



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 63 Vol. 63	Br. 2 No. 2	49-96 49-96	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2018. 2018.
--------------------	----------------	----------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

**DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji**

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs@eunet.rs, milicamantic@yahoo.com

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

Tel / Fax + 381 (11) 2420-652
(10-16h)

duzs@eunet.rs

www.duzs.org.rs



UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof. dr Miroslav Đurđanović, dipl.ing.

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Aleksa Blagojević, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Nародна библиотека Србије, Београд
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije :
časopis Društva za unapređivanje zavarivanja
u Srbiji = Welding & Welded Structures :
Serbian Welding Society quarterly review /
glavni i odgovorni urednik = editor-in-chief Milica Antić. –
Vol. 41, no. 1 (1996)- . - Beograd :
Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji,
1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno.

ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije
COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2018.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 355-1025530-87

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. 000200073783

VBUBRS22 (Vojvođanska banka Novi Sad, Srbija)
IBAN CODE RS35 3550 0000 0200 0737 83

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Aleksinačkih rudara 35, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

- 05 **VEZA IZMEĐU KOROZIONOG POTENCIJALA I RAZLIČITIH VIDOVA KOROZIJE METALA I LEGURA I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA - II DEO** **RELATIONSHIP BETWEEN CORROSION POTENTIAL AND DIFERENT CORROSION FORMS OF METALS, ALLOYS AND THEIRS WELDED JOINTS - PART II**
Bore V. Jegdić, Biljana M. Bobić, Bojana M. Radojković



IZ STRANIH ČASOPISA

FROM FOREIGN JOURNALS

- 65 **WELDING DUPLEX STAINLESS STEELS – A REVIEW OF CURRENT RECOMMENDATIONS** **ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA- PREGLED SADAŠNJIH PREPORUKA**
Dr. Leif Karlsson



IZ STRANIH ČASOPISA

FROM FOREIGN JOURNALS

- 79 **LIGHTWEIGT SUPPORTIVE WEAR PROTECTION SYSTEMS AGAINST EROSIVE WEAR BY FINE PARTICLES** **PODRŠKA MALE TEŽINE SISTEMIMA ZAŠTITE OD HABANJA USLED TRENJA EROZIJOM FINIM ČESTICAMA**
Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling, Dr.-Ing. Rolf Reiter, Marvin Hecht, MSc.



OBRAZOVANJE

EDUCATION

- 93 **VARIJANTE KONTROLE MIG/MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA**



VESTI

NEWS

- 51 **REPUBLIČKO TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA „MLADI ZAVARIVAČ 2018“**
52 **IIW KONGRES ZAVARIVANJA JUGOISTOČNE EVROPE**
64 **REPUBLIČKO TAKMIČENJE MLADIH ZAVARIVAČA „MLADI ZAVARIVAČ 2018“ -nastavak**
96 **MARKETING**

Poštovani čitaoci,

U ovom broju ćete imati priliku da pročitate još jedan zanimljiv rad iz oblasti korozije zavarenih spojeva kao i rad preuzet iz stranog časopisa iz oblasti „navarivanja“.

Ono što je važno u ovom momentu je, da je upravo završeno takmičenje mladih zavarivača u organizaciji Zajednice mašinskih škola u Srbiji. Naše društvo, DUZS je učestvovalo u delu ocenjivanja praktičnog rada učenika ovih škola kao i ostalih učesnika takmičenja.

Jedna aktivnost je gotova, sledi nam verovatno vrelo leto tokom kojeg će se i naše aktivnosti usijavati zbog predstojećih jesenjih događaja.

Do novog broja, želimo vam da se dobro odmorite i akumulirate energiju za dalje druženje sa nama.

*Glavni i odgovorni urednik
Milica Antić, dipl.ing, EWE*

Republičko takmičenje mladih zavarivača „Mladi zavarivač 2018“, Beograd, 23. Maj 2018



Nastavak na strani 64.



Prijavite se za učešće na četvrtom IIW Kongres zavarivanja Jugoistočne Evrope



The 4th IIW South-East European Welding Congress

4. IIW Kongres zavarivanja Jugoistočne Evrope

Beograd, 10 - 12. oktobar 2018.



Pozivamo Vas da uzmete učešće na **predstojećem 4. IIW Kongresu zavarivanja Jugoistočne Evrope** koji se po prvi put organizuje u Srbiji i to prema pravilima Međunarodnog Instituta za zavarivanje, te kao takav ima tretman kao Međunarodni Kongres posebnog značaja.

Organizator kongresa je DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji u saradnji sa Rumunskom asocijacijom za zavarivanje i Bugarskim društvom za zavarivanje i uz podršku Međunarodnog Instituta za zavarivanje (International Institute of Welding - IIW) i Evropske federacije za zavarivanje (European Welding Federation - EWF).

Tema kongresa je: Visokokvalitetno zavarivanje za sigurne konstrukcije (Safe Welded Construction by High Quality Welding). U okviru Kongresa će se održati i redovno Savetovanje "ZAVARIVANJE 2018", Radionca predstavnika zavarivačkih asocijacija iz Regiona na temu "Kako unaprediti zavarivanje u regionu" pod mentorstvom Međunarodnog instituta za zavarivanje, kao i Izložba opreme, dodatnih i pomoćnih materijala za zavarivanje.

U pitanju je najveća zavarivačka konferencija ikada održana u Srbiji, a u 2018. godini biće i najveći skup o zavarivanju u Jugoistočnoj Evropi, koji će okupiti preko 300 stručnjaka iz zemalja regiona, Evrope i sveta.

Ovaj skup podržavaju i zavarivačke asocijacije iz regiona, uključujući i zemlje EX Yu, što znači da će biti prisutni predstavnici čitavog Balkana.

Na Kongresu će biti saopšteno preko 50 radova autora iz naše zemlje i inostranstva. Kongresu će prisustvovati i u njegovom radu učestvovati predsednik Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) - g. Douglas Luciani, bivši predsednik IIW-a i član Borda direktora - g. Chris Smallbone, Član borda direktora Evropske federacije za zavarivanje (EWF) - prof. Luísa Coutinho, izvršni direktor EWF- g. Chris Eady, i mnogi drugi zvaničnici, članovi Borda direktora, predavači, predstavnici komisija IIW-a...

Ovakva manifestacija treba bitno da doprinese podizanju nivoa znanja kadrova koji se bave zavarivanjem i srodnim tehnikama sa bilo kog aspekta.

Više informacija o Kongresu i prijavni formular (Registration form) možete pronaći na web stranici: www.seeiiw2018.duzs.org.rs

Za sva dodatna pitanja, budite slobodni da kontaktirate **BBN Congress Management d.o.o.** tehnički sekretarijat Kongresa na tel: +381 11 3629402 i E-mail: bbn.pco@gmail.com, bbn@bbn.co.rs

Molimo Vas da na vreme prijavite svoje učešće na Skupu.

Radujemo se susretu!



DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji



Bore V. Jegdić¹, Biljana M. Bobić¹, Bojana M. Radojković¹

Veza između korozionog potencijala i različitih vidova korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva - II deo

Relationship between corrosion potential and different corrosion forms of metals, alloys and their welded joints - Part II

Originalni naučni rad / Original scientific paper
UDK / UDC: 620.193:621.791.05

Rad primljen / Paper received:
Maj 2018.

Ključne reči: korozija, korozioni potencijal, metali i legure, zavareni spojevi

Izvod

U ovom radu opisana je zavisnost vrednosti korozionog potencijala i različitih vidova korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. Pokazano je kako se primenom metode elektrohemijaskog šuma, na osnovu vrednosti korozionog potencijala, može predvideti sklonost metala i legura i njihovih zavarenih spojeva prema različitim vidovima lokalizovane korozije, kao što je pitting korozija. Takođe je pokazano da se na osnovu vrednosti korozionog potencijala može predvideti sklonosti aluminijumskih legura prema naponskoj koroziji. Ilustrovana je povezanost vrednosti korozionog potencijala i tipa inhibitora korozije. Razmatrana je povezanost korozionog potencijala sa sklonošću nerđajućeg čelika prema pitting koroziji, kao i sklonošću hirurških implantanata prema galvanskoj koroziji. Kriterijumi protektorske i aktivne katodne zaštite se zasnivaju na merenju korozionog potencijala. Takođe, stanje armature u betonu se može proceniti na osnovu vrednosti korozionog potencijala. Sklonost metalnih (čeličnih) konstrukcija i njihovih zavarenih spojeva prema pojavi vodonične krtosti u značajnoj meri zavisi od vrednosti korozionog potencijala čelika u datoj korozionoj sredini. Zbog velikog broja primena merenja korozionog potencijala, rad je podeljen na dva dela (deo I i deo II).

UVOD

Kod zavarenih spojeva se, pored strukturnih promena i dejstva naponskog i termičkog gradijenta, često javlja i hemijska nehomogenost. Navedene promene u znatnoj meri utiču na mehaničke karakteristike i koroziono ponašanje

Adresa autora / Author's address:

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, IHTM, Njegoševa 12.

Autor za prepisku: borejegdic@yahoo.com (Bore V. Jegdić)

Key words: corrosion, corrosion potential, metals and alloys, welded joints

Abstract

This paper describes the correlation between the value of the corrosion potential and various types of corrosion of metals and alloys and their welded joints. It is shown that using the method of electrochemical noise is possible to predict the tendency of metals and alloys and their welded joints to different forms of localized corrosion (e.g. pitting corrosion), on the basis of the corrosion potential value. Also, there is a correlation between the value of corrosion potential and the tendency of aluminum alloys to stress corrosion cracking. The correlation between the value of the corrosion potential and the type of corrosion inhibitor is presented. In addition, the correlation between corrosion potential and tendency of stainless steels to pitting corrosion, as well as the tendency of surgical implants to galvanic corrosion was considered. Criteria for sacrificial and active cathodic protection are based on the measurements of corrosion potential. Also, the corrosion behaviour of steel armature in concrete depends on the value of corrosion potential. The susceptibility of metal (steel) constructions and their welded joints to hydrogen embrittlement depends to a considerable extent on the corrosion potential of steel in the given corrosion environment. Due to a large number of applications of corrosion potential measurements, this study is divided into two parts (Part I and Part II).

zavarenih spojeva. Kod zavarenih spojeva postoji nekoliko različitih zona. Zona topljenja, ili oblast metala šava, nastaje popunjavanjem prethodno pripremljenog žleba rastopljenim dodatnim materijalom. Po završetku očvršćavanja metal šava



ima karakterističnu strukturu livenja. Sloj koji poslednji očvršćava ima izrazito dendritnu strukturu, za koju je karakteristična pojava likvacije, tj. lokalne hemijske nehomogenosti, zbog nedostatka vremena za difuziju atoma legirajućih elemenata. Hemijska heterogenost je često uzrok pojave lokalnih vidova korozije. U zoni uticaja toplote (ZUT), pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja, dolazi do različitih faznih i strukturnih transformacija. Na primer, kod nerđajućih čelika i aluminijumskih legura često dolazi do izdvajanja određenih faza po granicama zrna i pojave interkristalne korozije.

Pri koroziji metala na površini metala teku istovremeno dve ili više elektrohemijskih reakcija. Anodna reakcija je rastvaranje metala, odnosno prelazak metalnih jona u rastvor. Katodna reakcija je redukcija nekog oksidacionog sredstva koje je prisutno u rastvoru. To je najčešće redukcija kiseonika ili razlaganje vode. U kiseloj sredini se istovremeno odvija i reakcija redukcije vodoničnih jona. Tokom odigravanja elektrohemijske korozije na površini metala se uspostavlja korozioni potencijal E_{kor} (potencijal otvorenog kola ili mešoviti potencijal), pri kome je brzina anodne reakcije jednaka brzini katodne reakcije. Vrednost E_{kor} zavisi od prirode metala, stanja njegove površine, sastava i koncentracije elektrolita, temperature itd.

U ovom radu opisana je primena merenja korozionog potencijala E_{kor} za određivanje sklonosti metala i legura i njihovih zavarenih spojeva prema različitim vidovima korozije. Na osnovu vrednosti E_{kor} metala u nekoj korozionoj sredini može se proceniti koroziono ponašanje metala i njihovih zavarenih spojeva, tj. proceniti opasnost od galvanske, piting, interkristalne i naponske korozije, kao i sklonost prema vodoničnoj krtosti. Takođe, na osnovu vrednosti E_{kor} može se proceniti kompatibilnost metalnih implantata koji su u električnom kontaktu, a koji se ugrađuju u ljudski organizam, mogu se odrediti strukturna i druga metalurška stanja aluminijumskih legura, proceniti opasnost od korozije čelične armature u betonu, proceniti pravilno funkcionisanje anoda za protektorsku katodnu zaštitu itd. Navedene primene merenja E_{kor} su ilustrovane eksperimentalnim rezultatima autora rada, kao i primerima iz literature. Zbog velikog broja primena merenja E_{kor} , ovaj pregledni rad je podeljen na dva dela (deo I i deo II).

Postupak merenja korozionog potencijala

Apsolutnu vrednost korozionog potencijala nije moguće izmeriti, već se korozioni potencijal meri u odnosu na neku drugu elektrodu koja se naziva referentna elektroda. Za merenje korozionog potencijala nije potrebna skupa i sofisticirana oprema. Dovoljno je imati neku od referentnih elektroda i uređaj za merenje potencijala, kao što su komercijalni multimetri.

U svojstvu referentne elektrode može se upotrebiti neka od referentnih elektroda navedenih u I delu ovog rada [1]. U laboratorijskim uslovima najčešće se koristi zasićena kalomelova elektroda (SCE) ili srebro/srebro-hloridna elektroda (AgCl), a za terenska merenja korozionog potencijala najčešće se koristi zasićena bakar-sulfatna elektroda ($CuSO_4$). Referentna elektroda uvek ima konstantan i stabilan potencijal, nezavisno od sastava i koncentracije rastvora u koji je uronjena.

Vrednost korozionog potencijala je merilo termodinamičke otpornosti metala prema koroziji. Što je vrednost E_{kor} pozitivnija, manja je termodinamička pogonska sila za odvijanje procesa korozije. U realnim uslovima brzina korozije metala često nije u skladu sa ovom termodinamičkom tendencijom. Na primer, ugljenični čelici su termodinamički stabilniji od legura cinka (čelici imaju pozitivniju vrednost korozionog potencijala nego legure cinka). Međutim, u realnim uslovima legure cinka korodiraju znatno sporije (nego čelici) zbog obrazovanja stabilnog kompaktnog sloja korozionih produkata. U slučaju čelika sloj korozionih produkata (rđa) slabije štiti osnovni metal (čelik) od korozije.

Titan je reaktivan metal, ali je zbog obrazovanja pasivnog sloja stabilan u velikom broju korozionih sredina, odnosno veoma je otporan na koroziju. Sličan slučaj je kod legura aluminijuma i nerđajućih čelika.

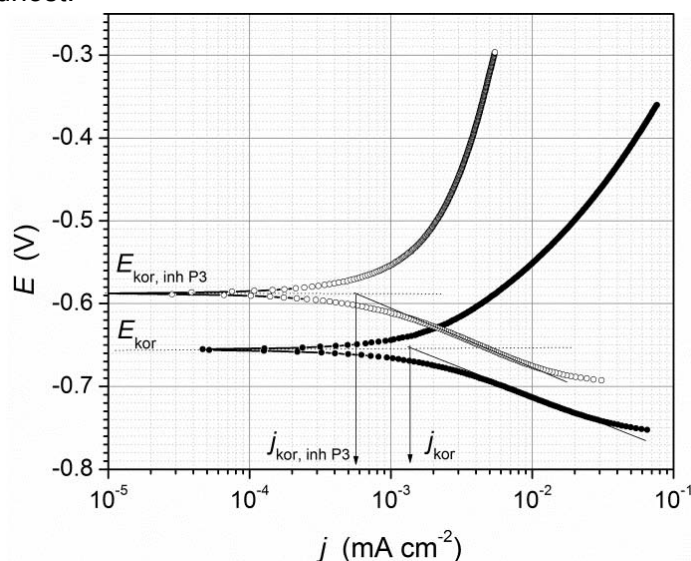
Pri promeni spoljnih uslova, metal može preći iz pasivnog stanja u aktivno stanje. Taj proces se naziva aktivacijom i najčešće se odvija lokalno (piting korozija, korozija u zazorima itd.). Pri tome dolazi do pomeranja E_{kor} ka negativnijim vrednostima. Sa druge strane, prevođenje metala iz aktivnog u pasivno stanje se može ostvariti dejstvom nekog oksidacionog sredstva (HNO_3 , K_2CrO_4), koje pomera korozioni potencijal ka pozitivnijim vrednostima (pasivna oblast).



Korozioni potencijal i inhibitori korozije

Najčešća klasifikacija inhibitora korozije je na anodne, katodne i mešovite inhibitore. Anodni inhibitori korozije smanjuju brzinu anodne reakcije u korozionom procesu i pomeraju E_{kor} ka pozitivnijim vrednostima. Katodni inhibitori korozije smanjuju brzinu katodne reakcije i pomeraju E_{kor} ka negativnijim vrednostima. Mešoviti inhibitori korozije smanjuju brzinu obe reakcije (anodne i katodne), pri čemu korozioni potencijal E_{kor} zadržava približno istu vrednost.

Na slici 1 su prikazani Tafelovi dijagrami za niskolegirani ugljenički čelik u rastvoru NaCl, bez inhibitora i u prisustvu inhibitora korozije (komercijalni inhibitor oznake P3). U prisustvu navedenog inhibitora korozioni potencijal E_{kor} je pomeren ka pozitivnijim vrednostima, a anodna reakcija se odvija manjom brzinom. To znači da je gustina struje korozije j_{kor} , odnosno brzina korozije v_{kor} , znatno manja u prisustvu inhibitora.



Slika 1. Eksperimentalni Tafelovi dijagrami za niskolegirani ugljenički čelik, bez inhibitora i u prisustvu inhibitora korozije u rastvoru [2].

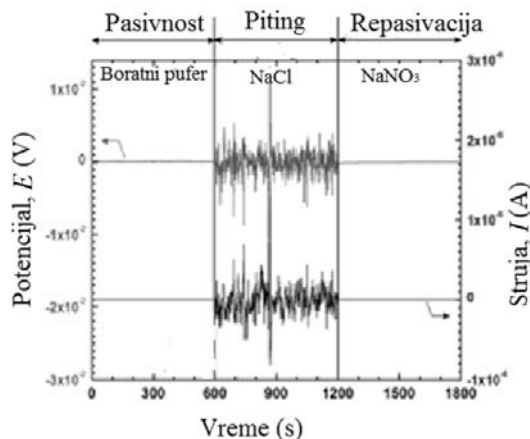
Korozioni potencijal i elektrohemijski šum

Nova elektrohemijska metoda određivanja sklonosti metala i legura i njihovih zavarenih spojeva prema različitim vidovima korozije zasniva se na merenju elektrohemijskog šuma. Metoda je našla veliku primenu za ispitivanja korozije metala u hemijskoj procesnoj industriji i drugim granama industrije.

Dva identična uzorka od istog materijala se ispituju na korozionom potencijalu, bez nametanja spoljašnjeg potencijala. Registruju se male fluktuacije potencijala i struje, koje su posledica odvijanja katodnih i anodnih reakcija u korozionom procesu. Izmerene fluktuacije potencijala i struje se kompjuterski obrađuju i dobija se vrednost otpornosti šuma R_n . Otpornost šuma R_n se izračunava kao odnos standardne devijacije potencijala i standardne devijacije struje. Pokazano je da je vrednost R_n obrnuto proporcionalna brzini korozije.

Pomoću metode elektrohemijskog šuma lako se mogu otkriti oblici lokalizovane korozije, kao što je piting korozija, naponska korozija itd.

Na slici 2 prikazani su rezultati ispitivanja aluminijuma metodom elektrohemijskog šuma, u skladu sa standardom ISO 17093 [3]. U boratnom puferu, aluminijum se nalazi u pasivnom stanju i fluktuacije potencijala i struje su veoma male (početni deo dijagrama). Posle dodavanja hloridnih jona u boratni puffer pojavljuju se jasno vidljivi pikovi potencijala i struje (središnji deo dijagrama). Ovo ukazuje na pojavu piting korozije aluminijuma u prisustvu hloridnih jona. Kada se u boratni puffer koji sadrži hloridne jone doda natrijum-nitrat (NaNO₃) dolazi do repasivacije pitova na aluminijumu i fluktuacije potencijala i struje su ponovo veoma male. NaNO₃ je efikasan inhibitor koji sprečava odvijanje piting korozije aluminijuma. Standardi ASTM G199 [4] i ISO 17093 [3] opisuju postupke primene metode elektrohemijskog šuma.



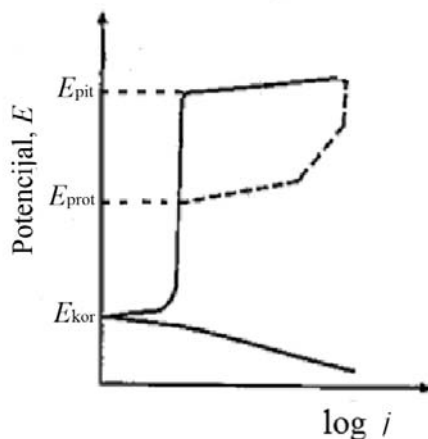
Slika 2. Eksperimentalni rezultati dobijeni metodom elektrohemijskog šuma za aluminijum[3].

Korozioni potencijal i piting korozija zavarenih spojeva nerđajućih čelika

Otpornost nerđajućih čelika i njihovih zavarenih spojeva prema koroziji je posledica formiranja tankog, adherentnog pasivnog filma na površini, koji razdvaja čelik od korozione sredine. U prisustvu halogenih jona (npr. u vodenim rastvorima NaCl), može doći do narušavanja kompaktnosti pasivnog filma i obrazovanja pitova.

Razaranje pasivnog filma u prisustvu NaCl se odvija lokalno, na mestima gde je narušena struktura ili debljina pasivnog filma. Na tim mestima dolazi do obrazovanja pitova. U slučaju zavarenih spojeva pitovi se lakše obrazuju na mestima metalurške heterogenosti metala. Na primer, hromom osiromašene oblasti, koje nastaju kada se austenitni nerđajući čelik zagreva do temperature na kojoj se odvija senzibilizacija, su podložne pitingu. Pitovi takođe mogu da se obrazuju na granicama faza austenit-ferit u zavarenim spojevima nerđajućih čelika. Verovatnoća obrazovanja pitova u metalu šava je velika, zbog postojanja mikrosegregacija u dendritnoj strukturi.

Određivanje otpornosti nerđajućih čelika prema piting koroziji se često vrši elektrohemijском potenciodinamičkom metodom u skladu sa standardima ASTM G 61 [5] i ISO 15158 [6]. Pored vrednosti piting potencijala E_{pit} , često se određuje vrednost zaštitnog potencijala E_{prot} , tj. vrednost potencijala kada pitovi prestaju da rastu (slika 3). Na potencijalima pozitivnijim od E_{pit} obrazuju se pitovi, koji dalje stabilno rastu. U oblasti između E_{pit} i E_{prot} ne dolazi do obrazovanja novih pitova, već do rasta postojećih. Pri potencijalima negativnijim od E_{prot} zaustavlja se rast obrazovanih pitova. Kao merilo otpornosti nerđajućeg čelika prema obrazovanju pitova uzima se vrednost E_{pit} ili vrednost $E_{pit}-E_{kor}$, dok se kao merilo otpornosti nerđajućeg čelika prema koroziji u zazorima često uzima vrednost E_{prot} ili vrednost $E_{prot}-E_{kor}$. Ako se metal ne repasivira pre nego što se dostigne vrednost korozionog potencijala E_{kor} to znači da je metal veoma osetljiv na pojavu korozije u zazorima.

