

**OCENA KVALITETA ZAVARENOG SPOJA NA BAZI METALOGRAFSKOG
ISPITIVANJA****EVALUATION OF THE QUALITY OF A WELDED JOINT BASED ON
METALLOGRAPHIC TESTING**

Svjetlana Bardak Šušnica, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast - MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu izvršeno je metalografsko makro ispitivanje uzoraka u cilju ocene kvaliteta zavarenih spojeva prema standardu SRPS EN ISO 15614-1. Vizuelnim pregledom površine materijala može se samo naslutiti kakvu strukturu ima pa se stoga metalografska ispitivanja obavljaju, između ostalog, u cilju identifikacije makro i mikrostrukturnih grešaka i ispitivanje metalografske strukture u karakterističnim zonama zavarenog spoja: metal šava, ZUT i osnovni materijal. Kao posledica nepoznavanja parametara zavarivanja zbog nedostatka prateće dokumentacije je nemoguće odrediti tačne uzroke nastanka grešaka u zavarenim spojevima. Zbog toga se u analizi makro preseka navode pretpostavke o uzrocima nastalih grešaka.

Ključne reči: Kvalitet, ispitivanje, greške, metalografija, makroanaliza

Abstract – In this study metallographic macro testing was conducted on samples in order to evaluate the quality of welded joints according to the standard SRPS EN ISO 15614-1. A visual inspection of the surface of the material can only provide an idea of the structure, so metallographic tests are performed, among other reasons, to identify macro and microstructural defects and to test the metallographic structure in the characteristic zones of the welded joint: weld metal, HAZ and base material. As a consequence of not knowing the welding parameters due to the lack of supporting documentation, it is impossible to determine the exact causes of defects in welded joints. For this reason, in the analysis of the macro sections, assumptions are made about the causes of the resulting defects.

Keywords: Quality, testing, defects, metalgraphy, macro analysis

1. UVOD

Jasno je da je vrlo složena problematika kod obezbeđenja kvaliteta zavarenih konstrukcija i da je neophodno najpre razjasniti šta podrazumeva kvalitetan zavareni spoj. Standardi koji se odnose na zavarivanje, bilo u domaćoj ili svetskoj literaturi, pružaju nam veliki broj različitih definicija pojma greške [1,2].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Sebastian Baloš, red. prof.

Zavareni spoj, kao kompleksna i heterogena struktura, predstavlja kritično mesto u zavarenoj konstrukciji zbog unosa toplote pri čemu dolazi do mikrostrukturnih promena. Greške u zavarenim spojevima je skoro pa nemoguće izbeći. Međutim, greške se mogu u velikoj meri umanjiti pažljivim planiranjem i izradom. Svaka, pa i najmanja greška, utiče na mehaničke i metalurške osobine konstrukcije i primene gotovog sklopa [3].

Povećani zahtevi za kvalitet i sigurnost zavarenih spojeva u određenim uslovima eksploatacije, postavljaju stroge zahteve za ostvarivanje niza osobina zavarenog spoja. Zahtevi koji se odnose na kvalitet zavarenih konstrukcija definisani su čitavim nizom obavezujućih standarda i direktiva koji su propisani od strane međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) [4].

Da bi rezultati bilo kojeg ispitivanja bili relevantni, važno je da se sprovede prema određenim procedurama. U tu svrhu razvijeni su standardizovani postupci ispitivanja, odnosno norme koje detaljno opisuju postupak ispitivanja materijala za svaku vrstu ispitivanja [5].

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Tokom ekperimentalnog istraživanja sprovedeno je metalografsko makro ispitivanje zavarenih spojeva. Predmet eksperimenta predstavljaju funkcionalni tipovi nosača za lire pri čemu su cevi zavarene za lim koji služi kao osnova. Ispitni uzorci su dostavljeni bez prateće dokumentacije. Ukupno je dostavljeno deset ispitnih uzoraka. Priprema uzoraka započinje izrezivanjem dva poprečna preseka iz svakog ispitnog uzorka u skladu sa SRPS EN ISO 15614-1, klasičnim postupkom rezanja sa planom rezanja prikazanom na slici 1. Poprečni preseki su obeleženi slovima A i B, pri čemu je poprečni presek A uzet iz dela gde cev zaklapa oštar ugao sa osnovom, a poprečni presek B iz bočnog dela.



