

RAZLIČITE STRATEGIJE ODREĐIVANJA PREOSTALE ČVRSTOĆE I VEKA DIFFERENT STRATEGIES FOR EVALUATION REMAINING STRENGTH AND LIFE

Pregledni rad / Overview paper
UDK / UDC: 539.4:624.046
Rad primljen / Paper received: 10.9.2001

Adresa autora / Author's address:
Dr Petar Agatonović, Beratung und Analyse, Pappelweg 11,
D-85244 Röhrmoos, Nemačka

Ključne reči:

preostala čvrstoća i vek, zamena-sa-razlogom, procurivanje-pre-loma, koncept prihvatljivog oštećenja, koncept sigurnog veka, replike

Rezime

U radu je dat opšti pristup određivanju preostale čvrstoće i veka konstrukcije primenom parametara mehanike loma. Posebno su analizirani mehanizmi nastanka i rasta oštećenja, kao što su zamor, puzanje i korozija. Kao primeri za ilustraciju opisanih procedura, analizirani su kolektori pare u termoelektrani i diskovi mlaznih motora. Takođe su analizirane posude pod pritiskom i zavareni spojevi, kao tipični primeri konstrukcija čiji integritet treba proceniti.

UVOD

U uslovima današnjeg privređivanja smanjenje troškova i optimalno korišćenje proizvodnih pogona je od presudnog značaja. Pod uticajem različitih mehanizama, kao što su to zamor, puzanje, povećanje krutosti, erozija i korozija, koji deluju ne samo pojedinačno nego i u kombinaciji, komponente stare sa vremenom. Starenje može uzrokovati smanjenje čvrstoće ili krutosti konstrukcije do stepena gubitka integriteta, što vodi ka neočekivanim zastojima, skupim popravkama, zameni delova i povećanju opštih troškova eksploatacije. Zbog toga su ovakvi delovi projektovani da budu u pogonu neki garantovani vek. Značajna ekonomska korist se ostvaruje ako se produži njihov vek. Stoga je važno proceniti njihovo stanje, preostalu čvrstoću i vek, i razviti odgovarajuće strategije održavanja.

Karakteristika konstrukcije koja garantuje pouzdanu eksploataciju definiše se kao *integritet* konstrukcije. Vezujući ovu karakteristiku za neki određeni period vremena, *vek* konstrukcije može da se definiše kao period vremena u toku koga je konstrukcija u stanju da ispunjava sigurno, pouzdano i ekonomično svoju funkciju u opštim uslovima.

Ova, na prvi pogled, jasno definisana karakteristika skriva u sebi mnoge neodređenosti i nesigurnosti. Pojam otkaza vezuje se za čitav niz kriterijuma kao što su to: potrošen vek, potrošen proračunati vek zavisno od uslova primene, učestanost otkaza i opravki, nalazi kontrole (prslina, oštećenja), curenje, povećane vibracije i promene dimenzija. Osim toga, kriterijumi odluke su veoma različiti zavisno od rizika vezanog za lom i otkaz, konzervativizma u donošenju odluka i drugih uticaja.

Proizvođači, korisnici, zvanične agencije i drugi odgovorni za integritet konstrukcije su svesni da su moguće greške u određivanju opterećenja i/ili napona. Proizvođači mogu da uzmu u obzir te nesigurnosti propisujući konzervativno kratak vek ili konzervativne šeme redovnih izmena i opravki u pogonu. Primena minimalnih karakteristika materijala, u kombinaciji sa uobičajenim stepenima sigurnosti pri određivanju veka, vodi u većini slučajeva ka nedovoljnom korišćenju kon-

Key words:

residual strength and life, retirement-for-cause, leak-before-break, damage tolerance concept, safe life concept, replicas

Summary:

A general approach to evaluation of residual strength and life of structures has been presented by using fracture mechanics parameters. Damage initiation and growth mechanisms due to fatigue, creep and corrosion has been analysed in particular. To illustrate the presented procedure, steam collector and jet engine disks have been given as examples. Pressure vessels and welded joints have been also analysed as typical structures whose integrity should be assessed.

strukcije. Praksa zamene komponentata sa ograničenim vekom kod prvog problema u pogonu ili na kraju veka često vodi ka nepotrebnim troškovima. Iskustvo je pokazalo da većina komponentata, čiji je vek istrošen, mogu i dalje da budu u eksploataciji bez većeg rizika.

Rezultat ove analize je program *zamena-sa-razlogom* (Retirement-for-cause), čijom primenom troškovi konstrukcije mogu znatno da se smanje, jer se povlačenje iz pogona uslovljava merljivim smanjenjem čvrstoće i veka.

TEORIJSKE OSNOVE

Garantovani integritet konstrukcije postiže se sistematskim ispitivanjem svih faktora koji mogu da utiču na opterećenje, uslove okoline i opšte uslove tokom pogona. U okvirima konvencionalnog inženjerskog prilaza polazi se od geometrije komponente za koju se, uzimajući da je bez grešaka, određuje nosivost. Prihvatljiva konstrukcija postiže se ako je maksimalni napon manji od čvrstoće materijala, umanjene odgovarajućim stepenima sigurnosti. Međutim, kod većine konstrukcija glavni uzrok pojave loma je nastanak i rast prslina. Zato je ovakvo dimenzionisanje konstrukcije često nedovoljno, pa je za obezbeđenje integriteta i sigurnosti neophodna primena mehanike loma. Ponekad mora da se uzme u obzir mogućnost da čak i posle temeljno sprovedene kontrole postoje prslina i slične greške, koje mogu da dovedu do katastrofalnog loma već na samom početku eksploatacije ili posle nakon nekog perioda rasta prslina sve do njene kritične veličine.

Postoji čitav niz mehanizama koji mogu dovesti do loma. Različiti oblici loma ne zavise samo od vrste opterećenja i osobina materijala, nego i od veoma složenih promena u materijalu pod uticajem niza uslova koji prate opterećenje u pogonu. Polazeći od jednostavnog statičkog loma koji može da bude krt ili žilav, pa sve do lomova koji su zavisni od vremena i akumuliranja odgovarajućih oštećenja u materijalu (zamor, puzanje, zamorno puzanje, korozija), u kombinaciji sa uslovima opterećenja nastaju i različite mogućnosti razvoja i pojave

loma. Shodno tome, preostala čvrstoća i vek delova konstrukcije moraju da se odrede u funkciji tipa i nivoa opterećenja, uslova okoline, kao i od oblika i veličine oštećenja u materijalu.

PREOSTALA ČVRSTOĆA PRI STATIČKOM OPTEREĆENJU

Prvo teorijsko objašnjenje uticaja greške (ili prsline) dao je Inglis još 1913. godine. Međutim, on je definisao napon na vrhu prsline kao beskonačan za beskonačno oštre prsline. To je u suprotnosti sa ponašanjem materijala koji na račun plastičnosti dovodi do zatupljivanja prsline. Nešto kasnije, 1920. godine, Grifit prilazi rešenju na drugi način, vezujući lom za energiju neophodnu za rast prsline. Na osnovu ovoga rešenja napon na vrhu prsline postaje konačna veličina i ne zavisi od radijusa prsline (pod uslovom da je prsline stvarno oštra).

Irwin i Orowan su 1948. godine modifikovali ova rešenja da bi uzeli u obzir plastične deformacije u blizini vrha prsline. Međutim, izvan male oblasti na vrhu prsline njihovo rešenje uzima u obzir isključivo elastične deformacije. Konačno, 1956. godine Irwin uvodi pojam *brzine oslobađanja energije* ili *sile rasta prsline*, G , koju upoređuje sa karakteristikom materijala koja se zove *žilavost loma*. Prsline počinje da raste kada brzina oslobađanja energije dostigne žilavost loma. Rast prsline može da bude stabilan ili nestabilan, zavisno od ponašanja žilavosti loma, koje je opisano pomoću tzv. R krive (kriva otpora). Kod idealno krutih materijala otpor materijala ne zavisi od dužine prsline (horizontalna R kriva), pa je rast prsline nestabilan.

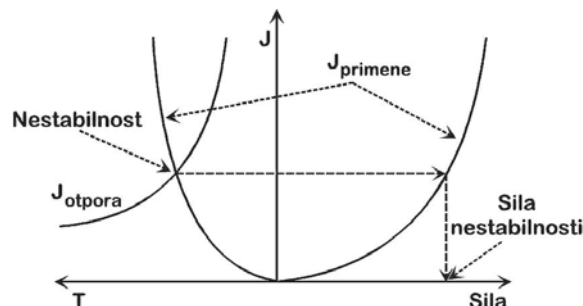
Danas se sila rasta prsline često iskazuje pomoću J-integrala, koji uzima u obzir međudejstvo plastičnosti i prsline [1]. Promena otpornosti sa rastom prsline se takođe uzima u obzir preko J-integrala, u okviru tzv. J krive otpornosti, sl. 1, izražene preko tzv. modula čupanja, T . U uslovima linearne elastičnosti važi $J=G$, a između J-integrala i faktora intenziteta napona K postoji zavisnost

$$J = \frac{K^2}{E'} \quad (1)$$

gde je E' efektivni modul elastičnosti.

U praksi linearno elastična mehanika loma (LEFM - Linear Elastic Fracture Mechanics) je primenljiva i kao postoje plastične deformacije, pod uslovom da su one ograničene na malu oblast ispred vrha prsline. U tom slučaju primena mehanike loma za procenu integriteta konstrukcije je zasnovana na jednom parametru. Za uslove LEFM otpor lomu je izražen kritičnom vrednošću faktora intenziteta napona K_{Ic} pri ravnoj deforma-

ciji, dok je otpor u odnosu na početak žilavog loma definisan kritičnom vrednošću J integrala, J_{Ic} . Postupak određivanja ovih veličina definisan je standardima, koji propisuju minimalnu debljinu epruvete da bi se postiglo stanje ravne deformacije.

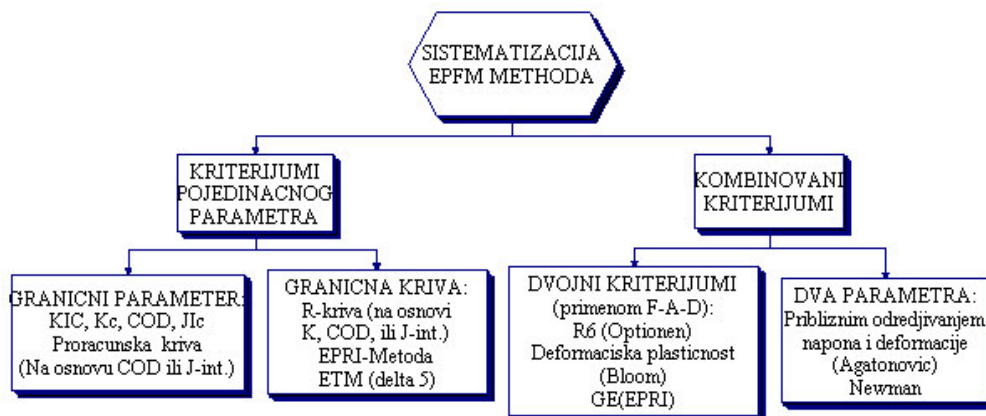


Slika 1. Metoda J/T određivanja stabilnosti rasta prsline

Opređeljivanje za jedan ili drugi parametar uglavnom zavisi od pogodnosti i tačnosti određivanja u datim uslovima. U praksi je čest slučaj da se karakteristike materijala određuju u uslovima elasto-plastične mehanike loma (EPFM - Elastic Plastic Fracture Mechanics), npr. kada se ne raspolože materijalom odgovarajuće debljine.

Međutim, iako bi, specijalno u slučaju K_{Ic} , trebalo da se radi o karakteristici materijala, to u stvarnosti nije sasvim tako. Na primer, primena 95% sekante (koje treba da odgovara 2% stabilnog rasta prsline) ne uzima u obzir različite mehanizme koji vode ka odstupanju od početnog nagiba krive, koje može nastati i kao posledica plastičnog, a ne samo krtog loma. Osim toga, kriterijum 2% znači različite veličine rasta prsline za različite veličine epruvete. Zbog toga veće epruvete daju za plastične materijale veće vrednosti žilavosti loma, čak i ako su kriterijumi standarda ispunjeni. Ako su ova odstupanja u propisanim granicama, onda K_{Ic} može da se smatra karakteristikom materijala.

U početnom periodu razvoja mehanike loma uticaj veličine ograničavao se samo na uslove ispitivanja da bi se dobili podaci o materijalu koji su nezavisni od geometrije. Interesantno je da se neophodna debljina epruvete obično opravdava uslovima ometene deformacije i neophodnošću postizanja stanja ravne deformacije na vrhu prsline. Međutim, dokazano je da je glavni uticaj u ovom pogledu zasnovan na statističkom uticaju dimenzija na 'žilavost loma'.



