Utjecaj aktivacijskog premaza na geometriju i korozijsku otpornost zavarenog spoja

Ražov, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:120343

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Ražov

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing. Iva Ražov

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se:

Mentoru prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu na ukazanom povjerenju pri zadavanju teme i kroz provedbu završnog rada.

Asistentu mag.ing. Ivanu Juriću na ukazanoj pristupačnosti, susretljivosti i vođenju kroz teorijski i eksperimentalni dio završnog rada.

Laborantima Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću s Katedre za zavarene konstrukcije koji su mi pomogli tijekom izvođenja eksperimentalnog rada.

Osobito se zahvaljujem mami Sanji na podršci, strpljenju i velikom odricanju kroz sve godine studiranja te ostatku obitelji tati Vinku te bratu Lucijanu i sestri Miri.

Iva Ražov

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVA RAŽOV** Mat. br.: 0035200255

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ AKTIVACIJSKOG PREMAZA NA GEOMETRIJU I KOROZIJSKU OTPORNOST ZAVARENOG SPOJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF ACTIVE FLUX ON GEOMETRY AND CORROSION RESISTANCE OF WELDED JOINT**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je detaljno opisati TIG zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika. Potrebno je proučiti način djelovanja aktivacijskog premaza pri A-TIG zavarivanju, te njegov utjecaj na parametre zavarivanja. Dati pregled dostupnih komercijalnih premaza i primjere primjene u proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu rada za određeni aktivacijski premaz potrebno je osmisliti plan pokusa kojim će se definirati utjecaj udjela komponenti u premazu na geometriju dobivenog zavarenog spoja i korozijsku otpornost. Ispitivanje treba provesti na visokolegiranom nehrđajućem čeliku EN 1.4301. Mjerenjem geometrije zavarenog spoja definirati prikladnost oblika pripreme spoja za zavarivanje. Ispitati korozijsku postojanost izvedenih zavarenih spojeva. Rezultate usporediti sa uzorcima zavarivanim konvencionalnim TIG postupkom. U konačnici ocijeniti podobnost primjene aktivacijskog premaza obzirom na postignuta svojstva kao i na ekonomsku isplativost.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Zadatak zadao:
Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. - 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ II
POPIS SLIKA IV
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. TIG 3
2.1. Izvori struje zavarivanja - vrsta struje, polaritet elektrode 4
2.2. Osnovne smjernice u tehnici rada 6
2.2.1. Vrsta i promjer volframove elektrode 7
2.2.2. Jakost struje zavarivanja 7
2.2.3. Brzina zavarivanja kod ručnog TIG zavarivanja 7
2.2.4. Položaj pištolja i dodatne žice 7
2.3. Zaštitni plinovi 10
3. A-TIG 12
3.1. Princip rada A-TIG zavarivanja 13
3.2. Načini nanošenja aktivacijskog premaza 15
3.3. Mehanizmi utjecaja aktivnog premaza na zavareni spoj 16
4. Aktivacijski premazi 19
4.1. Sastav aktivacijskog premaza 19
4.2. Dostupnost aktivacijskih premaza 20
5. Eksperimentalni rad 24
5.1. Osnovni materijal 24
5.2. Priprema aktivacijskog premaza 26
5.3. Oprema za zavarivanje 28
5.3.1. Izvor struje za zavarivanje 28
5.3.2. Oprema za automatiziranje postupka zavarivanja 30
5.3.3. Zaštitni plin 31
5.3.4. Netaljiva volframova elektroda 32
5.4. Proces navarivanja 32
5.4.1. Konstantni parametri tijekom postupka navarivanja 34
5.4.2. Promjenjivi parametri tijekom postupka navarivanja 34
5.5. Analiza geometrijskih značajki 37
5.6. Korozijsko ispitivanje 40
6. Analiza rezultata ispitivanja 43
6.1. Rezultati analize geometrijskih značajki 43
6.2. Rezultati korozijskih ispitivanja navarenih uzoraka 46
7. Zaključak 49

