



B.V. Jegdić, B.M. Bobić, A.B. Alil

NAPONSKA KOROZIJA METALA I LEGURA I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA, DEO II: METODE ISPITIVANJA

STRESS CORROSION CRACKING OF METALS AND ALLOYS AND THEIR WELDED JOINTS, PART II: TEST METHODS

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC: 620.194.2:621.791.052

Rad primljen / Paper received:

29.03.2012.

Adresa autora / Author's address:

Dr Bore V. Jegdić, dipl.ing.

Ana B. Alil, dipl.ing.

Dr Biljana M. Bobić, dipl.ing.

Institut GOŠA, Milana Rakića 35, Beograd, Srbija.

Ključne reči: zavareni spojevi, naponska korozija, metode ispitivanja.

Key words: welded joints, stress corrosion cracking, test methods.

Izvod

U radu su razmotrene metode ispitivanja naponske korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. Opisani su principi tih metoda, postupci izvođenja, oblasti primene, kao i prednosti i nedostaci pojedinih metoda. Shematski su prikazani tipični rezultati koji se dobijaju njihovom primenom. Posebna pažnja je posvećena metodama ispitivanja naponske korozije zavarenih spojeva. Opisane su klasične metode ispitivanja statički opterećenih glatkih uzoraka (C-prstenovi, uzorci na savijanje itd.), kao i savremene metode kao što je metoda male brzine deformacije (SSRT) i metode zasnovane na principima mehanike loma. Navedeni su odgovarajući standardi (ISO i ASTM) za njihovo izvođenje, kao i preporuke za sprečavanje naponske korozije zavarenih spojeva različitih metala i legura.

Summary

Test methods of stress corrosion cracking (SCC) of metals and alloys and their welded joints were discussed in this paper. Principles of the methods, procedures, application areas and the advantages and disadvantages of the methods were described. Typical results obtained by their application were shown schematically. Special attention was devoted to SCC tests of the of the welded joints. Classical test methods of statically loaded smooth specimens (C-rings, bend-beam SCC samples, etc.), as well as modern methods such as slow strain rate test (SSRT) and methods based on the fracture mechanics (FM) principles have been described. Appropriate standards for SCC testing (ISO and ASTM) were listed, as well as some recommendations for preventing SCC of welded joints of different metals and alloys.

Uvod

Uopšte, da bi došlo do naponske korozije, moraju biti ispunjena sledeća tri uslova: (1) legura treba da bude sklona naponskoj koroziji, (2) legura se nalazi u specifičnoj korozionoj sredini i (3) prisutna su zatezna naprezanja veća od kritične vrednosti. Ovaj treći uslov, mehanika loma definiše tako da koeficijent intenziteta napona na vrhu prsline K_I , bude veći od neke kritične vrednosti K_{ISCC} [1-5].

Za ispitivanje otpornosti zavarenih spojeva prema naponskoj koroziji primenjuju se iste metode kao i za ispitivanje naponske korozije uopšte, uz određene modifikacije. Pored tih direktnih metoda ispitivanja često se koriste druge metode, kao što su elektrohemijske metode (elektrohemijska impedansna spektroskopija, polarizaciona merenja itd.) [6,7], mikroskopske metode (skening elektronska mikroskopija, transmisiona elektronska mikroskopija itd.) [8], različite nerazarajuće metode ispitivanja (merenje provodljivosti legure, radiografija itd.) [9]. Te metode daju niz korisnih podataka i dublji uvid u proces naponske korozije. Pomenute metode su ranije detaljno opisane u drugim oblastima nauke [6-9], tako da se neće razmatrati u ovom radu.

Metode ispitivanja statički opterećenih glatkih uzoraka

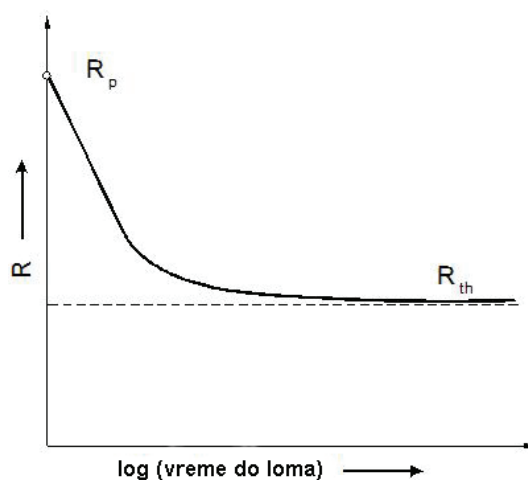
Ove metode se obično primenjuju pri različitim konstantnim nivoima naprezanja. Meri se vreme do pojave prsline ili loma uzoraka u odgovarajućoj korozionoj sredini. Vreme do loma (slika 1), se ubrzano smanjuje sa povećanjem nivoa naprezanja. Kritično naprezanje R_{th} se određuje za beskonačno dugo vreme do loma, odnosno za dovoljno dug period ispitivanja [10-14]. Ukupno vreme do loma t_f , pri datom naprezanju, sastoji se od vremena potrebnog za obrazovanje prsline (inkubaciono vreme t_{inc}) i vremena potrebnog za rast prsline. Inkubaciono vreme obično obuhvata vreme za obrazovanje pitova i njihov rast do veličine pri kojoj se transformišu u naponsko-korozionu prslinu. Taj



