

9. PUZANJE

Procesi u materijalu tokom procesa puzanja dovode do plastične deformacije. Ako metal izložimo naprezanju na povišenoj temperaturi T , uz ispunjen uslov da je $T/T_t = \min 0,3-0,4$ (T_t - apsolutna temperatura topljenja), deformacija se povećava sa vremenom pod konstantnim opterećenjem. Definisane ponašanja materijala u uslovima puzanja, odnosno stadijumi procesa puzanja određeni su veličinom i brzinom deformacije.

Određivanje karakteristika puzanja materijala vrši se laboratorijskim ispitivanjima opterećivanjem epruvete konstantnim uglavnom jednoosnim naponom na određenoj temperaturi. U toku ispitivanja meri se promena dužine epruvete - izduženja ε u funkciji vremena, a na osnovu dobijenih podataka dobija se kriva statičke deformacije.

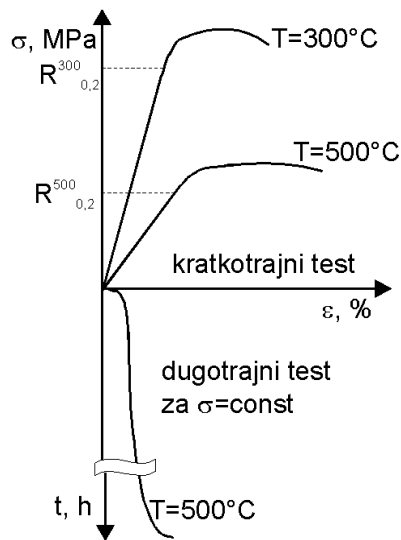
Definicija puzanja materijala: Puzanje materijala je spora plastična deformacija materijala nastala usled delovanja dugotrajnog opterećenja na povišenoj temperaturi.

Puzanje materijala je toplotno aktivirani proces ($T > 0,3-0,4T_t$) tako da puzanje kod npr. polimera nastupa već na sobnoj temperaturi, a kod čelika na temperaturama višim od 400°C za nelegirane niskougljenične toplotno postojane čelike, dok je ta temperatura znatno viša za nisko i visokolegirane toplotno postojane čelike, legure na bazi nikla, itd.

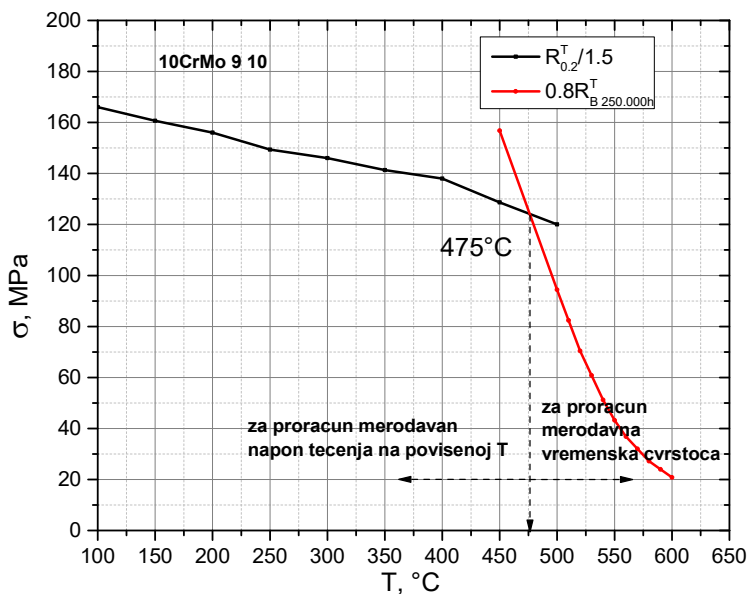
Na slici 9.1 prikazan je dijagram σ - ε za niskougljenični nelegirani čelik ispitan zatezanjem na temperaturi od 300°C i 500°C. Ako se isti čelik izloži niskom naponu, nižem od napona tečenja na datim temperaturama i koji izaziva samo elastičnu deformaciju, pojava puzanja će biti zabeležena samo na temperaturi od 500°C. Primer određivanja merodavne T od koje kreće puzanje je prikazan na slici 9.2.

Na **idealizovanoj krivoj puzanja**, slika 9.3, mogu da se razlikuju tri stadijuma:

- I stadijum - Primarni, odnosno polazni stadijum puzanja. Na početku, neposredno posle opterećenja epruvete dolazi do pojave trenutnog izduženja ε_0 , čija veličina zavisi od napona i modula elastičnosti ispitivanog materijala na datoj temperaturi. Deformacija se povećava sa vremenom, uz kontinualni pad brzine deformacije, slika 9.4. Smanjenje brzine deformacije je proces kontrolisan deformacionim ojačavanjem usled porasta gustine dislokacija u materijalu pod dejstvom opterećenja. Brzina puzanja opada sa porastom gustine dislokacija.



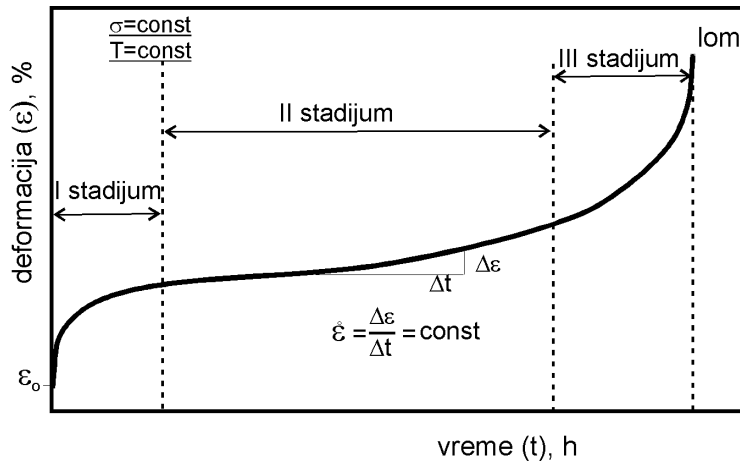
Slika 9.1: Dijagram napon-izduženje i dijagram puzanja (razlika u brzini deformacije)



Slika 9.2: Određivanje temperature na kojoj se pojavljuje puzanje kod čelika 10CrMo9 10

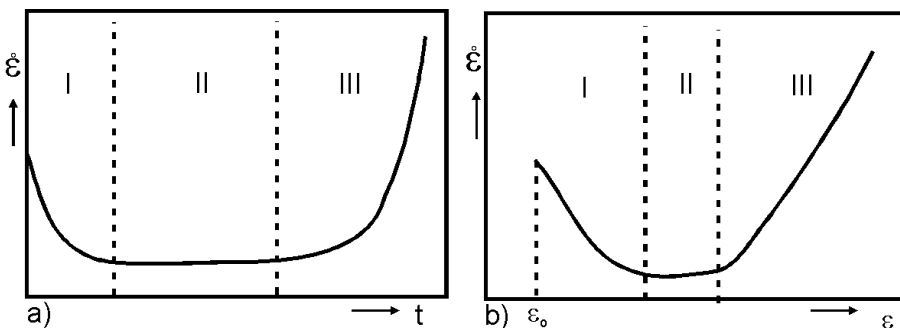
- II stadijum: Sekundarni stadijum ili stanje stabilnog puzanja sa približno konstantnom brzinom deformacije. Drugi stadijum puzanja na krivoj puzanja ima izgled kao na slici 9.3 samo kod materijala kod kojih ne dolazi do mikrostrukturnih promena tokom procesa puzanja (metalurški jednostavne legure), što nije slučaj kod većine komercijalnih tehničkih legura. Konstantna

brzina deformacije postiže se ako je napon u komponenti konstantan, dok je kod većine materijala ova brzina samo aproksimativno konstantna. Za ovaj stadijum je karakteristično da postoji ravnoteža između deformacionog ojačavanja i oporavljanja. Na povišenim temperaturama (oko 0,3-0,4 T_t metala), dolazi do procesa oporavljanja pa metal nastavlja da se deformiše i izdužuje se konstantnom brzinom jer se uspostavlja dinamička ravnoteža između procesa deformacionog ojačavanja i oporavljanja. U ovom intervalu, otpornost metala prema puzanju je najveća. Nagib krive puzanja, u idealnom slučaju određuje minimalnu brzinu puzanja, slika 9.3.



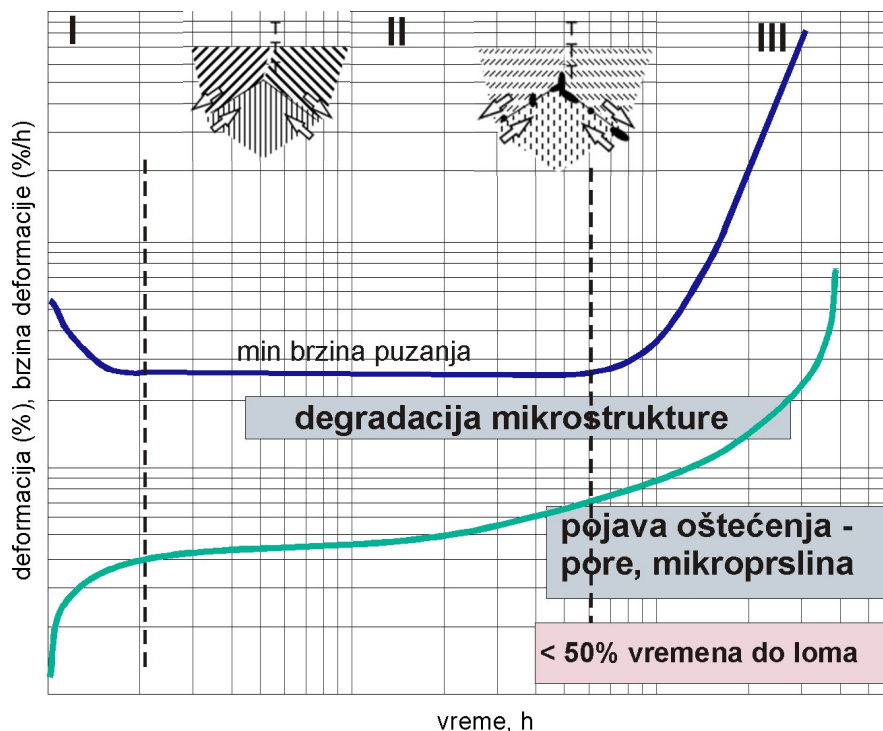
Slika 9.3: Idealizovana kriva statičke deformacije

- III stadijum: Tercijarni stadijum, odnosno završni stadijum puzanja. U ovom stadijumu pojavljuju se oštećenja materijala, koja se najčešće manifestuju kroz smanjenje poprečnog preseka, obrazovanje i rast pora, pojavu mikro i makroprslina. Usled velikog stepena oštećenja i smanjenja poprečnog preseka pod opterećenjem izrazito raste brzina deformacije sve do loma. Laboratorijska ispitivanja se često prekidaju na početku trećeg stadijuma, s obzirom da je brzina statičke deformacije u okviru sekundarnog stadijuma puzanja osnovna veličina koja se meri.



Slika 9.4: Promena brzine puzanja: a) sa vremenom i b) sa deformacijom

Oblik krive statičke deformacije definisan je vrstom materijala, naponom, temperaturom, deformacijom i vremenom. Brzina deformacije se povećava sa povećanjem napona i povišenjem temperature, tako da se sva tri stadijuma puzanja javljaju samo pri određenim kombinacijama napona i temperature za određene materijale. Na primer pri niskim vrednostima napona i temperatura kao osnovnih parametara, javlja se primarni ili primarni i sekundarni stadijum puzanja, dok tercijerni stadijum obično izostaje. Pri srednjim vrednostima napona i temperatura sva tri stadijuma su jasno definisana, dok se pri visokim vrednostima parametara primarni i sekundarni stadijum sužavaju, a tercijerni stadijum proširuje.



Slika 9.5: Procesi degradacije mikrostrukture i pojava oštećenja po stadijumima puzanja

S obzirom na relativno dug radni vek koji se očekuje od komponentata izloženih puzanju, utvrđeno je da se u toku rada može tolerisati brzina deformacije usled puzanja od oko $3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, što odgovara $\sim 2\%$ - nom trajnom izduženju za period od 30 godina.

Na brzinu deformacije tokom puzanja utiču sledeći procesi koji se odvijaju u materijalu:

- deformaciono ojačavanje – porast broja dislokacija usled dejstva napona i pojave deformacije,
- oporavljanje - promena broja praznina i rasporeda dislokacija u deformisanom materijalu, što dovodi do promene fizičkih i mehaničkih karakteristika materijala,

- rekristalizacija - promena kod koje se usled procesa stvaranja i rasta novih zrna smanjuje broj dislokacija, čime se povećava brzina statičke deformacije
- izdvajanja taloga iz čvrstog rastvora praćeno osiromašenjem čvrstog rastvora - odvijanje ove pojave utiče dvojako na brzinu statičke deformacije sve dok je doprinos taložnog ojačavanja veći od gubitka ojačavanja usled osiromašenja čvrstog rastvora, pada brzina deformacije i
- prestarevanje taložno ojačanih legura – smanjenje broja čestica taloga i povećanje njihovog prečnika (ukrupnjavanje taloga) čime se povećava brzina statičke deformacije.

Procesi oporavljanje, rekristalizacija i prestarevanje povećavaju brzinu statičke deformacije dok je, taložno i deformaciono ojačavanje smanjuju. Generalno proces puzanja zahvaljujući navedenim procesima u prvoj polovini radnog veka dela dovodi do promena u mikrostrukтури, tzv. mikrostrukturne degradacije. Proces mikrostrukturne degradacije dovodi do pada čvrstoće i kada se steknu uslovi počinju da se pojavljuju oštećenja. Oštećenja kod puzanja su pore, čiji broj raste vremenom, one se spajaju prvo u mikroprrsline, a kasnije i u makroprrsline koje dovode konačno do loma, slika 9.5

9.1. Ispitivanje puzanja

Ispitivanje otpornosti na puzanje se sprovodi najčešće na epruvetama okruglog poprečnog preseka, slika 9.6, opterećivanjem epruveta na zadatoj temperaturi tegovima ili sistemom poluga i beleženjem promene izduženja sa vremenom. Epruvete se tokom ispitivanja nalaze u pećima kojima se termostatom reguliše temperatura ispitivanja. Uređaji za ovo ispitivanje se nazivaju puzalice. Standardno ispitivanje puzanja (prema EN ISO standardima) podrazumeva:

- merenje deformacije tokom puzanja
- merenje vremena do loma



slika 9.6: Epruveta za ispitivanje puzanja

Mehanička svojstva koja opisuju otpornost materijala na puzanje su:

1. Granica puzanja $R_{\epsilon}^{T(^{\circ}C)}/t(h)}$ - zatezni napon koji na temperaturi ispitivanja T nakon određenog vremena ispitivanja t izaziva u epruveti unapred definisanu trajnu deformaciju ϵ . Najčešće ona iznosi 0,1; 0,2; 0,5 ili 1 % (za austenitne čelike često iznosi 2%). Na primer $R_{1/100.000}^{540}$ predstavlja napon koje nakon 100.000 sati na 540°C dovodi do trajnog izduženja epruvete od 1%.
2. Vremenska čvrstoća $R_{B/t}^{T(^{\circ}C)}$ je onaj zatezni napon koji na temperaturi T nakon zadatog trajanja ispitivanja " t " dovodi do loma epruvete. Na primer $R_{B200,000}^{575}$ je napon koji dovodi do loma epruvete nakon 200.000h na temperaturi ispitivanja od 575°C.

