđeno je da prsline termičkog zamora imaju interkristalan karakter (sl.11e), kao i da pojava poprečnog povezivanja (sl.11d) može dovesti do odvajanja komadića sa površine komore i njenu eroziju. Drugi primer primene metalografskog pregleda pokazuje kako je zbog nepravilne izrade lopatice turbine došlo do sečenja vlakana formiranih pri kovanju (sl.12b), što je pogodilo pojavi pitinga i inicijaciji prsline korozionog zamora i naponske korozije, sl.12c.

Rukovanje uzorcima loma

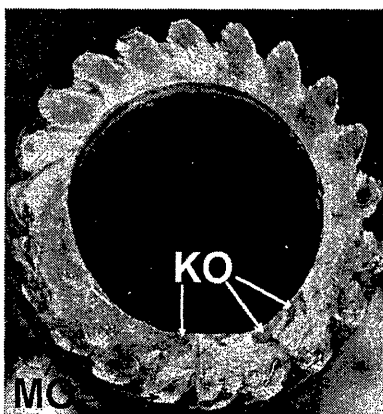
Rezanje, čišćenje, transportovanje, čuvanje uzoraka loma, otvaranje prsline mogu oštetiti površinu loma, a rezanje promeniti i stanje okolnog materijala, čime se analiza otežava ili potpuno onemogućava. Najčešća oštećenja su koroziona, mehanička kao i pojava nanosa, slike 3; 10c; 13a,b; 14a, b, c i 15a. Neke od opštih preporuka za sprečavanje nepoželjnih oštećenja površine loma su:

- plameno rezanje vršiti dovoljno daleko od površine loma i okolne zapremine materijala;
- ostala rezanja obaviti bez rashladne tečnosti;
- odmašćivanje i pranje uzoraka loma obavljati u alkoholu i acetonu, dok organske rastvarače koji sadrže npr. hlorni jon (trihloretilen i dr) treba izbegavati, a pogotovu kada se sumnja na korozione procese u kojima je učestvovao navedeni jon;
- sušenje obavljati kvarcnom lampom ili fenom;
- lomove je najbolje čuvati u eksikatoru ili plastičnim vrećama sa silika gelom, koji su eventualno vakuumirani;
- zaštitu površine loma najbolje je izvesti sredstvom Tectyl 605, dok upotrebu lakova i sličnih sredstava treba izbegavati, jer se teško naknadno uklanjaju;
- otvaranje sekundarnih ili drugih prsline vršiti delovanjem zateznih napona normalnih na površinu loma i ako je potrebno određivanje dužine prsline vršiti termičko bojenje, otvaranje prsline na niskoj temperaturi ili drugi pogodan način za promenu mehanizma loma i razlikovanja područja prsline nastalih pri eksploataciji od područja pri otvaranju i
- izbegavati spajanje površina loma pri pregledu.

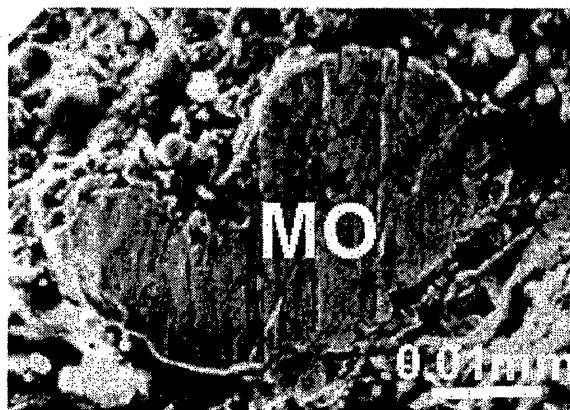
Značajno je istaći da neke od metoda bez razaranja nisu nedestruktivne u odnosu na površinu loma. Tačni penetranti sadrže materije slične onima koje izazivaju naponsku koroziju, pa njihovo prisustvo na površini može dovesti do pogrešnog zaključka. Površinu loma može oštetiti pojava luka na priljubljenim površinama prsline pri ispitivanju metodom magnetskog polja. Takođe, namagnetisane uzorke koji se ispituju na SEM-u pri povećanjima iznad 500x, treba razmagnetisati [5].

Analiza rezultata i zaključci

Završna analiza sa zaključcima treba da sadrži obavezno i preporuke o sprečavanju bilo kakvih oštećenja. Veliki praktični značaj, sa stanovišta sprečavanja eventualnih budućih lomova, imao je lom komore bestrzajnog topa prikazan na sl.10. Komora bestrzajnog oruđa je izuzetno teška za



a)



b)