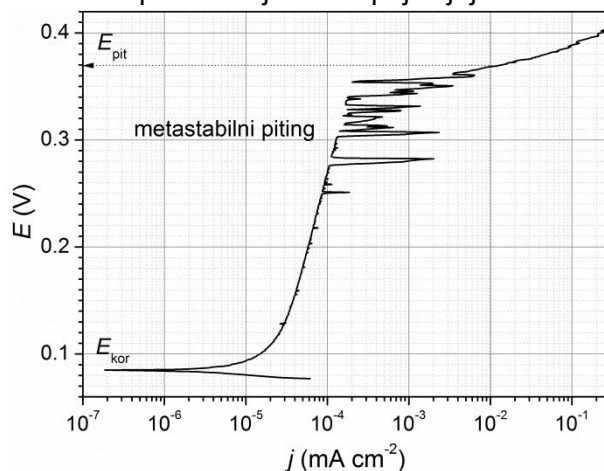


Slika 3. Šematski prikaz određivanja parametara piting korozije potenciodinamičkom metodom.



Potenciodinamička metoda primenjena je za ispitivanje piting korozije nerđajućeg čelika u rastvoru NaCl + Na₂SO₄, na sobnoj temperaturi. Po uspostavljanju stabilnog korozionog potencijala E_{kor} na čeliku snimljene su anodne krive polarizacije

(slika 4). Piting potencijal E_{pit} određen je kao potencijal koji odgovara gustini anodne struje od 10 $\mu\text{A cm}^{-2}$, u oblasti stabilnog rasta pitova (prema ISO 15158). Na slici 4 se takođe vidi oblast u kojoj se pojavljuje metastabilni piting.

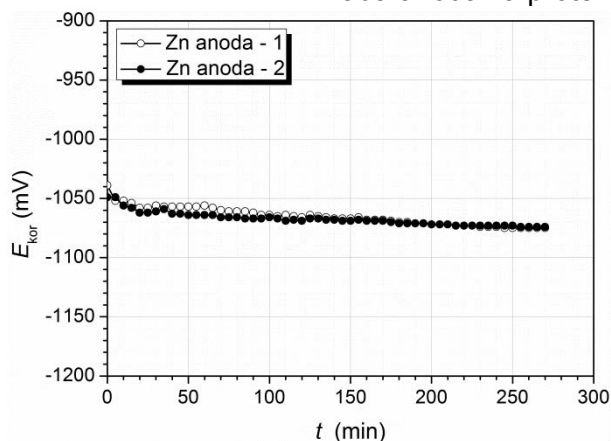


Slika 4. Eksperimentalni potenciodinamički dijagram za određivanje parametara piting korozije nerđajućeg čelika [7]

Korozioni potencijal i katodna zaštita (protektorska i aktivna)

U nekim uslovima anode na bazi Mg, Al, ili na bazi Zn, za protektorsku katodnu zaštitu (bez spoljašnjeg izvora struje) postaju nedovoljno aktivne, jer je došlo do njihovog pasiviranja. Korozioni potencijal tih anoda se pomera u pozitivniju oblast. Usled nedovoljne razlike korozionih potencijala anoda i metala konstrukcije, efikasnost anoda se znatno smanjuje i one ne uspevaju da u potpunosti katodno zaštite metalnu konstrukciju od korozije.

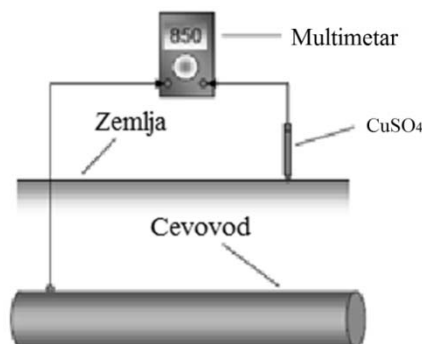
Provera pravilnog rada anode za protektorsku zaštitu se često vrši merenjem vrednosti njenog korozionog potencijala u datoj korozionoj sredini. Na slici 5 su prikazani rezultati merenja E_{kor} anoda na bazi Zn, u rastvoru NaCl. Posle ~ 10 min, uspostavlja se stabilna negativna vrednost E_{kor} od ~ -1070 mV. Ta vrednost E_{kor} ostaje konstantna tokom celog perioda merenja (~ 4,5 h). Standard ASTM G97 [8] opisuje postupke provere pravilnog rada anoda za protektorsku katodnu zaštitu.



Slika 5. Korozioni potencijal E_{kor} anoda na bazi Zn u NaCl.

Tokom izvođenja aktivne katodne zaštite (sa spoljašnjim izvorom struje) predhodno se vrši merenje korozionog potencijala konstrukcije u zemljištu ili drugoj korozionoj sredini, kao što je beton ili prirodne vode. Na osnovu vrednosti izmerenog E_{kor} bira se odgovarajući kriterijum za

aktivnu katodnu zaštitu, u skladu sa standardima NACE TM0497, NACE TM0108 i NACE TM0109 [9]. Na slici 6 je šematski prikazan postupak merenja potencijala cevovoda tokom izvođenja katodne zaštite, pomoću bakar-sulfatne referentne elektrode.



Slika 6. Postupak merenja potencijala podzemnog cevovoda.

Korozioni potencijal čelične armature u betonu

Čelična armatura u betonu je često otporna na koroziju (pasivirana) usled relativno visoke pH vrednosti betona. U takvim uslovima armatura u betonu ima vrednost E_{kor} koja odgovara pasivnom stanju čelika. Ukoliko dođe do prodora koroziono-agresivnih supstanci iz okolne sredine (kao što su hloridni joni), narušava se pasivno stanje armature u betonu i dolazi do aktivne ravnomerne ili lokalizovane korozije čelične armature. Na tim mestima E_{kor} postaje znatno negativniji. Standard

ASTM C876 [10] opisuje postupak merenja E_{kor} čelične armature u betonu (slika 7) i daje kriterijume na osnovu kojih se može proceniti stanje čelične armature u betonu (tabela 1). Merenja E_{kor} se izvode na prethodno ovlaženoj površini betona, na rastojanjima koja obezbeđuju dobijanje vrednosti E_{kor} pri uzastopnim merenjima u granicama od 50 mV. Navedeni ASTM standard je definisao kriterijume za verovatnoću pojave korozije čelične armature u betonu (tabela 1). U literaturi postoje precizniji kriterijumi za određivanje pojave korozije čelične armature u betonu (tabela 2).

E_{kor} vs ZKE (mV)	Stanje čelične armature u betonu
$E_{kor} > - 200$	Verovatnoća da nema korozije armature u betonu veća je od 90 %
$- 200 > E_{kor} > - 350$	Koroziona aktivnost armature u betonu je neodređena
$E_{kor} < - 350$	Verovatnoća da ima korozije armature u betonu je veća od 90 %

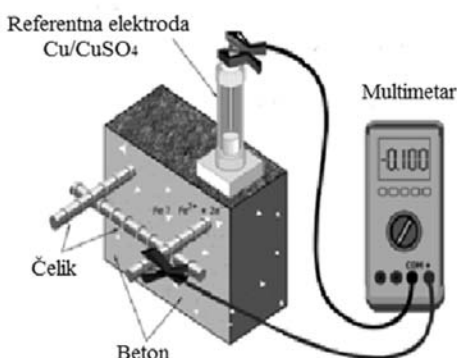
Tabela 1. Kriterijumi za procenu stanja čelične armature u betonu sa stanovišta korozije [10]

E_{kor} vs ZKE (mV)	Sklonost ka pojavi korozije čelične armature u betonu
$E_{kor} > - 150$	Nema sklonosti
$- 150 > E_{kor} > - 250$	Blaga sklonost
$- 250 > E_{kor} > - 350$	Prilično visoka sklonost
$E_{kor} < - 350$	Visoka sklonost

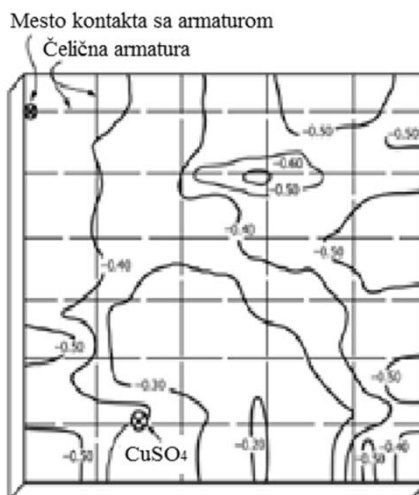
Tabela 2. Kriterijumi za ocenu sklonosti čelične armature u betonu prema koroziji [11]

Merenje E_{kor} se izvode na više mesta na površini betonske konstrukcije u koju je ugrađena čelična armatura. Na osnovu dobijenih rezultata prave se

mape korozionih potencija za čeličnu armature u betonu (slika 8).



Slika 7. Postupak merenja korozionog potencijala čelične armature u betonu.

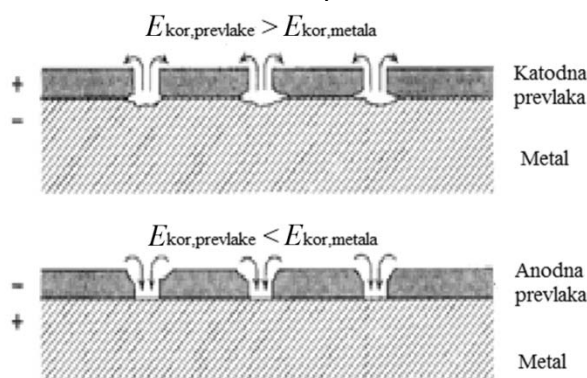


Slika 8. Mapa korozionog potencijala čelične armature u betonu.

Korozioni potencijal metalnih prevlaka

Za zaštitu od korozije konstrukcija izrađenih od čelika i drugih metala i legura, kao i njihovih zavarenih spojeva često se koriste galvanске i druge metalne prevlake. Metalne prevlake mogu imati korozioni potencijal E_{kor} pozitivniji ili negativniji od E_{kor} osnovnog metala, npr. čelika. Prevlake aluminijuma, cinka, cink-nikla, titan-nikla itd. na čelicima imaju negativniji korozioni potencijal od čelika u većini korozionih sredina. Takve prevlake

su anodne u odnosu na osnovni metal-čelik. Te prevlake se postepeno rastvaraju i katodno štite čelik u porama i defektima prevlake. Prevlake bakra, nikla, kalaja, hroma itd. imaju pozitivniji E_{kor} u odnosu na E_{kor} čelika. Te prevlake su katodne u odnosu na osnovni metal-čelik. One štite čelik od korozije samo ako nisu porozne. U praksi nije moguće naneti galvanску prevlaku koja je potpuno bez pora. U porama dolazi do rastvaranja osnovnog metala-čelika. Na slici 9 su šematski prikazane anodne i katodne prevlake na čeliku.



Slika 9. Šematski prikaz katodnih i anodnih prevlaka na metalu [12].

Višeslojne prevlake nikla imaju veliku primenu za zaštitu od korozije predmeta od čelika. Potpuna zaštita čelika od korozije pomoću višeslojnih prevlaka nikla se ostvaruje ako pojedini slojevi nikla imaju određenu vrednost E_{kor} i ako postoji odgovarajuća razlika vrednosti E_{kor} između pojedinih slojeva nikla. Standard EN 16866 [13] opisuje postupak određivanja E_{kor} i razlike u vrednostima E_{kor} pojedinih slojeva nikla, kod višeslojnih prevlaka nikla. Navedeni postupak se naziva STEP postupak.

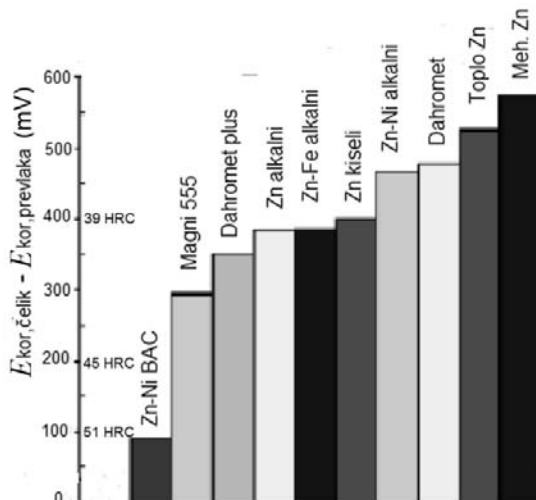
Korozioni potencijal i vodonična krtost

Utvrđeno je da se u porama i defektima anodnih prevlaka (slika 9), na površini čelika i njegovih zavarenih spojeva odvija intenzivna katodna reakcija, obično uz izdvajanje vodonika iz vode ili usled redukcije vodoničnih jona. Deo nastalog vodonika difunduje u čelik i posle određenog inkubacionog vremena (kada se postigne kritična koncentracija vodonika) dolazi vodonične krtosti čelika. Isto se dešava kada se čelik bez galvanске prevlake katodno polarizuje do potencijala koji odgovara korozionom potencijalu prevlake.



Što je veća tvrdoća čelika, veća je njegova sklonost ka vodoničnoj krtosti. Takođe, što je veća razlika

između E_{kor} čelika i E_{kor} prevlake, veća je sklonost čelika prema vodoničnoj krtosti (slika 10).

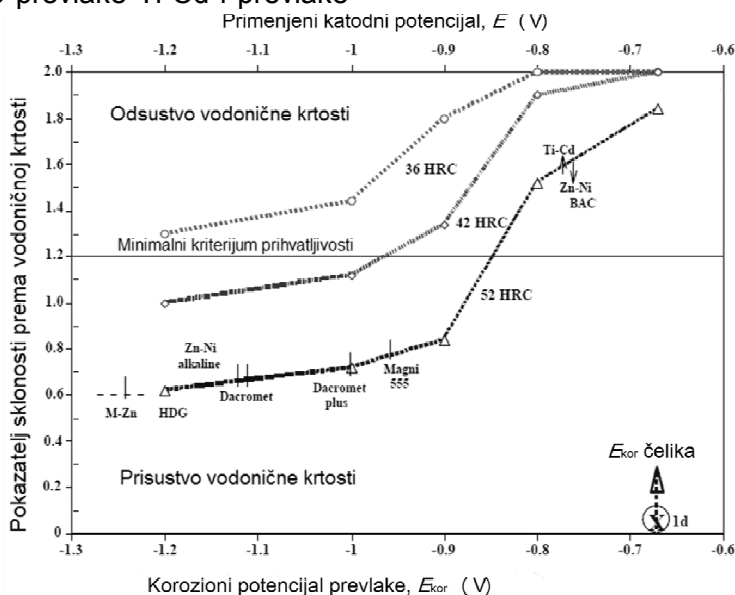


Slika 10. Veza između razlike E_{kor} čelika i E_{kor} prevlake u rastvoru NaCl i maksimalno dozvoljene tvrdoća čelika.

Uticaj nivoa tvrdoće čelika na sklonost prema vodoničnoj krtosti prikazana je na slici 11. Na istoj slici prikazan je uticaj E_{kor} prevlake na sklonost čelika prema vodoničnoj krtosti. Ispitivanje sklonosti prema vodoničnoj krtosti čelika AISI 4340 izvršeno je na epruvetama sa zarezom (koje su slične Šarpijevim epruvetama). Epruvete su imale tvrdoću 52, 42 i 36 HRC. Ispitivanja su izvršena metodom savijanja u tri tačke, u rastvoru NaCl. Na slici 11 se vidi oblast u kojoj ne dolazi do vodonične krtosti, kao i oblast u kojoj dolazi do vodonične krtosti. Može se videti da prevlake cinka najviše katodno polarizuje čelik. U slučaju epruveta sa tvrdoćom 36 HRC sve razmatrane prevlake na čeliku su zadovoljile postavljeni kriterijum za otpornost prema vodoničnoj krtosti (prikazan horizontalnom linijom na slici 11). U slučaju epruveta od čelika sa tvrdoćom 52 HRC, samo prevlake Ti-Cd i prevlake

Zn-Ni su zadovoljile postavljeni kriterijum. Te prevlake imaju E_{kor} blizak E_{kor} osnovnog metala-čelika i ne dovode do značajnije polarizacije čelika u porama i defektima prevlake.

Postupak ispitivanja vodonične krtosti čelika je detaljno opisan u standardima ASTM F1624 [14] i ASTM F1940 [15]. Navedeni standardi predviđaju nanošenje veštačkog defekta, koji prodire kroz metalnu prevlaku do osnovnog metala-čelika. Pored toga ovim ASTM standardima predviđeno je ispitivanje vodonične krtosti čelika na katodno polarizovanim epruvetama bez galvanske prevlake, u rastvoru NaCl. Ispitivanja se vrše na uzorcima od čelika koji su katodno polarizovani do potencijala koji odgovara vrednosti E_{kor} galvanske prevlake. Korozioni potencijal galvanske prevlake se prethodno izmeri.



Slika 11. Uticaj korozionog potencijala prevlake i nivoa čvrstoće čelika na sklonost prema vodoničnoj krtosti.



U aneksu X2 standarda ASTM G215 [9] opisan je postupak merenja E_{kor} prevlake cinka koja je nanešena toplim postupkom na čelik. U aneksu X3 istog ASTM standarda opisan je postupak određivanja E_{kor} čelika u nekoj korozionoj sredini, u cilju određivanja sklonosti korozione sredine da izazove vodoničnu krtost.

Korozioni potencijal i naponska korozija aluminijumskih legura

Čist aluminijum nije sklon naponskoj koroziji. Od svih legura aluminijuma prema naponskoj koroziji su sklone legure serije 2000, 5000 i 7000.

Za legure serije 2000 (kao sto je legura AA 2219) i za legure serije 7000 (kao što su legure AA 7178 i AA 7075) razrađene su ubrzane metode određivanja otpornosti prema naponskoj koroziji, na osnovu merenja korozionog potencijala [16]. Korozioni potencijal se meri u rastvoru metanola (CH_3OH) i ugljen-tetrahlorida (CCl_4) koji su pomešani u određenom odnosu. U slučaju aluminijumskih legura serije 2000 razlika E_{kor} za leguru koja je otporna i koja nije otporna prema naponskoj koroziji iznosi više od 200 mV. U slučaju aluminijumskih legura serije 7000 ta razlika je još izraženija i iznosi preko 400 mV. Anodne i katodne korozione reakcije, pri čijem odvijanju dolazi do formiranja E_{kor} na pomenutim aluminijumskim legurama, razmatrane su u radu [16]. Rezultati merenja E_{kor} u rastvoru metanola i ugljen-tetrahlorida mogu da zamene ispitivanja otpornosti prema naponskoj koroziji navedenih legura klasičnim metodama. Merenja E_{kor} traju manje od 1 h, za razliku od klasičnih metoda određivanja sklonosti prema naponskoj koroziji, koja traju duže od 1 meseca.

Legure serije 2000 (Al-Cu-Mg) su aluminijumske legure visoke čvrstoće (npr. duraluminijum) i najmanje su otporne prema naponskoj koroziji i ostalim vidovima korozije. Sa povećanjem sadržaja Cu u ovim legurama otpornost prema koroziji se smanjuje. Posle visokotemperaturnog homogenizacionog žarenja i kaljenja (često i plastične deformacije koja se izvodi neposredno posle kaljenja), legura se podvrgava starenju na sobnoj temperaturi (prirodno starenje), ili na povišenoj temperaturi (veštačko starenje). Najveću sklonost prema naponskoj koroziji ima legura neposredno pre dostizanja maksimalne čvrstoće (podstareno stanje), a najveću otpornost ima legura u prestarenom stanju, kada je u strukturi legure prisutna stabilna faza Al_2Cu . Takođe, pri nedovoljno brzom kaljenju posle homogenizacionog rastvarajućeg žarenja, po granicama zrna može

doći do izdvajanja čestica stabilne faze Al_2Cu . Usled toga može doći do pojave interkristalne korozije i naponske korozije.

Serija 7000 (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu). U ovu seriju spadaju aluminijumske legure najveće čvrstoće. Kao i kod aluminijumskih legura serije 2000 podstareno stanje se odlikuje najmanjom otpornošću prema naponskoj koroziji, a prestareno stanje najvećom otpornošću. Najbolja kombinacija mehaničkih osobina i otpornosti prema naponskoj koroziji se ostvaruje dvostepenim termičkim taloženjem. Objašnjenje za ovu pojavu se zasniva na karakteru plastične deformacije (klizanja). Bakar ima značajan uticaj na otpornost ovih legura prema naponskoj koroziji. Legure bez Cu (Al-Zn-Mg) su manje otporne prema naponskoj koroziji od legura sa Cu (Al-Zn-Mg-Cu).

Kao i kod aluminijumskih legura serije 2000, otpornost prema naponskoj koroziji legura serije 7000 može se proceniti na osnovu merenja korozionog potencijala u rastvoru metanola i ugljen-tetrahlorida.

Korozioni potencijali korozija metalnih implantanata

Implantanti koji se ugrađuju u ljudski organizam moraju se prethodno detaljno ispitati. Posebno je značajno ispitivanje otpornosti prema različitim vidovima opšte i lokalizovane korozije. Lokalizovana korozija implantanata može dovesti do njihovog oštećenja. Tokom procesa opšte i lokalizovane korozije mogu nastati rastvorni produkti korozije, koji mogu imati štetno dejstvo na ljudski organizam.

Standard ASTM F2129 [17] opisuje postupke ispitivanja izrađenih implantanata na otpornost prema piting koroziji i koroziji u zazorima. Ispitivanja se izvode primenom standardne potenciodinamičke tehnike, u rastvoru koji je po sastavu sličan rastvoru u ljudskom organizmu (na temperaturi $37\text{ }^{\circ}C$). Na osnovu potenciodinamičkih merenja određuje se korozioni potencijal E_{kor} , piting potencijal E_{pit} i zaštitni potencijal E_{prot} implantanata. Kao pokazatelj otpornosti prema piting koroziji uzima se vrednost E_{pit} ili razlika $E_{pit} - E_{kor}$, a kao pokazatelj otpornosti prema koroziji u zazorima uzima se vrednost E_{prot} ili razlika $E_{prot} - E_{kor}$.

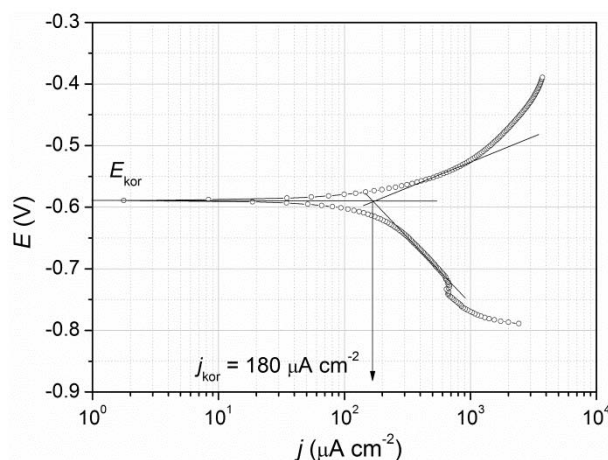
Standard ASTM F3044 [18] razmatra kompatibilnost izrađenih implantanata u sklopu (formiranom zavarivanjem ili na neki drugi način), sa aspekta galvanske korozije. Ukoliko je razlika korozionih potencijala pojedinih komponenata velika može doći do intenzivne galvanske korozije, uz rastvaranje manje plemenite komponente.