Slika 1. Uzorak, način uzorkovanja i označavanja

Izrezivanjem uzoraka iz osnovnog materijala dobija se grubo izrađeni makroizbrusak koji se dalje fino obrađuje brušenjem brusnim papirom, počev od najgrubljeg P100 pa do najfinijeg P2500. Nakon brušenja površine uzoraka su polirane dijamantskim suspenzijama od 6 μ m do 1 μ m, potom se vrši nagrizanje nitalom, ispiranje vodom i alkoholom i sušenje.

Fotografisanje makro uzoraka je urađeno na svetlosnom mikroskopu LEITZ-Orthoplan, pri uvećanju od 20x kako bi se uočile greške i nepravilnosti u zavarenim spojevima. Ispitivanje je urađeno po standardu SRPS C A1.011:2004 na optičkom emisionom spektrometru.

Na slici 2 prikazani su makro preseki dobijenih uzoraka nakon metalografske pripreme. Navedenom pripremom se omogućava da se na uzorcima jasno vidi zona uticaja toplote (ZUT), geometrijski oblik spoja i prolazi pri zavarivanju.



Slika 2. Makro preseki pripremljeni za analizu, s leva na desno 1-10

3. REZULTATI I DISKUSIJA

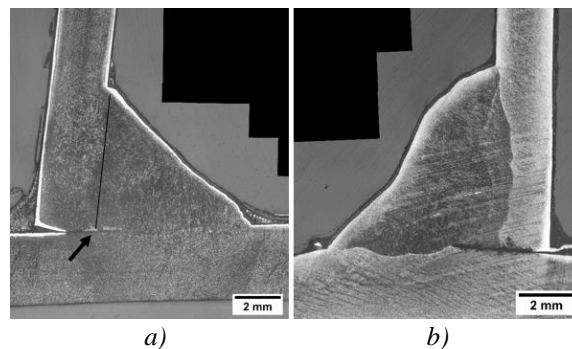
U tabeli 1 je dat hemijski sastav dva zavarena elementa, cevi i horizontalnog elementa (stope). Na osnovu hemijskog sastava, može da se konstatuje da oba materijala pripadaju grupi konstrukcionih čelika. Na osnovu ekvivalentnog sadržaja ugljenika (C_{EKV}), izračunatog na osnovu formule Međunarodnog instituta za zavarivanje, može da se konstatuje da je s obzirom na vrednost ispod 0,46, zavarljivost oba materijala dobra i da se može izvesti bez mera predostrožnosti.

Tabela 1. Hemijski sastav elemenata i C_{EKV}

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	C_{EKV}
Cev	0,17	0,21	0,72	0,011	0,012	0,41	0,22	0,02	0,391
Stopa	0,15	0,30	0,76	0,016	0,017	0,67	0,17	0,04	0,430

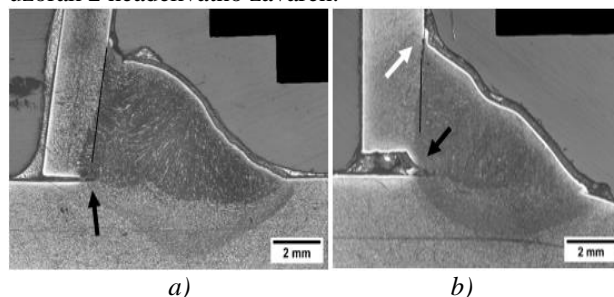
Vizuelnim pregledom uočene su vidljive nepravilnosti na nekoliko uzoraka poput nepravilnosti oblika šava i neprovarenosti korena šava pri čemu je prisustvo ostalih grešaka postalo uočljivo tek nakon pregleda na svetlosnom mikroskopu. Makro prikaz zavarenih spojeva dat je na slikama 5-8.