prelaz zavisi od niza faktora kao što su sastav metala na dnu pita, elektrohemijski uslovi na dnu pita (pH vrednost, elektrodni potencijal, lokalni sastav rastvora itd.), geometrija pita, kao i naprezanja, odnosno deformacije metala na dnu pita [10]. Pri naprezanjima većim od kritičnog, dolazi do obrazovanja i rasta pitova i njihove transformacije u naponsko-korozionu prslinu. Prslina može nastati i pri interkristalnoj koroziji, ukoliko je metal sklon ovom vidu korozionog razaranja.

Pomenuta ispitivanja se koriste za određivanje maksimalnog (kritičnog) naprezanja R_{cr} , koje se može primeniti bez rizika od naponsko-korozionog loma. Primenjuju se za određivanje uticaja metalurških faktora (sastav legure, termička obrada itd.) i elektrohemijskih faktora (sastav rastvora, pH itd.) na sklonost legure prema naponskoj koroziji. Pri ispitivanjima treba imati u vidu da procesi obrazovanja i rasta prsline i nestabilnog završnog loma uzorka nisu razdvojeni. Vreme do formiranja prsline zavisi od velikog broja faktora, kao što su npr. stanje površine ili predistorija metala. Ukoliko su u metalu prisutni defekti koji mogu igrati ulogu prsline, tada se vreme do loma znatno skraćuje.

Nekada se ispitivanja izvode pri konstantnoj deformaciji uzorka. Tada se meri vreme do obrazovanja prve vidljive prsline ili vreme do loma.



Slika 1: Postupak određivanja kritičnog naprezanja (R_{th}) za odvijanje procesa naponske korozije [5].

Ispitivanja naponske korozije metodom statički opterećenih glatkih uzoraka izvode se na uzorcima U oblika, na C-prstenovima, na uzorcima opterećenim na savijanje ili direktno zatezanje (slika 2). Za izvođenje ovakvih ispitivanja mogu se primeniti ASTM, ISO ili neki drugi standardi: ASTM G 30 i ISO 7539-3 (za uzorke U oblika), ASTM G 38 i ISO 7539-5 (C-prstenovi), ASTM G 39 i ISO 7539-2 (savijanje), ASTM G 49 i ISO 7539-4 (direktno zatezanje). Navedeni standardi definišu oblik uzoraka, dok uslove ispitivanja u različitim korozionim sredinama definišu ostali standardi. Za ispitivanje naponske korozije nerđajućih čelika primenjuju se: ASTM G 35 (politionske kiseline), ASTM G 36 ($MgCl_2$), ASTM G 41 (rastopi soli), ASTM G 44 (NaCl), ASTM G 123 (zakišljeni NaCl) i ISO 15324 (kapi NaCl). Standardi ASTM G 47 i ISO 9591 daju preporuke za ispitivanje naponske korozije aluminijumskih legura i njihovih zavarenih spojeva u različitim korozionim sredinama. U standardima ISO 6957 i ASTM G 37 opisan je postupak za ispitivanje naponske korozije legura Cu-Zn (mesing) u prisustvu zaostalih naprezanja, u amonijačnim rastvorima (Matsonov rastvor).

Standardi ASTM G 58 i ISO 7539-8, GOST 26294 i DIN 50915 su posebno namenjeni za ispitivanje naponske korozije zavarenih spojeva. Ispitivanja se izvode pri spolja nametnutom naprezanju ili na uzorcima sa zaostalim naprezanjima, koja su nastala usled prisustva zavarenih spojeva. U standardima su navedeni uslovi ispitivanja, kao i odgovarajući sastavi rastvora za ispitivanje, što omogućava predviđanje ponašanja zavarenih spojeva različitih konstrukcionih materijala u uslovima eksploatacije (morski uslovi, industrijska i seoska atmosfera i uslovi u hemijskoj procesnoj industriji).

