



Tomaž Vuherer¹, Darko Bajić², Mersida Manjgo^{3,a}, Edvard Bjelajac⁴, Andrej Skumavc⁵, Uroš Orožim¹, Gorazd Lojen¹

USPOREDBA TOPITELJA ZA ATIG ZAVARIVANJE I NJIHOV UTICAJ NA MEHANIČKE OSOBINE

COMPARISON OF ATIG WELDING POWDERS AND THEIR INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Februar 2024.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerza u Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija

² Univerzitet Crne Gore, Mašinski Fakultet, Podgorica, Crna Gora

³ Univerzitet Džemal Bijedić, Mašinski Fakultet, Mostar, BiH

⁴ Messer Slovenija d.o.o., Ljubljana, Slovenija

⁵ SIJ Acroni d.o.o., Jesenice, Slovenija

email: ^amersida.manjgo@unmo.ba

Ključne reči: ATIG, aktivirajući topitelj, TIG zavarivanje, mehanička svojstva, zatezanje, tvrdoća, energija udara

Keywords: ATIG, activating flux, TIG welding, mechanical properties, tensile tests, hardness, absorbed energy

Rezime

Primjena konvencionalnog elektro-lučnog zavarivanja u zaštiti argona (TIG postupak zavarivanja) ima ograničene mogućnosti. Ova ograničenja se prije svega odnose na debljinu zavarivanog materijala i potrebu pripreme žljeba za njihovo zavarivanje. Prevažilaženje ovih ograničenja kod TIG zavarivanja je učinjeno primjenom aktivirajućih topitelja, pa je postupak dobio naziv ATIG (A-TIG) zavarivanje. U radu se prezentuju rezultati istraživanja primjene aktivirajućih topitelja pri zavarivanju austenitnog nerđajućeg čelika 316L debljine 6 mm. Upotrebom topitelja BC-31 i QuickTIG različite hemijske osnove, međusobno upoređujemo mehanička svojstva zavarenih spojeva, kao i sa zavarenim spojevima istog materijala dobijenog primjenom konvencionalnog TIG postupka. Rezultati pokazuju da najbolja mehanička svojstva posjeduju zavareni spojevi realizovani ATIG postupkom primjenom mješavine aktivnih topitelja BC - 31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli topitelj).

Abstract

The application of conventional electric arc welding in argon protection (TIG welding process) has limited possibilities. These limitations are primarily related to the thickness of the welded material and the need to prepare the groove for their welding. Overcoming these limitations in TIG welding was done by using activating flux, so the procedure was named ATIG (A-TIG) welding. The paper presents the results of research into the application of activating fluxes in welding austenitic stainless steel 316L with a thickness of 6 mm. By using the BC-31 and QuickTIG melters of different chemical bases, we compare the mechanical properties of the welded joints, as well as with the welded joints of the same material obtained using the conventional TIG procedure. The results show that the best mechanical properties are possessed by welded joints realized by the ATIG process using a mixture of activating fluxes BC - 31 (50%) and QuickTIG (50%) (green + white flux).

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Postizanje pouzdanog zavarenog spoja podrazumijeva identičnost ili minimalna razlika mehaničkih karakteristikama metala šava (MŠ) i osnovnog metala (OM). Ograničenja primjene konvencionalnog elektrolučnog TIG zvarivanja uslovlila su potrebu za poboljšanjem penetracionih svojstava električnog luka. Povećanje struje zavarivanja nije dalo dobre rezultate. Primjena aktivirajućih topitelja predstavlja modifikovati konvencionalni TIG postupak koji se u literaturi sreće pod nazivom ATIG zavarivanje. Efekti ATIG postupka zavarivanja su posledica aktivacije hemijskih i fizičkih procesa u zoni zavarivanja.

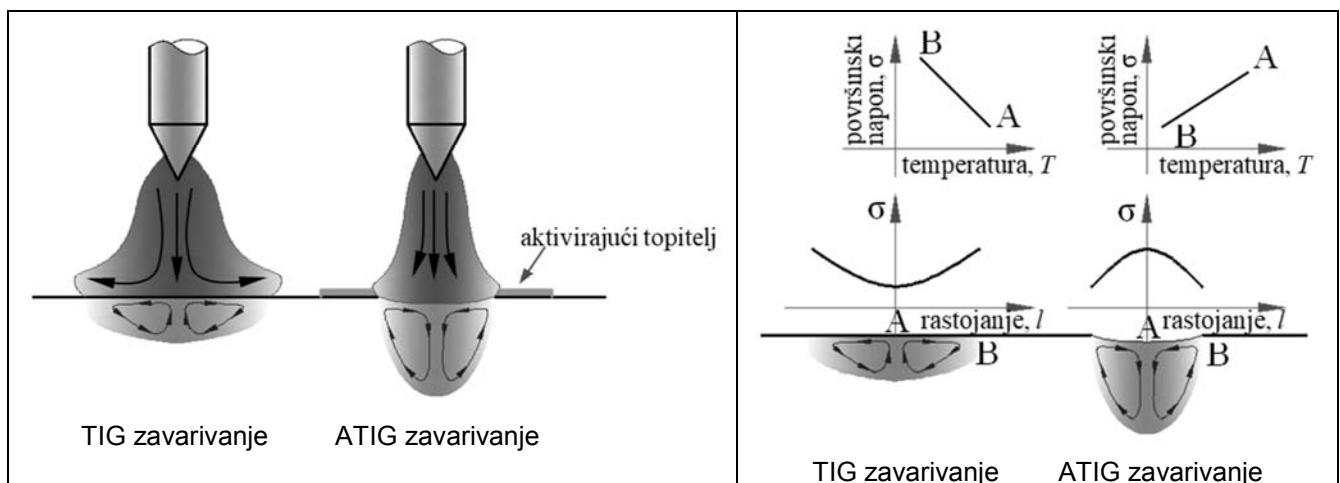
U Institutu za elektrozavarivanje E.O.Paton iz Kieva (Ukraina), 60-tih godina prošlog vijeka, kao nužna potreba pri zavarivanju visoko rafiniranih čelika, kontrolisanim unosom mikrokoličina aktivirajućih topitelja u zonu zavarivanja osvojena je nova metoda poboljšanja tehnoloških karakteristika električnog luka [1-6]. Mikro količine topitelja potpomažu razvoju hemijskih i fizičkih proces u električnom luku i rastopu, što doprinosi poboljšanju penetracione sposobnosti električnog luka [7].

