

BRANKO B. PEJOVIĆ  
MILORAD V. TOMIĆ  
VLADAN M. MIČIĆ  
MIOMIR G. PAVLOVIĆ

Originalni naučni rad  
UDC:620.193.194.197:621.791.4=861

## O nekim načinima za povećanje otpornosti zavarenih konstrukcija sa aspekta korozivnih razaranja

*Polazeći od činjenice da je problem korozivnih procesa kod zavarenih konstrukcija u praksi veoma izražen, u radu je na osnovu više literaturnih izvora izvršena: sistematizacija najčešćih oblika elektrohemijske korozije, analiza korozivnih svojstava i čvrstoće zavarenih spojeva u korozivnim uslovima. Na kraju, dat je prikaz karakterističnih metoda za povećanje otpornosti zavarenih konstrukcija sa stanovišta korozivnih razaranja, koje se u opštem slučaju svode na opšte i specijalne. Na bazi ovoga ukazano je na mogućnost: povećanja čvrstoće, radne sposobnosti i korozivne stabilnosti zavarenih spojeva pri njihovoj eksploataciji.*

**Cljučne reči:** čvrstoća zavarenog spoja, korozivno razaranje, elektrohemijski potencijal, strukturalna nehomogenost, korozivna sredina i mehanizmi korozije, korozivna otpornost i stabilnost, vek konstrukcije

### 1. UVOD

Usled zavarivanja dolazi do pregrevanja osnovnog metala u neposrednoj blizini vara, zbog čega dolazi do hemijskih i strukturalnih promena u kristalnoj rešetki u zoni pregrevanja. Takođe, i sam var se najčešće razlikuje po hemijskom i strukturalnom sastavu od osnovnog materijala, te usled toga imamo više zona sa različitim elektrodnim potencijalima (osnovni metal, zone pregrevanja, mesto vara-šav, površina sa i bez zaštitne opne, itd.). Razlike elektrodnih potencijala na mikro i makro nivou su uzrok elektrohemijske korozije, usled čega dolazi do anodnog rastvaranja (gubitka mase) metala, čime se ugrožava pouzdanost rada zavarene konstrukcije i njen radni vek [1-4]. Jačina struje, tj. gustina struje korozije (1) je mera brzine elektrohemijske korozije [4,5]:

$$j = K_m^- \cdot \frac{A}{n} \cdot 26.8 \cdot 10^{-4} \text{ (A/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

gde je:

$K_m^- = \frac{\Delta m}{S_0 \tau}$  - negativni maseni pokazatelj korozije (g/m<sup>2</sup>h)

A – atomska masa metala (g/mol); n – valantnost jona metala; Δm – smanjenje mase uzorka (g);

Adresa autora: Tehnološki fakultet Zvornik, Republika Srpska

S<sub>0</sub> – površina uzorka (m<sup>2</sup>); τ - vreme korozije (h)

$j = \frac{I}{S_0}$  - gustina korozivne struje, tj. strujni pokazatelj korozije (A/cm<sup>2</sup>)

Jačina struje (2) zavisi od razlike elektrodnih potencijala metala i ukupnog otpora u sistemu [4, 5]:

$$I = \frac{E_K - E_A}{R + P_K + P_A} \text{ (A)} \quad (2)$$

gde su:

E<sub>K</sub> i E<sub>A</sub> – efektivni potencijali katodnog i anodnog sprega (V)

R- električni otpor korozivnog sprega (Ω)

P<sub>K</sub> i P<sub>A</sub> – katodna i anodna polarizabilnost (Ω)

Zavareni spojevi u praksi izloženi su često složenim uslovima eksploatacije u kojima temperature mogu biti ekstremno niske, ekstremno visoke, ili dolazi do naglih promena temperature, odnosno do promena same korozivne sredine kojoj je konstrukcija izložena, što je posebno izraženo u procesnoj industriji. Podložnost koroziji kod zavarenih konstrukcija je veća nego kod livenih i kovanih [5].