LITERATURA.....51
PRILOZI.. 53

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [4] 3
Slika 2. Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [5] 4
Slika 3. Oblici vrha elektrode [3] 6
Slika 4. Utjecaj kuta elektrode na izgled zavara [6] 6
Slika 5. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [7] 8
Slika 6. Prikaz tehnike rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja[2]: 8
Slika 7. Karakteristični izgled luka kod A-TIG i konvencionalnog TIG zavarivanja i usporedba dubine penetracije kod nehrđajućeg čelika debljine 6 mm (desno: konvencionalni TIG, lijevo: A-TIG [16] 13
Slika 8. Shematski prikaz priprave aktivnog talila, miješanja te nanošenja talila na ploču koja se zavaruje [10] 14
Slika 9. Shema ATIG i FBTIG zavarivanja [12] 15
Slika 10. Marangonijev efekt strujanja fluida [8]: a) Centrifugalni b) Centripetalni 16
Slika 11. Mehanizam kontrakcije električnog luka [14] 17
Slika 12. Aktivacijski premaz za nehrđajući čelik – za 80 m zavara [18] 22
Slika 13. Aktivacijski premaz za titan – za 50 m zavara [18] 22
Slika 14. Rezanje uzoraka na tračnoj pili 25
Slika 15. Praškaste aktivacijske komponente 27
Slika 16. Etanol denaturirani 96 % 27
Slika 17. Pripremljeni aktivacijski –TIG premazi 28
Slika 18. Uređaj za TIG zavarivanje Fronius tipa MagicWave 230i EF 29
Slika 19. „Bugo Systems“, uređaj za automatiziranje postupka zavarivanja 30
Slika 20. Zaštitni plin 31
Slika 21. Pripremljeni uzorci s nanešenim aktivacijskim premazima 32
Slika 22. Probno navarivanje 33
Slika 23. Probni navareni uzorak 33
Slika 24. Priprema za navarivanje uzorka 1 35
Slika 25. Izrezivanje makrouzoraka 37
Slika 26. Brušenje uzorka na brusnom papiru P150 38
Slika 27. Izgled izbrušenih makrouzoraka 38
Slika 28. Desetpostotna oksalna kiselina 39
Slika 29. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje 39
Slika 30. Pasta za kemijsko čišćenje 40
Slika 31. Uzorci premazani pastom 41
Slika 32. Uzorci nakon djelovanja paste 41
Slika 33. Pripremljeni uzorci uronjeni u desetpostotnu otopinu željezovog (III) kloridheksahidrata 42
Slika 34. Grafički prikaz penetracije navara pojedinih makrouzoraka 44
Slika 35. Makrouzorak 1 44
Slika 36. Makrouzorak 2 44
Slika 37. Makrouzorak 3 45
Slika 38. Makrouzorak 4 45
Slika 39. Makrouzorak 5 45
Slika 40. Izgled očišćenih površina uzoraka nakon 48 h u otopini 46
Slika 41. Izgled navarenih uzoraka nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini 47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno ovrsti struje i polaritetu [1].....5
Tablica 2. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [1].....9
Tablica 3. Karakteristike zavarivanja s plinovima Ar i He [1] 11
Tablica 4. PWI premazi [16].....21
Tablica 5. NJC premazi s prikladnim materijalima [16] 21
Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala AISI 304 [23] 26
Tablica 7. Mehanička svojstva AISI 304 [24].....26
Tablica 8. Fizička svojstva osnovnog materijala [23] 26
Tablica 9. Udijeli komponenata u aktivacijskom premazu.....27
Tablica 10. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 230i EF [25].....29
Tablica 11. Promjenjivi parametri prilikom navarivanja.....35
Tablica 12. Navareni uzorci.....36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m	N / mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N / mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
A_5	%	Istezljivost
KU	J	Udarni rad loma
Q	KJ/mm	Unos topline
U	V	Napon
I	A	Jakost struje
v	mm/min	Brzina zavarivanja

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada jest utvrditi utjecaj aktivacijskog premaza na geometriju i korozijsku otpornost zavarenog spoja austenitnog visokolegiranog nehrđajućeg čelika. Za zavarivanje je odabran TIG postupak bez dodatnog materijala. U teorijskom dijelu rada opisani su konvencionalni TIG i A-TIG postupak zavarivanja. Analizirani su aktivacijski premazi te mehanizam njihova djelovanja koji dovodi do povećane penetracije. Također je razjašnjen njihov sastav i dani su primjeri njihove uporabe u proizvodnji i dostupnost.