Penetraciona sposobnost električnog luka se povećava kao posledica povećanja 1,5 - 2,5 puta gustine energije u aktivnoj mrlji anode bez dodatne

potrošnje inertnog zaštitnog gasa. U odnosu na konvencionalni TIG postupak, potrebna struja zavarivanja pri ATIG postupku je 30 - 40 % manja pri zavarivanju istog materijala. Usled koncentracije energije širina zone uticaja toplote (ZUT) je manja, čime se postiže efekat povećanje otpora formiranju toplih i hladnih prslina u OM i ZUT-u. Hemijski sastav MŠ u odnosu na OM ostaje skoro nepromijenjen, što doprinosi ujednačenosti ili poboljšanju mehaničkih svojstava MŠ.

Razumijevanje metalurškog aspekta i aktivacije procesa u zoni zavarivanja su od ključnog značaja za razumijevanje poboljšanih penetracionih svojstava električnog luka primjenom aktivirajućih topitelja. Topitelji su osmišljeni na bazi negativnih i površinski-aktivnih, lako jonizujućih elemenata. Sadrže aktivatore za obezbjeđenje potrebne povoljne geometrije šava i modifikatora za poboljšanje strukture i svojstava tečnog metala rastopa.

Mehanizam za objašnjenje uticaja aktivirajućeg topitelja na penetraciono svojstvo električnog luka i geometriju MŠ je Marangonijev efekat strujanja fluida (sl.1) u kombinaciji s Lorentz-ovim silama. Marangonijev efekat se bazira na Toplotnom Koeficijentu Površinskog Napona – TKPN rastopa.



Slika 1. Shematski prikaz Marangonijevog efekta strujanja tečnog metala u rastopu

Figure 1. Schematic representation of the Marangoni effect of the liquid metal flow in the melt

Primjenom aktivirajućeg topitelja, vrijednost TKPN je pozitivan. Temperatura perifernog dijela rastopa je i dalje niža od centralnog ($T_A > T_B$) ali je površinski napon manji ($\sigma_A > \sigma_B$) što doptinosi generisanju cenripetalnog Marangonijevog efekta u rastopu - tok rastopa se odvija od periferije ka

centru (sl.1). Geometrija zavara je povoljna, mala širina i velika penetracija [7, 8].

Osnovu hemijskog sastava aktivirajućih topitelja čine soli i oksidi metala koji determinišu njegova metalurška svojstva, a diktiran je od strane hemijskog sastava zavarivanog čelika [9, 10]. U ovom trenutku, razvijeni su topitelji za zavarivanje



visokolegiranih austenitnih čelika (Cr-Ni), feritno-beinitnih (Cr-Mo-V) čelika otpornih na puzanje i ugljeničnih konstrukcionih feritno-perlitnih čelika (do 0.25% C) za izradu cijevi visokog pritiska [9].

ATIG postupak zavarivanja omogućava da se uspješno izvede zavarivanje čelika debljine do 12 mm bez pripreme žljeba i zazora za jednostrano, a debljine do 20 mm za dvostrano zavarivanje [9]. Tehnološki ATIG postupak zavarivanja je veoma blizak plazma zavarivanju.

Istraživanja na polju primjene topitelja zavarivanje čelika različitih klasa je intenzivno [11-16].

2. Metodologija rada

2.1 Materijal

Za istraživanje je, kao OM korišćen austenitni nerđajući čelik 316L (ASTM). Debljina čelika je 6 mm. Njegov hemijski sastav je vidljiv u tabeli 1 a njegove mehaničke osobine su date u tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav nerđajućeg čelika 316L (mas %)

Table 1. Chemical composition of stainless steel 316L (mass %)

C	Si	Mn	S	P	Cr
0,028	0,336	1,396	0,001	0,033	16,580
Ni	Mo	Cu	Co	N	Fe
10,005	2,008	0,336	0,154	0,036	ostatak

Tabela 2. Mehaničke osobine nerđajućeg čelika 316L

Table 2. Mechanical properties of the stainless steel 316L

$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	HB
297	329	594	56	82

2.2 Zavarivanje

Za zavarivanje su pripremljeni uzorci sa I oblikom žljeba. Osnovni materijal (316L), debljine 6 mm, dužine 220 mm i širine 75 mm pripremljen je za robotsko ATIG zavarivanje. Sa donje strane izvedena je zaštita korijena zavarenog spoja korišćenjem inertnog gasa Argona. Dvije ploče osnovnog materijala postavljene su u stezaljke, a

na kraju sa obje strane su postavljeni dodatni pomoćni taloni za početak i kvalitetan završetak zavara.

Na slici 2. prikazana je priprema osnovnog materijala prije zavarivanja sa formiranjem korijena korišćenjem inertnog gasa argona sa donje strane. Za zavarivanje je korišćen Fronius AC/DC TIG izvor MagicWave 2000.



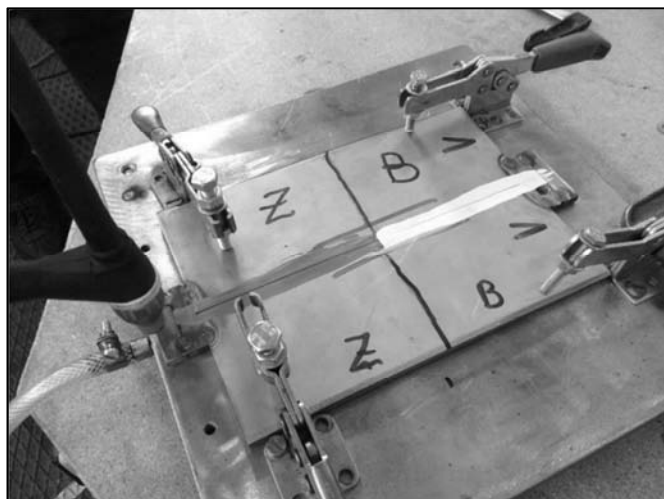
Slika 2. Priprema osnovnog materijala prije zavarivanje sa formiranjem korijena korišćenjem inertnog gasa argon sa donje strane

Figure 2. Preparation of the base material before welding, with root protection from the bottom side by using inert argon gas



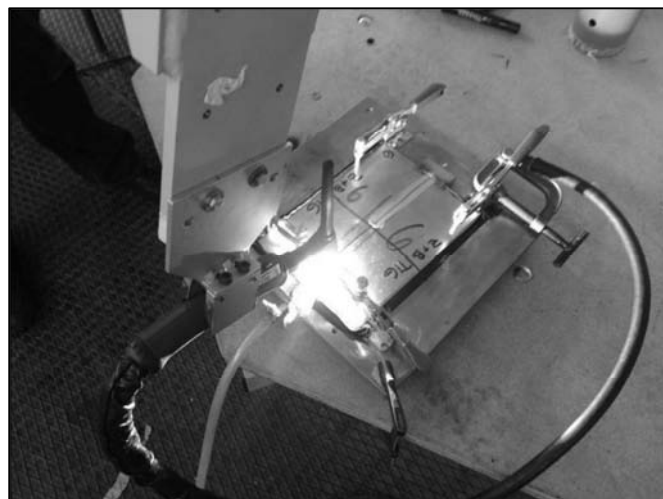
Zavarivanje je izvedeno korišćenjem robotskog ATIG postupka zavarivanja bez dodatnog materijala, pri čemu se koristio ABB robot XR ACMA 701. Prije zavarivanja na površinu sa gornje strane je nanešen aktivirajući topitelj za ATIG zavarivanje. Za analizu su korišćena dva topitelja različite hemijske osnove. Prvi topitelj je ukrajinskog proizvođača Patonovog instituta iz

