

NEKI ASPEKTI PROCJENE VIJEKA TRAJANJA KOMPONENTA POD TLAKOM TRERMOENERGETSKIH POSTROJENJA

SOME ASPECTS OF OPERATING LIFE ASSESSMENT OF PRESSURIZED COMPONENTS IN POWER PLANTS

Ljubica MILOVIĆ¹⁾, Tomaz VUHERER²⁾, Stojan SEDMAK³⁾, Aleksandar SEDMAK⁴⁾, Milorad ZRILIC¹⁾, Mersida MANGO⁵⁾, Miodrag JANKOVIC⁴⁾, Nikola DONDUR⁴⁾

Ključne reči: čelik P/T 91, pukotine tipa IV, puzanje, vijek trajanja

Key words: P/T 91 steel, type IV cracking, creep, life

Sažetak: Stalni zahtjevi korisnika termoenergetskih postrojenja za povećanje snage, efikasnosti i vijeka trajanja, uz smanjenje zagadivanja okoline, doveli su pre oko 20 godina do razvoja novih čelika sa povećanim sadržajem kroma. Podaci o ponašanju ovih čelika i njihovih zavarenih spojeva u eksploataciji su oskudni, s obzirom da su projektirani za vijek od najmanje 100.000 sati, odnosno 12 godina eksploatacije. Posljednjih godina su objavljeni podaci koji ukazuju na probleme uočene tokom eksploatacije komponenti izrađenih zavarivanjem ovih čelika i na primjere kada projektirani vijek nije ostvaren. Ovi problemi privlače sve veću pažnju proizvođača čelika i opreme, kao i korisnika postrojenja u kojima su ovi čelici ugrađeni, a zbog ozbiljnosti i obima problema u tome se angažiraju i razvojno-istraživačke i znanstvene institucije. U ovom radu su dani neki od aspekata procjene radnog vijeka zavarenih komponenti opreme pod tlakom izrađenih od suvremenih materijala za rad na povиšenim temperaturama.

Abstract: Continuous request of thermal-energetic plants for increasing power, greater efficiency and extended life, in addition to protection of environment, resulted in development of new steels with increased Cr content during last twenty years. The data for the behaviour of these steels and their welded joints in service are not sufficient, having in mind design operating life of min. 100,000 hours, i.e. 12 years of operation. Data referred in last years indicated service problems and noticed examples when service life had not been achieved. Mentioned problems attracted the attention of steel producers and equipment manufacturers, and especially of equipment owners, and the engagement of research and development and scientific institutions. Some aspects of operating life assessment of welded pressure vessels components, produced of modern steels developed for high temperature application are considered in the paper.

¹⁾ Tehnološko-metalički fakultet Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija

²⁾ Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

³⁾ Društvo za integritet i vek konstrukcija, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

⁴⁾ Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

⁵⁾ Univerzitet Džemal Bijedić, Mašinski fakultet Mostar, Sjeverni logor bb, 88104 Mostar, Bosna i Hercegovina

1. UVOD

Tendencija globalnog zagrijavanja potakla je pronalaženje strategija koje vode smanjenju zračenja CO₂. Usprkos naporima da se poveća proizvodnja energije iz alternativnih izvora (voda, sunce, vjetar itd.), sagorijevanjem fosilnih goriva se i dalje najviše proizvodi električna energija, te je sektor energetike najveći "proizvođač" CO₂.

U proizvodnji električne energije, elektrane sa pogonom na fosilno gorivo oslanjaju se na parne turbine. Termodinamički koeficijent korisnog djelovanja turbina moguće je povećati ako se povećaju radna temperatura i radni tlak pare na ulazu u turbine.

Širom svijeta se udruženim naporima radi na razvoju čelika poboljšanih osobina pogodnih za korištenje u elektranama sa pogonom na fosilno gorivo sa visokim koeficijentom iskorištenja. Čini se da su feritne legure koje sadrže 9-12 težinskih postotaka kroma materijali koji najviše obećavaju u tom smislu, posebno kod komponenata sa debelim zidom kao što su sabirne cijevi i glavni parovodi u kotlovima. Međutim, često se performanse takvih čelika ne realiziraju u radu, zato što u zonama pod utjecajem topline (ZUT) zavarenih spojeva dolazi do prijevremenog otkaza izazvanog fenomenom koji se naziva *lom izazvan nastankom i širenjem pukotina iz IV grupe*.

2. RAZVOJ ČELIKA ZA RAD NA POVIŠENIM TEMPERATURAMA

Prvi visoko-kromni feritni čelici pojavili su se u Europi sredinom šezdesetih godina prošlog stoljeća. Čelik 9Cr-2Mo je razvijen u Francuskoj, prvenstveno za cjevovode i kasnije je dobio naziv EM12. Imao je dupleks mikrostrukturu sa δ-feritom što mu je dalo dobru udranu žilavost. Otprilike u isto vrijeme u Njemačkoj je razvijen čelik 12Cr-1Mo oznake X20CrMoV12-1, koji je širom sveta korišten za cjevovode i parovode. Dobra osobina ovog čelika je potpuno martenzitna mikrostruktura, ali je zato njegova čvrstoća puzanja niža nego kod čelika EM12 na temperaturama preko 520 °C i teško se zavaruje prvenstveno zbog visokog sadržaja ugljika.

Sedamdesetih godina prošlog stoljeća u OAK Ridge National Laboratory u Americi je razvijen modificirani čelik 9Cr-1Mo, što je konačno dovelo do T91 za cijevi pod pritiskom i legure P91 za parovode i sabrine cijevi. Ovim materijalom su zamijenjeni EM12 i X20CrMoV12-1.

Legura čelika P/T91 oslanja se na mikrostrukturu popuštenog martenzita stabiliziranu karbidima tipa M₂₃C₆ sa daljim ojačavanjem zahvaljujući molibdenu u čvrstoj otopini i finoj raspadjeli taloga karbonitrida tipa (MX) bogatih vandijumom (V), i niobijumom (Nb).

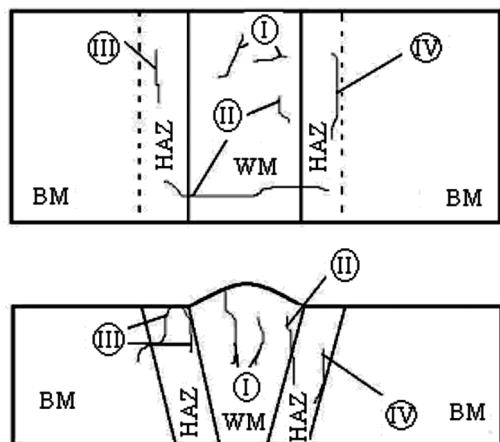
Daljnja pouzdana poboljšanja čvrstoće puzanja postignuta su pojmom čelika NF616 i HCM12A, kod kojih W povećava dugoročnu čvrstoću puzanja ojačavanjem u čvrstom rastvoru i usporava ukrupnjavanje karbida M₂₃C₆ koji stabiliziraju niskougljični martenzit. Međutim, pri koncentracijama većim od 2 %, formiranje krupne laves faze (Fe₂W) može da dovede do pogoršanja osobina u uvjetima puzanja. W također pospješuje formiranje δ-ferita pa njegovo dodavanje mora da bude balansirano bilo smanjivanjem koncentracije drugih rastvora – aktivatora ferita kao što je Mo, bilo dodavanjem austenitnih stabilizatora kao što je kobalt (Co).

Mnoge nove legure koje pokazuju poboljšanu čvrstoću loma u uvjetima puzanja pri kratkotrajnim ispitivanjima, nakon 100.000 sati rada su pokazale porazne rezultate. Zato se težište istraživanja pomjerilo na bolje upoznavanje faktora koji utiču na dugoročnu stabilnost taloga tipa M₂₃C₆ i MX. U čelicima ispitanim u uvjetima puzanja, "modificirana Z-faza", Cr(V,Nb)N se izgleda taloži na štetu M₂₃C₆ i, što je od suštinskog značaja, na štetu taloga MX.

