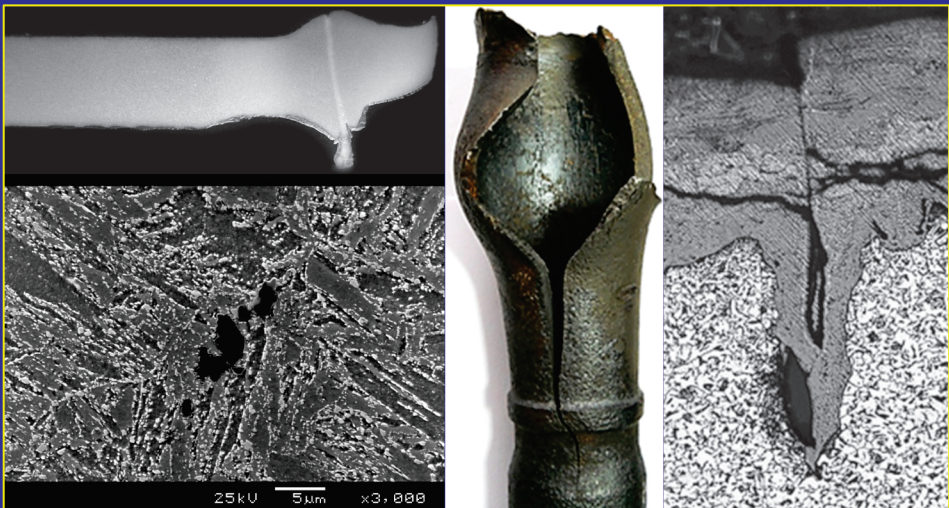


Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Gordana Bakić
Miloš Đukić
Vera Šijački Žeravčić

OSNOVNI MEHANIZMI OŠTEĆENJA MAŠINSKIH KONSTRUKCIJA



Beograd, 2021.

**Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet**

**Gordana Bakić
Miloš Đukić
Vera Šijački Žeravčić**

**OSNOVNI MEHANIZMI OŠTEĆENJA
MAŠINSKIH KONSTRUKCIJA**

Beograd, 2021.

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

Dr Gordana Bakić, dipl.inž.maš., vanredni profesor
Dr Miloš Đukić, dipl.inž.maš., vanredni profesor
Dr Vera Šijački Žeravčić, dipl.inž.met., red.prof. u penziji

OSNOVNI MEHANIZMI OŠTEĆENJA MAŠINSKIH KONSTRUKCIJA

I izdanje

RECENZENTI:

Prof. dr Radica Prokić Cvetković, Mašinski fakultet u Beogradu
Dr Vesna Maksimović, naučni savetnik, Naučni institut Vinča

IZDAVAČ:

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet
Ul. Kraljice Marije 16, 11120 Beograd
tel: (011) 3370-760
fax: (011) 3370-364

ZA IZDAVAČA:

Prof. dr Radivoje Mitrović, dekan

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom dekana Mašinskog fakulteta u Beogradu,
broj 08/2021 od 12.04.2021.

TIRAŽ:

300 primeraka

ŠTAMPA:

PLANETA-print

ISBN 978-86-6060-069-3

*Preštampavanje ili fotokopiranje nije dozvoljeno.
Sva prava zadržavaju izdavač i autori.*

Sadržaj

Predgovor

Simboli

1	Zavareni spojevi i njihovo ponašanje u radu	1
1.1.	Opšti principi izbora materijala u projektovanju zavarenih konstrukcija.....	1
1.2.	Posebni principi pri izboru materijala za zavarene konstrukcije.....	4
1.3.	Osobine materijala od značaja u projektovanju zavarenih konstrukcija.....	8
2	Ocena pogodnosti za rad komponente	13
2.1.	Eksploataciona upotrebljivost zavarenih spojeva.....	16
2.2.	Priroda prslina kod zavarenih spojeva.....	17
2.3.	Ostale greške zavarenih spojeva.....	21
3	Osnove mikroskopije	23
4	Pojam oštećenja i loma	29
5	Fraktografija - analiza površine loma	33
5.1.	Brzi statički lom.....	34
6	Mehanizmi oštećenja	39
6.1.	Produžetak radnog veka mašinskih delova.....	42
6.2.	Podela mehanizama oštećenja.....	42
6.3.	Specifični mehanizmi oštećenja - promena svojstava materijala.....	48
7	Korozija	51
7.1.	Podela korozionih procesa.....	52
7.2.	Teorija korozionih procesa.....	54
7.3.	Teorijske postavke hemijske korozije.....	55
7.4.	Teorijske osnove elektrohemijske korozije.....	63

8	Specifični oblici elektrohemijske korozije	75
8.1.	Atmosferska korozija.....	75
8.2.	Kiseonična korozija.....	76
8.3.	Korozija u uslovima niskih ili visokih pH vrednosti	78
8.4.	Galvanska korozija.....	81
8.5.	Piting (tačkasta) korozija.....	82
8.6.	Selektivna korozija.....	85
8.7.	Korozija u zazorima.....	86
8.8.	Interkristalna korozija.....	88
8.9.	Naponska korozija.....	90
8.10.	Korozioni zamor.....	97
8.11.	Vodonična oštećenja.....	100
8.12.	Kavitaciona korozija.....	106
8.13.	Eroziona korozija.....	107
8.14.	Mikrobiološka korozija.....	108
9	Puzanje	113
9.1.	Ispitivanje puzanja.....	117
9.2.	Mehanizmi deformacije čelika tokom puzanja.....	121
9.3.	Oštećenja čelika na povišenim temperaturama.....	128
9.4.	Klasifikacija oštećenja od puzanja kod čelika.....	131
9.5.	Degradacija mikrostrukture čelika.....	135
9.6.	Mehanizmi razaranja usled puzanja.....	140
9.7.	Promene mehaničkih i fizičkih osobina čelika tokom puzanja.....	147
10	Zamor materijala	151
10.1.	Vrste opterećenja.....	152
10.2.	Zamorni lom.....	154
10.3.	Inicijacija zamornih prslina.....	156
10.4.	Razaranja usled zamora.....	158
10.5.	Rad dela sa zamornom prslinom.....	159
10.6.	Zamor kod zavarenih spojeva.....	163
10.7.	Uticaj zaostalih napona na inicijaciju zamornih prslina	165
10.8.	Kombinovano delovanje zamora i puzanja.....	167
10.9.	Termički naponi i termički zamor.....	172
	Literatura	176