Slika 2: Sistematizacija metoda mehanike loma

Porast otpornosti materijala u uslovima stabilnog rasta prsline pokazao je da neki granični parametri materijala ne važe u tim uslovima i da odgovarajuća rešenja mogu dovesti do velikih odstupanja. Za mnoge praktične probleme takav pristup je suviše konzervativan, što može da vodi nepotrebnim popravkama, isključivanju postrojenja i povećanim troškovima. U realnim konstrukcijama prslina su retko u uslovima ometene deformacije, pa se krti lom u praksi ne javlja često. Mnogo češći je otkaz koji je praćen plastičnim deformacijama i postepenim rastom prsline, poznat pod nazivom 'žilavi lom'. U slučaju žilavog loma, sledeći tipičnu J-R krivu, otpornost materijala na rast prsline može znatno da se poveća dok prslina raste. Stoga je osnovni pristup uopšten time što je uzeta u obzir kriva otpornosti materijala.

Međutim, ako su plastične deformacije ometene, porasta otpornosti nema i materijal otkazuje već na samom početku krive, gde J_{Ic} odgovara kritičnoj vrednosti faktora intenziteta napona pri ravnom stanju deformacije, K_{Ic} . Stoga treba težiti da epruvete za određivanje karakteristika materijala odgovaraju dimenzijama (debljini) konstrukcije. U radu /1/ je demonstrirana tačnost ovakvog prilaza. Međutim, određivanje žilavosti loma na ovaj način postaje znatno komplikovanije, pa se ovakvo razmatranje kombinuje za ispitivanjem uticaja geometrije da bi se dobile univerzalnije karakteristike materijala /1/.

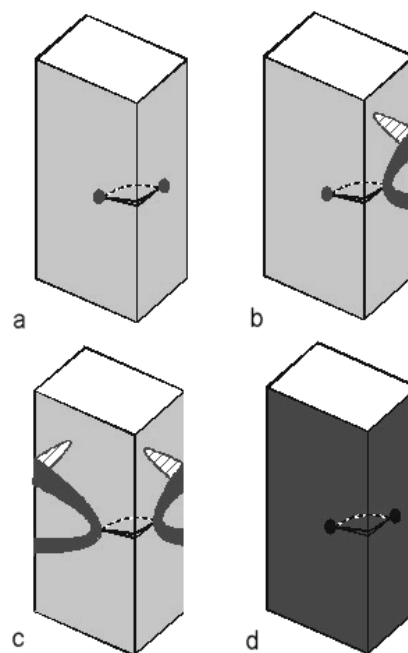
S druge, polazeći od kriva otpora, predložene su i mnoge inženjerske metode, npr. "Inženjerski pristup" (Engineering Approach - EPRI) i Metoda inženjerske obrade (Engineering Treatment Method).

Opšti zaključak ove analize je da parametri plastične mehanike loma zavise od geometrije i dimenzija. Pri tome uticaj ometene deformacije dovodi do različitih rezultata u pogledu otpornosti materijala na rast prsline. Ispitivanja na epruvetama pokazuju da je porast otpornosti na rast prsline veći kod tanke ploče nego kod debele, kao i kod opterećenja na zatezanje (ploča sa centralnom prolaznom prslinom) u odnosu na savijanje (CT epruveta).

Uticaj ometene deformacije je relativno novi aspekt u analizi sličnosti ponašanja laboratorijskih epruveta i realne konstrukcije. Pri tome se ne radi samo o merenim vrednostima karakteristika materijala. Postoje izvesni podaci, na primer, koji pokazuju da cevi sa površinskom prslinom imaju znatno nižu temperaturu prelaska u krti lom (cca 100 °C) nego što je to slučaj sa epruvetama za savijanje u tri tačke. U slučaju prolaznih prslina, međutim, ponašanje cevi sa prslinom poklapa se sa ponašanjem standardnih epruveta. Shodno tome lom konstrukcije sa površinskom prslinom može da bude žilav i ispod temperature prelaska u krti lom, što znači da postoji rezerva, kako u pogledu radne temperature, tako i u pogledu opterećenja.

Različite faze razvoja plastičnosti su pokazane na sl. 3. U početku tečenje je ograničeno na vrh prsline, a plastična deformacija je okružena elastičnom, sl. 3a. Spoljna kriva krutosti je linearna, budući da je doprinos plastičnosti zanemarljiv. Ukoliko su dimenzije u svim pravcima dovoljno velike plastična zona ostaje mala sve do pojave loma, uz nestabilan rast prsline. Ovi uslovi, koji se obično nazivaju 'srazmerno malo tečenje', mogu uspešno da se razmatraju u LEFM. Međutim, kod tankih ploča dolazi do tečenja ligamenta, sl. 3b, ili celog preseka, sl. 3c. U oba ova slučaja deformacija nije ometena u značajnoj meri, pa postoje uslovi za porast otpornosti materijala na rast prsline. U slučaju mešanja lokalne plastičnosti oko vrha prsline sa globalnom plastičnošću u neto preseku, razvoj i ponašanje

pri lomu ne mogu da se opišu samo svojstvima mehanike loma materijala. U ekstremnim uslovima, kada je prslina mala i materijal plastičan, prslina može da bude 'zaboravljena' od materijala, koji teče u celoj zapremini epruvete, sl. 3d.



Slika 3: Različiti stepeni razvoja plastičnosti na vrhu prsline

Prethodne metode procene, uzimajući u obzir isključivo parametre mehanike loma, sl. 3a, nezavisne su od uslova tečenja i mogućeg plastičnog kolapsa, sl. 3d. Zbog toga su, polazeći od oba granična slučaja, razvijene metode koje kombinuju odgovarajuće kriterijume u obliku tzv. dijagrama procene loma (Failure Assessment Diagram - FAD). Zbog komplikovanosti realnih uslova, koja su po pravilu između ova dva granična slučaja, rešenje su jedino moguća putem interpolacije ili približavanja. Shodno tome, klasični dijagram procene loma zasniva se na interpolaciji između dva nezavisna rešenja: otkaza usled prsline, na osnovu LEFM, i otkaza usled plastičnog kolapsa u kritičnom preseku, koji se procenjuje plastičnom analizom. Nije teško uočiti da ova metoda ne koristi EPFM jer ne uzima u obzir ponašanje koja odgovara sl. 3b-c.

Umesto interpolacije uprošćena rešenja mogu da se dobiju putem približavanja. Imajući u vidu da za procenu loma u uslovima plastičnosti treba uzeti u obzir kako napon, tako i deformaciju, razvijena je od autora nova metoda na osnovu njihovog približnog određivanja, koja je prvi put primenjena za proračun kućista rakete ARIANE 5, /3/. Do rešenja se dolazi na jednostavan način. Polazeći od (1), kvadrat se razlaže u proizvod dva faktora intenziteta od kojih faktor intenziteta napona K_{σ} ostaje neizmenjen, a drugi faktor nakon skraćivanja sa elastičnim modulom postaje faktor intenziteta deformacija K_{ϵ} :

$$E' \cdot J = K_{\sigma} K_{\epsilon} \quad (2)$$

Analogija sa poznatim rešenjem Nojbera (Neuber) za slučaj zarez ($K_t = K_{\sigma} K_{\epsilon}$) je očigledna. Na osnovu ovoga rešenja može da se konstruiše odgovarajući FAD, sl. 4:

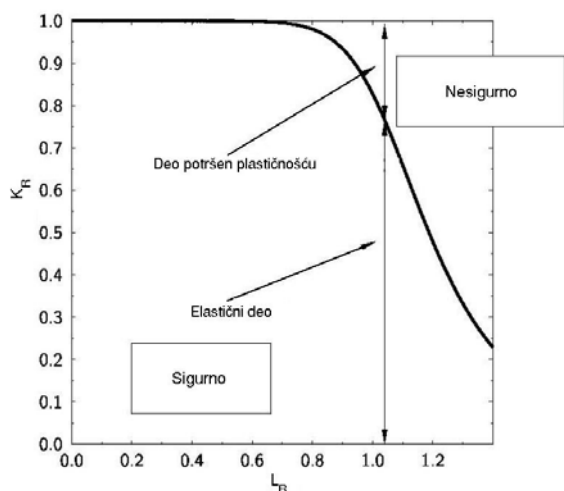
$$K_r = \sqrt{\frac{L_r \cdot \sigma_T}{E \cdot \epsilon_{ref}}} \quad (3)$$

gde je L_r bezdimenziona koordinata FAD,

$$\varepsilon_{ref} = \left[\frac{L_r \cdot \sigma_T}{E} + (L_r \cdot \sigma_T \cdot B_F) \right]^{1/n} \quad (4)$$

a B_F i n koeficijenti inženjerske krive napon-izduženje:

$$\sigma = B_F \cdot \sigma^n \quad (5)$$



Slika 4: Primer dijagrama procene loma (FAD)

UTICAJ PRSLINE I GREŠAKA NA PREOSTALI VEK

Koncept cikličnog razvoja prsline pri zamoru prethodio je u inženjerskoj praksi mehanici loma. Ova lokalna pojava oštećenja uzrok je ograničenja veka u zavisnosti od broja ciklusa. Uopšteno se smatra da se ukupni vek sastoji od perioda za nastanak prsline i perioda za rast prsline do loma. Imajući ovo u vidu, istraživanja su pretežno usmerena na uspostavljanje nezavisnih procedura za nastanak i rast ciklične prsline.

U slučaju zamora početna faza oštećenja u većini slučajeva nije praćena vidljivim manifestacijama. Do vremena kada stepen oštećenja dostigne nivo pri kome može da bude otkriven pomoću uobičajenih metoda ispitivanja bez razaranja, veliki deo veka je možda već utrošen. Odgovarajući period obuhvata komplikovane procese ne samo početka prsline u mikroobimu materijala, nego i prelazni period do obrazovanja glavne prsline. Koncept nastanka prsline, zasnovan na uprošćavanjima komplikovanih odnosa, neophodan je radi analize preostalog veka pri rastu prsline. U tom cilju prsline treba da bude precizno geometrijski definisana, a da bi se "razlikovala" od drugih mikroprslina i grešaka u materijalu treba da bude dovoljne veličine da bi njen uticaj na dalji razvoj oštećenja do loma bio dominantan. Deo veka koji se pripisuje jednoj ili drugoj fazi je veoma je različit zavisno od geometrije, opterećenja, vrste i kvaliteta obrade. U slučaju najjednostavnije glatke laboratorijske epruvete 90% i više veka može da bude u nastanku prsline. To naravno nije slučaj kod pljosnate epruvete primenjene u mehanici loma za ispitivanje žilavosti loma i otpornosti na rast prsline, iako i ova epruveta zahteva izvestan broj ciklusa opterećenje za „oštrjenje“ veštačke prsline.

U slučaju realnih konstrukcija proces nastanka prsline je usled koncentracije napona najčešće lokalnog karaktera. Zavisno od proizvodnog kvaliteta moguće je i prisustvo prsline u makroobimu već na samoj početku primene. Na osnovu današnjih saznanja o fizičkoj osnovi procesa nastanka i rasta prsline, radni vek do loma komponente može da se podeli u četiri faze:

1. Nastanak ili inkubacija sve do pojave značajnog diskontinuiteta u materijalu. Takav diskontinuitet može da postoji u materijalu od početka u vidu prirodne greške.
2. Period rasta prsline koji zavisi od lokalne mikrostrukture i geometrije (npr. zarez), poznat još kao period rasta 'kratke' prsline.
3. Rast makroskopske prsline koji može da se opiše pomoću metoda mehanike loma, pri čemu uticaj mikrostrukture može da se zanemari.
4. Završna faza, praćena velikim deformacijama i duktilnim lomom.

Dva najčešća mehanizma rasta prsline su zamor i naponska korozija. Rast dužine prsline usled zamora u uslovima linearno elastičnog cikličnog opterećenja računa se pomoću poznatog Parisovog obrasca:

$$\frac{da}{dn} = C \Delta K^n \quad (6)$$

Međutim, u najopštijem slučaju ova jednostavna zavisnost brzine rasta prsline, da/dN , od opsega faktora intenziteta napona, ΔK , proširuje se nizom uticaja kao što su odnos minimalnog i maksimalnog napona (R), intenzitet amplitude faktora intenziteta napona ispod koga prsline ne raste (ΔK_{th}) i kritična vrednost faktora intenziteta napona (K_c) za date uslove geometrije i opterećenja prsline.

U uslovima elasto-plastičnog cikličnog opterećenja rast prsline može da iskaže preko amplitude J integrala, ΔJ :

$$\frac{da}{dn} = Q \Delta J^p \quad (7)$$

Shodno (2) ΔJ može da se izrazi kao

$$E' \cdot \Delta J = \Delta K_\sigma \Delta K_\varepsilon \quad (8)$$

Do rasta prsline usled naponske korozije dolazi samo ako istovremeno postoji koncentracije neke hemikalije i povišeno statičko opterećenje. Pri tome nije važno da li je opterećenje spoljne ili je, npr. posledica zaostalih unutrašnjih napona. Slično zamoru i ovde mogu da se prepoznaju različite faze kao što su inkubacija i nastanak prsline, rast prsline i konačni lom izazvan gubitkom nosivosti zbog smanjenja preseka.