Makro preseki preuzeti iz uzorka 1 dati su na slici 3. Na slici 3a se vidi neprovaren materijal na dva mesta blizu osnove, sa svetlo sivom fazom nepoznatog sastava. Ista faza je primećena na još jednom mestu u ovoj zoni, više desno. Između ovih faza i ispred faze obeležene strelicom je neprovaren materijal. Na mestu sive faze obeležene strelicom materijal ivice vertikalnog lima nije provaren, što je greška 402. Spoj na slici 3b je izveden korektno. Iz gore navedenog može da se konstatuje da je uzorak 1 neadekvatno zavaren.



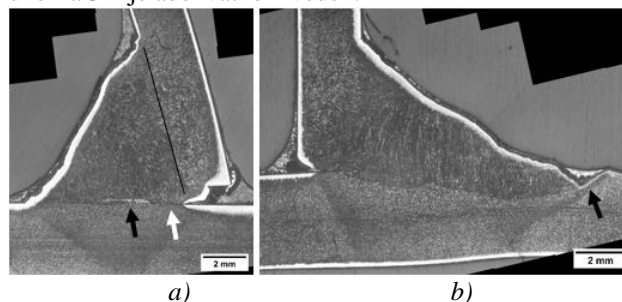
Slika 3. Makro preseki za uzorak 1: a) A; b) B

Makro preseki uzorka 2 dati su na slici 4. Na oba preseka, slika 4a i 4b, se vidi da je ivica vertikalnog lima pretopljena, ali ne postoji veza sa horizontalnim elementom, obeleženo crnim strelicama, što nije adekvatno i predstavlja grešku 402. Na slici 4b je uočena prslina, obeležena belom strelicom, i predstavlja grešku 1001. Na osnovu ovog, može da se konstatuje da je uzorak 2 neadekvatno zavaren.



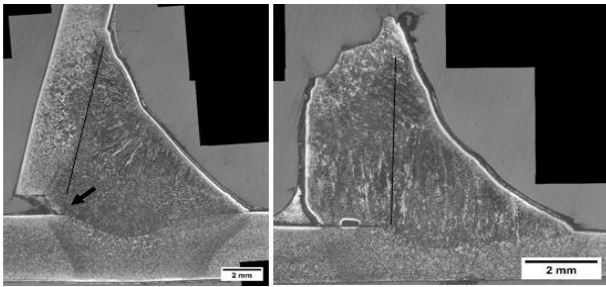
Slika 4. Makro preseki za uzorak 2: a) A; b) B

Makro preseki zavarenog spoja na uzorku 3 dati su na slici 5. Na slici 5a se vidi siva faza nepoznatog porekla, obeleženo crnom strelicom, a desno od nje nestopljena ivica, obeležena belom strelicom. Ivica vertikalnog lima prema metalu šava jeste stopljena, ali veza sa horizontalnim limom ne postoji zbog naznačene nestopljene ivice i sive faze, greška 402. Zavareni spoj na slici 5b je izveden korektno osim nepravilnosti tipa zajeda sa desne strane obeleženog crnom strelicom, greška 5011 ili 5012. Na osnovu navedenog, ocenjuje se da ni zavareni spoj uzorka 3 nije adekvatno izveden.



Slika 5. Makro preseki za uzorak 3: a) A; b) B

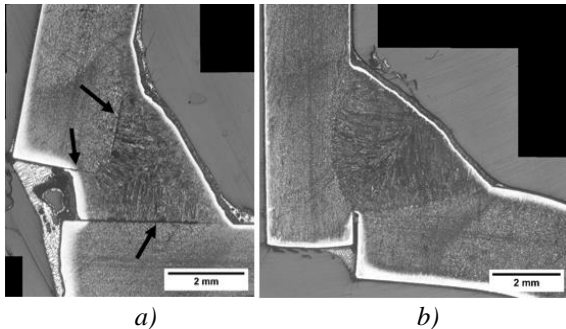
Makro preseki zavarenog spoja uzorka 4 prikazani su na slici 6. Na slici 6a se vidi da je ivica vertikalnog elementa -cevi pretopljena, ali ne postoji veza sa horizontalnim elementom zbog nestopljene ivice, prikazano crnom strelicom, greška 402. Zavareni spoj na slici 6b je adekvatan. To znači, da ni uzorak 4 nije zavaren prema pravilima struke.