Slika 17. Lom vratila sa ozubljenjem na kome su prisutna mehanička (MO) i koroziona oštećenja (KO)

projektovanje zbog prisustva barutnih gasova i strogih zahteva u pogledu težine oruđa. O kakvim zahtevima se radi, svedoči podatak da su američki projektanti koristili i legure titana [9]. Projektant navedene komore bestrzajnog topa se opredelio za francusko rešenje [10], koje je podrazumevalo korišćenja čelika Č.5481 (35NCD16) pretopljenog pod troškom u niskopopuštenom stanju sa granicom popuštanja $R_{P0.2} > 1475$ MPa. Visoka čvrstoća zahtevala je primenu vakuumske peći pri kaljenju i korišćenje argona kao rashladnog sredstva. Primenjeno rešenje je zahtevalo osvajanje proizvodnje čelika Č.5481, dok je konstrukcija komore bila originalna uz veoma složen oblik u jednom delu (prisustvo otvora, „lastin rep“ sa spoljne strane i ispust sa unutrašnje strane) zbog mehanizma za okidanje. Samo osvajanje proizvodnje čelika bilo je praćeno pojavom pucanja dela šarži pretapanja pri skladištenju. Komora, u toku poligonskih ispitivanja prototipa i probne partije, nije zadovoljila propisani vek trajanja zbog pojave loma. Detaljna analiza uzroka loma komore nije vršena, već je za lom rutinski okrivljen kvalitet čelika, s obzirom na pojave pucanja pri skladištenju. Pojava loma komore, pri veku trajanja kraćem od propisanog, ponovila se i pri ispitivanju nulte serije. Tada se pristupilo detaljnijoj analizi uzroka loma kombinovanim ispitivanjem na poligonu i naknadnim ispitivanjima hidropriškom uz detaljna fraktografska ispitivanja polomljenih komora. Navedena ispitivanja su bila praćena detaljnim ispitivanjima mehanike loma. Fraktografskim ispitivanjima je utvrđeno da krti lom nastaje na unutrašnjem ispustu kod otvora za mehanizam okidanja (sl.11a). Izvršenim ispitivanjima zaključeno je da je uzrok pojave loma neadekvatan odnos između stanja materijala (niskotemperaturno popuštanje sa niskom žilavošću loma K_{Ic} približno $60 \text{ MPam}^{3/2}$ i nemogućnost uklanjanja makroskopskih zaostalih napona) i primenjene konstrukcije (složen oblik sa prisutnim koncentradorima naprezanja). Predložene korektivne mere - izmena konstrukcije u području ispusta i promena postupka kaljenja sa korišćenjem ulja za hlađenje, povećale su, ali nisu omo-

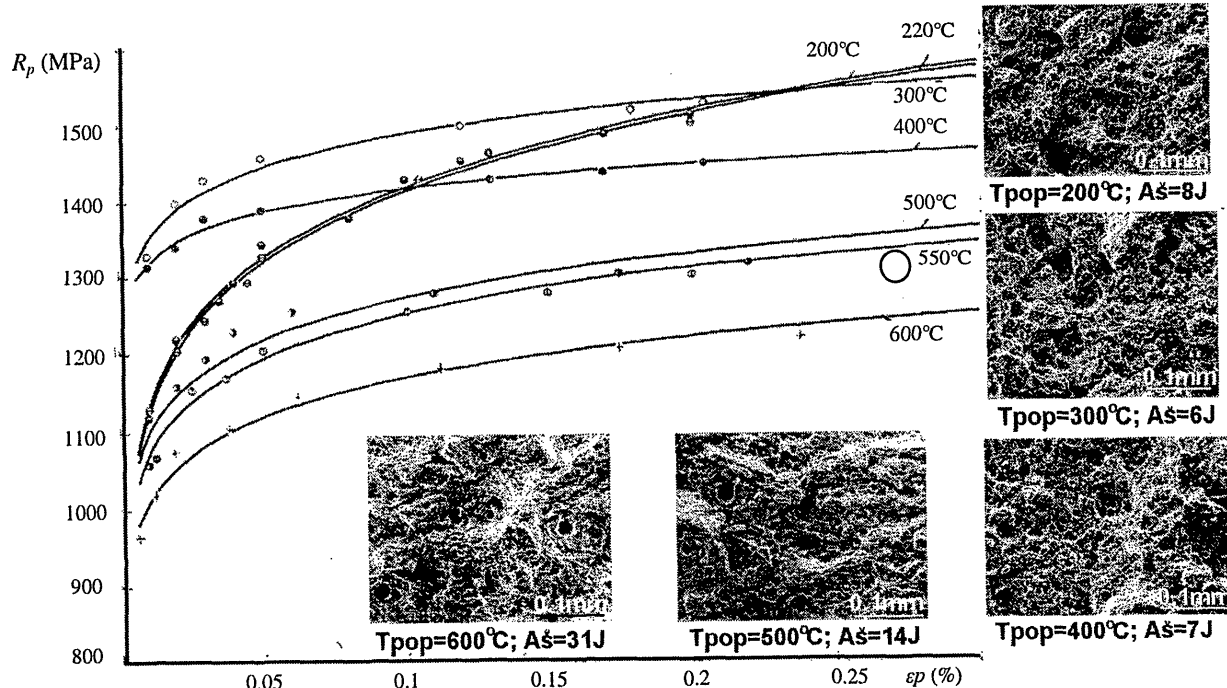
gućile dobijanje zahtevanog veka trajanja. Sledeća korektivna mera je bila primena visokotemperaturnog popuštanja uz promenu dimenzija komore zbog niže čvrstoće. Povećanje žilavosti loma materijala K_{Ic} na $\approx 100 \text{ MPam}^{1/2}$, smanjenje radnih napona i delimično uklanjanje zaostalih napona dali su zadovoljavajuće rezultate.