Nastali korozioni produkti mogu imati veoma štetno dejstvo po ljudski organizam. Merenja E_{kor} se izvode u rastvoru koji je po sastavu sličan rastvoru u ljudskom organizmu (na temperaturi 37 °C). Pored korozionog potencijala, kvantitativan pokazatelj sklonosti prema galvanskoj koroziji je struja koja protiče između komponenata implantanta, koje su u električnom kontaktu. Izmerena struja je posledica razlike u korozionim potencijalima komponenata implantanta. Tokom ispitivanja galvanske korozije implantanta koji se sastoji od više komponenata, na ukupnoj površini implantanta u kontaktu sa rastvorom dolazi do formiranja jedinstvenog (zajedničkog) korozionog potencijala. Komponente koje imaju negativniji E_{kor} polarišu se anodno sve do vrednosti jedinstvenog (zajedničkog) E_{kor} , pri čemu se dodatno rastvaraju. Sa druge strane, komponente koje imaju pozitivniju vrednost E_{kor} polarišu se katodno takođe do vrednosti jedinstvenog (zajedničkog) E_{kor} . Na tim komponentama odvija se katodna reakcija. Opisana ispitivanja piting korozije i galvanske korozije se izvode na izrađenim originalnim implantantima za kliničku upotrebu.

Korozioni potencijal i elektrohemijske metode određivanja brzine korozije

Voltometrija sa linearnom promenom potencijala (LSV) primenjena je za dobijanje Tafelovih polarizacionih dijagrama, u skladu sa standardom ASTM G102 [19]. Uzorak od čelika polarizovan je u oblasti potencijala $E = \pm 0.200$ V u odnosu na E_{kor} , uz registrovanje odgovarajuće gustine struje j . Gustina struje korozije j_{kor} direktno je određena sa Tafelovog dijagrama ekstrapolacijom linearnih delova anodne i katodne polarizacione krive do korozionog potencijala E_{kor} , kao što je prikazano na slici 12. Kao što se vidi na prikazanom dijagramu, $j_{kor} = 180 \mu\text{A cm}^{-2}$. Gustina struje korozije j_{kor} preračunata je u brzinu korozije v_{kor} prema standardu ASTM G102 [18]. Metoda se često koristi za koroziona ispitivanja različitih zona zavarenog spoja (ZUT, metal šava).



Slika 12. Eksperimentalni Tafelov dijagram za srednjelegirani ugljenični čelik [20].

ZAKLJUČAK

Pri odvijanju procesa korozije, na površini metala se spontano uspostavlja korozioni potencijal E_{kor} . Izmerena vrednost E_{kor} može se upotrebiti za procenu korozionog ponašanja metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. Merenje E_{kor} se izvodi jednostavno, uz pomoć referentne elektrode i uređaja za merenje potencijala (komercijalni multimetar). Primena merenja E_{kor} za procenu korozionog ponašanja metala i njihovih zavarenih spojeva je razmotrena na više primera: Pokazano je da se, na osnovu merenja promene E_{kor} , može suditi o tipu inhibitora korozije koji je prisutan u rastvoru.

Primenom metode elektrohemijskog šuma, na osnovu merenja E_{kor} , može se registrovati pojava lokalizovane korozije metala i legura i njihovih zavarenih spojeva.

Rizik od pojave vodonične krtosti čelika i njegovih zavarenih spojeva može se predvideti na osnovu merenja E_{kor} . Takođe je pokazano kako se na osnovu merenja korozionog potencijala može predvideti sklonost aluminijumskih legura serije 2000 i 7000 prema naponskoj koroziji.

Na osnovu vrednosti E_{kor} i E_{pit} može se odrediti sklonosti zavarenih spojeva nerđajućih čelika prema piting koroziji.



Na osnovu merenja E_{kor} čelične armature u betonu može se odrediti da li je došlo do aktivne korozije armature (rastvaranja čelične armature).

Na osnovu vrednosti korozionog potencijala zasnivaju se kriterijumi aktivne i protektorske katodne zaštite.

Na osnovu korozionog potencijala komponenta hirurških implanata može se proceniti opasnost od pojave galvanske korozije implanata.

Opisane primene merenja E_{kor} ilustrovane su eksperimentalnim rezultatima autora rada, kao i primerima iz literature.

Zahvalnica:

Rad je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, projekti TR 34028 i TR 34016.

LITERATURA

- [1] B.V. Jegdić, B.M. Bobić, M. Bošnjakov, Relationship between corrosion potential and diferent corrosion forms of metals, alloys and theirs welded joints-part I, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2 (2017) 65-76.
- [2] B. Bobić, B. Jegdić, J. Stevanović, Ispitivanje zaštitne sposobnosti inhibitora korozijeu razblaženim rastvorima hlorida, Zaštita materijala, 58 (2017) 41 – 46.
- [3] Corrosion metals and alloys-Guidelines for corrosion test by electrochemical noise measurements-ISO 17093.
- [4] Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement-ASTM G199
- [5] Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys-ASTM G61.
- [6] Corrosion of metals and alloys — Method of measuring the pitting potential for stainless steels by potentiodynamic control in sodium chloride solution-ISO 15158
- [7] B. Jegdić, B. Bobić, D. Nedeljković, B. Alić, Uticaj jačine struje zavarivanja na otpornost prema piting koroziji zavarenog spoja nerđajućeg čelika X5CrNi18-10, Zastita Materijala 58 (3) (2017) 297 – 303.
- [8] Laboratory Evaluation of Magnesium Sacrificial Anode Test Specimens for Underground Applications-ASTM G97.
- [9] Electrode Potential Measurement-ASTM G215.
- [10] Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete-ASTM-C876.
- [11] T. Yamaguchi, Y. Kato, S. Miyazato, M. Kanematsu, H. Minagawa, H. Kobayashi, M. Yamamoto, Technical committee on systematization of electrochemical measurement based on physicochemical theory, Report : JCI-TC134A-2015.
- [12] H.H. Uhlig, R.W. Revie, Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering—4th ed., John Wiley and Sons, New Jersey, 2008.
- [13] Metallic and other inorganic coatings - Simultaneous thickness and electrode potential determination of individual layers in multilayer nickel deposits (STEP test)-EN 16866.
- [14] Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique-ASTM F1624.
- [15] Process Control Verification to Prevent Hydrogen Embrittlement in Plated or Coated Fasteners-ASTM F1940.
- [16] Dostizhenija nauki o korrozii i tehnologija zaschiti ot nee. Korrozionnoe rastreskivanie metallov, (prevod sa Engleskog), Moskva, Metallurgija, 1985.
- [17] Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements to Determine the Corrosion Susceptibility of Small Implant Devices-ASTM F2129.
- [18] Evaluating the Potential for Galvanic Corrosion for Medical Implants-ASTM F3044.
- [19] Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements-ASTM G102.
- [20] B. Bobić, B. Jegdić, M. Burzić, Z. Damjanović, Corrosion Testing of Sa Gr. 91 Steel, Integritet i vek konstrukcija 17 (2017) 15-20.



Republičko takmičenje mladih zavarivača „Mladi zavarivač 2018“, Beograd, 23. Maj 2018

U sredu, 23. maja u okviru sajma tehnike na Beogradskom sajmu održano je republičko takmičenje „Mladi zavarivač 2018.“

Organizatori takmičenja bili su: Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS, Zajednica mašinskih škola Republike Srbije (ZMŠ RS) i Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), pokrovitelji takmičenja: Beogradski sajam, Nemačka organizacija za međunarodnu saradnju (GIZ) i Privredna komora Srbije a generalni sponzor: Proficut doo.

Takmičenje mladih zavarivača u Srbiji organizovano je, u tri postupka zavarivanja (111-REL; 135-MAG; 141-TIG). Takmičari su bili podeljeni u dve starosne kategorije: I kategoriju su činili učenici srednjih mašinskih škola u Srbiji a II kategoriju mladi zavarivači starosti do 22 god.

Najuspešniji takmičari u okviru I kategorije (učenici srednjih mašinskih škola u Srbiji)

Postupak 111 - REL		
Učenik	Mentor	Škola
1. Krstić Bojan	Ratomir Dumić	Srednja škola KRUPANj
2. Dragan Kužić	Radisav Vilotić	Tehnička škola Obrenovac
3. Tomić Dejan	Gajić Ivan	Tehnička škola „ Kolubara " Lazarevac

Postupak 135 - MAG		
Učenik	Mentor	Škola
1. Božanić Đorđe	Teofilović Dragiša	Mašinsko saobraćajna škola Čačak
2. Ramo Alijević	Snežana Pantić	Tehnička škola sa domom učenika „Nikola Tesla" Kostolac
3. Petrović Miloš	Trifunović Dejan	Tehnička škola Mladenovac

Postupak 141 - TIG		
Učenik	Mentor	Škola
1. Lazić Ivana	Gajić Ivan	Tehnička škola „ Kolubara " Lazarevac
2. Jovanović Jovan	Takov Miodrag	Tehnička škola Železnik
3. Petrović Bojan	Jankov Aleksandar	Srednja mašinska škola, NOVI SAD

Najuspešniji takmičari u okviru II kategorije (mladi zavarivači do 22god.)

Postupak 111 - REL		
Učenik	Mentor	Škola
1. Krstić Bojan	Ratomir Dumić	Srednja škola KRUPANj
2. Dragan Kužić	Radisav Vilotić	Tehnička škola Obrenovac
3. Gićanov Radovan	Lazić Luka	Tehnička škola „ Nikola Tesla " ŠID

Postupak 135 - MAG	
Takmičar	Poslodavac / Ustanova
1. Zoltan Kuti	Montavar Metalna Lola doo, Beograd
2. Danijel Despotović	Stelit 90, Obrenovac
3. Marko Milošević	Zoran Lukić (mentor), Tehnička škola Obrenovac

Postupak 141 - TIG	
Takmičar	Poslodavac / Ustanova
1. Marko Vasilčić	Via ocel doo, Beograd
2. Stefan Vasilčić	Via ocel doo, Beograd
3. Lazić Ivana	Gajić Ivan (mentor), Tehnička škola „ Kolubara " Lazarevac

Kao i na prethodnim takmičenjima i ovaj put smo imali goste iz inostranstva.

Takmičar	Mentor	Škola / Ustanova
Anastasija Ristevski	Andrej Vasle	Rep. SLOVENIJA Strojna šola Velenje
Krizsán Péter Zoltán	Dávid Attila	REp.Mađarska Szegedi Szakképzési Centrum Móravárosi Szakgimnáziuma és Szakközépiskolája
Rok Primožić	Rajko Brodej	Rep. SLOVENIJA Strojna šola Velenje

Dr. Leif Karlsson¹

WELDING DUPLEX STAINLESS STEELS – A REVIEW OF CURRENT RECOMMENDATIONS

ZAVARIVANJE DUPELKS ČELIKA- PREGLED SADAŠNJIH PREPORUKA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je preuzet iz časopisa: WELDING IN THE WORLD
(N°06 2012 Vol. 56)

Doc. IIW-2287, recommended for publication by Commission IX
"Behaviour of Metals Subjected to Welding."

Rad primljen / Paper received:

Januar 2018.

Adresa autora / Author's address:

¹ESAB AB, Göteborg (Sweden) (leif.karlsson@esab.se)

Ključne riječi: Potrošni materijali; Prslina; Dupleks nerđajući čelici; Uneta toplota; Ferit; Intermetalne faze; Mikrostruktura; Azot; Zaštitni gasovi; Zavarivanje; Metal šava; Zavarljivost

Key words: Consumables; Cracking; Duplex stainless steels; Energy input; Ferrite; Intermetallics; Microstructure; Nitrogen; Shielding gases; Welding; Weld metal; Weldability

NASTAVAK IZ PREDHODNOG BROJA 2.deo

Recommendations are grade-dependent but vary little within each group with some exceptions. Two major observations are

- 1) the lower maximum arc energy permitted for the more highly-alloyed grades and
- 2) the lower minimum arc energy applicable for grades higher in nitrogen.

It can also be noted that there is less agreement on recommendations for newer grades compared to older better established. The very recent 24 % Cr LDX 2404 grade was not launched when the questionnaire was distributed and is consequently not listed in Tables 2 and 3. Producers' data suggest similar weldability as for other high nitrogen grades with low or medium alloy content and the use of 2209-type consumables.

Where recommendations differ between sources upper and lower values have been included. Specific comments on grades have been included where suitable. Interpass temperatures and arc energies, both higher and lower than those indicated in Table 2, are sometimes used in applications where post-weld solution annealing is applied.

Preheating is usually not recommended. However, if welding is performed at temperatures lower than room temperature, it is advisable to preheat to 50-80 °C to ensure moisture free joint surfaces. In rare cases preheating to maximum 150 °C is used to minimize the risk of cracking when welding thick and/or heavily restrained work pieces with low arc energy to reduce cooling rate and stress levels.

CONTINUED FROM PREVIOUS ISSUE Part 2

Preporuke su zavisne od klase, ali se u okviru svake grupe vrlo malo razlikuju uz neke izuzetke. Dva glavna zapažanja su:

- 1) niža maksimalna energija luka je dopuštena za više visoko-legirane i
- 2) niža minimalna energija luka koja se primjenjuje za klase sa više azota.

Takođe se može primetiti da postoji manje saglasnosti sa preporukama za novije klase u odnosu na starije- bolje uspostavljene. Nedavna klasa 24% Cr LDX 2404 nije obuhvaćena upitnikom i posledično nije navedena u tabelama 2 i 3. Podaci proizvođača ukazuju na sličnu zavarljivost kao i kod drugih visoko azotnih klasa sa nižim i srednjim sadržajem legurajućih elemenata i upotrebom potrošnog materijala tipa 2209.

Kada se preporuke razlikuju između izvora, uključene su gornje i niže vrednosti. Specifični komentari o klasama su uključeni gde je to prikladno. Međuslojne temperature i energija luka, i više i niže od onih navedenih u Tabeli 2, ponekad se koriste tamo gde se primjenjuje rastvarajuće žarenje nakon zavarivanja.

Predgrevanje se obično ne preporučuje. Međutim, ako se zavarivanje vrši na temperaturama nižim od sobne temperature, preporučljivo je da se zagreje do 50-80 °C kako bi se obezbedile površine spoja bez vlage. U retkim slučajevima, predgrevanje do maksimalno 150°C koristi se da bi se smanjio rizik od prslina pri zavarivanju debelih i / ili jako uklještenih radnih komada sa niskom energijom luka kako bi se smanjile brzine hlađenja i nivoi napona.



3.2. Welding methods

The choice of welding method is governed by several factors, but generally the aim to produce a weld with desired properties with the highest possible productivity. High productivity in welding is usually synonymous with one or more of the following: high arc energy, high welding speed and narrow joint configuration. As pointed out above, welding of duplex stainless steels has to be performed in such a way that a suitable ferrite content and freedom from deleterious phases is ensured. This therefore imposes some restrictions in the use of welding methods, which to some extent is dependent on joint configuration, steel grade and thickness.

To generalize, all welding methods commonly used for stainless steels are usually well suited for duplex stainless steels. However, welding with low energy input methods should be used with caution and welding without filler material is generally not recommended, unless full solution heat treatment is to be performed [12]. As always there are no rules without exceptions as illustrated in Table 3. It can be noted that grades higher in nitrogen generally seem better suited for low arc energy/high dilution welding methods. Recommendations given within brackets in Table 3 indicate that caution has to be applied, opinions vary or that suitability depends on thickness. The fact that a certain welding method is not recommended is either due to lack of information or because it can result in a weldment with unsuitable microstructure and thereby less good properties. Readers are referred to steel producers for further details for specific grades.

Some comments received (slightly edited) regarding the choice of welding method are listed below.

TIG: Nitrogen additions in shielding and backing gas are beneficial to compensate for losses.

MIG/MAG: Synergic pulse machines recommended for best results.

Autogenous welding: Only recommended for thin material with special welding gas. Maximum 1.5 mm plate thickness is e.g. recommended for S32101/1.4162.

High power density welding processes: Risk of nitrogen loss and high ferrite contents.

Laser: CO₂ laser welding permits formation of more austenite contents compared to welding with highbrightness lasers such as fibre- and disk-lasers. PWHT is preferred.

Resistance welding: A double pulse technique reheating the weld is beneficial for improved austenite formation.

3.2 Metode-postupci zavarivanja

Izbor metoda-postupaka zavarivanja reguliše nekoliko faktora, ali uopšteno, cilj je stvaranje šava sa željenim svojstvima uz najvišu moguću produktivnost. Visoka produktivnost u zavarivanju je obično sinonim za jedno ili više od sledećeg: velika energija luka, velika brzina zavarivanja i konfiguracija uskog spoja. Kao što je već istaknuto, zavarivanje dupleks nerđajućih čelika mora biti izvedeno na način koji obezbeđuje odgovarajući sadržaj ferita i slobodu od štetnih faza. Ovo stoga nameće određena ograničenja u korišćenju postupaka zavarivanja, što u izvesnoj meri zavisi od konfiguracije spojeva, klase čelika i debljine.

Za generalizaciju, sve metode-postupci zavarivanja koje se najčešće koriste za nerđajuće čelike su obično pogodne za dupleks nerđajuće čelike. Međutim, zavarivanje sa niskom unetom energijom treba koristiti pažljivo, a ne preporučuje se zavarivanje bez dodatnog materijala, osim ako se ne izvodi termička obrada s potpunim rastvaranjem [12]. Kao i uvek, nema pravila bez izuzetaka kao što je ilustrovano u Tabeli 3. Može se primetiti da su klase sa više azota, uglavnom pogodnije za zavarivanje sa malom unetom energijom/velikim mešanjem. Preporuke navedene u zagradama u tabeli 3 pokazuju da se mora biti oprezan, mišljenja se razlikuju ili da pogodnost zavisi od debljine. Činjenica da se ne preporučuje određeni postupak zavarivanja je ili zbog nedostatka informacija ili zbog toga što može dovesti do zavarenog spoja sa neadekvatnom mikrostrukturom, a time i manje dobrim osobinama. Čitaoci se upućuju na proizvođače čelika za više detalja za određene klase.

Neki primljeni komentari (malo izmenjeni) u vezi sa izborom postupka zavarivanja su navedeni ispod.

TIG: Dodavanje azota u zaštitnom i podložnom gasu korisno je da se nadoknade gubici.

MIG / MAG: Sinergijske impulsne mašine se preporučuju za najbolje rezultate

Autogeno zavarivanje: preporučuje se samo za tanke materijale sa posebnim gasom za zavarivanje. Debljina ploče debljine 1,5 mm je npr. preporučuje se za S32101 / 1.4162.

Postupci zavarivanja visoke gustine energije: rizik gubitka azota i visok sadržaj ferita.

Laser: CO₂ lasersko zavarivanje dozvoljava stvaranje većeg sadržaja austenita u poređenju sa zavarivanjem sa laserima visoke osvetljenosti kao što su laser sa vlaknima i disk laseri. PWHT (TOPZ) je poželjna.

Elektrootporno zavarivanje: tehnika dvostrukog pulsiranja za zagrevanje šava je korisna za poboljšanje formiranja austenita.



UNS No. UNS br.	EN No. EN br.	Common steel designation Uobičajena oznaka čelika	Welding method												Comments/ Other methods Komentari
			MMA/REL	MIG/MAG		TIG	SAW/EPP	PAW/plazma	Autogenous	Laser	Hybrid	Electron beam/ES	Resistance welding		
				Solid wire	Cored wire										
Early grades / Ranije klase															
S31500	1.4424	3RE60	x	x		x									
Contemporary grades / Savremene klase															
Lean duplex, PRE_{N/W} ~ 20-30 / Siromašni duplex															
S32101	1.4162	LDX 2101	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	x	(x)	(x)	SAW not first choice EPP nije prvi izbor	
S32202	1.4062	UR2202	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	x	(x)	(x)		
S82011		ATI 2102	(x)	x	(x)	x	x	x	(x)	(x)	x	(x)			
S32304	1.4362	2304	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	ESW/SAW strip cladding/trakom	
S32003		ATI 2003		x		x	x	x	(x)	(x)	x	(x)			
Standard 22% Cr duplex, PRE_{N/W} ~ 35															
S31803	1.4462	2205	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	ESW/SAW strip cladding/trakom	
S32205	1.4462	2205	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	ESW/SAW strip cladding/trakom	
25% Cr duplex, PRE_{N/W} ~ 35-40															
S32550	1.4507	255	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Superduplex, PRE_{N/W} ~ 40-50															
S32520	1.4507	2507Cu	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)		
S32750	1.4410	2507	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	FSW possible -moguće	
S32760	1.4501	Zeron 100	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)		
S32906	1.4477	SAF 2906°	x		x	x	x	(x)						ESW strip cladding/trakom	
Hyperduplex, PRE_{N/W} ~ > 50															
S32707		SAF 2707 HD°				x	x								
S33207		SAF 3207 HD°				x									
<p>“x” = recommended. –preporučuje se “x)” = caution has to be applied, opinions vary or recommendations depend on thickness. -oprez, mišljenja su različita ili preporuke zavise od debljine “ ” = not recommended or lack of information.- ne preporučuje se ili nedostatak informacija</p>															

Table 3. Recommended welding methods for a selection of duplex stainless steel grades

Tabela 3. Preporučeni postupci zavarivanja za izbor klasa duplex nerđajućih čelika

3.3 Welding consumables

The choice of welding consumables is largely governed by the need to match base material strength, achieve sufficient toughness and ensure that corrosion properties meet requirements. Although welds often have very good corrosion resistance, it is hardly realistic to require matching properties unless a full solution treatment is performed after welding.

3.3. Potrošni materijali za zavarivanje

Izbor potrošnih materijala za zavarivanje je u velikoj mjeri regulisan potrebom za usklađivanjem čvrstoće osnovnih materijala, postizanjem dovoljne žilavosti i obezbeđenjem korozivnih svojstava tako da ispunjavaju zahteve. Iako zavareni često imaju vrlo dobru otpornost na koroziju, teško je zahtevati podudaranje svojstava, osim ako se ne sprovede termička obrada potpunog rastvaranja nakon zavarivanja.



In terms of guaranteeing good corrosion resistance, the choice of filler material and shielding/backing gas is dictated by insuring that the weld metal will have similar or higher contents of critical alloying elements such as Cr, Mo + W, N and for some applications Cu. In addition they need to be higher in elements promoting austenite formation, usually Ni, to avoid excessively high weld metal ferrite contents [12]. Filler materials for duplex stainless steels are therefore different in composition compared to the corresponding steel grade.

3.3.1 Filler materials

The standard recommendation is usually to use a "matching consumable". Matching should here be understood as matching in elements critical for corrosion resistance (Cr, Mo + W, N and sometimes Cu). The Ni-content is always higher compared to the steel, except for consumables designed for applications where a solution heat treatment is to follow the welding operation. Matching consumables are available for most major steels grades.

Within each group of duplex stainless steels, as defined in Table 1, experience has shown that consumables for grades with similar PRE_{NiW} values in practice are interchangeable although different opinions exist. The need for Cu-containing consumables for welding Cu-alloyed steels is sometimes disputed. A rational approach seems to be to use Cu-alloyed consumables whenever steels are specifically selected for applications where Cu is desired. Cu-alloyed consumables can, without any known deleterious effects, be used also for Cu-free steels.

The need for W additions to fillers when welding W-alloyed steels is another issue. W is basically added for three reasons, to differentiate grades for patent and licensing reasons, to improve corrosion resistance in the same manner as Mo and it is also claimed that W slows down precipitation of intermetallics in steels. Studies of weld metals have however not conclusively shown any beneficial effect of W on precipitation behaviour in weld metals [14-17]. As the PRE_{EW} formula suggests, consumables with or without W can therefore be used to weld W-containing or W-free steels, as long as the total W+Mo-content is sufficient to provide the desired corrosion resistance. It should be noted, however, that it is sometimes claimed that joining different superduplex grades, e.g. where W content differs, may increase the risk of intermetallic formation.