Predgovor

Projektovanje i vek mašinskih konstrukcija su u direktnoj vezi sa uslovima rada kojima su one izložene. Uslovi rada pogoduju pojavi različitih oštećenja čije prisustvo na specifičan način menja prvobitno stanje materijala konstrukcije. Da bi se pojava oštećenja vitalne opreme svela na najmanju meru, neophodno je u svakom pojedinačnom slučaju odrediti delujuć mehanizam oštećenja, pojavu i širenje oštećenja, kao i stvarni uzročnik koji to oštećenje izaziva.

Važnost ovih saznanja leži u činjenici da promene izazvane različitim mehanizmima oštećenja dovode do promene osobina konstrukcije, tako što se menjaju svojstva materijala i/ili geometrija, tj. poprečni presek mašinskog dela. Usled ovakvih promena, prvobitni projektni uslovi konstrukcija više nisu merodavni, mašinske konstrukcije gube svoju radnu sposobnost koja vremenom opada do te mere da dolazi do otkaza koji se najčešće manifestuje lomom ili prekomernom deformacijom dela. Zato može da se kaže da u velikom broju slučajeva pojave oštećenja, posebno kod složenih sistema, između teorije i prakse postoji značajan raskorak - delujuć mehanizam oštećenja je funkcija velikog broja uticajnih parametara, od kojih neki ne mogu čak ni da budu pretpostavljeni, pa samim tim ni kontrolisani.

Stanje materijala kao i sklonost ka pojavi oštećenja u uslovima oštih parametara radne sredine nekog sistema ili njegovog dela, ali i mehanizmi oštećenja koji počnu da deluju imaju ključnu ulogu i u proceni preostalog resursa za rad datog sistema i u proceni vremena neophodne zamene sistema/dela, čime smo zatvorili krug i ponovo došli na početak.

Gradivo u ovom udžbeniku je namenjeno studentima koji slušaju predmet *Ponašanje zavarenih spojeva u eksploataciji* na Master akademskim studijama Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, ali i za predmete na doktorskim studijama koji obrađuju mehanizme oštećenja i koroziju - *Ponašanje i pouzdanost materijala u eksploataciji* i *Korozija materijala i zaštita*. Cilj ovog udžbenika je da se studentima ne samo približe osnove mehanizama oštećenja mašinskih konstrukcija i efekti do kojih oni dovode, već i da se upoznaju i nauče da prepoznaju osnovne tipove nekih vrsta oštećenja (npr. osnovne oblike korozije, oštećenja od puzanja, zamora, itd.). Za sve mehanizme oštećenja pored opšteg razmatranja, posebno je analizirano kako se mehanizmi oštećenja manifestuju kod zavarenih spojeva. Ovo je prvenstveno urađeno zbog studenata sa modula Zavarivanje i zavarene konstrukcije na Mašinskom fakultetu, ali i zbog studenata sa drugih modula koji godinama biraju ovaj predmet u okviru svog master programa.

Za detekciju većine oštećenja koriste se različite tehnike ispitivanja, od kojih je studentima mašinstva najmanje poznata mikroskopija pa je stoga u knjizi posvećena posebna pažnja osnovama mikroskopije i načinima njene primene u otkrivanju oštećenja. S obzirom da oštećenja nastaju u kompleksnim uslovima, u gradivu su istaknuti dominantni aspekti koji utiču na oštećenja.

Autori od srca zahvaljuju recenzentima prof. dr Radici Prokić Cvetković i dr Vesni Maksimović, naučnom savetniku, na uloženom trudu i korisnim sugestijama da ova knjiga dobije konačan izgled.

Posebnu zahvalnost autori duguju laboratoriji „Tehnički centar-Inspekt“ iz Obrenovca na čelu sa direktorkom g-đom Vesnom Peruničić, dipl.inž.met. koji su naši dugogodišnji saradnici sa kojima smo izradili veliki broja ekspertiza, odakle i potiče najveći broj neverovatno lepih mikrofotografija mikrostruktura, koje smo koristili u tekstu i bez kojih najveći broj obrađenih mehanizama oštećenja i lomova ne bi mogao da budu kvalitetno ilustrovan.

Takođe, autori od srca zahvaljuju i našim dragim saradnicima Bratislavu Rajičiću, dr Aleksandru Maslareviću, naučnom saradniku, i dr Biljani Anđelić, redovnom profesoru u penziji, na pomoći oko izrade ovog udžbenika i što su imali strpljenja svih ovih godina, zatim, prof. dr Draganu Cvetkoviću koji nam je uredio naslovne strane, kao i laboratoriji „Zavod za zavarivanje“ koja nam je ustupila neke svoje fotografije za ilustraciju.

I za kraj, treba navesti u ovom uvodnom delu - multidisciplinarnost tokom istraživanja je preduslov da bi mogla da se pouzdano izvode analize uzroka pojave oštećenja i lomova.

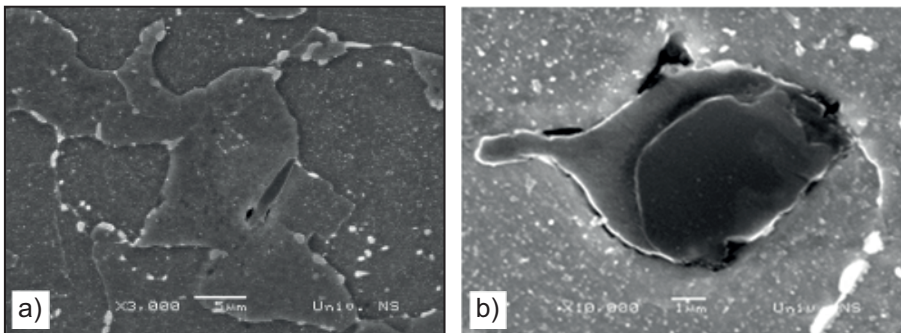
Svaku sugestiju od strane čitalaca i korisnika ovog udžbenika, u smislu poboljšanja njegovog kvaliteta, autori će rado čuti i prihvatiti.