3. U cilju vremenskog skraćenja dužine trajanja testa primenjuju se i kratkotrajna ispitivanja kojima je moguće odrediti granicu puzanja $R_{dvm/T}$. $R_{dvm/T}$ predstavlja konstantan napon koji između 25 i 35 sata ispitivanja izazvao brzinu puzanja od $\Delta\varepsilon/\Delta t=10^{-3}\%/h$, a dodatno, nakon rasterećenja, trajnu deformaciju od $\varepsilon_{pl}<0,2\%$. Kratkotrajnim ispitivanjem su obuhvaćeni samo prvi stadijum puzanja (početni stadijum) i deo drugog stadijuma u kome je brzina puzanja konstantna. Za zadovoljenje kriterijuma definisanog ovim svojstvom priraštaj izduženja ($\Delta\varepsilon$) između 25. i 35. sata ispitivanja (10 sati) mora da iznosi tačno $\Delta\varepsilon=0,01\%$. Dodatno nakon rasterećenja (nakon 45 sati) izduženje $\Delta\varepsilon$ mora biti manje od 0,2%.

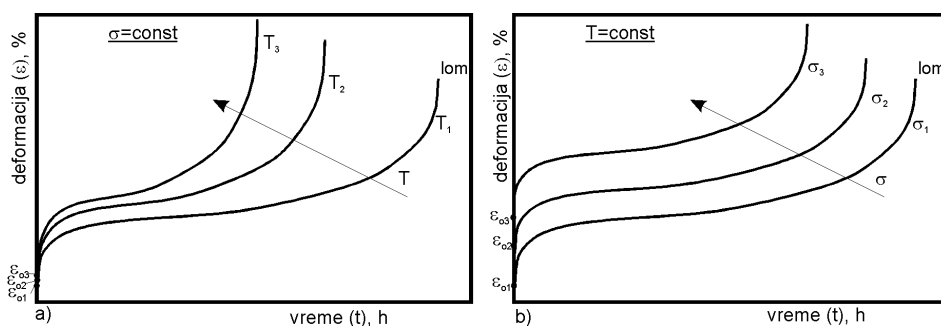
Za praktičnu primenu idealno bi bilo poznavanje krive puzanja koja je dobijena u uslovima delovanja radnih napona i temperatura koje odgovaraju realnim vrednostima, odnosno naponima i temperaturama kojima će neka komponenta da bude izložena tokom svog radnog veka. Međutim tada bi i vreme ispitivanja moralo da odgovara vremenu eksploatacije što sa tehničkog aspekta nije opravdano i isplativo. Zato je uobičajeno da se sprovode testovi na znatno višim temperaturama ili naponima većim od realnih, a naknadno se izvodi ekstrapolacija na radne parametre (napon i temperaturu) i određuje ukupna trajna statička deformacija za određeno vreme. Prilikom ekstrapolacije se može pojaviti greška koja je verovatnija ukoliko je ekstrapolisani period duži.

Parametarska ekstrapolacija se može primeniti na dva osnovna načina:

1. ekstrapolacijom napona i
2. ekstrapolacijom temperature.

Za slučaj ekstrapolacije napona koristi se zavisnost promene izgleda krive puzanja sa naponom i temperaturom. Ispitivanja se, u ovom slučaju, izvode na radnoj temperaturi i pri naponima koji su viši od radnih napona, pa se ekstrapolacija vrši sa eksperimentalnog na radni napon pri konstantnoj radnoj temperaturi.

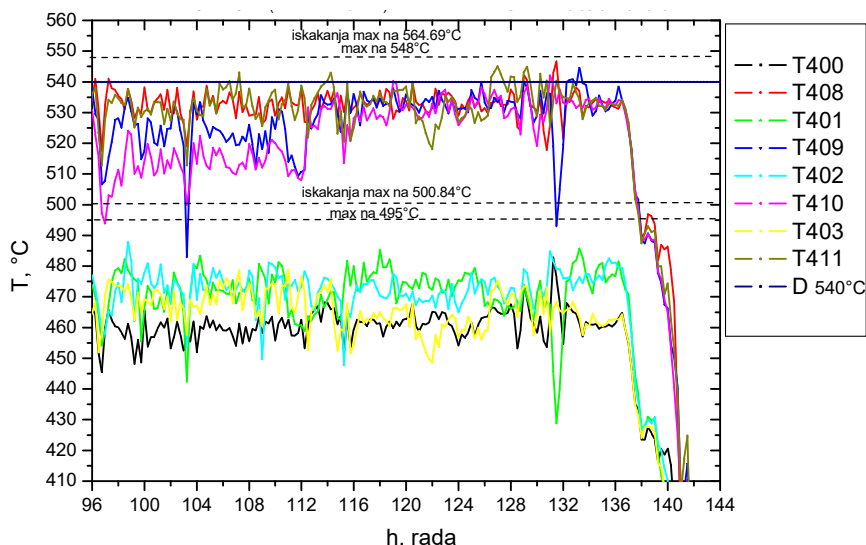
U slučaju ekstrapolacije temperature, ispitivanja se izvode na povišenoj temperaturi i radnom naponu, pa se vrši ekstrapolacija temperature sa eksperimentalne na radnu temperaturu pri konstantnoj vrednosti radnog napona.



Slika 9.7: Promena krive puzanja: a) sa temperaturom (T) i b) sa naponom (σ)

Ispitivanja novih materijala, kao i onih koji su bili u eksploataciji, dovela su do zaključka da ekstrapolacija temperature daje pouzdaniju procenu preostalog radnog veka do loma, od ekstrapolacije napona. Postupak ekstrapolacije temperature daje realniju sliku i sa aspekta mikrostrukturnih promena u materijalu

tokom puzanja, pa samim tim i sa aspekta mehanizama razaranja i promene mehaničkih osobina. Uočeno je da ubrzani testovi za ekstrapolaciju napona dovode do strukture različite od strukture na kraju radnog veka komponente, dok sa druge strane, testovi za ekstrapolaciju temperature izazivaju strukturu koja odgovara onoj na kraju radnog veka. Usled toga, procena radnog veka do loma dobijena na osnovu ekstrapolacije napona, može da pruži pogrešne rezultate. Zbog svojih višestrukih prednosti, danas se pre svega koristi postupak ekstrapolacije temperature



maksimalne zabeležene T na različitim mernim mestima (primer)

	T402	T403	T400	T401	T408	T409	T410	T411
25.9.2016	488.64	486.01	476.63	488.94	551.79	544.76	538.46	550.48
26.9.2016	488.79	482.78	480.29	493.48	550.77	546.67	545.05	549.16
27.9.2016	493.48	489.52	490.55	500.81	564.69	549.16	540.66	555.75
28.9.2016	487.91	484.84	484.69	499.34	555.02	549.89	533.77	549.01
29.9.2016	493.19	486.01	482.49	496.12	548.86	551.65	542.56	551.36
30.10.2016	487.47	487.91	500.81	497.58	562.05	557.95	548.86	549.6

Slika 9.8: Zapisi radnih temperatura (T) tokom eksploatacije na različitim mernim mestima

Razvijen je čitav niz parametarskih metoda koje omogućavaju ekstrapolaciju rezultata dobijenih ubrzanim testovima puzanja na povišenoj temperaturi (Larson-Miller, Manson-Haferd, Goldhoff-Sherby, Manson-Succop, Orr-Sherby-Dorn). Upoređenjem rezultata koji su dobijeni ovim vremensko-temperaturnim parametrima, zaključeno je da svi daju gotovo iste rezultate. Najpoznatiji i najčešće upotrebljavan parametar je Larson-Milerov parametar (LMP).

Veza između minimalne brzine puzanja i vremena do loma je uspostavljena preko Monkman-Grantova relacija:

$$t_f \times \dot{\epsilon}_{min} = C_{MG} = const \quad (9.1)$$

gde je: t_f vreme do loma, a C_{MG} Monkman-Grantova konstanta. Ova relacija važi u slučaju kada do razaranja dolazi nakon dugog perioda eksploatacije pri

uslovima delujućih napona niskog intenziteta. Monkman-Grantova relacija uspostavlja uzajamnu vezu između procesa deformacije i razaranja a takođe omogućava i određivanje preostalog radnog veka materijala na osnovu poznavanja deformacionih karakteristika. Izraz 9.1 pokazuje da su procesi razaranja i plastične deformacije pod kontrolom istog fizičkog mehanizma, jer im je proizvod konstantan. Takođe može da se uoči da razvoj oštećenja, koji povećava minimalnu brzinu puzanja, dovodi do smanjenja vremena do loma i obrnuto.

Da bi se sproveo postupak proračuna radnog veka (vremena do loma) potrebno je što preciznije poznavanje radnog napona i temperature. U praksi se koriste podaci dobijeni praćenjem eksploatacionih parametara (pritiska i temperature), slika 9.8. Kod postrojenja koja nemaju savremene sisteme monitoringa ovi podaci se nalaze na mernim trakama koje se moraju očitavati. Mora se imati u vidu da tokom rada dolazi do promena radne temperature tako da je svaka komponenta, iako najveći deo vremena provede na radnoj temperaturi, u određenom vremenskom periodu izložena i dejstvu temperatura koje su više i niže od radne.

9.2. Mehanizmi deformacije čelika tokom puzanja

Ako promene koje se dešavaju tokom plastične deformacije tokom procesa puzanja posmatramo na mikro nivou, moguće je definisati pet osnovnih mehanizama plastične deformacije, od kojih su sa aspekta toplotnopoostojanih čelika, interesantna četiri (dvojnikanje je, u opštem slučaju, značajno za niske temperature):

- dislokaciono klizanje - kretanje dislokacija po ravnima klizanja;
- dislokaciono puzanje - kretanje dislokacija mehanizmom uspinjanja – spuštanja i savladavanje prepreka zahvaljujući difuziji praznina i intersticijala;
- klizanje po granicama zrna - relativno kretanje jednog zrna u odnosu na drugo duž zajedničke granice i
- difuziono puzanje - samodifuzija praznina i intersticijala kroz materijal.

Tokom plastične deformacije koja se odvija pod uticajem konstantnog opterećenja malim brzinama na povišenim temperaturama, pored mehanizama koji su karakteristični za niske temperature (klizanje dislokacija), aktiviraju se i mehanizmi karakteristični za visoke temperature (klizanje po granicama zrna, uspinjanje – spuštanje, odnosno puzanje dislokacija i difuziono puzanje). U slučaju dislokacionog klizanja, brzina deformacije materijala kontrolisana je kretanjem ivičnih dislokacija po ravnima klizanja. Teorije deformacionog ojačavanja polaze od pretpostavke da dislokacije u međusobnoj reakciji obrazuju nepokretne dislokacije, koje predstavljaju prepreke za kretanje drugih dislokacija. Ivične dislokacije zaobilaze prepreke mehanizmom uspinjanja i spuštanja i nastavljaju kretanje po drugim kliznim ravnima.

Sumarano, dominantni mehanizmi deformacije i razvoja oštećenja koji deluju u materijalu tokom ispitivanja na puzanje u uslovima zatezanja u toku sva tri stadijuma su:

- a) prvi stadijum - porast gustine dislokacija,

- b) drugi stadijum - umnožavanje i usmeravanje dislokacija pri ravnotežnoj brzini deformacije (sporo i stabilno stvaranje oštećenja) i
- c) treći stadijum - oštećenje materijala usled obrazovanja mikropora, mikroprslina i rasta prslina puzanja.

Ako se pretpostavi da je napon σ samo funkcija vremena t i deformacije ε , onda se on može izraziti na sledeći način:

$$d\sigma = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial t}\right)_{\varepsilon} dt + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}\right)_t d\varepsilon = -r dt + h d\varepsilon \quad (9.2)$$

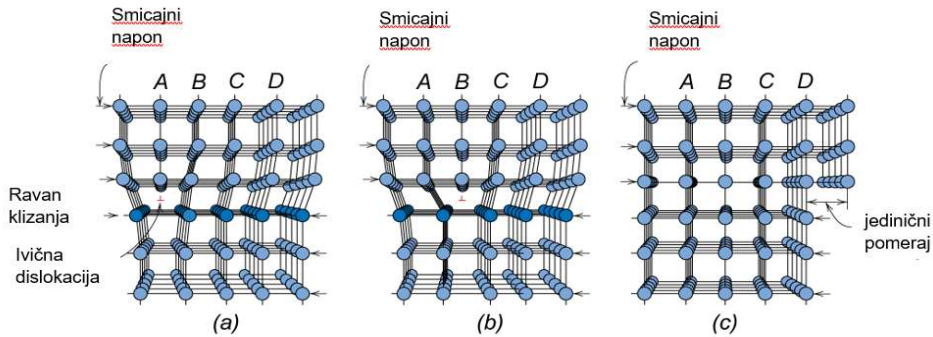
gde je: r - brzina oporavljanja i h - koeficijent deformacionog ojačavanja. U uslovima delovanja konstantnog napona, $d\sigma=0$, iz prethodnog izraza sledi:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{r}{h} \quad (9.3)$$

Iz izraza 9.3 sledi da je minimalna brzina deformacije, rezultat dinamičkog uravnoteženja procesa deformacionog ojačavanja pod dejstvom radnog napona i procesa oporavljanja.

Dislokaciono klizanje. Dislokacija je termodinamički nestabilna greška koja povećava slobodnu energiju kristala. Pri delovanju smicajnog napona, dislokacija teži da promeni svoj položaj nestabilne ravnoteže i zauzme najbliži položaj stabilne ravnoteže, pomeranjem za jedno međuatomsko rastojanje. Klizanje se odvija sukcesivnim pomeranjem pojedinačnih atoma ili manjih grupa atoma dislokacije. Kada se atomi jedne kristalne ravni, ovakvim kretanjem pomere do površine kristala, formira se klizna stepenica, a dislokacija nestaje, slika 9.9. Ovakvo kretanje dislokacija, pod dejstvom smicajnog napona, po kliznim ravnima naziva se dislokaciono klizanje. Deformacija kristala koja se javlja pri prolasku jedne dislokacije kroz ceo kristal, odgovara veličini jednog Burgesovog vektora. Da bi se ostvarila deformacija makroskopska deformacija, potrebno je istovremeno kretanje velikog broja dislokacija. Mehanizmom dislokacionog klizanja dislokacija može da se kreće samo u ravni u kojoj se nalaze Burgesov vektor i dislokaciona linija.