Rast prsline usled naponske korozije opisuje se izrazom:

$$\frac{da}{dt} = P \Delta K_{max}^q \quad (9)$$

koji važi za uslove gde je K_{max} neka vrednost između intenziteta napona K_{Isc} pri kome ne dolazi do naponske korozije i žilavosti loma K_{Ic} .

U slučaju niske temperature i niske koncentracije hemikalija obično ne dolazi do naponske korozije, čak i ako prsline postoji, budući da su elektrolitični efekti mali da bi prouzrokovali koroziju. Mestimična korozija ne izaziva prsline nego glatke pore koje su manje opasne. U tom slučaju korozija kao uzrok rasta prsline može da se isključi.

Kombinovani uticaj naponske korozije i zamora može uprošćeno da se predstavi sumiranjem oba uticaja (uz korekciju zamornog rasta frekvencijom ciklusa):

$$\frac{da}{dt_{ukupno}} = \frac{da}{dt_{korozije}} + f \frac{da}{dn_{zamor}} \quad (10)$$

Do korozionog zamora dolazi kada usled cikličnog opterećenja pasivni zaštitni sloj od korozije puca i tako nastaje oblast anode čime se ubrzava ceo proces otkaza.

Povišenje temperature u uslovima opterećenje ne samo da utiče na brzinu rasta prsline, nego dovodi i do novih mehanizama rasta prsline i oštećenja materijala kao što je puzanje. U slučaju dela konstrukcije koji je na početku primene bez karakterističnih grešaka, razvoj do loma tipično je uslovljen fazama nastajanja, rasta i sjedinjavanja pora na granicama zrna. Međutim, i ovde je, zavisno od geometrije dela i opterećenja, moguća različita kombinacija nastanka i rasta prsline. Lom usled rasta prsline može da se nađe kod komponenata sa oštirim zarezom ili početnim greškama (npr. u zavarenom spoju).

Većina eksperimentalnih rezultata pokazuje da rast prsline može biti opisan obrascem koji ovo dovodi u vezu sa parametrom mehanike loma C^* integralom:

$$\frac{da}{dt} = \beta C^* \delta \quad (11)$$

Za materijale čije se puzanje opisuje eksponencijalnom zavisnošću tipa

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = A \cdot \sigma_c^m \quad (12)$$

ovaj parametar može da se, po analogiji sa J integralom, opiše na osnovu rešenja za potpuno plastično stanje /3/

$$C^* = \alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot \sigma_0 c \cdot h_1 \left(\frac{a}{W} \cdot n \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n+1} \quad (13)$$

koje posle zamene

$$\frac{\alpha \cdot \varepsilon_0}{\sigma_0} = A \rightarrow \left(\text{shodno } \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \right) \quad (14)$$

dobija sledeći oblik

$$C^* = A \cdot c \cdot h_1 \left(\frac{a}{W} \cdot m \right) (\sigma_c)^{n+1} \quad (15)$$

Funkcija h_1 se određuje za razne geometrije iz tablica.

U slučaju kombinovanog dejstva puzanja i zamora, prethodno opisani proces nastanka i rasta zamorne prsline se dodatno komplikuje uticajem mehanizma puzanja i međudejstvom puzanja i zamora. Rast prsline je ubrzan dejstvom puzanja i okolne sredine. Stoga pristup analizi veka visokotemperaturnih komponenata na osnovu "lokalnih događaja", kao što je bio slučaj kod zamora, mora da se uopšti u cilju istovremenog razmatranja lokalnog rasta prsline i zapreminskog oštećenja materijala i njihovog međudejstva.

U najjednostavnijem slučaju rast prsline usled puzanja i zamora može da se odredi superpozicijom na osnovu /4/:

$$\frac{da}{dN} = \frac{da}{dn^{\text{zamor}}} + \frac{1}{f} \frac{da}{dt^{\text{puzanje}}} \quad (16)$$

KONCEPTI MEHANIKE LOMA

Na postupcima određivanja preostale čvrstoće i veka u okvirima mehanike loma zasnovan je koncept *prihvatljivog oštećenja* (Damage tolerance), kojim se definiše sposobnost konstrukcije sa prslinom da nosi opterećenje u nekom ograničenom periodu vremena bez popravke. Ovaj koncept se realizuje u sledeće tri faze:

1. Određivanje oblika i stepena oštećenja u cilju ocene preostale čvrstoće.
2. Analiza razvoja oštećenja i procena preostalog veka.
3. Blagovremena kontrola radi dalje ocene razvoja oštećenja.

Pri tome je neophodan uslov uspesno sprečavanje i potpuno isključenje mogućnosti katastrofalnog loma. Blagovremena i redovna kontrola uslovljena je činjenicom da postojanje grešaka ispod nivoa osetljivosti IBR ne može da se isključi, pa je određivanje preostale čvrstoće i veka privremenog karaktera i zasnovano na hipotezi postojanja grešaka. Cilj koncepta prihvatljivog oštećenja je, prema tome, da se garantuje vek i čvrstoća koji su dovoljni do sledeće kontrole. Zbog toga je koncept prihvatljivog oštećenja nerazdvojan od principa Zamene sa razlogom.

Primena koncepta prihvatljivog oštećenja za ocenu veka zahteva odgovarajuću preciznost i pouzdanost metoda IBR, kako za potrebe Zamene-sa-razlogom, tako i za ocenu postojećih grešaka. Iako metode IBR nisu predmet ovoga rada, mora da se naglasi značaj zahteva koje mehanika loma ima u tom pogledu. U okvirima IBR moraju da se reše problemi sigurnosti nalaženja greške i uspostavljanja relacija između nalaza i realne greške. Pri tome je transformacija mernog signala koji je zavisn od metoda IBR u stvarne dimenzije greške značajna karakteristika merenja.

Radi vrednovanja nalaza IBR metodama mehanike loma neophodna je karakterizacija realne prsline, što je moguće samo konzervativnim uprošćavanjima, na osnovu iskustva i normi.

EKSPRIMENTALNO-NUMERIČKA VERIFIKACIJA

Poznato je da usled sistematskih grešaka u određivanju opterećenja, radnih ciklusa i napona, kao i rasipanja karakteristika materijala i ostalih parametara mogu da nastanu znatna odstupanja u pogledu procene veka. Prethodna razmatranja su pokazala da je praktična primena parametara mehanike loma na ocenu integriteta konstrukcije vezana za mnoge nesigurnosti. Zbog toga je potrebno da se dobijeni rezultati proveravaju i eksperimentalno verifikuju.

NEOPHODNOST I GRANICE EKSPERIMENTA

Najefikasniji direktan način da se verifikuje postupak projektovanja i procene veka je ispitivanje stvarnih komponenata u stvarnim radnim uslovima. Na žalost, ne samo ekonomski razlozi često isključuju ovu varijantu. Na primer, sasvim je nepraktično izvesti ovakve ispitivanja dovoljno dugo da bi se pokrio ceo vek komponenata koji često prelazi 20 ili 30 godina. S druge strane, neizbežna odstupanja pri ispitivanju u laboratorijskim uslovima dovode u pitanje prenosivost dobijenih rezultata na stvarne uslove. Zbog toga je uobičajeno da se rezultati ispitivanja numeričkim putem transformisu ili ekstrapoliraju na realne uslove. Da bi se otkrile i eliminisale greške kako u pogledu rezultata analize i tako i u pogledu ispitivanja značajno je da se eksperimentalne i numeričke metode kombinuju tako da daju najveću moguću potporu jedno drugoj.

Najvažnije merilo primenljivosti bilo koje metode je pouzdanost prenošenje rezultata sa prostih laboratorijskih epruveta (znatno manjih dimenzija) na realne (velike) konstrukcije. Iako mnogi parametri mogu da se mere tokom ispitivanja sa epruvetama, sa gledišta primene otvoreno je pitanje: "Koji parametar ostaje nepromenjen?", pa je važeći za konstrukciju koja se tretira. Shodno tome, u okviru ocene veka, najozbiljniji problem je činjenica da je eksperimentalno određivanje veka ograničeno na kratak period vremena ili mali broj ciklusa i mali broj epruveta.

Svršishodni izbor, koncepcija i vrednovanje rezultata ispitivanja radi prenošenja na radne uslove nisu mogući bez numeričke analize, čiji je glavni cilj u tom pogledu:

- da predvidi ponašanje konstrukcije u radnim uslovima, i time smanji zavisnost od obimnih i skupih opita, i
- da kroz analizu i tumačenje rezultata ispitivanja poveća opštu korist.

UBRZANO I EKONOMIČNO ODREĐIVANJE VEKA

Postoje različiti načini da bi se ubrzano dobili podaci ispitivanja veka. Na osnovu poznate logaritamske zavisnosti

$$\sigma^m \cdot N = \text{const.} \quad (17)$$

sledi da povećanje opterećenja skraćuje vek za

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_P} = \left(\frac{N_P}{N_T} \right)^m \quad (18)$$

Povećanje opterećenja, npr. za 20%, skraćuje vek na jednu trećinu za tipičnu vrednost eksponenta krive zamora $m=6$. Ovo skraćivanje ne može direktno da se primeni u praksi budući da su pojedini rezultati podložni širokom rasipanju. Statistička obrada rezultata i definicija stvarnih vrednosti na osnovu rezultata je nauka za sebe. U praksi se, međutim, polazi od izvesnih uprošćavanja i unose podaci ranijih iskustava, bez koji bi vrednovanje rezultata bilo neekonomično.

Tipičan prilaz u slučaju zamora je da se vek elemenata raspisa po zakonu logaritamske normalne raspodele. Ukoliko se pretpostavi da je rasipanje rezultata u okviru $\pm\sigma \rightarrow N_{\max}/N_{\min}=6$ onda za srednju vrednost sledi $N_m = \sqrt{6} = 2,4495$, pa je

$$\sigma = \frac{1}{3} \log \frac{N_m}{N_{\min}} = 0.12969$$

U praksi se obično raspolaze manjim brojem epruveta, npr. manjim od 10. Shodno tome, mora se uzimati u obzir da se srednje vrednosti raspajaju oko stvarne vrednosti, pa se za raspodelu srednjih vrednosti mora usvojiti faktor rasipanja koji je zavisan od broja opita

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

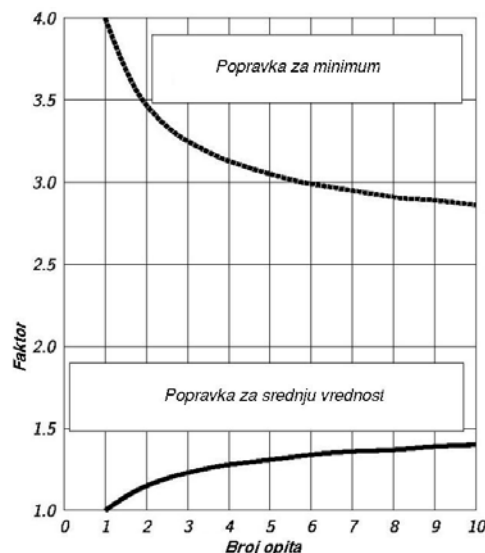
Sada mogu da se izračunaju faktori popravke srednje vrednosti opita (logaritamska raspodela):

$$N_{m,n} = N_m \cdot 10^{\frac{U_c \cdot \sigma}{\sqrt{n}}} \quad (20)$$

gde je U_c parameter stepena pouzdanosti, koji u slučaju 95% ima vrednost 1,645. Na osnovu ovoga mogu da se izračunaju popravni koeficijenti zavisno od broja epruveta, sl. 6. Za beskonačni broj epruveta rezultati teže vrednosti 2,4495.

Iz ovog razmatranja sledi da je skraćivanje eksperimenta moguće, ako je povećanje opterećenja više od 20% i broj epruveta veći od tri. Međutim, povećanje nivoa opterećenja nikako ne sme da dovede do plastičnosti i preraspodele napona, jer su onda gornji odnosi nevažeci. Isto tako, ovi odnosi važe samo za uslove pre ili posle nastanka prsline, a nikako za oba perioda, jer nagib zamorne krive nije isti u obe oblasti. Ukoliko opterećenje ne zavisi od vremena smanjenje vremena je moguće na račun frekvencije opterećenja.

Uslovi postaju naročito složeni ako je oštećenje zavisno ne samo od broja ciklusa, nego i od vremena opterećenja. Najjednostavniji slučaj, u ovom pogledu, je pri statičkom opterećenju gde se oštećenje razvija na račun puzanja.