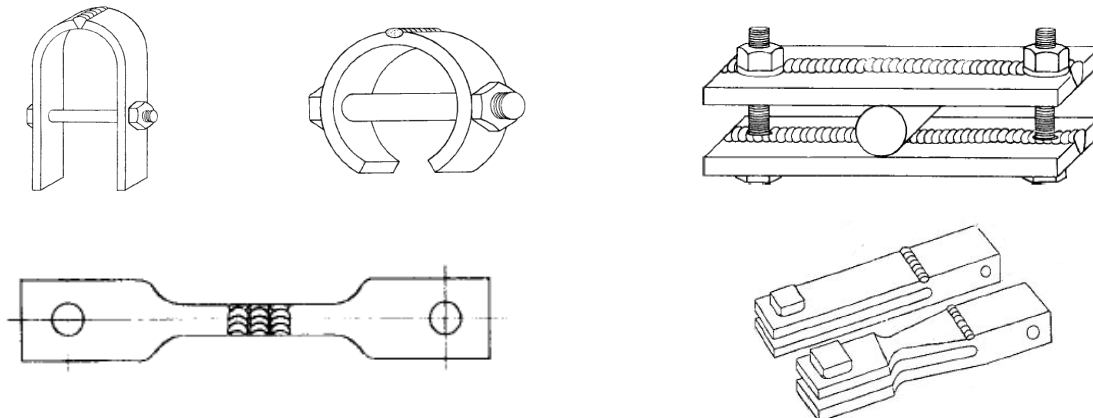
Metoda male brzine deformacije (SSRT)

Ispitivanja naponske korozije metodom male brzine deformacije (zatezanja) izvode se pri sporom povećanju opterećenja ili deformacije, na glatkim uzorcima, ili na uzorcima sa zarezom ili prslinom. Obično, mašine za ispitivanje na zatezanje (kidalice) "vuku" uzorak, koji je u kontaktu sa korozionom sredinom, na suprotne strane malom brzinom. Metodu je razradio Parkins [10, 14-16] pod nazivom: Metoda male brzine deformacije (Slow Strain Rate Test, SSRT).

Metoda je kvalitativna i primenjuje se za određivanje relativne sklonosti različitih metala i legura i njihovih zavarenih spojeva prema naponskoj koroziji. Njena prednost je velika brzina dobijanja rezultata. U poređenju sa ostalim metodama, vreme ispitivanja ovom metodom po jednom uzorku iznosi od nekoliko časova do nekoliko dana, dok se kod ostalih metoda vreme ispitivanja meri mesecima. Metoda je pogodna za ispitivanje uticaja različitih metalurških



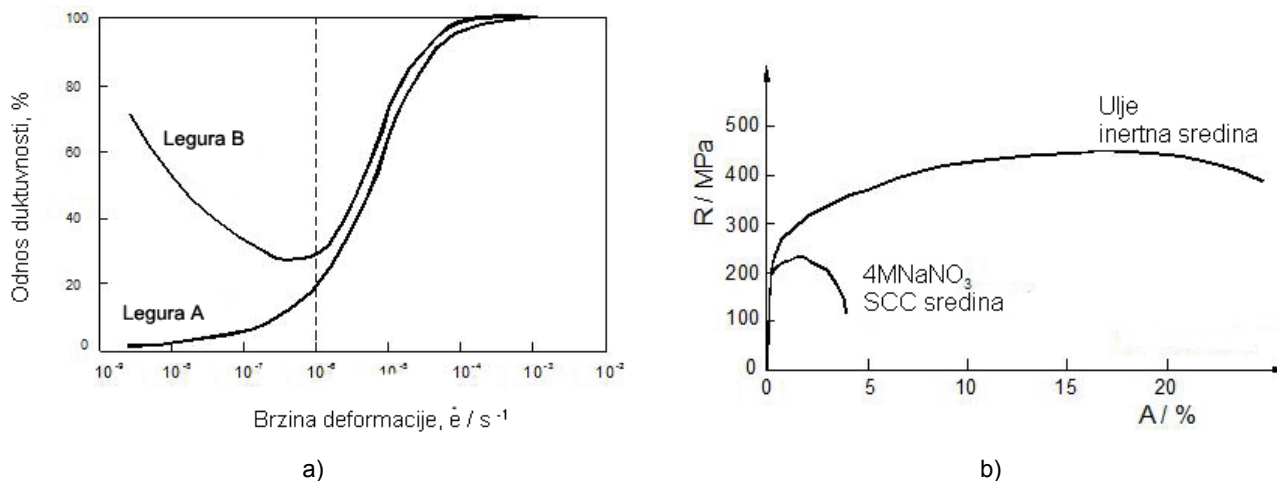
faktora, kao što su struktura, termička obrada, zaostala naprezanja nastala tokom zavarivanja itd., ili faktora korozivne sredine (npr. sastav i koncentracija rastvora za ispitivanje, pH, temperatura itd.). Često se koristi za relativno rangiranje sličnih legura, s obzirom na njihovu otpornost prema naponskoj koroziji. Treba imati u vidu da i kod ove metode, kao kod metode ispitivanja statički opterećenih glatkih uzoraka, procesi obrazovanja i rasta prsline i završnog nestabilnog brzog loma nisu razdvojeni, tako da se njenom primenom dobijaju samo podaci o ukupnoj sklonosti legure prema naponskoj koroziji.