Deformaciono ojačavanje se ostvaruje zaustavljanjem dislokacija: ili njihovim delimičnim blokadama na preprekama kao što su atmosfere rastvorenih atoma legirajućih elemenata ili njihovim potpunim blokadama na preprekama tipa čestica taloga ili spletova dislokacija. Delimične blokade se postižu rastvorenim atomima u čvrstom rastvoru. Oko atoma rastvorenih elemenata u čvrstom rastvoru se stvara naponsko polje (zatezno ako su ovi atomi manji od atoma osnovnog elementa i pritisno u slučaju ako su veći) koje u uzajamnom dejstvu sa elastičnim poljem dislokacija dovodi do povećanja ravnotežne koncentracije rastvorenih atoma u okolini dislokacije u odnosu na koncentraciju ovih atoma u okolnom metalu. Usled toga se stvaraju atmosfere rastvorenih atoma oko dislokacije koje ometaju njeno kretanje (delimične blokade su posledica rastvarajućeg ojačavanja).



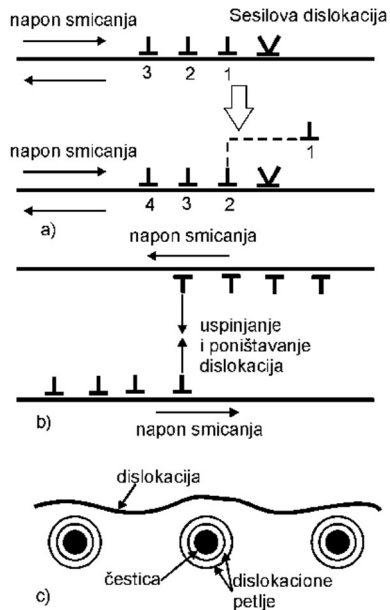
Slika 9.9: Faze kretanja ivičnih dislokacija (a)-(c)

Čestice sekundarne faze (talog – potpuna blokada) mogu biti koherentno, delimično koherentno ili nekoherentno vezane sa osnovom. Karbidi u čelicima su nekoherentne čestice taloga i one se ne mogu preseći, već samo običi poprečnim klizanjem ili Orovanovim mehanizmom. Ako je napon manji od kritičnog smicajnog Orovanovog napona $\tau = Gb/L$, dislokacija je blokirana česticom i može je zaobići samo poprečnim klizanjem. Ako je napon u materijalu veće od kritičnog (potrebno da se dislokacija savije u luk poluprečnika $L/2$), dislokacija će običi česticu ostavljajući za sobom dislokacione petlje koje se nazivaju Orovanove petlje. Ove petlje oko čestice smanjuju efektivno rastojanje između čestica, čime povećavaju kritični Orovanov napon i otežavaju kretanje dislokacija i tako dovode do disperzionog (taložnog) ojačavanja. Povećana gustina dislokacija dovodi do povećanog otpora daljoj plastičnoj deformaciji, zbog blokiranja kliznih ravni stvaranjem Lomer-Kotrelovih prepreka. Relaksacija se, sa druge strane, ostvaruje mehanizmima uspinjanja-spuštanja i poprečnog klizanjem dislokacija (što zajedno čini puzanje dislokacija), koji omogućavaju dalji nastavak klizanja dislokacija. Kada se odnos r/h poremeti dolazi do povećanja brzine puzanja, razvoja oštećenja i razaranja. Kada se odnos r/h poremeti dolazi do povećanja brzine puzanja, razvoja oštećenja i razaranja.

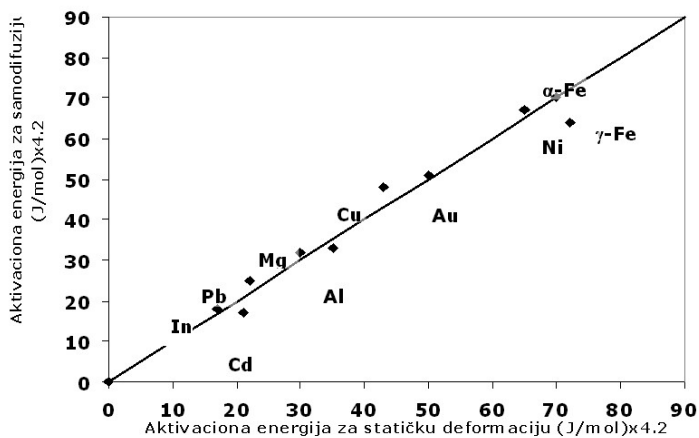
Dislokaciono puzanje. Da bi se ostvarila dalja plastična deformacija potrebno je povećati opterećenje ili pri nepromenjenom opterećenju povisiti temperaturu. Ivične dislokacije tada mogu da obilaze prepreke (nepokretne dislokacije, čestice taloga, atmosfere rastvorenih atoma) mehanizmom uspinjanja i nastave svoje kretanje, što najčešće predstavlja mehanizam kojim se opisuje puzanje. Drugim rečima, iako se deformacija prvenstveno ostvaruje klizanjem, faktor koji kontroliše količinu klizanja je uspinjanje dislokacija savladavanjem prepreka po nekom od mogućih mehanizama Uspinjanje počinje na temperaturama višim od $1/3$ temperature topljenja.

Na slici 9.10a je šematski prikazan jedan od mehanizama kojim dislokacije savladavaju prepreku: blokirajuće dejstvo Sesilove dislokacije, koja izaziva nagomilavanje dislokacija ispred nje i uspinjanje dislokacije ispred prepreke koje omogućava nastavak deformacije klizanjem. Drugi mehanizam se javlja kada se dislokacije iz paralelnih ravni, ali suprotnog znaka, uspinju jedna prema drugoj, slika 9.10b, što smanjuje gustinu dislokacija u metalu. Treći mehanizam je prikazan na slici 9.10c, a odnosi se na dislokacione petlje koje okružuju čestice taloga ili uključke. Prema Orovanu, razvoj jedne ili više petlji oko čestica taloga

blokira kretanje narednih dislokacija. Zahvaljujući uspinjanju, ivične komponente petlji mogu da se pomeraju iznad i preko čestica da bi se međusobno poništile, dok preostali delovi petlji, koji su u osnovi zavojne orijentacije, mogu da se kreću klizanjem.



Slika 9.10: Uspinjanje dislokacija: ivične komponente dislokacije oko dislokacione petlje



Slika 9.11: Zavisnost aktivacione energije za samodifuziju i aktivacione energije za statičku deformaciju

Uspinjanje i spuštanje dislokacija i poprečno klizanje delujući zajedno, izazivaju znatno veći stepen oporavljanja nego samo dislokaciono klizanje koje preovlađuje u prvom stadijumu puzanja. Međutim, uspinjanje-spuštanje

dislokacija zahteva veću aktivacionu energiju od poprečnog klizanja pa brzinu oporavljanja određuje sporiji proces uspinjanja-spuštanja, koji zavisi od brzine difuzije praznina. Oдавde sledi da brzina statičke deformacije zavisi od temperature na isti način na koji i brzina difuzije i da ima istu aktivacionu energiju. Ovo objašnjava zašto je aktivaciona energija za statičku deformaciju kod većine metala jednaka aktivacionoj energiji za samodifuziju, slika 9.11.

Difuziono puzanje. Difuziono puzanje je mehanizam deformacije baziran na kretanju praznina usled dejstva opterećenja, za razliku od mehanizma dislokacionog puzanja koji je zasnovan na kretanju dislokacija,

Nabaro i Hering, kao i Koble su proučavajući ovaj mehanizam, pretpostavili da zapreminska samodifuzija može da izazove plastičnu deformaciju prenosom atoma i praznina iz granica zrna koje se nalaze u zoni pritiska, u granice zrna koje su u zoni zatezanja. Prema tome, granice pod uticajem pritiska su izvori, dok su istovremeno granice pod uticajem zatezanja ponori za difuziju.

Uvažavajući pretpostavku da su granice zrna jedini mogući izvori i ponori praznina, brzina difuzione deformacije je kontrolisana difuzijom na rastojanjima veličine kristalnih zrna. Pri visokim temperaturama i/ili niskim naponima, brzina deformacije je kontrolisana zapreminskom difuzijom (Nabaro-Hering puzanje), dok se pri niskim temperaturama i/ili visokim naponima uglavnom odvija difuzija po granicama zrna (puzanje po Kobleu).

Mehanizmi difuzionog puzanja zahtevaju niže vrednosti napona u odnosu na dislokaciono puzanje. Zbog toga se jedan deo deformacije u realnim uslovima puzanja mašinskih delova ostvaruju mehanizmom difuzionog puzanja.

Klizanje granica zrna. Klizanje granica zrna predstavlja relativno pomeranje jednog zrna u odnosu na drugo duž zajedničke granice i odvija se kretanjem dislokacija, čiji Burgersov vektor leži u ravni granice zrna. Tokom ovog pomeranja, prepreke koje otežavaju kretanje dislokacija dovode do povećanja unutrašnjeg napona. Kretanje se nastavlja kada se dislokacije nagomilane na prepreci premeste u granicu zrna mehanizmom uspinjanja-spuštanja, čime se postiže ravnomerniji raspored dislokacija duž granice zrna. To znači da ovaj mehanizam dobija na značaju tek na temperaturama na kojima je omogućeno kretanje dislokacija mehanizmom uspinjanja i spuštanja.

Proces klizanja po granicama zrna izaziva u okviru zrna koncentraciju elastičnih napona, difuziju atoma i nukleaciju i rast pora i/ili mikroprslina na granicama zrna. Pore i/ili mikroprslina nastaju u slučaju kada je unutrašnji napon, nastao usled ometenog kretanja dislokacija veći od čvrstoće granice zrna, i javljaju se po granicama zrna koje su normalne (ili približno normalne) na pravac dejstva glavnog napona.

Karte mehanizama deformacije. Karte mehanizama deformacija predstavljaju pogodan način za prikazivanje grafičke zavisnosti ponašanja materijala tokom procesa puzanja u uslovima različitog opterećenja i temperature.

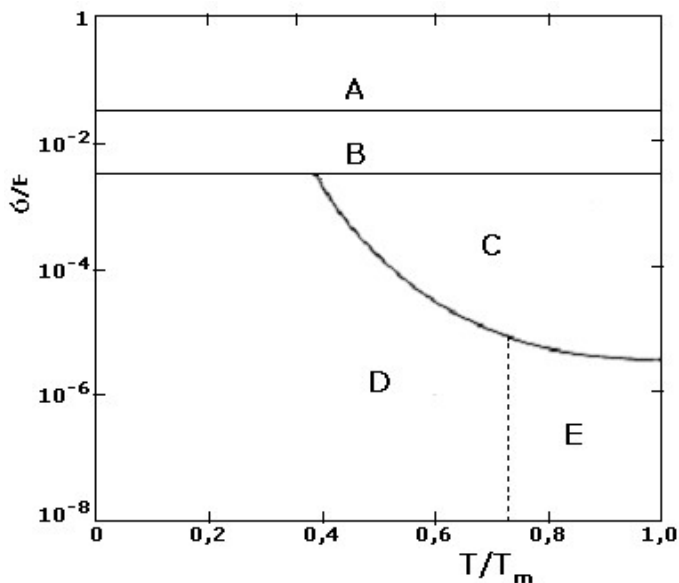
Na idealizovanoj karti mehanizama deformacije prikazanoj na slici 9.12 uočava se u gornjem delu oblast teorijske čvrstoće (oblast A). Ispod ove oblasti, za vrednosti napona od oko $10^{-2} E$ i pri svim temperaturama, dominantan mehanizam deformacije je dislokaciono klizanje (oblast B). Pri srednjim vrednostima opterećenja i temperaturama iznad 0,3 do 0,4 T_f olakšan je proces

uspinjanja - spuštanja dislokacija, koji omogućuju odvijanje mehanizma dislokacionog puzanja (oblast C).

Sa porastom temperature difuziono Koble puzanje (oblast D) zamenjuje se difuzionim Nabaro-Heringovim puzanjem (oblast E) pri nižim nivoima napona, odnosno dislokacionim puzanjem (oblast C) pri srednjim nivoima napona. Na mapi mehanizama deformacije nije posebno izdvojena oblast klizanja po granicama zrna, zato što se ne mogu definisati spoljašnji uslovi pri kojima bi dominiralo klizanje po granicama zrna u odnosu na druge mehanizme deformacije. Na slici 9.13 je šematski prikazana jedna takva mapa mehanizama deformacije, konkretno za čelik 1CrMoV.

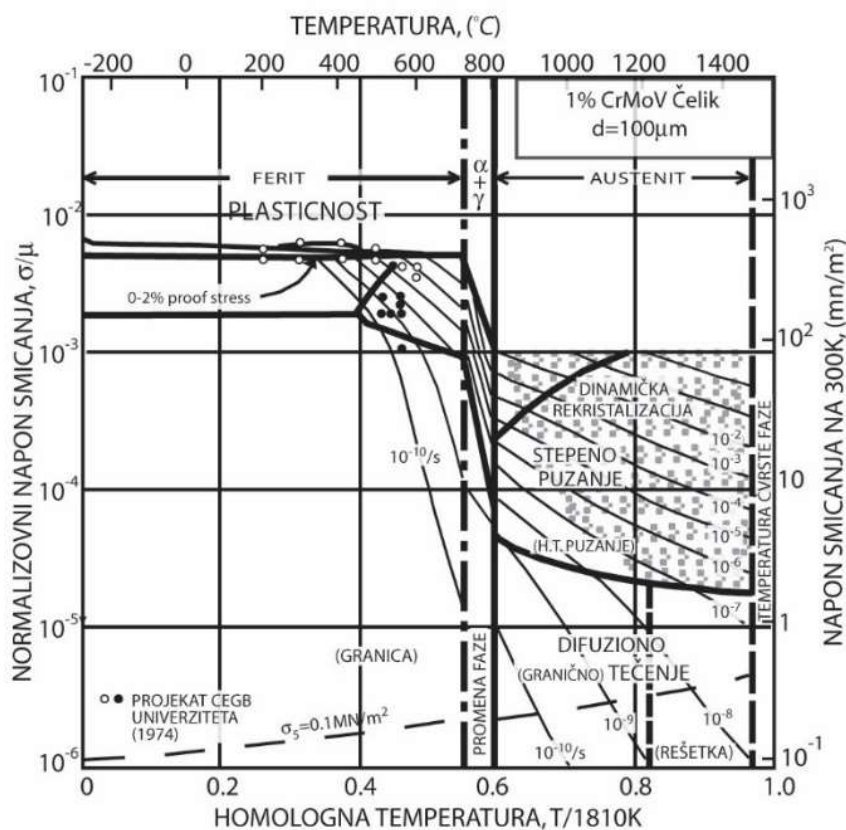
Najveća praktična prednost mapa mehanizama deformacije leži u smernicama koje one daju pri ekstrapolaciji podataka o puzanju u realnim uslovima. Većina testova puzanja u laboratoriji se obavlja u toku jedne godine ili manjeg perioda a samo ponekad u toku više godina, dok su inženjerske konstrukcije, kao što su termoenergetska postrojenja, projektovane da rade najmanje 25 godina. Laboratorijski podaci mogu da se ekstrapoliraju za uslove koji postoje u praksi sa izvesnom pouzdanošću jedino ako se i jedan i drugi nalaze u istom području deformacione mape.

