



Determination of the Quality of the Welded Joint of Duplex Steel 1.4462 using Fracture Mechanics

Određivanje kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika 1.4462 primjenom mehanike loma

D. Bajić*¹, M. Marić², T. Vuherer²

¹ Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Bul. Džordža Vašingtona bb, Podgorica, Crne Gora

² Univerzitet u Mariboru, Fakultet za strojništvo Maribor, Smetanova ul.17, Maribor, Republika Slovenija

Abstract: The microstructure of duplex stainless steels at room temperature is austenitic-ferritic in the ratio of 50% austenite and 50% ferrite. These materials have high corrosion resistance. Recognizing this property, duplex steels have found their application in practice for operating temperatures ranging from -50 °C to 350 °C. In the fields of thermomechanics and petrochemicals, these materials are used more and more. The purpose of this work is to define the quality level of the welded joint of duplex steel 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) using fracture mechanics methods. The welding of sheets with a thickness of 10 mm was performed using the conventional MAG (Metal Active Gas) procedure. Test results have confirmed the high level of quality of the welded joint.

Keywords: duplex stainless steel, MAG, J-integral fracture mechanics

Apstrakt: Mikrostruktura dupleks nerđajućih čelika na sobnoj temperaturi je austenitno – feritna u odnosu 50% austenit i 50% ferit. Ovi materijali posjeduju visoku korozionu otpornost. Uvažavajući ovo svojstvo, dupleks čelici su u praksi našli svoju primjenu za radne temperature u rasponu od -50 °C do 350 °C. U oblastima termotehnike i petrohemijske ovi materijali se sve više koriste. Cilj rada je definisati nivo kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) primjenom metoda mehanike loma. Zavarivanje limova debljine 10 mm izvršeno je primjenom konvencionalnog MAG (Metal Active Gas) postupka. Rezultati ispitivanja su potvrdili visok nivo kvaliteta zavarenog spoja.

Ključne riječi: dupleks nerđajući čelik, MAG, mehanika loma J-integral

1 UVOD

Dupleks čelici ili austenitno-feritni čelici se odlikuju dvofaznošću. Visokom sadržaju austenita ovim čelicima obezbjeđuje visoku duktilnost i dobru korozionu postojanost na niskim temperaturama. Naponska korozija je glavni uzročnik pojave prslina kod ovih čelika. Uloga feritne faze je da obezbijedi visok nivo njegove čvrstoće i otpornosti pojave prslina.

Hemijski sastav nerđajućih dupleks čelika čine hrom 21-27%, nikl 1,25-5,5% i ugljenik 0,02%, a kada govorimo o drugim legirajućim elementima treba spomenuti bakar 0,5%, mangan 5% i molibden 3% [1]. Osnovna podjela dupleks nerđajućih čelika je na [2]:

- dupleks nerđajuće čelike koji u svom sastavu ne sadrže azot usled čega imaju slabu zavarljivost,
- dupleks nerđajuće čelike koji su u svom sastavu sadržali azot u obimu 0,1-0,25%,
- dupleks nerđajući čelici kod kojih je ekvivalentna otpornosti na piting koroziju $PREN > 40$ ($PREN$ - postojanost dupleks nerđajućih čelika na tačkastu (piting) koroziju).

Ekvivalentna otpornost ($PREN$) prema [2] računa se pomoću izraza:

$$PREN = \%Cr + 3,3x(\%Mo) + 30x(\%N) \quad (1)$$

dok se prema [3] i [4] računa pomoću izraza:

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16x\%N \quad (2)$$

* darko@ucg.ac.me

Dupleks čelici imaju izrazito dobra mehanička svojstva, visoku čvrstoću i dobru duktilnost do -40°C . Kako temperaturno područje njihove primjene počinje od -50°C , dok dobru duktilnost zadržavaju do -40°C , može se izvesti zaključak da je postepen prelaz iz duktilnog u krto stanje.