U novijim istraživanjima ispitani je utjecaj koncentracije ugljika i kontroliranih dodataka bora (B) na ponašanje pri taloženju karbida tipa M₂₃C₆ i karbonitrida tipa MX, [1].

3. PUKOTINE TIPO IV

Lom zavarenih spojeva obično se klasificira prema položaju pukotine, sl. 1., [2]. Pukotine iz I grupe javljaju se u metalu zavara. Pukotine II grupe se javljaju također u metalu zavara, ali mogu da rastu izvan zavara u osnovni metal. Pukotine iz III grupe javljaju se u krupnozrnom dijelu zone pod utjecajem topline (GZZUT). Pukotine iz IV grupe su svojstvo zavarenih spojeva čelika otpornih na puzanje i njihovo stvaranje karakterizira povećana brzina formiranja šupljina u uvjetima puzanja u sitnozrnim (FZZUT) i interkritičnim (IKZUT) žarenim područjima ZUT, što dovodi do značajno ranijeg otkaza u usporedbi s ispitivanjima na puzanje nezavarenog čelika. Spomenute zone sadrže čestice krupnozrnog karbida (GZK) koje smanjuju čvrstoću puzanja i doprinose nastanku šupljina. Pri ispitivanju sučelnih X zavara, područje oslabljeno pukotinama iz IV grupe nalazi se "zarobljeno" između jače, osnovne ploče i GZZUT. Akumulacija takvih oštećenja izazvanih puzanjem u oblasti pukotina iz IV grupe dovodi do prijevremenog otkaza zavarene komponente.



Slika 1. Klasifikacija pukotina u zavarenim spojevima
 (BM - osnovni metal; HAZ - zona utjecaja toplote; WM - metal šava)

Pojava pukotina iz IV grupe je naročito izražena kod čelika koji sadrže 9-12 % Cr. Kako problem nastaje zbog heterogene mikrostrukture ZUT, on se može eliminirati naknadnom toplinskom obradom - ponovnom austenitizacijom i popuštanjem. Nažalost to nije uvijek slučaj u praksi pa se komponente moraju projektirati tako da se uzme u obzir smanjenje $\Delta\sigma$ čvrstoće puzanja (ili ekvivalentno smanjenje vijeka puzanja) zbog nastanka pukotine iz IV grupe. Veličina $\Delta\sigma$ zavisi od kemijskog sastava, toplinske obrade i stanja naprezanja, te se mora eksperimentalno izračunati za svaki pojedinačni slučaj. Ovo je, očigledno, ograničavajući faktor u postupku projektiranja, bez obzira na to da li obuhvata razvoj legure ili zavarivanje postojećeg komada.

Otkriveno je da na smanjenje čvrstoće puzanja FZZUT u usporedbi sa čvrstoćom puzanja GZZUT, metala šava (MŠ) i osnovnog metala (OM), utiču sljedeća dva fenomena, [3-5]:

1. smanjenje otpornosti na puzanje povezano sa smanjenjem gustoće dislokacija i promjena strukture karbida izazvana starenjem i
2. ubrzani nastanak i rast šupljina na granicama zrna izdvajanjem nečistoća.

4. ISKUSTVA U SVIJETU PRI EKSPLOATACIJI ČELIKA P/T 91

Kompanija ETD (European Technology Development Ltd.) iz Velike Britanije je uključena u razmatranje i analizu uočenih problema u svojstvu tehničkog savjetnika i razvojno-istraživačke institucije specijalizirane za ocjenu i povećanje radnog vijeka postrojenja za rad na povišenim temperaturama, njihovom održavanju, materijalima i tehničkim problemima u energetici i petrokemijskim procesima. Na osnovu sakupljenog iskustva ETD je organizirala tečajeve i konferencije u Europi i Aziji, posvećene procjeni vijeka postrojenja, materijalima za rad na povišenim temperaturama, otpornosti komponenata, ponašanju zavarenih spojeva u eksploataciji, održavanju na osnovu rizika i reparaturi zavarivanjem. ETD je nosilac i koordinator mnogih inicijativa međunarodne industrijske suradnje (podržane od strane industrija Sjeverne Amerike, Japana, Europe, kao i od strane vladinih organizacija, što je slučaj sa Europskom komisijom), uključujući i strategiju održavanja i inspekcije. Kroz studije i projekte o ponašanju čelika P/T 91 (u sistemu označavanja ovih čelika "P" se odnosni na cijev (pipe), "T" na tankostijenu cijev (tube) i "F" na otkivak (forging)) u postrojenjima širom svijeta, ETD je sakupio značajno iskustvo o ovom čeliku i njegovim zavarenim spojevima u pogledu reparturnog zavarivanja, otkrivanja i karakterizacije pukotina i ocjene integriteta kao i na procjenu i produženje vijeka komponenata postrojenja izrađenih od čelika nove generacije.

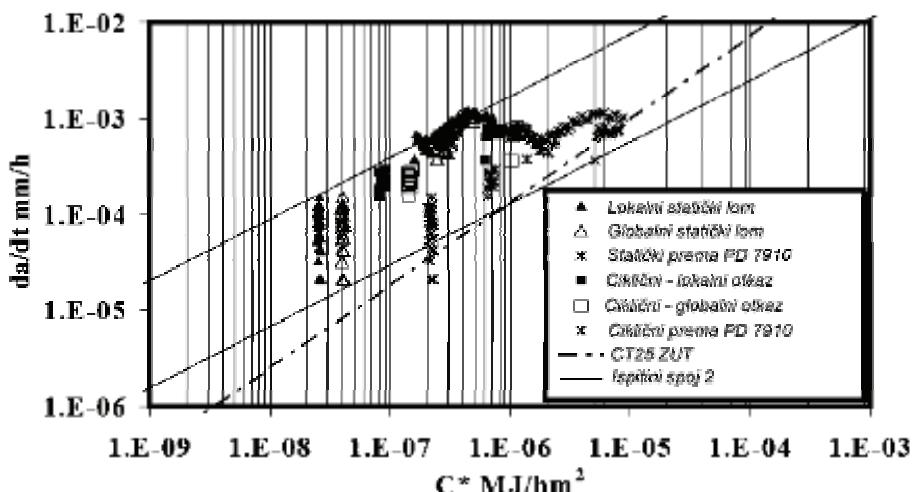
Podaci su najvećim dijelom sakupljeni pri izradi evropskih projekata "Ocjena grešaka na visokim temperaturama" ("High Temperature Defect Assessment" - HIDA) i "Integritet u reparturnom zavarivanju" ("Integrity of Welds Repair"), na kojima je učestvovala kompanija ETD. Ispitivani su integritet zavarenih i zavarivanjem repariranih dijelova velikog presjeka pri puzanju i zajedničkom djelovanju puzanja i zamora od cikličnog rada postrojenja. Zbog ekonomičnosti pogona u suvremenim termoenergetskim postrojenjima se zahtjeva učestalo startanje i isključivanje, čime se opterećenju puzanjem dodaje i zamorno opterećenje, po pravilu u oblasti niskocikličnog zamora. Zbog toga se od novih materijala zahtjeva zadovoljavajuća otpornost na ovaj kombinirani vid opterećenja. U izvedenim ispitivanjima je važna stavka bila i metodologija detektiranja pukotina.

U ispitivanjima koje je ETD izvela nađeno je da se otkazi javljaju i kod dijelova malog presjeka, iako u njima djeluje ravninsko stanje naprezanja, kada deformacija može da se razvija u sva tri pravca čime je otežana pojava pukotina.