Slika 2: Različiti oblici uzoraka za ispitivanje naponske korozije zavarenih spojeva (ASTM G58 i ISO 7539-8)

Na slici 3 prikazan je shematski izgled tipičnih rezultata koji se dobijaju primenom ove metode. Količnik izduženja do loma u korozivnoj sredini i izduženja u inertoj sredini se daje u odnosu na brzinu zatezanja (slika 3a). Vidi se da postoji određen kritični interval brzina zatezanja u kome dolazi do naponske korozije (minimum na krivoj). Pri većim brzinama zatezanja dolazi do mehaničkog loma, pre nego što dođe do odvijanja korozivnih reakcija. Prema tome, mora se primeniti relativno mala brzina zatezanja uzorka.

Međutim, pri isuviše malim brzinama zatezanja ne dolazi do naponske korozije, zato što je brzina pasiviranja sveže, korozivno aktivne površine na vrhu prsline (brzina repasivacije) veća od brzine formiranja nove sveže površine. Takođe, na slici 3a se uočavaju dva oblika krive zavisnosti izduženja do loma od brzine deformacije (legura A i legura B). Ovakve zavisnosti se dobijaju ako se naponska korozija odvija po mehanizmu lokalne vodonične krtosti (legura A), odnosno po mehanizmu anodnog rastvaranja vrha prsline (legura B).



Slika 3: Shematski prikaz tipičnih rezultata koji se dobijaju ispitivanjem SSRT metodom a) zavisnost duktilnosti od brzine zatezanja i b) krive naprezanje-deformacija u inertoj i u korozivnoj sredini za niskouglenični čelik [10]

Za izvođenje serijskih ispitivanja, eksperimentalno se odabere jedna vrednost brzine zatezanja iz kritičnog intervala brzina zatezanja i sva naredna ispitivanja se izvode pri toj odabranoj brzini zatezanja (slika 3b).

Poslednjih godina postoje pokušaji da se dobiju kvantitativni pokazatelji otpornosti metala prema naponskoj koroziji, kao što su srednja brzina rasta prsline, kritično naprezanje itd. Na primer, srednja brzina rasta prsline se može odrediti ako se dubina najveće prsline, izmerena na površini preloma uzorka, podeli ukupnim vremenom ispitivanja. Pretpostavlja se da se prsline inicira odmah na početku eksperimenta, što nije uvek tačno. Postupak određivanja kritičnog naprezanja opisan je u standardu ISO 7539-7.



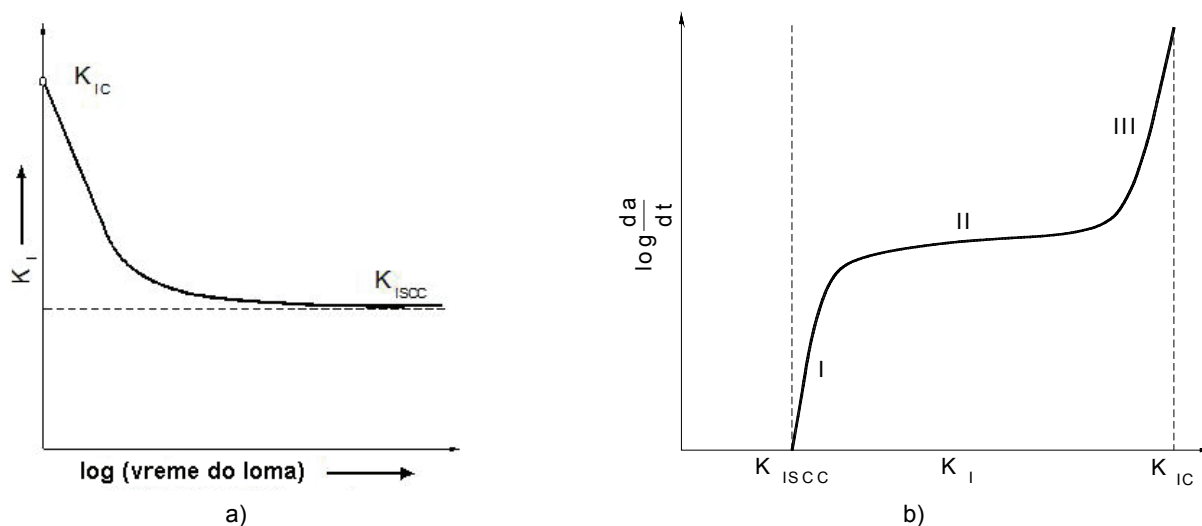
Određivanje sklonosti metala i legura i njihovih zavarenih spojeva prema naponskoj koroziji primenom SSRT metode vrši se u skladu sa standardima ASTM G 129 ili ISO 7539-7.

Metode mehanike loma

Za ispitivanje naponske korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva često se primenjuju metode mehanike loma. Pri ispitivanju zavarenih spojeva potrebno je prethodno odrediti mesto u oblasti zavarenog spoja gde će se naneti zarez i zamorna prslina.

