

10. Zamor materijala

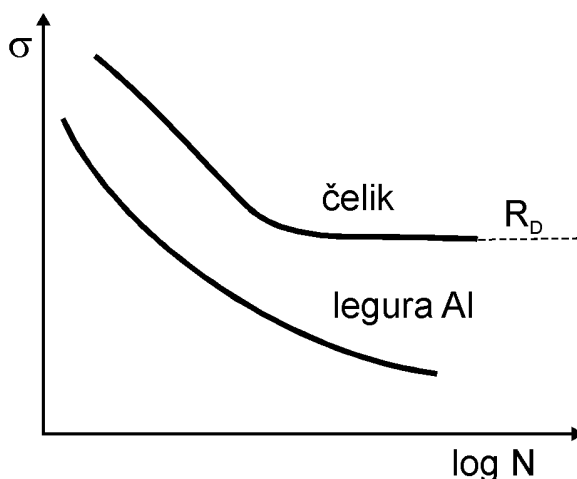
Pre više od jednog veka projektovanje konstrukcija je bilo zasnovano samo na konceptu statičke čvrstoće materijala. U to vreme se nije dovoljno znalo ni o izvorima cikličnog opterećenja ni o teoriji zamora, pa su zato delovi projektovani sa velikim stepenom sigurnosti. Sa razvojem i korišćenjem složenijih sistema opreme počelo je da dolazi do neobjašnjivih lomova materijala, bez veće plastične deformacije, pri naponu nižem od zatezne čvrstoće, koji su opisivani kao "zamor", jer su se javljali posle dužeg vremena eksploatacije. Kasniji eksperimenti su pokazali da je značajan faktor u tim događajima ponavljanje napona, da je taj faktor važniji od vremena, i da je "zamorni lom" ustvari "lom zbog ponovljenih napona". Efikasnost projektovanja i ekonomičnost uslovljavaju da komponenta radi pri visokim statičkim i dinamičkim naponima, pa je najveća briga projektanta otpornost prema zamornom lomu, čestom obliku loma u eksploataciji.

Lom usled zamora nastaje pri opterećenjima koja se ponavljaju i brzo menjaju i posledica su elastičnih i elasto – plastičnih deformacija koje se, zbog nehomogenosti materijala, neravnomerno raspodeljuju po zapremini mašinskog dela.

Generalno, periodično promenljiva opterećenja koja imaju slučajan karakter se aproksimiraju u pravilne trigonometrijske funkcije i okarakterisana su srednjim naponom (σ_{sr}), amplitudom naponom (σ_a) i koeficijentom odnosa minimalnog i maksimalnog napona ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$). Ponašanje materijala u uslovima delovanja cikličnih opterećenja se opisuje dijagramima napon – broj ciklusa do razaranja ili tzv. Velerovom krivom. Oblik Velerove krive se generalno razlikuje za dva tipa ponašanja materijala, odnosno za:

- grupu materijala koja ima jasno izraženu trajnu dinamičku čvrstoću i kod kojih postoji zbir amplitudnog i srednjeg napona koji ne dovodi do loma za jako veliki broj ciklusa; u ovu grupu materijala spadaju čelici i legure železa generalno, legure titana, itd i
- grupu materijala koja nema jasno izraženu trajnu dinamičku čvrstoću, kao što su legure na bazi alumunijuma, bakra, itd.

Na slici 10.1 prikazane su krive napon - broj ciklusa do razaranja za jedan čelik i jednu leguru alumunijuma za poređenje. Takođe, treba napomenuti da je ustaljena praksa da se na osama ovog dijagrama umesto uobičajene oznake za napon upisuju oznaka S tako da se krive često nazivaju S-N krive.



Slika 10.1: Velerova kriva za čelik i leguru Al

10.1. Vrste opterećenja

Dinamički zamorni lom obuhvata uticaj više fenomena, koji se javljaju tokom brojnih ciklusa napona i deformacija. Postoji više načina zadavanja opterećenja pri ispitivanju dinamičke čvrstoće. Epruveta može biti izložena direktno zatezanju ili pritisku, savijanju ili torziji, ili kombinovanom opterećenju. Podaci ispitivanja se obično iskazuju u $\log \sigma - \log N$ dijagramima (napon – broj ciklusa), slika 10.2, gde napon σ na krivoj odgovara vrednosti σ_{max} . Na početku σ_{max} se brzo smanjuje sa povećanjem broja ciklusa N , a zatim se kriva asimptotski približava vrednosti napona koja se dalje ne smanjuje iako se broj ciklusa povećava, tj. vrednost napona koju materijal može podneti bez loma pri beskonačno velikom broju ciklusa dinamičkog opterećenja. Ta se veličina zove granica zamora ili trajna dinamička čvrstoća materijala i označava se sa R_D . Trajna dinamička čvrstoća za feritne čelike ispitivane na vazduhu pri sobnoj temperaturi se dostiže posle 10^6 do 10^7 ciklusa, dok za neke druge metale i za feritne čelike na povišenoj temperaturi se napon loma i dalje smanjuje, iako manjom brzinom.

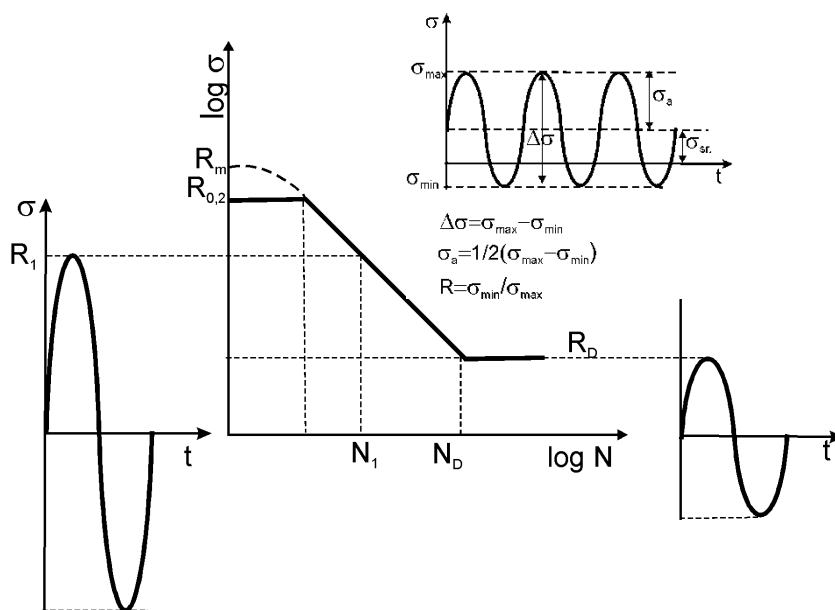
Za čelike niske i srednje čvrstoće trajna dinamička čvrstoća iznosi 40 do 55% zatezne čvrstoće. Ispitivanja zamora pokazuju da se u području prevoja i desno od njega zamorni lom slaže sa naponom kao kontrolnom promenljivom. To je oblast visokocikličnog zamora. Međutim, levo od tog područja uočljivo je rasipanje rezultata, koje je pripisano činjenici da u tom području napon može da prelazi napon tečenja materijala, zbog čega dolazi do plastične deformacije materijala. Ako se u tom slučaju deformacija uzme kao kontrolni parametar u tom području rezultati postaju pouzdani i ponovljivi. U skladu sa tim za izradu krive zamora, deformacija se množi sa polovinom modula elastičnosti da bi se dobila pseudo amplituda napona. To je

niskociklični zamor i obično se smatra da obuhvata područje ispod 10^5 ciklusa (za neke materijale i uslove do 10^4 ciklusa).

Pojmovi vezani za ispitivanje zamora su:

- *Trajna dinamička čvrstoća* (granica zamorne izdržljivosti) – definiše vrednost napona ispod koje neće doći do razaranja tokom delovanja dinamičkih opterećenja (nemaju je svi materijali).
- *Zamorni vek* – definiše dozvoljeni broj ciklusa do loma za određeni napon.
- *Dinamička čvrstoća* (zamorna čvrstoća) – napon koji dovodi do loma za unapred zadati broj ciklusa (uobičajeno je 2×10^6 za zavarene spojeve).
- *Osetljivost na zarez* – veličine koje objašnjavaju uticaj zareza ili neke greške u materijalu na osobine materijala kao što je žilavost loma.

Ispitivanja niskocikličnog zamora, sa malim brojem ciklusa i visokom amplitudom, pokazala su da je ciklično područje plastičnih deformacija merodavna veličina za određivanje broja ciklusa do loma nego što je to napon. Niskociklični zamor je kontrolisan duktilnošću materijala u široj oblasti, pa stoga parametar deformacije mora da se uvrsti u određivanje broja ciklusa do razaranja.