4.1. Otpornost prema stvaranju pukotina i lomu

Bitna prednost čelika sa 9-12 % Cr u odnosu na prethodno ugrađivane materijale u termoenergetska postrojenja, je njegova visoka čvrstoća na povišenim temperaturama; postiže se prikladnom martenzitnom mikrostrukturom nakon odgovarajuće toplinske obrade. Kako je tokom postupka zavarivanja izlaganje visokoj temperaturi neizbjježno, struktura konstituenata zavarenog spoja ovog čelika će biti lošija od prvobitne strukture OM, pa će i osobine zavarenog spoja biti lošije. Zavareni spoj je kritično mjesto i zbog toga je neophodno poznavati njegove osobine i procijeniti nivo njegove degradacije. Zbog toga su izvedena ispitivanja epruveta izrađenih od sučelnog X zavarenog spoja čelika P 91 tokom 50.000 sati, koja su ukazala na znatno smanjenje čvrstoće zavarenog spoja u odnosu na čvrstoću OM. Zavarene cijevi su ispitane i puzanjem i malociklusnim zamarajućim opterećenjem. Paralelno je ispitivan i prethodno korišteni čelik P 22. Rezultati ovih ispitivanja su prikazani na dijagramu ovisnosti brzine rasta pukotine da/dt od veličine C^* integrala¹⁾, na sl. 2 za čelik P 22 i na sl. 3 za čelik P 91.

¹⁾ C^* je parametar mehanike loma koji je dobiven modifikacijom J integrala, a uveden je da bi se opisalo ponašanje pukotine u uvjetima puzanja.

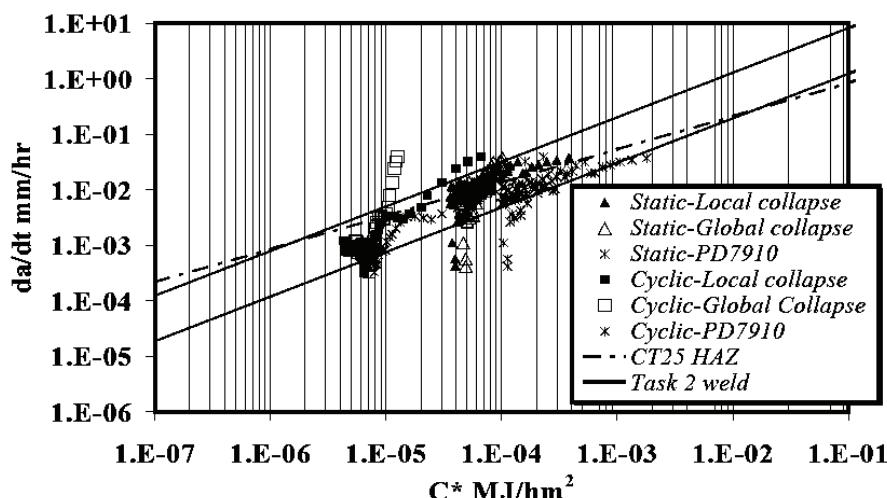


Slika 2. Dijagram zavisnosti brzine rasta pukotine da/dt od veličine C^* integrala za zavareni spoj cijevi od čelika P 22 (sivo – ciklično opterećenje, crno – puzanje)

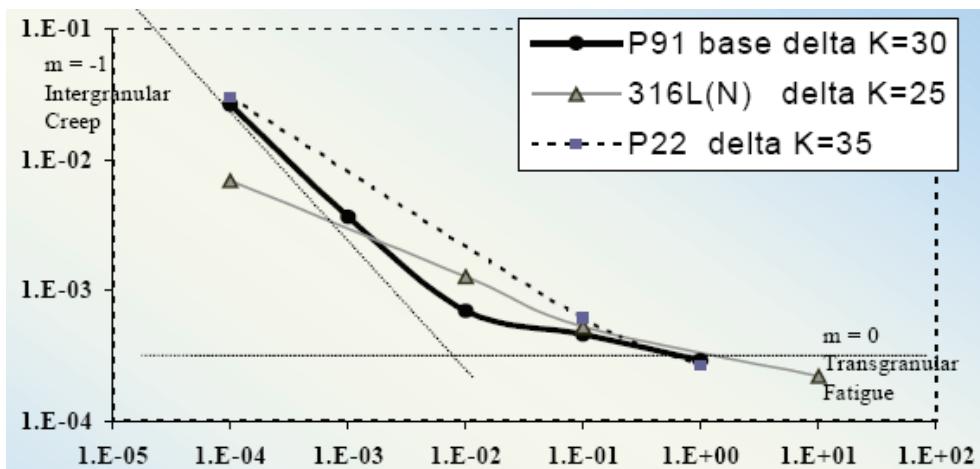
Često se koristi dijagram udjela vijeka uslijed puzanja i uslijed zamora, koji pokazuje da se ukupni vijek značajno smanjuje već pri razmjerno malom udjelu zamornog opterećenja. U takvom dijagramu, sl. 4, su također uspoređeni čelici P 22 i P 91, ali za različite vrijednosti opsega faktora intenziteta napona ΔK . Unijeta je i linija zavisnosti za nehrđajući čelik 316L. Može se ocijeniti da je negativni utjecaj zamornog opterećenja najviše izražen kod čelika P 91, što je od značaja za njegovu eksploraciju.

U više zamornih ispitivanja na temperaturi od 600°C je pokazano da je čvrstoća zavarenog spoja čelika P91 približno dva puta manja od čvrstoće osnovnog metala.

Dalja usporedba čelika P 22 i P 91 je izvedena na osnovu njihovih standardom dozvoljenih naprezanja za 100.000 sati rada na različitim temperaturama, sl. 5. Što je temperatura viša, to je prednost u pogledu čvrstoće čelika P 91 jasnije izražena, a čvrstoća ovog čelika je i iznad čvrstoće više legiranog čelika X 20. Modificiran čelik P 92 (legiran dodatno sa W) na temperaturama iznad 550°C pokazuje osjetno višu čvrstoću od čelika P 91.



Slika 3. Dijagram zavisnosti brzine rasta pukotine da/dt od veličine C^* integrala za zavareni spoj cijevi od čelika P 91 (sivo – ciklično opterećenje, crno – puzanje)

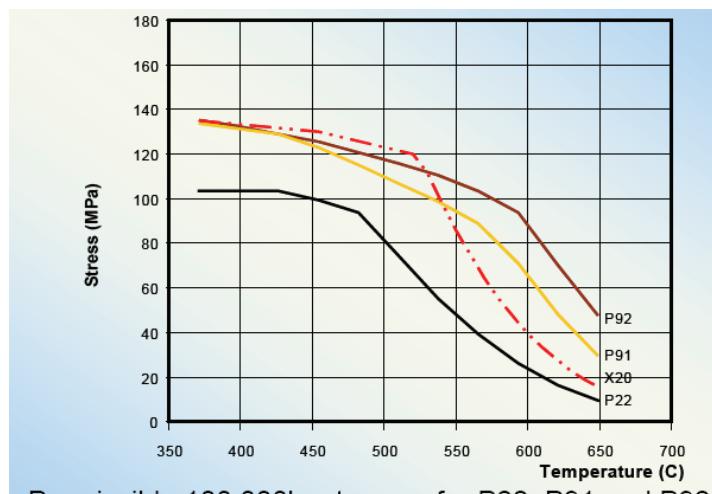


Slika 4. Doprinos loma puzanjem i loma zamorom ukupnom lomu čelika P 22 i P 91 (radi usporedbi unijet je i dijagram za nehrđajući čelik 316 L)

Na sl. 6. su prikazane pukotine na poklopcu, izrađenom od čelika F 91 koje su nastale zbog velike debljine zida (ometena deformacija) i koncentracije napona na ivici otvora. Zbog uspostavljenog ravnog stanja deformacije, pri razvoju loma je promjena površine poprečnog presjeka više izražena na višoj temperaturi, kada je duktilnost čelika manja i ispoljava se kraćim vremenom do loma.