Stanje naprezanja na vrhu prsline mehanika loma definiše pomoću koeficijenta intenziteta napona K_I [10,14,16-18]. Da bi došlo do rasta naponsko-korozione prsline, koeficijent intenziteta napona K_I mora da bude veći od neke kritične vrednosti K_{ISCC} , koja se naziva kritični koeficijent intenziteta napona za rast naponsko-korozione prsline (slika 4a). Poznavanje vrednosti koeficijenta K_{ISCC} omogućava da se proceni da li će postojeća prslina u datim uslovima (primenjenog naprezanja i korozione sredine) mirovati ili početi da raste, ali ne omogućava da se predvidi kako će se ponašati prslina koja je već počela da raste, odnosno da se proceni brzina njenog rasta. Na osnovu vrednosti brzine rasta prsline može se proračunati vreme do loma, odnosno radni vek konstrukcije u kojoj je detektovana naponsko-koroziona prslina. Izračunavanje vremena do loma je moguće ako je poznata brzina rasta prsline $v=da/dt$ u funkciji od koeficijenta intenziteta napona K_I , u intervalu intenziteta napona od K_{ISCC} do K_{IC} .

Na slici 4b data je zavisnost logaritma brzine rasta prsline v u funkciji od koeficijenta intenziteta napona K_I , u intervalu od K_{ISCC} do K_{IC} . Kriva se može podeliti na tri stadijuma. U okviru prvog stadijuma brzina rasta prsline izrazito zavisi od K_I . Kada je $K_I < K_{ISCC}$, ne dolazi do rasta naponsko-korozione prsline ili je brzina rasta toliko mala da se može zanemariti. Vrednost K_{ISCC} odgovara nivou naprezanja za sinergetsku interakciju legure sa korozionom sredinom. Pri niskim vrednostima K_I , ali većim od K_{ISCC} , brzina rasta prsline izrazito zavisi od K_I i dužina prsline se brzo povećava sa povećanjem K_I (stadijum I). Pri srednjim vrednostima K_I brzina rasta prsline se približava nekoj konstantnoj vrednosti koja je nezavisna od K_I (stadijum II). U okviru drugog stadijuma brzina rasta prsline praktično ne zavisi od K_I , ali je zato uticaj korozione sredine veoma izražen i ogleda se u pomeranju nivoa drugog stadijuma prema većim ili manjim vrednostima. Brzina rasta prsline na platou v_{pl} je karakteristična za određenu kombinaciju legura/koroziona sredina. Ona je rezultat postojanja nekog sporog procesa (transport neke od komponenata sredine, brzina elektrohemijske ili hemijske reakcije na vrhu prsline, brzina difuzije vodonika kroz metal itd.). U okviru trećeg stadijuma brzina rasta se naglo povećava sa povećanjem K_I , dok se ne dostigne kritična vrednost koeficijenta intenziteta napona za mehanički lom u inertnoj sredini (žilavost loma K_{IC}). U ovom stadijumu koroziona sredina igra malu ulogu, za razliku od mehaničke komponente koja dominira.



Slika 4: Prikaz rezultata ispitivanja naponske korozije metodama mehanike loma:
a) pri konstantnom opterećenju, b) pri konstantnom otvaranju prsline [10]

Osnovna prednost ispitivanja po metodologiji mehanike loma je u tome što se direktno dobijaju kvantitativni podaci o sklonosti legure prema naponskoj koroziji, kao što je kritični koeficijent intenziteta napona za rast naponsko-korozione prsline ili brzina njenog rasta. Ti rezultati se mogu direktno koristiti za različite inženjerske proračune, kao što je npr. proračun radnog veka neke konstrukcije. Osnovni zahtev za primenu mehanike loma je da debljina uzorka za ispitivanje bude veća od neke minimalne vrednosti, koja se proračunava na osnovu poznate žilavosti loma na vazduhu K_{IC} i granice tečenja $R_{0,2}$ te legure.

Ispitivanja se obično izvode pri konstantnom naprezanju (slika 4a) ili pri konstantnom otvaranju prsline (COD), pri čemu se meri brzina rasta prsline (slika 4b). U poslednjem slučaju formira se dijagram zavisnosti brzine rasta prsline



log da/dt od koeficijenta intenziteta napona K_I . U cilju merenja brzine rasta prsline moraju se primeniti uzorci veće dužine. Najpogodniji za te potrebe su DCB i T-WOL uzorci. DCB uzorci se obično naprežu pomoću zavrtneva (COD metodologija) i izlažu dejstvu korozione sredine. Merenje dužine prsline se vrši sve dok brzina rasta prsline ne postane dovoljno niska. Posle ispitivanja izvrši se dodatni mehanički lom uzoraka. Na površini loma meri se dužina mehaničke prsline (obrazovane pri dejstvu naprezanja izazvanog pomoću zavrtneva), kao i ukupna dužina prsline (mehanička i naponsko-koroziona prsline). Na osnovu dužine mehaničke prsline a_C i odgovarajuće COD vrednosti određuje se vrednost žilavosti loma K_{IC} za ispitivani materijal, na osnovu jednačine date u standardu ASTM G 168. Izračunata vrednost žilavosti loma predstavlja početnu vrednost K_I za dalje ispitivanje naponske korozije. Na analogan način određuje se vrednost koeficijenta intenziteta napona pri zaustavljanju prsline K_{ISCC} . Podaci o dužini prsline se prikazuju u zavisnosti od vremena ispitivanja u korozionoj sredini i koriste se za proračun brzine rasta prsline v , kao i za proračun odgovarajućih vrednosti K_I (kao na slici 4b).