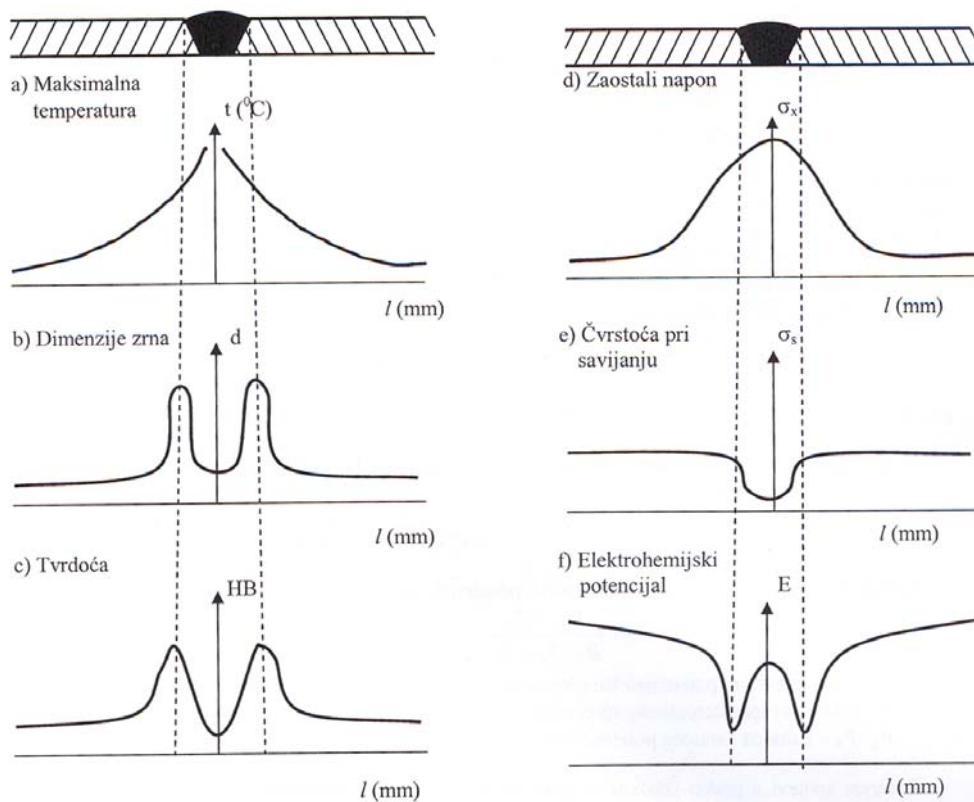
Mehanizam korozivnih razaranja zavarenih spojeva principijelno se ne razlikuje od lomova osnovnog materijala, iako postoje i određene osobenosti. Inače, zavareni spoj predstavlja nahomogeni termodinamički nestabilan sistem, čija je nehomogenost

genost izazvana različitim hemijskim sastavom, strukturom pojedinih zrna, geometrijom spoja, zaostalim naponima i plastičnim deformacijama u vezi sa neravnomernim zagrevanjem i hlađenjem pri zavarivanju. Stoga je za zavarene spojeve karakteristična povećana makro i mikroelektrohemijska nehomogenost u poređenju sa osnovnim materijalom [6-14]. Nehomogenost zavarenog spoja jednog konstrukcionog čelika zavarenog elektrolučno, može se principijelno prikazati preko dijagrama na slici 1., na bazi više literaturnih informacija [15-20].

Fizički defekti koji nastaju prilikom zavarivanja su opasni sami po sebi, ali oni mogu da utiču i na pojavu i odvijanje procesa korozije. Poželjno je

da zavareni spoj ima glatku i ravnu površinu, bez zazora, tako da se korozioni spregovi mogu lako ukloniti sa površine zavarenog spoja [1]. Takođe, zaštitne prevlake na metalima koji se spajaju tokom zavarivanja mogu da sagore, tako da metal šava i osnovni metal u njegovoj blizini ostaju nezaštićeni [2].

Ukupni korozioni efekat u svakoj zoni zavarenog spoja određuje se korozionim gubicima usled elektrohemijske korozije, tj. korozijom izazvanom efektima mikrogalvanskih spregova i rastvaranjem konstrukcije, čime se dovodi u pitanje sigurnost i pouzdanost konstrukcije.