Što se tiče garantovanja dobre otpornosti na koroziju, izbor dodatnog materijala i zaštitnog / podložnog gasa diktiran je osiguranjem da će metal šava imati sličan ili viši sadržaj kritičnih legirajućih elemenata kao što su Cr, Mo + V, N i za neke primene Cu. Pored toga, oni moraju imati više elemenata koji promovišu formiranje austenita, obično Ni, kako bi se izbegao preterano visok sadržaj ferita u metalu šava.[12]. Zbog toga se dodatni materijali za dupleks nerđajuće čelike razlikuju u odnosu na odgovarajuću klasu čelika.

3.3.1 Dodatni materijali

Standardna preporuka je obično da se koristi "usklađeni potrošni materijal". Ovde treba podudaranje shvatiti tako da se uklapaju u elementima kritičnim za otpornost na koroziju (Cr, Mo + V, N i ponekad Cu). Ni-sadržaj je uvek veći u odnosu na čelik, osim potrošnih materijala dizajniranih za aplikacije gde je rešenje termička obrada koja prati operaciju zavarivanja. Uparivanje potrošnih materijala je dostupno za većinu glavnih klasa čelika.

U okviru svake grupe dupleks nerđajućih čelika, kako je definisano u Tabeli 1, iskustvo je pokazalo da su potrošni materijal za klase sa sličnim PRE_{NiW} vrednostima u praksi zamenjivi iako postoje različita mišljenja. Ponekad je sporna potreba za potrošnim materijalima koji sadrže Cu za zavarivanje čelika legiranih Cu. Izgleda da racionalni pristup koristi potrošne materijale sa Cu kad god su čelici posebno odabrani za primene gde je Cu poželjan. Cu-legirani potrošni materijal mogu se, bez ikakvih poznatih štetnih efekata, koristiti i za čelike bez Cu.

Druga stvar je potreba za dodacima W u dodatnim materijalima pri zavarivanju čelika legiranih sa W. W se u osnovi dodaje iz tri razloga, kako bi se razlikovale klase zbog patentnih razloga i razloga za licenciranje, kako bi se poboljšala otpornost na koroziju na isti način kao i Mo, a takođe se tvrdi da W usporava precipitaciju intermetalida u čeliku. Studije o metalu šava, međutim, nisu pokazale nikakav povoljan uticaj W na taloženje u metalu šava [14-17]. Kao što sugeriše PRE_{EW} formula, potrošni materijal sa ili bez W može se koristiti za zavarivanje čelika sa W ili čelika slobodnih od W, sve dok ukupni V + Mo-sadržaj bude dovoljan da obezbedi željenu korozionu otpornost. Treba istaći, međutim, da se ponekad tvrdi da se spajanjem različitih superdupleks klasa, npr. gde se sadržaj W razlikuje, može povećati rizik od intermetalnih formacija.



To summarize current practice without going into grades or specific fillers, typical recommendations are:

– *Early grades*: Matching consumables are used when required and available. The standard recommendation is however typically to use 22Cr9Ni3Mo+N type fillers.

– *Lean duplex stainless steels*: All lean duplex grades can, with few exceptions, be welded with fillers for 22 % Cr providing excellent mechanical and corrosion properties. However, lean duplex fillers (typically 23Cr7Ni+N) are more cost efficient and metallurgically designed to give the weld properties similar to the base material. There are some applications where Mo has a negative effect on corrosion resistance making 22Cr9Ni3Mo+N type fillers less suitable. The Mo-alloyed lean grade S32003 is preferably welded with Mo-containing 22 %Cr fillers to ensure matching corrosion resistance.

– *22 % Cr standard duplex stainless steels (including LDX 2404)*: These grades are welded with the well-established 22Cr9Ni3Mo+N type matching filler materials. Over-alloyed (superduplex) fillers are often recommended for root passes in single-side welds where corrosion resistance of the root is critical.

– *25 % Cr duplex stainless steels*: Common recommendations are, depending on grade, 25Cr7Ni2Mo+N type consumables or superduplex 25Cr fillers with or without Cu.

– *Superduplex stainless steels*: Superduplex grades are commonly welded with matching consumables. A number of filler grades are available with or without Cu and W. As discussed above these are in most cases interchangeable depending on requirements and application.

The S32906/1.4477 grade is due to its different alloying concept preferably welded with 29Cr8Ni2Mo+N fillers. Highly corrosion resistant Ni-base filler are sometimes used but Nb-alloyed grades should be used with care due the strong tendency of N and Nb to form nitrides thereby lowering corrosion resistance and toughness (Figure 3) [18-20]. Strength will also be undermatching compared to the steel. With the introduction of hyperduplex steels, and corresponding 27Cr9Ni5Mo+N fillers, these could be an alternative when overalloying is needed. However, there is little or no documented experience of this approach.

Hyperduplex stainless steels: These should be welded with hyperduplex fillers of the 27Cr9Ni5Mo+N type. Highly-alloyed Ni-base filler materials could in theory be used if lower strength is acceptable. The high N-content of the steels might however cause problems with porosity.

Da sumiramo dosadašnju praksu bez ulaska u klase ili specifične dodatne materijale, tipične preporuke su:

- *Ranije klase*: Usklađeni potrošni materijal se koristi kada je to potrebno i dostupno. Standardna preporuka je međutim uobičajeno korišćenje dodatnih materijala tipa 22Cr9Ni3Mo + N.

- *Siromašni dupleks nerđajući čelici*: Svi siromašni dupleks čelici mogu, uz nekoliko izuzetaka, biti zavareni dodatnim materijalom za 22% Cr pružajući odlične mehaničke i korozivne osobine. Međutim, siromašni dupleks dodatni materijali (obično 23Cr7Ni + N) su efikasniji i metalurški dizajnirani da daju karakteristike slične osnovnom materijalu. Postoje neke primene u kojima Mo ima negativan uticaj na otpornost na koroziju, čime su dodatni materijali tipa 22Cr9Ni3Mo + N manje pogodni. Mo-legiranu klasu S32003 je poželjno zavarivati 22% Cr dodatnog materijala sa sadržajem Mo, kako bi se osigurala odgovarajuća otpornost na koroziju.

- *22% Cr standardni dupleks nerđajući čelici (uključujući LDKS 2404)*: Ove klase se zavaruju pomoću usaglašenih dodatnih materijala tipa 22Cr9Ni3Mo + N. Prekomerno legirani (superdupleks) dodatni materijali se često preporučuju za korene zavare kod jednostranih zavarenih spojeva gde je otpornost na koroziju korena kritična.

- *25% Cr dupleks nerđajući čelici*: Uobičajene preporuke su, zavisno od kvaliteta, potrošni materijal 25Cr7Ni2Mo + N ili superdupleks 25Cr dodatni materijal sa ili bez Cu.

- *Superdupleks nerđajući čelik*: Superdupleks klase se često zavaruju sa odgovarajućim potrošnim materijalom. Dostupne su brojne vrste dodatnih materijala sa ili bez Cu i W. Kao što je već rečeno, u većini slučajeva su zamenjive u zavisnosti od zahteva i primene. Klasu S32906 / 1.4477 je, zbog svog različitog koncepta legiranja, poželjno zavarivati sa 29Cr8Ni2Mo + N dodatnim materijalima. Ponekad se upotrebljava dodatni materijal na bazi Ni, otporniji na koroziju, ali za klase legirane sa Nb ga treba koristiti pažljivo zbog jake tendencije N i Nb da formiraju nitride čime se smanjuju otpornost na koroziju i žilavost (slika 3) [18-20]. Čvrstoća će takođe biti manja u odnosu na čelik. Uz uvođenje hiperdupleks čelika i odgovarajućih dodatnih materijala 27Cr9Ni5Mo + N, to bi mogla biti alternativa kada je potrebno. Međutim, malo ili ne postoji dokumentovano iskustvo ovakvog pristupa.

Hiperdupleks nerđajući čelici: Njih treba zavarivati sa hiperdupleks dodatnim materijalom tipa 27Cr9Ni5Mo + N. Visokolegirani materijali na bazi Ni mogu se teorijski koristiti ukoliko je prihvatljiva niža čvrstoća. Međutim, visok sadržaj N u čeliku može uzrokovati probleme sa poroznošću.



Dissimilar joining: Joining duplex stainless to unalloyed, low alloyed or to other stainless steels is rarely a problem as long as a post-weld heat treatment is not required. Usually the duplex consumable recommended for the particular duplex stainless steel grade is used. A standard 22Cr9Ni3Mo+N type or over-alloyed stainless fillers such as 23Cr12Ni or 23Cr12Ni+Mo are also common choices. Ni-base consumables, preferably Nb-free, are recommended for joining duplex to Ni-base alloys.

Raznorodni spojevi: Spajanje dupleks nerđajućeg čelika sa nelegiranim, nisko legiranim ili drugim nerđajućim čelikom retko je problem dokle god nije potrebna termička obrada posle zavarivanja. Obično se preporučuje dupleks potrošni materijal za poseban dupleks čelik koji se koristi. Standardni tip 22Cr9Ni3Mo+N ili vise legirani nerđajući dodatni materijali kao 23Cr12Ni ili 23Cr12Ni+Mo su takođe čest izbor. Potrošni materijali na bazi Ni, poželjno bez Nb, se preporučuju za spajanje dupleks čelika sa legurama na bazi Ni.

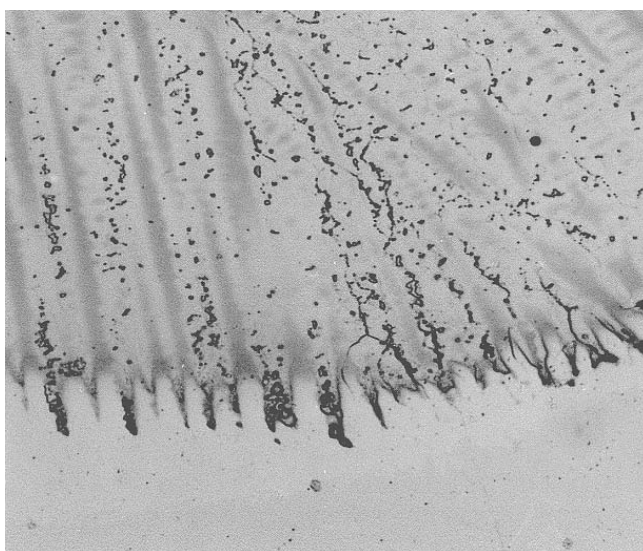


Figure 3. Nb- and N-rich precipitates next to fusion boundary in superduplex steel TIG-welded with an alloy 625 type Ni-base filler wire

Slika 3. Precipitati bogati Nb i N u blizini linije stapanja kod superdupleks čelika zavarenog TIG postupkom sa žicom na bazi Ni legure tipa 625

3.3.2 Shielding and backing gases

Two trends emerge when comparing typical recommendations today and at the time of the duplex conference in Beaune in 1991 [4]. Firstly nitrogen-containing gases are today commonly used for shielding and purging. Nitrogen additions are more or less standard practice in TIG welding but also used in plasma welding. However, MIG/MAG welding with nitrogen containing shielding gases is generally not recommended due to the risk of porosity. The second trend is to use multicomponent gases with He-additions to improve weld pool fluidity and to permit higher welding speeds.

Recommendations vary somewhat between grades depending on the need to compensate potential losses of nitrogen or improve austenite formation. The dividing line is therefore usually between

3.3.2 Zaštitni i podložni gasovi

Dve trenda se pojavljuju kada se upoređuju tipične preporuke danas i u vreme konferencije o dupleks čelicima u Beaune-u, 1991.[4]. Prvo, gasovi koji sadrže azot se danas često koriste za zaštitu i čišćenje. Dodavanje azota je više ili manje standardna praksa kod TIG zavarivanja, ali se takođe koristi u plazma zavarivanju. Međutim, MIG / MAG zavarivanje sa zaštitnim gasovima koji sadrže azot se generalno ne preporučuje zbog rizika od poroznosti. Drugi trend je korišćenje višekomponentnih gasova sa dodatkom He za poboljšanje tečljivosti zavarivačke kupke i omogućavanje veće brzine zavarivanja.

Preporuke se delimično razlikuju između klasa u zavisnosti od potrebe za kompenzacijom potencijalnih gubitaka azota ili poboljšanjem formiranja austenita. Zbog toga je linija razdvajanja, najčešće između novijih klasa sa visokim



newer high-nitrogen grades and older grades lower in nitrogen rather than between groups as presented in Table 1. Typical recommendations are consequently summarized in Table 4 based on welding methods rather than groups of steels. Brackets indicate the second choice, where practices vary or where recommendations depend on steel grade.

Root shielding with a purging gas is, as always in welding of stainless steels, critical for optimum corrosion resistance in particular for single sided welds. Ar, He or mixtures thereof can be used but He is seldom an option for cost reasons.

Nitrogen containing purging gases are often recommended for best corrosion resistance but is sometimes claimed to give rise to a yellow discoloration that is not found with Ar. Addition of hydrogen to the purging gas is effective at reducing oxidation and 90 % N₂ + 10 % H₂ is therefore sometimes recommended. However, gases including hydrogen are not always allowed due to the risk of hydrogen embrittlement [7].

3.4 General recommendations

In most respects duplex should be treated similar to any stainless steel when it comes to handling and preparation for welding. A few points not discussed above are listed below for completeness.

– *Joint design*: To achieve good penetration a slightly wider root gap, a smaller land and a joint angle about 10° larger than for standard stainless joints, should be used.

– *Joint preparation*: Standard joint preparation methods used for stainless steels are suitable also for duplex stainless steels. Oxides resulting from thermal cutting shall be removed before welding.

– *Tack welding*: Tacks shall be longer and they should have a shorter distance compared to tacks in austenitic stainless steel grades.

– *Cleaning*: Cleaning joints, before and after welding, follows standard stainless practice.

sadržajem azota i starijih klasa sa nižim sadržajem azota, a ne između grupa kao što je prikazano u tabeli 1. Tipične preporuke su dakle rezimirane u tabeli 4 na postupke zavarivanja, a ne prema grupama čelika. Podaci u zagradama ukazuju na drugi izbor, gde se prakse razlikuju ili gde preporuke zavise od klase čelika.

Zaštita korena gasom za čišćenje je, kao i uvek kod zavarivanja nerđajućih čelika, kritična za optimalnu otpornost na koroziju, posebno za jednostrano zavarene spojeve. Ar, He ili njihove mešavine mogu se koristiti, ali He retko predstavlja opciju zbog troškova.

Gasovi za čišćenje koji sadrže azot, često se preporučuju, ali se ponekad tvrdi da dovode do promene boje u žuto koje nije pronađeno sa Ar. Dodavanje vodonika u gas za čišćenje je efikasno u smanjenju oksidacije, pa se ponekad preporučuje 90% N₂ + 10% H₂. Međutim, gasovi, uključujući vodonik, nisu uvek dozvoljeni zbog rizika od nastanka vodonične krtosti [7].

3.4. Opšte preporuke

U većini aspekata duplekse treba tretirati slično bilo kojem nerđajućem čeliku kada je u pitanju rukovanje i priprema za zavarivanje. Nekoliko tačaka koje nisu gore navedene, date su zbog potpunosti.

- *Oblik spoja*: Da bi se postiglo dobro uvarivanje, trebalo bi koristiti nešto veći zazor u korenu, manju površinu i ugao spoja veći za oko 10 ° nego kod standardnih nerđajućih spojeva.

- *Priprema spoja*: Standardne metode pripreme spojeva za nerđajuće čelike pogodne su i za dupleks nerđajuće čelike. Okside nastale usled termičkog rezanja, treba ukloniti pre zavarivanja.

- *Pripojni zavari*: Pripoji treba da budu duži i da imaju kraće rastojanje u poređenju sa pripojima u austenitnim klasama nerđajućih čelika.

- *Čišćenje*: Čišćenje spojeva, pre i posle zavarivanja, prati standardnu praksu za nerđajuće čelike.



Shielding gas Zaštitni gas	Welding method-Postupak zavarivanja						Rootshielding- Zaštita korena
	MIG/MAG		TIG	PAW	Laser ^c	Hybrid	
	Solid wire	Cored wire					
Ar			(x)	(x) ^b	x	(x)	x
He					x	x	(x)
CO ₂		(x)					
N ₂					x		x
Ar + 1-2 % O ₂	x				(x)	(x)	
Bban Ar + 2-3 % CO ₂	x				(x)	(x)	
Ar + 16-25 % CO ₂		x					
Ar + 1-3 % N ₂	(x) ^a		x	x ^b	(x)		x
Ar + 20-30 % He				(x) ^b	x	x	(x)
Ar + 30 % He + 1-3 % CO ₂	x				(x)		
Ar + 30 % He + 2 % N ₂	(x) ^a		x	x ^b	(x)	x	(x)
Ar + 30 % He + 1-2 % N ₂ + 1-2 % CO ₂	(x) ^a						

^a Generally not recommended due to risk of porosity.- Generalno se ne preporučuje zbog rizika od poroznosti
^b Typically the same gas is used as plasma and shielding gas.-Obično se isti gas koristi I kao plazma I kao zaštitni gas
^c Depends on type of laser and laser power.-Zavisno od tipa i snage lasera
"x" = recommended.-Preporučuje se
"(x)" = caution has to be applied, opinions vary or recommendations depend on thickness.- Potreban oprez, mišljenja se razlikuju ili preporuke zavise od debljine
" " = not recommended or lack of information- Ne preporučuje se ili nedostatak informacija

Table 4. Examples of recommended shielding gases

Tabela 4. Primeri preporučenih zaštitnih gasova

4 Welding related problems

Overall modern duplex stainless steels have good weldability and welding is generally seen as much less of a problem when compared to the time of the duplex conference in Beaune in 1991. Nevertheless welding has to be performed in such ways that weld imperfections are avoided. As most grades are high in nitrogen, porosity can occur and is most commonly observed with thick beads and high welding speeds. Welding duplex stainless steels also require understanding of the need to weld in such a way that a balanced microstructure free from deleterious phases is achieved. Problems therefore typically occur due to lack of knowledge and training, or due to neglecting the need to follow recommendations. One such example is TIG re-melting to improve weld profiles, which inevitably leads to poor corrosion resistance due to high ferrite content unless filler is added or nitrogen containing shielding is used.

Most problems are commonly seen when either too low or excessively high heat input is used, when dilution is too high and when too much nitrogen is lost from the weld pool.

4 Problemi vezani za zavarivanje

Svi savremeni dupleks nerđajući čelici imaju dobru zavarljivost i zavarivanje se uopšteno vidi kao manji problem u poređenju sa vremenom održavanje konferencije o dupleks čelicima u Beaune-u, 1991. godine. Bez obzira na to, zavarivanje se mora izvoditi na takav način da se izbegnu nesavršenosti u zavarenim spojevima. Pošto većina klasa ima visok sadržaj azota, može doći do poroznosti i najčešće se javlja na debelim zavarima i pri velikim brzinama zavarivanja. Zavarivanje dupleks nerđajućih čelika takođe zahteva razumevanje potrebe za postizanjem uravnotežene mikrostrukture, bez štetnih faza. Zbog toga se problemi obično javljaju zbog nedostatka znanja i obuke, ili zbog zanemarivanja potrebe da se prate preporuke. Jedan od takvih primera je TIG pretapanje radi poboljšanja profila šava, što neizbežno vodi do loše otpornosti na koroziju usled visokog sadržaja ferita, osim ako se ne koristi dodatni materijal ili zaštitni gas koji sadrži azot. Većina problema se najčešće javlja kada se koristi previše niska ili prekomerno velika količina unete toplote, kada je mešanje preveliko i kada se previše azota izgubi iz zavarivačke kupke.



4.1 Loss of nitrogen and low energy input

In the author's experience the most frequent problem is poor corrosion resistance, typically in ASTM G48 testing of TIG welds. Examples of pitting attack in weld metal are shown in Figure 4.

The common denominator of these problems is loss of nitrogen and/or too rapid cooling. As shown in Figure 5 this results in a highly ferritic as-deposited microstructure and copious amounts of secondary austenite in reheated regions, sometimes together with nitride formation. The secondary austenite is low in nitrogen and hence pitting corrosion resistance will be poor in these regions [9].

The remedy is to use higher energy input often in combination with an N-containing shielding gas to enhance austenite formation. In 22 % Cr steels, root passes are often welded with superduplex filler to further improve the root side corrosion resistance.

4.2 Intermetallic phase formation

In superduplex and hyperduplex grades intermetallic phase formation (Figure 6) can occur if cooling is too slow or if a weld region is reheated repeatedly in the range of approximately 600-1000 °C [11]. Whenever intermetallic phases, such as sigma and chi, form toughness and corrosion resistance will suffer. A strict control of welding procedure is therefore required for highly-alloyed grades.

Not only must the upper recommended energy input and interpass temperature limits be adhered to, it is also important to plan the bead sequence to avoid unnecessary repeated reheating of preceding beads. A too small root bead followed by a larger "hot pass" should normally be avoided.

4.1 Gubljenje azota i mali unos energije

Prema autorovom iskustvu, najčešći problem je loša otpornost na koroziju, obično pri ispitivanju prema ASTM G48 TIG-om zavarenih spojeva. Primeri pitinga u metalu šava su prikazani na slici 4. Zajednički imenitelj ovih problema je gubitak azota i / ili suviše brzo hlađenje. Kao što je prikazano na slici 5, ovo rezultuje u visoko feritnoj mikrostrukturi koja je deponovana kao i na velikim količinama sekundarnog austenita u ponovno zagrevanim oblastima, ponekad zajedno sa formiranjem nitrida. Sekundarni austenit ima nizak sadržaj azota, a samim tim i otpornost na koroziju će biti loša u ovim regionima [9].

Lek je korišćenje veće energije često u kombinaciji sa zaštitnim gasom koji sadrži N za poboljšanje formiranja austenita. Kod 22% Cr čelika, koreni prolazi se često zavaruju superdupleksnim dodatnim materijalima kako bi se dodatno poboljšala otpornost na koroziju na strani korena.

4.2 Stvaranje intermetalnih faza

Kod superdupleksa i hiperdupleksa može doći do stvaranja intermetalne faze (slika 6) ako je hlađenje suviše sporo ili ako se oblast zavarivanja ponovo zagreva u opsegu od oko 600-1000 °C [11]. Kad god postoje intermetalne faze, kao što su sigma i chi, žilavost i otpornost na koroziju će se umanjivati. Zbog toga je stroga kontrola tehnologije zavarivanja potrebna za visokolegirane klase.

Ne samo da se mora pridržavati gornjih preporučenih granica unete energije i međuslojne temperature, već je važno i planirati redosled zavara kako bi se izbeglo nepotrebno ponovljeno grejanje prethodnih zrna. Uobičajeno treba izbegavati premali koreni zavar praćen većim "toplim prolazom".