Za ispitivanje naponske korozije po metodologiji mehanike loma mogu se primeniti standardi ASTM G 168 ili ISO 7539-6 (za DCB uzorke), ili ASTM E 1681 ili ISO 7539 7539-6 (za T-WOL uzorke, kompaktne i druge uzorke). U standardu ISO 7539-9 i u [19] je opisana ubrzana metoda određivanja kritičnog koeficijenta intenziteta napona (K_{ISCC}) koja se sastoji u postepenom povećanju opterećenja ili otvaranja prsline do početka njenog rasta.

Standardi za ispitivanje naponske korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva

U narednom tekstu su navedeni ISO i ASTM standardi koji se često koriste za ispitivanje naponske korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva.

ISO Standardi:

- ISO 7539-1 Stress corrosion testing - Part 1: General guidance on testing procedures
- ISO 7539-2 Stress corrosion testing - Part 2: Preparation and use of bent-beam specimen
- ISO 7539-3 Stress corrosion testing - Part 3: Preparation and use of U-bend specimens
- ISO 7539-4 Stress corrosion testing - Part 4: Preparation and use of uniaxially loaded tension specimens
- ISO 7539-5 Stress corrosion testing - Part 5: Preparation and use of C-ring specimens
- ISO 7539-6 Stress corrosion testing - Part 6: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement
- ISO 7539-7 Stress corrosion testing - Part 7: Method for slow strain rate testing
- ISO 7539-8 Stress corrosion testing - Part 8: Preparation and use of specimens to evaluate weldments
- ISO 7539-9 Stress corrosion testing - Part 9: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under rising load or rising displacement
- ISO 15324 Evaluation of stress corrosion cracking by the drop evaporation test
- ISO 9591 Corrosion of aluminum alloys -- Determination of resistance to stress corrosion cracking
- ISO 6957 Copper alloys -- Ammonia test for stress corrosion resistance

ASTM Standardi:

- ASTM G 30 Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens
- ASTM G 35 Determining the Susceptibility of Stainless Steels and Related Nickel-Chromium-Iron Alloys to Stress-Corrosion Cracking in Polythionic Acids
- ASTM G 36 Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution
- ASTM G 37 Use of Mattsson's Solution of pH 7.2 to Evaluate the Stress-Corrosion Cracking Susceptibility of Copper-Zinc Alloys
- ASTM G 38 Making and Using C-Ring Stress-Corrosion Test Specimens
- ASTM G 39 Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens
- ASTM G 41 Determining Cracking Susceptibility of Metals Exposed Under Stress to a Hot Salt Environment



- ASTM G 47 Determining Susceptibility to Stress-Corrosion Cracking of 2XXX and 7XXX Aluminum Alloy Products
- ASTM G 49 Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens
- ASTM G 58 Preparation of Stress-Corrosion Test Specimens for Weldments
- ASTM G 64 Classification of Resistance to Stress-Corrosion Cracking of Heat-Treatable Aluminum Alloys
- ASTM G 103 Evaluating Stress-Corrosion Cracking Resistance of Low Copper 7XXX Series Al-Zn-Mg-Cu Alloys in Boiling 6% Sodium Chloride Solution
- ASTM G 123 Evaluating Stress-Corrosion Cracking of Stainless Alloys with Different Nickel Content in Boiling Acidified Sodium Chloride Solution
- ASTM G 129 Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking
- ASTM G 139 Determining Stress-Corrosion Cracking Resistance of Heat-Treatable Aluminum Alloy Products Using Breaking Load Method
- ASTM G 168 Making and Using Pre-cracked Double Beam Stress Corrosion Specimens
- ASTM G 186 Determining Whether Gas-Leak-Detector Fluid Solutions Can Cause Stress Corrosion Cracking of Brass Alloys
- ASTM D 807 Assessing the Tendency of Industrial Boiler Waters to Cause Embrittlement (USBM Embrittlement Detector Method)
- ASTM E 1681 Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials

Postupci sprečavanja naponske korozije zavarenih spojeva

Postoji više postupaka za sprečavanje pojave naponske korozije (SCC) zavarenih spojeva, od kojih su najvažniji sledeći [20]:

Šav zavarenog spoja treba da bude niskog profila, sa ravnim ivicama, kako bi se onemogućilo zadržavanje troske na površini. Nepravilno projektovanje zavarenog spoja može da izazove pojavu zazora u kojima dolazi do zadržavanja elektrolita, odnosno do obrazovanja pitova i pojave korozije u zazorima kao i naponske korozije. Pravilnim izborom topivih elektroda, postupka zavarivanja i pažljivim uklanjanjem troske posle zavarivanja može se izbeći obrazovanje zazora, odnosno pojava nekog od lokalnih vidova korozije. Pažljivim izborom osnovnog metala i topive elektrode mogu se smanjiti makro i mikro razlike u sastavu zavarenog spoja, odnosno smanjiti opasnost od pojave galvanske i naponske korozije. Pažljivim izborom obložene elektrode, njenim sušenjem, kao i eliminisanjem nečistoća i vlage sa površina koje se zavaruju, može se znatno smanjiti rizik od pojave vodonika odnosno vodonične krtosti (hladne prsline).