Slika 1 - Principijelni dijagrami nehomogenosti zavarenog spoja konstrukcionog čelika

Makrogalvanski korozioni elementi šav – osnovni materijal, usled različitih elektrohemijskih potencijala mogu se podeliti u tri grupe [4, 5, 21, 22]:

- Međusobno su jednaki elektrodni potencijali šava i osnovnog materijala. Tada nema mikrogalvanskog sprega i korozije različitih zona određuje se samorazaranjem ( $E_{\text{š}} = E_0$ )
- Kada je potencijal materijala šava elektronegativniji u odnosu na osnovni metal ( $E_{\text{š}} < E_0$ ), tada će šav korodirati intezivnije kao rezultat anodnog rastvaranja.

- Kada je potencijal materijala šava elektro pozitivniji u odnosu na osnovni metal ( $E_{\text{š}} > E_0$ ), tada dolazi do korozije osnovnog materijala.

Elektrodni potencijali zavarenih spojeva zavise kako od materijala koji se zavaruje tako i od materijala (elektrode za zavarivanje), postupka zavarivanja i korozione sredine [15,17,18].

Cilj ovog rada je da se na osnovu dosadašnjih iskustava i literaturnih podataka analiziraju, razrade i pokažu neki od načina za povećanje otpornosti

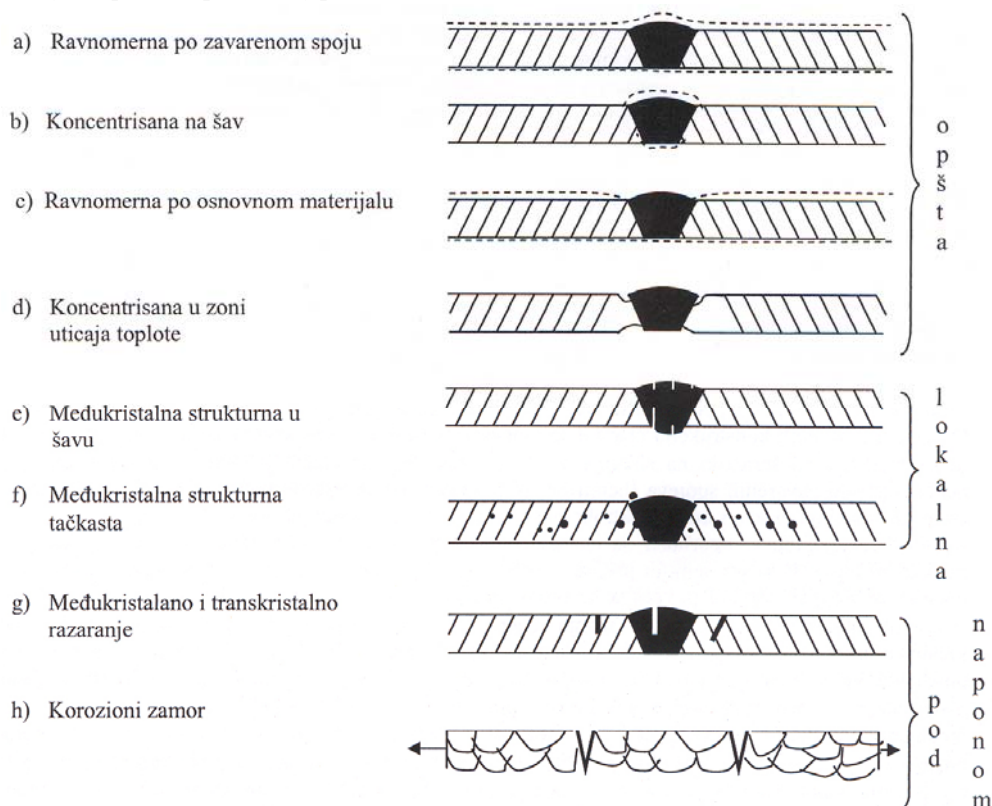
zavarenih konstrukcija sa aspekta korozionih razaranja, kao i da se ukaže na probleme koje izaziva korozija zavarenih spojeva u praksi, s obzirom da je ovo kompleksno područje nedovoljno istraženo i ne posvećuje mu se potrebna pažnja.

## 2. OSNOVNE VRSTE KOROZIJE ZAVARENIH SPOJEVA

Uopšte korozija se deli na opštu i mestimičnu. Opšta korozija se prostire po čitavoj površini meta-

la i može da bude ravnomerna i neravnomerna. Mestimična korozija nastaje na određenim mestima površine i pri beznačajnim heterogenostima površine. Neki od karakterističnih oblika korozionog razaranja zavarenih konstrukcija, prikazani su šematski na slici 2 [7, 16, 17, 23].