Beograd, 2021. godine

Autori

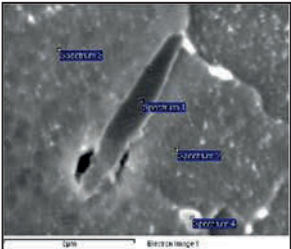
Svaki uzorak mora da provodi struju pa se površina uobičajeno prevlači tankim slojem ugljenika, zlata ili platine (2 nm), što istovremeno sprečava akumulaciju naelektrisanja i eroziju uzorka snopom elektrona tokom ispitivanja.

Primer primene SEM: Na slici 3.4 je prikazana mikrostruktura uzorka niskolegiranog toplotnopoštojanog CrMoV čelika dobijena skening elektronskom mikroskopijom. Uzorak je bio u eksploataciji 170000h na povišenoj temperaturi i odlikuje se velikim stepenom degradacije, odnosno sferoidizacijom. Faze koje su prisutne kod ispitivanog uzorka čine ferit i karbidi (slika 3.4a) sa prisutnim uključcima (veliki uključak na slici 3.4b) i manji štapićast na slici 3.4a). Rezultati EDS analize pokazuju da je izduženi uključak sulfidnog tipa (MnS izdvojeni karbidi sadrže Cr, Mo i Fe a), tabela 3.2.



Slika 3.4: SEM Mikrostruktura uzorka čelika 12H1MF (GOST) koji je proveo u radu 170000 sati na povišenoj temperaturi: a) i b)

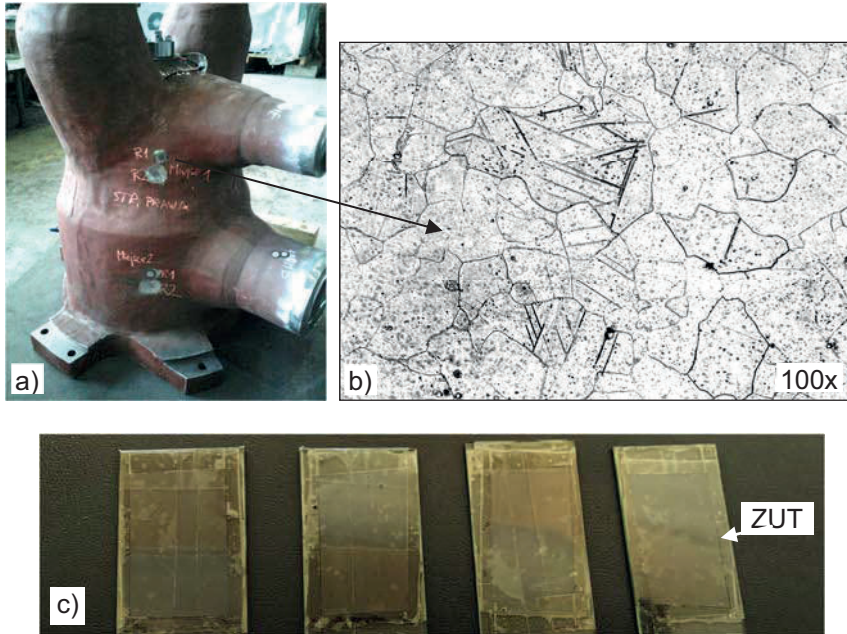
Tabela 3.2: Sastav karbida i uključka određen EDS analizom

Faza	Uključak spektar, 1	Karbid, spektar 4	
Element	% tež.		
Cr K	0,72	10,34	
Mo L	0	4,68	
V K	0,35	0,5	
Mn K	37,23	4,14	
S K	22,57	-	
Fe K	39,12	80,34	
ukupno	100	100	

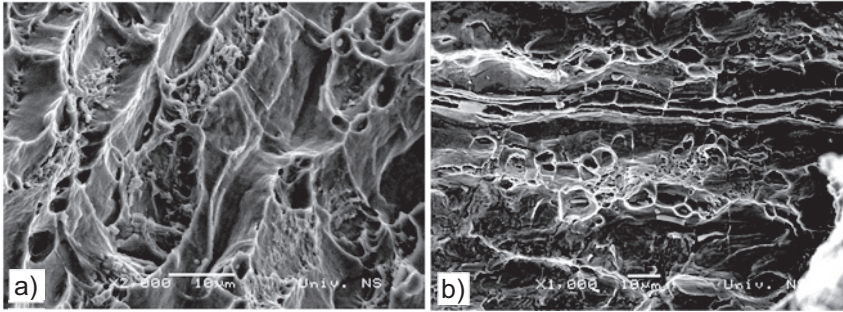
Ispitivanje mikrostrukture metodom replika. Acetatne replike su tanke folije koje imaju ulogu da „preslikaju“ mikrostrukturu, koja se potom pregleda pod mikroskopom, slika 3.5.

Faze razvijanja mikrostrukture su identične kao kod metalografskih uzoraka: na licu mesta se brusi i fino polira površina metala, zatim nagriza u odgovarajućem sredstvu, a potom se nanosi omekšala replika. Nakon njenog očvršćavanja, lagano se podiže sa površine metala i nanosi na staklenu podlogu. Repliku je moguće prevući tankim slojem ugljenika, zlata ili

aluminijuma (tzv. naporavanje, odnosno postizanje vrlo tankih slojeva uniformne debljine), tako da može da se posmatra i na SEM. Ispitivanje mikrostrukture metodom replika je jedan od osnovnih vidova eksploatacione kontrole i na slici 3.5 je prikazan primer ovog ispitivanja



Slika 3.5: Ispitivanje mikrostrukture metodom replika:
Ispitivanje kućišta ventila: a) mesto ispitivanja replikom na kućištu ventila, b) mikrostruktura ispitanog mesta i
c) slike replika zavarenog spoja na kojima se vidi nagrižen ZUT