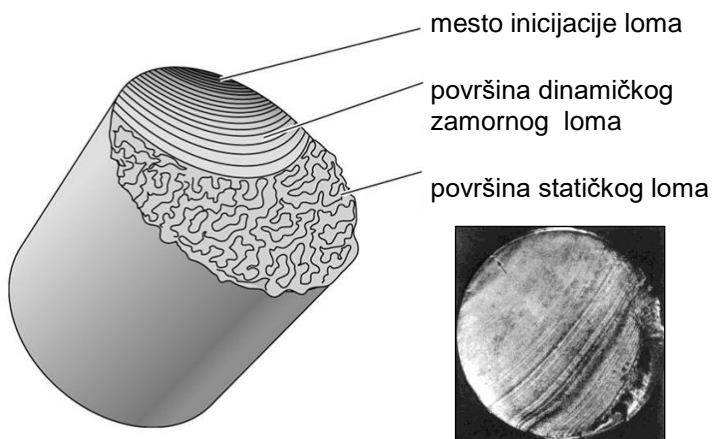
Slika 10.2: Tipični σ - n dijagram

Karakteristike materijala vezane za niskociklični zamor menjaju se tokom eksploatacije, u skladu sa rastućim oštećenjem materijala i opisuju ga napon i deformacija. Visokociklični zamor (od $\sim 10^5$ do 10^8 ciklusa) se najbolje opisuje parametrima napona (učestalost, amplituda, vrsta napona,...).

10.2. Zamorni lom

Zamor je oštećenje materijala izazvano periodično promenljivim opterećenjima koja po svom intenzitetu uobičajeno ne prelaze napon tečenja. Lom usled zamora je posledica elastičnih i elasto - plastičnih deformacija koje se, zbog nehomogenosti materijala, neravnomerno raspodeljuju po zapremini mašinskog dela izuzev u slučaju niskocikličnog zamora gde je moguća pojava deformacije niskog nivoa. Početne prsline nastaju u mikrozapreminama nepovoljno orijentisanim prema spoljašnjem opterećenju, prenapregnutim zonama usled zaostalih napona i lokalnim oslabljenjima usled geometrijskih nepravilnosti. Lokalna mikro oštećenja, koja se postepeno nagomilavaju, mogu da izazovu početak procesa makro razaranja. Pod zamorom materijala može da se smatra proces akumulacije oštećenja nastalog usled promenljivih napona i deformacija, koje može da dovede do stvaranja prsline ili da prouzrokuje njen dalji rast.

Najuočljivija karakteristika površine širenja prsline usled zamora su linije zamaranja („linije odmaranja“ ili „strije“) koje u stvari predstavljaju dužinu povremenog stepenastog širenja prsline koja je proporcionalna akumulaciji ciklusa naizmeničnih opterećenja, tzv. dinamičkog loma, slika 10.3.



Slika 10.3: Šematski prikaz loma izazvanog zamorom materijala (vratilo)
 Slika 10.3 makrofotografija, Preuzeta iz A.S. Yasir, Study the Effect of Cooling Rate on Fatigue Strength and Fatigue Life of Heated Carbon Steel Bars, Mechanical Engineering Research Vol. 3(2), 2013,1-12, licenca otvorenog koda

Linije zamaranja su opisane kao tragovi krivolinijske površine loma usled zamora koje imaju sledeće osobine:

- međusobno su suštinski paralelne i upravne na pravac širenja prsline,

- različitog su međusobnog rastojanja u zavisnosti od amplitude napona,
- po broju su jednake broju ciklusa opterećenja i
- grupisane su u oblasti u okviru kojih su svi tragovi kontinualni i približno iste dužine.

Iako su teorijski i eksperimentalni radovi u oblasti zamora materijala značajno napredovali, situacija na ovom polju je još uvek takva da nema potpune i sasvim zadovoljavajuće teorije koja bi objasnila složenu problematiku zamora materijala u svim njegovim aspektima.

Neka od osnovnih zapažanja o loma izazvanom zamorom su:

- proces započinje kretanjem dislokacija i eventualnim formiranjem kliznih traka na kojima se nukleišu prsline,
- zamorno oštećenje je kumulativan proces kod koga nema mogućnosti oporavka,
- površina zamornog loma se sastoji iz dinamičkog i statičkog dela,
- dinamički deo ima više ili manje vidljive linije odmaranja i uglačane površine ukoliko je lom nastajao kroz veliki broj ciklusa opterećenja,
- zamor je stohastičan proces kod koga je prisutna pojava rasipanja veličina dinamičke čvrstoće i pri nepromenljivim uslovima,
- sa porastom napona skraćuje se broj ciklusa do loma, dok se sa smanjenjem napona povećava rasipanje podataka o broju ciklusa do loma,
- na radni vek u uslovima zamora utiče veliki broj faktora: temperatura, stanje površine, radna sredina, zaostali naponi, kontakt, itd.,
- kod niskocikličnog zamora nastala deformacija je važan parametar za određivanje broja ciklusa do razaranja u ovoj oblasti zamora i
- za visokociklični zamor je najvažnije što preciznije određivanje vrste dinamičkog opterećenja i delujućih napona.

Za sada ne postoje dovoljno pouzdane ni teorijske ni eksperimentalne metode kojima može da se predvidi ili proceni nastanak promena u osobinama materijala nekog mašinskog elementa izloženog određenom broju ciklusa pri nivoima napona većim od njegove trajne dinamičke čvrstoće. Njačešća korelacija se uspostavlja između smanjenja dinamičke čvrstoće i akumulacije oštećenja materijala mašinskog elementa.

Mnogi istraživači su predlagali teorije o kumulativnom oštećenju kod zamora i u svakom od tih modela, oštećenje se pondira tako da je stepen oštećenja jednak jedinici u slučaju loma, odnosno jednak nuli u slučaju materijala koji nije bio opterećen, s tim što međustepeni oštećenja nisu jasno definisani. Logično je pretpostaviti da svaki ciklus dinamičkog opterećenja izaziva izvesnu količinu ireverzibilnog oštećenja usled zamora, što dovodi do smanjenja dinamičke i statičke čvrstoće mašinskog dela.

Finalna faza loma usled zamora u stvari je statički lom koji nastupa u poslednjem ciklusu dinamičkog opterećenja, za vreme prve četvrtine ili prve polovine tog poslednjeg ciklusa. Ovo praktično znači da dinamička čvrstoća mašinskog elementa predstavlja statičku čvrstoću mašinskog elementa u toku poslednjeg ciklusa promene opterećenja. Drugim rečima, može da se pretpostavi da proces oštećenja usled zamora smanjuje statičku čvrstoću

materijala od prvobitne vrednosti, koja je karakteristična za neoštećeni materijala, do vrednosti koja odgovara datom nivou napona koji dovodi do razaranja.

Lomovi usled zamora prema tome pokazuju, u opštem slučaju, dve oštro uočljive zone i to: zonu širenja prsline usled zamora i zonu konačnog razaranja, slika 10.3.

Izgled zone razaranja usled zamora zavisi od broja promena opterećenja u toku kojih se razvija inicijalna prslina. U procesu ponovljenih opterećenja dolazi do gnječenja i sabijanja površina razdvojenih prslinom. Veličina i oblik statičkog razaranja, kao završne faze razaranja usled zamora, zavise od uslova opterećenja, veličine nominalnih napona pri kojima je došlo do preloma i od veličine koncentracije napona. Prema tome, karakteristična struktura površine preloma često omogućava donošenje zaključaka o uzrocima razaranja.

U procesima razaranja usled zamora, veliku ulogu igraju izvori toplote oslobođene u mikrozapreminama izloženim deformacijama. Kao rezultat povišene temperature snižava se čvrstoća materijala. Snižena čvrstoća olakšava početak pojave plastične deformacije izazvane smicajnim naponima. Izazvana deformacija dovodi do daljeg porasta temperature i do nastavka procesa. Odvijanje ovog procesa pre svega zavisi od osobina materijala i njegovog sastava na lokalnom nivou. Takođe procesom oslobađanja toplote može da se objasni pojava da dinamička čvrstoća nekog dela ima najmanju vrednost u slučaju naizmenično promenljivih opterećenja koja generišu najveće smicajne napone suprotnih smerova. Značajna ali kratkotrajna preopterećenja ne umanjuju dinamičku čvrstoću, jer se u tom slučaju oslobođena toplota brzo provodi kroz materijal dalje od mesta oštećenja.

10.3. Inicijacija zamornih prslina

Inicijacija (nukleacija) zamornih prslina se javlja na heterogenim mestima u materijalu: greške, koncentratori napona, uključci, gasne pore, lokalno oslabljena mesta u mikrostrukтури. Kod procesa inicijacije zamorne prsline najvažniji aspekt je stvaranje mesta nukleacije.

U prvim fazama procesa, prsline mogu da se iniciraju u zrnima i na granicama zrna.

Inicijacija prslina u granicama zrna. Početak inicijalnih prslina u granicama zrna u suštini je rezultat kretanje dislokacija i praznina ka granicama zrna, i kao što je već istaknuto u početnim fazama proces je reverzibilan. Usled stvaranja barijera zbog akumulacije mikrooštećenja, potrebna srednja vrednost napona da se savladaju barijere u granicama zrna određuje trajnu dinamičku čvrstoću materijala kod inicijacije prslina na granicama.