Za svaki od ovih oblika, postoje odgovarajuće metode za procenu otpornosti prema koroziji kao i određeni pokazatelji korozije [9,15,18].



Slika 2 - Oblici korozionih razaranja zavarenih konstrukcija

Ako se korozija razvija ravnomerno, brzina razaranja se može uzeti u obzir i unapred odrediti vek konstrukcije. Taj oblik korozionog razaranja karakterističan je za većinu zavarenih konstrukcija u praksi od konstrukcionog čelika pri običnim uslovima eksploatacije, i odnosi se na atmosfersku koroziju, koja najviše zavisi od meteoroloških uslova, [6, 7, 20, 22].

Treba naglasiti da je veoma opasno koncentrisanje opšte korozije po šavu ili u zoni uticaja toplote, što može dovesti do vrlo brzog razaranja konstrukcije pri relativno malim gubicima mase.

Posebni oblici lokalne korozije karakteristični su za zavarene spojeve visokolegiranih čelika i legura obojenih metala. Tačkasta korozija je tipična

za elektrohemijski pasivne materijale (hrom, aluminijum, hrom – nikl čelike).

Osim navedenih oblika korozije, zavareni spojevi mogu biti izloženi i kontaktnoj koroziji u slučaju zavarivanja raznorodnih metala i legura, koroziji u zarezima pri postojanju grešaka u obliku šava, naročito neprovarenih mesta, [8,15,17].

Korozija zavarenih spojeva usled dejstva napona spada među najopasnije u praksi. Tokom očvršćavanja zavarenog spoja pojavljuju se zaostala naprezanja visokog nivoa, koja su često uzrok pojavi naponske korozije i korozionog zamora. Usled napona povećava se brzina opšte korozije metala u kiselim sredinama, a veoma malo u neutralnim. Naponi malo utiču na opštu ali pojačavaju lokalnu

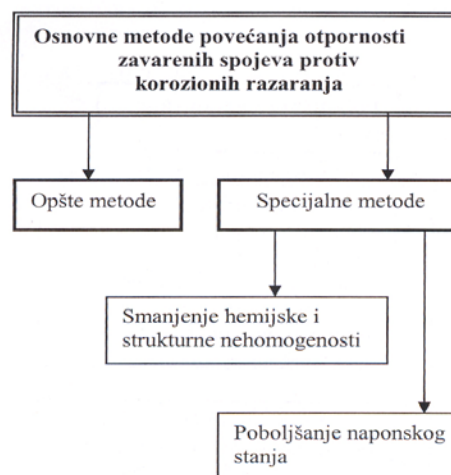
koroziju [18,19,21, 24]. Pri ovome imamo uzajamno dejstvo opterećenja i koroziono aktivirane sredine, što izaziva nastajanje i širenje prslina. Kao što je poznato, zaostala naprezanja se obično efikasno smanjuju termičkom obradom.

Smanjenje otpornosti na koroziona razaranja kad postoje naponi nastaje uglavnom usled nehomogenosti i termodinamičke nestabilnosti zavarenog spoja. Isto tako na koroziju utiče i složeno naponsko stanje usled plastične deformacije, zaostalih napona i greške u šavu. Koroziona sredina pri prethodnom smanjuje čvrstoću materijala, što često izaziva stvaranje prslina i ako na površini nema većih oštećenja. Pri zasićenju produktima korozije izražena je pojava krtosti zavarene konstrukcije [b].

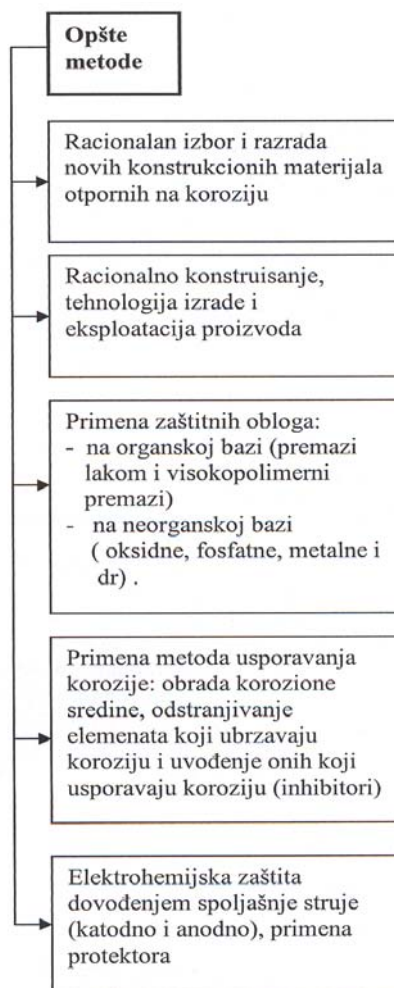
### 3. RADNA SPOSOBNOST ZAVARENOG SPOJA PRI KOROZIJI I METODE ZA NJENO POVEĆANJE