Treba imati u vidu da naprezanje loma pri dugotrajnoj upotrebi na visokoj temperaturi zavisi od:

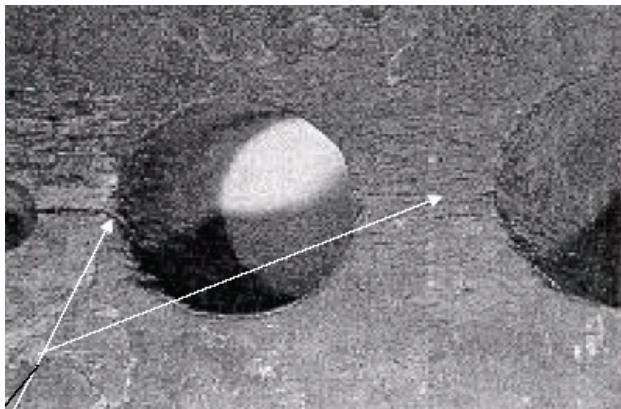
1. ojačavanja čvrstim rastvorom (C, Cr, Mo);
2. vrste, veličine i raspodjele čvrstog taloga;
3. gustoće dislokacija u substrukturi.



Permissible 100,000hr stresses for P22, P91 and P92

Slika 5. Dopushtena naprezanja za vijek od 100.000 sati za čelike za visoke temperature

Za postizanje optimalnih osobina čelika P91 od presudnog značaja je toplinska obrada. Za osnovni metal je to austenitizacija i popuštanje. Za zavareni spoj je značajno predgrevanje, dogrijavanje i toplinska obrada nakon zavarivanja (PWHT), koja se može izvoditi i neposredno posle zavarivanja.



Slika 6. Pukotine na ivici otvora poklopca od čelika F 91

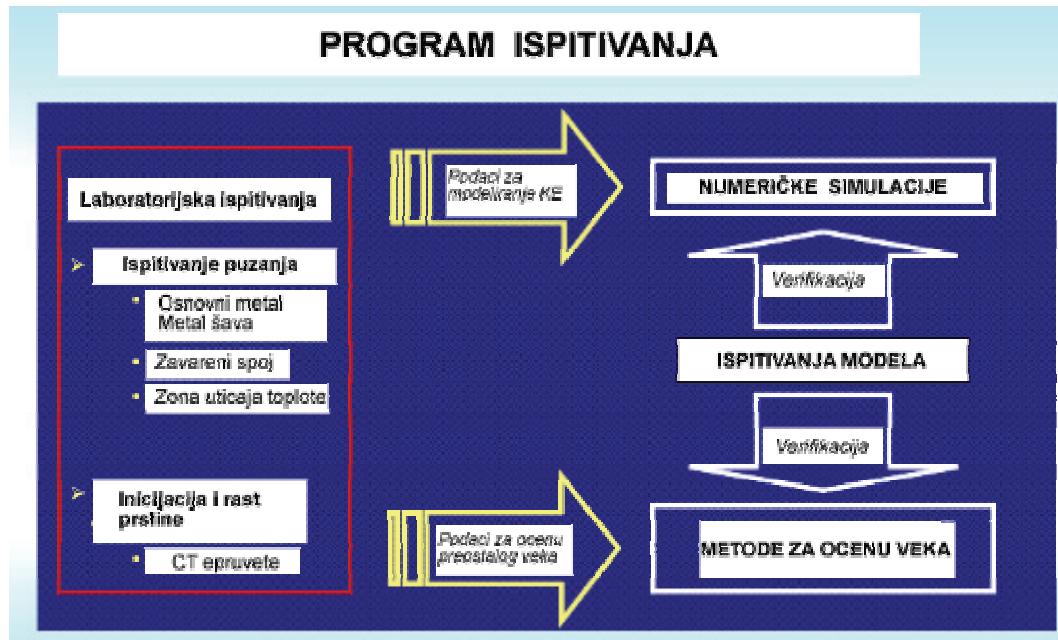
5. RAZVOJ METODA ZA PROCJENU RADNOG VIJEKA KOMPONENTA PROCESNE OPREME

Mehanika loma je dala bitan doprinos analizi ponašanja pukotina i osigurala mjesto aktivnom pristupu problemima vezanim sa pojmom i razvojem loma. Analiza pukotina i njihovog razvoja u različitim uvjetima opterećenja, pri statičkom i udarnom opterećenju, zamoru, puzanju, koroziji i koroziji uz naprezanje, a naročito pri istovremenom djelovanju više vrsta opterećenja, je omogućila da se problemu integriteta konstrukcija pride sa velikim šansama za predviđanje otkaza kombiniranim aktivnošću: analizom konstrukcije, ispitivanjem i kontrolom, inspekcijom u toku eksploatacije, procjenom preostalog radnog vijeka, pravovremenom reparaturom i procjenom vijeka trajanja. Potreba interdisciplinarnog pristupa je jasna iz nabrojanih aktivnosti. Da bi se unapredile i razvile metode za procjenu vijeka, neophodno je povezati teorijsko znanje, iskustvo iz eksploatacije, eksperimentalne podatke i kompjutersko modeliranje, a još značajnija je sposobljenost za primjenu razvijene metode.

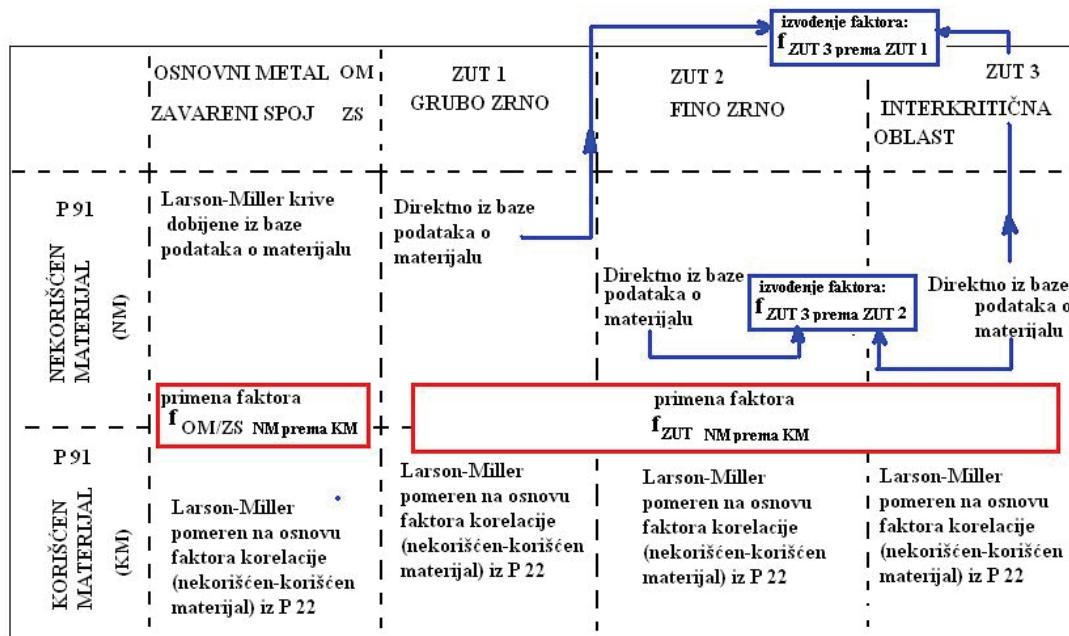
Na primjerima iz prakse prikazanim na seminaru o P 91 održanom 2005. godine u Londonu, biti će prikazan pristup ocjeni vijeka komponenata izrađenih od čelika za rad na povišenim temperaturama, [6-8].