Slika 5.1: Duktilni lom – lom koalescencijom mikrošupljina, SEM mikrofotografija: a) šupljine inicirane na ukljućima i grubom talogu i b) lamelarno cepanje nisko ugljeničnih valjanih čelika normalno na pravac valjanja: žlebovi popunjeni ravnim ukljućima i razdvojeni po zonama i šupljina

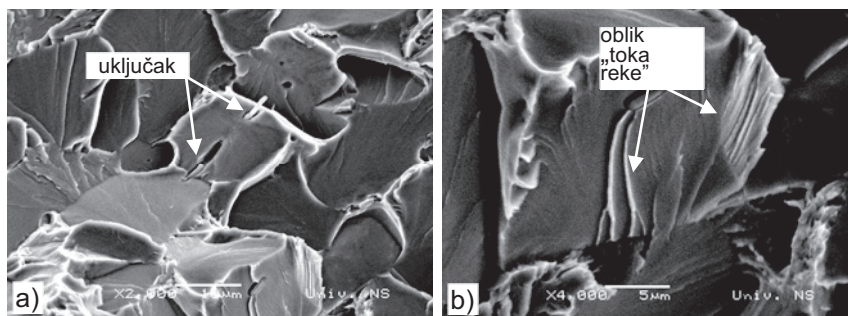
Krti lom. Generalno, krti lom se prostire kroz zrna (transkristalni lom ili transgranularni lom). U slučajevima kada materijal poseduje visoku čvrstoću, npr. kaljeni i otpušteni čelici, prslina može da raste duž granice zrna – to se dešava kada su one oslabljne česticama i nečistoćama (interkristalni lom ili intergranularni lom). Najčešće, granice po kojima raste prslina su bivše granice austenitnih zrna. Tokom hlađenja, kada se austenit transformiše u ferit ili martenzit, ove granice zrna nestaju, ali nečistoće nakupljene na njima predstavljaju pogodno mesto za rast prslina.

Lom cepanjem – transkristalni krti lom. Lom cepanjem je karakterističan za KZC rešetku, dok se kod KPC rešetke ne javlja u normalnim uslovima. Tokom cepanja, odvajanje se javlja duž dobro definisanih kristalografskih ravni.

Treba napomenuti da se tokom cepanja ispred vrha prsline najčešće stvara zona lokalne plastične deformacije, na čije se obrazovanje troši najveći deo rada potrebnog za nastajanje površine loma. To znači da je materijal u okolini ravni prsline plastično deformisan bez obzira na krti karakter loma. Sa udaljavanjem od ravni prsline, manja je plastična deformacija materijala.

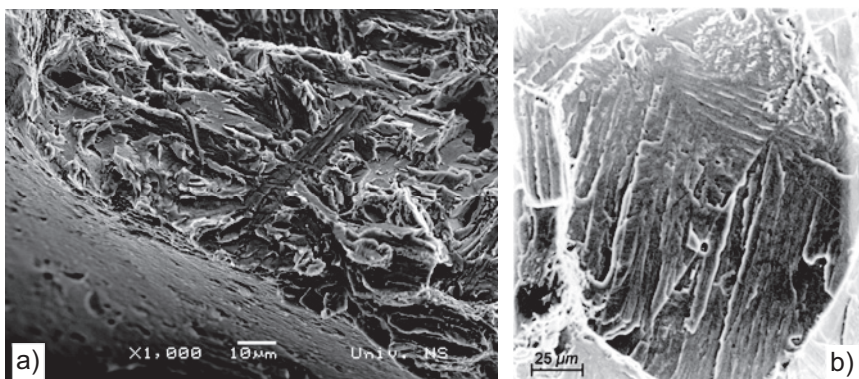
Nukleacija transkristalne prsline može da bude na mestima gde je otežan proces klizanja, kao na primer na mestima gde se nalaze čestice sekundarnih faza i ukljućaka (slika 5.2a) ili na granicama zrna.

S obzirom da zrna imaju različitu orijentaciju jedna u odnosu na druga (kristalografske ravni susednih zrna se nalaze pod većim uglovima), prsline se šire grananjem, kada prelaze granicu zrna i formiraju stepenice. Posle granica zrna, novonastale različite ravni prsline ponovo se spajaju u jednu i imaju karakterističan oblik „toka reke”, slika 5.2b. Generalno, u slučajevima prikazanim na slikama 5.2a i 5.2b, površine dobijene cepanjem su ravne.



Slika 5.2: Transkristalni krti lom – lom cepanjem SEM mikrofotografija: a) na mestima gde se nalaze čestice sekundarnih faza i uključaka; b) prslina u obliku „toka reke“

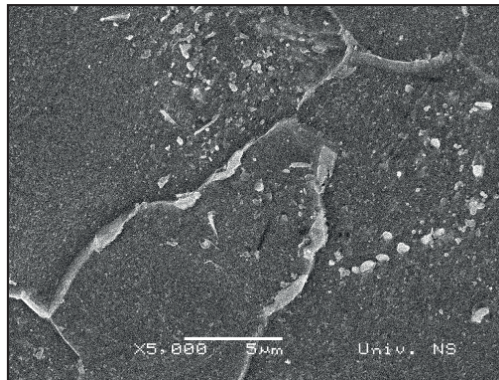
Prslina se kod kaljenih i otpuštenih čelika martenzitne strukture širi kao kod feritnih čelika, slika 5.3a. Zbog velike razlike u orijentaciji pojedinačnih blokova martenzita, prolaz prsline kroz granice zrna je otežan i neophodno je smicajno opterećenje za dalji rast - „tok reke“ je jedva vidljiv, slika 5.3a. Kod pojedinih oblasti oblik loma ukazuje na martenzitnu građu sa velikim brojem finih poprečnih površina cepanja.