Kijeva sa oznakom BC-31 koji je zelene boje. Drugi topitelj je slovenačkog proizvođača JUVAR d.o.o. sa oznakom QuickTIG koji je bijele boje. Oba topitelja su prije zavarivanja nanešena na istom pripremljenom uzorku za zavarivanje u dužini od po 110 mm, što je prikazano na slici 3. Robotsko ATIG zavarivanje prikazano je na slici 4. Zavareni spoj je formiran u jednom prolazu.



Slika 3. Priprema za zavarivanje sa nanosom aktivnih topitelja na površini – zeleni aktivni topitelj i bijeli aktivni topitelj

Figure 3. Preparation for welding with application of activating flux on the surface - green activating flux and white activating flux



Slika 4. Robotsko ATIG zavarivanje bez dodatnog materijala

Figure 4. Robotic ATIG welding without filler material

Izmjereni parametri zavarivanja prikazani su u Tabeli 3. U tabeli „Z“ označava korišćenje zelenog topitelja BC-31 i „B“ označava korišćenje bijelog topitelja QuickTIG, a „bez topitelja“ znači da je zavarivanje izvedeno konvencionalnim TIG postupkom zavarivanja.

Kod svih uzoraka, struja i brzina zavarivanja je bila ista, kao i dužina električnog luka. Napon nije podešavan na TIG uređaju Fronius MagicWave 2000, već je mjerjen tokom procesa zavarivanja.

Na prelazu iz zone jednog na zonu sa drugim topiteljem, napon za zavarivanje je doživio svoju promjenu. Dio zavarenog spoja ploče na kom se nalazio BC-31 topitelj (zeleni) napon je bio za 3,5% veći nego na dijelu spoja sa QuickTIG topiteljem (bijeli). Najmanji napon zavarivanja je izmjeren pri zavarivanju konvencionalnim TIG postupkom, bez korišćenja dodatnog materijala.

Tabela 3. Izmjereni parametri zavarivanja

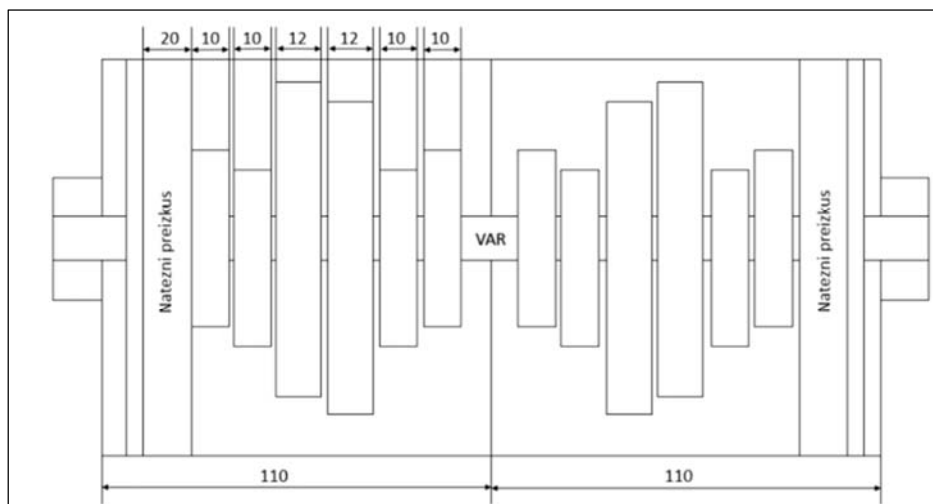
Table 3. Measured welding parameters

Aktivirajući topitelj	I [A]	U [V]	v_w [cm/min]	k [%]	Q [kJ/cm]
BC-31 (Z)	170	12,4	9,1	0,65	9,03
QuickTIG (B)	170	11,6	9,1	0,65	8,45
BC-31 +QuickTIG (Z+B)	170	10,9	9,1	0,65	7,94
TIG (bez topitelja)	170	10,4	9,1	0,65	7,57



Iz svakog zavarenog spoja uzorkovane su epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Izrađene su epruvete za ispitivanje zatezanjem, ispitivanje na ugib,

ispitivanje na instrumentiranom Charpy klatnu, mjerenje tvrdoće i uzorci za analizu mikrostrukture. Plan sječenja uzoraka i sami uzorci su prikazani na slici 5.



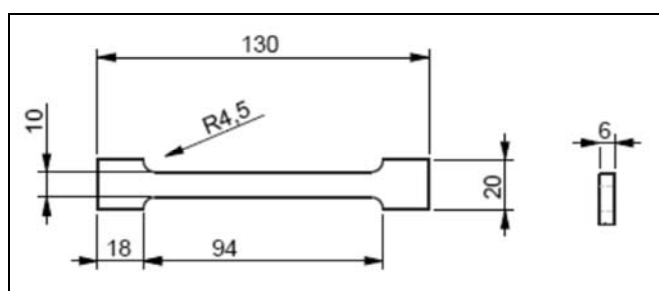
Slika 5. Plan sječenja uzoraka iz zavarenog spoja

Figure 5. Plan of cutting samples from the welded joint

Geometrija uzorka za zatezanje je prikazana na slici 6. Svi uzorci su debljine 6 mm.

Na kraju ispitivanja su pripremljeni makro-uzorci sa brušenjem na vodo brusnom papiru raznih granulacija između P100 do P1200 i poliranjem na glinici dimenzija 0,3 μm . Sledilo je nagrizanje površine sa 1 % nitalom u trajanju od 20 sekundi.

Na tim makro-uzorcima je mjerena tvrdoća po Vikesu u skladu sa standardom EN ISO 9015-1 u čeonom (tjemenom) dijelu zavarenog spoja 1 mm ispod površine. Tvrdoća je mjerena u tri zone zavarog spoja: OM, ZUT-u i MŠ.



Slika 6. Geometrija i izgled uzorka (epruvete) za ispitivanje zatezanjem

Figure 6. Geometry and appearance of the specimen (sample) for tension testing

Urađen je test udarne žilavosti na instrumentiranom Charpy klatnu AMSLER RPK 300 J u MŠ za sve ATIG zavarene spojeve. Za test su korišćeni uzorci dimenzija 6 x 10 x 55 mm sa ISO – V zarezom sa radijusom na dnu zarezom 0,25 mm.