Slika 6. Makro preseki za uzorak 4: a) A; b) B

Makro preseki preuzeti iz uzorka 5 dati su na slici 7. Na preseku zavarenog spoja se vidi neprovaren materijal na nekoliko mesta, obeleženo crnim strelicama na slici 7a. Na ovim mestima nije došlo do mešanja dodatnog materijala i pretapanja sa osnovnim materijalom, te se mogu očekivati niske mehaničke osobine zavarenog spoja, greške 401 i 402.

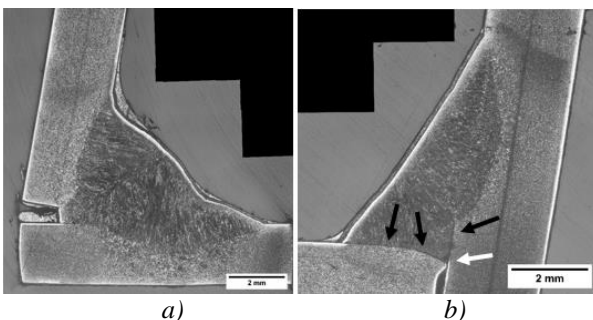
Najlošija je situacija na osnovi, odnosno na horizontalnom limu, gde je do pretapanja/mešanja došlo samo u uskom pojasu na desnoj strani. Na slici 7b se vidi da je cev zavarena korektno, sa pretapanjem ugla horizontalnog materijala, što je u skladu sa dobrom praksom. Međutim, nejasna je geometrija. Potrebno je proveriti da li cev treba da naiđe na osnovu, slika 7a, ili obrnuto, slika 7b. Iz gore navedenog može da se konstatuje da je i uzorak 5 neadekvatno zavaren.



Slika 7. Makro preseki za uzorak 5: a) A; b) B

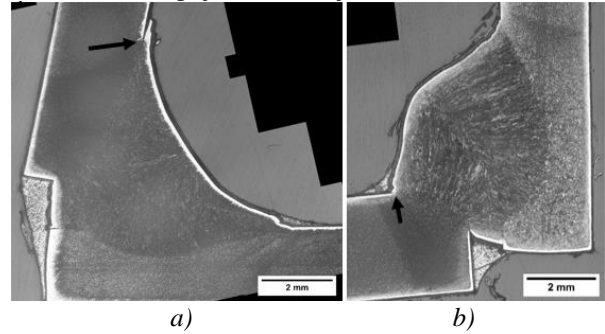
Presek uzorka 6 dat je na slici 8. Zavareni spoj na slici 8a korektno je izveden, ali je na preseku prikazanom na slici 8b došlo do nestapanja sa osnovom, označeno crnim strelicama što predstavlja grešku 401.

Takođe, ivica osnove na mestu obeleženom belom strelicom nije pretopljena, greška 402. Potrebno je proveriti geometriju na zahtevu, da li cev treba da naiđe na osnovu, slika 8a ili obrnuto slika 8b. Na osnovu ovog, može da se konstatuje da je uzorak 6 neadekvatno zavaren.



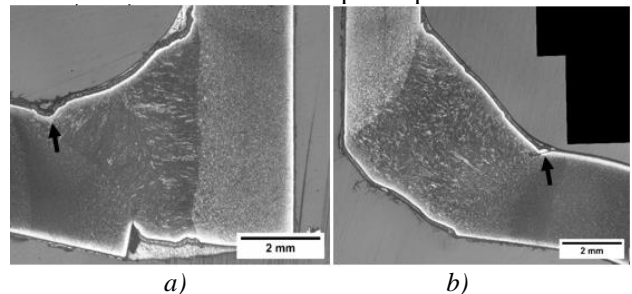
Slika 8. Makro preseki za uzorak 6: a) A; b) B

Makro preseki zavarenog spoja na uzorku 7 dati su na sl. 9. Na oba poprečna preseka vide se prsline koje su obeležene crnim srelicama, koje verovatno potiču od nestapanja sa osnovnim materijalom i mogu predstavljati mesto pojave prsline u slučaju dinamičkog opterećenja, greška 1001. Takođe se primećuje drugačija geometrija spoja kao i u prethodnim slučajevima, koja je neobična u pogledu rasporeda delova osnovnog materijala (vertikalna cev i horizontalna osnova). Na osnovu navedenog, ocenjuje se da ni zavareni spoj uzorka 7 nije adekvatno izveden.