Iskustvo sa krtim lomom komore bestrzajnog oruđa uticalo je na to da se nastavi sa istraživanjem uticaja termičkog stanja na pokazatelje konstrukcione čvrstoće artiljerijskih oruđa. Istraživanja su pokazala da temperatura popuštanja utiče različito na otpor materijala u elastično-plastičnoj i plastičnoj oblasti. Uobičajeni kriterijumi čvrstoće pri projektovanju, zatezna čvrstoća i granica popuštanja 0.2%, kontinuirano opadaju sa porastom temperature popuštanja, dok otpor malim elastično-plastičnim deformacijama prolazi maksimum na temperaturama popuštanja 300°C do 400°C (sl.17a). Uslovne granice elastičnosti reda 0.01% su praktično jednake za temperature popuštanja oko 200°C i između 500°C i 550°C, što pokazuje da je za povećanje čvrstoće potpuno neopravdano korišćeno niskotemperaturno popuštanje kod komore bestrzajnog topa. Koristeći stečena iskustva pri izboru materijala, uobičajeni dijagrami odnosa ($R_M, R_{P0.2}$)-energija i dijagrami konstrukcione čvrstoće ($R_M, R_{P0.2}$)-žilavost loma (K_{Ic}) izmenjeni su tako da se, umesto zatezne čvrstoće i granice popuštanja, koriste uslovne granice elastičnosti u području linearno-elastične mehanike loma.

Zaključak

Fraktografska ispitivanja, kao i analiza oštećenja zahtevaju multidisciplinarni pristup, koji se u praksi uvek ne primenjuje.

Fraktografska ispitivanja su nužna metoda, kako za istraživačko-projektne organizacije, proizvodne organizacije, tako i za korisnike, jer se njihovom primenom u analizi loma može doprineti sprečavanju ponavljanja lomova i velikih ekonomskih šteta koje pri tome nastaju.



Slika 18. Uticaj popuštanja na otpor malim plastičnim deformacijama, energiju širenja prsline i mikromehanizam loma (ispitivanja energije udara npruveti KV) kod Č.57302-T

U praksi se ne poklanja dovoljna pažnja makrofrakto-grafskom ispitivanju, iako ono ne zahteva specijalnu opre-mu a pruža niz temeljnih informacija o lomu, kao što su nalaženje mesta nastanka loma, određivanje faza loma i nji-hovog redosleda, procenu makromehanizma loma itd.

Uvedeni su dijagrami odnosa uslovna granica elastično-sti-energija i uslovna granica elastičnosti-žilavost loma pri ravnoj deformaciji za izbor čelika u oblasti linearne meha-nike loma.

Literatura

- [1] ...Ed. ASM komitet, *Failure Analysis and Prevention*. ASM handbo-
ok, vol.11, 9th. ed., ASM, Metals Park, Ohio, 1996.
- [2] ENGEL,L. KLINGELE,G. *Rasterelektronen mikroskopische Untersu-
echungen von Metallschaden*. Gerling institut fur Schadenforschung
und Schadenverhutung GmbH, Koln, 1974.
- [3] ENGEL,L., KLINGELE,G. *Rastrovaja elektronaja mikroskopija, ra-
zrušenje*. sprovočnik, Metalurgija, Moskva, 1986.
- [4] LATAŠ,JU.V., MATJAH,V.N. *Sovremenie sposobi proizvodstva
slitkov osobo visokogo kačestva*. Naukova Dumka, Kiev, 1987.
- [5] ...Ed. ASM komitet, *Fractography*. ASM handbook, vol.12, 9th. ed.,
ASM, Metals Park, Ohio, 1996.
- [6] ...Ed. ASM komitet, *Fatigue and Fracture*. ASM handbook, vol.19,
9th. ed., ASM, Metals Park, Ohio, 1996.
- [7] GOLDŠTEJN,M.I. *Specialnie stali*. Metalurgija Moskva 1985.
- [8] Ed. JAFFE,R.I., WILCOX,B.A *Fundamental aspects of structural
alloy design*. Plenum Press, New York, 1977.
- [9] Ed. LIEBOVITC,H. *Fracture design of structures*. Academic Press,
vol.5, New York, 1969.
- [10] Grupa autora. Application of Ni-Cr-Mo-V steels to the fabrication of
guns barrels with high yield strength 26th. SPECIAL STEEL
CONFERENCE AL UNIVERSITE PAUL SABATIER Toulouse
may 1987.
- [11] MARKOVIĆ,D. BLAČIĆ,I. TI – 688 VTI Beograd, 1983.
- [12] VELJANOVSKI,B., BLAČIĆ,I. *Izveštaj o ispitivanju lopatica parnih
turbina*. int. dok.VTI VJ Beograd, 1997.
- [13] COLANGELO,V.J., HEISER,F.A. *Analysis of Metalurgical Failure*.
John Wiley & Sons, New York, 1974.

Rad primljen: 5.10.1999.god.