Najsadržajnu zbirku podataka o materijalima koji su od značaja za konstruisanje deformacionih mapa su sakupili Frost i Ashby (u svetskoj literaturi je za ove mape aktuelan i naziv Ashby-jeve deformacione mape) i izradili deformacione mape za preko 40 materijala, uključuju čiste metale, komercijalne legure i keramičke materijale.



Slika 9.12: Idealizovana mapa mehanizama deformacije:

A – oblast teorijske čvrstoće; B – oblast dislokacionog klizanja; C – oblast dislokacionog puzanja; D – oblast Kobleovog difuzionog puzanja i E – oblast Nabaro-Heringovog difuzionog puzanja



Slika 9.13: Mapa deformacionih mehanizama puzanja za čelik 1CrMoV

Model puzanja. Zavisnost deformacije puzanja od napona u okviru drugog stadijuma puzanja, pri konstantnoj temperaturi može da se prikaže Nortonovim zakonom, prema jednačini:

$$\dot{\epsilon}_s = B\sigma^n \quad (9.4)$$

ili

$$\dot{\epsilon}_s = B(\sigma - \sigma_p)^n \quad (9.5)$$

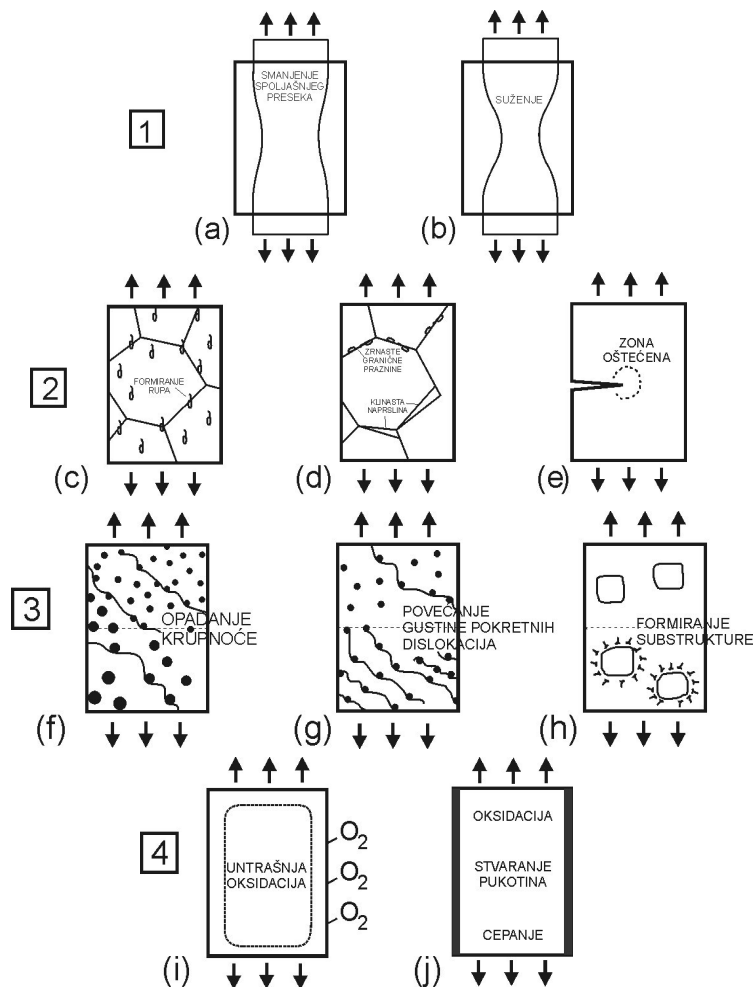
koji uspostavlja vezu između brzine deformacije i efektivnog napona ($\sigma - \sigma_p$) koji predstavlja razliku spoljašnjeg (primenjenog) napona σ i „praga” napona σ_p .

9.3. Oštećenja čelika na povišenim temperaturama

Kod elemenata koji su tokom eksploatacije izloženi dejstvu povišenih temperatura, dominantni mehanizam koji doводи do degradacije i oštećenja materijala je puzanje. Radne temperature tokom eksploatacije i naponi dovode do promena u materijalu, kako na mikro, tako i na makro nivou, koje se manifestuju kroz promene mehaničkih i fizičkih osobina čelika.

Oštećenja usled puzanja mogu da se podele u četiri opšte kategorije, šematski prikazane na slici 9.14.:

1. smanjenje spoljašnjeg poprečnog preseka bez i sa stvaranjem „vrata”,
2. slabljenje poprečnog preseka usled stvaranja pora, mikro i makroprslina,
3. oštećenja izazvana degradacijom mikrostrukture i
4. oštećenja koja su posledica interakcije sa okolinom.



Slika 9.14: Šematski prikaz četiri opšte kategorije oštećenja usled puzanja

Svaka od navedenih kategorija oštećenja usled puzanja može pojedinačno da dovede do loma, ali su u praksi razaranja češće izazvana simultanim ili vremenski pomerenim dejstvom dve ili više njih.

Oštećenje izazvano smanjenjem spoljašnjeg poprečnog preseka.

Tokom puzanja, pri konstantnom zateznom opterećenju, poprečni presek materijala se smanjuje, napon se lagano povećava i brzina puzanja raste. U odsustvu ostalih mehanizama oštećenja, lom se događa kada se tzv. vrat obrazovan na materijalu u teorijskom smislu smanji do tačke. Obično, u poslednjem stadijumu - smanjenja poprečnog preseka, a pre pojave samog loma, aktiviraju se i ostali mehanizmi oštećenja. Istraživanja su pokazala da na vrlo visokim temperaturama (iznad $0,8T_t$; T_t - temperatura topljenja) najčešće dolazi do razaranja čistih metala i čvrstih rastvora samo zbog smanjenja poprečnog preseka.

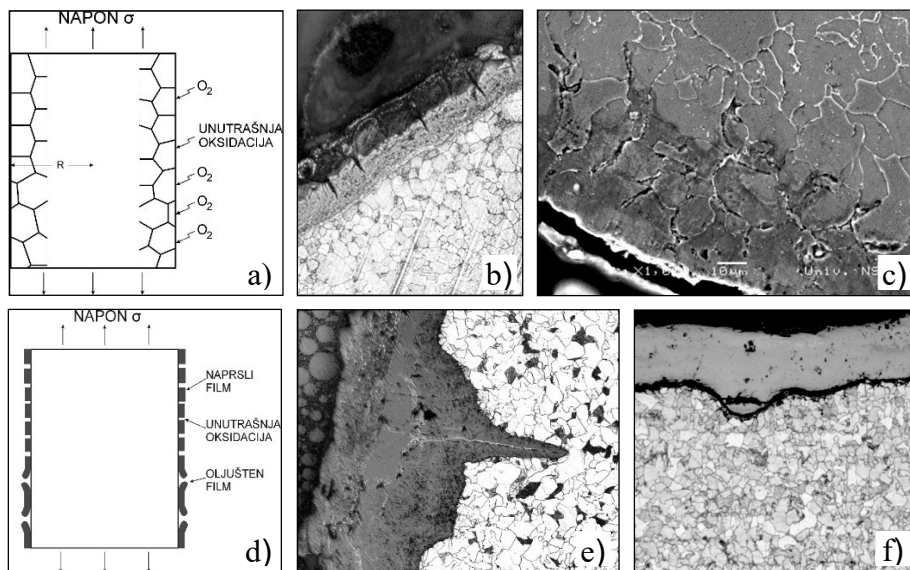
Oštećenje izazvano slabljenjem poprečnog preseka. Mehanizam koji je najopsežnije proučavan i eksperimentalno i teorijski je obrazovanje pora unutar zrna ili na granicama zrna. Pore se obično javljaju na granicama zrna koje se pružaju približno normalno u odnosu na pravac maksimalnog glavnog zateznog napona. Mnogobrojni čisti metali i industrijske legure (uključujući i najvažnije superlegure na bazi nikla, kao i feritne i austenitne čelike) se razaraju pod dejstvom ovog mehanizma, iako je češći slučaj da u razaranju učestvuju i ostali mehanizmi oštećivanja. Pore mogu da zauzmu različite oblike (sferne, w, r) što zavisi od njihovog rastojanja, mesta gde se javljaju, temperature i brzine deformacije.

Rast pojedinačnih dominantnih prslina. Za industrijske komponente je karakteristično da često imaju nehomogenu prostornu raspodelu napona, koja može da rezultuje u obrazovanju diskretnih prslina, često prouzrokovanih lokalnom pojavom pora usled puzanja. U vrhu ovih prslina se obrazuje zona oštećenja malih dimenzija, kroz koju se prslina dalje širi. Širenje diskretnih prslina je značajno kod masivnih komponenata, kod kojih su naponi mali.

Ubrzavanje puzanja izazvano promenom substrukture. Kod materijala komponenti koje rade u uslovima visokih parametara u trećem stadijumu puzanja može da dođe do porasta i ogrubljivanja primarnog zrna, s tim što ova promena ne mora da prouzrokuje i neki značajniji porast brzine puzanja. Mnogo veći značaj na povećanje brzine puzanja, posebno kod velike grupe legura na bazi nikla, ima promena u dislokacionoj substrukтури, odnosno starenje materijala u uslovima puzanja. Porast brzine puzanja je u funkciji načina na koji se akumuliraju dislokacije tokom puzanja, pri čemu se uobičajeno razmatraju dva moguća slučaja. U prvom slučaju, u uslovima delovanja niskih napona, mnogo ispod napona tečenja ($\sigma=0.1R_e$) kretanje dislokacija je kontrolisano njihovim uspinjanjem. Iako je pokretljivost dislokacija po ovom mehanizmu mala, može da dođe do pojave deformacije, s tim što je ona ograničena gustinom dislokacija koje se kreću mehanizmom uspinjanja. Povećanje gustine ovih dislokacija utiče na porast brzine puzanja. Sa druge strane, kada je reč o visokim naponima ($\sigma=0.5R_e$) dolazi do obrazovanja čelijske dislokacione substrukture, koja omogućava veću brzinu procesa oporavljanja a time i porast brzine puzanja.

Oštećenje izazvano degradacijom mikrostrukture - termičko ogrublivanje čestica. U cilju obezbeđenja eksploatacije na visokim parametrima, mnoge legure su ojačane česticama sekundarne faze: γ' -česticama u superlegurama, intermetalidima u legurama aluminijuma i karbidima i nitridima u čelicima. Tokom puzanja dolazi do rasta i ogrublivanja ovih čestica i njihovog izdvajanja u stabilnijem obliku pri čemu oba ova procesa starenja mogu da ubrzaju puzanje.

Oštećenje izazvano unutrašnjom oksidacijom. Izlaganje komponente agresivnim gasovima, pre ili za vreme puzanja, često uslovljava porast brzine puzanje čime se istovremeno smanjuje i radni vek. Ako se npr. komponenta zagreva u oksidnoj atmosferi, može da dođe do prodora kiseonika u metal, izuzev u slučaju kada on učestvuje u obrazovanju zaštitnog oksidnog sloja koji ostaje netaknut tokom puzanja. Kiseonik koji difunduje u metal reaguje sa prisutnim nečistoćama, pri čemu se stvara zona unutrašnje oksidacije, slike 9.15a-c. U ovoj zoni može da dođe do obrazovanja gasnih mehurića (CO_2 i H_2O) na granicama zrna ili se istaloženi čvrsti oskid ponaša kao jezgro za obrazovanje novih pora pri čemu i mehurići i pore utiču na smanjenje čvrstoće materijala unutar ove zone.



Slika 9.15: Oksidacija: a) šematski prikaz unutrašnje oksidacije: b) austenitnog čelika i c) niskolegirano čelika); d) šematski prikaz spoljašnje oksidacije: e) sa gasne strane i f) sa strane pare

Oštećenje izazvano razaranjem spoljašnjeg oksidnog sloja. Usled delovanja statičkih ili dinamičkih opterećenja može da dođe do oštećenja ili čak i do pucanja zaštitnog površinskog oksidnog sloja, slike 9.15 d i e. Na slici 9.15f je prikazan neoštećeni oksidni sloj. Kada se to dogodi, okolni gas počinje da deluje ili na nastalim prslinama koje takođe mogu da se ponašaju kao izvori unutrašnje oksidacije ili direktno na metal.

9.4. Klasifikacija oštećenja od puzanja kod čelika

Pore. Dominantan mehanizam deformacije u poslednjem stadijumu puzanja je mehanizam klizanja po granicama zrna, kojim se obrazuju nukleusi mikropora (skupovi atomskih praznina kritične veličine), koji kasnije rastu različitim mikromehanizmima. Mikropore, međutim, mogu nastati i u ranijim stadijumima puzanja, pa čak i u primarnom stadijumu. Neki autori smatraju da se jezgra stvaranja pora formiraju još u procesu fabrikacije elemenata i pripreme materijala, pre eksploatacije i nezavisno od njenih uslova. Uticaj mikropora na proces puzanja, neposredno po njihovom nastanku, nije veliki, ali u kasnijim fazama dolazi do povećanja njihovog broja i rasta, pa se njihov uticaj povećava progresivnim slabljenjem materijala. Tokom razvoja oštećenja, pore koje se spajaju, orijentišu se duž granica zrna koje su više opterećene, grupišu i obrazuju mikroprslina. Povezivanjem mikroprslina u procesu puzanja nastaju makroprslina.

U okviru procesa razaranja materijala, izazvanog pojavom pora po granicama zrna usled puzanja, mogu da se uoče sledeće faze: stvaranje pora, rast pora, spajanja (koalescencije) pora i stvaranja mikroprslina i razvoj magistralne prslina koja dovodi do konačnog razaranja.