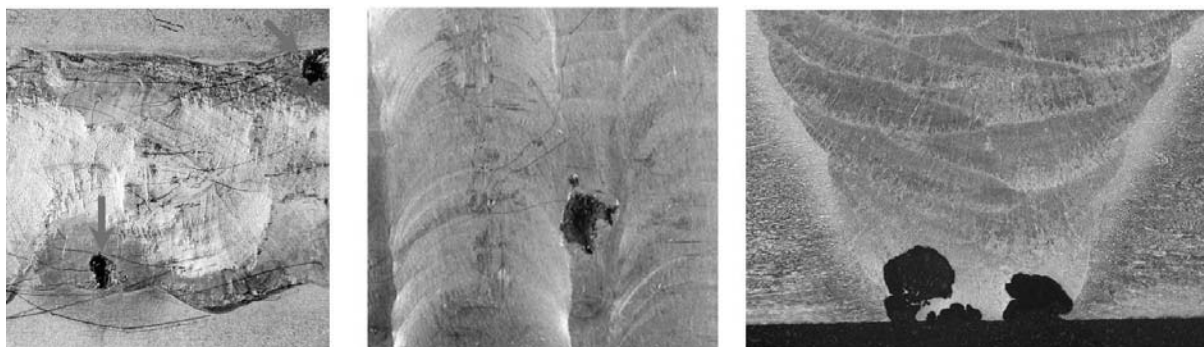
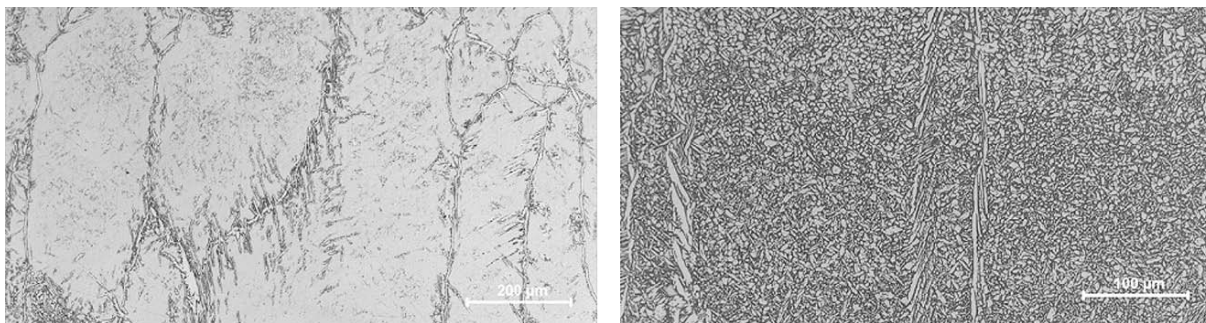


Figure 4. Examples of pitting attack in TIG-welded 22% Cr duplex and superduplex stainless steels seen after ASTM G48 testing

Slika 4. Primeri piting korozije na TIG-om zavarenom 22% Cr dupleks i superdupleks nerđajućem čeliku posle ispitivanja prema ASTM G-48



Massive formation of secondary austenite can be seen in the reheated bead
 Masivna formacija sekundarnog austenita se može videti u ponovo zagrejanom zavaru
 a) Last bead - Poslednji zavar b) Reheated beads-Ponovno zagrejani zavar

Figure 5. Microstructure of last and reheated beads in 22% Cr duplex stainless steel TIG-welded with a 22Cr9Ni3Mo+N type filler

Slika 5. Mikrostruktura poslednjeg i ponovo zagrejanog zavara na 22% Cr dupleks nerđajućem čeliku zavarenom TIG-postupkom sa dodatnim materijalom tipa 22Cr9Ni3Mo+N

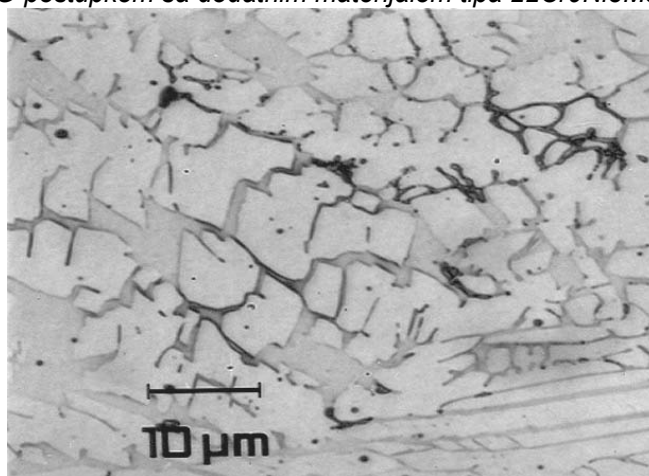


Figure 6. Intermetallic phase (dark etching) formation in a repeatedly reheated region of a superduplex weld

Slika 6. Intermetalna faza (tamno nagrižena) stvorena na ponovno zagrejanom zoni superdupleks metala šava
 4.3 Solidification cracking 4.3 Solidifikacione prsline

Solidification cracking is a minor problem in welding of duplex stainless steels. However, this is not to say it cannot occur under certain conditions. A high restraint in combination with deep and narrow beads is a classical condition when cracking can become a problem with conventional arc welding methods. This tendency is generally counteracted by modifying the bead profile and for thick material sometimes using a moderate preheat.

Two less well-known situations when hot cracking sometimes is observed is with very shallow beads or in highly ferritic welds. The first case is illustrated in Figure 7 for a submerged arc weld in 22 % Cr duplex material. Typically hot cracks appear under high restraint situation, with shallow beads forming "wings". Cracking is either found in the "wing" region where stresses will act perpendicular to the vertical ferrite grains or in the transition region between the "wing" and the central penetrating portion of the weld. These cracks can be avoided

Solidifikaciona prsline je manji problem kod zavarivanja dupleksnih nerđajućih čelika. Međutim, to ne znači da se to ne može dogoditi pod određenim uslovima. Visoka ograničenost u kombinaciji sa dubokim i uskim zavarima je klasično stanje kada prsline može postati problem konvencionalnim metodama elektrolučnog zavarivanja. Ova tendencija se generalno suprotstavlja modifikacijom profila zavara i ponekad kod debelih materijala uz umereno zagrevanje.

Dve manje poznate situacije kada se ponekad primećuje vruća prsline su vrlo plitki zavari, ili kod zavarenih spojeva sa visokim feritom. Prvi slučaj je ilustrovan na slici 7 za EPP šav od 22%Cr dupleks materijala. Tipične vruće pukotine pojavljuju se pod visokim uslovima ukrućenja, sa plitkim zavarima koji formiraju "krila". Prsline se nalaze ili u oblasti "krila" gde će naponi delovati normalno na vertikalna feritna zrna ili u prelaznoj oblasti između "krila" i centralnog prodirućeg dela zavara. Ove



by modifying welding parameters to avoid “wing” formation.

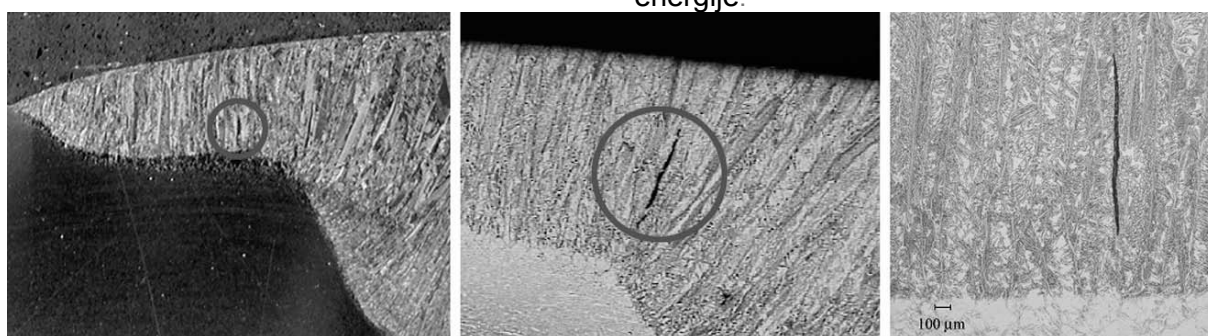
The second condition when hot cracks appear is most commonly seen with low energy input and high dilution welding situations. Two examples are shown in Figure 8 for autogenous laser welding and hybrid welding of 22 % Cr duplex material. It is well-known that hot cracking resistance decreases when going from austenitic weld metals with some ferrite towards fully ferritic compositions [21].

The common solution is therefore to modify the welding procedure, to permit formation of more austenite, by adding more austenite promoting elements through shielding gas and filler wire and by increasing the energy input.

prsline se mogu izbeći modifikacijom parametara zavarivanja radi izbegavanja nastanka krila.

Drugi uslov kada se pojavljuju vruće prsline se najčešće vide pri malom unosu energije i velikim mešanjem. Dva primera su prikazana na slici 8 za autogeno lasersko zavarivanje i hibridno zavarivanje 22%Cr dupleks materijala. Poznato je da se otpornost na vruće prsline smanjuje pri izlasku iz austenitnog metala šava sa nešto ferita prema potpuno feritnim sastavima [21].

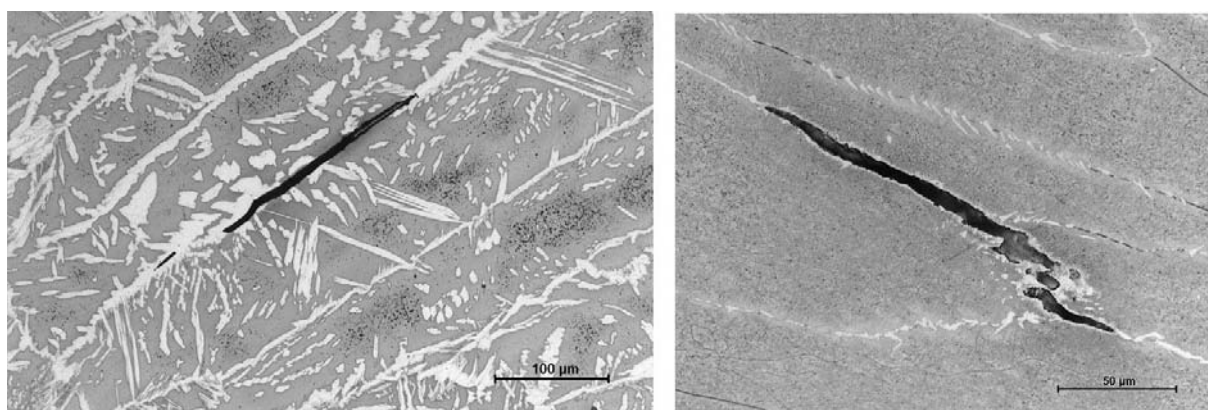
Zbog toga je zajedničko rešenje, modifikovati postupak zavarivanja, kako bi se omogućilo formiranje više austenita, dodavanjem više elemenata koji promovišu austenit kroz zaštitni gas i dodatni materijal i povećanjem količine unete energije.



The red circles show regions with solidification cracks in the macrographs (left and centre). A close-up of a crack is seen in the micrograph (right).

Crveni krugovi pokazuju regione sa solidifikacijskim prslinama na makrografima (levo i centar). Na mikrofotografiji (desno) vidi se krupna prslina.

Figure 7. Hot cracks in submerged arc welds in 22 % Cr duplex stainless steel
Slika 7. Vruće prsline kod EPP zavarenih spojeva na dupleksnerđajućem čeliku 22% Cr



The energy input was 0.6 kJ/mm.
Uneta energija 0,6kJ/mm
a) Hybrid weld -Hibridno zavareni spoj

The energy input was 0,1 kJ/mm
Uneta energija 0,1kJ/mm
b) Laser weld –Laserom zavareni spoj

Figure 8. Hot cracks in hybrid and laser welds in 22 % Cr duplex stainless steel
Slika 8. Vruće prsline kod hibridno i laserom zavarenih spojeva od dupleks nerđajućih čelika 22%Cr



5. Concluding remarks

Many important aspects of welding duplex stainless steels have not, or only briefly, been touched on. These include for example standardization, suitability and reliability of various test methods, hydrogen effects, postweld straightening and cleaning, characterization and prediction of microstructures and properties [22-25].

Many of these aspects were discussed in papers at the recent conference on duplex stainless in Beaune, France, in 2010 and the reader is referred to the proceedings for more detail [4].

Generally the knowledge about what can be done and what should be avoided is at a high level among experienced users and these consequently report very few welding related problems. Nevertheless, as discussed above, duplex stainless steels require understanding of how welding will affect the microstructure and properties.

New users/fabricators therefore occasionally experience problems when cutting corners to save time.

The following is the summary of some of the more important aspects discussed in the paper:

- The range of duplex grades has in recent years been extended both with lean less-alloyed grades
- The newer as well as more established grades are welded with excellent result provided basic rules and recommendations are followed.
- Generally there is consensus on welding recommendations but variations reflecting differences in practices exist in particular for newer steel grades.
- Limits in allowable energy inputs are less well documented for some of the newer grades.
- Welding related problems are most commonly encountered when too low or excessively high heat input is used, when dilution is too high or when too much nitrogen is lost from the weld pool. In particular resistance to localized corrosion and impact toughness is affected.

Acknowledgements

The author is grateful for input and assistance from experts within the worldwide welding community including members of IIW Sub-Commission IX-H. A particular thank is extended to the following for providing detailed information on steels and welding recommendations: R. Sölch (Butting, Germany), J. Dunn (ATI Allegheny Ludlum, USA), E. Westin (Outokumpu Stainless AB, Sweden) J. Ingemansson (Avesta Welding, Sweden) Z. Zhou (Sandvik Materials Technology, Sweden), A. Fatica (Industeel, ArcelorMittal group, France), P. Woollin (TWI, UK). S. Wessman (Swerea-KIMAB AB, Sweden) kindly provided micrographs of electroslag strip welds.

5. Završne napomene

Mnogi važni aspekti zavarivanja dupleks nerđajućih čelika nisu ili su samo kratko dodirnuti. Ovo uključuje, na primer, standardizaciju, pogodnost i pouzdanost različitih metoda ispitivanja, efekte vodonika, ispravljanje posle zavarivanja i čišćenje, karakterizaciju i predviđanje mikrostruktura i svojstava [22-25].

Mnogi od ovih aspekata diskutovani su u radovima na nedavnoj konferenciji o dupleks nerđajućim čelicima u Beaune-u, u Francuskoj 2010. godine, a čitalac se upućuje na zbornik radova za više detalja [4].

Uopšteno, znanje o tome šta se može uraditi i šta se treba izbegavati je na visokom nivou među iskusnim korisnicima i zbog toga oni prijavljuju vrlo malo problema sa zavarivanjem. Ipak, kao što je već rečeno, dupleks nerđajući čelici zahtevaju razumevanje toga kako zavarivanje utiče na mikrostrukturu i svojstva.

Iz tog razloga, novi korisnici / proizvođači povremeno imaju problema prilikom sečenja uglova kako bi uštedeli vreme.

Sledeće je pregled nekih od najvažnijih aspekata koji su razmatrani u članku:

- Opseg klasa dupleksa se poslednjih godina proširio i sa manje legiranim klasama
- Novije i bolje utvrđene klase su zavarene sa odličnim rezultatom uz poštovanje osnovnih pravila i preporuka.
- Uopšteno postoji konsenzus o preporukama za zavarivanje, ali varijacije koje odražavaju razlike u praksi postoje, posebno za nove klase čelika.
- Granice dozvoljenih ulaza energije su manje dokumentovane za neke od novijih klasa.
- Problemi sa zavarivanjem najčešće se javljaju kada se koristi previše mali ili prekomerni unos toplote, kada je mešanje preveliko ili kada se previše azota izgubi iz zavarivačke kupke. Konkretno je ugrožen otpor lokalizovanoj koroziji i udarna žilavost.

Zahvalnost

Autor je zahvalan za unos i pomoć stručnjaka u okviru svetske zajednice za zavarivanje, uključujući i članove podkomisije IIW-IX-H. Posebno se zahvaljujemo na pružanju detaljnih informacija o čeliku i preporukama za zavarivanje: R. Solch (Butting, Nemačka), J. Dunn (ATI Allegheny Ludlum, SAD), E. Vestin (Outokumpu Stainless AB, Švedska) J. Ingemansson (Avesta Velding, Švedska) Z. Zhou (Sandvik Materials Technology, Švedska), A. Fatica (Industeel, ArcelorMittal grupa, Francuska), P. Voollin (TVI, UK). S. Vessman (Sverea-KIMAB AB, Švedska) koji je ljubazno obezbedio mikrofotografije EPP zavarenih spojeva.



REFERENCES LITERATURA

- [1] Charles J.: Duplex stainless steels, a review after DSS'07 held in Grado, Proceedings Stainless Steel World'2007, Maastricht, The Netherlands, Nov. 2007, Paper K05.
- [2] Benson M.: Applications utilising the advantageous properties of LDX 2101, Proceedings Stainless Steel World'2005, Maastricht, The Netherlands, Nov. 2005, pp. 171-176.
- [3] Stenvall P. and Holmquist M.: Weld properties of Sandvik SAF 2707, Proceedings Duplex 2007, Grado, Italy, June 2007.
- [4] Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune, France, Oct. 1991.
- [5] Charles J.: The duplex stainless steel family, Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune, France, Oct. 1991, vol. 1, pp. 3-48.
- [6] Charles J.: Superduplex stainless steels: structure and properties, Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune, France, 1991, vol. 1, pp. 151-168.
- [7] van Nassau L., Meelker H. and Hilkes J.: Welding duplex and super-duplex stainless steels, Doc. IIW-1165, Welding in the World, 1993, vol. 31, no. 5, pp. 323-343.
- [8] Herbsleb G. and Schwaab P.: Precipitation of intermetallic compounds, nitrides and carbides in AF 22 duplex steel and their influence on corrosion behaviour in acids, Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'82, St Louis, USA, Oct. 1982, pp. 15-40.
- [9] Nilsson J.-O., Karlsson L. and Andersson J.-O.: Secondary austenite formation in duplex stainless steel weld metal and its relation to pitting corrosion, Materials Science and Technology, March 1995, vol. 11, pp. 276-283.
- [10] Karlsson L.: Plenary paper: Duplex stainless steel weld metals – Effects of secondary phases Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'97, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1997, pp. 43-58.
- [11] Karlsson L.: Review: Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steels and weld metals – Metallurgy, influence on properties, welding and testing aspects, Doc. IIW-1419, Welding in the World, 1999, vol. 43, no. 5, pp. 20-41.
- [12] EN 1011-3, Welding – Recommendations for welding of metallic materials, Part 3: Arc welding of stainless steels.
- [13] Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, IMO, London, England, Second edition, 2009.
- [14] Hertzman S., Nilsson M. and Jargelius-Pettersson R.: Influence of W and Cu on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance in superduplex weld metals, Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'94, Glasgow, Scotland, Nov. 1994, vol. 1, Paper 1.
- [15] Nilsson J.-O., Huhtala T., Jonsson P., Karlsson L. and Wilson A.: Structural stability of superduplex stainless weld metals and its dependence on tungsten and copper, Metallurgical and Materials Transactions A, Aug. 1996, vol. 27A, pp. 2196-2288.
- [16] Hertzman S., Huhtala T., Karlsson L., Nilsson J.-O., Nilsson M., Jargelius-Pettersson R. and Wilson A.: Microstructure-property relations of Mo- and W-alloyed super duplex stainless weld metals, Materials Science and Technology, 1997, vol. 13, no. 7, pp. 604-613.
- [17] Wessman S., Karlsson L., Pettersson R. and Östberg A.: Study of the influence of tungsten in superduplex stainless steel welds, Proceedings International Conference Duplex World 2010, Beaune, France, Oct. 2010, pp. 1077-1088.
- [18] Karlsson L., Rigdal S. and Andersson S.L.: Welding of highly alloyed austenitic and duplex stainless steels, Doc. IIW-1333, Welding in the World, 1997, vol. 39, no. 2, pp. 99-110.
- [19] Karlsson L., Andersson S.L. and Rigdal S.: Welding superduplex stainless steels with Ni-base consumables – Optimising toughness and corrosion resistance, Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'97, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1997, pp. 433-443.
- [20] Bonnefois B., Charles J., Coudreuse L.: Welding superduplex stainless steels with Ni base filler materials: Innovation in the consumables and industrial experience, Proceedings International Conference Duplex 2000, Venice, Italy, Oct. 2000, pp. 617-626.
- [21] Matsuda F., Nakagawa H., Kato I. and Murata Y.: Solidification crack susceptibility in weld metals of duplex stainless steels, Transactions JWRI, 1986, vol. 15, no. 1, pp. 17-30.
- [22] Kotecki D.J.: Predicted and measured FN in specifications - A position statement of the experts of IIW Commission IX, Doc. IIW-1420, Welding in the World, 1999, vol. 43, no. 2, pp. 8-10.
- [23] van Nassau L. and Meelker H.: Position statement on the specification of metallographic properties of weldments in duplex and superduplex stainless steel, Doc. IIW-1421, Welding in the World, 1999, vol. 43, no. 2, pp. 11-12.



[24] ISO/TR 22824:2003, Welding consumables – Predicted and measured FN in specifications - A position statement of the experts of IIW Commission IX.

Additional literature

The interested reader is referred to the Proceedings of Duplex Conferences for further details. These give an excellent overview of the development of steels, applications and welding experiences during the last four decades:

Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'82, St Louis, USA (Oct. 1982).
 Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'86, The Hague, Netherlands (Oct. 1986).
 Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'91, Beaune, France (Oct. 1991).
 Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'94, Glasgow, Scotland (Nov. 1994).

[25] Pettersson C.-O., Böllinghaus T. and Kannengiesser T.: Corrosion testing of welds, a review of methods, Doc. IIW-1804, Welding in the World, 2007, vol. 51, no. 7/8, pp. 79-106.

Dodatna literatura

Zainteresovani čitalac se upućuje na Zbornik radova sa Konferencije o dupleks čelicima za više detalja. Oni daju odličan pregled razvoja čelika, primena i iskustava zavarivanja tokom poslednje četiri decenije:

Proceedings Conference Duplex Stainless Steels'97, Maastricht, The Netherlands (Oct. 1997).
 Proceedings International Conference Duplex 2000, Venice, Italy (Oct. 2000).
 Proceedings International Conference Duplex 2007, Grado, Italy (June 2007).
 Proceedings International Conference Duplex World 2010, Beaune, France (Oct. 2010).

**Internacionalni inženjeri zavarivanja (IWE) / Evropski inženjeri zavarivanja (EWE);
 Internacionalni tehnolozi zavarivanja (IWT) / Evropski tehnolozi zavarivanja (EWT);
 Internacionalni inspektori zavarivanja (IWI-C)**

kojima je diplome izdao DUZS-CertPers mogu javno da prikažu nivo kvalifikacije na relevantnim dokumentima korišćenjem IIW/EFW pečata izdatim od strane DUZS-CertPers



Na zahtev kandidata koji imaju IWE / IWT / IWI-C diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i IIW pečate (izdaju se na osnovu IIW diploma).

Takođe, na zahtev kandidata koji imaju IWE ili IWT diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i evropske ekvivalentne diplome EWE/EWT i EWF pečat (izdaje se na osnovu EWF diplome).

Ukoliko ste zainteresovani za izdavanje EWF diplome/pečata ili IIW pečata, ZAHTEV(E) je potrebno popuniti i dostaviti sekretarijatu DUZS-CertPers – a.

Zahteve za izdavanje pečata možete preuzeti na sajtu DUZS: www.duzs.org.rs tj. putem sledećih linkova:

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-izdavanje-IIW-pecata_IWE-IWT-IWI-C.pdf

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-dobijanje-EWF-diplome_pecata.pdf

Informacije:

+ 381 (11) 2420-652

duzs011@gmail.com





¹Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling, ¹Dr.-Ing. Rolf Reiter, ²Marvin Hecht, MSc.

LIGHTWEIGHT SUPPORTIVE WEAR PROTECTION SYSTEMS AGAINST EROSIIVE WEAR BY FINE PARTICLES

PODRŠKA MALE TEŽINE SISTEMIMA ZAŠTITE OD HABANJA USLED TRENJA EROZIJOM FINIM ČESTICAMA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 669.14.018.8:620.193.4 ;

Rad je preuzet iz časopisa: WELDING AND CUTTING
(16 (2017) N°06 669.14.018.8:621.791.05

Rad primljen / Paper received:

Maj 2018.