Slika 6: Faktori popravke za ograničen broj proba

U ovoj oblasti razvijena je parametarska metoda za interpolacije i ekstrapolacije rezultata ispitivanja. Ispitivanja mehanizama deformacija i loma pri povišenoj temperaturi na nivou kristalne strukture metala pokazala su da postoje dva najvažnija mehanizma, koji kontrolišu proces puzanja: difuziono puzanje i klizanje dislokacija. Ovi mehanizmi dominiraju u različitim oblastima temperatura. Međutim, tipični eksponencijalni zakon ukupne deformacije puzanja može jednostavno da se uopšti da bi se u oba slučaja uzeo u obzir se uticaj temperature. Polazna osnova je činjenica da je osnovni parameter ovih mehanizama termička energija aktivacije Q_c kojom se uzimaju u obzir promene zavisne od temperature:

$$\dot{\epsilon}_s = B' \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (21)$$

gde su n i B' empirijski koeficijenti materijala.

Praksa pokazuje da ovaj obrazac može da se koristi da bi se okarakterisao lom pri puzanju na osnovu vremena do loma τ_L ili do ograničene deformacije puzanja (najčešće 1%). Posle logaritamske transformacije za konstantni napon σ , sledi dobro poznati Larson-Miller obrazac

$$T \cdot (C + \ln \tau_L) = \frac{Q_c}{R} = F(\sigma) \quad (22)$$

Na osnovu ove zavisnosti može da se opiše ponašanje i prikažu podaci ispitivanja pomoću dvodimenzione $F(\sigma)$ 'glavne' krive, sl. 7, kao funkcije parametra P :

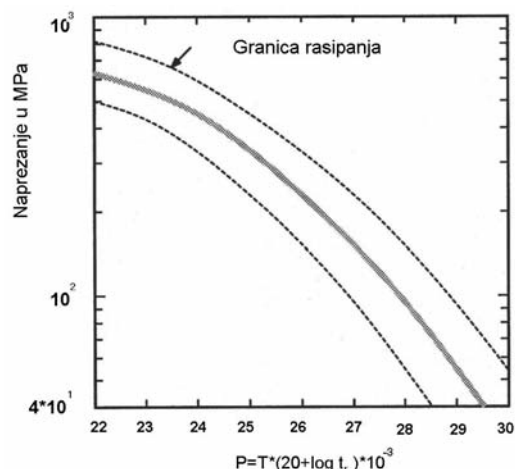
$$P = T(C + \log \tau)$$

gde je T temperatura u stepenima Rankina, C konstanta materijala (≈ 20), τ vreme do loma u satima.

Pored oštećenja od puzanja čelik je pri povišenoj temperaturi izložen oksidaciji. Ovaj vid oštećenja je površinski i karakteristiše se oksidanim slojem čija debljina zavisi od vremena dejstva i nivoa temperature. Na osnovu izmerene debljine oksidnog sloja i poznatog vremena eksploatacije, brzina rasta oksidnog sloja može da se izračuna. Na osnovu toga može da se definiše matematički model brzine rasta oksidnog sloja i odredi debljina sloja za svaki interval vremena. Ovi podaci mogu da služe i za ocenu temperature u toku pogona, korišćenjem izraza kao što je:

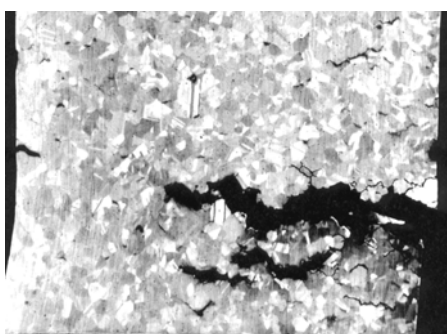
$$\log X = 0.0002[T \cdot (20 + \log \tau)] - 7.25$$

gde je X je debljina sloja u mils (1 mils = 0,00254 mm), T apsolutna temperatura ($^{\circ}\text{F} + 460$) i τ vreme u satima. Ovaj obrazac važi za tipične Cr-Mo čelike sa 1-3% hroma, kao što su 1,25Cr-0,5Mo i 2,25Cr-1Mo.



Slika 7: Rezultati ispitivanja na puzanje (IN738C)

Mnogo složeniji je slučaj kombinovanja zamornog opterećenja pri visokim temperaturama sa uticajem vremena, koje dovodi do puzanja i oksidacije. Pouzdano projektovanje konstrukcija pri najvišim temperaturama je veoma otežano, pošto se bitno razlikuje u odnosu na primenu pri 'okolnoj temperaturi'. U uslovima kombinacije opterećenje-temperatura-vreme temperatura postaje najvažniji parametar koji utiče na razvoj deformacije i oštećenja kako od zamora tako i od puzanja [6]. Pod tim uslovima primena konvencionalnih metoda (za uslove 'okolne temperature') značajno je ograničena. Tako, npr. u uslovima zamor-puzanje klasifikacija stepena rasta oštećenja, koja je zasnovana na iskustvima sa zamorom, dalje se komplikuje uvođenjem mehanizma puzanja i oksidacije, kao i međudejstvom zamora i puzanja. Kako puzanje uključuje nastanak i rast pora, sl. 8, to kombinacija zamora i puzanja čini razdvajanje i odgovarajući tretman nastanka i rasta prsline veoma otežanim.



Slika 8: Razvoj oštećenja puzanjem

U radu [6], baziranom na rezultatima istraživanja sprovedenih u okviru BRITE projekta P-1209, uticaj temperature na ponašanje pri deformaciji i lomu ispitan je sa ciljem da se izabere i definiše pouzdana procedura koja treba da bude primenjena za ocenu veka u uslovima cikličnog opterećenja sa vremenom držanja i temperaturskom opsegu koji je izvan oblasti pokrivena standardima.

Važna istraživanja u okviru BRITE projekta bila su ostvarena za uslove puzanje-zamor pri relativno visokoj temperaturi (850°C) materijala Inco 800H. Iako austenitni čelici kao što je 800H poseduju izvanrednu otpornost u odnosu na opštu oksidaciju, pri visokim temperaturama na granicama zrna izdvajaju se karbidi, koji su osetljivi na oksidaciju. Time se ubrzava nastanak zamornih prsline (inkubacija oštećenja) što znatno skraćuje vek pri cikličnom opterećenju sa vremenom držanja.

Uticaj smanjanja žilavosti materijala usled prodiranja oksida duž granica zrna od površine (koji vodi ka brzom nastanku prsline) uzet je u obzir u cilju popravke modela sa podelom opsega deformacije:

$$\frac{1}{N_i} = \left[\frac{f_{pp}}{N_{pp}} \right] \cdot \alpha + \frac{f_{cp}}{N_{cp}} \quad (23)$$

gde je koeficijent korekcije α dat preko Arrhenijusovog obrasca, sa zavisnošću od temperature preko energije aktivacije Q :

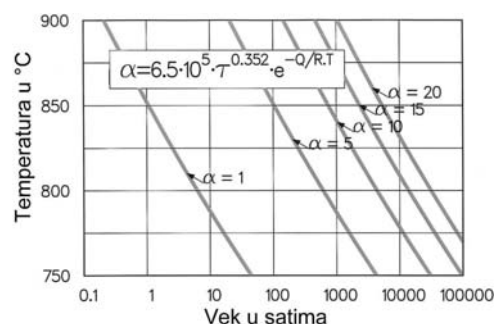
$$\alpha = A \cdot t^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (24)$$

Uvođenjem ove korekcije, postignuti su dobri rezultati procene i ekstrapolacije veka u svim opitima sa vremenom držanjem u opsegu $750-850^{\circ}\text{C}$. Osim toga, procene razpoloživih rezultata iz literature za isti materijal pokazale su takođe veliku tačnost, iako se ovde radilo o veoma različitim odlicima, materijalima i uslovima ispitivanja.

U cilju primene ove metode na osnovu 'opšte' zavisnosti vreme-temperatura konstruisan je dijagram na sl. 9, [6] koji pokazuje zavisnost od temperature i vremena u uslovima zamor-puzanje. Krive na dijagramu za različite vrednosti α su približno linearne i paralelne jedna drugoj. Ako se usvoji da je međusobno odstojanje krivih takođe funkcija od α , sve krive mogu da se daju u obliku:

$$A \cdot T + \log t_r = F(\varepsilon_{IN}, \alpha) \quad (25)$$

Dijagram na sl. 9 ukazuje na mogućnost skraćivanja ispitivanja, ako je ispitna temperatura viša nego u pogonu. Shodno nagibu na sl. 9 (kod iste amplitude deformacija) povećanje temperature za 60°C omogućuje skraćivanje ispitivanja, uz isti stepen oštećenja usled oksidisanja, od 10.000 na samo 1.000 sati. Pri tome broj ciklusa treba da ostane isti, a vreme držanja treba da se smanji prema faktoru redukcije zavisno od temperature ispitivanja.



Slika 9. Vremenska zavisnost u uslovima puzanja i zamora

Posebno treba da se naglasi da je između raznih načina ubrzavanja opita, povišenje temperature pogodnije od povećanja opterećenja ili ograničavanje vremena držanja do kraja relaksacije, zbog manje opasnosti od promene mehanizma oštećenja.

PRAKTIČNE PRIMENE

Između prilaza rešavanju problema sa praktične i teorijske strane postoje važne razlike. Teoričar nalazi tačno rešenje za problem koji u praksi ne postoji, dok se praktičar sukobljava sa konkretnim problemima koji mogu da budu rešeni samo približno, kombinovanjem teorijskih rešenja sa iskustvom i inženjerskom procenom.

ISPITIVANJE POSUDA I CEVI POD PRITISKOM

Za posude je uobičajeno ispitivanje pod pritiskom pre eksploatacije da bi se proverio njihov integritet. Praksa ovakvog *probnog ispitivanja* sa preopterećenjem priznata je kao 'dobra konstruktivna praksa' i opravdava se pretpostavkom da ispunjenje uslova probnog ispitivanja obezbeđuje da će posuda izdržati radne uslove koji su na nekom nižem nivou opterećenja.

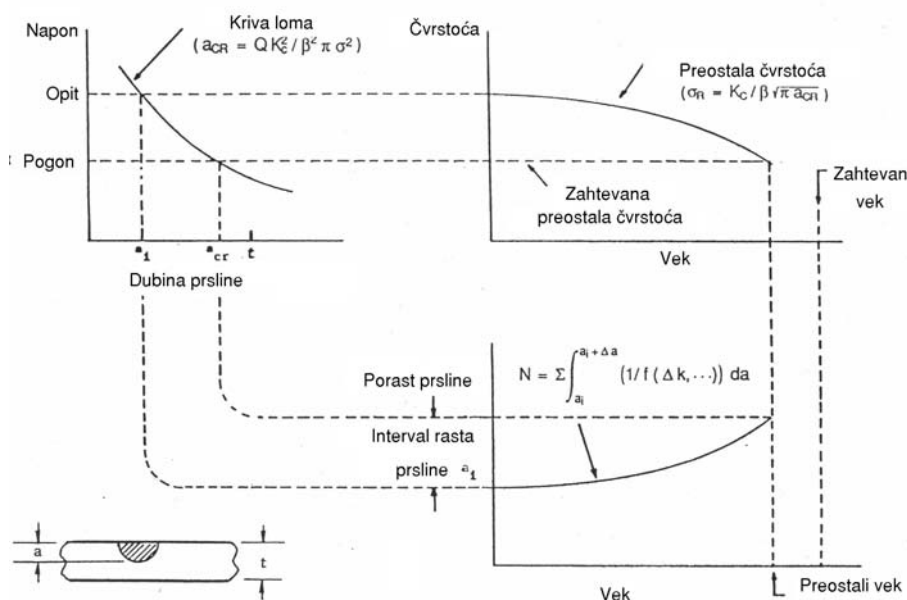
Direktna korist ovoga opita, koji ne mora da se ograniči samo na posude pod pritiskom, može znatno da se poveća primenom mehanike loma, jer se tako mogućnost loma u toku opita smanjuje na minimum.

ISPITIVANJE NADPRITISKOM

Primena mehanike loma, kojom se omogućuje efikasno probno ispitivanje posuda, prikazana je shematski na sl. 10 za slučaj krtih materijala i jednokratnog opterećenja. Ovde je a_0 maksimalna dimenzija prsline sa kojom još uvek nema otkaza pri opterećenju P_0 . Logika probnog ispitivanja pretpostavlja da je prslina dimenzije a_0 polazna prslina za određivanje preostalog veka.

Ako je ovo ispitivanje uspešno može da se tvrdi da ne postoji ni jedna druga prslina koja je veća od a_0 . Preostali vek se određuje na osnovu rasta prsline u radnim uslovima, kao posledica očekivanih mehanizama rasta sve do dostizanja dozvoljene veličine prsline a_S , koja se računa za najveće radno opterećenje P_S .