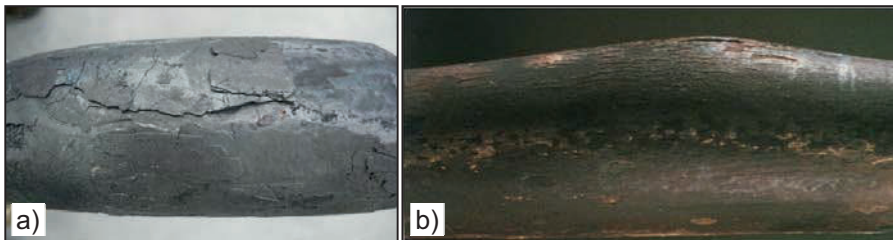
Slika 5.3: Transkristalni krti lom – lom cepanjem: a) promena moda u razaranju na nivou jednog zrna kod otpuštenog martenzita, b) otpušteni martenzit - fine površine cepanja

Slika 5.3b, Preuzeta iz M. Möser, Fractography with the SEM (Failure Analysis) Materials Science. Monographs 40: Electron Microscopy in Solid State Physics. Eds. H. Bethge and J. Heydenreich, Elsevier: Amsterdam-New York-Tokyo 1987, 366-385

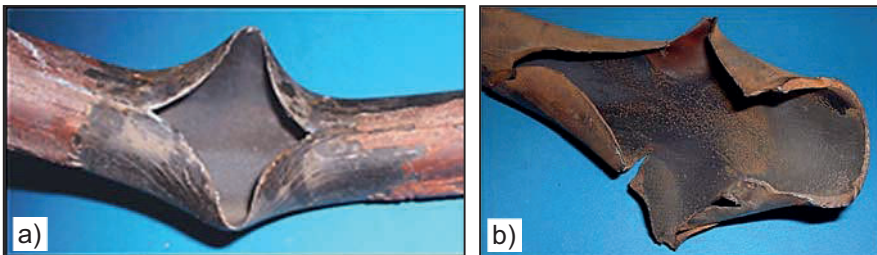
U dvofaznim austenitno-feritnim CrNi čelicima zbog postojanja feritne komponente u austenitnoj strukturi, sa opadanjem temperature čelik postaje krtiji kao bilo koji feritni čelik, ali ovo povećanje krtosti se odvija sporije u poređenju sa feritnim čelicima. Tokom rasta prsline, feritna zrna se cepaju na uobičajeni način. Rast prsline se zaustavlja kada prslina dostigne granicu austenitnog zrna koje je duktilnije u odnosu na feritno, slika 5.3b. Ovo je



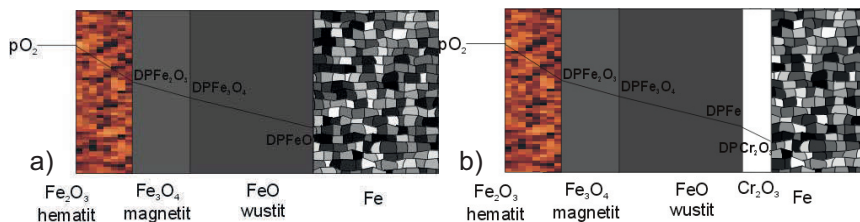
Slika 6.9: Uklupnjavanje zrna pri radu na povišenim temperaturama



Slika 6.10: Dugotrajno pregrevanje: a) uzrok - direktno izlaganje plamenu (lokalna topla zona) i b) uzrok - debele naslage na unutrašnoj površini



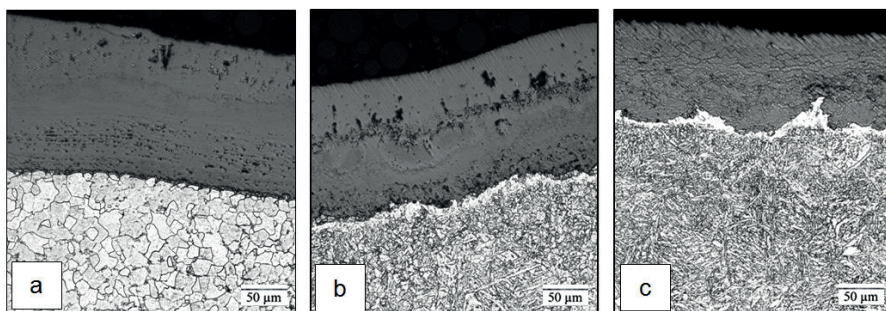
Slika 6.11: Kratkotrajno pregrevanje: a) uzrok - nedovoljan protok fluida i b) uzrok - stanjen zid cevi

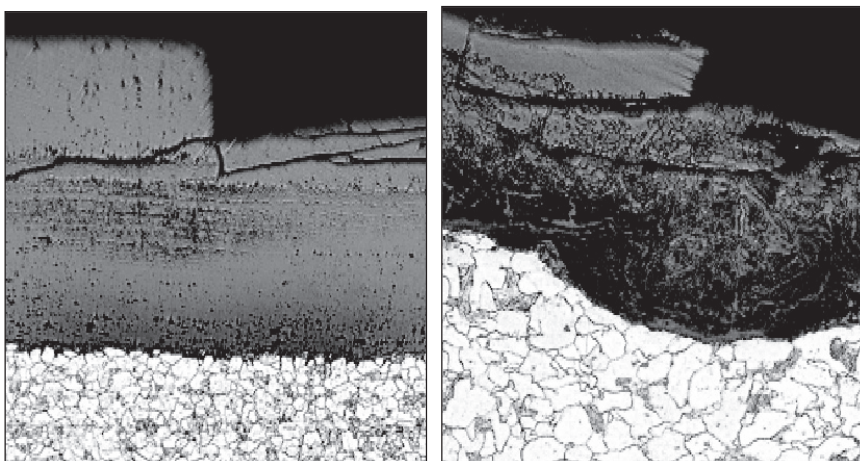


Kod čelika legiranih hromom oksidi sadrže još jedan sloj, odnosno oksid hroma (Cr_2O_3) koji je znatno stabilniji od oksida železa što ovim čelicima daje znatno višu otpornost na oksidaciju. Generalno, zaštitni oksidni sloj se postiže tek sa sadržajem od hroma od 16 % u leguri. Sa porastom radne temperature otpornost na oksidaciju opada. Na slici 7.6 prikazan je mehanizam formiranja oksidnih naslaga na površini niskolegiranih čelika i čelika sa visokim sadržajem hroma.