Radnu sposobnost zavarene konstrukcije pri koroziji po pravilu, određuje radna sposobnost zavarenog spoja. Na nju utiču sledeći osnovni faktori: svojstva i kvalitet osnovnog i dodatnog materijala, metod i tehnologija zavarivanja, geometrijski oblici spojeva, termomehantički uticaji i uslovi zavarivanja, i pravila konstruisanja zavarenog spoja, uslovi eksploatacije (koroziona sredina, temperatura, opterećenje). Slučajevi lomova u praksi, ponekad su vezani za ponekad slabo procenjenju otpornost prema koroziji.

Otpornost zavarenih konstrukcija protiv korozionog razaranja moguće je povećati raznim metodama što je sistematizovano šematski na slikama 3., 3.1., 3.2.a i b. [6,8,9,21,22]. Glavni načini su smanjenje nehomogenosti zavarenih spojeva (hemijske, strukturalne, geometrijske, mehaničke i naponsko stanje), odnosno smanjuje makro i mikroelektrohemijske heterogenosti materijala šava i čitavog zavarenog spoja i približavanja njihove otpornosti na koroziju otpornosti osnovnog materijala. U tom cilju koriste se različiti načini koji se primenjuju pre, za vreme ili posle zavarivanja. Primena metoda zavarivanja sa manjim unošenjem toplote povećava se otpornost spoja na koroziju. Značajni su postupci dobijanja zavarenih spojeva u tvrdj fazi bez otapanja materijala, [16, 22]. Poželjno je da hemijski sastav spoja bude identičan sastavu osnovnog materijala, ili da se što manje razlikuje, tj. da ima elektroodni (elektrohemijski) potencijal što približnji ili isti osnovnom materijalu. Ovo se postiže racionalnim izborom dodatnog materijala, geometrijom zavarenog spoja i režimom zavarivanja, [2, 15, 19, 20].



Slika 3 - Šematski prikaz osnovne podele metoda za povećanje otpornosti zavarenih spojeva sa aspekta korozionog razaranja



Slika 3.1 - Opšte metode za povećanje otpornosti zavarenih spojeva sa aspekta korozionog razaranja