Adresa autora / Author's address:

¹Institute of Welding and Maching (ISAF), Clausthal university of Technology (Germany).

²School of Economics and Technology (FWT) Clausthal-Zellerfeld gGmbH (Germany)

Ključne riječi: habanje i korozija, zaštita od habanja, tvrdi navari, zavarene prevlake

Key words: wear and corrosion, wear protection, hardfacing, weld coating

ABSTRACT

Machines and equipment wear lead to annual losses in billions. Usually highly stressed mechanical components are not directly hardfaced for wear protection, rather they are protected by prefabricated plates which are coated by welding methods for wear protection, the plates are adapted and mounted to the structures to be protected by welding or mounting screws. This procedure leads to an increase in weight of the wear protected components, which is not advantageous, especially at high speeds for ventilators subjected to wear. The direct hardfacing of high-strength structures by traditional gas metal arc welding (GMAW) processes typically leads to high dilution, large energy input and a large heat-affected zone (HAZ) which makes it meaningless, since the required mechanical properties for high strength steels will be irreversibly lost [1-3].

By using a modern controlled short arc (CSA) welding method, it is possible to reduce the energy input considerably in the base material. A new application is the surfacing of high-strength steels with the aim of both providing effective protection against wear as well as to preserve the mechanical properties of hardfaced steel. The aim is to support lightweight objects through this concept, leading to a cost advantage in the overall system [1-3]. As part of this contribution, the possibility to hardface high-strength steels grade (S960) with the CSA welding process is reported. The mechanical-technological properties of the coated steels are carefully studied as well as the wear resistance and behavior of the applied coatings. The common application of the technology is for structural components for high-speed wear-exposed ventilators [1-3].

REZIME

Trošenje mašina i opreme dovodi do godišnjih gubitaka u milijardama. Obično vrlo naglašene mehaničke komponente nisu direktno zaštićene od habanja tvrdim navarima, već su zaštićene prefabrikovanim pločama koje su prevučene zavarivanjem za zaštitu od habanja, a koje su prilagođene i montirane na konstrukcije koje treba zaštititi zavarivanjem ili montažnim vijcima. Ova procedura dovodi do povećanja težine komponenta zaštićenih od habanja, što nije povoljno, posebno kod ventilatora sa velikim brzinama podložnim habanju. Direktno tvrdo navarivanje konstrukcija visoke čvrstoće tradicionalnim postupcima zavarivanja u zaštiti gasa (MIG/MAG-GMAW) obično dovodi do visokog razblaživanja (mešanja), velikog unosa energije i velike zone uticaja toplote (ZUT-HAZ) što ga čini značajnim, s obzirom na to da će zahtevane mehaničke osobine čelika visoke čvrstoće biti nepovratno izgubljene [1-3].

Korišćenjem modernog postupka zavarivanja sa kontrolisanim kratkim lukom (CSA), moguće je znatno umanjiti unos energije u osnovni materijal. Nova primena je navarivanje čelika visoke čvrstoće sa ciljem da se obezbedi efikasna zaštita od habanja, kao i da se očuvaju mehaničke osobine tvrdo navarenog čelika. Cilj je, kroz ovaj koncept, podrška lakim objektima, što dovodi do troškovne prednosti u celokupnom sistemu [1-3]. Kao deo ovog doprinosa, ovde se izveštava o mogućnosti tvrdog navarivanja čelika (S960) visoke čvrstoće, postupkom zavarivanja CSA. Mehaničko-tehnološke osobine obloženih čelika pažljivo se ispituju, kao i otpornost na habanje i ponašanje nanetih prevlaka. Uobičajena primena ove tehnologije je za konstrukcione komponente ventilatora sa visokom brzinom sa visokim stepenom habanja [1-3].



1. Introduction

Wear and corrosion are important factors in the failure and breakdown of mechanical parts of machines. In the Federal Republic of Germany, repair and downtime causes losses of 2-4% of the GDP which corresponds to an average amount of about 85 billion Euros [4]. In view of these huge costs, there has been research to find and develop materials which can withstand the stresses better and longer and thus reduce the expenses [1-3].

Industrial fans are affected by such wear during their operation, so that regular maintenance and repair is required. One way to reduce the wear is the use of prefabricated wear plates, which are provided by specialised suppliers. They consist of a substrate material on which, by different welding/coating techniques, in particular iron- or nickel-based hard alloys are applied. The produced plates are then adapted to the contours of the fans to be protected and applied to the structural component selectively, for example by screws or weld, Fig. 1.

1. Uvod

Zaštita i korozija su važni faktori u otkazu i razgradnji mehaničkih delova mašina. U Saveznoj Republici Nemačkoj, popravke i vreme zastoja uzrokuju gubitak od 2-4% BDP-a koji odgovara prosečnom iznosu od oko 85 milijardi evra [4]. S obzirom na ove ogromne troškove, došlo je do istraživanja da se pronađu i razviju materijali koji mogu izdržati napon bolje i duže i time smanjiti troškove [1-3].

Industrijski ventilatori su podložni takvom habanju tokom rada, tako da je potrebno redovno održavanje i popravka. Jedan od načina da se smanji habanje je upotreba prefabrikovanih ploča otpornih na habanje, koje pružaju specijalizovani dobavljači. Sastoji se od materijala podloge na kome se primenjuju različite tehnike zavarivanja / prevlaka, posebno tvrdih legura na bazi železa ili nikla. Proizvedene ploče se zatim prilagođavaju konturama ventilatora koji se moraju zaštititi i selektivno primeniti na konstrukcionu komponentu, na primer vijcima ili zavarenim spojevima, sl.1.



Fig.1. Application of separate wear plates on the structural material of a worn-out industrial ventilator (5).

Sl.1. Primena odvojenih ploča otpornih na habanje na konstrukcijskom materijalu istrošenog industrijskog ventilatora (5).

The range of materials that can be used is limited. For example no (high-)boron containing alloys are applied on composite sheets using this method, because these layers easily flake and fall off in subsequent forming. Additionally the hard phase morphology (especially hard phase spacing, size as well as the uniformity of the microstructure) is not feasible to obtain through conventional open arc (OA)/GMAW methods, as it is required for the erosion wear by fine particles. A further disadvantage is that the main structural component

Raspon materijala koji se mogu koristiti je ograničen. Na primer, na kompozitnim pločama se ne nanose nikakve legure koje sadrže bor (visoki sadržaj), koristeći ovu metodu, jer se ti slojevi lako odlepljuju i otpadaju pri naknadnom oblikovanju. Pored toga, morfologija tvrde faze (naročito razmak između tvrdih faza, veličina kao i jednoobraznost mikrostrukture) nije izvodljiva uobičajenim metodama otvorenog luka (OA-otvoreni luk) / GMAW-MIG-MAG), kao što je potrebno kod habanja erozijom finim česticama. Još jedan



is not directly hardfaced and protected. This is because the available conventional welding processes such as Plasma-Transferred-Arc (PTA), OA and GMAW induce too much thermal stresses in the components so that their original mechanical properties are irreversibly lost and therefore they cannot be taken into consideration as a fundamental cross-section in the design calculations of the fan [1-3].

Therefore necessarily wear protection plates must be used, whereby additional weight is caused by the wear plates as well as considerable additional efforts and costs in transport, energy requirements and construction foundations etc. [1-3].

One possible solution is the development of required and suitable coating process for a wear protection system by welding for highly stressed structural components made of high and ultra high strength fine grained steel materials by a modern controlled (low energy) welding process to protect lightweight ventilators [1-3].

2. Erosion wear in ventilators' structure

2.1 Typical abrasives and wear patterns

The occurring wear in ventilators' structure is attributed to the particles entrained in the air flow [1-3]. This is because industrial ventilators are used for example in cement, steel, chip wood, plastic as well as chemical plants and refineries in the basic material dedusting technology, where the conveying air pushes fine, highly abrasive particles, Table 1 [1-3]. The sucked particles sometimes induce a considerable wear attack through impingement of the structural materials of the ventilator, such as blades, top and bottom plates, Fig. 2 [1-3].

nedostatak je da glavna konstrukciona komponenta nije direktno tvrdo navarena i zaštićena. To je zato što dostupni konvencionalni postupci zavarivanja kao što su Plazma-preneseni-luk (PTA), OA i GMAW stvaraju previše termičkih naprezanja u komponenti, tako da se njihova originalna mehanička svojstva nepovratno gube i stoga ne mogu uzeti u obzir kao fundamentalni poprečni presek u projektnim proračunima ventilatora [1-3]. Zbog toga se moraju koristiti zaštitne ploče, pri čemu dodatnu težinu izazivaju ploče za habanje, kao i znatni dodatni naponi i troškovi u transportu, energetske zahtevima i građevinskim temeljima itd. [1-3].

Jedno od mogućih rešenja je razvoj neophodnog i odgovarajućeg postupka nanošenja prevlaka - prevlačenja za sistem zaštite od habanja, zavarivanjem visoko-naponskih konstrukcionih komponenta izrađenih od fino-zrnih čeličnih materijala visoke i ultra visoke čvrstoće, modernom kontrolisanim postupkom zavarivanja (niskoenergetski) za zaštitu lakih ventilatora [1-3].

2. Erozijska konstrukcija ventilatora

2.1. Tipični abrazivi i obrasci habanja

Izraženo habanje na konstrukciji ventilatora se pripisuje česticama koje su ušle u vazdušni tok [1-3]. To je zato što se industrijski ventilatori koriste na primer u cementaram, čeličana, drvnoj industriji, industriji plastike, kao i hemijskim postrojenjima i rafinerijama kao osnovna tehnološka tehnologija otprašivanja, gde transportni vazduh gura kolonu, visoko abrazivnih čestica, tabela 1 [1-3]. Ušisane čestice ponekad izazivaju značajno oštećenje habanjem kroz udaranje konstrukcijskih materijala ventilatora, kao što su lopatice, gornje i donje ploče slika 2 [1-3].

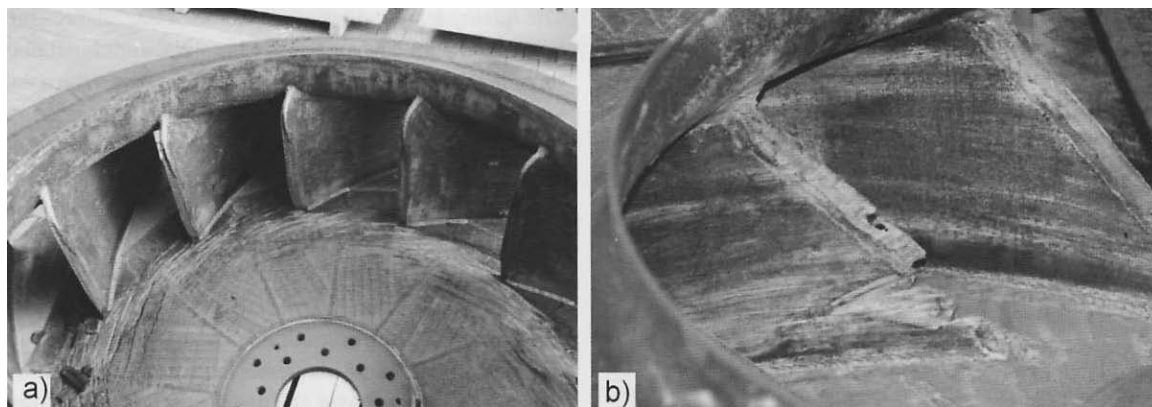


Fig.2. Wear of industrial ventilators after deployment: a) Wear of bottom plate, b) Wear of fan blades [5].

Sl. 2. Habanje industrijskih ventilatora nakon upotrebe: a) habanje donje ploče, b) habanje lopatica ventilatora [5].



2.2. Conventional wear protection

As a wear protection solution, because of the required wear reserves and respectively layer thickness as well as the dynamic wear stresses, the protective layer coatings applied by welding technology are preferred. The wear protection materials consist of a relatively tough-hard solid solution matrix in which the wear-protective brittle hard materials are incorporated [1-3]. For wear protection high-alloy iron and nickel-based alloys are used, Table 2 [1-3].

These are usually applied via wired arc or bonded powder plasma process on substrate material of the type S235, S355 and in some exceptional cases S690 and S960. In such way, wear protection plates of different thickness are prepared. These produced layers have a multiphase microstructure consisting of locally formed or foreign precipitated metal carbides or borides or a combination of these hard materials. All alloys are commonly processed by welding with high energy input (PTA, OA and GMAW). With the costly PTA process expensive powdered hard phase strengthened nickel alloys are processed with dilution less than 10%, while the main application area for the lower cost GMAW and OA methods lies in the processing of iron-based materials. With the GMAW/OA procedure usually a dilution between 20-40% is achieved, Table 3.

2.2 Konvencionalna zaštita od habanja

Kao rešenje za zaštitu od habanja, zbog potrebnih rezervi za habanje, odnosno debljine sloja, kao i dinamičkih napona habanja, poželjno je zaštitne slojeve naneti zavarivanjem. Materijali za zaštitu od habanja sastoje se od matrice relativno žilavo/tvrđog čvrstog rastvora u kojoj su ugrađeni krti, tvrdi materijali za zaštitu od habanja [1-3]. Za zaštitu od habanja koriste se visoko legirano železo i legure na bazi nikla, tabela 2 [1-3].

Oni se obično nanose elektrolučnim postupcima sa žicom i plazma postupcima praškom za vezivanje na materijalu podloge tipa S235, S355 i u nekim izuzetnim slučajevima S690 i S960. Na taj način se pripremaju zaštitne ploče različitih debljina. Ovi proizvedeni slojevi imaju multifaznu mikrostrukturu koja se sastoji od lokalno formiranih ili stranih taloga metalnih karbida ili borida ili kombinacije ovih tvrdih materijala. Sve legure obično se zavaruju sa visoko-energetskim unosom (PTA, OA i GMAW). Skupim PTA postupkom, skupe ojačane niklove legure u prahu se nanose sa stepenom mešanja manjim od 10%, dok su glavna područja primene manje skupih postupaka GMAW i OA kod obrade materijala zasnovanih na železu. Postupcima GMAW / OA obično se postiže stepen mešanja između 20-40%, tabela 3.

Abrasive Particles	Average particle size
Raw powder dust	~ 8 µm
Sinter dust	5-15 µm
Dusts from steelmaking	< 20 µm
Cement raw powder	8-15 µm
Cement dust	10-20 µm

Abrasive Particles-- Čestice abraziva; Raw powder dust- Praškasta sirovina; Sinter dust- Prašina sintera; Dusts from steelmaking- Prašina pri proizvodnji čelika; Cement raw powder- Prah sirovog cementa; Cement dust- Cementna prašina; Average particle size- Prosečna veličina čestice

Table 1. Average particle size for typical abrasives with industrial ventilators (5)
Tabela 1. Prosečna veličina čestica tipičnih abraziva kod industrijskih ventilatora (5)

Matrix	Hard phase formers	Welding process
Fe	Cr, (Nb, V, Mo, W), (C, B)	OA/GMAW
Fe	C, Cr, cast tungsten carbide (CTC)	OA/GMAW
Ni	Cr, Mo, CTC	PTA, GMAW

Matrix-matrica; Hard phase formers-Stvaraoci tvrde faze; Welding process-Postupak zavarivanja

Table 2. Standard wear protection materials for ventilators structure.

Tabela 2. Standardni materijali za zaštitu od habanja konstrukcije ventilatora.



Welding process	Deposition rate in kg/h	Dilution in %	Layer thickness in mm
GMAW/OA	8-9	20-40	4-8
PTA	≤ 15	5-10	2-7

Welding process-Postupak zavarivanja; Deposition rate-Brzina deponovanja; Dilution-Stepen mešanja; Layer thickness-Debljina sloja

Table 3. Standard processes for applying hardfacing for ventilators' structure [6].

Tabela 3. Standardni postupci za nanošenje tvrdih navara za konstrukciju ventilatora,[6].

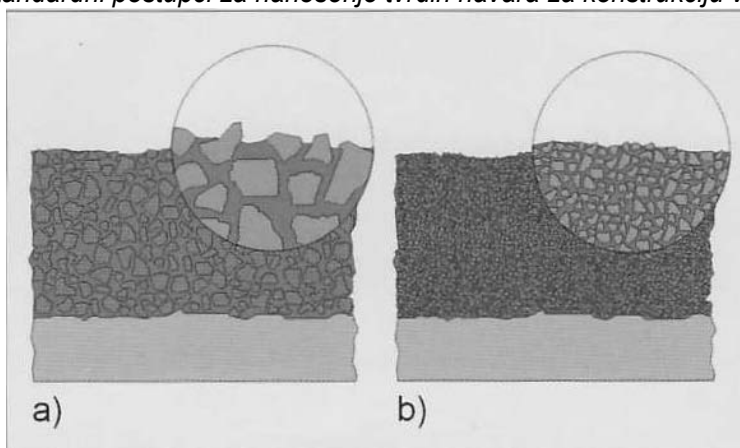


Fig.3. Wear protedive measures by grain refinement: a) conventional hard alloy with large hard phase spacing (- 30-50 μm), higher wear with fine abrasive attack, b) customised hard alloy with very small hard phase intervals for protection against fine abrasive wear applications [7].

SI 3. Mere zaštite od habanja rafinacijom zrna: a) konvencionalna tvrda legura sa velikim razmakom tvrdih faza (- 30-50 μm), veća habanja napadom finih abraziva, b) prilagođena tvrda legura sa vrlo malim intervalima tvrdih faza za zaštitu od finih abraziva [7].

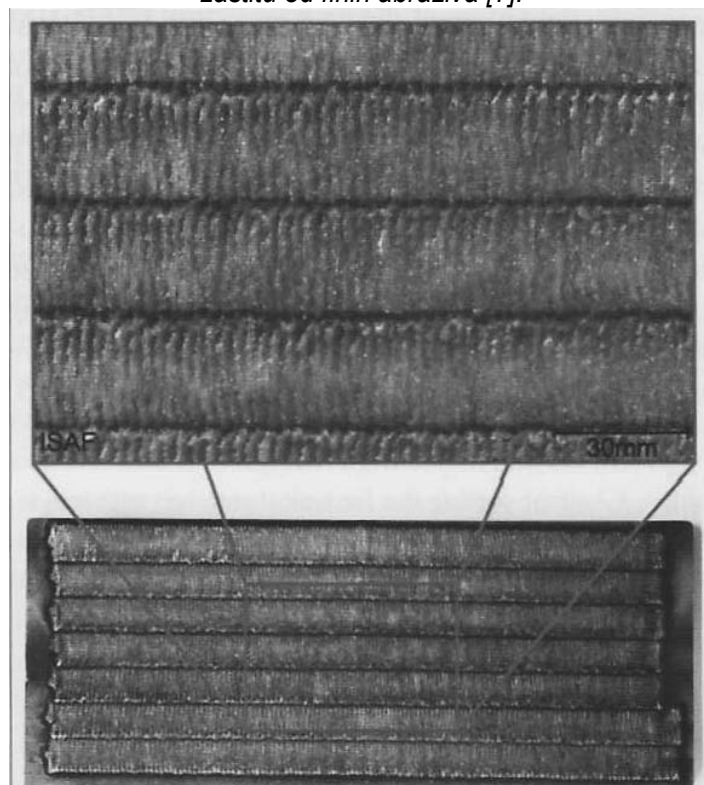


Fig.4 . CSA structural component coating: Fe-Basis + Cr-boride + VC, ventilator component factory OeldE GmbH (Picture: ISAF)

SI..4. CSA konstrukciona komponenta: Fe-osnova + Cr-borid + VC, fabrika komponenti ventilatora OeldE GmbH (Slika: ISAF)



The quality feature dilution describes is the relationship between the mixing zone of the base and additional material to the total area of the weld cross section. With a decreasing degree of dilution the film quality increases, wherein a minimum of about 3% is however necessary to ensure adhesion especially under dynamic stress [1-3].

2.3 High performance wear protection systems

The protection effect of hard alloys is based on the fact that the brittle hard phases prevent the attacking hard abrasive particles from penetrating the matrix. If the distance between the hard phases is greater than the average particle size of attacking particles, the metal matrix is washed out and there are significant signs of wear, Fig. 3 [1-3].

The considered abrasive particles here, Table 1, show in comparison to other wear protective usual applications - such as in the mining industry - an extremely small grain size in the order of about 10 μm . Therefore a finely dispersed distribution of the hard phases ($< 12 \mu\text{m}$) independent of the base alloy is absolutely necessary in order to achieve an improvement in the wear resistance. In addition to the high-quality nickel-based alloys, there are alternative lower cost iron-based alloys. The ones which are used in fans structure are high and ultra-high fine-grained structural steels of classes S690+ and S960+ which should be protected by a modern low energy controlled short arc (CSA) welding process without the original material losing its original properties excessively. This hardfaced base material can be used as a highly stressed structural material, also the lightweight objects (obtaining the base material properties) are realised and as considerable life extension (properties of the coatings) can be achieved [1-3].

3. Short arc techniques

The CSA processes cause only slight thermal strains in the involved base material, because overall a low energy input (short arc technique) is used while high short circuit currents are avoided. CSA processes have been developed to connect thin sheets by welding. In order to avoid high energy input and uncontrolled spatter during the breaking of short circuit current, the maximum power is significantly lowered during re-ignition of the arc. This leads to a significantly lower thermal influence on the material during melting [1-3, 8].

In addition to joining, this technology is also advantageous for hardfacing [9-11]. For example, corrosion-resistant hardfacings are produced with the CSA technology on an industrial scale [12]. Through conventional short arc processes the introduced energy input to the substrate is normally only reduced for inadequate weld beads formation. With the CSA processes the short circuit current

Kvalitet vezivanja se opisuje kao odnos između zone mešanja osnovnog i dodatnog materijala prema ukupnoj površini preseka šava. Sa smanjenjem stepena mešanja, povećava se kvalitet filmova, pri čemu je minimum oko 3% neophodan da bi se obezbedila adhezija posebno u slučaju dinamičkih naprezanja [1-3].

2.3 Sistemi za zaštitu od habanja visokih performansi

Zaštitni efekat tvrdih legura zasniva se na činjenici da krke tvrde faze sprečavaju napade tvrdih abrazivnih čestica koje udaraju u matricu. Ako je rastojanje između tvrdih faza veće od prosečne veličine čestica udarajućih čestica, metalna matrica se spira i nastaju značajni znaci habanja, slika 3 [1-3].

Smatra se da abrazivne čestice, ovde navedene u tabeli 1, u poređenju sa ostalim primenama zaštite od habanja - kao što je u rudarskoj industriji - imaju izuzetno mala zrna u rasponu od oko 10 μm . Zbog toga je fina raspodela tvrdih faza ($< 12 \mu\text{m}$) nezavisna od legure osnove, apsolutno neophodna kako bi se postiglo poboljšanje otpornosti na habanje. Pored visokokvalitetnih legura na bazi nikla, postoje i alternativne jeftinije legure na bazi železa. One koje se koriste u ventilatorima su visoki i ultra visoki fino-zrni konstrukcioni čelici klase S690 + i S960 + koje treba zaštititi modernim postupkom zavarivanja niskoenergetskim kratkim lukom (CSA) bez preteranog gubljenja osobina originalnog materijala. Ovaj tvrdo navareni materijal se može koristiti kao visoko naponski konstrukcioni materijal, takođe se realizuju laki objekti (postizanje svojstava osnovnog materijala) kao i značajno produženje životnog veka (osobine prevlaka) [1-3].