Tri su pristupa neophodna da bi se razvila pogodna metoda za procjenu vijeka. Kao prvo, potrebna je solidna teorijska osnova za razvoj postupka. Drugo, za numeričku analizu neophodna su dva nezavisna programa: prvi se odnosi na stanje napona i deformacija, koje je osnova za dalje proračune, a drugi treba da osigura primjenljiv postupak za procjenu vijeka. Na dostignutom nivou razvoja najveći problem ipak predstavlja treća grupa podataka, podaci o materijalu. U ovoj fazi su izvedena osnovna ispitivanja puzanjem OM, MŠ i posebno ZUT. Podaci o karakteristikama puzanja ne pružaju sliku o ponašanju pukotine, pa su potrebna i ispitivanja mehanike loma, u ovom primjeru izvedena pomoću kompaktnih epruveta za zatezanje (CT), a kao parametar je prihvaćen C^* integral. Specifičnost razvoja programa je njegova namjena za ocjenu preostalog vijeka repariranih zavarenih komponenti izrađenih od čelika P 91, što odgovarajućim ispitivanjima treba i verificirati. Radi toga je definirana teorijska osnova za praćenje ponašanja repariranih zavarenih spojeva od čelika P 91 sa pukotinom ili bez nje. Neovisan zadatak je razvoj modela konačnih elemenata koji povezuje konstrukciju sa osobinama materijala u području zavarenog spoja u pogledu puzanja i kombiniranog djelovanja puzanja i zamora, ali bez tog modela nije moguće razviti postupak. Paralelno treba provjeriti primjenljivost većeg broja postojećih postupaka za procjenu osobina i preostalog vijeka na reparirane zavarene spojeve. Da bi usporedba bila mjerodavna potrebno je paralelna ispitivanja izvesti s novim, nekorištenim materijalom i materijalom koji je bio izložen uvjetima

eksploracije. Pristup primijenjen u razvoju postupka za procjenu vijeka repariranih zavarenih spojeva je prikazan na sl. 7.



Slika 7. Osnovni pristup razvoju postupka za procjenu vijeka reparaturnih zavarenih spojeva

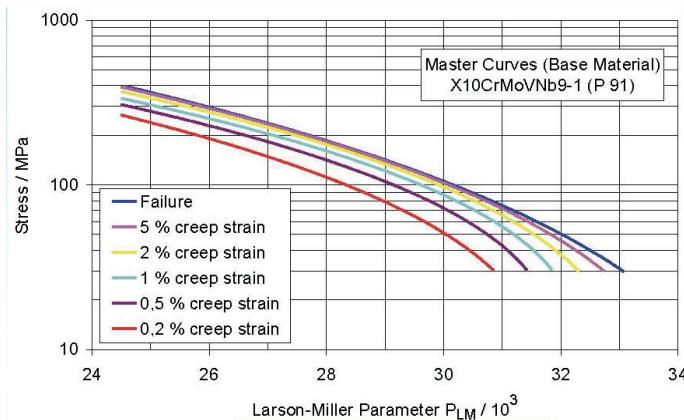


Slika 8. Tehnika za simulaciju zone utjecaja topline i materijala iz eksploracije

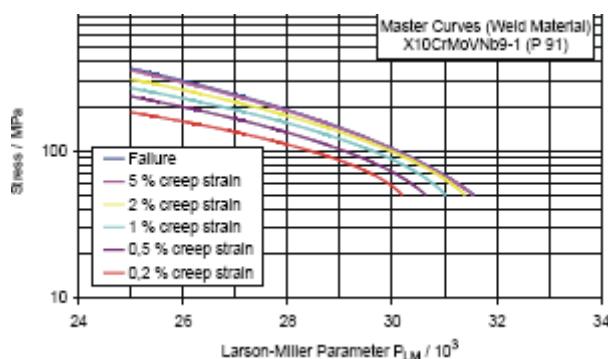
Na sl. 8. je prikazana shema ispitivanja za određivanje potrebnih podataka o osnovnom materijalu i zoni utjecaja topline nakon određenog vremena eksploracije.

Da bi podaci bili što vjerodostojniji, osim elasto-plastičnog ponašanja određeno je i ponašanje pri puzanju dugotrajnim ispitivanjem do deformacije značajne veličine i dobiveni

podaci, potrebni za korištenje odgovarajuće Larson - Miler jednadžbe. Na taj način su dobivene krivulje prikazane na sl. 9. za osnovni metal P91 i na sl. 10. za metal zavara P91, koje pokazuju zavisnost Larson-Milerovog parametra od djelujućeg naprezanja, pri lomu i za različite veličine deformacije puzanja.



Slika 9. Osnovne krivulje ovisnosti deformacije pri puzanju od Larson-Milerovog parametra za osnovni metal P 91



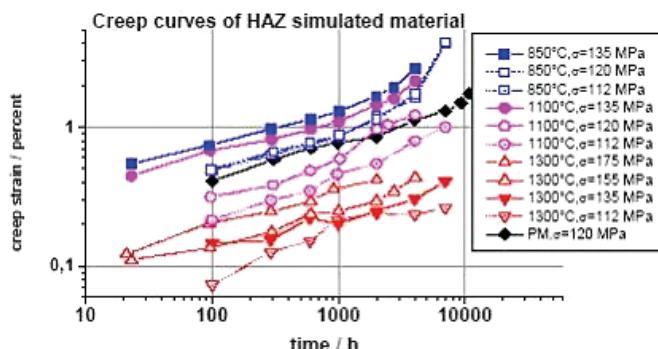
Slika 10. Osnovne krivulje ovisnosti deformacije pri puzanju od Larson-Milerovog parametra za metal zavara P 91

Za ZUT su dugotrajna ispitivanja izvedena na simuliranim uzorcima, što je omogućilo da se dobiju krivulje prikazane na sl. 11. Veličina deformacije puzanja u % je prikazana u zavisnosti od vremena za karakteristične temperature ZUT (850 °C, 1000 °C, 1300 °C), na kojima dolazi do strukturalnih transformacija. Radi usporedbe na sliku su unijeti i podaci za osnovni metal.

U tablici 1. su dane skice i dimenzije zavarenih uzoraka za ispitivanja različitim vrstama opterećenja i vremenima. Na sl. 12. prikazano je reparaturno zavarivanja uzorka sa priključnom cijevi. Primjenjene su dvije metode reparature. Zavarivanje punog presjeka (FRW) je izvedeno nanošenjem mekog ("puterovanog") sloja i korijenih prolaza u zaštiti argonom (TIG postupak) i prolaza popune i pokrivenih prolaza ručnim elektrolučnim zavarivanjem (E zavarivanje). Svi korijeni prolazi, prolazi popune i pokriveni prolaz pri djelomičnom zavarivanju sa ostavljenim ligamentom (PRW1) su izvedeni E postupkom. Konvencionalni postupak zavarivanja uključuje izbor dodatnog materijala iste čvrstoće, predgrijavanje na 225 °C, temperaturu međuprolaza između 250 °C i 300 °C, periodično hlađenje do 60 °C do 100 °C, sa toplinskom obradom nakon zavarivanja (760 °C, 180 min).

Na sl. 13. je prikazan makrosnimak pukotine nakon loma uzorka, a na sl. 14. je dana shema raspodjele oštećenja po volumenu. Vrijeme do loma je određeno modeliranjem pomoću

konačnih elemenata za naprezanje 104 MPa sa podacima o osobinama loma izotermičkog materijala prema ISO.



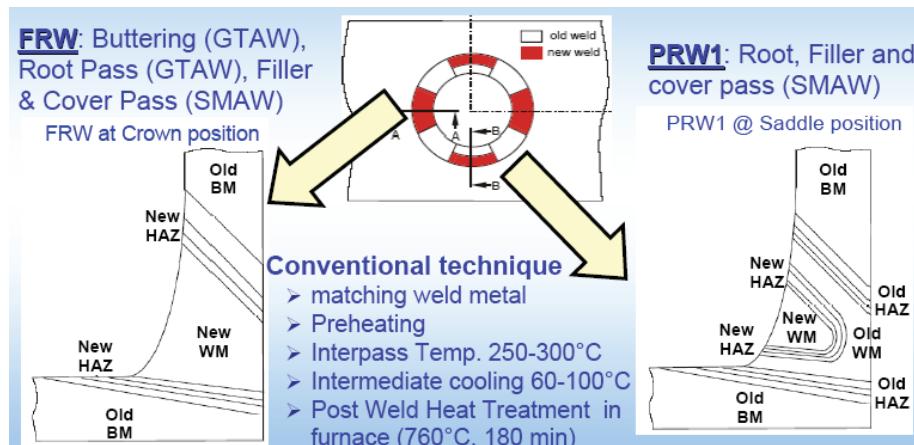
Slika 11. Osnovne krivulje ovisnosti deformacije pri puzanju od vremena za simulirane uzorke ZUT čelika P 91