U zavisnosti od karakteristika osnovnog materijala (OM) dupleks čelika 1.4462, tj. prema njegovom hemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima, izvršen je odabir dodatnog materijala za zavarivanje. Dodatni materijal pri MAG zavarivanju je puna nerđajuća topljiva žičana elektroda G/W 22 9 NL (ISO 14343-A) prečnika $\varnothing 1\text{mm}$. Izvršeno je višeprolazno zavarivanje MAG postupkom koristeći aparat VARSTROJ-VARMIG 600 D44 Synergu sa parametrima zavarivanja: napon električnog luka $U = 23,9\text{ V}$, jačina struje zavarivanja $I = 151,2\text{ A}$ i brzina zavarivanja $v = 35\text{ cm/min}$. Temperatura međuprolaza je $+150^{\circ}\text{C}$ [5].

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala zavarenih spojeva, odnosno metala šava (MŠ), debljine 10 mm primjenom MAG postupka pokazalo je slične vrijednosti s vrijednostima mehaničkih svojstava OM. Ispitivanja koja obuhvataju ispitivanje na zatezanje, ispitivanje duktilnosti po Charpy, ispitivanje tvrdoće HV metodom, potvrđuju dobra mehanička svojstva i dobru zavarljivost dupleks čelika 1.4462 [5, 6].

2 METODOLOGIJA RADA

2.1 Uzorkovanje epruveta

Po završetku zavarivanja (slika 1 i slika 2), tečnim penetrantima (slika 3) izvršeno je ispitivanje kvaliteta zavarenih spojeva s aspekta postojanja površinskih prslina. Ispitivanjem je potvrđeno da ne postoje površinske greške u zavarenim spojevima.



Slika 1 - Lice zavarenog spoja ploča debljine 10 mm

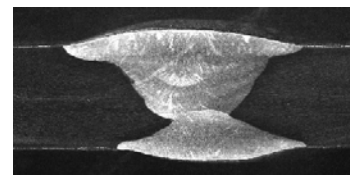


Slika 2 - Korijenska strana ploča debljine 10 mm



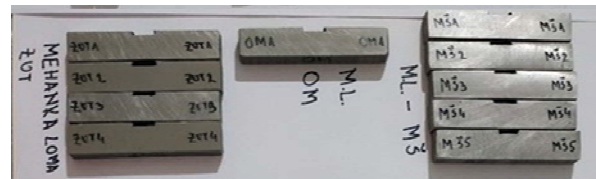
Slika 3 - Penetrantska kontrola zavarenog spoja limova 10 mm

Makro izbrusak na kom se jasno detektuju zavarivački prolazi (zavari) prikazan je na slici 4.



Slika 4 - Makroizbrusak zavarenog spoja

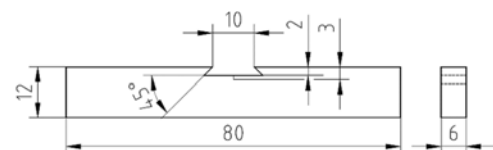
Uzorkovanje epruveta (slika 5) iz zavarenih ploča dimenzija 360x240x10 mm izvršeno je primjenom WaterJet tehnologije.



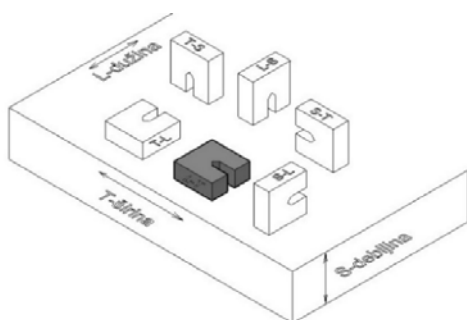
Slika 5 - Uzorkovane epruvete [5]

2.2 Ispitivanje primjenom mehanike loma

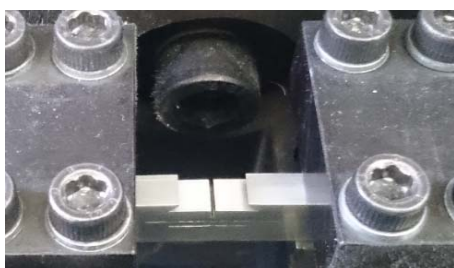
Ispitivanje uzoraka primjenom mehanike loma izvršeno je u OM, ZUT-u (zona uticaja toplote) i MŠ. U skladu sa standardom ASTM E1820-20A [7] za ova ispitivanja korišćena je epruveta tipa Single Edge Bend SE(B) uzorak (slika 6), dok je šema orijentacija uzorkovanja epruvete iz ploče L-T data na slici 7. Formiranje zamorne prsline je izvršeno na uređaju Rumul Cractronic (slika 8), a ispitivanje mehanike loma zavarnog spoja izvršeno je na uređaju SMITWELD 1405 (slika 9) [5].