U okvirima probnog ispitivanja, otkaz ne mora da znači katastrofalni lom. Na primer, curenje može u pogonskim uslovima da izazve stvaranje zapaljivih ili drugih opasnih gasova. U tom slučaju curenje za vreme probnog opita mora da se tretira kao potpuni otkaz, čak iako nije došlo do havarije i prslina se ponaša stabilno.



Slika 10: Logika probnog ispitivanja u mehanici loma

MEHANIKA LOMA PROBNOG ISPITIVANJA

Kod primene probnog ispitivanja treba uočiti da je prslina veličine a_0 pretpostavljena na osnovu tzv. scenarija najgoreg slučaja, što znači da ona ne mora da postoji i ne mora da bude otkrivena prilikom IBR. U opštem slučaju je određivanje a_0 jednostavnije nego određivanje a_S , budući da su uslovi probnog ispitivanja dobro poznati i manje komplikovani nego što je to slučaj sa radnim uslovima. Stvarne prsline se obično predstavljaju u obliku polovine ili cele elipse, što znači da ne mogu biti određene samo na osnovu jednog parametra, a_0 i a_S . Ukoliko podaci o obliku prsline nisu na raspolaganju, mora da se pretpostavi niz raznih kombinacija dubine a_0 i dužine $2c_0$ prsline (u opsegu $a/c_0=0,1-1,0$).

Probnog ispitivanje se najlakše sprovodi sa krtim materijalima, kod kojih nema stabilnog rasta prsline pre loma, što povećava mogućnost otkrivanja prsline. Osim toga, kritična dimenzija prsline je manja, što daje veći odnos a_S/a_0 za dato

P_0/P_S nego kod žilavih materijala, a to omogućuje duži preostali vek. Ova prednost može da se iskoristi ako se ispitivanja sprovode na temperaturi na kojoj je žilavost materijala niža nego što je u radnim uslovima.

Iako se sl. 10 odnosi na krte materijale, ovaj koncept se primenjuje i na žilave materijale gde čupanje prethodi nestabilnom lomu. Primena koncepta probnog ispitivanja na žilave materijale je komplikovana i zahteva dublju analizu jer mora da se uzime u obzir rast prsline čupanjem. Iako je većina analiza probnog ispitivanja objavljena u dostupnoj literaturi uspešno primenila linearnu mehaniku loma, danas se smatra da analiza probnog ispitivanja treba da se bazira na nelinearnoj (EPFM), a ne na linearno elastičnoj (LEFM) mehanici loma. Međutim, ispitivanja u 1/1 sa površinskim prslinama u konstrukcijama tankih zidova su pokazala da je stabilni rast prsline veoma mali.

Iako a_0 ne mora da bude stvarna prslina, primena probnog ispitivanja ne znači smanjenje raspoloživog veka, već se ovim

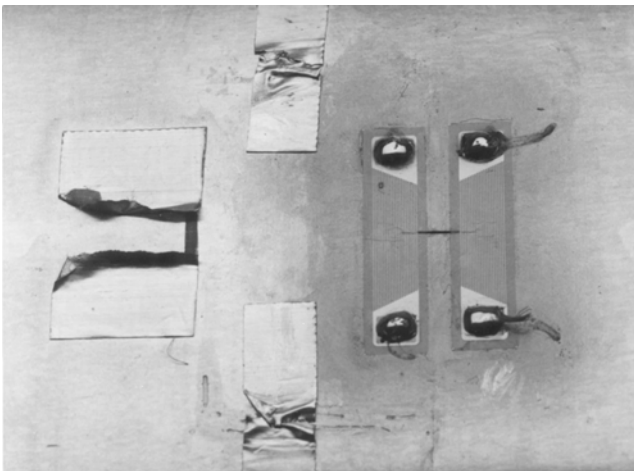
postupkom garantuje određeni period eksploatacije bez rizika, a dalje produžavanje veka je moguće posle ponovljenog ispitivanja. To ujedno znači da je scenario najgoreg slučaja privremenog karaktera i važi samo do sledećeg ispitivanja kada se određivanje ponavlja na isti način.

Na osnovu analize probnog ispitivanja, utvrđene su sledeće njegove koristi:

- povećanje pouzdanosti konstrukcije,
- obezbeđenje kvaliteta,
- poboljšanje uslova ispitivanja bez razaranja,
- određivanje veličine grešaka i njihovo pronalaženje kada IBR nije moguće,
- otpuštanje zaostalih napona i
- provera analize napona.

Postoje mnogi standardni propisi koji preporučuju probno ispitivanje kao integralni deo proizvodnje i obezbeđenje kvaliteta. Svrha probnog ispitivanja u tom slučaju je da otkrije manjkavosti materijala i montaže koji mogu biti ispoljeni pucanjem, curenjem ili lomom, a takođe i da se otkrije loše konstruktivno rešenje i proveri zaptivna funkcija.

Probno ispitivanje može da se koristi i kao alternativa u otkrivanju nedozvoljenih prslina (na primer, ako složenost oblika znatno otežava efikasnu primenu IBR), ali i kao dopunsko sredstvo uz IBR. Pouzdanost rada konstrukcije je svakako povećana kombinovanim probnim ispitivanjem i IBR, koje može da bude pre ili posle probnog ispitivanja. Varijanta IBR pre probnog ispitivanja ima prednost, jer smanjuje rizik od otkaza u toku probnog ispitivanja, tako što se meri otvaranje i eventualni rast prslina, sl. 11. S druge strane, IBR posle probnog ispitivanja ima veću verovatnoću nalaženja grešaka.



Slika 11. Merenje rasta prsline specijalnim mernim trakama

Kada probno ispitivanja nije moguće ili je neophodno preopterećenje suviše visoko, pooštavaju se zahtevi u pogledu pouzdanosti IBR, jer je određivanje a_0 u tom slučaju jedino moguće na osnovu rezultata IBR. Dalji postupak određivanja veka do sledećeg ispitivanja uz pomoć mehanike loma je isti.

Konačno, probno ispitivanje daje mogućnost merenja deformacija i napona u cilju provere računskih vrednosti. Ovo je veoma važno, budući da je što tačnije određivanje napona u radnim uslovima neophodno za određivanje parametara mehanike loma. Pri tome, osim sprečavanja loma pri prekomernom opterećenju, treba voditi računa i o mogućim trajnim oštećenjima materijala. Na primer, ako je probno ispitivanje sprovedeno pod uslovima pod kojima je materijal manje žilav nego

u pogonskim uslovima, mogu da se pojave prslina koje inače ne bi nastale. Shodno tome, iako pooštavanje uslova i povećanje broja probnih ispitivanja može da poveća pouzdanost konstrukcije u radu, s druge strane ono može da poveća broj lomova usled relativno malih grešaka.

Mogućnost sprovođenja probnog ispitivanja direktno zavisi od praktičnih uslova. Na primer, ispitivanja treba sprovesti pri niskim temperaturama, ali je to nemoguće zbog uslova zaptivanja; simuliranje pogonskog opterećenja je poželjno, ali nemoguće zbog termičkih napona ili dopunskih spoljnih opterećenja (npr. na osloncima). Probno ispitivanje sa fluidima koji mogu dovesti do eksplozije, kao što je vodonik, je nepraktično zbog sigurnosnih uslova.

Projektovanje probnog ispitivanja je ozbiljan poduhvat i moguće je samo na osnovu detaljnog ispitivanja konstrukcije, njenog opterećenja i uslova rada. Dok je proračun posuda uobičajen na osnovu složenijih metoda proračuna, kao što su konačni elementi, u slučaju cevi često se primenjuju približni proračuni.

Pritisak prskanja cevi (bez greške) radijusa R i debljine zida h izračunava se po obrascu /11/

$$P_p = \sigma_F \log \left(1 + \frac{h}{R} \right) \quad (26)$$

ili za mali poluprečnik

$$P_p = \frac{\sigma_F \cdot h}{R_m} \quad (26a)$$

gde je R_m srednji poluprečnik cevi, a σ_F napon tečenja, definisan na osnovu jačine popuštanja (σ_Y) i zatezne jačine (σ_M):

$$\sigma_F = k \cdot (\sigma_Y + \sigma_M)$$

Ekperimentalne vrednosti k variraju između 0,5-0,6. Pri višim temperaturama gde je deformaciono ojačavanje malo, ova veličina teži 0,5.

Najčešće primenjeni obrazac za određivanje pritiska prskanja cevi (plastični kolaps) sa aksijalnom prolaznom prslinom je

$$P_{kr} = \frac{\sigma_F \cdot h}{m \cdot R_m} \quad (27)$$

gde je $m=0,614+0,481 \cdot \lambda+0,386 \exp(-1,25 \cdot \lambda)$ korekcija zbog prisustva prslina, $\lambda \approx 1,82 \cdot c / \sqrt{R_m \cdot h}$ i $2c$ aksijalna dužina prslina.

Za slučaj aksijalne površinske prslina, pritisak procurivanja (lom ligamenta) može da se izračuna na osnovu empirijskog izraza:

$$P_{pp} = \frac{\sigma_F \cdot h}{m_p \cdot R_m} \quad \text{gde je} \quad m_p = \frac{1 - \frac{a}{m \cdot h}}{1 - \frac{a}{h}} \quad (28)$$

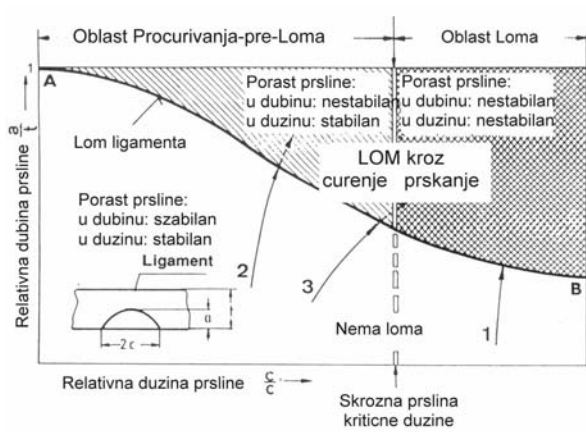
Ako je $p_{kr} > p_{pp}$ procurivanje nastaje pre prskanja cevi. Za slučaj procurivanja usled polukružne prslina ($a/h=1$) važi tačniji izraz:

$$m_p = \frac{1 - \alpha \frac{a}{m \cdot h}}{1 - \frac{a}{h}}, \quad \text{gde je} \quad \alpha = 1 + 0,9 \cdot \left(\frac{a}{h} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{m} \right) \quad (29)$$

KONCEPT PROCURIVANJA PRE LOMA

Ako pod uticajem radnih uslova (opterećenje, temperatura, okolina) površinska prslina u zidu posude pod pritiskom počne da raste, to može da dovede do probijanja zida ili prskanja posude. U slučaju probijanja zida nastaje procurivanje što ili rasterećuje posude ili može da se blagovremeno primeti kod

redovnih ispitivanja. Na osnovu ovoga razvijen je koncept procurivanja pre loma (PPL), prema kome će rast prsline uvek voditi ka probijanju zida i procurivanju, a ne ka prskanju suda. U praktičnoj primeni koncepta PPL mora da postoji dovoljna vremenska rezerva između procurivanja i prskanja da bi se sprovele neophodne popravke. Ako je ovo ispunjeno PPL može da bude usvojen kao metod sprečavanja loma.



Slika 12: Prikaz metode procurivanja pre loma

Ponašanje posude i odgovarajući odnosi mogu da se prikažu na tzv. PPL-dijagramu, sl. 12, čije su ose relativna dubina prsline, a/t , i relativna dužina prsline c/c_k . Kriva AB je linija koja definiše mesto početka loma (rasta prsline). Vertikalna linija gde je $c/c_k=1$ razdvaja prsline čija je dužina ispod ili iznad kritične vrednosti. Međutim, površinska prslina koja je duža od c_k ne mora izazvati lom ako je ispod linije loma AB. Ali ako ova prslina raste u dubinu (sl. 12, oblast 1) ona će svakako izazvati nestabilni lom, pa je za ovakvu prslinu koncept PPL neprimenljiv. Konstrukcija ostaje sigurna samo ako je rast prsline ograničen na oblast ispod AB. S druge strane, u oblast 2 linija loma je dostignuta rastom prsline u dubinu, a rast u dužinu je stabilan. Nestabilni rast je moguć samo ako je dužina prsline (oblast 3) blizu kritične vrednosti pri kojoj dolazi do katastrofalnog loma, a ne do curenja.