U eksperimentalnom dijelu rada navareni su uzorci AISI 304 čelika konvencionalnim TIG i A-TIG postupkom te su ispitivana i uspoređena geometrijska i korozijska svojstva od svakog uzorka. Analizom rezultata ocijenjena je podobnost primjene aktivacijskog premaza obzirom na postignuta svojstva kao i na ekonomsku isplativost.

Ključne riječi: TIG, A-TIG, AISI 304, aktivacijski premaz

SUMMARY

The aim of this final paper is to determine the effect of activation coating on the geometry and corrosion resistance of a welded joint of austenitic high alloy stainless steel without the use of additional material. For welding, the TIG process with no additional material was selected. The theoretical part describes the conventional TIG and A-TIG welding process. Active fluxes and the mechanism of their action leading to increased penetration are analyzed. Their composition has also been clarified and examples of their use in production and availability are given.

In the experimental part of the paper, samples of AISI 304 steel were welded by conventional TIG and A-TIG process and the geometric and corrosion properties of each sample were tested and compared. The analysis of the results evaluated the suitability of the application of the activation coating in view of the achieved properties as well as the economic cost-effectiveness.

Key words: TIG, A-TIG, AISI 304, active fluxes

1. UVOD

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "*Tungsten Inert Gas*", a često se naziva i WIG (njem. *Wolfram Inert Gas*) ili GTAW (eng. *Gas Tungsten Arc Welding*). Početak razvoja TIG postupka povezuje se sa početkom II. svjetskog rata (1941/1942. godina) i razvojem istog u svrhu zamjene plinskog zavarivanja u zrakoplovnoj industriji (zavarivanje legura na bazi magnezija). Russell Meredith koji je radio za Northrup Aircraft patentirao je postupak pod imenom *"Heli-Arc Welding*" što se smatra pretečom današnjeg TIG/GTAW postupka zavarivanja. Razvoj ovog postupka zavarivanja nastavljen je u tvrtci Linde koja je otkupila patent i to prvenstveno zbog upotrebe inertnih plinova u postupku, a razvoj je nastavljen kroz konstrukciju i primjenu različitih tipova gorionika, sapnica i proučavanja strujanja zaštitnog plina. Komercijalna primjena TIG postupka zavarivanja započela je u 50-tim godinama prošlog stoljeća. Danas ovaj postupak, uz vrlo male konstrukcijske promjene, ali zbog značajnih prednosti ili primjeni modificiranih izvedbi (omogućenih kroz razvoj izvora struje za zavarivanje) predstavlja značajan elektrolučni postupak zavarivanja primjenjiv na širokom spektru materijala (čelici, plemeniti čelici, teški i laki obojeni metali itd.) u ručnoj, polu-automatiziranoj ili automatiziranoj primjeni [1].

Svi konstrukcijski čelici, nelegirani, niskolegirani i visokolegirani mogu se vrlo kvalitetno zavarivati TIG postupkom. Budući da je TIG postupak spor i skup, primjenjuje se samo za zavarivanje tankih materijala, limova, cijevi i raznih posuda. Često se primjenjuje i za zavarivanje korijena zavara čak i na debljim materijalima. Pretežno se TIG postupkom zavaruju visokolegirani konstrukcijski čelici manjih debljina, a vrlo često se zavaruje korijen zavara na cjevima i cjevovodima iz nelegiranih, niskolegiranih i visokolegiranih konstrukcijskih čelika [2].