Tablica 1. Zavareni uzorci i uvjeti ispitivanja
 (NKM-nekoristišten materijal; KM-korišten materijal)

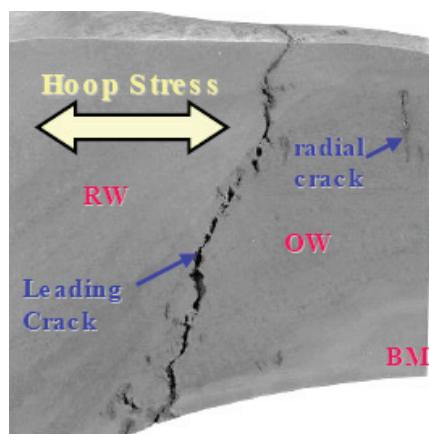
Isp. br.	Uzorak za ispitivanje	Dimenzije	Radni parametri	Opterećivanje (režim)	Vreme ispitivanja
1		D=353 mm t=56.5 mm	p=25 MPa t=565 °C 60.000 h	Savijanje u 4 tačke + unutrašnji pritisak (puzanje+zamor)	5000 h
2		Cev D=380 mm t=50 mm Mlaznica D=273 mm t=38 mm	p=24 MPa t=600 °C 10.000 h	Unutrašnji pritisak (puzanje)	2520 h
3		D=358 mm t=48 mm	Veštacki stareno 2500 h	Unutrašnji pritisak + aksijalna sila (puzanje)	2500 h

Kako je do loma puzanjem došlo pretežno u starom zavarenom spaju, to je potrebno u proračun unijeti i podatke o eksploraciji vezane za njegov utrošeni dio vijeka (10.000 sati). Utvrđeno je da donja granična krivulja za lom puzanjem osnovnog metala daje suviše konzervativne rezultate, ali se ipak razvijeni postupak može koristiti u preliminarnoj procjeni vijeka za reparaturno zavareni spoj. Za pouzdaniju i manje konzervativnu procjenu potrebno je da se postupak poboljša, što je postignuto uvođenjem parametra oštećenja i faktora redukcije vijeka zbog zavarivanja. Poboljšani model je verificiran eksperimentalno i dobivena je zadovoljavajuća suglasnost, sl. 15. Na sl. 16. je dat snimak pukotine, koji potvrđuje da je u ovom slučaju mjerodavno oštećenje puzanjem, a ne rast pukotine.

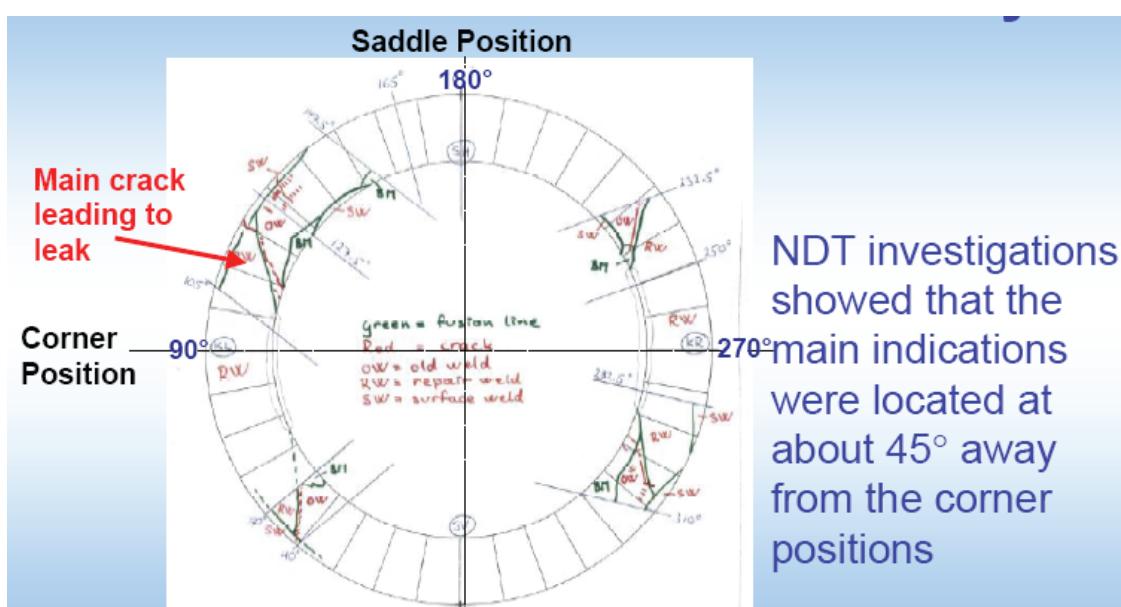
Do loma je došlo posle 2.530 sati ispitivanja. Glavna pukotina se razvijala između reparaturnog zavara i prethodnog metal šava. To se poklapa sa iskustvom elektrane da je kritično područje prethodni metal šava, koji ograničava vijek repariranog zavarenog spoja. Sa sl. 13. i 14. se vidi da se lom razvijao pod uglom od 45° u odnosu na radijalni pravac, u skladu pravcem prostiranja ZUT. Slike 13. i 16. pokazuju da se ispred vrha pukotine javlja intenzivno oštećenje. Nije mogao da se utvrdi točan položaj inicijacije pukotine zbog njenog složenog oblika i orijentacije, što onemogućava direktnu primjenu parametara pukotine. Zbog toga je



Slika 12. Tehnike simulacije reparaturnog zavarivanja uzorka sa priključkom



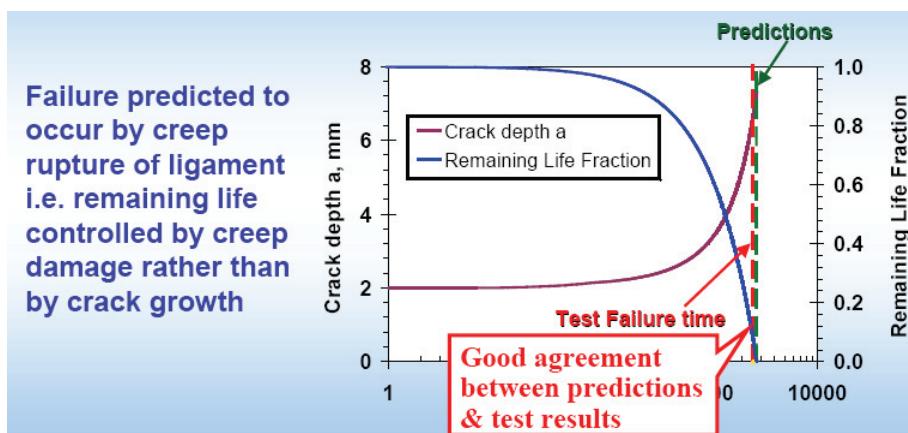
Slika 13. Makrosnimak pukotine razvijene ispitivanjem uzorka sa priključkom



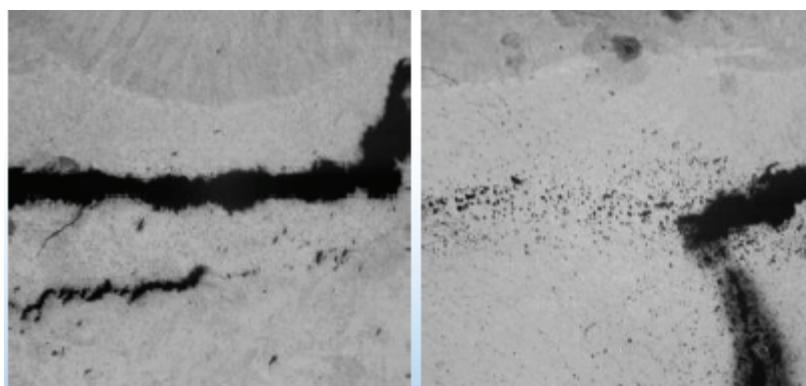
Slika 14. Shema razvoja oštećenja na uzorku sa priključkom

potrebna idealizacija oblika pukotine.