Očigledno je da primena ovoga koncepta zahteva preciznu analizu metodama mehanike loma i da obuhvata:

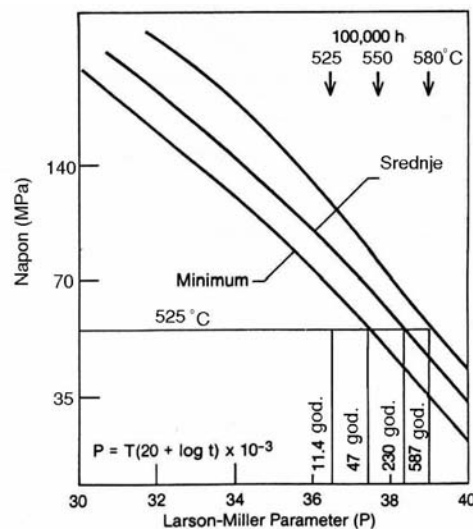
- Ispitivanje svih uslova čije je ispunjenje neophodno da bi princip PPL bio primenjiv u konkretnom slučaju.
- Određivanje kritične veličine prolazne prsline za razne položaje, uzimajući u obzir sva merodavna opterećenja.
- Proračun intenziteta curenja, polazeći od minimalnih veličina merodavne prsline, od čega zavisi brzina curenja. Te veličine moraju da se odrede konzervativno (minimalne očekivane), da bi se uslovi curenja osigurali.
- Otkrivanje prsline metodama IBR (uključujući probno ispitivanje).
- Analizu rasta prsline.
- Obezbeđivanje otkrivanja curenja pri ispitivanju.

Otkrivanje curenja i prsline u cevovodima je često veoma komplikovano, budući da je broj cevi veliki i da postoje kolena, koja su dodatno opterećena momentima. Kod posuda opterećenje je lakše definisati i otkrivanje prsline je jednostavnije. Poteškoće naravno nastaju na mestima spojeva i kod oslonaca, posebno kada su prsline usled zaostalih napona za vreme ispitivanja zatvorene. Međutim, PPL je posebno korisno za delove koji su nepristupačni za IBR.

ODREĐIVANJE PREOSTALOG VEKA PRI PUZANJU

Većina kritičnih termoenergetskih komponenti su napravljene od čelika koji su razvijeni za primenu u opsegu temperature 480–565 °C i napona 15–90 MPa. Osnovni parametri za proračun veka (geometrija, pogonski uslovi i osobine materijala) mogu da imaju veliko rasipanje. Mehanički i termički radni uslovi nisu uvek potpuno definisani. Osim toga tzv. nominalni uslovi se često odnose na maksimalno opterećenje koje ne deluje tokom celog radnog veka. Na drugoj strani, oštećenje koje nastaje kao posledica promene radnih uslova obično se zanemaruje. Osobine materijala se uzimaju u obzir na osnovu dozvoljenih napona, koji se npr. po ASME Boiler and Pressure Vessel Code računaju na osnovu 80% minimalne vrednosti čvrstoće puzanja posle 100,000 sati (sl. 13). Ova rezerva u odnosu na minimalne vrednosti je neophodna, jer se vrednosti čvrstoće za ovako dugo vreme uglavnom dobijaju na osnovu ekstrapolacije eksperimentalnih rezultata kod znatno kraćeg vremena (pri povišenoj temperaturi), kao što je to pokazano na sl. 7.

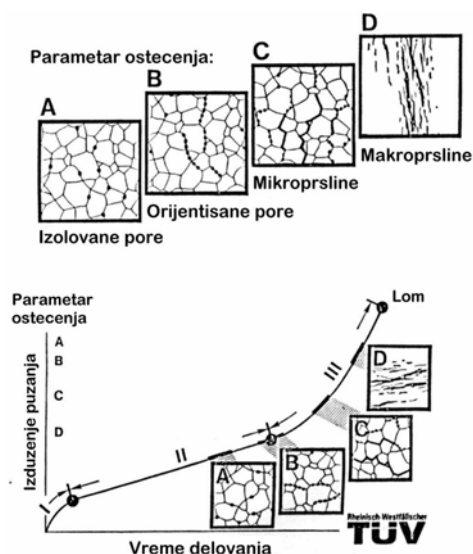
Iskustvo sa starijim komponentama je pokazalo da određivanje veka primenom hipoteze najgoreg slučaja daju suviše pesimističku procenu, /12/. Upoređenje tipičnih rezultata ispitivanja puzanja, sl. 13, pokazuju da između dozvoljenih, minimalnih i srednjih vrednosti postoje znatne rezerve veka u odnosu na tzv. računski vek. Međutim, iako je jasno da ovakve rezerve postoje i da su one veoma velike, ako u konkretnom slučaju ne postoje kvantitativni podaci primena scenarija 'najgoreg slučaja' vratilo bi nas ponovo na početak i onemogućilo korišćenje ovih rezevi. Očigledno je da je rešavanje ovoga problema moguće samo uz pomoć specijalnih metoda merenja stvarnog utroška veka.



Slika 13: Krive puzanja za 2,25Cr1Mo čelik

Za komponente čiji je vek pretežno definisan uslovima puzanja program ocene stanja je relativno jednostavan, /13/. Danas je opšte poznato da se razvoj oštećenja u uslovima puzanja sastoji od nastanka, rasta i sjedinjavanja pora na granicama metalnih zrna, što prethodi nastanku prsline. Na osnovu ovakvog mehanizma razvoja oštećenja uvedena je nova metoda određivanja veka na principu *mehanike kontinualnog oštećenja*. U tom cilju se efekti nagomilavanja mikrostrukturnih defekata izražavaju promenom makroparametara kao što su modul elastičnosti i tvrdoća.

Na sl. 14 je prikazana tzv. Videl-Nojbauerova (Wedel-Neubauer) klasifikacija pora sa ocenu stanja materijala koja pored početnog neoštećenog materijala obuhvata još 4 klase (uporedi Tabelu 1). Na osnovu utvrđene klase može da se oceni preostali vek i neophodnost sledeće kontrole.



Slika 14: Klasifikacija oštećenja puzanjem

Prvobitna klasifikacija se pokazala u praksi nepotpunom, posebno u odnosu na srednje klase (B i C), koje su od najvećeg značaja za primenu. Na osnovu ispitivanja predloženo je sledeće proširenje:

- Klasa 2a: Izolirane pore nakon termičkog delovanja.
- Klasa 2b: Brojne pore bez orijentacije.
- Klasa 3a: Brojne pore sa orijentacijom.
- Klasa 3b: Pore u nizu, razdvajanje na granicama zrna.

Tabela 1: Wedel-Neubauer klasifikacija oštećenja

Klasa	Opis	Udeo veka	Preporučena akcija
A	Pojedinačne mikropore na granicama metalnih zrna	0.27	Praćenje daljeg razvoja. Sledeće ispitivanje posle cca. 20.000 h
B	Mikropore raspoređene na granicama zrna upravno na pravac najvećih napona	0.46	Praćenje, Fiksiranje intervala inspekcije (cca. 15.000 h)
C	Sjedinjavanje pora izaziva razdvajanje na pojedinim granicama zrna	0.65	Ograničenje pogona do opravke
D	Razvoj prslina čija dužina obuhvata nekoliko zrna	0.84	Opravka ili zamena

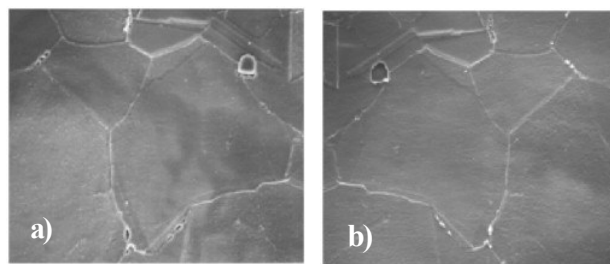
Po klasifikaciji Nordispitivanja (NT TR 170/92) podela je još detaljnija. Ovde je učinjen pokušaj brojčane definicije gustine pora, što nije tako jednostavno, jer se različiti materijali u ovom pogledu ponašaju različito.

PRIMENA REPLIKA

Određivanje stepena oštećenja zasniva se pretežno na primeni površinskih otisaka - replika. Ova metalografska metoda spada u IBR, a primenjuje se da bi se dobili podaci oštećenju od puzanja. Replika je u suštini prostorni snimak površine i može da se koristi za otkrivanje prslina, pora, uključaka i sličnih oštećenja, koja drugim metodama ne mogu da se otkriju.

Jedna od najvećih prednosti ove metode je da priprema i pravljenje otisaka može da sprovede na licu mesta, a tumačenje rezultata u laboratoriji. Rezultati ispitivanja mogu relativno lako da se dokumentuju uz pomoć fotografija, a otisci da se sačuvaju za kasnija upoređenja i eventualne popravke. Repliranje je vrlo često dopunska metoda kojom se sumnjiva mesta podvrgavaju detaljnijem ispitivanju.

Mesto replike i njen kvalitet su veoma važni. Tačna pozicija uzimanja otiska se nanosi na crtežu ili na fotografiji dela. Radi dobijanja pouzdanih rezultata neophodna je veoma savesna priprema površine. Ovo se postiže brušenjem i poliranjem, što je to uobičajeno u laboratoriji (finijim papirom i na kraju polirpastom), tako da površina pre hemijskog tretiranja, neophodnog da bi se razvile karakteristike strukture, bude glatka kao ogledalo. Veličina pripremljene površine je obično prečnika 30–50 mm. Skidanje površine treba da bude što je moguće manje (0,1–0,3 mm), ali sve naslage i oksidacioni slojevi moraju da budu odstranjeni. Razvoj strukture se postiže odgovarajućim hemijskim sredstvom, koje zavisi od materijala. Okolina u kojoj se repliranje sprovodi mora da bude zaštićena od prašine i vlage. Ispitivanja su pokazala da kod neadekvatne pripreme pore neće biti otkrivene, što svakako ima ozbiljne posledice na donošenje odluka u pogledu ocene veka i opštu sigurnost. U slučaju nesigurnih rezultata, mesto ispitivanja treba ponovo da se pripremi, da bi se napravili novi otisci. Na sl. 15 je pokazan kvalitet otiska koji se postiže savesnom pripremom.



Slika 15: Upoređenje replike sa originalom

Ispitivanje pomoću replika je ranije korišćeno radi produženja veka parovoda koji su postigli projektni vek od 100,000 h. Produženje veka je postizano kroz sistematsko ispitivanje i popravke nekoliko kritičnih pozicija. Većina starih elektrana je danas tehnički prevaziđena i zatvorena, a nove su izgrađene sa projektnim vekom od 200,000 h, uz primenu novih legura, istovremeno dozvoljavajući više radne temperature. Ovaj razvoj znači da proračunati naponi i temperaturni uslovi novih postrojenja tek treba da budu provereni kontrolom stvarne brzine oštećenja.

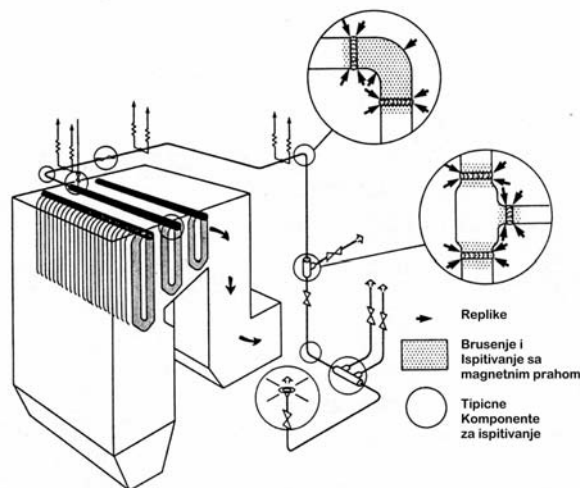
Analiza rezultata ispitivanja su pokazale da postoji bitna razlika kod čelika za parovode (14MoV63, 13CrMo44, 10CrMo910 i X20CrMoV121) u uslovima dugoročne primene, posebno u slučaju zavarivanja. Preporuke u pogledu vremena početka ispitivanja u zavisnosti od materijala su date u tab. 2.

Tabela 2: Početak ispitivanja za šavove i kolena, /14/

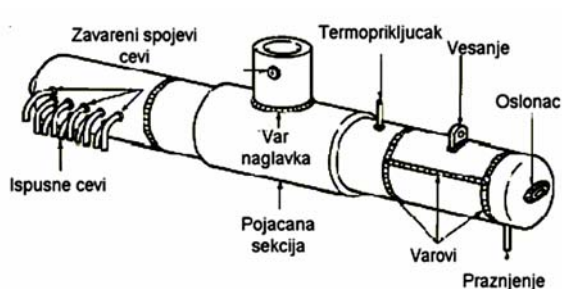
Vrsta čelika	Preporučeni radni vek (h) do početka ispitivanja replikama. Radna temperatura max. 500 °C
14MoV63	50,000
13CrMo44	100,000
10CrMo910	100,000
X20CrMoV121	120,000

Veoma je važno već na samom početku odrediti zone sa najvišim opterećenjem, koje su merodavne za određivanje veka komponente. Slika 16 pokazuje tipičan raspored ispitnih mesta na parovodu kotla, a sl. 17 za kolektor pare. Izbor mesta se isto tako zasniva na rezultatima drugih IBR metoda, ako su pri tome pronađena oštećenja. Zbog toga je već na početku po-

željno sprovesti vizuelnu kontrolu na svim pristupačnim površinama parnih kotlova i snimiti foto aparatom sve kritične oblasti. Iako je vizuelna kontrola verovatno najstarija metoda ispitivanja, danas je ona unapređena primenom raznih pomoćnih sredstava, npr. televizijskom kamerom.