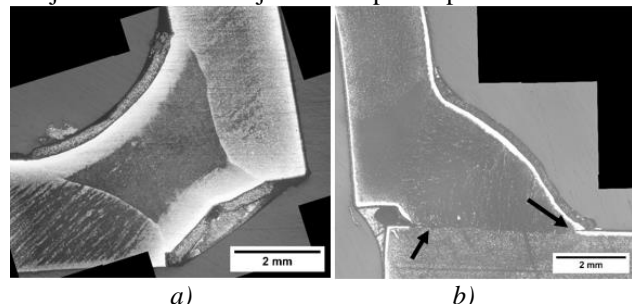
Slika 9. Makro preseki za uzorak 7: a) A; b) B

Makro preseki zavarenog spoja uzorka 8 su prikazani na slici 10. Na slici 10a primetno je da je deo zavarenog spoja adekvatan, uz prisustvo nesavršenosti zajedno, označeno strelicom i predstavlja grešku 5011 ili 5012. Na slici 10b je dat presek sa nestopljenom ivicom u vidu prsline koja je obeležena strelicom, greška 1001. Takođe se primećuje drugačija geometrija spoja kao i u prethodnom slučaju, koja je neobična u pogledu rasporeda delova osnovnog materijala (vertikalna cev i horizontalna osnova). Iz gore navedenog može da se konstatuje da je i uzorak 8 neadekvatno zavaren prema pravilima struke.



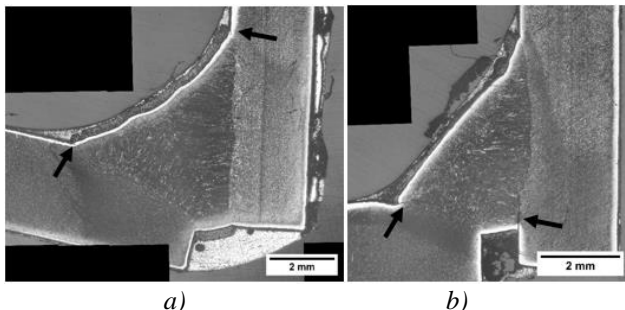
Slika 10. Makro preseki za uzorak 8: a) A; b) B

Zavareni spoj uzorka 9 dat je na slici 11. Na mestu A, slika 11a, je zavareni spoj izveden korektno. Na mestu B, slika 11b, primećena je nestopljena ivica u vidu inicijalne prsline obeleženo strelicom desno, što predstavlja grešku 1001 kao i nestopljena ivica obeleženo strelicom levo, greške 401 i 402. Takođe je i na ovom uzorku neobična geometrija zavarenog spoja. Na osnovu navedenog, konstatuje se da uzorak 9 nije zavaren prema pravilima struke.



Slika 11. Makro preseki za uzorak 9: a) A; b) B

Na slici 12 prikazani su makro preseki zavarenog spoja uzorka 10. Uočene su nestopljene ivice u vidu inicijalnih prslina označenih strelicama na slici 12a, greška 1001. Na slici 12b je takođe primećena prslina na donjoj ivici spoja, obeleženo levom strelicom. Desnom strelicom na slici 12b je označena greška 401, odnosno deo vertikalnog elementa-cevi nije stopljen. Na osnovu toga, konstatuje se da zavareni spoj na uzorku 10 nije adekvatan.