Kada razlika u sastavu zavarenog spoja može da prouzrokuje naponsku i druge vidove lokalne korozije, potrebno je primeniti zaštitne prevlake. Zaštitna prevlaka treba da prekriva metal šava i osnovni metal. Za nanošenje zaštitnih prevlaka neophodna je posebna priprema površine. Postupkom pasivacije može da se poveća otpornost prema koroziji i naponskoj koroziji zavarenih komponenata od nerđajućih čelika.

Pravilno odabran postupak čišćenja može da smanji pojavu defekata koji su često mesta korozionog napada u agresivnim sredinama. Međutim, postupak čišćenja može da bude i uzrok pojave korozije. Na primer, mehanički tretirana površina (peskarenjem ili brušenjem) ostavlja nečistoće na površini zavarenog spoja, koje mogu da utiču na pojavu naponske korozije. Maksimalna otpornost prema koroziji se postiže ako je površina metala šava glatka, ravnomerno oksidisana, bez stranih čestica i drugih nepravilnosti. Površinska hrapavost šava se obično smanjuje naknadnim brušenjem. Za glatke šavove dovoljna je primena metalnih četki. Međutim, u slučaju nerđajućih čelika četkanje može da naruši postojeći pasivni film i tako omogući intenzivniji korozioni i naponsko-korozioni napad.

Termička obrada posle zavarivanja često je efikasan način za povećanje otpornosti prema koroziji. Termičkom obradom se postiže smanjenje gradijenta unutrašnjih naprezanja, koji utiču na rast naponsko-korozione prsline. Naknadna termička obrada (žarenje) olakšava uklanjanje vodonika iz zavarenog spoja i smanjuje opasnost od pojave vodonične krtosti. Primena odgovarajućeg predgrevanja i međuprolaznog zagrevanja može da spreči pojavu vodonične krtosti kod ugljeničnih i niskolegiranih čelika.

Detaljniji prikaz nekih postupaka koji se mogu primeniti u cilju sprečavanja korozije zavarenih spojeva dat je u literaturi [21-23].



ZAKLJUČCI

U radu su opisane metode ispitivanja naponske korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. Za ispitivanje otpornosti zavarenih spojeva prema naponskoj koroziji mogu se primenjivati iste metode kao i za ispitivanje naponske korozije uopšte, uz određene modifikacije. Elektrohemijske i druge metode ispitivanja naponske korozije, koje imaju široku primenu u raznim oblastima nauke i tehnike, nisu obuhvaćene ovim radom. Opisani su principi direktnih metoda ispitivanja, postupci njihovog izvođenja, oblasti primene kao i prednosti i nedostaci tih metoda. Šematski su prikazani tipični rezultati koji se dobijaju njihovom primenom. Posebna pažnja je posvećena metodama ispitivanja naponske korozije zavarenih spojeva.

Klasične metode ispitivanja naponske korozije statički opterećenih glatkih uzoraka (C-prstenovi, uzorci na savijanje, itd.) dale su niz korisnih podataka o otpornosti prema naponskoj koroziji različitih metala i legura i njihovih zavarenih spojeva kao što su vrednosti kritičnog naprezanja. Te metode još uvek imaju široku primenu.

Metoda male brzine deformacije (SSRT) je nova metoda ispitivanja naponske korozije i odlikuje se velikom brzinom dobijanja rezultata. Metoda je kvalitativna, pa se njenom primenom dobijaju podaci o relativnoj sklonosti metala i legura prema naponskoj koroziji. Kod ove metode, kao i kod metoda ispitivanja glatkih uzoraka, procesi obrazovanja i rasta prsline i nestabilnog brzog loma nisu razdvojeni. Poslednjih godina postoje pokušaji da se dobiju kvantitativni pokazatelji otpornosti metala prema naponskoj koroziji, kao što je srednja brzina rasta prsline i kritično naprezanje itd.

Prednost ispitivanja metodama mehanike loma je u tome što se direktno dobijaju kvantitativni podaci o sklonosti legure prema naponskoj koroziji, kao što je kritični koeficijent intenziteta napona za rast naponsko-korozione prsline (K_{ISCC}), ili brzina njenog rasta. Ti rezultati se mogu direktno koristiti za različite inženjerske proračune, kao što je npr. proračun radnog veka neke konstrukcije. Ispitivanja se obično izvode pri konstantnom naprezanju ili pri konstantnom otvaranju prsline, pri čemu se meri brzina rasta prsline. Nedavno je razrađena ubrzana metoda određivanja K_{ISCC} koja se sastoji u postepenom povećanju opterećenja ili otvaranja prsline do početka njenog rasta.