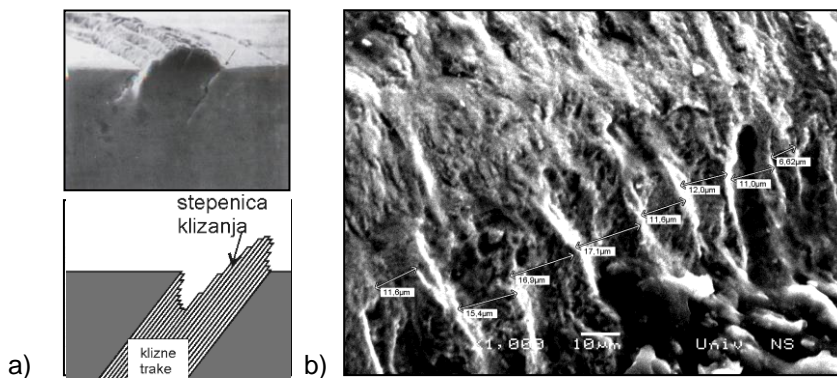
Trajna dinamička čvrstoća kod inicijacije prslina na granicama može da se posmatra kao srednja vrednost napona pri kojem nukleusi prsline još

ostaju u granicama zrna koji se delimično ili potpuno poništavaju tokom vremenskog intervala delovanja napona manjeg od maksimalnog, u toku svakog ciklusa.

Otpornost materijala prema smicanju između zrna zavisi od fizičkih i mehaničkih osobina materijala. Čim se proširi preko granice zrna mikroprrlina se u intervalima maksimalnog napona širi, prelazeći u makroprrlinu koja menja pravac širenja prostirući se upravno na pravac dejstva najvećeg napona

Kod inicijacije zamorne prsline u zrnu, nasuprot statičke deformacije koja izaziva pojavu stepenica, periodično promenljivi naponi izazivaju klizanjem stvaranje oštih vrhova (istisnuća) i ulegnuća, tj. mesto nukleacije zamorne prsline, slika 10.4. Stoga, je teorijski moguće produžiti radni vek mašinskog dela primenom postupka periodičnog poliranja površine, kojim bi se uklonio površinski reljef.

Za oba tipa inicijacije mikroprrlina važi da nastaju istovremenim na više mesta, prsline su međusobno paralelne, i normalne su na pravac delovanja glavnih napona. Njihov razvoj se ubrzava pojavom nastalog koncentratora napona u korenu inicijalne prsline. Međutim, od nastalih inicijalnih mikroprrlina, širi se samo jedna ili grupa susednih lokalnih prsline, prvenstveno zbog grešaka u materijalu skoncentrisanih na nekom mestu, ili zbog lokalizovanog prednaprezanja, ili zbog nepovoljno orijentisane kristalne rešetke u odnosu na napone. Makroprrlina može da se širi i pod dejstvom napona znatno nižih od onih potrebnih za inicijaciju mikroprrlina.



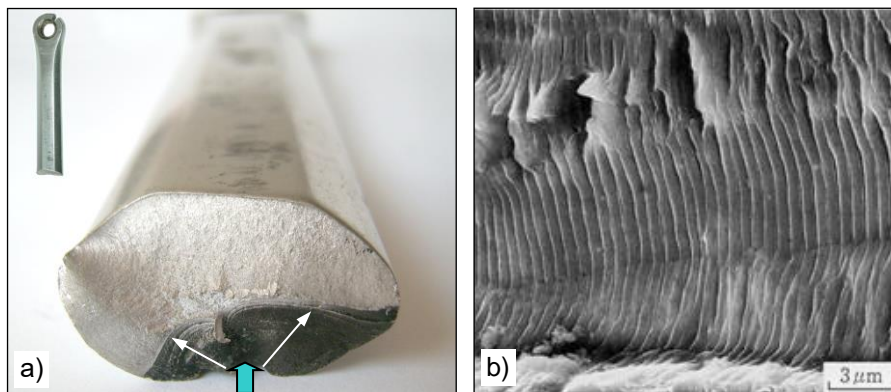
promena opterećenja, nego što je to bio slučaj kada je izrađen od čelika koji je topljen u vazdušnoj atmosferi.

10.4. Razaranje usled zamora

Do razaranja usled zamora dolazi širenjem glavne prsline usled smanjenja nosivosti poprečnog preseka. Finalno razaranje počinje naglo i ima karakter statičkog krtog loma. Izgled zone razaranja usled zamora zavisi od broja promena opterećenja i vrste opterećenja, pa izgled morfologije površine loma često omogućuje donošenje zaključaka o uzrocima loma, slika 10.5.

Zona širenja prsline usled zamora, ili dinamički deo loma, ima sitnozrnastu površinu tipičnu za lomove u kojima preovlađuje **transkristalno razaranje**. Ivice prsline često imaju uglačane deonice, što je rezultat udara, drobljenja ili habanja zidova prsline za vreme periodičnih deformacija materijala.

Zona konačnog razaranja ima kristalnu površinu tipičnu za krte lomove (na primer lomovi usled udarnog opterećenja, krti lomovi elastičnog materijala pod dejstvom statičkog opterećenja).



Slika 10.5: Površina zamornog loma: (a) linije zamaranja - bele strelice pokazuju pravac napredovanja fronta prsline inicirane na donjem delu (mesto označeno zelenom strelicom) i (b) SEM mikrofotografija: linije zamaranja

Slike 10.5a i b, Preuzete iz izvora: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material)) i [https://en.wikipedia.org/wiki/Striation_\(fatigue\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Striation_(fatigue)) licence otvorenog koda

U slučaju delovanja promenljivih napona manjeg intenziteta, razaranje se razvija lagano tako da do konačnog loma mašinski deo pretrpi veliki broj promena opterećenja. Tokom razvoja oštećenja dolazi do uzajamnog delovanja površina prsline (dugotrajan proces) tako da je zona razaranja

usled zamora glatka i oštro je odvojena od zone statičkog loma, a zona statičkog loma je relativno mala.

Za veće vrednosti intenziteta napona, broj promena opterećenja do konačnog razaranja je manji, pa je i zona razaranja usled zamora manja u odnosu na zonu statičkog loma, a njen izgled se manje razlikuje od izgleda zone statičkog razaranja.

Ako je zamorni lom nastupio pod većinskim uticajem delovanja normalnih napona, površina loma približno odgovara poprečnom preseku mašinskog dela.

U slučaju loma pod dominantnim uticajem tangencijalnih napona, npr. usled uvijanja, nastane za manje intenzitete napona zamorni lom može da nastane na površinama u kojima deluju najveći normalni naponi ili u slučaju delovanja većih intenziteta napona, lom može da nastane u ravni u kojoj deluju najveći tangencijalni naponi. Pravac širenja prsline često je određen prisustvom zareza i sličnih oštećenja, a javlja se i kao posledica neadekvatne obrade mašinskog dela.

Imajući u vidu način inicijacije i rasta zamorne prsline do loma sledeći činioci mogu da utiču na produžetak radnog veka mašinskog dela izloženog zamoru:

- izbegavanje konstruktivnih rešenja i mesta sa izraženom koncentracije napona kada je to moguće,
- uvođenje povoljnih pritisnih zaostalih napona,
- uklanjanje primarno nepovoljnih mesta u strukturi materijala - uključci, pore, mikroprrsline, itd.
- za niskociklični zamor, koji podrazumeva pojavu plastičnih deformacija, poželjno je primeniti materijal koji ima veliku elastičnost i visoku tvrdoću,
- za visokociklični zamor, kod kog se javljaju elastične deformacije, poželjno je primeniti materijal visoke čvrstoće,
- legiranjem sa hemijskim elementima koji smanjuju nagomilavanje energije koja utiče na procese koji su odgovorni za obrazovanje istisnuća i ulegnuća,
- materijal treba da se odlikuje stabilnom mikrostrukturom i da bude sa što „čistijim” granicama zrna.

10.5. Rad dela sa zamornom prslinom

Kod nekih mašinskih delova moguće je da ukupni radni vek dela podrazumeva i vreme rada mašinskog dela sa prslinom. Ovaj deo radnog veka se zanemaruje prilikom projektovanja zbog visokih napona i/ili male vrednosti kritične veličine prsline do kada prsline raste stabilno. Kod komponenti kod kojih je kritična veličina prsline velika, moguće je da deo sa prslinom neometano radi i obavlja svoju funkciju u relativno dugom vremenskom intervalu. Karakteristike materijala vezane za niskociklični zamor menjaju se tokom eksploatacije u skladu sa rastućim stepenom oštećenjem materijala.