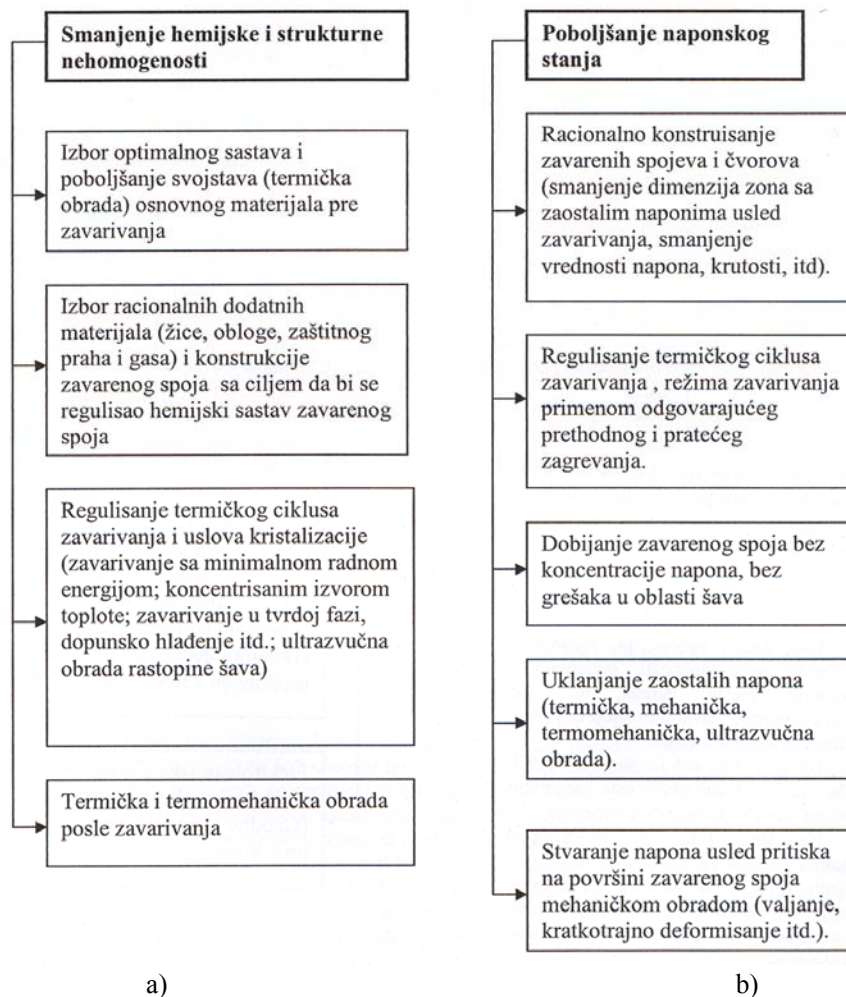
Smanjenje strukturne nehomogenosti spojeva pored regulisanja termičkog ciklusa i termičke obrade postiže se i regulisanjem kristalizacije, hlađenjem rastopine kao i ultrazvučnom obradom [4, 10, 22]. Pобољшanje naponskog stanja postiže se smanjenjem veličine napona i promenom njegovog karaktera (zone dejstva napona zatezanja) [17, 18, 23, 24].

Isto tako važno je smanjenje geometrijske nehomogenosti, otklanjanjem neprovarenih mesta,

zareza, itd., što povećava otpornost zavarenih spojeva prema lokalnim vidovima korozije.

Na slici 3.1., dat je pregled opštih metoda za povećanje otpornosti zavarenih spojeva sa aspekta korozionog razaranja.

Na slici 3.2., dat je pregled specijalnih metoda za povećanje otpornosti zavarenih spojeva sa aspekta korozionog razaranja: a) pobољшanje naponskog stanja, b) smanjenje hemijske i strukturne nehomogenosti.



Slika 3.2 - Specijalne metode za povećanje otpornosti zavarenih spojeva sa aspekta korozionog razaranja, a) smanjenje hemijske i strukturne nehomogenosti, b) pobољшanje naponskog stanja

#### 4. ZAKLJUČAK

Na radnu sposobnost, odnosno čvrstoću zavarenih konstrukcija utiču različiti tehnološki, konstrukcioni i eksploatacioni faktori, a koji su u direktnoj vezi sa korozijom zavarenih spojeva. Informacije o radnoj sposobnosti zavarenih spojeva i uticajnih faktora su važni za praksu, s obzirom da utiču na vek konstrukcije. I ako su mehanizmi ele-

ktrohemijske korozije veoma dobro poznati i razrađeni, ipak u praksi neki od oblika elektrohemije korozije su glavni uzrok smanjenja radne sposobnosti i veka trajanja konstrukcija. Greške nastaju već pri projektovanju i izboru tehnologije zavarivanja jer konstruktori i tehnolozi zavarivanja često nedovoljno poznaju mehanizme elektrohemije korozije i ne ulaze u suštinu problema. U ovom ra-

du dat je prikaz osnovnih metoda za povećanje otpornosti zavarenih spojeva u odnosu na koroziona razaranja, koje se uglavnom svode na smanjenje različitih oblika nehomogenosti samoga zavarenog spoja, kao i u manjem unošenju toplote u zoni zavarivanja, kako bi se ukazalo na mogućnosti produženja radnog veka zavarenih konstrukcija i njihove pouzdanosti u procesu eksploatacija.

Zavareni spojevi su veoma komplikovana mesta sa aspekta korozionih razaranja i do sada im nije posvećena dovoljna pažnja. U budućnosti ovim spojevima, sa naučnog aspekta treba posvetiti veću pažnju. To bi se sigurno odrazilo na duži vek konstrukcija i njihov pouzdan rad. Takođe, i edukacija projektanata zavarenih konstrukcija i tehnologa zavarivanja o koroziji uopšte, kao i o koroziji zavarenih spojeva dala bi pozitivne efekte u praksi.