3. Tehnike kratkog luka

Postupci CSA izazivaju samo blage termalne napore u uključenom osnovnom materijalu, jer se u celosti koristi niskoenergetski unos (tehnika kratkog luka), dok se izbegavaju velike struje kratkog spoja. CSA postupci razvijeni su za spajanje tankih ploča zavarivanjem. Da bi se izbegao veliki unos energije i nekontrolisano razbrizgavanje („pucne“), tokom prekida struje kratkog spoja, maksimalna snaga je značajno spuštana tokom ponovnog paljenja luka. To dovodi do znatno manjeg termičkog uticaja na materijal tokom topljenja [1-3, 8].

Pored spajanja, ova tehnologija je takođe pogodna za tvrdo navarivanje [9-11]. Na primer, tvrdi navari otporni na koroziju izvode se tehnologijom CSA na industrijskom nivou [12]. Kroz konvencionalne postupke kratkim lukom, unos energije na podlogu se obično smanjuje samo kod neadekvatno formiranja zavara u šavu. Postupcima



and the current rise during the arc re-ignition is limited after the material transfer in controlled short circuit technology. The droplet detachment can be further enhanced by the mechanical support by the reversal of the wire feed [1-3]. Table 4 provides an overview of selected presently available process techniques in connection with the control methods used.

The current developments focus on a material side matching the additional material as well as the use of the process to apply hardfacing on thermally sensitive materials. Investigations [9, 11, 13] have shown that refining the hard phases over conventional process is possible. An increase in performance of the coatings against fine abrasive or erosive stress wear in practice is therefore expected in this context [1-3, 14].

CSA, struja kratkog spoja i povećanje struje tokom reaktivacije luka ograničeno je nakon prenosa materijala kontrolisanom tehnologijom kratkog spoja. Odvođenje kapi se dalje može poboljšati mehaničkom podrškom pomoću obrtanja žice [1-3]. U tabeli 4 dat je pregled odabranih tehnika koje su dostupne u prethodnom periodu u vezi sa korišćenjem metoda kontrolisanja.

Aktuelni razvoj se fokusira na podudarne dodatne materijale, kao i na korišćenje postupka za tvrdo navarivanje na termički osjetljivim materijalima. Ispitivanja [9, 11, 13] su pokazala da je rafinisanje tvrdih faza u odnosu na konvencionalni proces, moguće. U tom kontekstu se očekuje povećanje performansi prevlaka protiv finih abraziva ili habanja erozivnim naponima u praksi [1-3, 14].

CSA process	Manufacturer
Electronic control	
AC-MIG	OTC Daihen Europe
coldArc®	EWM Hightec Welding
CP (Cold Process)	CLOOS
RMDTM (Regulated Metal Deposition)	Miller Electric
TST (Tension surface Transfer)	Lincoln Electric
Electronic and mechanical control	
CMT (Cold Metal Transfer)	Fronius International
CSC (Controlled Short Circuit)	Miller Electric

Table 4. Selected CSA processes and manufacturers [13].

Tabela 4. Odabrani postupci CSA i proizvođači [13].

Type	Material density in g/cm ³	Layer hardness in HR _C
FeCrB	7.2	56.6
FeCrNbVBC	7.1	65
FeCrC	7.6	63-66

Table 5. Properties of weld coating

Tabela 5. Osobine zavarenih prevlaka

4. Experimental

By the CSA process hardfacing was performed on fine grained steel of grade S960QL. As additional materials iron based flux cored wires (Φ 1.6 mm) with characteristic hard phases were processed [1-3].

Hereby, a high chromium high boron containing hard alloy, also Cr-boride forming Fe-based alloy with additional alloy contents of VC and NbC as well as a reference anti-wear material, a conventional high-chromium high carbon Fe-based

4. Eksperiment

Postupkom CSA je obavljeno tvrdo navarivanje na finostrukom čeliku klase S960KL. Kao dodatni materijali korišćene su punjene žice na bazi železa (PH 1,6 mm) sa karakterističnim tvrdim fazama [1-3].

Ovde su korišćene tvrde legure sa visokim sadržajem hroma i bora, takođe legure na bazi železa koje stvaraju Cr-borid sa dodatnim legiranjem VC i NbC, kao i referentni anti-habajući materijal, konvencionalne legure tipa FeCrC.



type FeCrC were used. The layers produced were both metallographically and wear technically qualified [1-3].

4.1 Hardfacings

With the selected flux-cored wire materials planar wear-resistant coatings were applied to the structural material in a weaving beads technique with a weaving width of 20 mm, Fig. 4 [1-3]. Film thicknesses between 2 and 2.5 mm were generated. As a protective gas, an argon-carbon dioxide mixture was used. All samples with applied layers were cut by electrical discharge machining and material densities were determined pycnometrically, Table 5 [1-3].

The multilayer composites produced were investigated metallographically. Macro-hardness (Rockwell C) and micro-hardness measurements (HV_1) were performed in THE region of the HAZ [1-3].

Proizvedeni slojevi bili su ispitani metalografski i tehnikama ispitivanja habanja [1-3].

4.1. Tvrdo navarivanje

Odabranim materijalima u obliku punjene žice, nanete su pločaste prevlake otporne na habanje na konstrukcioni materijal tehnikom njihanja, širine 20 mm, slika 4 [1-3]. Dobijene su debljine filma od 2 do 2,5 mm. Kao zaštitni gas korišćena je smeša argon-ugljen-dioksida. Svi uzorci sa nanetim slojevima su sečeni mašinama sa električnom pražnjenjem, a gustine materijala određene su piknometrijski, tabela 5 [1-3].

Dobijeni višeslojni kompoziti su metalografski ispitani. Makro-tvrdoća (Rockwell C) i merenja mikro tvrdoće (HV_1) izvedena su u regionu ZUT [1-3].

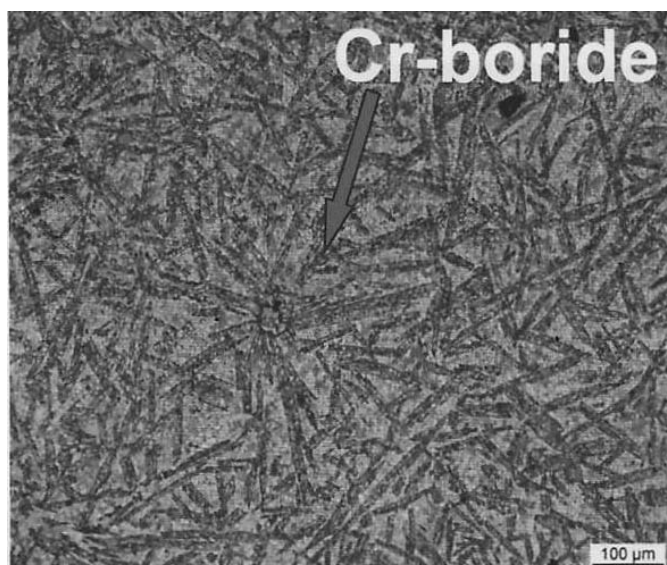


Fig. 5. CSA welding: FeCr
Sl. 5. CSA zavarivanje: FeCr

4.2 Metallographic analysis

After processing with the CSA process, the microstructure of hardfacing type FeCrB shows a random distribution of the hard chromium boride phase with very small hard phase gaps, Fig. 5 [1-31].

The newly developed wear protection material of the type FeCTNbVBC shows additional vanadium carbide hard phases, which precipitate between the boride hard phases and thus further reduce the hard phase spacing, Fig. 6. Hence, the preparation of the corresponding hard-facings can be expected to perform somewhat better in the target application than the FeCrB hardfacings allows a further improvement in coating properties to be expected [1-3].

4.2. Metalografska analiza

Posle nanošenja postupkom CSA, mikrostruktura tvrdog navara tipa FeCrB pokazuje slučajnu raspodelu tvrde hrom boridne faze sa veoma malim zazorima na tvrdoj fazi, slika 5 [1-31].

Novorazvijeni materijal za zaštitu od habanja tipa FeCTNbVBC pokazuje dodatnu tvrdi fazu vanadijum karbida, koje precipitiraju između boridnih tvrdih faza i time dodatno smanjuju razmak između tvrdih faza, slika 6. Stoga se može očekivati da priprema odgovarajućih tvrdih navara može da se izvede nešto bolje u ciljanoj primeni nego FeCrB tvrdi navari, što omogućava unapređenje poboljšanja svojstava prevlaka [1-3].

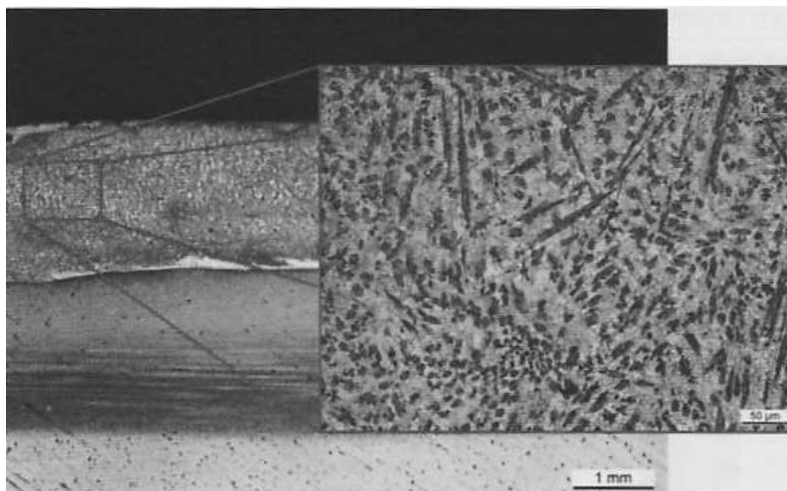


Fig. 6 . CSA welding FeCTNbVBC
Sl. 6 . CSA zavarivanje FeCTNbVBC

4.3. Wear tests

The wear resistance of the hardfacings was assessed according to DIN 50332. The test bench consists essentially of a blast chamber, a reservoir with a metering system for controlling the abrasive particles mass flow rate, a compressed air supply, an injector and the sample holder, Fig.7 [1-3]

4.3. Ispitivanje habanja

Otpornost na habanje tvrdog navara je ocenjivana u skladu sa DIN 50332. Ispitna klupa se sastoji od eksplozivne komore, rezervoara sa dozirnim sistemom za kontrolu masenog protoka abrazivnih čestica, snabdevačem komprimovanog vazduha, injektorom i držačem uzorka, sl..7 [1-3]

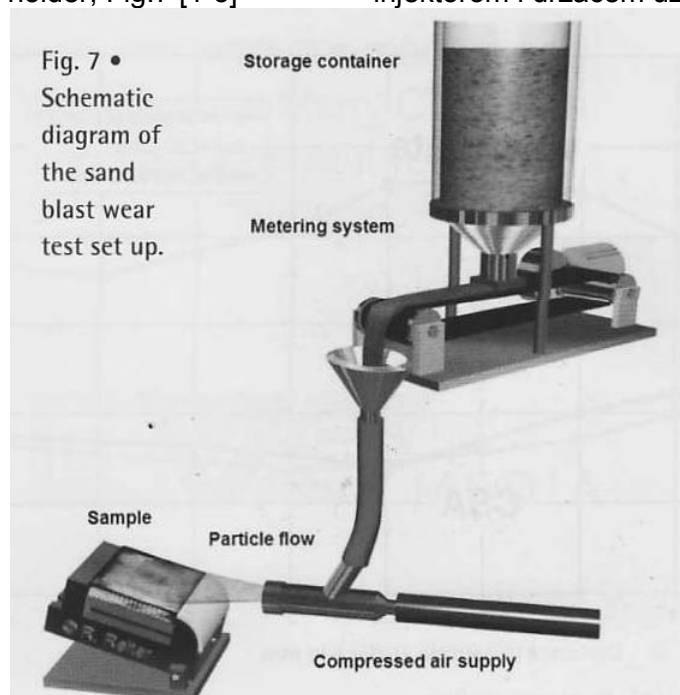


Fig. 7 •
Schematic
diagram of
the sand
blast wear
test set up.

Fig.7
Sl.7

The abrasive particle volume flow supplied to the injector is adjusted via a dosing system. The free flowing particles with the guided gas beam cause a ramming or tapping material damage depending on the stress angle. For the tests, a blast angle of 10° (inclined blast abrasion stress) was set at the seam transition because practical experience showed a particular vulnerability here. The test took place on the weld seam with cement as abrasive particles. A particle size analysis of the used abrasive particles

Zapreminski protok abrazivnih čestica koji se isporučuje u injektor podešava se putem dozirnog sistema. Čestice slobodne tečnosti sa vođenim gasnim snopom uzrokuju oštećenje materijala ili pucanje materijala u zavisnosti od ugla napona. Za ispitivanje, ugao naleta od 10° (nagnuti napon od abrazije) postavljen je na presk šava, jer je praktično iskustvo pokazalo posebnu ranjivost ovde. Test se odvijao na zavarenom spoju sa cementom kao abrazivnim česticama. Analiza



showed a mean particle diameter of $d_{50} = 16 \mu\text{m}$. The variable test parameters are the form and amount of abrasive particles as well as the distance between the sample and injector outlet, table 6 [1-3].

Through the wear tests, a significantly improved wear performance can be demonstrated for the wires processed with the CSA method in comparison to the GMAW welded flux-cored wires (for example NiCrBSi + CTC), Fig. 8. The hardfacings of the new wear resistant materials with precipitated hard phases in the matrix and at the same time very small hard phase spacing in conjunction with the low thermal influence of the CSA welding coating process technology (dilution < 10%) provide an increase in service life of 325 to about 400% against traditional wear solutions (Fe-Cr-C-Mo-B-wear plates), also an increase of about 150-175% while compared to conventional coating methods [1-3]. By reducing the hard phase spacing for FeCrNbVBC, the expected increase in the wear resistance cannot be confirmed yet [1-3].

veliĉine ĉestice korišćenih abrazivnih ĉestica pokazala je srednji preĉnik ĉestica $d_{50} = 16 \mu\text{m}$. Promenljivi parametri testa su oblik i koliĉina abrazivnih ĉestica, kao i rastojanje izmeĉu izlaza uzorka i injektora, tabela 6 [1-3].

Kroz testove habanja, moŹe se dokazati znaĉajno poboljšanje performansi habanja sa Źicama nanetim postupkom CSA u poreĉenju sa GMAW zavarivanjem punjenim Źicama (na primer NiCrBSi + CTC), slika 8. Tvrdi navari od novih materijala otpornih na habanje sa precipitiranim tvrdim fazama u matrici i istovremeno sa vrlo malim rastojanjem tvrdih faza u kombinaciji sa malim toplotnim uticajem tehnologije zavarivanja CSA (stepen mešanja <10%) omoguĉavaju povećanje veka trajanja od 325 do oko 400% naspram tradicionalnog rešenja za habanje (Fe-Cr-C-Mo-B-ploĉe za habanje), takoĉe povećanje od oko 150-175% u poreĉenju sa klasiĉnim metodama prevlaka [1-3]. Smanjivanjem rastojanja tvrdih faza za FeCrNbVBC, oĉekivano povećanje otpornosti na habanje još ne moŹe biti potvrĉeno [1-3].

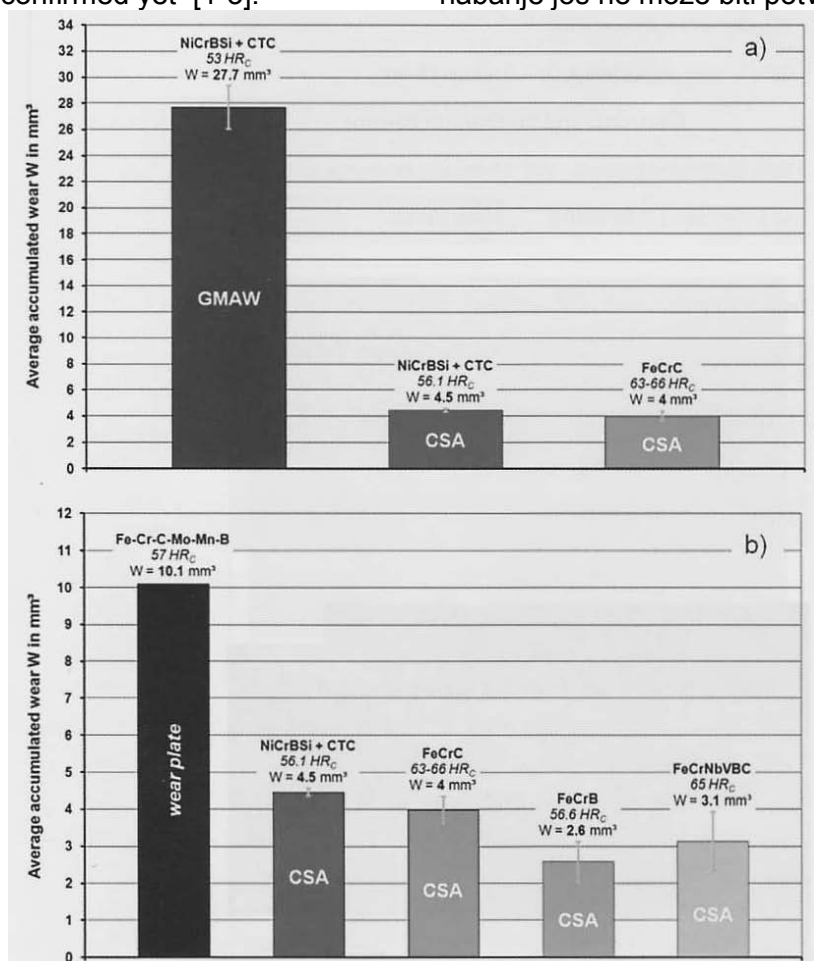


Fig. 8. Average accumulated material removal by wear under 100 inclined blast abrasion stress: a) GMAW vs. CSA hardfacing, b) Novel high performance wear protection system

SI.8. Proseĉno nakupljeno uklanjanje materijala habanjem ispod 100 nagnutog naprezanja od abrazije: a) GMAV nasuprot. CSA tvrdo navarivanje, b) Novi sistem zaštitе od habanja visokih performansi



5. Potential for lightweights

To apply for the lightweight objects, a layer thickness between 2 and 2.5 mm was sought. The HAZ thickness was about 3mm in all welds and therefore shows, in comparison to conventionally layered composites, reliably a width of substantially less than 5 mm with which the residual load-bearing cross-section was considerably enlarged. In conjunction with a dilution zone of less than 1.5 mm it is therefore largely possible to preserve the basic material properties with all coatings [3-1].

5.1 Hardness measurement in the heat-affected zone

Additional micro-hardness measurements (HV1) were carried out in the HAZ, Fig. 9. Through the low energy CSA process the hardening in the HAZ as well as in the temperature-sensitive base material can be clearly reduced in comparison to the GMAW variant. A significant increase in hardness was observed in the weld metal both with the conventionally employed FeCrC alloy as well as the newly developed high-performance wear-resistant alloy [1-3]. A reduction in the HAZ expansion is permitted with the CSA process and also confirmed through the series of hardness measurement [1-3].

5. Potencijal za male težine

Za primenu na lakim predmetima tražena je debljina sloja od 2 do 2,5 mm. Debljina ZUT-a je bila oko 3 mm u svim zavarenim spojevima i prema tome pokazuje, u poređenju sa konvencionalno slojevitim kompozitima, pouzdano širinu znatno manju od 5 mm sa kojom je preostali presek nosivosti znatno uvećan. Zbog toga je u kombinaciji sa zonama mešanja manjim od 1,5 mm, u velikoj meri je moguće sačuvati osnovne osobine materijala svim prevlakama [3-1].

5.1 Merenje tvrdoće u zoni uticaja toplote

Dodatna merenja mikro-tvrdoće (HV1) su obavljena na ZUT-u, slika 9. Kroz nisko energetski CSA postupak, otvrdnjavanje ZUT-a kao i u temperaturno osetljivom osnovnom materijalu može biti vidno smanjeno u poređenju sa varijantom GMAW. Značajno povećanje tvrdoće primećeno je u metalu šava i sa konvencionalno korišćenom FeCrC legurom, kao i sa novim razvijenim legurama otpornim na habanje visokih performansi [1-3]. Smanjenje širenja ZUTa je dozvoljeno zahvaljujući CSA postupku a potvrđeno je kroz seriju merenja tvrdoće [1-3].

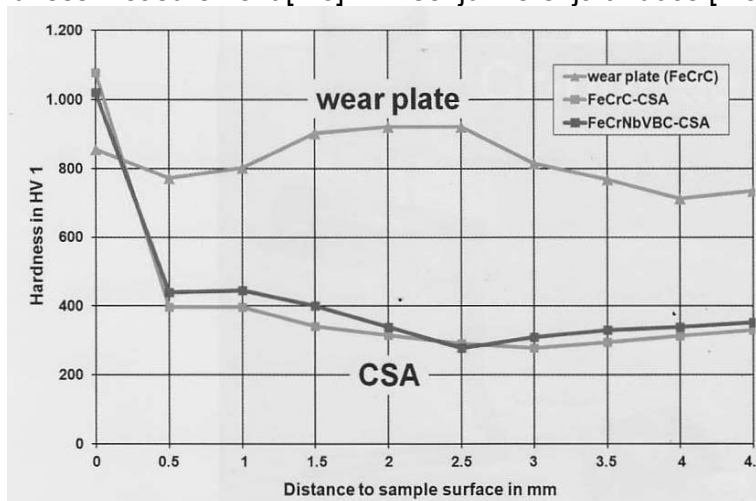


Fig.9. Expansion of the HAZ: Hardness profiles.

Fig.9. Širenje ZUT: Profili tvrdoće

Wear test	Sand blast wear test (DIN 50332)
Abrasive particles	Cement powder
Stress angle	10° (inclined blast wear)
Pressure	7.5 bar
Sample distance	20 mm
Abrasive particle mass flow rate	140 g/min
Test duration	2 h

Table 6 . Test parameters
Tabela 6. Parametri ispitivanja



5.2 Mechanical-technological tests

To further verify the mechanical technological properties of the composites, tensile tests were performed on the coated structural samples. For this flat tensile test, specimens (DIN 50125, Form E, sample thickness: $a = 10$ mm, sample width: $b = 30$ mm) were cut with the hardfaced layer using water jet cutting technique and the direction was chosen traverse the welding direction of the longitudinal sample, in order to accommodate as many undercuts as possible from the weaving weld beads during the test, Fig. 10.

5.2. Mehaničko-tehnološka ispitivanja

Da bi se utvrdile mehaničko-tehnološke osobine kompozita, izvedene su ispitivanja zatezanjem na prevučanim konstrukcionim uzorcima. Za ovaj test ravnog zatezanja, epruvete (DIN 50125, oblik E, debljina epruvete $a = 10$ mm, širina epruvete: $b = 30$ mm) su se presečene zajedno sa slojem tvrdog navara vodenim mlazom i izabran je pravac poprečno na smer zavarivanja kod uzdužnog uzorka, kako bi pri ispitivanju bilo što više prokapina usled njihanja zavara, slika 10.