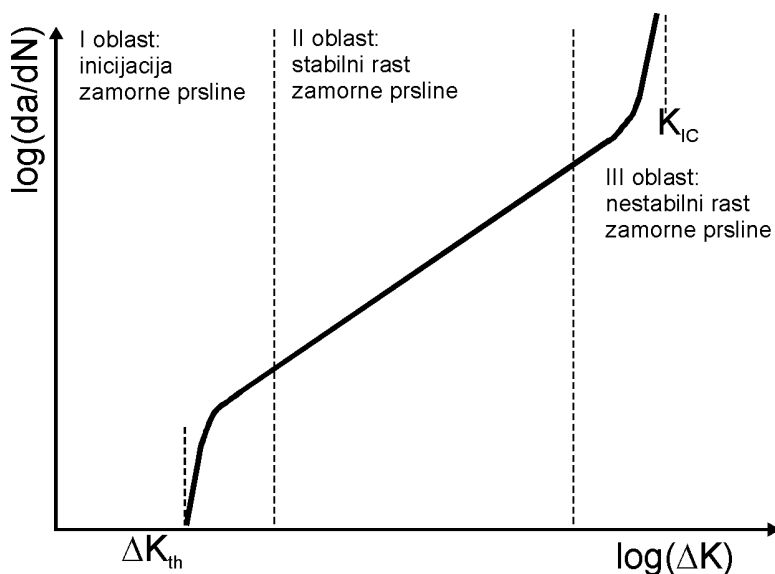
Brzina rasta prsline može da se odredi eksperimentalno putem ispitivanja uzoraka sa inicijalnom prslinom izloženih periodično promenljivim opterećenjima sa konstantnom amplitudom. Period rasta zamorne prsline može da se podeli u tri oblasti: oblast stvaranja zamorne prsline, oblast stabilnog rasta prsline i oblast nestabilnog rasta prsline, slika 10.6.

Za praćenje rasta zamornih prsline mogu da se koriste različite metode, kao što su mikroskopija, ispitivanje vrtložnim strujama, merenje električnog otpora ili akustična emisija. Pošto je postojanje inicijalnih grešaka uobičajeno kod realnih konstrukcija i materijala, period inicijacije prsline se uzima sa pretpostavkom da je početna prsline imala dužinu a_0 . Praćenjem priraštaja dužine prsline, Δa sa brojem ciklusa opterećenja - ΔN , slika 10.7, dobijaju se krive koje imaju različiti oblik u zavisnosti od intenziteta cikličnog opterećenja i veličine inicijalne prsline

Više takvih krivih moguće je prikazati na jednom dijagramu, ukoliko se podaci prikažu preko zavisnosti između brzine rasta prsline po jednom ciklusu opterećenja ($\Delta a/\Delta N$ ili da/dN) i promene faktora intenziteta napona na vrhu prsline (ΔK , je mera mehaničke pokretačke sile za rast prsline). Najčešće se ovi dijagrami predstavljaju u koordinatnom sistemu $\log da/dN$ - $\log \Delta K$, slika 10.7, a ΔK se definiše kao:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10.1)$$

gde su: $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ i Y - geometrijski parametar.



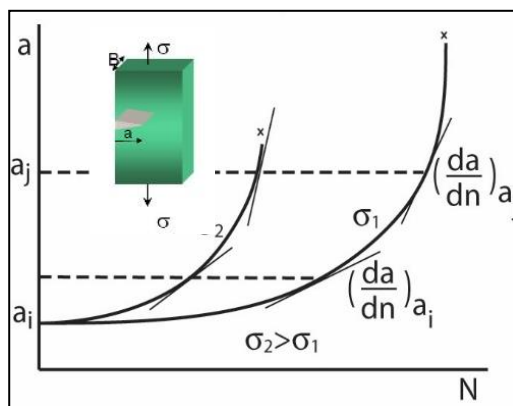
Slika 10.6: Šematski prikaz brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od opsega faktora intenziteta napona; a - dužina prsline, N - broj ciklusa, K - faktor intenziteta napona

Lom nastupa u trenutku kada prslina dostigne kritičnu vrednost $a=a_c$, odnosno, kada faktor intenziteta napona dostigne žilavost loma $K=K_{IC}$ (brzina rasta prsline teži beskonačnosti $da/dN \rightarrow \infty$).

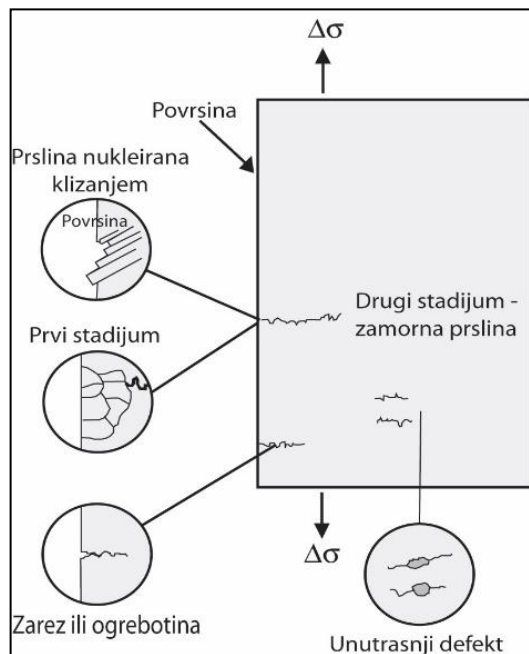
Brzina rasta prsline da/dN se uglavnom analizira u funkciji raspona faktora intenziteta napona za dati spektar cikličnog opterećenja. Rast zamorne prsline može da se predstavi kroz tri stadijuma koji odgovaraju oblastima na slici 10.6 (vidi sliku 10.8):

- I stadijum - mala vrednost promene faktora intenziteta napona tako da prslina praktično ne napreduje (oblast praga zamora – prag faktora intenziteta napona ΔK_{th}); iznad te vrednosti dolazi do inicijacije prsline,
- II stadijum - linearna promena brzine rasta prsline sa promenom faktora intenziteta napona,
- III stadijum, ili stadijum nestabilnog rasta prsline - oblast u kojoj se sa malim promenama faktora intenziteta napona dobija veliko povećanje brzine rasta zamorne prsline.

Prvi stadijum - oblast inicijacije (nastanka) prsline. Prvi stadijum opisuje inicijaciju prsline što uključuje ciklične plastične deformacije jedne ili više mikroskopskih prslina i spajanje ovih mikroprsline u oblik početne makroprsline. U prvoj oblasti se nalazi prag opsega faktora intenziteta napona ΔK_{th} za koji brzina rasta prsline asimptotski teži nuli. Za vrednosti $\Delta K < \Delta K_{th}$ nema rasta prsline, odnosno prslina ostaje „pokrivena” i njena propagacija se ne može uočiti niti se može odrediti eksperimentalnim putem, slika 10.6. U opštem slučaju u okviru prve oblasti izražen je uticaj mikrostrukturnih svojstava. Za prag faktora intenziteta napona ΔK_{th} je prvobitno pretpostavljano da je konstanta materijala, međutim, savremena istraživanja su pokazala da vrednost ΔK_{th} zavisi od više parametara i da ne može da se tretira kao konstanta. Njegova vrednost se menja sa temperaturom, radnom sredinom (korozija) i opterećenjem.



Slika 10.7: Dijagram promene dužine prsline sa brojem ciklusa ispitivanja



Slika 10.8: Faze nukleacije i stabilnog rasta prsline kod naizmeničnog zateznog opterećenja

Drugi oblast - stabilan rast prsline. U drugom stadijumu brzina rasta prsline postaje konstantna i oblast je linearna. U ovoj oblasti je rast prsline pre svega osetljiva na dejstvo okoline i srednjeg napona, dok je uticaj mikrostrukture i debljine manji. Radni vek dela koji sadrži inicijalnu prslinu se sa dovoljnom tačnošću može svesti na period stabilnog rasta prsline, s obzirom da su periodi inicijacije i nestabilnog rasta vrlo kratki. Stabilni rast prsline se najčešće opisuje Parisovim zakonom. Paris je pretpostavio da faktor intenziteta napona kontroliše rast zamorne prsline i da rast prsline po jednom ciklusu može da se odredi kao:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (10.2)$$

gde su: C i m konstante materijala, ΔK - opseg faktora intenziteta napona, koji zavise od faktora opterećenja $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ i temperature.

Faktor inteziteta napona je ključni parametar od koga zavisi proces širenja prsline. Parisov zakon daje dobre rezultate u oblasti stabilnog rasta prsline.

Treća oblast - nestabilan rast prsline. Vreme trajanja treće faze je uglavnom vrlo kratko i ne može bitno uticati na vek trajanja usled zamora. U ovoj oblasti brzina rasta prsline raste i teži beskonačnosti kada opseg faktora

intenziteta napona dostigne žilavost loma materijala (kritična vrednost faktor intenziteta napona) K_{IC} , odnosno u trenutku loma. U okviru ove oblasti mehanizmi rasta prsline su osetljivi na dimenzije prsline, vrstu opterećenja, nivo srednjih napona, ali i na mikrostrukturna svojstva, dok je uticaj okoline mali.