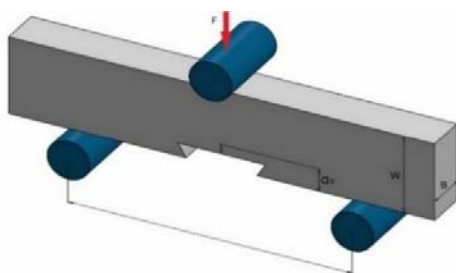
Slika 6 - Geometrija SENB epruvete



Slika 7 - Obilježavanje orijentacije epruveta pri uzorkovanju iz lima



Slika 8 - Formiranje zamorne prsline na uređaju Rumul Cractronic



a)



b)

Slika 9 - Ispitivanje SENB epruvete: šema (a) i na uređaju Smitweld 1405 (b)

Mehanika loma je nauka koja se zasniva na matematičkom opisu polja napona koji okružuju prslinu u opterećenom tijelu. Kada se lom posmatra kao završna faza razvoja prsline, tada je lom epruvete uslovljen lokalnim procesima. Dakle, ukupna otpornost epruvete na lom zavisi od lokalnih poremećaja. Završna faza deformacije je lom epruvete. Prema definiciji, postoji potpuni i nepotpuni lom [8].

Linearno elastična mehanika loma (LEL) primjenjuje se sve dok je veličina plastične zone na vrhu prsline mala u poređenju sa dužinom prsline. U slučaju kada je veličina plastične zone veća (dominantno ravno stanje napona), ali je i dalje značajno manja od prsline, procjena nosivosti elementa se dobija pomoću modifikovane LEML, tj. Koristeći R-krive. Kada je veličina plastične zone mnogo veća u odnosu na dužinu prsline primjenjuje se elasto plastična mehanika loma (EPML) [9].

Faktor intenziteta napona K_I je jedan od osnovnih faktora u oblasti mehanike loma. Faktorom K_I opisuje se naponsko deformaciono stanje u okolini vrha prsline koje je uzrokovano dejstvom opterećenja koje je udaljeno ili postupkom zaostalih napona u strukturi [10]. Prema autorima Sedmaku i Anyiami [11] faktor intenziteta napona predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije. Kritična vrijednost ovog faktora naziva se žilavost loma (K_{Ic}) i predstavlja fundamentalno svojstvo materijala. Osnovni izraz za određivanje faktora intenziteta napona je:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

gdje su:

Y – bezdimenzioni geometrijski parametar,

σ (MPa) – napon u presjeku dovoljno udaljenom od vrha prsline i

a (m) – dužina prsline.

Drugi važan faktor koji se bavi analizom u oblasti EPML je otvaranje vrha prsline CTOD (σ). Ovaj parametar se dobija mjerenjem na određenom rastojanju od vrha prsline. Zbog jednostavnosti određivanja, parametar CTOD (σ) ima veliku praktičnu primjenu [10, 11].

Faktor intenziteta napona za korišćenu SENB epruvetu se određuje pomoću izraza [9]:

$$K_I = \frac{PS}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\sqrt{\frac{a}{W}}\{1,99 - \frac{a}{W}(1 - \frac{a}{W})[2,15 - 3,93(\frac{a}{W}) + 2,7(\frac{a}{W})^2]\}}{2(1 + 2\frac{a}{W})(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

gdje su:

- W (m) – debljina SENB epruvete,
- B (m) – širina SENB epruvete,
- $S (= 4W)$ (m) – raspon oslonaca i
- P (kN) – intezitet sile opterećenja.

Rice je 1968. godine postavio teorijske osnove J integrala, koji je po njemu i dobio ime - Rajsov integral. Prema [10], J integral je faktor koji se bavi analizom u oblasti EPML, nezavisan je od putanje integracije, a karakteriše se sledećim svojstvima:

- mogućnost primjene u LEML i EPML,
- njegovu vrijednost moguće je odrediti numerički, analitički i eksperimentalno i
- predstavlja energetski parametar.