Slika 12. Makro preseki za uzorak 10: a) A; b) B

Dozvoljena odstupanja od homogenosti, tj. dozvoljene vrste, veličine i rasprostranjenosti grešaka, određuju se standardima i propisima. Kriterijum prihvatljivosti za greške u zavarenom spoju definisane su standardom SRPS ISO 5817:2015 gde su navedeni kriterijumi za ocenu dopustivosti grešaka. Prema ovom standardu postoji više mogućih klasifikacija zavarenih proizvoda i zavarenih spojeva, te je izdvojena podela zavarenih proizvoda na 4 klase: I, II, III i IV, dok se zavareni spojevi unutar svake klase proizvoda dele na klase A, B, C i D [6]. Metalografskom analizom dostavljenih uzoraka se zaključuje da nijedan dostavljeni uzorak ne ispunjava zahteve zavarenih spojeva postavljene prema standardu SRPS ISO 5817.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prethodno iznetog iz sprovedenog eksperimenta mogu se izvući određeni zaključci. Zbog nedostajuće dokumentacije, odnosno WPS liste, poprilično je teško tačno odrediti koji su uzroci nastalih grešaka pa se zbog toga navode pretpostavke.

- Prslinae kao najopasnije greške u zavarenom spoju znatno smanjuju čvrstoću pa su samo uslovno dozvoljene. Ova greška nastaje pri hlađenju uz tri neophodna uslova nastanka: prisustvo vodonika, dejstvo zateznih napona i sklonost čelika ka martenzitnoj transformaciji, a nastaju takođe i ako je brzina hlađenja relativno velika.
- Greške nalepljivanja i pojava nestopljenih ivica takođe predstavlja opasnost u konstrukcijama koje su dinamički opterećene postoje uslovi za nastanak i propagaciju prslina. Mogući uzroci njihovog nastanka su premala jačina struje, neadekvatna tehnika rada, prevelika brzina zavarivanja kao i prisustvo nečistoća na površinama materijala.

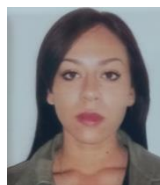
- Greške tipa zajeda u zavarenom spoju su mestimični nedostatak materijala na granicama zavarenog spoja i vrlo često su posledica neočišćenog žljeba ili prevelike struje zavarivanja. Faktori koji doprinose pojavi zajeda su nepravilna tehnika rada i nepravilni parametri zavarivanja.

Sve navedene greške smanjuju nosivost zavarenog spoja kada su izloženi raznim opterećenjima. S obzirom da su greške neizbežna pojava tokom zavarivanja, neke greške se mogu dopustiti u skladu prihvatljivosti i klasi prema navedenom standardu. Može se zaključiti da je propisna upotreba standarda vrlo bitna za postizanje zahtevanog nivoa kvaliteta proizvoda.

6. LITERATURA

- [1] Uvod o obezbeđenju kvaliteta zavarenih konstrukcija <https://www.scribd.com/document/446072825/4-1-Uvod-u-obezbe%C4%91enje-kvaliteta-zav-konstr> (pristupljeno u junu 2023.)
- [2] Greške i kriterijumi prihvatljivosti <https://www.scribd.com/document/516422893/4-7-Gre%C5%A1ke-i-Kriterijumi-Prihvatljivosti-MDj#> (pristupljeno u junu 2023.)
- [3] Bitić S., Greške u zavarenim spojevima, Završni rad; Pula, 2021
- [4] SRPS EN ISO 15614-1:2018-Institut za standardizaciju Republike Srbije
- [5] Bajramović E., Istraživanje uticaja promjenljiv opterećenja na proces inicijacije i rasta prslina kod zavarenih čeličnih konstrukcija, Projekat doktorske disertacije; Bihać, 2021
- [6] Zorković M.; Mjesto i uloga NDT metoda u osiguranju kvalitete zavarivačkih radova; Završni rad; Varaždin, 2016.

Kratka biografija:



Svjetlana Bardak Šušnica rođena je u Beogradu 1989. god. Diplomski rad odbranila je 2021. god. na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinstvo – Materijali i tehnologije spajanja.
Kontakt: svjetlana.susnica@ts9maj.edu.rs