Forman, Kearney i Engle su predložili empirijsku relaciju za zakon rasta prsline koji, osim oblasti stabilnog uzima u obzir i oblast nestabilnog rasta prsline:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{[(1-R)K_{IC}-\Delta K]} \quad (10.3)$$

gde je uticaj maksimalnih napona uzet u proračun preko faktora opterećenja R . Ovom relacijom moguće je simulirati trenutak loma, odnosno trenutak kada se ostvaruje uslov da brzina rasta prsline $da/dN \rightarrow \infty$, kada $\Delta K \rightarrow K_{IC}$ pri $R=0$.

U tabeli 10.1 su sumarno prikazane osnovne osobine rasta prsline po stadijumima - oblastima definisanim na slici 10.6.

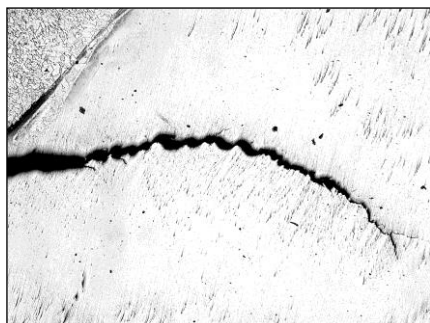
Tabela 10.1: Osnovne osobine oblasti sa slike 10.6

Oblast	I	II	III
Naziv	Spori rast prsline	Umereni rast prsline – stabilan rast	Brzi rast prsline – nestabilan rast
Mikroskopski tip razaranja	Čisto smicanje	Linije odmaranja; klizanje u dve ravni	Linije odmaranja i dodatni statički mod
Karakteristike površine loma	Fasete	Kretanje prsline po ravnicama	Dodatni statički deo loma (žilav – spajanje mikropora; krt – transkristalni)
Uticaj mikrostrukture	Veliki	Mali	Veliki
Uticaj faktora opterećenja R	Veliki	Mali	Veliki
Uticaj naponskog stanja	-	Veliki	Veliki
Zona plastičnosti na vrhu prsline r_c	$r_c < d_{zrna}$	$r_c > d_{zrna}$	$r_c \gg d_{zrna}$

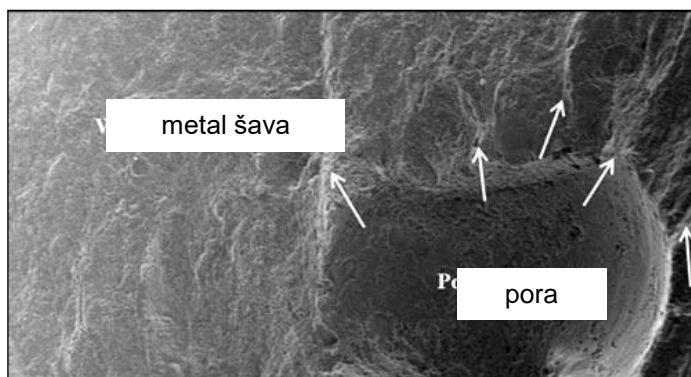
10.6. Zamor kod zavarenih spojeva

U svim uslovima rada zavareni spojevi pokazuju manji zamorni vek u odnosu na osnovni materijal. Ova činjenica se može pripisati pre svega uticaju mikrostrukture na inicijaciju i rast prsline kod različitih zona zavarenih spojeva, međutim, uvek se zadržava transkristalni karakter loma. Najčešće inicijacija prsline zamornog loma započinje u grubozronim zonama ZUT-a za

koje je karakterističan transkristalni lom cepanjem i na granici različitih faza, slika 10.9



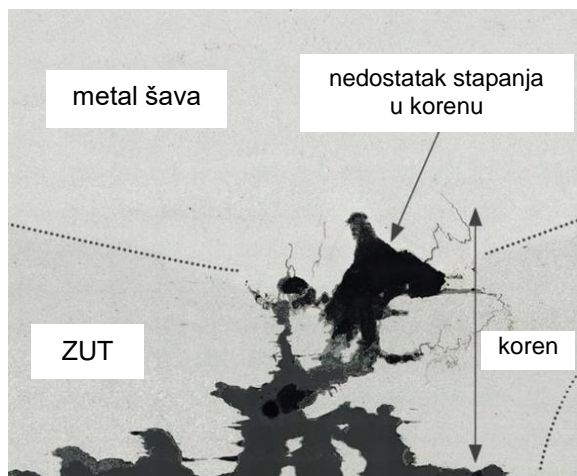
Slika 10.9: Prslina u MŠ-a inicirana na granici ZUT-MŠ kod raznorodnog zavarenog spoja (ferit - austenit)



Slika 10.10: Rast zamorne prsline (bele strelice) potpomognut poroznošću u metal šavu, SEM mikrofotografija

Slika 10.10, Preuzeta i adaptirana iz izvora: <https://www.met-tech.com/fractured-crane-frame-weldment/> licence otvorenog koda

Iako je i za osnovni materijal karakterističan transkristalni lom, postoji izražena razlika u propagaciji prsline kroz ZUT i OM. Jedan od ključnih faktora upravljanja zamornim vekom zavarenih spojeva je pažljivo modifikovanje mikrostrukture u cilju sprečavanja pojave krtih i tvrdih faza koje olakšavaju rast zamorne prsline i smanjenje broja grešaka u spoju, slike 10.10 i 10.11. Takođe, poželjno je dobijanja takve raspodele veličine zrna koja će izazvati skretanja zamorne prsline, čime se smanjuje intenzitet napona na vrhu prsline, kao i brzina napredovanja prsline (npr. formiranjem austenitno-feritne dupleks strukture kod zavarenih spojeva austenitnih čelika).



Slika 10.11: Inicijacija zamorne prsline u korenu i u ZUT-u

Slika 10.10, Preuzeta i adaptirana iz izvora: <https://si-materialslab.com/metallurgical-lab-case-study-corrosion-fatigue-in-waterwall-tubes/> licence otvorenog koda

10.7. Uticaj zaostalih napona na inicijaciju zamornih prsline

Radni vek u uslovima delovanja cikličnih opterećenja može da se produži i kontrolom zaostalih napona. Osnovni uslov za inicijaciju prsline je postojanje zateznog naponskog polja na površini dela. Promenom znaka napona u površinskom sloju, odnosno unošenjem pritisnih napona znatno se otežava inicijacija prsline. U tom slučaju je za inicijaciju prsline potrebno da se primeni spoljašnji napon koji će po intenzitetu biti viši od pritisnih napona u površinskom sloju materijala i pritom mora da savlada minimalno potreban napon za inicijaciju prsline. Jedan od najčešćih postupaka za unušenje pritisnih zaostalih napona je postupak sačmarenje (shot peening), tj., mehaničko delovanje na površinu mlazem kuglica.

Zamorni vek se povećava zbog:

- povećane zatezne čvrstoće deformisanog sloja i
- smanjenja zaostalih zateznih napona u površinski slojevima materijala i njihovo prevođenje u pritisne napone indukovane nakon postupka sačmenjem.

Ovaj efekat je izraženiji kod predopterećenih delova jer se postiže veća dubina na kojoj se indukuju poželjni pritisni naponi.

Na sličan način hladna deformacija površine može doprineti relativno povoljnoj raspodeli zaostalih napona. Obrada pritiskom površine je proces koji se koristi za obradu određenih površina mašinskih delova (npr. rukavaca i osovin), kao i kod komponenata pod pritiskom kao što su cevi na naftnim bušotinama, a kojim se omogućava da se u površinskom sloju izazove plastična deformacija. Efekat plastične deformacije površinskih slojeva se postiže samo do određene dubine i u graničnoj oblasti ispod deformisanog

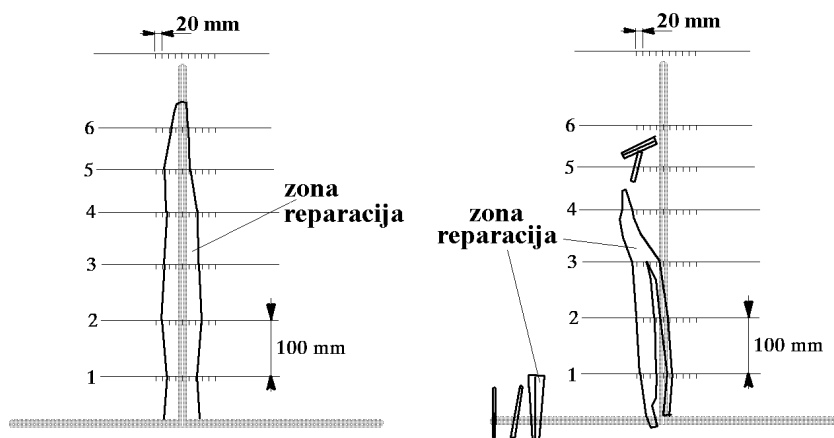
sloja tokom delovanja opterećenja metal ispod površine će se ponašati različito u odnosu na površinske slojeve, što generiše pritisne zaostale napone u deformisanom sloju. Kod ovako obrađena površina radni vek u uslovima zamora može da se poveća i do tri puta.