Vrijednost J integrala, izračunava se prema izrazu [7, 9]:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (5)$$

gdje su:

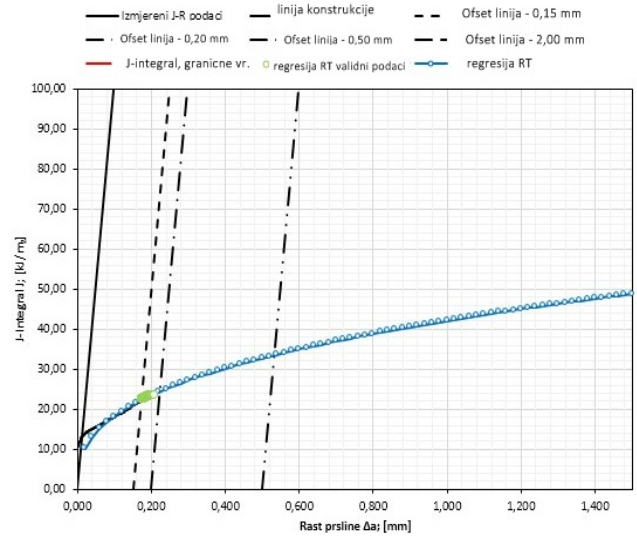
- J_{el} – elastična komponenta J integrala
- J_{pl} – plastična komponenta J integrala.

Vrijednost J_{IC} karakteriše žilavost materijala u blizini izduženja prsline.

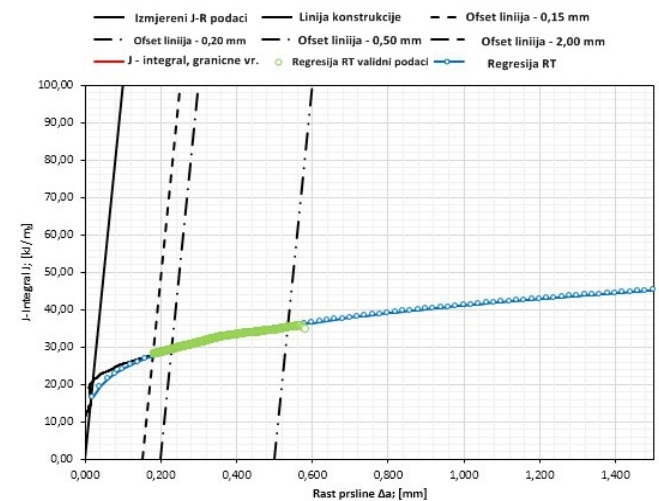
3 REZULTATI

Postupak određivanja vrijednosti J_{IC} definisan je standardom ASTM E1820-20A [7]. Na slikama 10-12 prikazani su karakteristični, eksperimentalno dobijeni, dijagrami $J-\Delta a$ koji nam služe za određivanje vrijednosti karakteristike žilavosti materijala, J_{IC} .

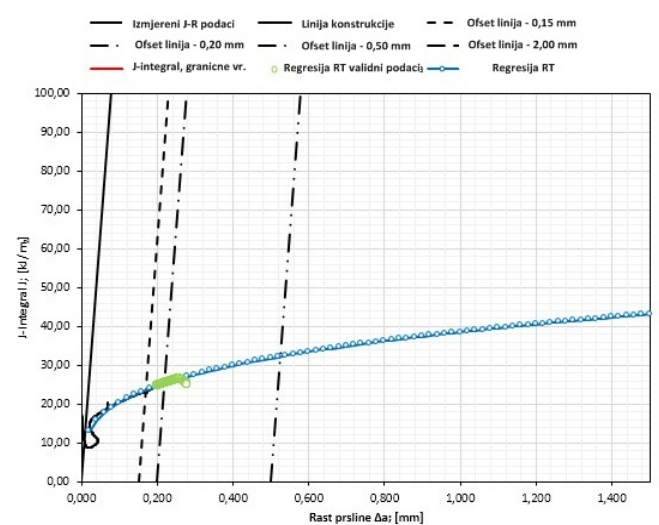
Pri ispitivanju uzoraka zavarenog spoja OM, MŠ i ZUT-a, konstovano je da nijesu ispunjeni svi uslovi ispitivanja koji su definisani standardom ASTM E1820. Budući da su neispunjeni uslovi u obilježavanju J-integrala figuriše JQ umjesti J_{IC}.