Stvaranje pora. U toku rada u uslovima visokotemperaturnog puzanja, dolazi do kontinualnog stvaranja pora, kako unutar zrna tako i po njegovim granicama. Pore koje nastaju u unutašnjosti zrna uglavnom nemaju veliki uticaj na deformaciju čelika u uslovima puzanja, za razliku od pora nastalih po granicama zrna koje značajno na nju utiču i opasnije su za materijal. Intenzitet formiranja pora u funkciji je vremena eksploatacije čelika, temperature i naponskog stanja. Stvaranje pora po granicama zrna se objašnjava sledećim mehanizmima:

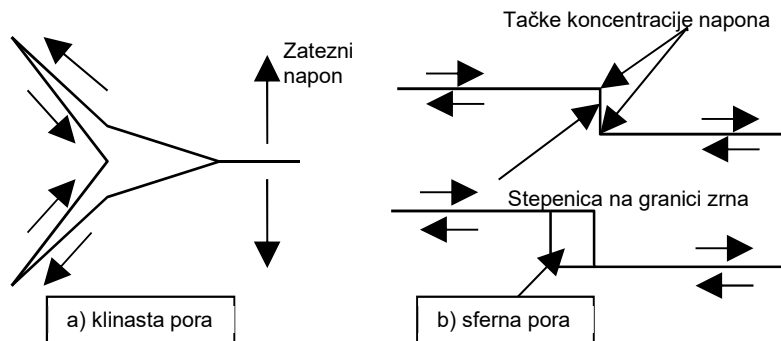
- deformacioni mehanizam,
- difuzioni mehanizam i
- mešoviti (difuzioni mehanizam potpomognut deformacionim).

Deformacioni mehanizam se zasniva na pretpostavci da se pore stvaraju pre svega usled deformacionih procesa po granicama i telu zrna, u funkciji veličine brzine međusobnog pomeranja zrna (usled klizanja po granicama zrna). Ovaj mehanizam je značajan pri velikim brzinama puzanja.

Difuzioni mehanizam pretpostavlja da do stvaranja pora dolazi usled napona koje izaziva kristalna rešetka prezasićena prazninama, odnosno usled difuzionih procesa pri klizanju po granicama zrna. Ovaj mehanizam je dominantan pri malim brzinama puzanja. Povišena radna temperatura dovodi do povećanja pokretljivosti praznina u okviru kristalne rešetke, dok postojeća deformacija dovodi do povećanja koncentracije praznina u odnosu na ravnotežnu, što stvara povoljne uslove za stvaranje pora.

Zbog svoje složenosti, oba ova mehanizma se u inženjerskoj praksi mogu primeniti samo uz određena ograničenja. Ispitivanjima je utvrđeno da se stvaranje pora dešava relativno homogeno na svim granicama zrna, ali da su za rast sposobne one pore, koje leže na granicama zrna, normalno orijentisanim na pravac dejstva glavnog napona.

Stvaranje pora se odvija kontinualno tokom celog procesa deformacije puzanjem, brzinom približno proporcionalnoj brzini deformacije. Usled postojanja koncentracije napona na mestima oštećenja, sekundarnih faza, uključaka, itd. (lokalni napon je po pravilu veći od primenjenog), pore se obrazuju pri relativno niskim primenjenim naponima. Način stvaranja klinastih i sfernih pora prikazan je na slici 9.16.



Slika 9.16: Mehanizam stvaranja klinastih i sfernih pora

Od mesta u mikrostrukturi sa izraženom koncentracijom napona mogu da se navedu kao najznačajnija:

- granice pod velikim uglom (mesta sa razdvajanjem granice ili na spojevima više granica);
- mesta istaloženih čestica sekundarne faze po granicama zrna i
- mesta segregacije elemenata iz čvrstog rastvora po granicama zrna.

Ispitivanjima je utvrđeno da se stvaranje pora dešava relativno homogeno na svim granicama zrna, ali da su za rast sposobne one pore, koje leže na granicama zrna, normalno orijentisanim na pravac glavnog napona. Najznačajnije mesto obrazovanja pora je njihova nukleacija na česticama sekundarne faze. Prisustvo različitih uključaka (karbida, oksida, sulfida i silikata), na granicama zrna koje su orijentisane normalno na pravac dejstva glavnih napona, pogoduje stvaranju pora, jer predstavljaju koncentratore napona. Izdvajanje ovih čestica stvara pritisak na okolni materijal i on se procesima difuzije duž granice zrna ili deformacijom, prilagođava ovoj promeni. Formiranje pore oko čestice taloga moguće je i kada je koeficijent termičkog širenja materijala veći od koeficijenta termičkog širenja čestice. Povećanjem gustine oštećenja u čeliku, energija aktivacije puzanja se smanjuje, a time, razvojem mikrooštećenja po granicama zrna, naglo olakšava deformacija i ubrzava proces razaranja.

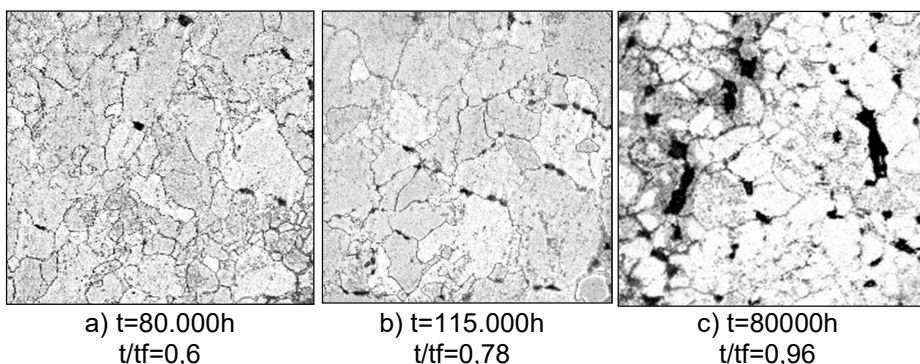
Čestice velike tvrdoće, kao što su karbidi, na granicama zrna su izložene visokim naponima smicanja pri klizanju zrna. Veličina napona može biti veća od čvrstoće veze čestica - granica zrna, zbog čega pore najčešće nastaju na mestu kontakta okolnog materijala i čestice. Veličina napona koja dovodi do stvaranja pore opada sa veličinom čestica, povećanjem njihovog međusobnog rastojanja i sa povećanjem veličine zrna.

Kao povoljna mesta za stvaranje pora uočena su i mesta segregacije atoma legirajućih elemenata iz čvrstog rastvora po granicama zrna. Koncentracija rastvorenog elementa može da bude, lokalno u zoni granice zrna, deset do hiljadu puta veća od srednje koncentracije tog elementa u leguri (slučaj koji se najčešće javlja pri termičkoj obradi). Ovo dovodi do povećanja energije granice zrna usled prisustva atoma primesa i opadanja čvrstoće veze dva susedna zrna što olakšava uslove za obrazovanje pora.

Klasifikacija oštećenja izazvanih nastankom pora. Iz koncepta ocene oštećenja mikrostrukture tokom puzanja proistekle su i mnogobrojne klasifikacije tih oštećenja od kojih je možda najpoznatija Neubauerova, tabela 9.1.

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

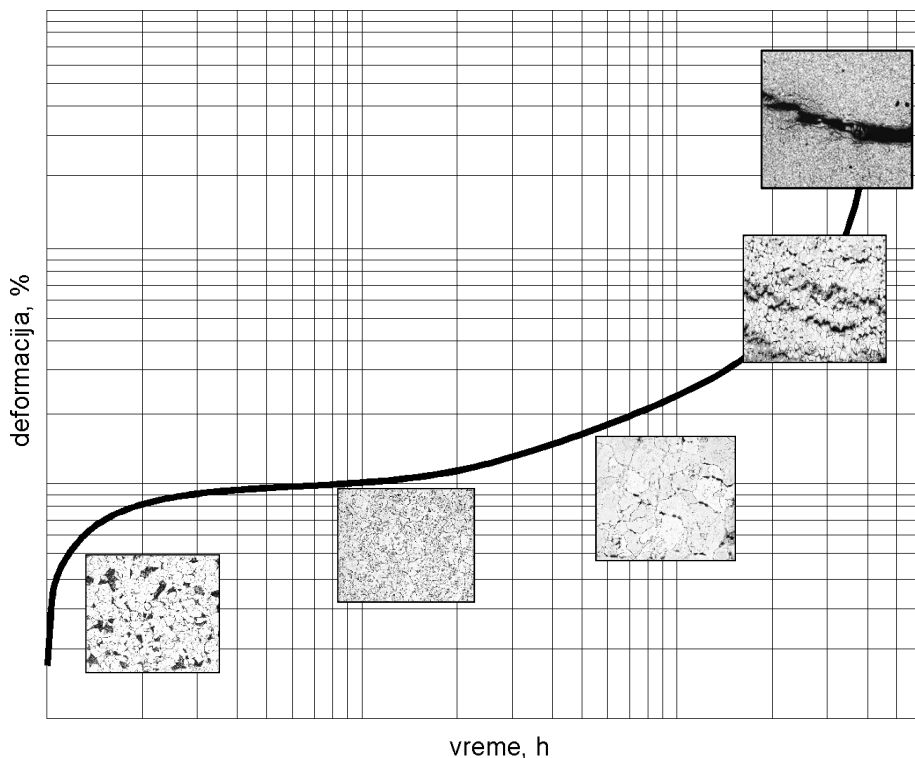
Stepen promena	Mikrostrukturna procena otkrivena metalografskim ispitivanjima
0	Uobičajena mikrostruktura za novu komponentu
1	Uobičajena mikrostruktura za radne uslove; tek započela ili uznapredovala transformacija ili taloženje sekundarne faze
2	Započele promene usled puzanja: a) lančani oblik, orijentisani karbidi u granicama zrna b) izolovane mikropore u granicama zrna nepravilnog rasporeda c) nekoliko mikropora u granicama zrna nepravilnog rasporeda
3	Uznappedovali proces oštećivanja usled puzanja: a) mikropore u granicama zrna orijentisane normalno na pravac glavnog napona b) razdvajanje granica zrna (dužina jedne granice)
4	Uznappedovalo 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, mikroporsline duže od jedne granice zrna nastale spajanjem pora

Sve klasifikacije su zasnovane na činjenici da je odvijanje puzanja kod čelika povezano sa pojavom pora. Međusobnim povezivanjem pora tokom vremena postepeno se obrazuju mikroprslina a zatim makroprslina koje konačno iniciraju lom. Veličina i gustina pora se povećavaju sa prelaskom od sekundarnog ka tercijarnom stadijumu puzanja. Veličina pora u velikoj meri zavisi od tipa materijala i obično iznosi oko jednog mikrona (često i manja), zbog čega se uobičajeno nazivaju „mikroporama“ ili „mikrošupljinama“. Zbog njihove male veličine, ne mogu da se otkriju pomoću konvencionalnih tehnika metodama bez razaranja (NDT tehnika), već je neophodno sprovesti metalografska ispitivanja. Korelacija izgleda i dimenzija pora sa utrošenim vekom je prikazana na slici 9.17.

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.



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 smanjuje jer u čvrstom rastvoru ostaje manja količina legirajućih elemenata. Do realizacije nekog ili svih navedenih mehanizama ojačavanja dolazi u zavisnosti od hemijskog sastava i režima termičke obrade čelika, sa određenim udelom svakog od mehanizama pojedinačno u ukupnom ojačavanju.

Kod čelika do ojačavanja česticama sekundarne faze dolazi usled izdavanja čestica, pre svega, karbida na dislokacijama i granicama subzrna, tokom termičke obrade otpuštanjem. Ovi karbidi zaustavljaju kretanje dislokacije, stvaraju prepreke tokom ostvarivanja plastične deformacije i zadržavaju procese rekristalizacije. Karbidne faze, definisane svojim parametrima (tip, stabilnost, kinetika transformacije, dimenzije i oblik čestica, količina i međučestično rastojanje) imaju presudni uticaj na karakteristike čelika kao što su:

- vremenska čvrstoća,
- brzina puzanja,
- deformacija u različitim stadijumima i
- vreme do loma.

Uticaj npr. disperznosti karbida na ponašanje materijala na povišenim temperaturama ogleda se u tome što se maksimalna vrednost vremenske čvrstoće dostiže pri maksimalnom broju čestica karbida u osnovi i menja se nekoliko puta sa promenom disperznosti. Takođe i klasične mehaničke karakteristike koje se odnose na čvrstoću ($R_{0,2}$, R_m), a posebno žilavost loma zavise od prosečnog rastojanja između čestica, s tim da one opadaju sa povećanjem rastojanja.

Ukrupnjavanjem (koagulacijom) čestica tokom eksploatacije dolazi do snižavanja termopostojanosti, tako da je od presudne važnosti ne samo dobijanje maksimalne gustine raspodele čestica u polaznom stanju čelika tokom njegove izrade, već i zadržavanje takve strukture tokom što većeg dela radnog veka.

Kad je reč o ojačavanju čvrstog rastvora, njegov uticaj na termopostojanost vezan je za uzajamno dejstvo atoma legirajućih elemenata sa dislokacijama u čvrstom rastvoru. Rastvoreni atomi legirajućih elemenata, koji se nalaze u blizini dislokacija, stupaju u međudejstvo sa tim dislokacijama otežavajući ili

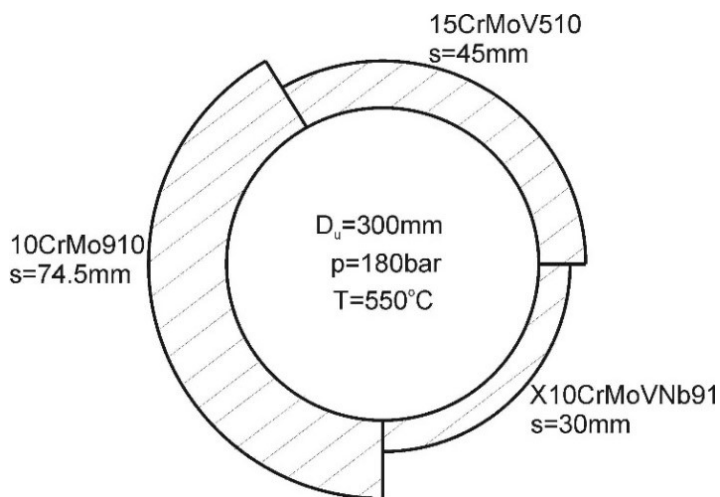
sprečavajući njihovo kretanje. Da bi se dislokacije odvojile od rastvorenih atoma i započele ili nastavile proces klizanja neophodno je povećati napon u materijalu.