2.3 Eksperiment i analiza rezultata

Rezultati testova na zatezanje su prikazani na slikama od 7 do 10, gdje su prikazani $\sigma - \epsilon$

dijagrami za zavarene spojeve sa upotrebom različitih aktivirajućih topitelja pri ATIG zavarivanju i konvencionalnog TIG zavarivanja.

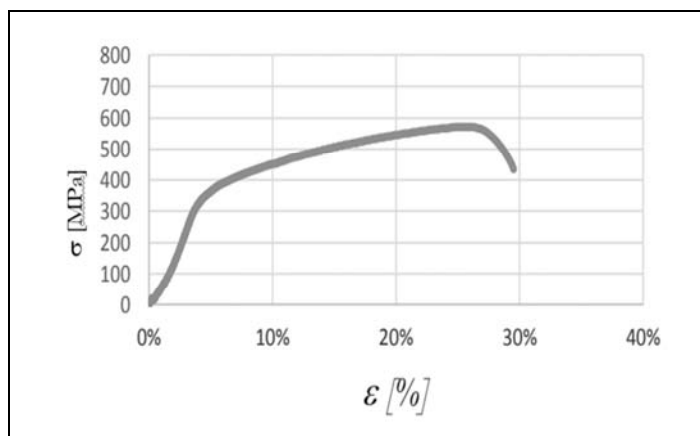
Na slici 7. su prikazani rezultati ispitivanja na zatezanje kada je korišćen aktivirajući topitelj BC-31 (zelene boje). Kod tih ispitivanih uzoraka dobijena je najveća zatezna čvrstoća od 582 MPa, najmanje izduženje MŠ od 29 % i kontrakcija 58 %.



Na slici 8. prikazani su rezultati ispitivanja na zatezanje kada je korišćen aktivirajući topitelj QuickTIG (bijele boje) gdje je zatezna čvrstoća 572 MPa. Kod ovih zavarenih spojeva, izduženje je bilo 31 %, a kontrakcija na mjestu preloma je 63 %.

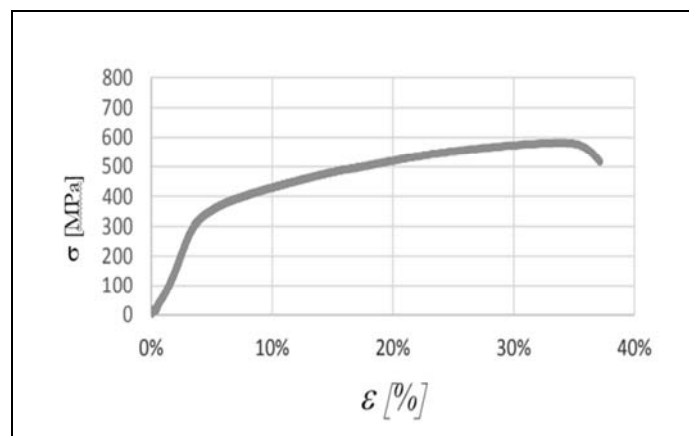
Na slici 9 prikazani su rezultati ispitivanja na zatezanja za ATIG zavareni spoj gdje je za zavarivanje upotrijebljena mješavina aktivnih topitelja BC – 31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli topitelj). Zatezna čvrstoća kod ovih uzoraka je 579 MPa, izduženje je imalo najveću vrijednost od 32 %, a kontrakcija je 61 %.

Na kraju, na slici 10 prikazan je rezultat testa na zatezanje za konvencionalni TIG spoj. Kod ovog spoja pri istim parametrima zavarivanja kao kod ATIG postupka (struja zavarivanja, brzina zavarivanja i dužina električnog luka), električni luk nije imao potrebnu penetraciju, pa nije u potpunosti provaren materijal, što je svakako uticalo na rezultate zatezanja. Zatezna čvrstoća je imala izuzetno nisku vrijednost od 199 MPa, izduženje samo 2 % i kontrakciju 20 %.



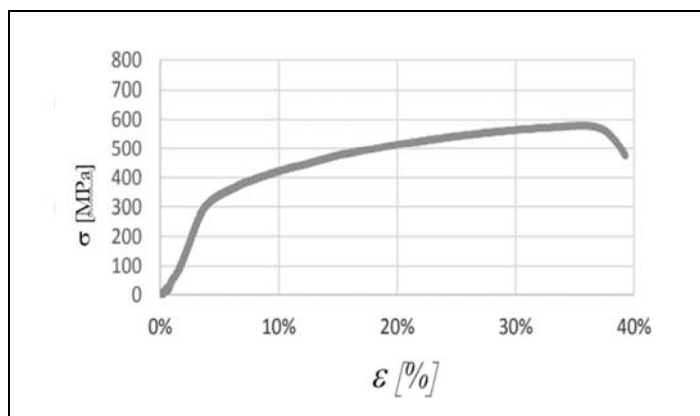
Slika 7. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem BC-31 (zeleni) topitelja

Figure 7. σ - ε diagram for an ATIG weld made using BC-31 (green) flux



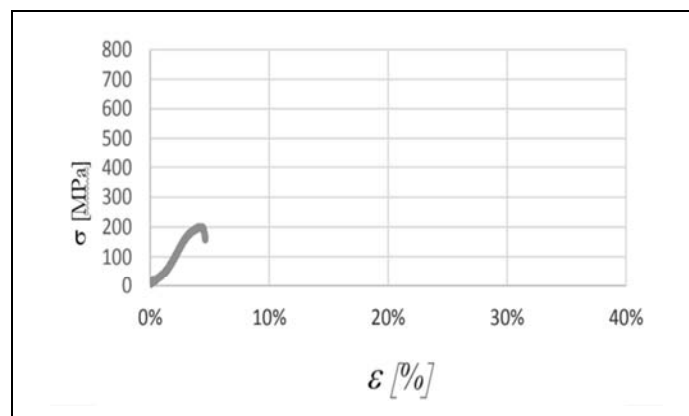
Slika 8. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem QuickTIG (bijeli) topitelja

Figure 8. σ - ε diagram for an ATIG weld made using the QuickTIG (white) flux



Slika 9. σ - ε dijagram za ATIG zavareni spoj izveden korišćenjem mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 (50%) i QuickTIG (50%) (zeleni + bijeli)

Figure 9. σ - ε diagram for an ATIG welded joint performed using a mixture of activating fluxes BC-31 (50%) and QuickTIG (50%) (green + white)