## 5. LITERATURA

- [1] Jarman R.A., Design in Relation to Welding and Joining, in Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, Ed. L. L. Shreir, J. A. Jarman and D. T. Burestein, Butterworth, Oxford, 2000., 9:85-9:104.
- [2] Krysiak K. F., Corrosion of Weldments, in ASM Handbook Vol. 13, Corrosion, Ohio, 1998., 344-368.
- [3] Šijački – Žeravčić, V. Milosavljević A., Sedmak A., Priručnik za mašinske materijale, zavarivanje, lemljenje i livenje, Mašinski fakultet, Beograd, 1996.
- [4] Mladenović S., Korozija materijala, TMF, Beograd, 1990.
- [5] Zuk N. P., Korroziya i zashchita metallov, Mashgiz, Moskva, 1957.
- [6] Karpenko G.V., Prochnost stali v korrozionnoi srede, Mashgiz, Moskva, 1983.
- [7] Langer I. A., Elektrokhimicheskie kharakteristiki stvarnykh soedinenii v agressivnykh sredakh, "Avtomaticheskaya svarka", IV<sup>0</sup> 12, Moskva, 1985.
- [8] Evans E. R., The corrosion and oxidation of metals, Edward Arnold, London, 1976.
- [9] Maksimović M., Mladenović S., Korozija i zaštita, Tehnička knjiga, Beograd, 1996.
- [10] Dillon C.P., Corrosion Control in the Chemical Process Industries, McGraw – Hill Book Company, New York, 1986.
- [11] R. P. M. Procter, Effects of Metallurgical Structures on Corrosion, in Corrosion, Vol. 1, Metal / Environment Reactions, Ed., L. L. Shreir, R. A. Jarman and G. T. Burstein, Butterworth, Oxford, 2000., 1:36 – 1:54.
- [12] [www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/otkazi.pdf](http://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/otkazi.pdf).
- [13] [www.fsb.hr/korozija/](http://www.fsb.hr/korozija/)
- [14] B. Bobić, B. Jegedić, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, (2/2005), str. 111-115.
- [15] Steklov O. I. Nadezhnost starnykh konstruksii pri rabote v korrozionnykh sredakh, Mashinostroenie, Moskva, 1986.
- [16] Švarc G. L., Korroziya khemichskoi apparatury, Mashgiz, Moskva, 1989.
- [17] Seferijan D, Metalurgija zavarivanja, prevod s francuskog, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.
- [18] C. Hase, W. Reitze, Elektrolučno zavarivanje, prevod s nemačkog, Građevinska knjiga, Beograd, 1992.
- [19] Antonijević M, Pavlović M., Lačnjevac Č, Mladenović S, Korozija i zaštita čelika, SITZAMS, Beograd, 1998.
- [20] Pludek V. R., Desing and corrosion control, Hacmillan press CTD, London, 1977.
- [21] Nikolaev G. A., Prochnost stvarnykh soedineni i raschet svarnykh konstruksii, Mashgiz, Moskva, 1985.
- [22] Tomashov N. D., Teoriya korrozii i zashchity metallov, AN SSSR, Moskva, 1998.
- [23] Garrett J. H., The Action of water on Lead, K.H. Lewis, London, 1991.
- [24] D. Dražić, B. Jegdić, Corrosion and Stress Corrosion Cracking, in IFMASS8, From Fracture mechanics to Structural Integrity Assessment, Ed. Sedmak, Z. Radaković, Belgrade, 2004., 255-276.

## SUMMARY

### ON SOME METHODS FOR INCREASING POWER OF RESISTANCE WELDED CONSTRUCTION WITH ASPECT OF CORROSION DESTRUCTION

*Problem of corrosion of welded construction in practice is very characteristic. In this work was performed systematization frequently shape electrochemical corrosion and way for increasing power of resistance welded construction with aspect of corrosion destruction by using more literature date. Methods for increasing power of resistance welded construction are usually and special. Every of these methods were developed in function of increasing power of resistance welded construction with aspect of corrosion destruction.*

**Key words:** *hardness of welded combine, corrosion destruction, electrochemical potential, structural inhomogeneous, voltage condition, corrosion medium and machinery corrosion, working capacity and duration of construction*