Mehanizmi degradacije mikrostrukture. Izlaganje čelika povišenim temperaturama u dužem vremenskom periodu neminovno izaziva određene promene u mikrostrukтури, a samim tim i promenu čvrstoće materijala.

Osnovne mehaničke karakteristike koje opredeljuju upotrebu čelika na određenim temperaturama su vremenska čvrstoća i granica puzanja koje opisuju njegovu otpornost na puzanje. Veća otpornost na puzanje za iste radne uslove podrazumeva duži radni vek, ali i manju težinu konstrukcije, slika 9.19.

Pored mehaničkih osobina na povišenim temperaturama, ponašanje na sobnoj temperaturi je takođe veoma bitno, jer proces fabrikacije u velikoj meri zavisi od tih osobina kao što je od značaja i ponašanje u uslovima delovanja dinamičkih opterećenja (zamora) i otpornost na koroziju.

Procena karakteristika materijala se izvodi ekstrapolacijom rezultata ubrzanih ispitivanja koja mogu biti ponekad značajne dužine, međutim, vrlo retko se ona obavljaju pri parametrima i u vremenskom intervalu koji odgovaraju realnoj eksploatacije. To je i razumljivo s obzirom da se projektni radni vek komponenti izloženih puzanju sve više produžuje, i trenutno prelazi 300000 h.



Slika 9.19: Minimalno potrebne debljine zida parovoda (s) izrađenih od čelika 10CrMo910, 15CrMoV510 i P91 (X10CrMoVNb91) za iste radne parametre i unutrašnji prečnik

S druge strane, da bi se sa sigurnošću izvršila ekstrapolacija, neophodno je poznavati i razumeti mehanizme koji utiču na ponašanje materijala, a oni zavise upravo od parametara na kojima se odvija puzanje. Iz tog razloga je, nažalost, uobičajena pojava da se tokom razvoja novih čelika u standardima daju na početku previše optimistične vrednosti karakteristika materijala, koje moraju vremenom da se koriguju. Ovo je bio slučaj kod gotovo svih feritnih čelika, ali i kod velikog broja čelika nove generacije. U pogledu predviđanja ponašanja materijala u dužem vremenskom periodu, najbolji rezultati su dobijeni iz podataka o mehanizmima ojačavanja čelika.

S obzirom na relativno dug radni vek, utvrđeno je da se u toku rada može tolerisati brzina deformacije usled puzanja od oko $3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, što odgovara $\sim 2\%$ - nom trajnom izduženju za period od 30 godina. Iz tog razloga projektni napon u zidu komponente mora da bude na zadovoljavajućem nivou, odnosno dovoljno niži od vremenske čvrstoće u predviđenom periodu rada, kako bi se sprečila razaranja izazvana puzanjem u toku radnog veka postrojenja. Međutim, pored puzanja i drugi mehanizmi koji učestvuju u procesu oštećivanja komponente, kao što su zamor, termički zamor, kombinovano delovanje puzanja i zamora, porast krtosti, uticaj korozije/oksidacije, a tamo gde je to relevantno i proces oštećivanja usled dejstva vodonika.

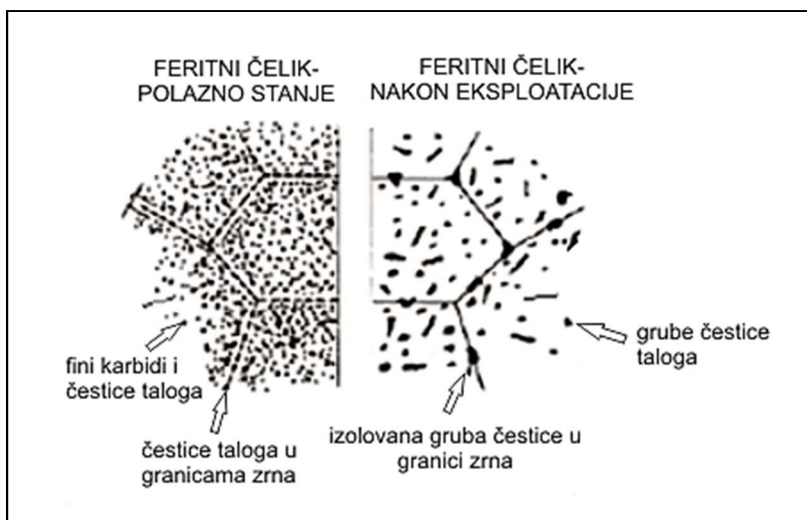
Toplotnopoostojani čelici mogu da se koriste u tako dugom vremenskom periodu zahvaljujući tome što im je na radnim temperaturama, koje su na nivou približno polovine temperature topljenja (T_t), pokretljivost atoma relativno mala, odnosno proces difuzije spor. Karakteristično rastojanje koje npr. difuzijom pređu atomi železa i supstitucijski rastvoreni atomi u toku 1 h na temperaturi od 500°C iznosi $\sim 10 \text{ nm}$. Pa ipak, tokom relativno dugog rada, neminovno može da dođe do pojave značajnih strukturnih promena u materijalu.

Još jedan razlog za sporije odvijanje promena u toplotnopoostojanim čelicima je i to što su podvrgnuti termičkoj obradi otpuštanja pre upotrebe, što im kao rezultat daje veoma stabilnu mikrostrukturu.

Mikrostrukturalna degradacija koja nastaje tokom dugotrajnog rada na povišenim temperaturama je uglavnom povezana sa uticajem temperature dok uticaj opterećenja ne dolazi posebno do izražaja. Usvojeno je da se kvalitativni indeks visokotemperaturne degradacije materijala prikazuje kroz:

- tendenciju perlita/beinita ka sferoidizaciji,
- ogrublјivanje taloga u feritnoj osnovi i na granicama zrna
- povećanje zona bez taloga duž granica zrna.

Ovakve mikrostrukturne promene, slika 9.20, su sinonim za povećanje duktilnosti materijala, ali se često uzimaju i kao pokazatelj pregrevanja.









Slika 9.20: Šematski prikaz mikrostrukturne degradacije

Tokom eksploatacije u dužem vremenskom periodu, difuzijom aktivirani procesi, dovode istovremeno do:

- osiromašenja čvrstog rastvora atomima legirajućih elemenata, što dovodi do kontinualnog smanjenja mehaničkih karakteristika materijala i
- termičkog rastvaranja i/ili ogrublivanja čestica sekundarne faze, što utiče na obrazovanje takvih substruktura materijala kod kojih se brzina puzanja stalno povećava.

Ovi procesi neutrališu efekte ojačavanja metala i izazivaju kontinualno smanjenje mehaničkih karakteristika na povišenim temperaturama u funkciji vremena. Transformacija strukture usled dugotrajne eksploatacije kod čelika posledica je rastvaranja osnovne faze (perlita i beinita) uz postupno ukрупnjavanje karbida i njihove migracije ka granicama zrna, kao i pretvaranja metalne osnove u nelegiran ferit (izjednačenje strukture po celoj zapremini) koji nema osobine termopostojanosti. Ovi procesi pogoduju razvoju oštećenja tipa pora po granicama zrna koje se prvo spajaju u mikro, zatim u makro prsline koje potom dovode do razaranja metala. Različiti stepeni degradacije (oštećenja) feritno-perlitnog čelika, navedeni kao A-F, šematski su prikazani i opisani sa aspekta mikrostrukture na slici 9.21.

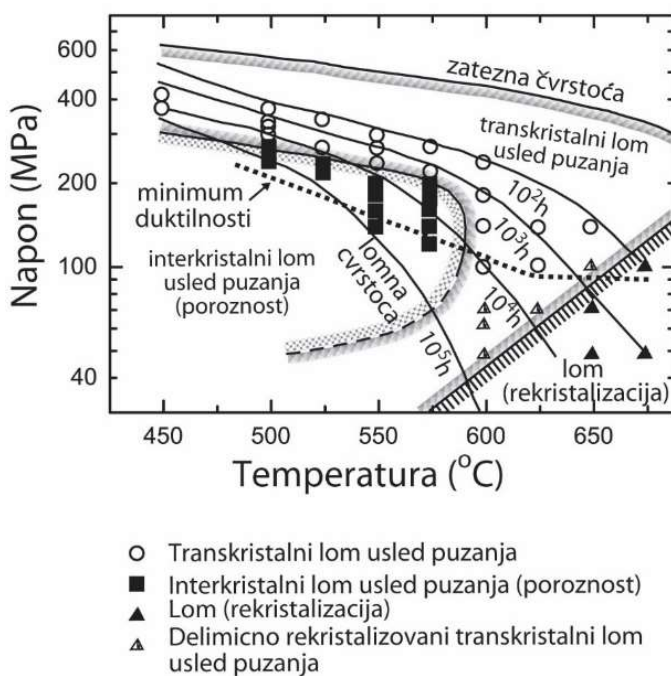
Šematski izgled			
Mikrostruktura	ferit + lamelarni perlit	započela sferoidizacija, sitne čestice karbida se izdvajaju u granicama zrna	međufazna sferoidizacija perlita ali su lamele još uvek prepoznatljive
Stepen oštećenja	A	B	C
Šematski izgled			
Mikrostruktura	potpuna sferoidizacija, ali se karbidi još uvek nalaze u originalnim perlitnim zrnima	ravnomera raspodela krupnijih karbida, ne uočava se više prvobitna mikrostruktura	ravnomerno raspoređeni karbidi, došlo je do njihovog ogrublivanja
Stepen oštećenja	D	E	F

Slika 9.21: Šematski prikaz mikrostrukturne degradacije feritno-perlitnog čelika usled puzanja

9.6. Mehanizmi razaranja usled puzanja

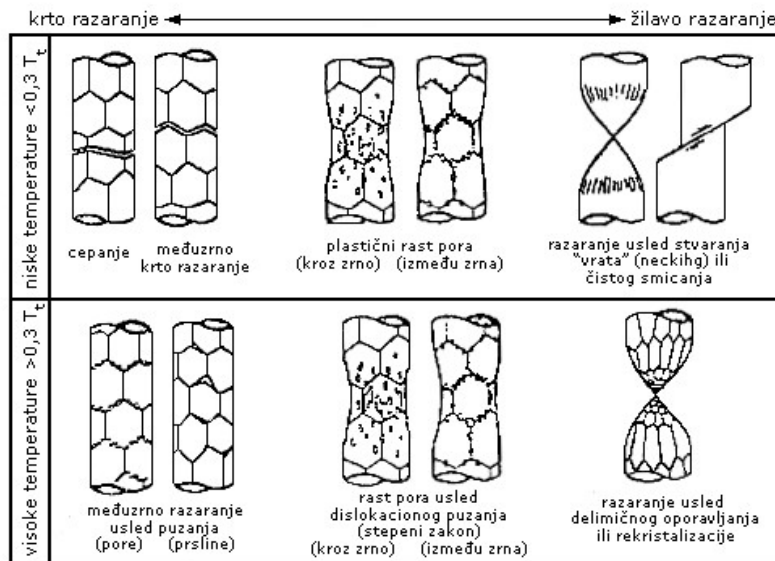
Mape mehanizama razaranja. Lom kristalnih materijala može da usledi putem jednog od više mehanizama razaranja. Kada je reč o puzanju, onda je lom koji prati ovaj proces označen kao visokotemperaturni lom pri malim brzinama deformacije. Međutim, važno je istaći i da postoje alternativni mehanizmi loma koji zavise od napona i temperaturnih režima koji su dominantni. Za materijale koji su tokom eksploatacije izloženi povišenim temperaturama i opterećenjima, izrađene su i mape mehanizama razaranja, na osnovu kojih je moguće, u zavisnosti od delujućih parametara, proceniti koji je mehanizam razaranja bio delujući. Analogno deformacionim mapama, mape razaranja su često dijagrami prikazani u koordinatnom sistemu deformacija – homologne temperatura (odnos radne i temperature topljenja) sa naznačenim područjima različitih mehanizama razaranja, dok je na slici 9.22 prikazan jedan takav dijagram za realne parametre.

Položaj granica koje razdvajaju delovanje različitih mehanizama razaranja zavisi od materijala, njegove termičke obrade, hemijskog okruženja (radne sredine) i ostalih komponenata napona pored zateznog napona. Pri izradi mapa mehanizama razaranja je usvojeno da je primenjeno opterećenje statičko, tačnije nije uzeto u obzir razaranja pri cikličnim opterećenjima. Mapu mehanizama razaranja su zajedno sastavili Ashby i Gandhi za metale i legure sa površinski centriranom kubnom rešetkom uz korišćenje rezultata dobijenih posmatranjem moda razaranja (interkristalni i transkristalni mod).



Slika 9.22: Mapa mehanizama razaranja

Makroskopskom razaranju metala prethode različiti procesi deformacije i oštećenja materijala. Ovi mehanizmi, mogu izazvati na kraju različita ponašanja prilikom razaranja. Na slici 9.23a prikazane su različite makroskopske manifestacije razaranja prema Ashby-ju. Sa jedne strane, postoje duktilni lomovi koji su okarakterisani lokalnim procesima tečenja, dok sa druge strane, postoje i kruti lomovi kod kojih gotovo nema deformacija. Primer loma usled puzanja kome je prethodila značajna plastična deformacija prikazan je na slici 9.23b.



Slika 9.23: Lom usled puzanja: a) šematski prikaz mehanizama loma usled puzanja, b) primer loma cevi usled puzanja sa izraženom plastičnom deformacijom

U zavisnosti od mehanizma deformacije koji prevladava, dolazi do pojave transkristalnog ili interkristalnog loma. Po pravilu, niže temperature i velike brzine deformacije pogoduju pojavi transkristalnog razaranja, dok visoke temperature i male brzine deformacije pogoduju pojavi interkristalnog razaranja. Granične brzine deformacije i temperature pri kojima dolazi do promene karaktera razaranja vrlo je teško definisati. Osim temperature i brzine deformacije, prelaz od jednog ka drugom tipu razaranja zavisi od čitavog niza činilaca kao što su

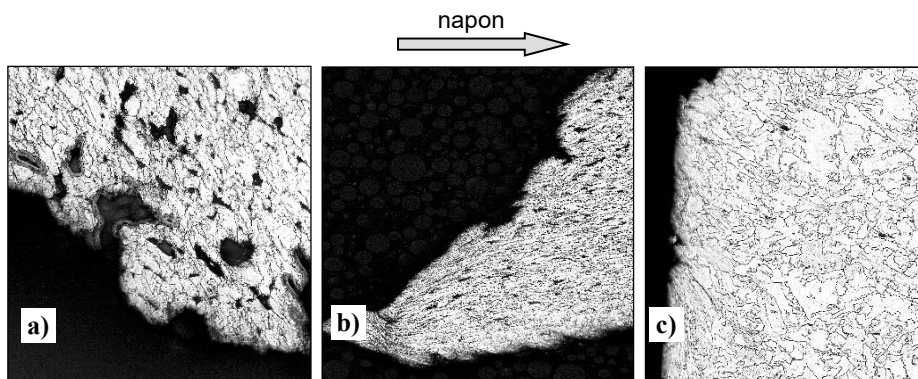
sastav, mikrostruktura, veličina zrna, procesi deformacije i dr. Prelaz od transkristalnog ka interkristalnom razaranju je kod legura izraženiji nego u slučaju čistih metala.