Metal kod koga je čvrstoća povećana hladnom deformacijom može biti nestabilan pri cikličnom opterećenju u plastičnom području (niskociklični zamor), a kao rezultat se javlja proces omekšavanja pa je ovaj način zaštite nepogodan za slučaj niskocikličnog zamora. Hladnom deformacijom se povećava otpornost na zamor kod visokocikličnog zamornog opterećenja, dok kod niskocikličnog praktično nema uticaja u odnosu na polaznu otpornost pre hladne deformacije.

Pri stacionarnim uslovima zaostali napon se ponašaju na isti način kao statički naponi i sabiraju se sa radnim naponima. Međutim, zaostali naponi se menjaju tokom eksploatacije komponente tako da se njihov nivo može odrediti pouzdano jedino ispitivanjem.

I brušenjem je moguće uneti malu količinu pritisnih zaostalih napona, međutim ako su već uneti pritisni zaostali naponi u površinsko sloju dela, brušenjem se oni uklanjaju. Glavna prednost finije mašinske obrade je uklanjanje potencijalnih koncentratora napona. Tokom procesa zavarivanja obavezno se unose zatezni zaostali napone, pa njihova veličina i pravac imaju štetan uticaj na zamorni radni vek.

Primer efekta sačmarenja na sprečavanje pojave prslina. Redovnim kontrolama jedne posude pod pritiskom izložene dinamičkom opterećenju u radu, u neposrednoj blizini vertikalnih i horizontalnih zavarenih spojeva, kao i u oblastima oko otvora za priključke, otkrivene su prsline.

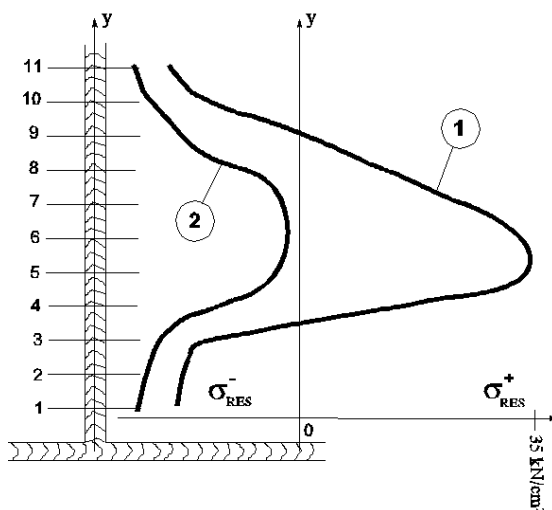


Slika 10.12: : Šematski prikaz zona reparatura na zavarenim spojevima posude pod pritiskom izložene dinamičkom opterećenju

Prsline su sanirane po propisanoj tehnologiji, ali nakon reparacije i određenog vremena eksploatacije primećeno je da se one ponovo pojavljuju u istim

zonama, i tako iz godine u godinu. Posle većeg broja reparacija oštećene oblasti su postajale sve šire, kako je to prikazano na skici na slici 10.12. Novonastale prsline su se pojavljivale u različitim pravcima sa različitim dubinom prodiranja. Interesantno je istaći da su se prsline stvarale u zoni uticaja toplote kod vertikalnih spojeva dok je kod radijalnih zavarenih spojeva njihova pojava bila u mnogo široj zoni.

Sprečavanje nastanka novih prsline je ostvareno unošenjem pritisnih zaostalih napona sačmarenjem oštećenih zona. Merenjima zaostalih napona utvrđeno je da je njihov nivo znatno niži posle sačmarenja u odnosu na polazno stanje, slika 10.13. Na ovaj način je odloženo novo iniciranje prsline u oštećenim zonama na više godina.



Slika 10.13: Raspodela zaostalih napona koji deluju duž zavarenog spoja pre i posle sačmarenja (shot peening-a)

10.8. Kombinovano delovanje zamora i puzanja

Za komponente koje rade na povišenim temperaturama neophodno je prepoznati vid razaranja koji je karakterističan za datu komponentu, odnosno neophodno je utvrditi da li se javlja neki od mehanizama oštećenja/razaranja:

- neelastična deformacija (ciklična plastičnost),
- prekomerna deformacija,
- akumulacija oštećenja usled puzanja,
- inicijacija prsline usled puzanja i zamora,
- rast prsline koji može da bude usled:
 - (a) zamora i puzanja u prelaznim uslovima,
 - (b) puzanja u uslovima stabilnog stanja.

Svaki od navedenih mehanizama oštećenja/razaranja neophodno je razmatrati odvojeno, s tim što može da se javi interakcija između vidova

oštećenja od (i) do (iv). Pristup ispitivanja zajedničkog delovanja puzanja i zamora je zasnovan na određivanju osobina materijala koje se koriste za procenu oštećenja, npr. ciklično-naponsko-deformaciono ponašanje i ciklično-relaksaciono ponašanje. Za proračun pojave prslina, koristi se dinamička čvrstoća kao specifični kriterijum loma. Testovi niskocikličnog zamora obuhvataju nivoe statičkih napona kojima se simulira neprekidni rad. Ponekad se izvode i osnovni eksperimenti na kojima se određuju parametri oštećenja, npr. stepen poroznosti granica zrna ili oksidacija tokom zamora. Primenjena ispitivanja uključuju i različite cikluse koji mogu da se izvode u cilju potvrde određenog modela, npr. pri interakciji puzanja i zamora i oksidacije i zamora.

Pri analizi uticaja veličine prslina na lom, osnovna pretpostavka je da ne može da se dozvoli značajan rast prslina u toku radnog veka dela/komponente, zbog čega se i laboratorijska ispitivanja uzoraka izvode pod tim uslovima. Osnovni cilj ispitivanja niskocikličnog zamora malih uzoraka je određivanje broja ciklusa do potpunog loma N_f , tako da taj podatak može da se koristi za predviđanje radnog veka. Uzorci koji se ispituju se uzorkuju iz realnih komponenti, tako da vrednost N_f stvarno odlikava iniciranje prslina u masivnom delu. Alternativno, egzaktniji kriterijumi se zahtevaju za određivanje kritične lokacije za pojavu prslina, zbog čega je i poznavanje broja ciklusa za inicijaciju prslina N_i , poželjno za svaki pojedinačni uzorak.

Imajući u vidu da su zatezne i pritisne komponente histerezisne petlje nejednake, kao kriterijum razaranja može da se usvoji od 2 % ili 5 % pada nosivosti usled pojave prslina. Zavisno od veličine komponente, ovo može da se smatra kao rana faza pojave prslina usled zamora. U eksperimentima izvedenim na austenitnom čeliku, prvi znaci oštećenja su u vidu prslina iniciranih na površini koje se susreću sa granicama zrna u kojima su izdvojene pore, a pri daljem ispitivanju izdvojene pore, čiji je broj enormno povećan, su intereagovala sa rastućom prslinom što je dovelo do relaksacije napona, a zatim i do interkristalnog razaranja. Za lom je karakterističan mešoviti mod razaranja kod kojeg je rastojanje između linja odmaranja manje izraženo. Na osnovu ovih i sličnih ispitivanja, utvrđena su četiri kriterijuma ciklusa razaranja, slika 10.14:

1. inicijacija oštećenja usled zamora,
2. inicijacija oštećenja usled puzanja,
3. lom usled zamora i
4. lom usled puzanja

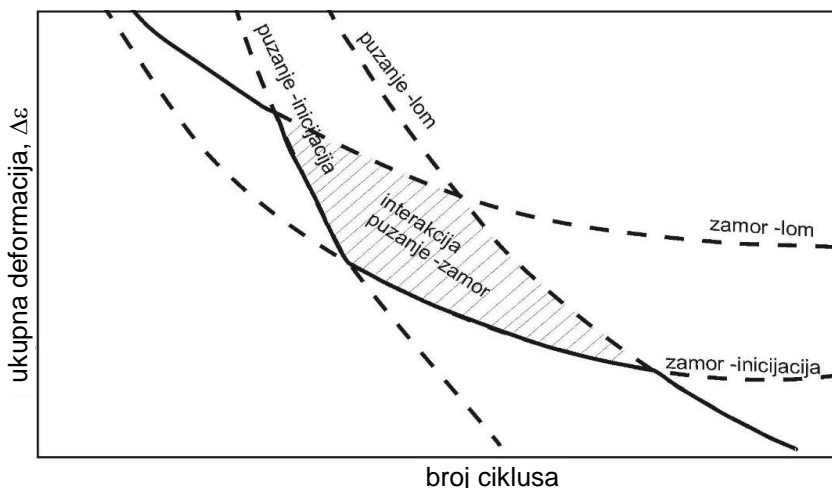
kao i modovi u kojima puzanje može da se promeni ili preklopi sa nekim drugim mehanizmom oštećenja, u zavisnosti od uslova zadržavanja na povišenoj temperaturi.

Za ciklus razaranja neophodno je jasno definisanje dužine zamorne prslina koja može da se smatra inicijalnom. Isto tako, ukoliko lom nastaje međusobnim spajanjem pora tokom radnog veka, bez obzira na efekt nastale prslina, lom se tretira da je izazvan dominantno puzanjem.