Navedeni su odgovarajući standardi (ISO i ASTM) za svaku metodu pojedinačno (ukoliko postoji standard), kao i preporuke za sprečavanje naponske korozije zavarenog spoja.

Zahvalnica

Rad je finansiran od strane Ministarstva za obrazovanje i nauku Republike Srbije, projekti TR No. 34028 i TR No. 35021.

LITERATURA

- [1] R.H. Jones, Stress-Corrosion Cracking, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 346–366.
- [2] H. Kaesche, Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [3] J.R. Davis, Corrosion of Weldments, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2006., pp. 43-75.
- [4] B. Bobić i B. Jegdić, Korozija zavarenih spojeva, Deo I: Vidovi korozije zavarenih spojeva, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, No. 1, Beograd, 2005, 33-39.
- [5] D. Dražić and B. Jegdić, Corrosion and Stress Corrosion Cracking, IFMASS 8, From Fracture Mechanics to Structural Integrity Assessment, Ed. S. Sedmak and Z. Radakovic, Belgrade, 2004., 255-276.
- [6] R.G. Kelly, J.R. Scully, D.W.Sh. Rudolph, G. Buchheit, Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, New York, Basel, 2002.
- [7] M.E. Orazem, B. Tribollet, Electrochemical Impedance Spectroscopy, John Wiley & Sons, 2008.
- [8] Analytical methods in corrosion science and technology, Edited by Philippe Marcus and Florian Mansfeld, Taylor & Francis Group, 2006.
- [9] P.R. Roberge, Corrosion Inspection and Monitoring, Canada, 2007.
- [10] R.H. Jones, Stress-Corrosion Cracking, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 346–366.
- [11] R. N. Parkins, Environmentally Assisted Cracking Test Methods, Comprehensive Corrosion, Shreir's Corrosion, Fourth Edition, 2010, pp 1527-1546.
- [12] B. Phull, Evaluating Stress-Corrosion Cracking, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 575–616.
- [13] D.O. Sprowls, Evaluation of Stress-Corrosion Cracking, Chapter 17, in Stress-Corrosion Cracking, Ed. R.H. Jones, ASM International, Ohio, 1993, 363-415.
- [14] B. Bobić i B. Jegdić, Korozija zavarenih spojeva, Deo V: Metode ispitivanja i postupci sprečavanja korozije, Zavarivanje i zavarene konstrukcije,



No. 2, Beograd, 2006, 77-85.

- [15] G.M. Ugianski and J.H. Payer, Ed., Stress Corrosion Cracking - The Slow Strain Rate Technique, STP 665, ASTM, Philadelphia, 1979.
- [16] W. Dietzel, P. B. Srinivasan, A. Atrens, Testing and evaluation methods for stress corrosion cracking (SCC) in metals, Stress corrosion cracking, Theory and practice, Edited by: V.S. Raja and T. Shoji, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, 2011, pp. 133-166.
- [17] S.W. Dean, E.N. Pugh and G.M. Ugianski, Ed. Environment Sensitive Fracture: Evaluation and Comparison of Test Methods, STP 821, ASTM, Philadelphia, 1984.
- [18] M.G. Fontana and R.W. Staehle, Ed., Advances in Corrosion Science and Technology, vol.2, vol.3 and vol.7, Plenum Press, New York, 1972, 1973 and 1980 (Russian translation).
- [19] W. Dietzel, Rising Displacement Stress Corrosion Cracking Testing, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 42A, February (2011) 365-372.
- [20] A. Wahid, D.L. Olson and D.K. Matlock, Corrosion of Weldments, in ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, Ohio, 1997., 1065-1069.
- [21] A. Pardowska, J.W.H. Price, T.R. Finlayson, Poređenje tehnika merenja zaostalih napona primenljivim na zavarenim čeličnim delovima, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 54, br.3, str. 119-127, 2009.
- [22] V. Ilić, Skladištenje, upijanje vlage i ponovno sušenje dodatnih materijala za zavarivanje, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 56, br. 3, str. 115-118, 2011.
- [23] R. Čirić, Uticaj procesa termičke obrade i tople plastične deformacije na odabrane osobine zavarenih spojeva raznorodnih metala, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 55, br. 4, str. 131-136, 2010.

PODSEĆAMO VAS ...

DRUŠTVO ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI - DUZS,

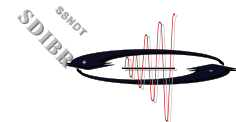


member of



i

SRPSKO DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE BEZ RAZARANJA – SDIBR,



SRPSKO DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE
BEZ RAZARANJA
SERBIAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING

member of



ORGANIZUJU:

Savetovanje sa međunarodnim učešćem

„ZAVARIVANJE 2012“ i „IBR 2012“

Datum održavanja: 09-12. oktobar 2012.

Mesto: DIVČIBARE, hotel „Divčibare“