Da li oštećenja puzanjem nastaju u zrnu ili po granicama zrna, zavisi od toga da li se deformacija dešava kroz zrno ili u zoni granica zrna.

Mikrostrukturne promene koje se odvijaju tokom procesa puzanja takođe utiču na proces interkristalnog razaranja. Ovaj uticaj se između ostalog ogleda u osiromašenju čvrstog rastvora uz postupno okrupnjavanje karbida i njihovu migraciju ka granicama zrna, usled čega dolazi do promene hemijskog sastava u granicama zrna u odnosu na hemijski sastav legure. Unutar zrna je smanjena koncentracija legirajućih elemenata, a tvrdoća u granicama zrna je po pravilu veće nego u unutrašnjosti zrna, što dovodi do povećanja krutosti granica zrna.

Dakle, u slučaju nastanka pora u unutrašnjosti zrna se po pravilu javljaju duktilni, transkristalni lomovi. Pri tome, stvaranje pora nema uticaj na deformaciju, osim tokom poslednjeg stadijuma lokalnog suženja (kontrakcije) neposredno pre razaranja.

Progresivna deformacija materijala prouzrokuje konačni lom materijala. Lom se može posmatrati kao tačka u kojoj je iscrpljena mogućnost deformacije materijala. Na slici 9.24 prikazane su vrste lomova kod puzanja, dok je na slikama 9.25 i 9.26 prikazana uspostavljena korelacija između režima puzanja i vrste loma.



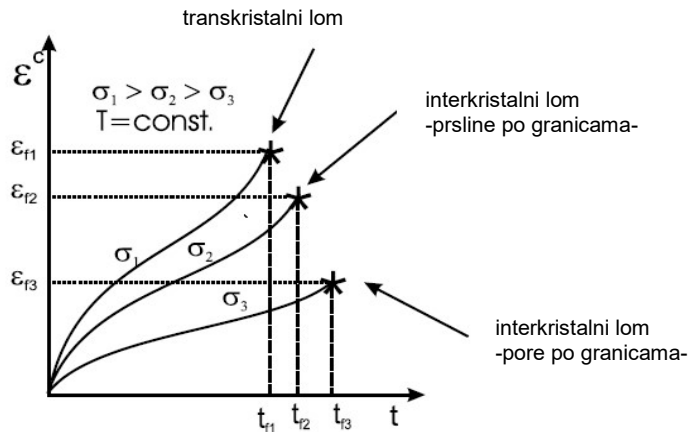
Slika 9.24: Vrste loma usled puzanja, optička mikrofotografija:

a) interkristalni lom, b) transkristalni lom i c) lom usled dinamičke rekristalizacije

Inerkristalni lom usled puzanja. Pri nižim nivoima napona i povišenim temperaturama, rast pora u granicama zrna, putem plastične deformacije ili deformacije usled puzanja, se odvija veoma malom brzinom, pa se lom javlja usled pora spojenih u makro prsline u granicama zrna, slike 9.24a, 9.25 i 9.26. Iz tog razloga je deformacija pre loma relativno mala.

Duktilni transkristalni lom mehanizmom rasta pora. Iznad temperature prelaza iz krkog u žilavo stanje, način loma se menja od cepanja ili krkog interkristalnog loma, u plastični transkristalni lom. U slučaju plastičnog transkristalnog loma, do razdvajanja materijala na dva dela dolazi usled koalescencije i srastanja pora, koje su nastale na česticama sekundarne faze ili nemetalnim uključcima, kao što je MnS uključci i koje mogu da rastu putem plastičnog tečenja materijala. Ovaj lom je, zbog karakterističnog pojavnog oblika,

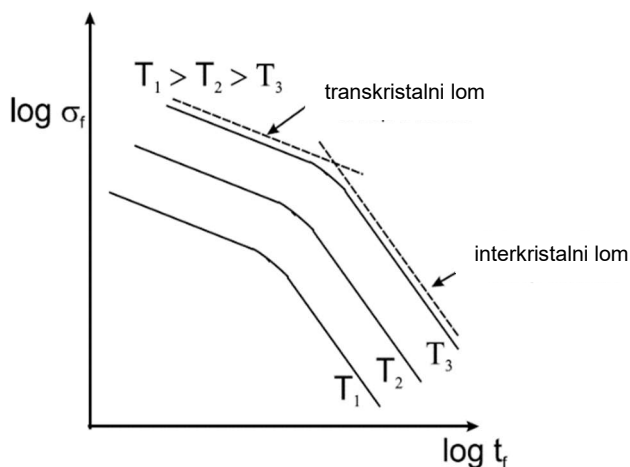
označen kao jamičasti ili vlaknasti lom. Većina inženjerskih legura na sobnoj temperaturi podleže ovom mehanizmu razaranja, o čemu postoji obimna literatura. Lom usled rasta pora može da nastane: momentalno, ako je primenjeni napon dovoljno veliki, ili polako, tečenjem usled puzanja ako je delujući napon relativno mali, a temperatura relativno visoka, slike 9.24b, 9.25 i 9.26.



Slika 9.25: Šematski prikaz mehanizama loma kod puzanja u funkciji napona

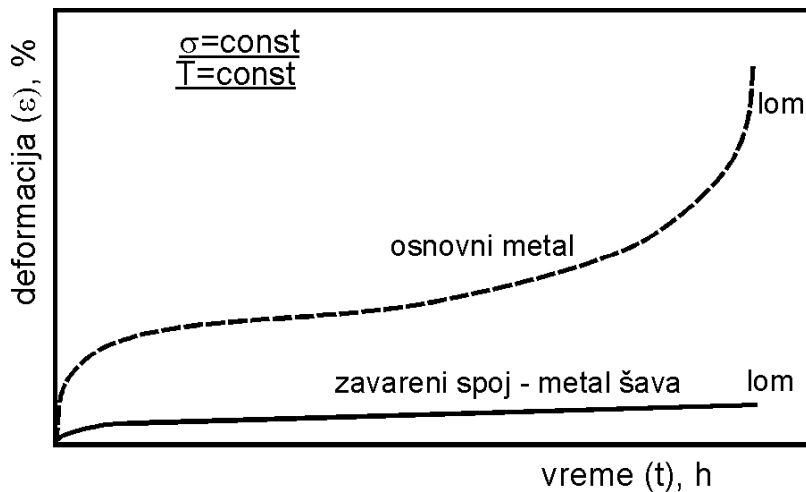
Lom usled dinamičke rekristalizacije. Pri vrlo visokim temperaturama, difuzija atoma / praznina, kao termički aktiviran proces, se odvija veoma velikom brzinom i u kombinaciji sa visokim nivoom napona što dovodi do dinamičke rekristalizacije materijala. Pri ovom režimu, pre će da dođe do značajnog poništavanja i nestajanja dislokacija (nagomilane dislokacije, dislokacione petlje, dislokacioni čelijski zidovi, itd.) i obrazovanja novih zrna u područjima koja se teže deformišu, nego do oporavljanja koje deluje u režimu puzanja. Isto tako, usled povećane i olakšane difuzione aktivnosti novonastale granice zrna mogu relativno lako da se kreću. Takođe, za razliku od interkristalnog loma usled puzanja za koji je karakteristično da je maksimalni zatezni napon normalan na granice u kojima se izdvajaju pore, odnosno u kojima se stvara prslina, za lom usled dinamičke rekristalizacije, je karakteristično da maksimalni zatezni napon više ne deluje normalno na granice, pa prslina propagiraju horizontalno. Pošto postoje dva jednako moguća ugla za propagaciju prslina, dolazi do grananja prslina pri većim brzinama širenja, slika 9.24c.

Dinamička rekristalizacija veoma zavisi od delujućeg napona, pa u slučaju ispitivanja uzorka koji je u tom strukturnom stanju izložen zatezanju, pre će da se javi obrazovanje vrata, nego što će da dođe do koalescencije pora. Granica između loma usled rekristalizacije i interkristalnog razaranja usled puzanja veoma zavisi od čistoće materijala. Čestice taloga koje su izdvojene na granicama zrna, ne samo da otežavaju klizanje granica zrna, već takođe otežavaju i migraciju granica zrna. Pored toga, čestice taloga u granicama zrna, kao što je već istaknuto, imaju tendenciju da olakšavaju obrazovanje pora u granicama zrna



Slika 9.26: Promena modova razaranja u funkciji napona kod puzanja

Puzanje zavarenih spojeva. Sve zone zavarenih spojeva su izložene puzanju i za njih je karakteristično da je mogućnost pojave oštećenja kod zavarenih spojeva veća zahvaljujući pre svega velikim varijacijama u mikrostrukturi i maloj duktilnosti spojeva.



Slika 9.27: Krive puzanja za osnovni materijal i zavareni spoj

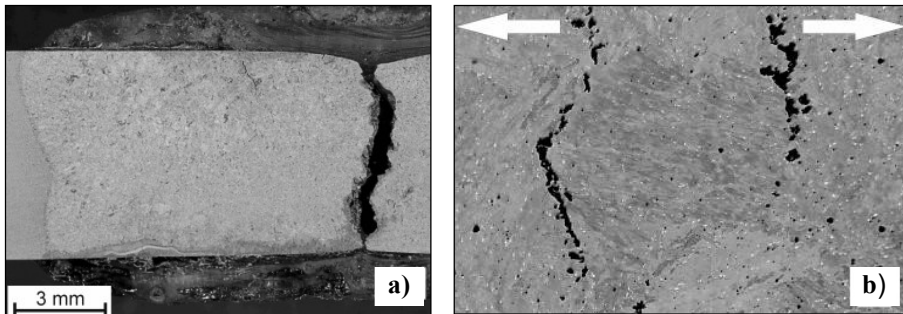
U poređenju sa osnovnim materijalom, tokom puzanja zavarenih spojeva lom će se desiti pri mnogo manjoj deformaciji, slika 9.27. Na slici 9.28 je prikazan lom izazvan puzanjem cevi sa zavarenim spojevima – na levoj strani zavareni spoj dobijen elektrootpornim postupkom varničenjem, a na desnoj strani

elektrolučnim zavarivanjem. Lom je karakteristično podužan ali u zoni spoja se praktično ne uočava deformacija.

Lokacije oštećenja od puzanja tipa prslina su klasifikovane po mestu nastajanja od I-IV prema podeli navedenoj ranije u poglavlju 2.2. Na slikama 9.29 - 9.32 prikazani su primeri karakterističnih lomova usled puzanja zavarenih spojeva kao i karakteristične mikrostrukture na mestu loma za pojedine zone spoja

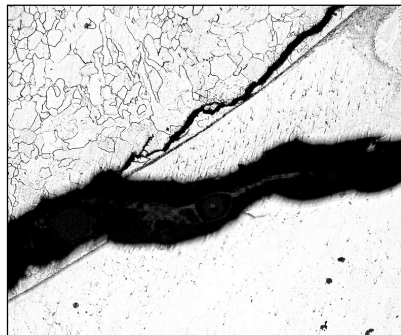


9.28: Lom usled puzanja cevi u zoni zavarenog spoja

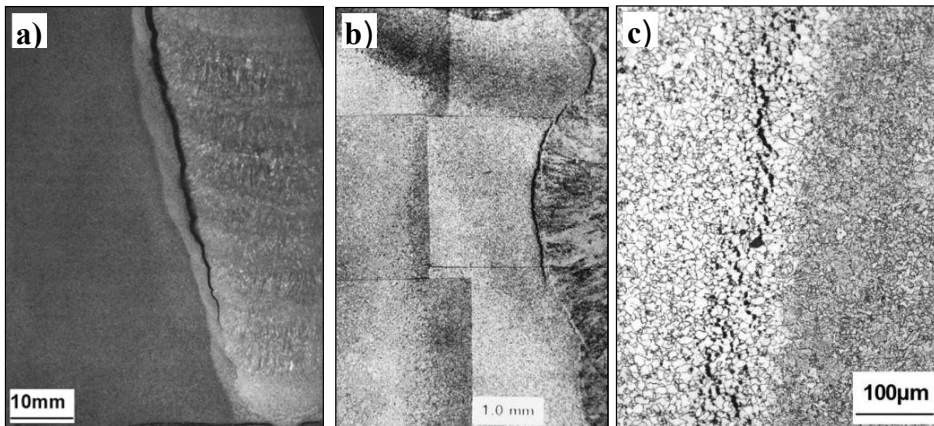


Slika 9.29: Prslina usled puzanja tipa I u MŠ: a) makrofografija, i b) mikrostruktura u zoni prsline

Slika 9.29, Preuzeto iz P. Mayr et al., The impact of weld metal creep strength on the overall creep strength of 9% Cr steel weldments, J. Eng. Mater. Technol., 2011, 133(2):021011

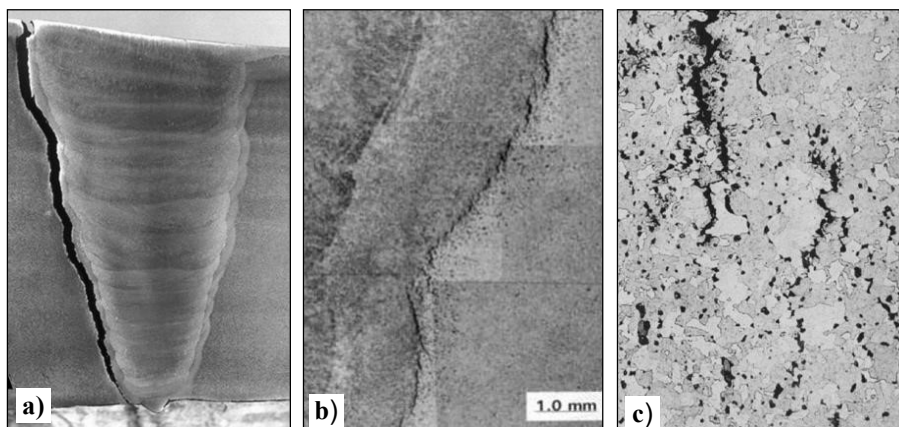


Slika 9.30: Prslina usled puzanja tipa II koja se pruža kroz MŠ i ZUT jednog raznorodnog zavarenog spoja



Slika 9.31: Prslina usled puzanja tipa III u ZUT-u: a) makrofografija, b) optička mikrofotografija i c) mikrostruktura u zoni prsline

Slika 9.31, Preuzeto iz P. Mayr et al., Microstructural features, mechanical properties and high temperature failures of ferritic to ferritic dissimilar welds, International Materials Reviews, 2019, 64(1),1-26 licence otvorenog koda



Slika 9.32: Prslina usled puzanja tipa IV u ZUT-u: a) makrofografija, b) optička mikrofotografija i c) pore u zoni prsline

Slika 9.32, Preuzeto iz P. Mayr et al., Microstructural features, mechanical properties and high temperature failures of ferritic to ferritic dissimilar welds, International Materials Reviews, 2019, 64(1),1-26 licence otvorenog koda

9.7. Promene mehaničkih i fizičkih osobina čelika tokom puzanja

Sa porastom temperature znatno se menjaju svojstva otpornosti i deformacije metala. Do određenih temperatura, mehaničke osobine se mogu odrediti klasičnim kratkotrajnim ispitivanjima, međutim, iznad tih temperatura (za niskougljenične čelike do 350-400°C, za obojene metale od 50-150°C), neke karakteristike, kao npr. granica proporcionalnosti i napon tečenja, imaju samo uslovno značenje ili u potpunosti gube smisao, jer pored temperature izrazito zavise i od vremena trajanja ispitivanja.