Slika 16. Tipična šema parovoda sa mestima ispitivanja



Slika 17: Mesta ispitivanja zavarenih spojeva kolektora pare

Svakako je preporučljivo da sistematska ispitivanja radi ocene preostalog veka počnu pošto je potrošena polovina projektnog veka. Ukoliko je ocena potrošenog veka i neophodnosti ovakvih ispitivanja nesigurna, onda je eksperimentalno određivanje stanja materijala neizbežno. Pogonske podatke treba sakupljati da bi se obezbedili podaci o razlikama između pojedinih komponenti u pogledu uslova primene, napona, temperature, proizvodnje i drugih parametara, a ne da bi se dobila absolutna ocena veka.

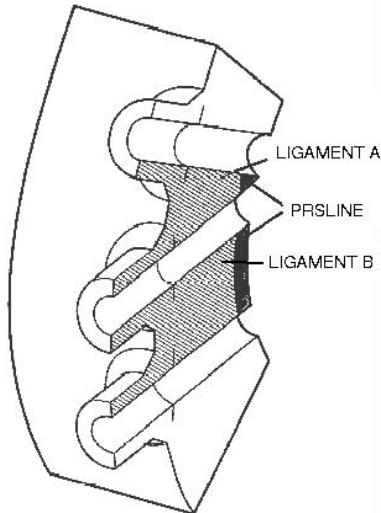
NEKE SPECIFIČNOSTI PRIMENE

Metodologija ocene veka grejnih cevi je ustaljena. Preostali vek cevi može da bude određen primenom krive puzanja materijala (sl. 7 i sl. 13) i linearnog sumiranja oštećenja, ukoliko se nivo opterećenja menja u pogonu. Preporučuje se da rezultati proračuna preostalog veka budu upotrebljeni u kombinaciji sa ostalim podacima, a ne da se uzimaju kao absolutna vrednost. Na primer, ako procena veka ukazuje da su mnoge komponente blizu kraja svog veka, a lomovi u postrojenju kao posledica puzanja su se već pojavljivali, onda je to indikacija da celo postrojenje treba zameniti. Obratno, ako ocena preostalog veka daje vrednosti više od 100,000 h za većinu komponentata, a lomovi koji su se javili su pojedinačne prirode, onda zamena celog postrojenja nema smisla.

Za grejne cevi napon i temperatura obično nisu konstantni. Na početku, čelik u kontaktu sa unutrašnjim fluidom počinje da formira sloj magnetita (Fe_3O_4). Ovaj sloj raste tokom vremena, a brzina rasta zavisi od temperature. Oksid je istovremeno prepreka za prenos toplote i kako raste njegova debljina, tako raste i temperatura, da bi se ostvarila ista temperatura pare na izlazu. Tipično, temperatura metala raste cca $1\text{ }^{\circ}C$ za svakih $0,03\text{ mm}$ sloja oksida formiranog na unutrašnjem zidu cevi. Osim porasta temperature metala, smanjenje debljine zida usled erozije, korozije i/ili drugih mehanizama izaziva povećanje napona u cevi koja radi pod konstantnim pritiskom. Uzimanje u obzir ovih promenljivih uslova u pogledu temperature i napona je važno za pouzdanu procenu veka, /15/.

Glavni uzrok ograničenja veka kolektora je oštećenje od kombinovanih uticaja zamora i puzanja, usled čega nastaju prslina u ligamentu i otvorima (sl. 19), koje skraćuju vreme do loma u odnosu na samo puzanje. Postoje tri faktora koji utiču na zamor i puzanje kolektora: sagorevanje, protok pare i opterećenja parnog kotla. Raspodela toplote unutar kotla, kao posledica opterećenja od gorionika, raspodele vazduha, naslaga i gareži, nije uniformna. Varijacije u količini toplote u odnosu na pojedinačne grejače i vodove se kombinuje sa razlikama u protoku pare, pa nastaju znatne razlike u temperaturi pare koja ulazi u kolektor. Konačno, promene u opterećenju kotla dalje povećavaju temperaturske razlike između pojedinih cevni priključaka i tela kolektora. Pri porastu opterećenja kotla, brzina sagorevanja mora da raste da bi se održao pritisak. Za vreme ovih prelaznih režima kotao je kratkotrajno pregrejan da bi se kompenzovali povećani protok pare i opadanje pritiska. Pri padu opterećenja, brzina sagorevanja opada nešto više nego protok pare u pregrejaču, što snižava ispusnu temperaturu u odnosu na telo kolektora. Kao posledica ovih temperaturskih razlika, kolektor je izložen lokalnim naponima koji su znatno veći od napona usled pritiska, što dovodi do rasta prslina u ligamentu između otvora.

Da bi se ispitalo oštećenje kolektora usled puzanja i zamera uzima se 6 do 12 replika na priključcima, obimskim i podužnim šavovima i na šavovima između kolektora i naglavaka. Za replike se biraju mesta promenljive temperature i/ili visokog napona. Najmanje jedna replika postavlja se na zavarenom spoju voda i kolektora, gde se očekuje da je temperatura najviša. Što se tiče same replike ona treba da obuhvati metal šava, zonu uticaja toplote (ZUT) i liniju stapanja. Zavisno od tipa replike ovo može da zahteva višestruko uzimanje replika za svaku poziciju.



Slika 18. Razvoj prslina u ligamentu između otvora

PRIMENA NA ZAVARENE KONSTRUKCIJE

Ponašanje zavarenih spojeva kod loma uslovljenog greškama u materijalu zavisi od razlike čvrstoće (mismečing) između metala šava i osnovnog metala, /16/. Na osnovu jačine popuštanja (napona tečenja), mogu da se razlikuju tri slučaja:

- Isti napon tečenja metala šava i osnovnog metala.
- Veći napon tečenja metala šava - overmečing.
- Manji napon tečenja metala šava - andermečing.

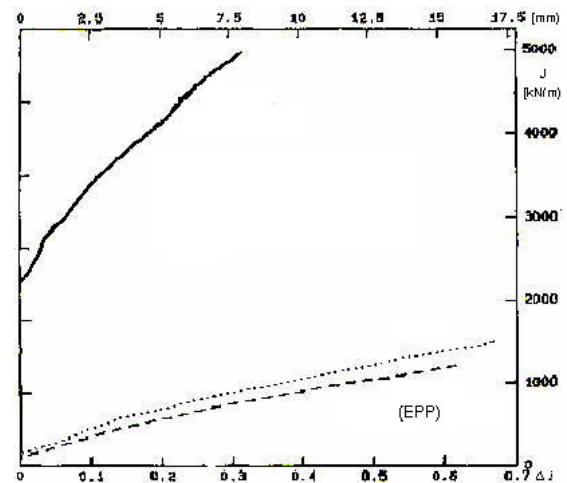
Sve dok su deformacije elastične, mismečing nema uticaja. Međutim, čim nastanu plastične deformacije u osnovnom metalu ili metalu šava uticaj mismečinga mora da se uzme u obzir. Zavareni spojevi su normalno projektovani sa naponima ispod nivoa granice tečenja osnovnog materijala. Ovo, međutim, ne znači da nigde u konstrukciji naponi ne prelaze ovu granicu. Sa gledišta čvrstoće konstrukcije racionalno je zahtevati da zavareni spoj i pored uobičajenih grešaka izdrži napon nivoa granice tečenja. Ovo naravno zahteva odgovarajuću kombinaciju dozvoljene veličine grešaka i parametara žilavosti i ograničava primenu zavarenih spojeva sa andermečingom. Budući da je ponašanje takvog spoja uslovljeno osobinama metala šava onda je ova kombinacija svrsishodna samo ako su ojačavanje metala šava i parametri žilavosti visoki. U protivnom, zavareni spojevi sa overmečingom imaju prednosti.

Raspodela deformacija u zavarenom spoju zavisi od veličine prslina i njenog položaja. Uticaj velikih površinskih prslina dominira nad uticajem deformacija, pa se i uticaj mismečinga smanjuje. Ako se mala površinka prslina nalazi u metalu šava niže čvrstoće, to znatno smanjuje žilavost spoja, što nije slučaj kada je ista prslina u ZUT.

Overmečing je više primenjen u praksi jer se na taj način ostvaruje rezerva u pogledu tečenja šava u kome se najčešće nalaze greške. Međutim, ponašanje konstrukcije u

tom slučaju zavisi i od čvrstoće okolnog materijala. Zbog toga nije jednostavno naći optimalnu kombinaciju između čvrstoće i žilavosti metala šava za datu veličinu i položaj prslina, jer se u slučaju povećanja čvrstoće žilavost smanjuje.

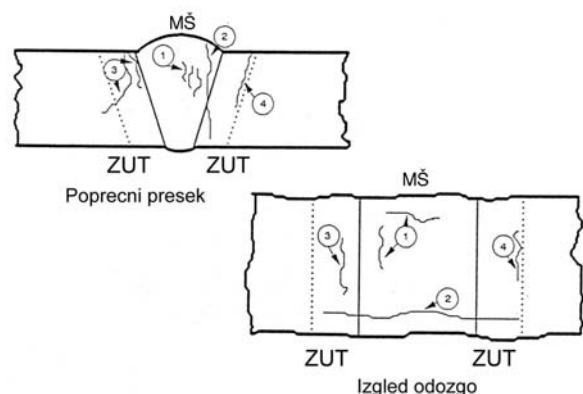
Iako ispitivanja zavarenih ploča sa centralnom prslinom pokazuju povoljan uticaj mismečinga, time što usmerava plastične deformacije u osnovni metal koji ima veću žilavost, povećanje veličine prslina obično smanjuje ove prednosti. Na drugoj strani, kod andermečinga deformacije se usmeravaju na šav, pa je veoma važno imati materijal sa velikim ojačavanjem i žilavošću. Pri tome treba imati u vidu ometanje deformacija zbog malih relativnih dimenzija šava. Stoga je važno uzeti u obzir uticaj geometrije, pravca glavnih napona i relativne veličine prslina u odnosu na dimenzije šava. Osim toga treba voditi računa o činjenici da overmečing iznad 25% (kod istorodnih materijala) nije svrsishodan zbog velike osetljivosti na prslina. Ispitivanja na nerđajucim čelicima su pokazala višestruko smanjenje otpornosti na rast prslina metala šava u odnosu na osnovni materijal (J-R krive, sl. 19), što treba uzeti u obzir kod ocene preostale čvrstoće i uticaja grešaka.



Slika 19: Smanjenje žilavosti metala šava (nerđajući čelik)

Zavisno od položaja, postoje razne vrste prslina metalu šava i ZUT, sl. 20:

- 1) Prslina u metalu šava, podužne i poprečne
- 2) Slične tipu 1, ali ove prslina prelaze u ZUT.
- 3) Intergranularne prslina u krupnozrnoj oblasti ZUT.
- 4) Prslina na granici ZUT i osnovnog metala, gde je otpornost prema puzanju mala (sitnozrna struktura).



Slika 20. Tipične greške zavarenog šava

U slučaju prevlake oksida ove prsline su verovatno nastale u toku proizvodnje, a ne u pogonu. Prsline tipa 3 i 4 najviše skraćuju vek kod opterećenja puzanjem i u slučaju naponske korozije.

Na ponašanje zavarenih spojeva bitan uticaj imaju zaostali naponi, koji su kod zavarivanja neizbežni. Uticaj zaostalih napona je naročito veliki na brzinu rasta prsline usled zamora. Ne uzimanje u obzir zaostalih napona kod proračuna preostale čvrstoće i veka može dovesti do značnog odstupanja rezultata na strani manje sigurnosti.

MOGUĆNOST POPRAVKE GREŠAKA

Oštećenja, kao što su prsline, po pravilu mogu da se poprave. Ovo se odnosi, na primer, na prsline u šavu na osloncima, pločama oslonaca, sporednim spojevima za ispuštanje pare i ventilisanje, šavovima na naglancima i obimskim šavovima kolektora, priključcima instrumenata, spojevima na glavnim otvorima i nekim spojevima na izlaznim naglancima vodova. Najčešći uzrok curenja su prsline na naglancima između cevi i kolektora. Iako se ove prsline lako pronalaze, one obično dovode do skupih prinudnih obustava.