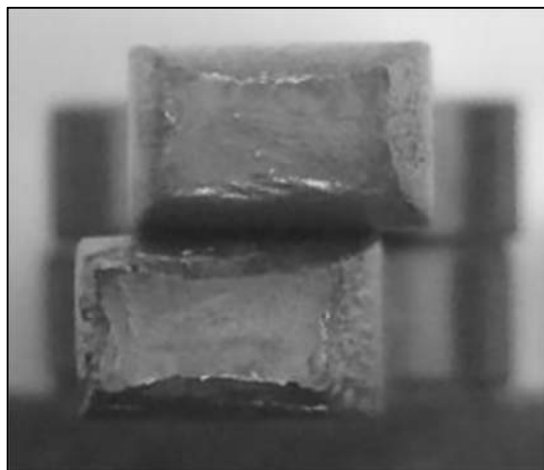
Slika 10. σ - ε dijagram za konvencionalni TIG zavareni spoj izveden bez korišćenja aktivnih topitelja

Figure 10. σ - ε diagram for a conventional TIG welded joint performed without the use of active fluxes

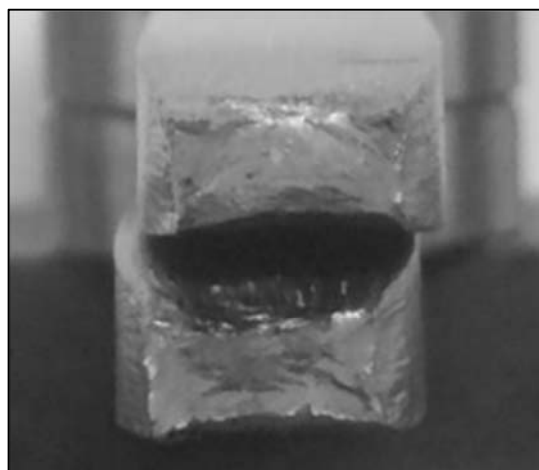


Na slici 11. prikazane su prelomne površine svih uzorka na zatezanje koje su se uvijek lomile u MŠ, gdje se jasno vidi kontrakcija na prelomnoj površini. Najmanja kontrakcija je kod konvencionalnog TIG zavarivanje gdje se jasno vidi da OM nije u

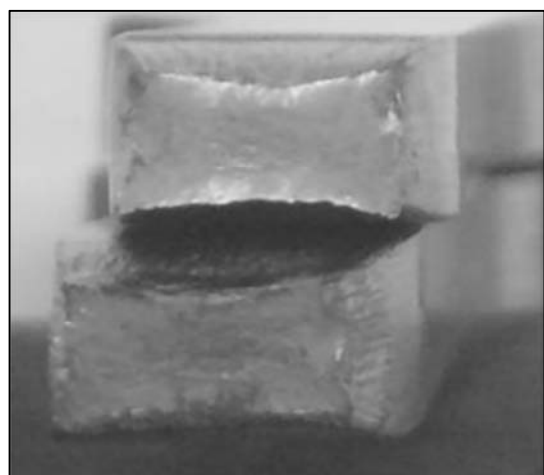
potpunosti protopljen što je pri ispitivanju zatezanjem izazvalo koncentraciju napona i uzorak se nije mogao deformisati, pa je lom uzorka nastao pri maloj deformaciji presjeka. Svi rezultati testova na zatezanje prikazani su u tabeli 4.



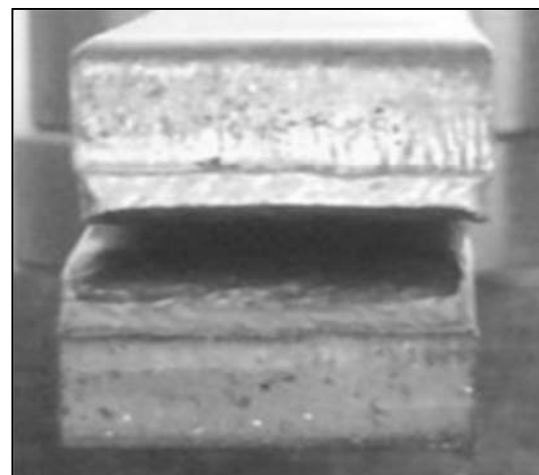
ATIG - BC-31 (zeleni topitelj)
ATIG - BC-31 (green flux)



ATIG - QuickTIG (bijeli topitelj)
ATIG - QuickTIG (white flux)



ATIG - BC-31 + QuickTIG (zeleni + bijeli topitelj)
ATIG - BC-31 + QuickTIG (green + white flux)



TIG (bez topitelja)
TIG (without flux)

Slika 11. Prelomne površine na uzorcima nakon ispitivanja zatezanjem

Figure 11. Fractured surfaces from samples after tensile testing

Tabela 4. Rezultati ispitivanja na zatezanje

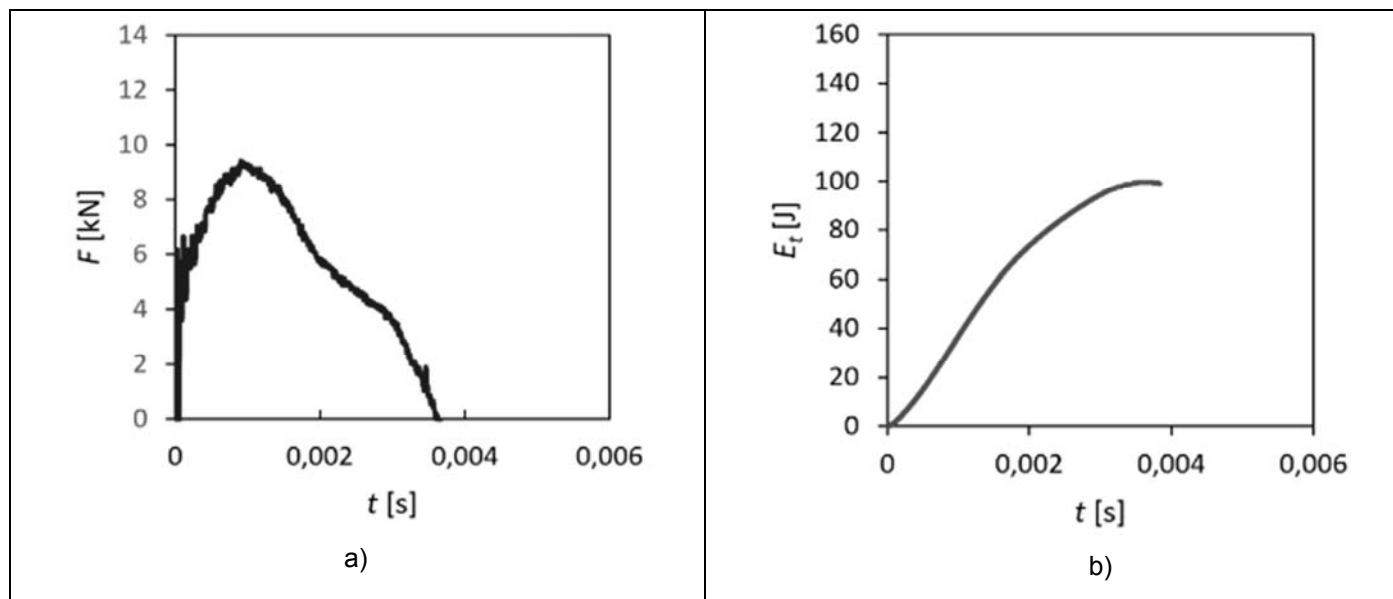
Table 4. Tensile test results

Aktivirajući topitelj	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	Mjesto preloma
BC-31 (Z)	582	29	58	Metal šava
QuickTIG (B)	572	31	63	Metal šava
BC-31 +QuickTIG (Z+B)	579	32	61	Metal šava
TIG (bez topitelja)	199	2	20	Metal šava