Ispitivanja se izvode i na uzorcima pripremljenim simuliranim reparaturnim zavarivanjem na pravom segmentu cijevi, sl. 17. Zavarivanje punog presjeka (FRW) je izvedeno konvencionalnim E postupkom sa dodatnim materijalom iste čvrstoće i termičkom obradom posle zavarivanja. Izvedene su dvije varijante djelomičnog reparaturnog zavarivanja: PRW1, u kome ZUT sa obje strane ima stari osnovni metal, i PRW2, u kome ZUT ima sa jedne strane stari osnovni metal, a sa druge strane stari metal zavara. U obje varijante je korišten elektrodnji materijal na bazi Ni, i primijenjen tzv. hladni postupak zavarivanja, bez toplinske obrade nakon zavarivanja.



Slika 15. Rezultati predviđanja rasta pukotine puzanja koje je dominantno u ovom procesu, na uzorku sa priklučkom



Slika 16. Makrografski snimak pukotine, koji potvrđuje dominantan utjecaj puzanja

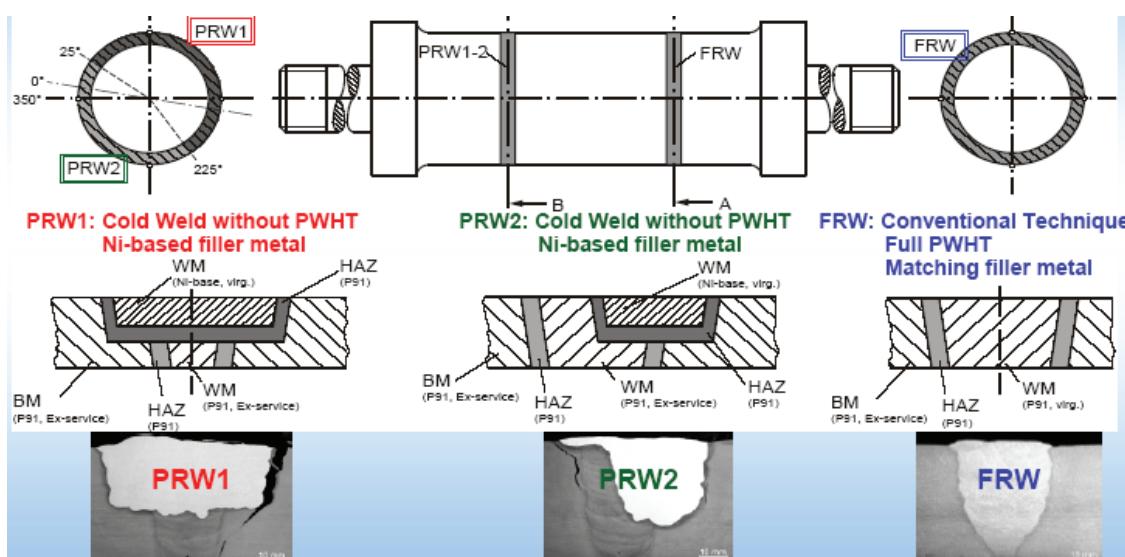
Približni oblik razvoja obimne pukotine na PRW1, prikazan na sl. 18 utvrđen je ultrazvučnim ispitivanjem. Detalji površine loma su dani na sl. 20.

Na sl. 20, 21. i 22. su dane raspodjele tvrdoće kroz zavarene spojeve ispitivanih uzoraka. Uočava se vrlo niska tvrdoća osnovnog metala u području IV ZUT u svim slučajevima, što je posebno izraženo u slučaju FRW i PRW2.

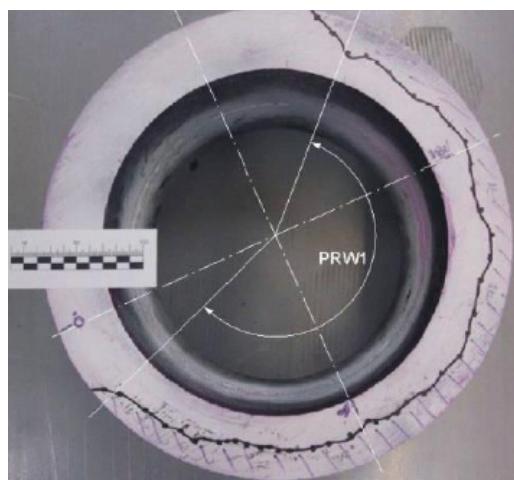
Iz aspekta integriteta konstrukcija treba ukazati na dva mehanizma loma u djelomice repariranom poprečnom presjeku (PRW): lom uslijed puzanja tipa IV u ZUT čelika 91 i loma u području linije stapanja između osnovnog metala P91 posle eksploatacije i metala zavara tzv. hladnog zavarivanja elektrodnim materijalom na bazi Ni. Pri tom je vrlo strm gradijent tvrdoće kroz ZUT od linije stapanja pri hladnom zavarivanju. Pri ispitivanju reparaturnog zavarivanja

punog presjeka (FWR) je vrlo rano došlo do otkaza zbog nekontroliranog unosa topline. Zavarivanje je ipak izvedeno do kraja da bi se ispitala druga dva zavarena spoja, djelomično reparaturno zavarena spoja.

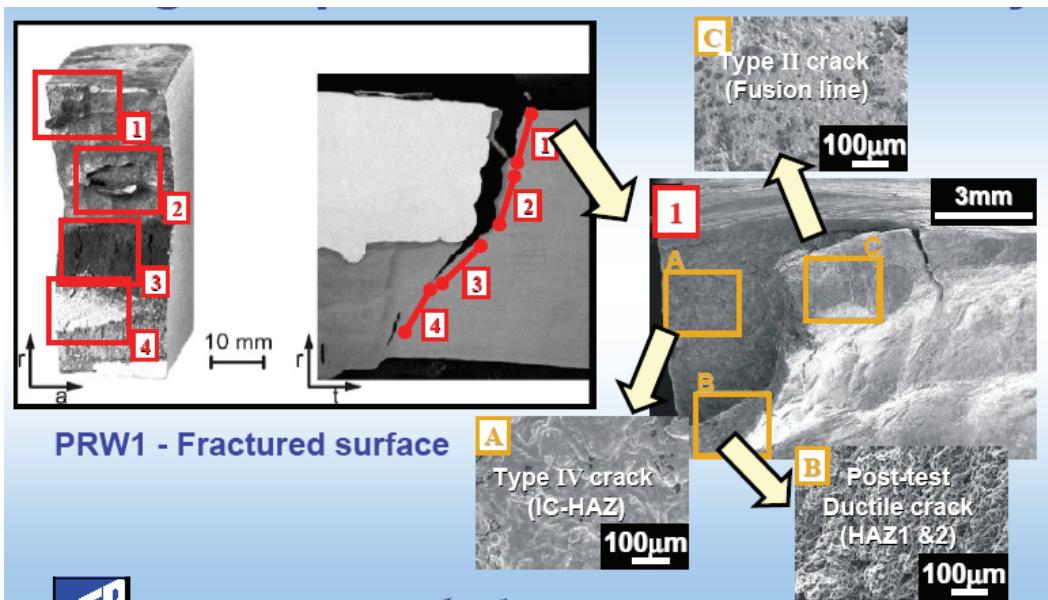
Ilustracije radi na sl. 23. i 24. prikazano je usporedba rezultata eksperimenta i numeričke simulacije ponašanja zavarenih spojeva. U oba djelomično repariranim poprečnom presjeku (PRW) (PRW1 i PRW2) je moguće primjenom metode konačnih elemenata predvidjeti lom u području IV ZUT, ali u sadašnjoj fazi razvoja programa nije moguće predvidjeti lom tipa II u području linije stapanja, iako je on uočljiv u slučaju PRW 1.