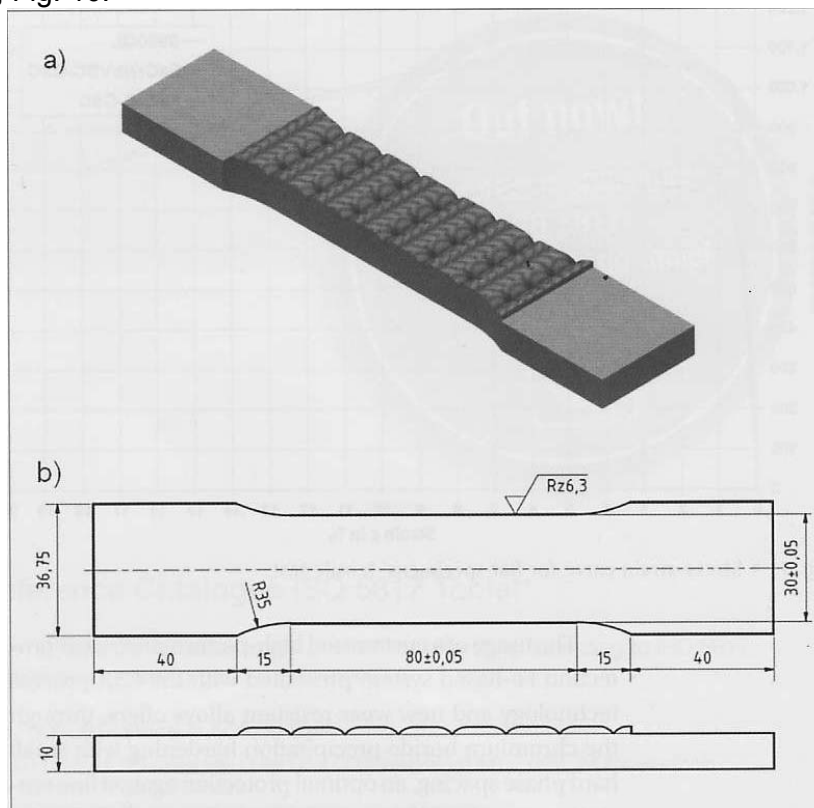


Fig. 10. Flat tensile test specimen geometry: a) 3D-CAD-Model (isometric), b) Engineering drawing
Sl. 10. Geometrija epruvete za ispitivanje zatezanjem: a) 3D-CAD-model (izometrijski), b) Inženjerski crtež

As it is demonstrated by the tensile tests, Fig. 11, the minimum elastic extension of the examined base material (S960QL) lies at about 950 MPa ($\sigma_y = 960$ MPa according to manufacturer) and at about a minimum ultimate tensile strength (UTS) of 1075 MPa the elongation was 18% at fracture ($\xi_{\min} = 10\%$).

Low energy coated tensile test specimens for the FeCrC alloy with the CSA process showed an ultimate tensile strength of up to 800 MPa. The elongation lies approximately between 7 and 8.5%. The interesting present type of wear stress Cr-boride strengthened hard alloy (here for example the FeCrNbVBC alloy) has a UTS of at least 750 MPa at an elongation of 7% at fracture.

Kao što je pokazano ispitivanjem zatezanjem, slika 11, minimalna elastična ekstenzija ispitivanog osnovnog materijala (S960KL) leži na oko 950 MPa ($\sigma_y = 960$ MPa prema proizvođaču) i pri približno minimalnoj konačnoj zateznoj čvrstoći (UTS) od 1.075 MPa, izduženje je bilo 18% pri prelomu ($\xi_{\min} = 10\%$).

Epruvete za ispitivanje zatezanjem obložene niskoenergetskim postupkom CSA legurom FeCrC pokazale su konačnu čvrstoću pri zatezanju do 800 MPa. Izduženje leži približno između 7 i 8,5%. Od interesa je za prisutni tip napona habanja da Cr-boridom ojačane tvrde legure (ovde npr. legura FeCrNbVBC) ima UTS od najmanje 750 MPa pri izduženju od 7% na prelomu.

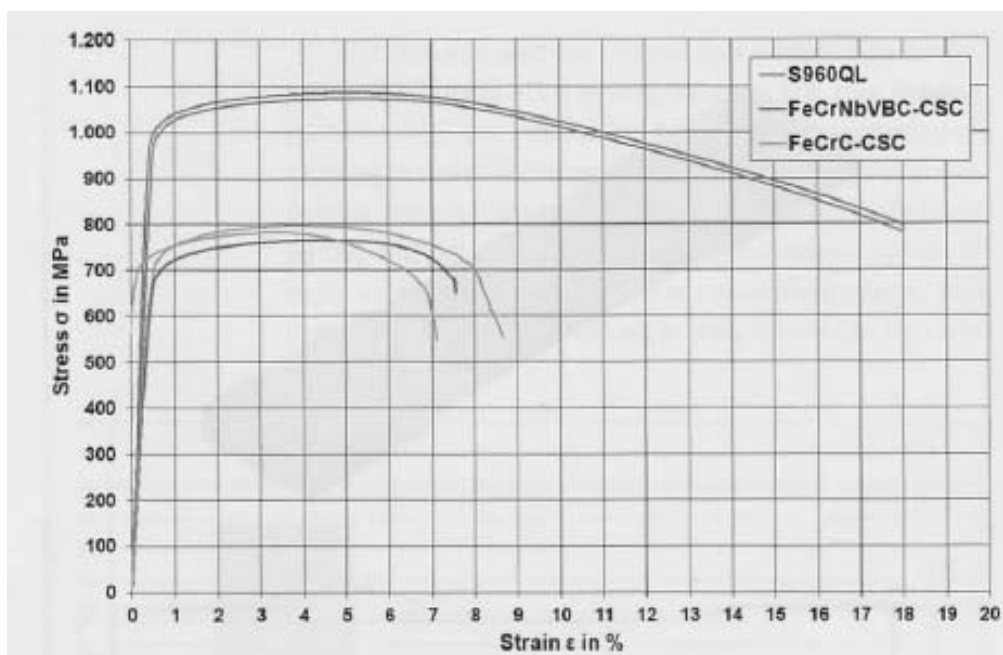


Fig. 11. Stress-strain curve for flat specimens' tensile test.

Sl. 11. Kriva napon-deformacija kod ispitivanja zatezanjem ravne epruvete

6. Conclusions

Typical and novel wire-based high performance wear protection alloys were processed and produced with the CSA process and partially compared with the conventionally GMAW produced layers. It was found that by using the CSA process with alloys characterised by hard phases, a hard phase refining occurs in the processing of nickel alloys containing cast tungsten carbide the occurring hard phase decay can be significantly reduced. This in turn significantly increases the layer quality and, in comparison to conventional coatings, an increase in the wear resistance through a sand blast wear test according to DIN 50332 can be determined.

The usage of a customised high-performance wear protection Fe-based system presented with the CSA process technology and new wear resistant alloys offers, through the chromium boride precipitation hardening with small hard phase spacing, an optimal protection against fine erosive stress wear and creates a technical-economical alternative to the expensive nickel-based alloys.

Through the energy reduction with the CSA process, the support of structural lightweight objects for the ventilators technology can also be achieved, firstly because the HAZ has a small expansion and the residual cross-section is correspondingly large, secondly the structural components can be protected and hardfaced directly. Thus the use of wear plates is eliminated.

6. Zaključci

Tipične i nove žice na bazi legura visokih performansi zaštite od habanja su primenjene i nanete CSA postupkom i delimično upoređene sa slojevima dobijenim konvencionalnim GMAW postupkom. Utvrđeno je da se korišćenjem CSA postupka sa legurama koje karakterišu tvrde faze, javlja rafinacija tvrde faze kod primene legura nikla, koje sadrže liveni volfram karbid, tako da može doći do značajnog smanjenja propadanja tvrde faze. Ovo zauzvrat značajno povećava kvalitet sloja i, u poređenju sa konvencionalnim prevlakama, može se odrediti povećanje otpornosti na habanje testom habanja peskom u skladu sa DIN 50332.

Korišćenje prilagođenog sistema za zaštitu od habanja visokih performansi na bazi Fe, postignutih tehnologijom CSA postupka i ponudom novih legura otpornih na habanje, kroz otvrdnjavanje precipitacijom hrom borida s malim razmakom tvrdih faza, optimalna je zaštita od finog erozivnog opterećenja i stvara tehno-ekonomičnu alternativu skupim legurama na bazi nikla.

Kroz smanjenje energije zahvaljujući CSA postupku, može se postići i nadgradnja konstruktivnih lakih objekata za ventilatorsku tehnologiju, pre svega zato što ZUT ima malu ekspanziju, a preostali poprečni presek je odgovarajuće velik, drugo, konstrukcione komponente mogu biti zaštićene i direktno tvrdo navarene. Tako se eliminiše upotreba ploča za habanje.



Literature and references

Literatura i reference

- [1] Wesling, V, et al.: Hardfacing on high strength steel for lightweight wear-protected structural materials, In: Deckers, S. (publisher): Cement International Vol. 13 (2015), Ekrath, pp. 46/53.
- [2] Wesling, V, et al.: Auftragschweißung hochfester Stähle zum Leichtbau verschleißgeschützter Strukturen. In: Kisters, B. (publisher), Schweißen und Schneiden - DVS-Berichte Voll. 315 (2015), Düsseldorf pp. 806/12
- [3] Westing, V., et al.: Innovationen von Ventilator/Oelde/Innovations from Ventilator/Oelde - Auftragschweißung hochfester Stähle zum Leichtbau verschleißgeschützter Strukturen/Hardfacing on high strength steel for lightweight wear-protected structural materials. A 1/11/00/5 (2015), Oelde.
- [4] Theisen, W.: "Metal Matrix Composites" widerstehen dem Verschleiß: Walzen aus Pulver. In: Klein, S. (publisher), RUBIN, Special issue (2004), Bochum, pp. 90-95.
- [5] Fa. Ventilatorenfabrik Oelde GmbH.
- [6] Schnick, T., F. Schreiber and T. Wenz: Verschleißschutz durch Filldraht- und Plasma-Pulver Auftragschweißen. In: Wielage, B. (publisher), Schriftenreihe Werkstoffe undwerkstofftechnische Anwendungen Vol. 22 (2005), Chemnitz
- [7] Fa. DURUM Verschleißschutz GmbH.
- [8] N. N.: EWM Hightec Welding GmbH (publisher): EWM- coldArc - Warmereduziertes Fiigen diinnster Bleche. WM.0455.00 (2008), Miindersbac
- [9] Echtenneyer, P.: Plattieren und Panzen von Korrosions- und Verschleißschutzschichten mittels geregelter Kurzlichtbogen-schweißprozess (2013). PhD thesis, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld.
- [10] Bergmann, J. P, W. Frisch, and K. Gunter: Aufmischungsarmes, endkontaminiertes Auftragschweißen hartstoff-verstärkter Fe-Hartpanzerungen mittels geregelter, energiereduzierter MSG-Kurzlichtbogentechnik. In: Kisters, B. (publisher), Schweißen und Schneiden - DVS-Berichte Vol. 296 (2013), Düsseldorf, pp. 602/07.
- [11] Wesling, V et al.: Gerichtete Hartphasen zum Schutz vor abrasiv-erosiver Beanspruchung. In: Wielage, B. (publisher), Schriftenreihe Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen (2011), Chemnitz, conference proceedings
- [12] Egerland, S.: Bedeutung und Anwendung moderner Lichtbogenprozesse für das Schweißplattieren. In: Middeldorf, K. (publisher), DIE VERBINUNGS SPEZIALISTEN – DVS Berichte Vol. 258(2009J, Düsseldorf, pp. 301-308.
- [13] Wesling, V., et al.: Auftragschweißen filldrahtbasierter Hartlegierungen mit geregelter Kurzlichtbogenverfahren zur Herstellung hochwertiger Panzerungen. In: Wielage, B. (publisher), Schriftenreihe Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen (2014), Chemnitz, conference proceedings.
- [14] Oligner, J.: Untersuchungen zum Strahlverschleiß an mehrphasigen Verschleißschutzwerkstoffen (2008). PhD thesis, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld.

Podsećamo vas da obnovite vaše članstvo u DUZS i pretplatu za naš časopis.





VARIJANTE KONTROLE MIG/MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA

DVS MEDIA

Postupak zavarivanja u zaštiti gasa (MIG/MAG) je najčešće korišćeni način zavarivanja. Sadašnja, na tržištu raspoloživa, oprema za zavarivanje je uglavnom sa digitalnom kontrolom i mogućnostima programiranja. To dopušta nove varijante postupka

sa specifično podešenim tehnološkim karakteristikama. Novi termini i nazivi su skriveni i koriste se na specifičan način na bazi kompanijskih naziva. Cilj ovog teksta je pomoćne korisnicima kao orijentacija kada se suoče sa različitim varijantama kontrole za MIG/MAG postupak.

	Naziv	Proizvođač	Klasifikacija prema tehničkom biltenu DVS 0973											
			1) Kontrolisani kratki luk	2) Kratki luk sa malim razbrizgavanjem	3) Kratki luk sa redukovanom energijom	4) Kratki luk visokih performansi	5) Modifikovani sprej luk	6) Pulzirajući (Impulsni) luk	7) Modifikovani pulzirajući (Impulsni) luk	8) Postupak sa naizmeničnom strujom	9) Varijanta kombinovanog procesa	10) Ciklično kretanje žice		
	ColdWeld	Cloos	x		x						x			
	ControlWeld	Cloos	x	x										
	RapidWeld	Cloos						x						
	coldArc	EWM	x	x	x									
	forceArc	EWM						x						
	rootArc	EWM	x	x	x									
	CMT Advanced	Fronius	x	x	x	x					x	x	x	
	CMT (Cold Metal Transfer)	Fronius	x	x	x	x								x
	CMT Pulse	Fronius								x		x	x	
	LSC (Low Spatter Control) & LSC Advanced	Fronius	x	x	x									
	PCS (Puls Controlled Spray Arc)	Fronius						x						
	PMC (Pulse Multi Control)	Fronius								x				
	WiseRoot	Kemppi	x	x										
	WiseThin	Kemppi	x		x									
	newArc	Kjellberg	x	x		x	x							
	SpeedArc	Lorch	x					x						
	SpeedCold	Lorch	x	x	x									
	SpeedPulse	Lorch							x	x				
	SpeedRoot	Lorch	x	x										
	SpeedUp	Lorch	x						x	x		x	x	
	ColdMIG	Merkle	x	x	x									
	DeepARC	Merkle						x						
	HighUp	Merkle	x						x			x		
	ProSWITCH	Merkle										x		
	SSA (Speed Short Arc)	Oerlikon	x	x	x	x								
	FOCUS. ARC	Rehm	x		x			x						
	FOCUS.PLUS	Rehm								x				
	POWER.ARC	Rehm	x		x									



1. Kontrolisani / modifikovani kratki luk

Kontrolisnim postupkom kratkospojenim lukom, elektronska oprema detektuje i kratki spoj i fazu luka i odvojeno ih balansira. Ovo može biti čak i u nekoliko privremenih sektora (intrevala) (sektorski bazirana kontrola).

2. Kratki luk sa malim razbrizgavanjem

Ovim tipovima kontrole postupaka kratkospojenim lukom, mere kontrole obezbeđuju to, da je struja ispod specifične kritične vrednosti u trenutku ponovnog „paljenja“ luka (završetak faze kratkog spoja).

3. Kratki luk sa redukovanom energijom

Ovaj tip kontrolisanog postupka kratkospojenim lukom je sa specijalnim parametrima za mali unos energije. Niskoenergetski postupci kratkospojenim lukom su namenjeni bilo da obezbede malu potrošnju energije tokom zavarivanja, bilo da održavaju mali unos toplote u radni komad.

4. Kratki luk visokih performansi

Brzina deponovanja postupkom sa kratkospojenim lukom može se povećati premeštanjem prelaska kombinovanog luka ka većim brzinama dotura žice. U poređenju sa mešanim lukom, kratki luk uvodi manje energije u radni komad i zahteva manje prevlačenje (razbrizgavanje). Željeno ponašanje se postiže preko specijalnih oblika struje tokom kratkog spoja i faze luka.

5. Modifikovani sprej (raspršeni) luk

Fokusirani luk i skraćeni prenos metala kod modifikovanog sprej luka daju kao rezultat veću gustinu energije i veću dubinu pritiska u rastopljenoj kupki. Ovo je prednost kada je zavarivanje prilagođeno geometriji spoja (na pr. uski žljeb i mali ugao otvora žljeba).

6. Pulzirajući (Impulsni) luk

Izvor energije za zavarivanje se periodično prebacuje na struju sa većim brojem impulsa što dozvoljava selektivan i dobro kontrolisan prenos metala, dok pozadinska struja isključivo služi za jonizaciju zone luka i zagrevanje kraja elektrode kao i površine osnovnog materijala. Kroz strujne impulse se postiže prenos metala sinhronizovan sa frekvencom impulsa. Na osnovu kontrolisanog

prenosa kapi sa definisanom zapreminom kapi, dodatni materijal se može specifično dodavati.

7. Modifikovani pulzirajući (Impulsni) luk

Postupci kontrolisanog pulzirajućeg luka imaju više parametara, koji generalno zahtevaju kontrolu na bazi karakteristika sinergije. Raznovrsnost parametara pulzirajućeg luka u mogućoj kombinaciji sa drugim efektima, strategijama kontrole i vrstama luka, daju širok opseg mogućnosti za modifikovanje pulzirajućeg luka u cilju optimizovanja specifičnih karakteristika postupka.

8. Postupak sa naizmeničnom strujom

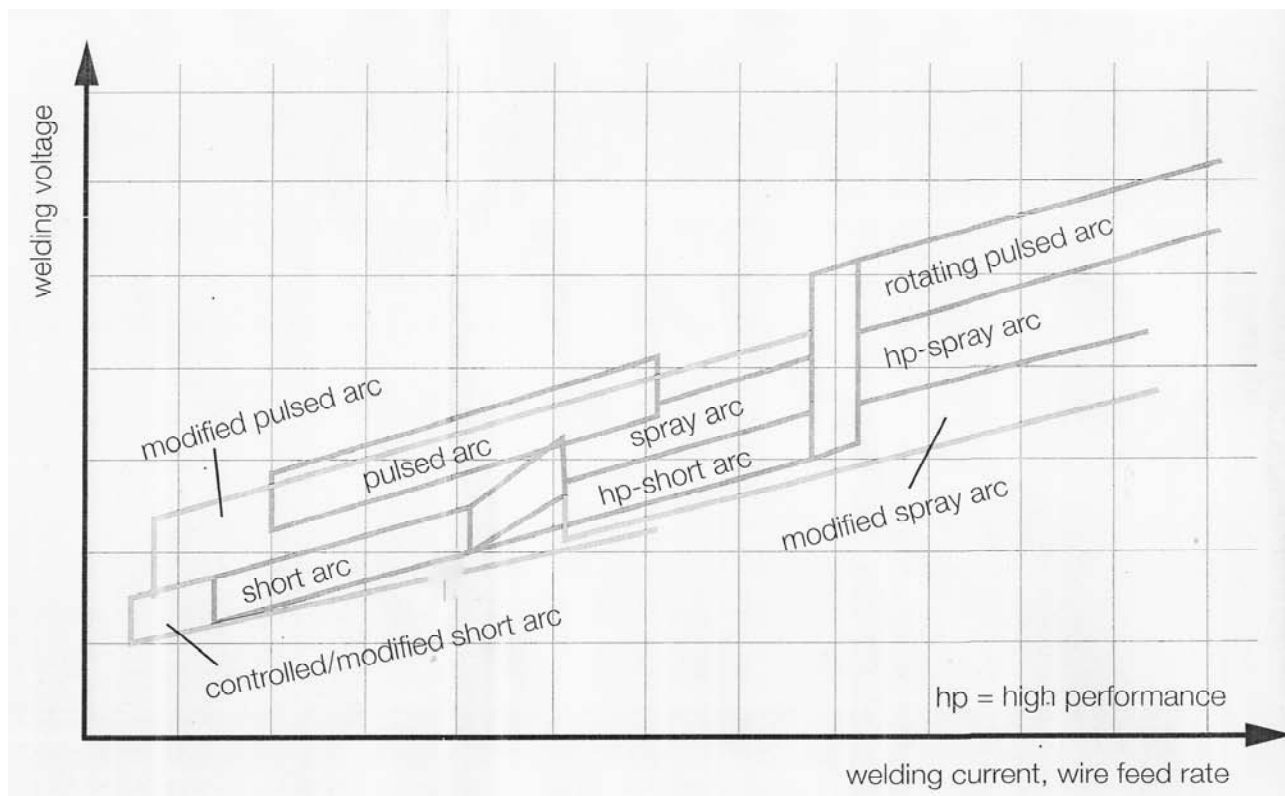
Kontrolisana promena polariteta korišćenjem dodatnog elektronskog izvora tokom određenih faza postupka zavarivanja dodaje još jedan stepen slobode pri kontroli postupka. Prednosti primarno rezultuju iz dobrih karakteristika premošćavanja kod primena sa manjim uvođenjem energije i stepena mešanja.

9. Varijante kombinovanog procesa

Modifikacije u kontroli postupka kod podešavanja vremena svakog pojedinačnog prenosa metala, više nisu vidljive golim okom, oblik luka izgleda „prosečno“ ljudskom oku kao specijalni oblik sa specifičnim karakteristikama. Isto se primenjuje i za provođenje toplote, količinu unete toplote, profil uvarivanja, površinu šava (na pr. namreškanost šava). Varijante kombinovanog postupka probijaju ovu percepciju i efekat, omogućavajući da podešavanje vremena ovih efekata bude razrešeno. Tako delujući zauzvrat daju specijalne nove karakteristike.

10. Ciklično kretanje žice

Ciklična modifikacija brzine dotura žice može biti odlika već i kod varijanti kombinovanog postupka ako individualne varijante postupka imaju različite brzine dotura žice. To povećava zahteve koji se postavljaju pred sistem za dodavanje žice. Varijante postupka koje ciklično menjaju pravac dodavanja žice, postavljaju još veće zahteve za sistem za dodavanje žice.



Tehnološka pripadnost

Varijante kontrolisanog MIG/MAG postupka u osnovi pripadaju elektrolučnom zavarivanju u zaštiti gasa(13)-elektrolučnom zavarivanju u zaštiti inertnog gasa (MIG,131/ zavarivanju u zaštiti aktivnog gasa (MAG, 135). Elektronski kontrolisane varijante MIG/MAG postupka se takođe mogu kategorisati prema sličnosti vrste luka, kao kratki

luk, mešani luk, raspšeni luk i pulzirajući luk. Za razliku od klasičnog MIG/MAG postupka, kontrolisane varijante MIG/MAG postupka specifično menjaju karakteristike u cilju postizanja specifičnih poboljšanja.

Prikaz (prozor) postupka

Varijante postupka proširuju mogući prikaz postupka (oblasti: modified pulsed arc, controlled/modified short arc i modified spray arc).

Podsećamo Vas da je članarina za 2018.g ostala
nepromenjena i iznosi 3500,00 dinara.

Uplatom članarine stičete pravo na GRATIS godišnje izdanje
časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"

Tekući račun DUZS: 355-1025530-87

Informacije:

+ 381 (11) 2420-652

duzs011@gmail.com



ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2018**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	39 000	23 000	16 000	10 000
	kolor	105 000	75 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavlivanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25 % od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
 - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - izrada filma sa CD: 10 % od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, (www.duzs.org.rs), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review**Advertising prices for four successive numbers in 2018**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	840	432	336	240
	colour	2 640	1 680	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30 % of black/white advertising price.
- Print material:
 - for black/white CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

**INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX**

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

MESSER TEHNOGAS

NEMINIK

- | | |
|--|---------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2018. godinu | 3.500 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2018. godina
u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%): | |
| ▪ cena pojedinačnog broja..... | 825 dinara |
| ▪ godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... | 2.500 dinara |
| 3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%) | |
| a) u slobodnoj prodaji: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2016. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2017. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) | 1.045 dinara |
| 5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma | 6.750 dinara |