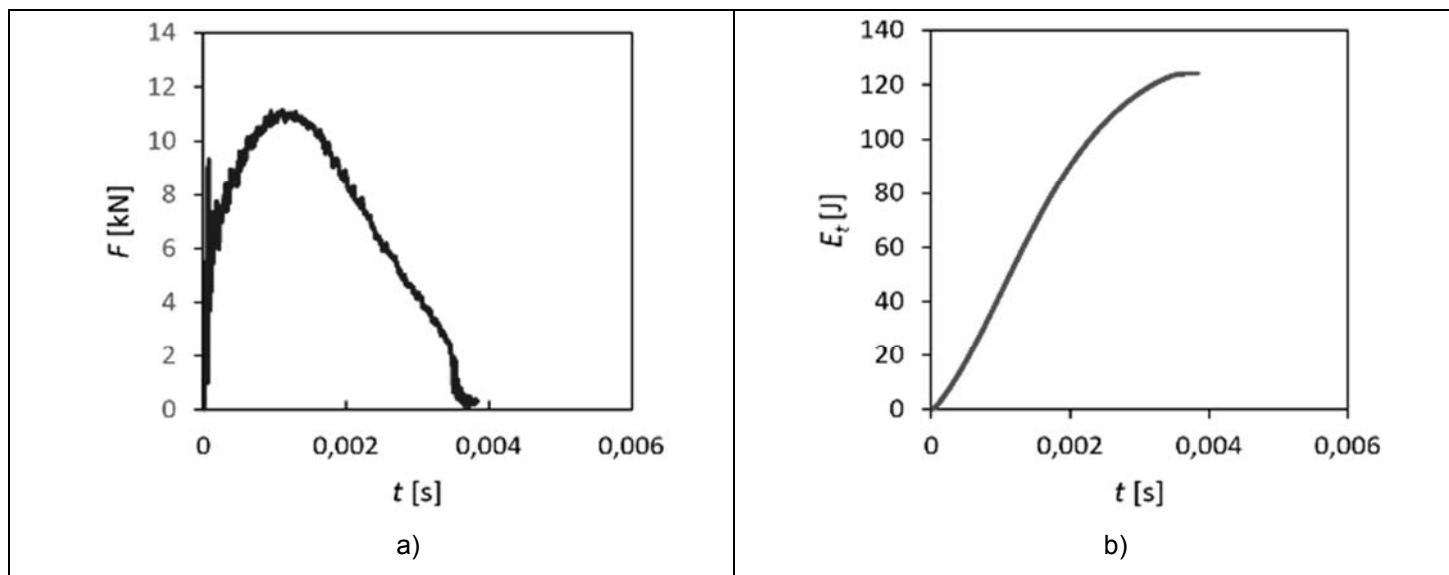
Rezultati testova na instrumentiranom Charpy šarpi prikazani su na slikama 12. do 14, gdje su

prikazani dijagrami sila – vrijeme (plava boja) i energija - vrijeme (crvena boja).



Slika 12. Rezultati instrumentiranog Charpy testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC-31 (zeleni): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 12. Instrumented Charpy test results for ATIG welded joint using BC-31 activating flux (green): a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

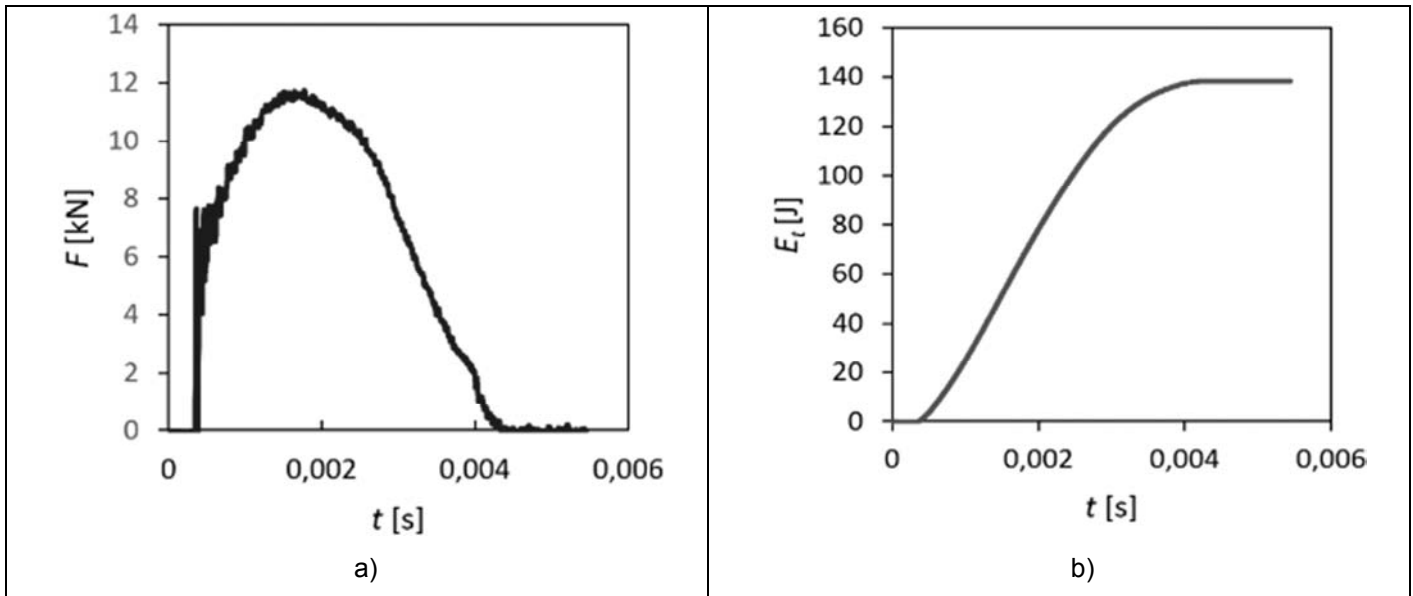


Slika 13. Rezultati instrumentiranog Charpy testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 13. Instrumented Charpy test results for an ATIG welded joint using the QuickTIG (white) activating flux: a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

Na slici 14. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa za MŠ zavarenog spoja za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih

topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli). Kod ovih uzoraka izmjerena je najviša vrijednost ukupne energije loma (E_u).