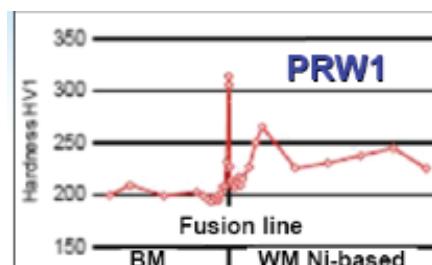
Slika 17. Tehnike pripreme uzorka simulacijom reparaturnog zavarivanja prave cijevi



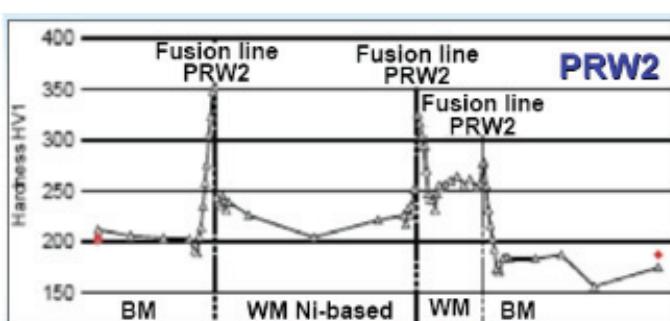
Slika 18. Približni oblik volumenske pukotine na zavarenom uzorku cijevi, utvrđen ultrazvučnim ispitivanjem



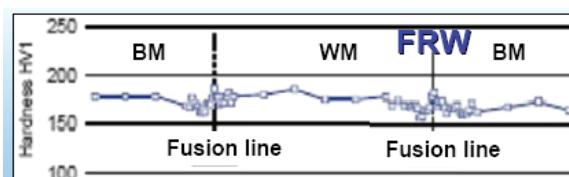
Slika 19. Detaljna metalografska analiza površine loma: A – pukotna tipa IV (IKZUT); B – nasilni duktilni lom posle ispitivanja; C – pukotina tipa II na liniji stapanja



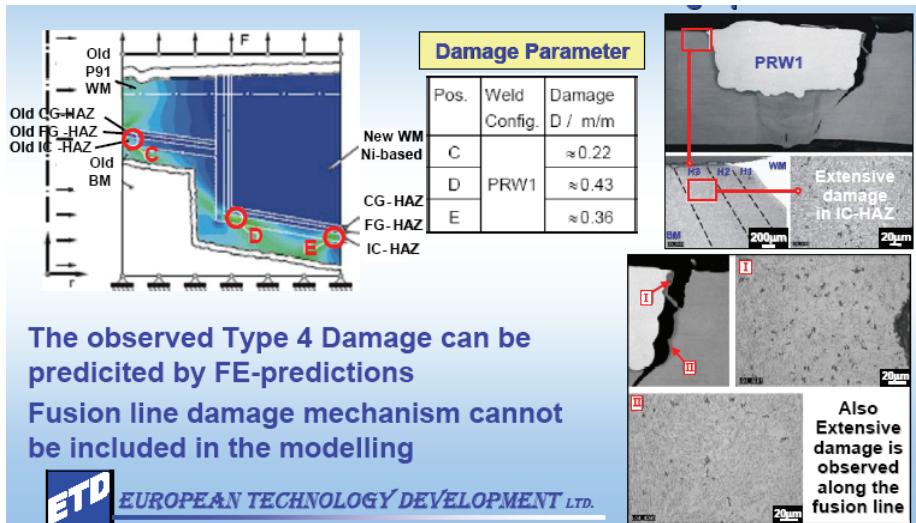
Slika 20. Raspodjela tvrdoće kroz reparaturni zavareni spoj punog presjeka FRW



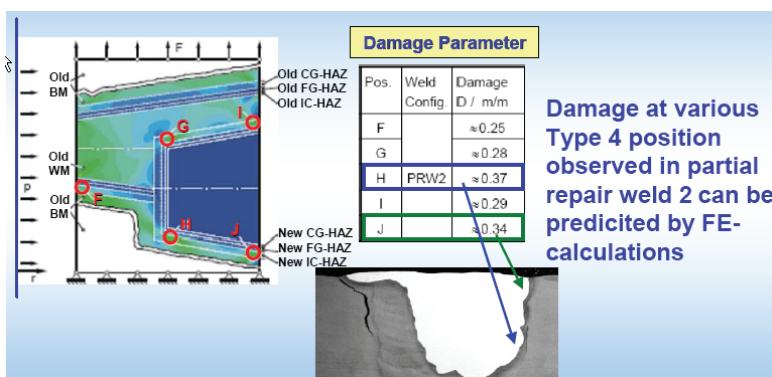
Slika 21. Raspodjela tvrdoće kroz reparaturni zavareni spoj sa ligamentom PRW1



Slika 22. Raspodjela tvrdoće kroz reparaturni zavareni spoj sa ligamentom PRW2



Slika 23. Usporedba eksperimentalnih rezultata i proračuna metodom konačnih elemenata djelomično repariranog poprečnog presjeka (PRW1)



Slika 24. Usporedba eksperimentalnih rezultata i proračuna metodom konačnih elemenata djelomično repariranog poprečnog presjeka (PRW2)

6. ZVRŠNA RAZMATRANJA

1. Za ocjenu vijeka pri puzanju potrebni su pouzdani podaci o lomu zbog puzanja repariranog zavarenog spoja, ali se mogu koristiti i podaci za osnovni metal sa faktorom redukcije. Za ocjenu rasta pukotine potrebni su odgovarajući podaci o parametru C^* .
2. Za ocjenu lokalne raspodjele naprezanja (npr. tip IV) treba primjenjivati multimaterijalni model KE sa podacima o područjima zavarenog spoja, koje je moguće dobiti simuliranjem.
3. Utjecaj "mismatchinga" treba također uzeti u obzir u numeričkoj analizi rasta pukotine.
4. Udio već istrošenog vijeka treba procijeniti na najpouzdaniji način.
5. Zaostala naprezanja od zavarivanja treba uračunati, naročito ako se radi o hladnom zavarivanju (bez toplinske obrade nakon zavarivanja).

ZAHVALNOST

Ovaj rad predstavlja teorijski dio istraživanja na projektu TR 35011 financiranom od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

7. LITERATURA

- [1] Milović, Lj., "Analiza integriteta zavarenih komponenata procesne opreme za povišene radne temperature", doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2008.
- [2] Milović, Lj., "Značaj prslina u zoni uticaja toplove čelika za povišene temperature", *Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 8, No. 1, 2008, str. 55-65.
- [3] Francis, J. A., Mazur, W., Bhadeshia, H. K. D. H., "Type IV cracking in ferritic power plant steels", *Materials Science and Technology*, Vol. 22, No.12, 2006, pp. 1387-1395.
- [4] Sokolianski, B. M., "Assessment of the remnant life of power plant pipelines", *Proceedings of the 5th International Fracture Mechanics Summer School The Application of Fracture Mechanics to Life Estimation of Power Plant Components*, ed. S. Sedmak, EMAS, Belgrade, 1990, pp. 383-390.
- [5] Weber H., "Assessment of creep damage in a heat resistant ferritic steel", *Proceedings of the 5th International Fracture Mechanics Summer School The Application of Fracture Mechanics to Life Estimation of Power Plant Components*, ed. S. Sedmak, EMAS, Belgrade, 1990, pp. 383-390.
- [6] Shibli, A., "Worldwide experience in the use of P/T91 steel and component integrity issues", *International Seminar Industry and Research experience in the use of P91/T91 in HRSG and Conventional Boilers* organized by European Technology Development Ltd. (ETD), London, 2005.
- [7] Hamata, N.L.M., Shibli, A., Klenk, A., "Feature test simulations of P91 repair welds", *International Seminar Industry and Research experience in the use of P91/T91 in HRSG and Conventional Boilers* organized by European Technology Development Ltd. (ETD), London, 2005.
- [8] Rantala, J. H., Shibli, A., "Full scale pressure vessel tests on weld repaired ex-service and new P91 steel base materials and observations on the resulting cracking", *International Seminar Industry and Research experience in the use of P91/T91 in HRSG and Conventional Boilers* organized by European Technology Development Ltd. (ETD), London, 2005.