Na slici 10.14 je šematski, na dijagramu intervala ukupna deformacija ($\Delta\varepsilon$) – broj ciklusa do razaranja (N), prikazana „stvarna” oblast koja odgovara

interakciji puzanja i zamora. Kriva $\Delta\varepsilon - N$ je podeljena u četiri oblasti zavisno od ukupnog intervala deformacije, $\Delta\varepsilon$:

- za $\Delta\varepsilon > 3\%$: dominantan je zamorni lom,
- za $3\% > \Delta\varepsilon > 0.6\%$: lom je izazvan interakcijom puzanja i zamora,
- za $\Delta\varepsilon < 0.6\%$: dominantan je lom izazvan puzanja i
- za $\Delta\varepsilon <$ deformacije pri naponu tečenja, lom nastaje usled zamora ukoliko je predhodno postojala prslina.



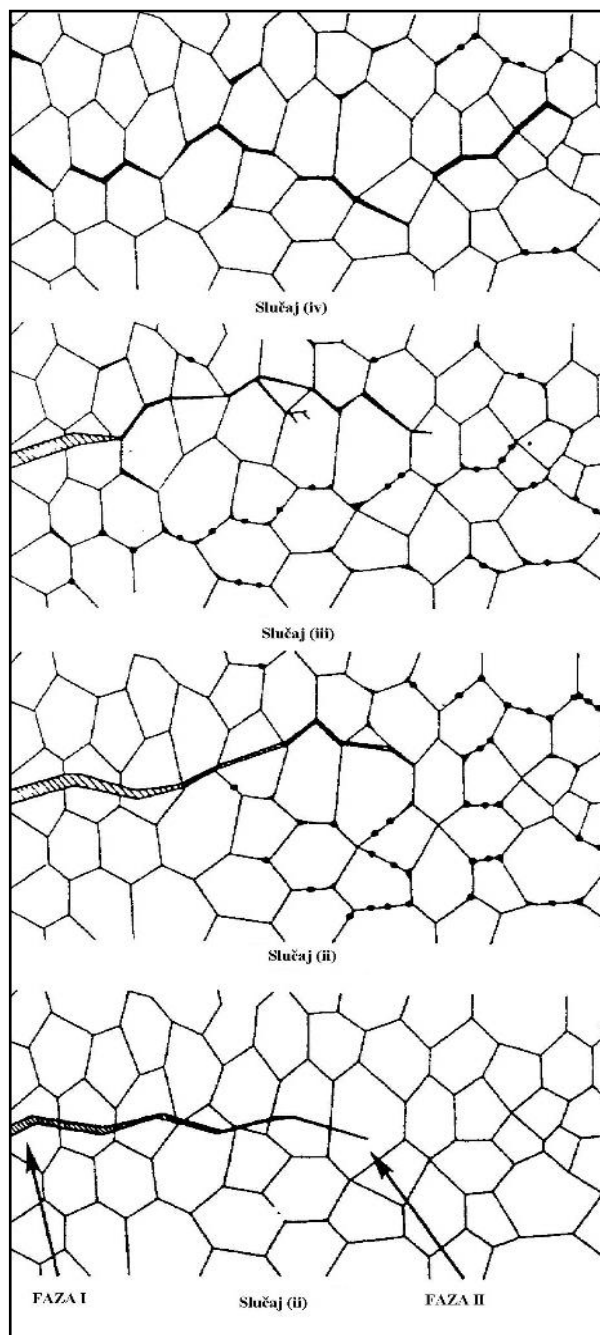
Slika 10.14: Oblast interakcije puzanja i zamora

Prethodnu podelu interakcije oštećenja moguće je detaljnije proširiti na:

- transkristalno iniciranje i rast prslina,
- transkristalno iniciranje praćeno interkristalnim rastom,
- interkristalno iniciranje praćeno transkristalnim rastom,
- interkristalno iniciranje i rast,
- iniciranje prslina u unutrašnjosti u trojnim tačkama i
- iniciranje prslina na postojećim porama i uključcima.

Prva četiri navedena slučaja su šematski prikazana na slici 10.15. Kod mnogih materijala za rad na povišenim temperaturama utvrđeno je da ne dolazi do interakcije zamora i puzanja jer dominira efekat puzanja, pošto se rast pora u unutrašnjosti i pojava prslina na površini događaju nezavisno. Takođe, kod dugih vremena rada menja se način širenja prslina od pretežno transkristalnog do pretežno interkristalnog oblika, što takođe, ukazuje na dominantan efekat puzanja.

Međutim, za realne uslove rada neophodno je da se još jedan aspekt uzme u obzir - lokalizovana i povratna deformacija na granicama zrna može da dovede do pucanja zaštitnog oksidnog filma, što izaziva ubrzanu oksidaciju metala i lakše iniciranje prslina. Imajući u vidu da isti ubrzan proces može da se desi i na vrhu prslina, ispravan naziv ove pojave bi bio - interakcija puzanja, oksidacije i zamora.



Slika 10.15: Kriterijumi za klasifikaciju interakcije puzanja i zamora

Uticaoj oksidacije. Za realne uslove rada neophodno je da se još jedan aspekt uzme u obzir - lokalizovana deformacija u granicama zrna može da dovede do pucanja zaštitnog oksidnog sloja, što izaziva ubranu oksidaciju metala i lakše iniciranje prslina. Imajući u vidu da isti proces može da se desi i u vrhu prsline i ubrza razaranje, ispravan naziv ove pojave bi bio - interakcija puzanja, zamora i oksidacije. Potreban broj ciklusa za inicijaciju prsline u ovim uslovima se smanjuje, a rast prsline je ubrzan usled uticaja radne sredine u vrhu prsline. Takođe, sa porastom vremena izlaganja oksidacionoj sredini (npr. vazduhu), dinamička čvrstoća se smanjuje.

Koliki je uticaj sredine najbolje se vidi iz podatka da je broj ciklusa do razaranja niskolegiranog čelika na 600°C u argonu, dvostruko veći od broja ciklusa na vazduhu. Generalno, može da se konstatuje da:

- oksidacija u uslovima delovanja napona izaziva mnogo veća oštećenja nego sama oksidacija,
- kod nekih materijala i na temperaturama koje su više od neke granične oksidacija ima veći uticaj na izdržljivost materijala nego puzanje.

Efekat interakcije oksidacije i zamora je često prikriven i može da se greškom svrsta u interakciju puzanja i zamora.

Ocena oštećenja izazvanih puzanjem i zamorom – frakcije radnog veka. Jedan od pristupa ocene utrošenog resursa materijala komponente kod kombinovanog delovanja zamora i puzanja je primena pravila frakcija radnog veka, odnosno, jednostavna relacija koja objedinjuje:

- Minerovo (1945) pravilo frakcija radnog veka pri delovanju zamora ($\sum(n/N_f)=1$),
- Robinsonovo (1952) pravilo frakcija radnog veka pri delovanju puzanja ($\sum(t/t_f)=1$) i
- Zbirni uticaj zamora i puzanja:

$$\sum \frac{n_i}{N_f} + \sum \frac{t_j}{t_f} = 1 \quad (10.4)$$

gde je: n_i - broj ciklusa određenog tipa; N_f - broj ciklusa do loma određenog tipa; t_j - vreme provedeno na određenoj temperaturi; t_f - vreme do loma pri puzanju na datoj temperaturi. Ovo pravilo je generalno eksperimentalno potvrđeno za broj ciklusa do 10^4 (niskociklični zamor i puzanje).

Međutim, jedan od glavnih nedostataka pravila frakcija radnog veka je što ne može da uzme u obzir deformaciju koja se javlja pri relaksaciji napona pre nego što dođe do uznapredovalog puzanja. Postoji vrlo malo eksperimentalnih potvrda samog Minerovog pravila za slučaj delovanja kontinualnog cikliranja na povišenoj temperaturi, tako da se sumiranjem frakcija kod potpunog iscrpljenja usled interakcije puzanja i zamora dobija vrednost ispod jedinice.

10.9. Termički naponi i termički zamor

Termički naponi. Naponi koji nastaju zbog ometanja prirodnog izduženja ili skupljanja materijala pri promeni temperature se nazivaju termički naponi. Ako se štap ravnomerno zagreva od početne temperature T_1 do temperature T_2 , jedinična promena dužine štapa u jednom pravcu (x) može da se odredi preko koeficijenta linearnog termičkog širenja α :

$$\frac{\sigma}{E} = -\alpha(T_2 - T_1) \quad (10.5)$$

uz napomenu da se termički naponi ne indukuju ako je omogućena slobodna dilatacija štapa u x pravcu (slobodno se izdužuje).