Na slici 7.7 su prikazane mikrostrukture površina metala sa oksidima za tri čelika koji sadrže različitu količinu hroma: 2,25%Cr, 9%Cr i 12% Cr. Čelici sa manje od 12 % Cr, zbog znatno brže oksidacije, postižu sličnu debljinu naslaga nakon 60000h rada na 550°C, kao čelik sa 12 % Cr nakon 240000h rada na istoj temperaturi. Čelici sa još višim sadržajem hroma i legure na bazi nikla imaju još višu otpornost na oksidaciju.

Na slici 7.8 prikazan je način odvajanja/otpadanja oksidnih naslaga kada dostignu određenu debljinu zbog razlike u specifičnoj gustini oksida i metala.





Slika 7.8: Izgled oksidnih naslaga koje su počele da se odvajaju

U tabeli 7.2 date su temperature na kojima počinje intenzivna oksidacija i koje limitiraju rad određenih klasa čelika sa aspekta oksidacije.

Primer oksida na unutrašnjoj površini cevi izrađene od toplotnopoštojanog čelika sa 12 % Cr, koja je radila na visokoj temperaturi je prikazan na slici 7.9. Oksid koji se formira je uobičajeno uniformne debljine. Tokom vremena debljina oksida raste i usled unutrašnjih napona, a usled razlika u gustini i koeficijenta linearnog širenja metala cevi i oksida, dolazi do njegovog pucanja i odvajanja sa površine. Mesta sa kojih se već odvojio oksid mogu da se uoče kao izljudspana površina (neravne površina na slici 7.9). Oksidi u sebi sadrže hrom i kompleksnog su sastava kao što je to prikazano na slici 7.10a. Snimak na kome se vidi već započelo odvajanje oksida je prikazan na, slici 7.10b.

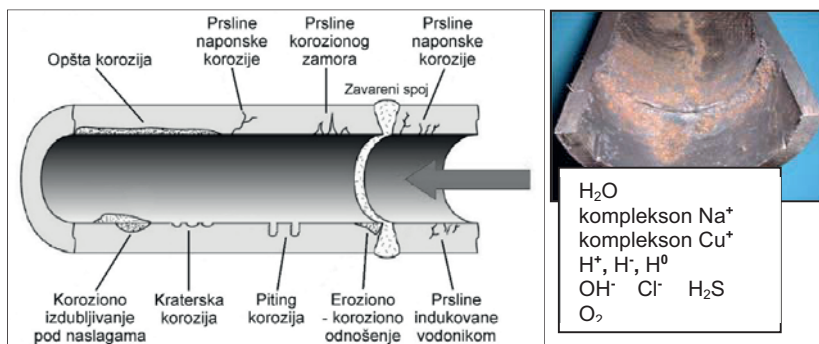
Tabela 7.2: Temperature početka intenzivnijeg stvaranja oksida

Čelik	Temperatura početka intenzivne oksidacije
	°C
0,1% C	480
5% Cr - 0.5% Mo	620
9% Cr - 1% Mo	675
12% Cr martenzitni	705
17% Cr feritni	845
21% Cr feritni	955
25% Cr feritni	1095
18-8 CrNi	900
18-8 CrNi + Mo	900
25-20 CrNi	1150

rezervoara, brodova, grejača vode, itd., dok se anodna zaštita zasniva se na anodnoj polarizaciji pri čemu se osnovni metal prevedu u pasivno stanje (pasivizacija metala).

Korozija zavarenih spojeva. Kao što je već poznato, kod zavarenih spojeva se tokom zavarivanja, uz dejstvo naponskog i termičkog gradijenta, javljaju različite fazne i strukturne transformacije u osnovnom materijalu koje dovode do pojave neujednačenosti mehaničkih osobina u različitim zonama zavarenog spoja. Pored toga, tokom zavarivanja uobičajeno se javlja i hemijska nehomogenost, koja je čest uzrok pojave lokalnih vidova korozije. Na primer, u zoni topljenja, po završetku očvršćavanja, metal šava ima karakterističnu strukturu livenja. Sloj koji poslednji očvršćava najčešće ima izrazito dendritnu strukturu, za koju je karakteristična pojava likvacije, tj. lokalne hemijske nehomogenosti, zbog nedostatka vremena za difuziju atoma legirajućih elemenata. Takođe, u zoni uticaja toplote (ZUT), kod nerđajućih čelika i legura aluminijuma često dolazi do izdvajanja sekundarnih faza po granicama zrna koje dovode do pojave interkristalne korozije.

Pri zavarivanju postupcima sa topljenjem, u zavarenom spoju se pri zagrevanju i hlađenju javlja značajno naponsko polje. Posledično nastali zaostali naponi mogu da dovedu do pojave hladnih prslina, pojave naponske korozije i vodonične krstosti tokom eksploatacije. Iz tih razloga se, obično posle zavarivanja, izvodi termička obrada žarenjem, radi smanjenja zaostalih napona i sadržaja vodonika.



Slika 7.16: Neki karakteristični oblici korozionih oštećenja koji mogu da se jave u okolini zavarenog spoja