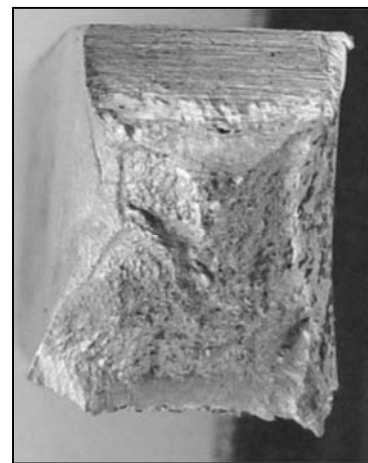


Slika 14. Rezultati instrumentiranog šarpi testa za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli): a) $F - t$ dijagram; b) $E - t$ dijagram

Figure 14. Results of the instrumented Sharpie test for the ATIG welded joint when using a mixture of activating fluxes BC - 31 and QuickTIG (green + white): a) $F - t$ diagram; b) $E - t$ diagram

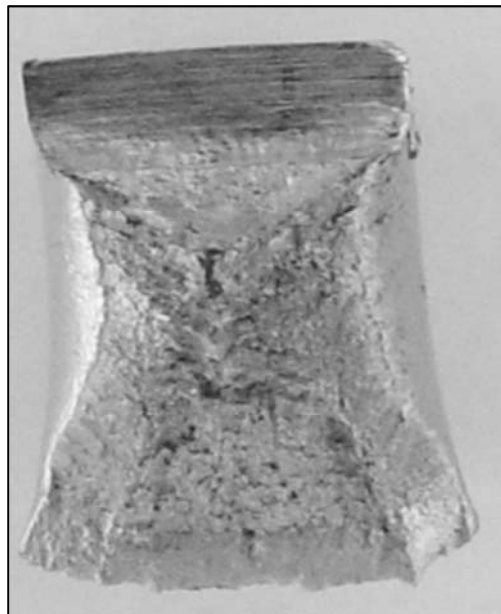
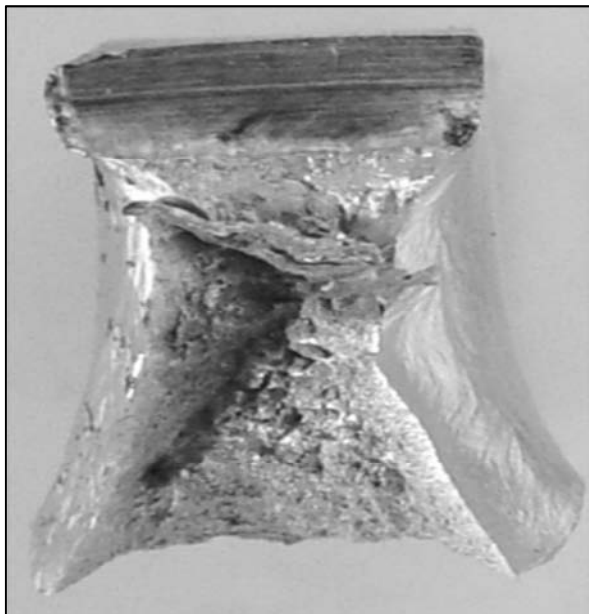
Na slici 12 prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC – 31 (zeleni). Kod ovih uzoraka izmjerena je najmanja vrijednost ukupne energije loma (E_u). Na slici 13. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli). Na slici 14. prikazani su rezultati instrumentiranog šarpi testa u MŠ za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješovine aktivirajućeg topitelja BC – 31 + QuickTIG (zeleni + bijeli).

Prelomne površine šarpi uzoraka su prikazane na slikama od 15. do 17. Na njima se uočava velika plastična deformacija sa velikim bočnim usnama. Najmanja plastična deformacija je vidljiva na MŠ ATIG zavarenog spoja korišćenjem BC – 31 (zeleni) aktivirajućeg topitelja, dok je najveća deformacija bila u metalu šava ATIG zavarenog spoja korišćenjem mješavine topitelja BC – 31 i QuickTIG (zeleni + bijeli).

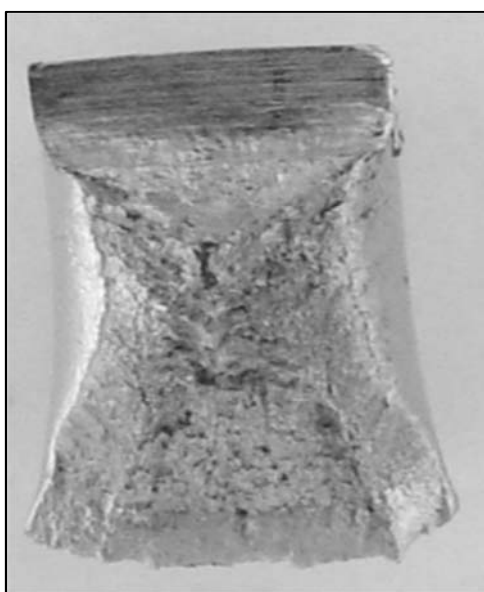


Slika 15. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja BC-31 (zeleni)

Figure 15. Fracture surfaces of a Sharpie sample for an ATIG welded joint using BC-31 activating flux (green).



Slika 16. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju aktivirajućeg topitelja QuickTIG (bijeli)
Figure 16. Fracture surfaces of a Sharpy sample for an ATIG welded joint using the QuickTIG (white) flux

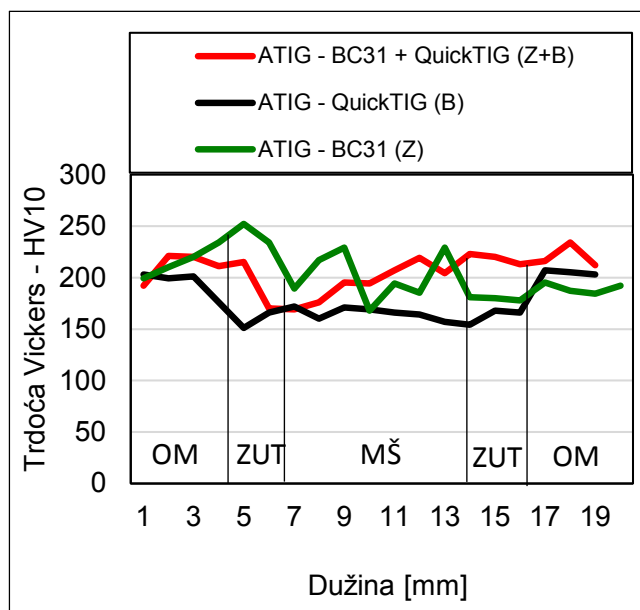


Slika 17. Prelomne površine šarpi uzorka za ATIG zavareni spoj pri korišćenju mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli)

Figure 17. Fracture surfaces of a Sharpy sample for an ATIG welded joint using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white)

Na svim uzorcima zavarenim ATIG postupkom izmjerene su tvrdoće po Vickersu u osnovnom materijalu, ZUT-u i MŠ na 1 mm ispod površine lica (tjemena) šava. Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su na slici 18. Najmanje tvrdoće bile su

izmjerene u ATIG zavarenom spoju koji je bio zavaren korišćenjem aktivirajućeg topitelja Quick TIG (bijeli). Najveća tvrdoća je izmjerena u ZUT-u kod ATIG zavarenog spoja korišćenjem aktivirajućeg topitelja BC – 31 (zeleni).