U slučaju da je deformacija sprečena u x pravcu (npr. konstantno rastojanje između oslonaca, itd.), a deformacija u y pravcu je slobodna, javlja se aksijalni termički napon koji može da se odredi preko izraza:

$$\sigma = -E\alpha(T_2 - T_1) \quad (10.6)$$

U slučaju da je deformacija sprečena i u y pravcu, deformacije u x i y pravcu usled zagrevanja su jednake:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\alpha(T_2 - T_1) = \alpha\Delta T \quad (10.7)$$

a glavne komponente termičkog napona u x i y pravcu iznose:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -\frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{1 - \nu} = -\frac{E\alpha\Delta T}{1 - \nu} \quad (10.8)$$

Sprečavanjem širenja i u trećem z pravcu, upravno na x-y ravan, indukovani napon iznosi:

$$\sigma = -\frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{1 - 2\nu} = -\frac{E\alpha\Delta T}{1 - 2\nu} \quad (10.9)$$

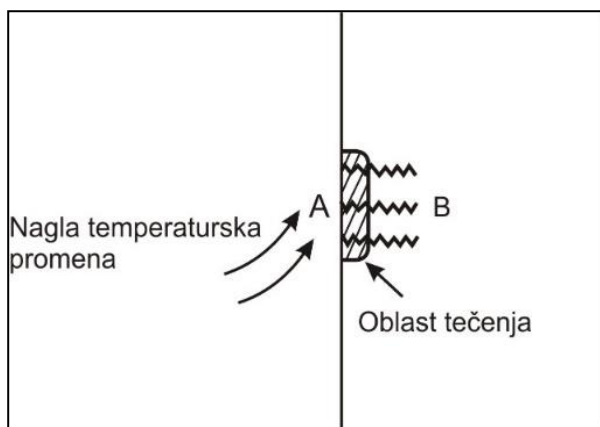
Termički naponi dati izrazom 10.9 odgovaraju potpuno sprečenim deformacijama, pa su maksimalno mogući. Kod većine elementa se pojavljuje ograničenje deformacije samo u dva pravca, tako da su oni veći od slučaja ograničenja samo u jednom pravcu za odnos $1/(1 - \nu)$, ili 43 % (za čelik sa Poasonovim koeficijentom $\nu = 0,3$). Znak „ - ” u datim jednačinama pokazuje da su naponi pritiski, jer je izduženje sprečeno. Ako je sprečeno skupljanje, javiće se napon zatezanja sa pozitivnim predznakom. Treba napomenuti da koeficijent linearnog širenja zavisi od temperature, pa samim tim i naponi koji nastaju pri istom ΔT na različitim temperaturama se razlikuju. Termički naponi mogu da se indukuju ako postoji neravnomerno temperaturno polje u nekom delu po zapremini. Ovo je slučaj kod masivnih

delova tokom procesa zagrevanja i hlađenja kada je širenje neravnomerno po oblastima dela a širenje jedne oblasti je ograničeno širenjem susednih oblasti. Zbog toga se u oblastima koje imaju višu temperaturu pojavljuju pritisni naponi, dok se u hladnijim oblastima pojavljuju zatezni naponi.

Termički naponi su sekundarnog značaja i oni ne mogu da izazovu lom duktilnog materijala pri prvom zagrevanju ili hlađenju izuzev u slučaju brze (nagle) promene temperature za veliku vrednost. Ovu pojavu nazivamo **termički šok**. Faktor velike brzine promene temperature podiže vrednost termičkih napona na maksimum i u ovom slučaju je moguće da dođe do loma posle samo par ciklusa ili čak posle jedne promene. Kao primer za ovu vrstu razaranja možemo da navedemo naglo hlađenje komponente zagrejane na visokoj temperaturi.

Kada je u pitanju promena temperature uobičajena za regularni rad mašinskih delova posle većeg broja ponavljanja termičkih ciklusa iniciraće se prsline koje mogu da dovedu do loma i tu vrstu oštećenja nazivamo **termičkim zamorom**.

Takođe, mogu da se jave i termički naponi koji izazivaju tečenje materijala u površinskim slojevima što je karakteristično za metalne materijale koji rade na vrlo visokim temperaturama, slika 10.16. Kada napon tečenja na povišenoj temperaturi opadne dovoljno sa porastom temperature, ispunjen je uslov za pojavu tečenja materijala.



Slika 10.16: Tečenje materijala u površinskim slojevima kod termičkog zamora

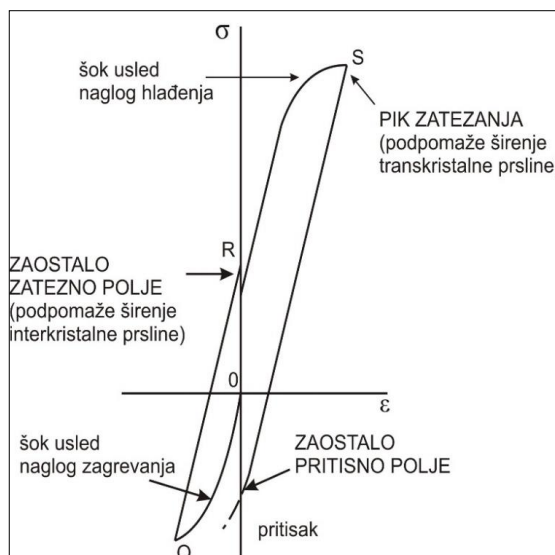
Ciklus zagrevanja i hlađenja, odnosno cikliranja neke komponente možemo da objasnimo na histerezis krivoj koja opisuje ovaj proces, slika 10.17. Tokom zagrevanja, ukoliko kod neke komponente naglo poraste temperatura, zagrejana oblast će biti izložena pritisnim naponima zbog onemogućenog širenja od strane oblasti koja nije dostigla tu temperaturu i u površinskim slojevima će početi da teče materijal. Sa protokom vremena, gradijent temperature lagano opada, okolne oblasti se zagrevaju do više temperature i celom sistemu ponovo deluje polazno polje napona u svim

tačkama. Ukoliko nakon ovakve promene komponenta duže vreme radi na povišenim temperaturama, oblast u kojoj se desilo tečenje materijala će biti podložna pojavi interkristalnih prslina.

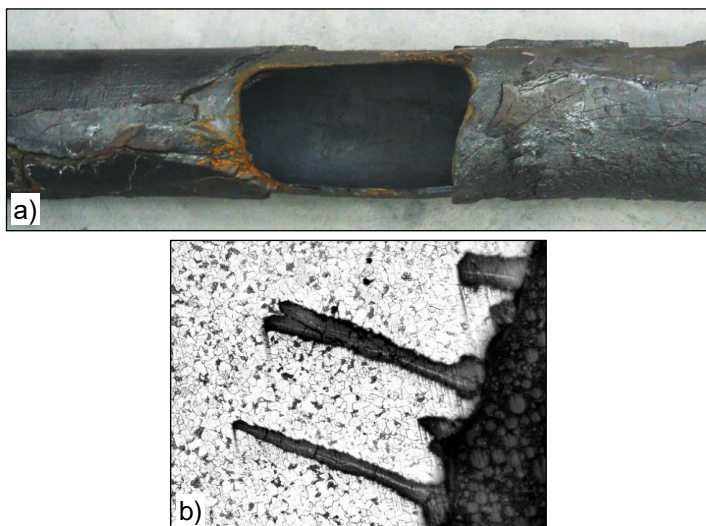
Ciklus se završava kada se komponenta ponovo hladi na početnu temperaturu, s tim što se u istim lokalnim oblastima javljaju zatezni naponi zbog ubrzanog lokalnog skupljanja materijala a tada nastaju uslovi za transkristalno širenje prslina. Zaostali naponi koji se u tom trenutku javljaju ne dovode obavezno do pojave oštećenja, ali nakon više ponavljanja ovih ciklusa na kritičnim mestima se zatvaraju histerezisne petlje, i ostvaruju se uslovi za iniciranje i rast razgranatih prslina usled termičkog zamora.

Oštećenje tankozidne cevi od termičkog zamora je prikazano na slici 10.18. Kod tankozidnih komponenti efekti cikliranja izazvan promenama temperature, najčešće izazivaju oštećenja, brzinom koja najviše zavisi od gradijenta fluktuacija temperatura.

Kod komponenti izloženih termičkom zamoru dubina i broj prslina zavise od temperature i brzine ciklusa. Što je više ΔT i veća brzina odvijanja ciklusa prslina su dublje i njihov broj je manji. Za niže vrednosti ΔT i veliki broj ciklusa karakteristična je pojava većeg broja prslina manje dubine koje su međusobno upravno postavljene. Ukoliko se ovaj proces odvija na temperaturama na kojima se odvija i puzanje, termički zamor je praćen i mikrostrukturnom degradacijom. Ukoliko se ova pojava dešava u vazduhu ili u parnoj sredini praćena je i procesom intenzivne oksidacije.



Slika 10.17: Histerezis termičkih napona u komponenti izazvanih naglim zagrevanjem i hlađenjem



Slika 10.18: Termički zamor: a) makro izgled ekstremnog oštećenja kotlovske cevi tipa „prozora” i b) SEM mikrofotografija: mikroprsrline od termičkog zamora