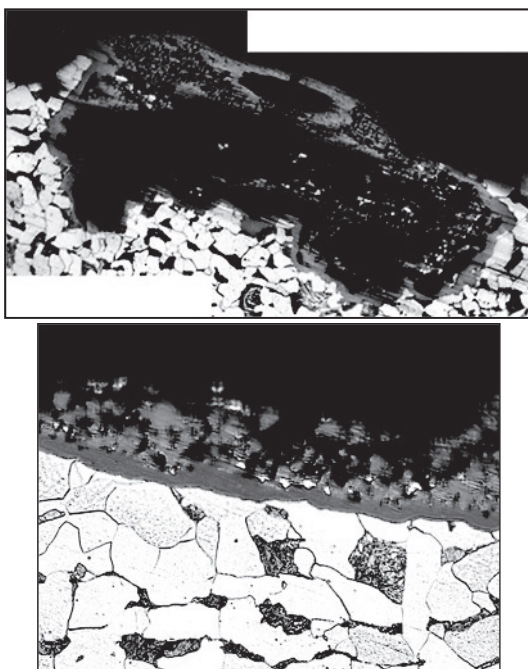
Takođe, posebno je važno istaći da se pri određenim uslovima rada mogu da stvore naslage, čije je prisustvo često neophodan preduslov za aktivaciju različitih korozionih procesa. Iz tog razloga, gde god je to bitno koncentracija nečistoća (rastvorenih materija) u radnom fluidu se održava ispod određene granice, da bi se sprečilo povećano taloženje prirodnih nečistoća iz vode ili taloženje korozionih produkata, posebno u okolini zavarenih spojeva. Na slici 7.16 su prikazani mogući korozioni procesi u blizini zavarenog spoja cevi kroz koju protiče elektrolit kao i najčešće prisutni korozioni agensi (slika levo).

8.4. Galvanska korozija

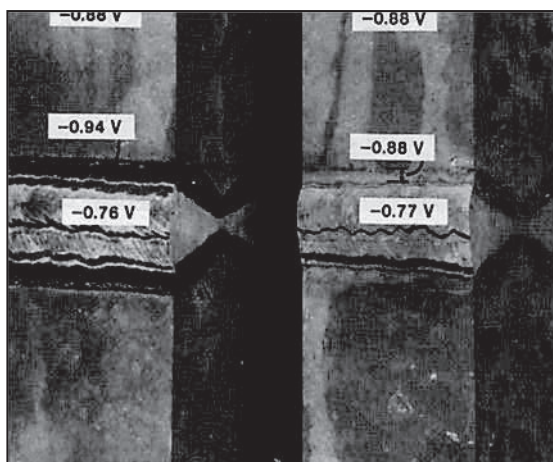
Galvanska (kontaktna ili bimetalna) korozija se javlja pri kontaktu dva ili više metala različitog elektrodnog potencijala u prisustvu elektrolita. Veliki uticaj na odvijanje korozionih procesa ima provodljivost elektrolita. Kada je provodljivost elektrolita mala, korozija je ograničena na oblasti metala koje su u kontaktu, dok je pri većoj provodljivosti galvanska korozija moguća i na većim rastojanjima između različitih metala. Sa aspekta metala, ukoliko je razlika potencijala između metala u kontaktu veća, galvanska korozija je intenzivnija. Takođe, kod galvanske korozije je od velikog značaja odnos anodnih i katodnih površina. Ukoliko je manja površina metala koji se ponaša anodno u odnosu na površinu metala koji se ponaša katodno, utoliko je korozija anodnog metala intenzivnija.

Ponašanje različitih metala u kontaktu, u određenoj korozionoj sredini, može se predvideti na osnovu galvanskog niza. Na slici 8.10 su prikazana koroziona oštećenja nastala dospevanjem čestica bakra u naslage. Kada čestice dospeju u kontakt sa metalom, u prisustvu elektrolita, započinje korozioni proces.

Galvanska korozija se često javlja kod zavarenih spojeva. Kada je sastav dodatnog metala različit od sastava osnovnog metala, neke oblasti u zavarenom spoju postaju anodne usled razlike elektrohemijskih potencijala, slika 8.11.



Slika 8.10: Galvanska korozija: kiseonična korozija u kombinaciji sa česticama bakra u naslagama (sjajne oblasti u naslagama)



Slika 8.11: Galvanska korozija zavarenih spojeva: razlika elektrohemijskih potencijala osnovnog materijala, ZUT-a i metal šava

Slika 8.11, Preuzeta iz Corrosion of Nonferrous Alloy Weldments, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, Edited By Stephen D. Cramer, Bernard S. Covino, Jr., ASM International, 2003, 317–321

8.5. Piting (tačkasta) korozija

Piting korozija (tačkasta korozija) se definiše kao izrazito lokalizovan korozioni napad pri kome dolazi do stvaranja korozivnih jamica (tzv. pitova po kome je i dobila ime), najčešće malog dijametra (širine) na površini i velike dubine prodora. Ostatak površine kod piting korozije je u pasivnom stanju. Površina pita se ponaša kao anoda i rastvara se velikom brzinom na račun kontakta sa ostatkom površine koja se nalazi u pasivnom stanju i ponaša kao nepolarizovana katoda. Pošto je istovremeno postojanje pasivne katode i aktivne anode na površini jednog istog metala, bez ikakvih dopunskih uslova, nemoguće, takav sistem je elektrohemijski nestabilan. Piting korozija se javlja u rastvorima koji su oksidaciona sredina i koji sadrže aktivne anjone Cl^- , Br^- , I^- , itd., slika 8.12.

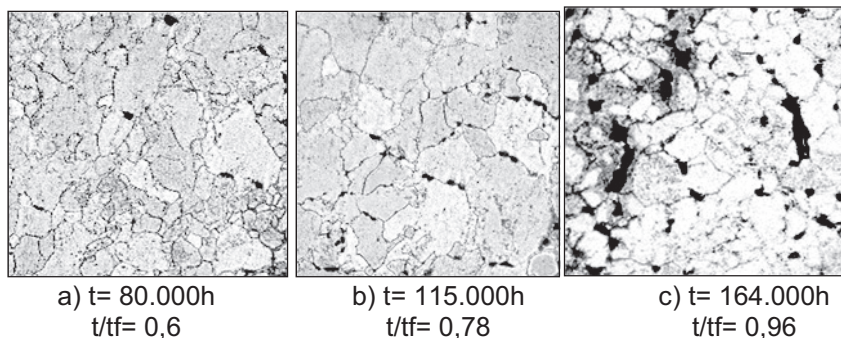
Osnovni uslov nastajanja piting korozije je pomeranje elektrohemijskog potencijala i približavanje kritičnoj vrednosti, E_{pit} . Sa povećanjem temperature raste sklonost metala i legura prema piting koroziji. Naprimera, do obrazovanja stabilnih pitova na nerđajućem čeliku neće doći ukoliko je temperatura niža od neke kritične vrednosti koja se naziva kritična temperatura pitinga. Piting korozija se razvija u tri stadijuma, slika 8.13, koji obuhvataju:

- inicijalno stvaranje jamice (nukleacija),
- početni rast jamice i moguća repasivizacija (obnavljanje
- zaštitnog sloja) i prestanak rasta jamice i
- stabilni rast jamice.