Mehaničke karakteristike dobijene iz kratkotrajnih testova. Sa porastom temperature sve mehaničke osobine, i svojstva otpornosti i svojstva deformacije se menjaju, i to:

- *zatezna čvrstoća (R_m)* kod čelika često blago raste i dostiže maksimalnu vrednost na temperaturama od oko 250-300°C, kada je za oko 20-25% veća nego na sobnoj temperaturi (20°C), a zatim naglo opada, tako da je na 600°C manja za oko 60% u odnosu na vrednost na 20°C,
- *napon tečenja (R_{eH} ili $R_{0,2}$)* obično malo raste i dostiže maksimum na oko 200°C (osim kod legiranih čelika kod kojih neprekidno opada sa porastom temperature), a zatim intenzivno opada, tako da na 400°C dostiže svega 60-70% od vrednosti na 20°C. Istovremeno sa snižavanjem napona tečenja smanjuje se i plastična deformacija na granici tečenja, koja sa porastom temperature potpuno nestaje (za ugljenične čelike na temperaturi od 350-450°C),
- *granica proporcionalnosti i modul elastičnosti E* opadaju, sa porastom temperature sve intenzivnije: na 800°C modul elastičnosti za čelike dostiže polovinu vrednosti na sobnoj temperaturi,
- *odnos R_{eH}/R_m* neprekidno opada i na 400°C iznosi oko 0,35-0,4,
- *dinamička čvrstoća (R_D)* opada slično kao i zatezna čvrstoća, tako da njihov odnos R_m/R_D praktično ostaje nepromenljiv,
- *Poasonov koeficijent* (koeficijent poprečne deformacije), raste, prvo sporo, a kasnije sve brže,
- *relativno izduženje (A) i suženje poprečnog preseka (Z)*, koji su dobri pokazatelji žilavosti, do oko 250-350°C opadaju, kada dostižu minimum; ovaj pad karakteristika deformacije u navedenom opsegu temperatura je poznat kao „područje plavog loma” (sledeće područje temperatura kada se primećuje nagli pad žilavosti i plastičnosti na oko 900-1000°C naziva se „područje crvenog loma”).

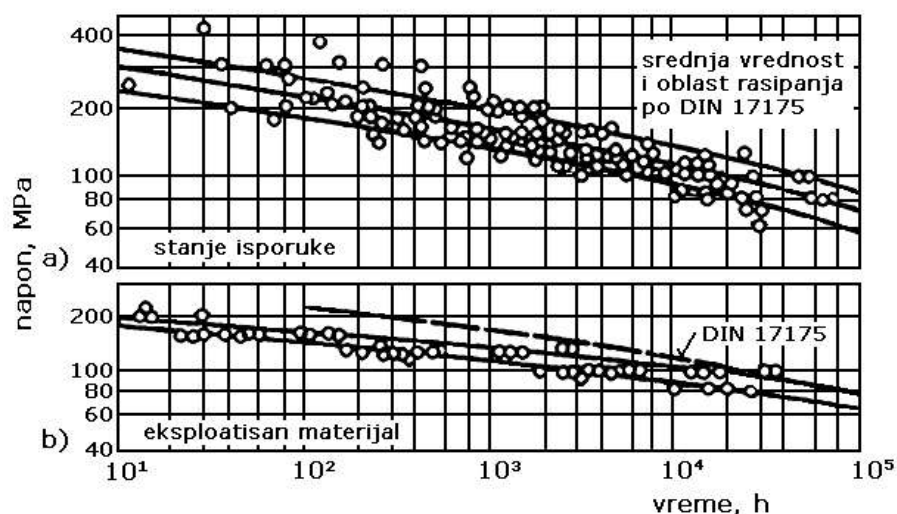
Mehaničke karakteristike dobijene iz dugotrajnih testova. Kao što je već navedeno, u toku eksploatacije čelika, odvijaju se procesi mikrostrukturnih promena, nastanka i akumulacije oštećenja, koji dovode do značajnih promena njegovih mehaničkih i fizičkih karakteristika.

Početno stanje čelika, nakon termičke obrade, može se smatrati nestabilnim, tako da se, imajući u vidu mikrostrukturne promene, materijal tokom eksploatacije kreće u pravcu dostizanja termodinamičke ravnoteže. Istim ispitivanjima je pokazana i osetljivost mehaničkih karakteristika (vremenska

čvrstoća, napon tečenja, relativno izduženje, tvrdoća i udarna žilavost) na promene u strukturi tokom eksploatacije. Uočen je pad svih karakteristika, sa porastom vremena eksploatacije, ispod oblasti rasipanja dozvoljenih vrednosti za nov materijal.

Na osnovu ispitivanja komponenti koje su bile u eksploataciji kao što su cevi, cevni lukovi, zavareni spojevi, fazonski komadi i armatura koji su bili izloženi uslovima puzanja u periodu od 12.000 do 350.000 radnih sati, uočeno je da većina mehaničkih karakteristika čelika u prvom redu oslikava strukturne promene u metalu koje se odvijaju tokom eksploatacije. Sa povećanjem vremena eksploatacije povećava se strukturna jednorodnost metala različitih cevi i smanjuje se pojas rasipanja vrednosti mehaničkih osobina. Na slici 9.33 su prikazani rezultati ispitivanja puzanja čelika 10CrMo910 na uzorcima sa stanjem u trenutku isporuke i na uzorcima isečenim iz komponenti, koje su bile u radu.

Na slici 9.33a može da se uoči da rasipanje vrednosti vremenske čvrstoće, kod materijala u trenutku isporuke, iznosi više od standardom dozvoljenih $\pm 20\%$. Ovo znači da se i kod novog materijala mogu naći uzorci koji, najčešće usled neadekvatne termičke obrade, ne zadovoljavaju ni minimalne karakteristike zahtevane standardom. Slika 9.33b predstavlja rezultate ispitivanja uzoraka elemenata koji su bili u eksploataciji od 22.000 do 156.000 h gde može da se uoči da je rasipanje vrednosti trajne zatezne čvrstoće značajno manje, nego kod uzoraka novih cevi. Smanjenje intervala rasipanja se javlja bez obzira što su komponente bile izložene različitim uslovima rada i sa različitim stepenima oštećenja. Ovakvo ponašanje se može objasniti gubitkom osobina ojačavanja koje je praćeno povećanjem stepena strukturne jednorodnosti čelika, kada dolazi do preraspodele legirajućih elemenata u čvrstom rastvoru i njihovom prelazu u karbide.



Slika 9.33: Vremenska čvrstoća čelika 10CrMo910: a) u stanju isporuke i b) nakon eksploatacije na $T=550^{\circ}\text{C}$

Interesantno je istaći da većina mehaničkih osobina metala, prema kojima se donosi sud o sigurnosti konstrukcije izložene puzanju, nije osetljiva na razvoj mikrooštećenja i ne odražava približavanje trenutka kada počinje razaranje.

Kao posledica mikrostrukturnih promena tokom dugotrajnog dejstva napona pri puzanju, osim navedenog pada vremensko čvrstoće, dolazi i do:

- smanjenja čvrstoće sa sniženom, istom ili čak povećanom duktilnošću;
- smanjenja zatezne čvrstoće pri niskocikličnom zamoru sa konstantnim ili rastućim ciklusima do loma i
- smanjenja udarne žilavosti usled povećanja kritične temperature.

Poređenjem materijala koji su različito vreme proveli u eksploataciji su pokazala da se udarna žilavost, kod cevi koja je najduže bila u eksploataciji, smanjila osam puta u odnosu na one koje nisu bile u radu (sa 82J na 10J), dok se prelazna temperatura krtog loma povećala sa -30°C na preko $+40^{\circ}\text{C}$.

Promene mikrostrukture koje se na radnim temperaturama odvijaju relativno malom brzinom mogu da se simuliraju kratkotrajnim termičkim tretmanom na temperaturama višim od radnih. Poređenjem materijala koji je bio u eksploataciji i materijala koji je bio dodatno otpušten može da se uoči da imaju sličnu feritnu strukturu sa istaloženim karbidima, tako da su im i vremenske čvrstoće bliske. U osnovi, nejednako stanje materijala u početnim uslovima može se izjednačiti termičkim tretmanima kao što su dugotrajno otpuštanje, izlaganje višim temperaturama ili dugotrajna eksploatacija. Međutim, stepen oštećenja materijala ne može da se odredi na osnovu ispitivanja većine mehaničkih karakteristika materijala. Uticaj oštećenja na mehanička i druga svojstva metala je trenutno samo delimično razjašnjen. Zbog toga se za određivanje stepena oštećenja materijala koriste metalografske metode, i to tek kada se postigne određeni granični stepen oštećenja. Takođe, česta je pojava pada duktilnosti materijala izloženih puzanju što u ovom slučaju nije posledica krtosti materijala, već akumuliranih ireverzibilnih oštećenja izazvanih puzanjem (pora i mikroprslina).

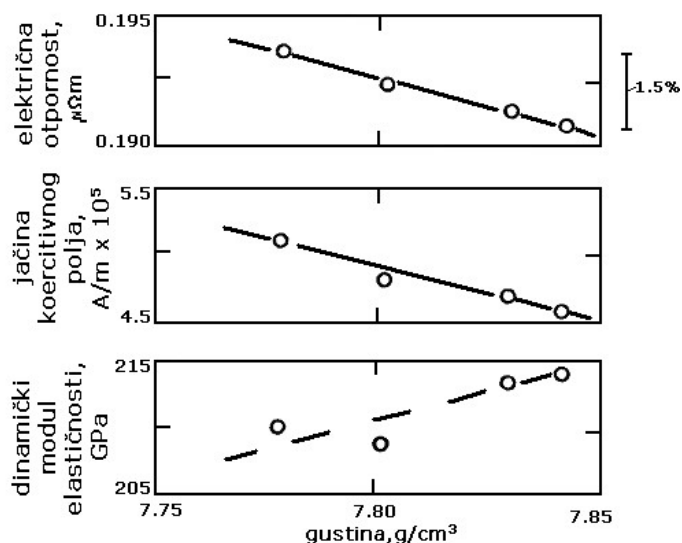
Naknadna termička obrada (ponovno kaljenje i otpuštanje) može da povoljno utiče na poboljšanje čvrstoće materijala što ukazuje na reverzibilnost mikrostrukturnih promena, kao i zavisnost čvrstoće materijala od strukture, međutim, ukoliko postaje ireverzibilnost oštećenja u materijalu neće doći do bitnih promena u duktilnosti, pa je oporavljanje mikrostrukture moguće samo u najranijim stadijumima pojave oštećenja.

Promena strukture i nastanak oštećenja dovode pored promena mehaničkih osobina i do promena drugih fizičkih osobina materijala, pre svega smanjenja gustine materijala tokom puzanja, uz prateće povećanje deformacije. Osim gustine i druga fizička svojstva, kao npr. specifična električna otpornost, jačina koercitivnog polja i dinamički E modul, kontinualno zavise od stepena oštećenja, pri čemu veliki stepen oštećenja uzrokuje značajne promene fizičkih svojstava.

Promena gustine čelika usled pojave mikropora kroz više različitih modela kvantifikuje oštećenja puzanjem i stoga se može smatrati referentnom za promene ostalih fizičkih svojstava. Na slici 9.34 je prikazana linearna korelacija gustine sa električnom otpornošću, jačinom koercitivnog polja i modulom elastičnosti.

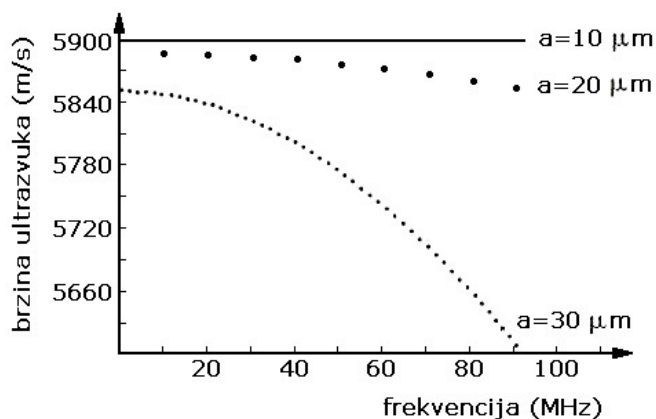
Takođe, postoji i zavisnost promene brzine ultrazvuka od stepena oštećenja. Sa aspekta primene metoda bez razaranja u određivanju stepena oštećenosti materijala ova relacija je značajna, jer bi merenjem promene brzine ultrazvuka, moglo da se definiše smanjenje gustine metala usled stvorenih oštećenja tipa pora. Na slici 9.35 je prikazana uticaj akumulacije pora na brzinu ultrazvučnih talasa kod železa za različite stepene oštećenja. Uočeno je približno linearno

smanjenje brzine zvuka u području manjih stepena oštećenja, ali do značajnijih promena dolazi tek pri postojanju većih oštećenja.



Slika 9.34. Uticaj oštećenja puzanjem na svojstva čelika u zavisnosti od gustine

Metoda zasnovana na merenju brzine zvuka mogu pomoći prilikom identifikacije oštećenja od puzanja međutim, da bi se postigla zadovoljavajuća tačnost i sigurnost u rezultate koji se dobijaju ovom metodom, potrebno je izvršiti obimna dodatna ispitivanja i merenja koja bi obuhvatila različite režime rada i različite materijale, kao i korelaciju sa drugim ispitivanjima, pre svega metalografskim.



Slika 9.35: Uticaj veličine pora i frekvencije na brzinu ultrazvučnih talasa