Slika 10 - J - integral kriva otpornosti za OM



Slika 11 - J - integral kriva otpornosti za MŠ



Slika 12 - J - integral kriva otpornosti za ZUT

4 DISKUSIJA

Upoređujući dobijene vrijednosti parametara J-integrala (Tab. 1), možemo konstatovati da najveće vrijednosti koje definišu duktilnost materijala ima MŠ. Rezultati za OM i ZUT su veoma bliski. Kao generalni zaključak može se izvesti da su OM i zavareni spoj izrazito duktilni. Ovu konstataciju potvrđuje i činjenica da je prslina kod MŠ otvorena veoma malo 1,7 mm, dok je kod OM i ZUT-a ovo otvaranje nešto veće ali i dalje izrazito male vrijednosti od 2,6 mm.

Tabela 1. Prikaz dobijenih vrijednosti J-integrala

	$J_{Q(1)}$, KJ/m ²
OM	24,37
ZUT	25,25
MŠ	29,08

Na konačne rezultate uticale su i usvajane karakteristike materijala. Za MŠ, mehanička svojstva dodatnog materijala su bila osnov za proračun karakteristika MŠ. Kod OM usvojene su vrijednosti mehaničkih svojstava dobijena eksperimentalnim putem, a za ZUT usvojena su mehanička svojstva koja je ponudio proizvođač u listama šarže proizvoda. Sve epruvete pri mehaničkom ispitivanju na zatezanje polomile su se u OM, a ne u ZUT-u ili MŠ [5].

Zbog neispunjenosti uslova definisanih standardom ASTM E1820-20A, vrijednosti rezultata dobijenih za J-integral ne mogu se smatrati prihvatljivim, pa umjesto oznake J1c obilježava se sa JQ(1).

5 ZAKLJUČAK

Neispunjenost uslova ispitivanja mehanike loma je posledica udara plastične zone prsline u zadnji zid epruvete. Rezultati dobijeni za MŠ su najbolji i ukazuju na izraženu duktilnost zavarenog spoja, odnosno MŠ.

Vrh prsline je plastično deformisan, tj. prsline je doživljavala proces zatupljenja, zbog čega njenog napredovanja skoro da nije ni bilo. Ovo je još jedna potvrda visoke duktilnosti ispitivanog dupleks čelika i njegovog MAG zavarenog spoja.

Rast prsline u sve tri zone zavarenog spoja je mali, što ukazuje da se radi o izuzetno duktilnom zavarenom

spoju tj. njegove zone posjeduju visok stepen otpornosti na mehanički lom.

6 LITERATURA

- [1] AK Steel, Stainless steel comparator, 2015, <https://hrv.mentorbizlist.com/4295994-duplex-steel-description-characteristics-and-features>, pristupano 06.01.2020
- [2] Juraga J., Šimunović V., Stojanović I., Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, Pula, 2007, str. 1-4
- [3] Babić N., Diplomski zadatak – A-TIG zavarivanje dupleks čelika – A-TIG welding of duplex stainless steel, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014, str. 10-30, 56-64
- [4] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf, pristupano 28.12.2019, str. 1-15
- [5] M. Marić, Istraživanje mogućnosti primjene MAG postupka za zavarivanje dupleks čelika 1.4462, Magistarski rad, jul 2021. godine, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet.
- [6] M. Marić, D. Bajić, T. Vuherert, Welding duplex stainless steel with MAG welding procedure, ASR International Conference “Welding 2021”/Conferința internațională ASR, ”Sudura 2021”, 22-23.04.2021., România.
- [7] ASTM E1820-20A Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- [8] Miličić D. M., Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš 2020.
- [9] Čulafić B. V., Mehanika loma, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet u Podgorici, Podgorica 1999.
- [10] Živojinović D.D., Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legure aluminijuma, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [11] Sedmak A., Anyiam H.A., Primena mehanike loma na procenu integriteta konstrukcije, 2001.