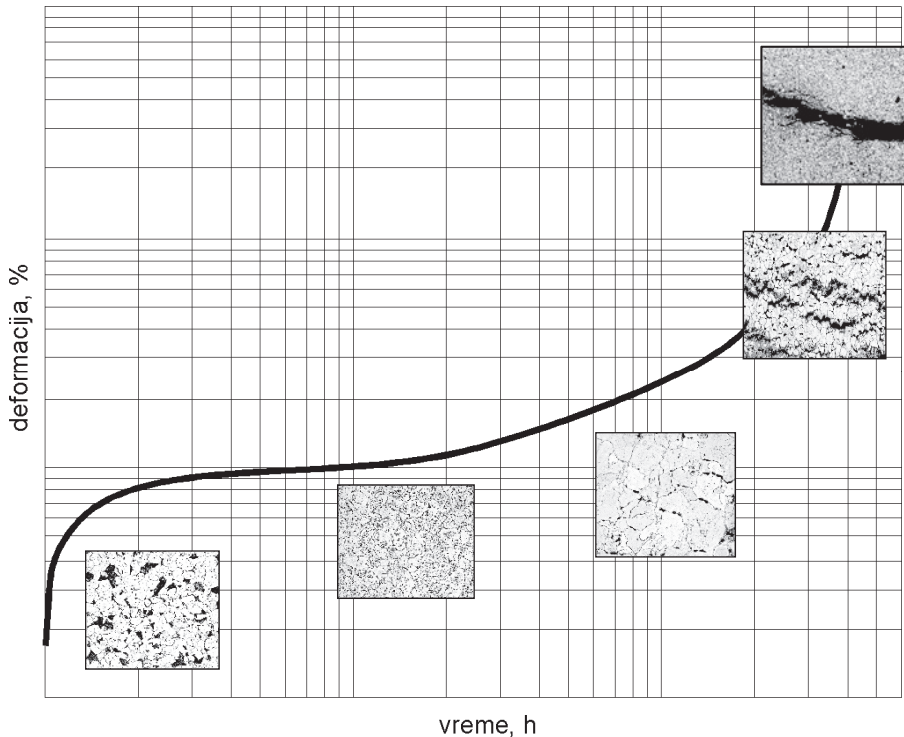
Primer dijagrama sa krivom puzanja (dijagram vreme - deformacija usled puzanja) zajedno sa odgovarajućim referentnim mikrostrukturama oštećenja po Neubauer klasifikaciji prikazan je na slici 9.18.

Tabela 9.1: Ocena oštećenja mikrostrukture usled pora prema Neubauer-u

Stepen promena	Mikrostrukturna procena otkrivena metalografskim ispitivanjima
0	Uobičajena mikrostruktura za novu komponentu
1	Uobičajena mikrostruktura za radne uslove; tek započela ili uznapredovala transformacija ili taloženje sekundarne faze
2	Započele promene usled puzanja: a) lančani oblik, orijentisani karbidi u granicama zrna b) izolovane mikropore u granicama zrna nepravilnog rasporeda c) nekoliko mikropora u granicama zrna nepravilnog rasporeda
3	Uznapredovali proces oštećivanja usled puzanja: a) mikropore u granicama zrna orijentisane normalno na pravac glavnog napona b) razdvajanje granica zrna (dužina jedne granice)
4	Uznapredovalo oštećenje usled puzanja: a) mikroporsline dužine nekoliko granica zrna mogu da se identifikuju
5	Krajnji stadijum oštećivanja pre loma: a) potpuna degradacija mikrostrukture, dezintegracija zrna b) Makroporsline, dužine nekoliko milimetara



Slika 9.17: Izgled oštećenja tipa pora u različitim stadijumima utrošenog radnog veka: a) pojedinačne pore, b) orijentisane pore i c) mikroporsline duže od jedne granice zrna nastale spajanjem pora



Slika 9.18: Klasifikacija oštećenja usled puzanja i kriva puzanja

9.5. Degradacija mikrostrukture čelika

Procesi mikrostrukturne degradacije materijala tokom eksploatacije, odnosno promene u materijalu u odnosu na početno ili nulto stanje (stanje pre početka rada) značajno umanjuju efekte ojačavanja metala, i odražavaju se, pre svega, kroz kontinualno smanjenje vrednosti njegovih fizičkih i mehaničkih karakteristika.

Osnovni mehanizmi ojačavanja toplotno postojanih čelika otpornih na puzanje su:

- deformacionim ojačavanjem tokom faznog preobražaja $\gamma \rightarrow \alpha$,
- ojačavanjem fino dispergovanim česticama sekundarne faze i
- ojačavanjem čvrstog rastvora.

Kao što se može videti izostavljeno je ojačavanje veličinom zrna jer se veća otpornost na stvaranje oštećenja javlja kod čelika koji imaju manju dužinu granica zrna, odnosno krupnije zrno. Takođe, ojačavanje čvrstim rastvorom se nakon termičke obrade koja ima za cilj izdvajanje karbidne faze

CIP – Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

620.1:621-1(075.8)

БАКИЋ, Гордана, 1967-

Osnovni mehanizmi oštećenja mašinskih konstrukcija / Gordana Bakić, Miloš Đukić, Vera Šijački Žeravčić. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2021 (Beograd : Planeta-print). - [XI], 182 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 300. - Simboli: str. [IX-XI]. - Bibliografija: str. 176-182

ISBN 978-86-6060-069-3

1. Ђукић, Милош, 1967- [аутор]
 2. Шијачки-Жеравчић, Вера, 1948- [аутор]
- а) Машинске конструкције – Испитивање

COBISS.SR-ID 37566729