Slika 18. Rezultati mjerenja tvrdoće po Vikersu na tri uzorka ATIG zavarenih spojeva sa korišćenjem različitih aktivirajućih topitelja

Figure 18. Vickers hardness measurement results on three samples of ATIG welded joints using different activating fluxes

Najveće tvrdoće dobijene su na ATIG zavarenom spoju koji je bio zavaren sa aktivirajućim topiteljem BC – 31 (zeleni). Najmanje

tvrdoće su na ATIG zavarenom spoju realizovanom sa Quick TIG (bijeli) aktivirajućim topiteljem.

3. Zaključci

Eksperimentalnim planom su realizovana četiri zavarena spoja. Jedan spoj konvencionalnim TIG postupkom zavarivanja, a tri primjenom ATIG postupka zavarivanja gdje su se koristio BC – 31 (zeleni) aktivirajući topitelj, QuickTIG (bijeli) aktivirajući topitelj i mješavina ova dva aktivirajuća topitelja (50% zeleni + 50% bijeli).

Rezultati testova zatezanja su pokazali najbolja svojstva kod ATIG zavarenog spoja, koji je realizovan korišćenjem mješavinom aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli), dok je najnepovoljniji rezultat dobijen kod uzoraka koji su realizovani konvencionalnim TIG postupkom jer električni luk nije imao punu penetraciju – neprovar.

Rezultati instrumentiranog šarpi testa su pokazali najveću energiju loma kod zavarenog spoja koji je zavaren ATIG postupkom korišćenjem mješavine aktivirajućih topitelja BC-31 i QuickTIG (zeleni + bijeli). Najmanu vrijednost energije loma kod ATIG zavarenih spojeva je imao spoj koji je zavaren korišćenjem BC – 31 (zeleni) aktivirajućeg topitelja.

3. Conclusions

Four welded joints were realized according to the experimental plan. One joint was performed by conventional TIG welding process, and three by applying ATIG welding process where BC - 31 (green) activating flux, QuickTIG (white) activating flux and a mixture of these two activating fluxes (50% green + 50% white) were used.

The results of the tensile tests showed the best properties of the ATIG welded joint, which was realized using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white), while the most unfavorable result was obtained with the samples realized with the conventional TIG process because the electric arc did not have full penetration - lack of fusion

The results of the instrumented Sharp test showed the highest fracture energy in the welded joint that was welded by the ATIG process using a mixture of activating fluxes BC-31 and QuickTIG (green + white). The joint that was welded using BC - 31 (green) activating solvent had the lowest value of fracture energy in ATIG welded joints.



Rezultati mjerenja tvrdoće su pokazali najmanje vrednosti tvrdoće u ATIG zavarenom spoju sa QuickTIG (bijeli) aktivirajući topitel.

The hardness measurement results showed the lowest hardness values in the ATIG welded joint with QuickTIG (white) activating flux.

Literatura / References

[1] S.M. Gurevich et al. (1965), Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process, *Automatic Welding*, 9, 1 - 4.

[2] A.M. Makara et al. (1968), High-tensile martensitic steels welded by argon tungsten arc process using flux, *Automatic Welding*, 7, 78-79.

[3] М.М. Савицкий, Г.М. Мельничук, А.Ф. Лупан, А.М. Савицкий, О.И. Олейник, (2000), Сварка стали в инертном газе с активаторами, Международная научно-техническая конференция, октября 2000г, Тбилиси, Грузи, 126-144.

[4] М.М. Савицкий, Г.И. Лесков, (1980), Механизм влияния электроотрицательных элементов на проплавливающую способность дуги с вольфрамовым катодом, *Автоматическая сварка*, 1980, №9, 17-22.

[5] М.М. Савицкий, Б.Н. Кушниренко, О.И. Олейник, (1999), Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активирующими флюсами (АТИГ-процесс), *Автоматическая сварка*, 12, 20-28.

[6] М.М. Савицкий, А.Ф. Лупан, Г.М. Мельничук, О.И. Олейник, (2000), Способы применения активаторов для сварки сталей в инертном газе, *Автоматическая сварка*, 2000, 3, 48-49.

[7] Y.L. Xu, Z.B. Dong, Y.H. Wei, C.L. Yang, (2007), Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol 48, 2, 178-186.

[8] T. Kuang-Hung, H. Chih-Yu, (2011), Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 503–512.

[9] D. Bajić, (2003), Istraživanje mogućnosti zavarivanja sklopova energetske opreme korišćenjem aktivirajućeg topitelja, *Doktorska disertacija*, Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet Podgorica.

[10] D. Bajić, M.M.Savitsky, Ž. Blečić, (2010), Optimizing the Welding Regime Using Activating Fluxes, *Counseling with International participation "Welding 2010"*, Tara (Serbia)

[11] T. Vuherer, M. Pal, D. Bajić, M. Manjgo, Mirza Manjgo, I. Samardžić, Ž. Kordić, (2019), Comparison of the properties at ATIG and TIG welded joints welded on the X5CrNi18-10 stainless steel, *ENGINEERING TECHNOLOGIES IN MANUFACTURING OF WELDED CONSTRUCTIONS AND PRODUCTS*, SBW 2019, Slavonski Brod, Croatia.

[12] P. Sharma, D.K. Dwivedi, (2019), A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 44, 166-178.

[13] K.D. Ramkumar, B.M. Kumar, M.G. Krishnan, S. Dev, A.J. Bhalodi, N. Arivazhagan, S. Narayanan, (2015), Studies on the weldability, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG weldments of Inconel 718, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 639, 234-244.

[14] A. Kulkarni, D.K. Dwivedi, M. Vasudevan, (2019), Effect of oxide fluxes on activated TIG welding of AISI 316L austenitic stainless steel, *Materials Today: Proceedings*, Volume 18, 7, 4695-4702.