U nekim slučajevima (plitke površinske prsline) jednostavno brušenje može da odstrani indikaciju tako da popravka zavarivanjem nije potrebna. Iako je popravka znatno jeftinija od zamene treba uzeti u obzir da česte popravke mogu da nanese štetu, pa u tim slučajevima treba dati prednost zameni. Popravke zahtevaju veliko iskustvo zbog velikih deformacija i oštećenja koji mogu da nastanu prilikom zavarivanja i termičke obrade posle zavarivanja.

Sa gledišta materijala, problem koji često dovodi do zame- ne su prsline u oblasti otvora i ligamenta otvora (sl. 19). Prsline u ligamentu (ili otvoru) su veoma značajne jer ograničavaju vek kolektora. Ove prsline nastaju kao brojne uzdužne prsline u otvorima vodova i rastu prema unutrašnjem zidu kolektora, a neke od njih nastavljaju da rastu duž unutrašnjeg zida, eventualno spajajući se sa sličnim prslinama koje dolaze iz susednih otvora. Ovakve prsline ne mogu da se poprave.

PRIMENA PRI POVEĆANOM ZAHTEVU SIGURNOSTI

Lom diska je jedna od naozbilnijih havarija mlaznog motora. Potencijalna energija diska i lopatica turbine visokog pritiska tipičnog mlaznog motora je, npr. ista kao kod kamiona mase 25 t pri brzini od 60 km/h. Stoga kućište turbine ne može da zaustavi disk koji se slomio, pa to izaziva ozbiljna oštećenja i predstavlja veliki rizik za avion. S obzrom na veliku energiju koja se oslobađa u slučaju loma svako produžavanje veka obrtnih delova mlaznih motora mora da se tretira sa najvećom oprežnošću.

PROCEDURA ODREĐIVANJA VEKA DISKOVA

Diskovi su izloženi zamoru zbog centrifugalnih i termičkih napona. Najveće vrednosti ovih napona javljaju se pri startovanju i pri poletanju aviona. Velika termička opterećenja nastaju pored ostalog, zbog toga što je postizanje maksimalne snage neophodno već na samom početku, nekoliko sekundi nakon poletanja. Ciklus opterećenja tipičnog leta završava se sletanjem, kočenjem motorom i isključivanjem.

U civilnom vazduhoplovstvu zahtevi veka su mnogo oštriji nego u vojnom, prvenstveno iz ekonomskih razloga. Do sada je velika većina diskova projektovana na principu "sigurnog" veka. Određivanje veka se bazira na ispitivanjima na obrtnim

stolovima na stvarnim diskovima pod opterećenjem i temperaturom, koji su slični radnim uslovima. Zato su ovakvi obrtni uređaji, koji su u stanju da ubrzaju disk od 200 do 20.000 obrta/min pod odgovarajućom temperaturom (do 600 °C) za 15 sekundi neophodni u cilju sigurnog projektovanja diskova. Radi skraćivanja vremena ovakvih ispitivanja obično se primenjuje izvesno preopterećenje u odnosu na normalne uslove, koje međutim ne sme da bude iznad granica kod kojih prenošenje na realne uslove nije više sigurno. Ispitivanje diskova je neophodno iz mnogih razloga:

- Stanje površine diska i raspored unutrašnjih napona su važni za postizanje pouzdanih rezultata, a njih je nemoguće simulirati na epruvetama.
- Zapremina i površina koja je izložena najvećem naponu utiče na rasipanje rezultata, jer se njihovim povećanjem povećava i broj mesta potencijalnog nastanka loma.
- Uslovi termičkog opterećenja i prostornog naponskog stanja često nisu dovoljno precizno definisani na epruvetama, pa tumačenje rezultata nije merodavno.

Cilj ispitivanja na originalnim diskovima je da se odredi vek neophodan do formiranja "inženjerske" prsline, koja je definisana kao prsline dužine 0,75 mm ili 0,38 mm dubine. U slučaju veće prsline na kraju ispitivanja brojanjem zamornih linija mora da se odredi odgovarajući manji vek. Procenjeni sigurni vek se određuje statističkom obradom rezultata uz primenu stepena pouzdanosti 95%, tako da samo 1 od 750 diskova ima prsline veću od 0,75 mm. Razvoj materijala visoke čvrstoće dovodi u pitanje ovu veličinu "dozvoljene" prsline, budući da kod ovakvih materijala brži porast prsline nastaje već kod manjih dimenzija prsline.

Međutim, vek postignut u uslovima ovakvih ispitivanja još uvek ne odgovara u potpunosti stvarnim uslovima leta:

- Profil leta odstupa delom zbog njegove složenosti koja ne može da se simulira u uslovima ispitivanja ili zbog toga što su uslovi leta različiti od projektnih.
- Razlike u trajanju i okolnim uslovima utiču na dopunska oštećenja usled oksidacije, korozije, površinskih i oštećenja stranim predmetima.

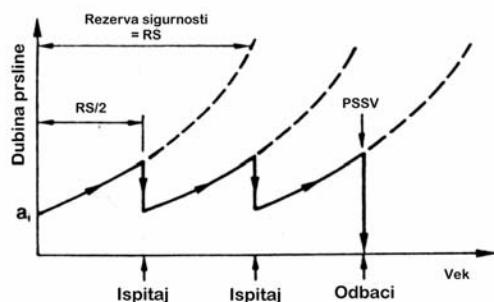
Ovakve razlike mogu samo delimično da se kompenzuju optimizacijom uslova ispitivanja diskova. Na drugoj strani, ubrzano ispitivanje kompletnih motora ne daje dobre rezultate zbog ograničenja, kako u pogledu trajanja ispitivanja, tako i u odnosu na druge komponente konstrukcije. Redovno ispitivanje diskova je, zbog nepristupačnosti, skupo i komplikovano. Zbog svega toga, pribegava se drugačijem postupku, koji se zasniva ne samo na prihvatljivom početnom radnom veku, nego i prihvatljivom planu za njegovo produženje sve do iskorišćenja punih kapaciteta.

Na početku, na osnovu procenjenog sigurnog veka dozvoljava se samo 1/3 njegove vrednosti. Pošto je reprezentativni motor, koji je bio najintenzivnije opterećen u pogonu, dostigao ovaj vek, disk se ispituje na obrtnom stolu do otkaza zamorom. Sabirajući radni i preostali vek, dobijen ispitivanjem, određuje se novi računski vek na osnovu koga se prethodno dozvoljeni vek produžava za još jednu trećinu. Ovaj se postupak ponavlja sve dok se ne dostigne projektni vek, /17/.

Danas se čine veliki naponi da se koncept sigurnog veka zameni konceptom prihvatljivog oštećenja, zasnovanom na primeni mehanike loma i redovnim kontrolama. Iako prvi koncept ima prednost u pogledu sigurnosti, njegov najvažniji nedostatak je da se potencijal veka većine komponenata ne-

dovoljno koristi. Na drugoj strani, budući da ne postoji mehanizam upozorenja na stanje komponente, iznenadni lomovi u slučaju oštećenja, na primer prilikom sklapanja ili rasklapanja, nisu isključeni ni u slučaju primene koncepta sigurnog veka.

Na osnovu prsline koja je na nivou osetljivosti metoda IBR računa se rast prsline sve do kritične veličine za sve kritične pozicije i opterećenja diska, sl. 21. Na osnovu proračunatog veka definiše se period do sledeće kontrole sa odgovarajućom rezervom sigurnosti. Posle otkrivanja ovakve prsline disk se zamenjuje, /18/.



Slika 21. Koncept prihvatljivog oštećenja diska turbine

ZAVRŠNI KOMENTAR

U ovome članku je dat prikaz mogućnosti za racionalizaciju procesa realizacije integriteta i veka inženjerskih konstrukcija, zasnovanih na primeni mehanike loma. Međutim, osnovna namera ovoga prikaza nije bila davanje recepata za rešavanje ovakvih problema. U tom pogledu postoji obimna literatura, gde se mogu pronaći i mnogi detalji, koji uzimaju u obzir specifičnosti primene raznih materijala, konstrukcije delova, uslova primene, kao i stečena iskustva. Glavni cilj je bio da se stimuliše dalji pristup u rešavanju praktičnih problema, polazeći od teorijskih rešenja, čija je direktna primena u praksi u najvećem broju slučajeva otežana, budući da takva rešenja ne pružaju dovoljno kompletne odgovore. Prevažilaženje granica u tom pogledu je jedino moguće kreativnim pristupom, kombinujući teoriju sa praktičnim iskustvima.

Uspešno i ekonomično održavanje komponenti radi sprečavanja iznenadnih otkaza i nastanka lomova ne treba da se svodi na mehaničkom sprovođenju propisanih operacija, već treba odrediti i uzeti u obzir smanjenje parametara čvrstoće i veka. Ovdje je mehanika loma, kao nova teorijska i praktična disciplina, od velike koristi. Mehanika loma je specijalno pogodna za određivanje razvoja oštećenja, koji nastaje kao posledica rasta prsline. U slučajevima gde vek zavisi od rasta prsline mehanika loma je u stanju da odredi preostalu čvrstoću i vek u bilo kojem momentu u eksploataciji. Međutim, ocena stanja konstrukcije ne zasniva se isključivo na ispitivanju prsline, budući da to sa gledišta sprečavanja iznenadnih lomova može biti kasno. Drugi oblici istraživanja razvoja, kao na primer merenjem pora kod puzanja, mogu isto tako da pruže neophodne podatke o stanju elemenata.

Literatura:

1. Agatonović, P. : Procena integriteta i veka na osnovu analize podržane eksperimentima, Monografija sedme letnja škola mehanike loma, Ured. S. Sedmak i A. Sedmak, GOŠA-TMF, 2001.
2. Agatonovic, P.: Development of residual strength evaluation tool based on stress-strain approximation, International Journal of Fracture 98, pp. 129-152, Kluwer Academic Publishers.
3. Kumar V. et al: An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI NP-1931. Palo Alto.
4. Oberparleiter, W. and P. Agatonovic: Creep Crack Growth and Fatigue Crack Propagation of IN 800 H at 830 C. in 'Fracture Control of Engineering Structures', Ed. by H.C. van Elst and A. Bakker, Proceedings ECF6, Amsterdam, 1986.
5. Agatonovic, P and N. Taylor: Life Assessment Technology for Creep-Fatigue Situation Based on Damage Incubation, in Fracture Mechanics Application in Lifetime Estimation of Power Plant Components, 1989, Dubrovnik.
6. Agatonovic, P and N. Taylor: Optimization of a Life Prediction Method for Environmental Assisted Damage of Components Operating at High Temperature, Int. Conf. ICM6 Kyoto/Japan, 1991.
7. Agatonovic, P.: Lifetime temperature dependence of components, European Conference 'Life Assessment of Industrial Components and Structures', Cambridge, 1993.
8. Agatonovic, P., R. Grunmach and N. Taylor: Werkstoffkenndaten und Mechanismen zur Beurteilung und Simulation des Bauteilverhaltens bei gleichzeitiger Kriech-, Ermüdungs- und Oxidationsschädigung. VDI Werkstofftag 91, VDI-Bericht 882 (1991).
9. Chell, G. at all: Significant Issues in Proof testing: A Critical Appraisal, NASA CR-4628, 1994.
10. Neubauer, B. and U. Wedel: Restlife estimation of creeping components by means of replicas, in Advances in Life Prediction Methods, ASME 1983.
11. Wilkowski, G.M. at all: State-of-the-Art Report on Piping Fracture Mechanics, NUREG/CR-6540 1997.
12. Viswanathan, R. and R.B. Dooley: Creep Life Assessment Techniques for Fossil Power Plant Boiler Pressure Parts, in Proceedings: Conference on Life Prediction for High-temperature Gas Turbine Materials, EPRI AP-4477 1986.
13. Viswanathan, R.: Life assessment of high temperature components – current concerns and research in the U.S. in 'Life Assessment of Industrial Components and Structures', Cambridge, 1993.
14. Auerkari, P. and J. Salonen: Experiences on creep life estimation of steam piping, in 'Creep and Fracture of Engineering Material and Structures' Conf. Swansea, U.K. April 84 Ed. by B. Wilshire and R.J. Owen, Pineridge Press, pp. 1227 - 1237.
15. Nakonelzny G.J. and C.C. Schultz: Life Assessment of High-Temperature Headers, Babcock & Wilcox, BR-1586.
16. Schwalbe, K.H.: Effect of weld metal mis-match on toughness requirements, International Journal of Fracture 56: 257-277 1992, Kluwer Academic Publisher 1992.
17. Agatonovic, P.: Untersuchungen zum Betriebsfestigkeitsverhalten von Turbinenscheiben zukünftiger Triebwerke, Abschlussbericht Zukunfts-Technik-Luftfahrt 1978, Aufgabe MTU 2.06-1.
18. Harrison, G.H. and P.H. Tranter.: Stressing and Lifting Techniques for High Temperature Aeroengine Components, in. Mechanical Behavior of Materials at High Temperature, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publisher 1996