Prednosti TIG zavarivanja [17]:

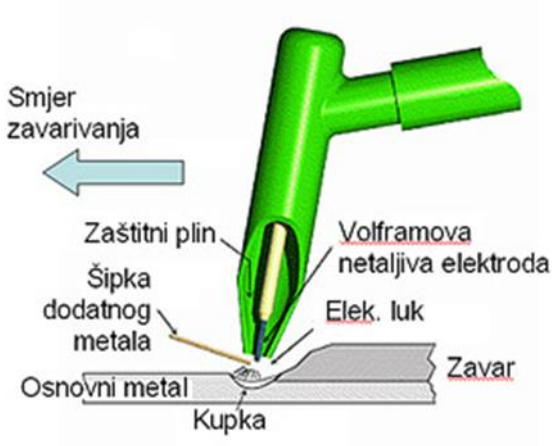
- nema rasprskavanja kapljica
- osobit estetski dojam zavarenog spoja
- svi položaji zavarivanja su mogući
- visoka kvaliteta zavarenog spoja.

Nedostatci TIG zavarivanja [17]:

- zahtjeva visoku vještinu zavarivača
- mala brzina zavarivanja
- hrđa treba biti izuzetno detaljno uklonjena prije zavarivanja
- nije prikladno za deblje uzorke.

2. TIG

TIG postupak je postupak elektrolučnog zavarivanja kod kojega se elektrolučni luk uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Dodatni materijal se dodaje sa strane pod kutem od 15 ° do 20 ° u odnosu na osnovni materijal [3]. Slika 1. prikazuje shematski prikaz TIG postupka zavarivanja.



Slika 1. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [4]

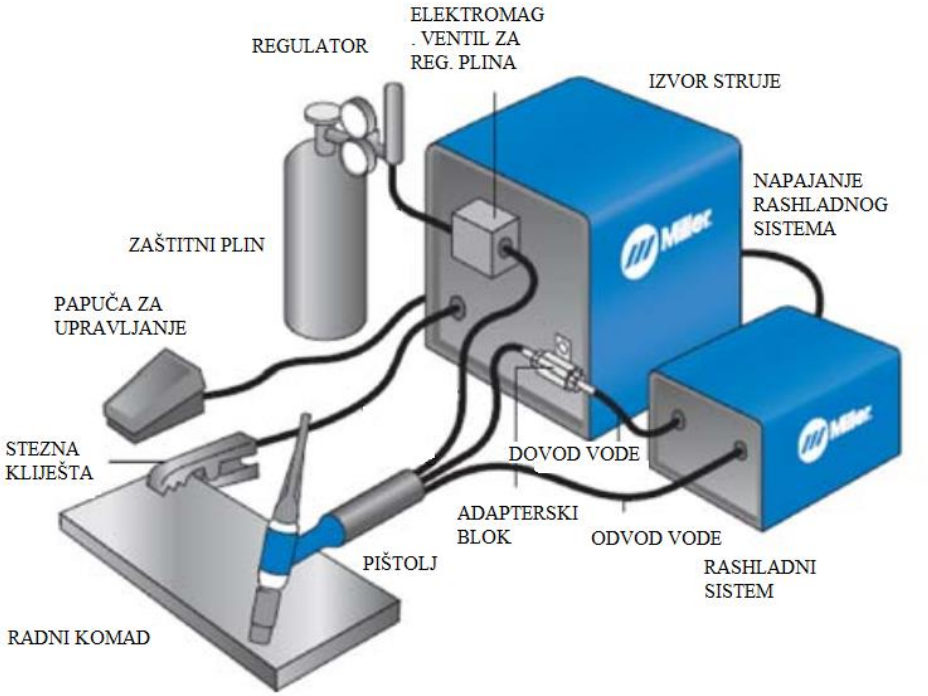
Udaljenost elektrode od osnovnog materijala iznosi oko 4 mm. Za zaštitu rastaljenog materijala od utjecaja plinova iz zraka koriste se inertni plinovi argon ili helij. Argon se kao zaštitni plin više upotrebljava jer je jeftiniji i ima veću specifičnu težinu nego helij. Uspostava luka je lakša, a sam luk manje osjetljiv na promjenu duljine ako se upotrebljava argon nego ako se upotrebljava helij. TIG postupak se najčešće koristi kao ručni postupak zavarivanja, no može biti i poluautomatski i automatski. Kod ručnog TIG postupka dodatni materijal se dodaje u električni luk slično kao kod plinskog zavarivanja [3].

Uređaj za zavarivanje TIG postupkom sastoji se od [3]:

- izvora struje zavarivanja
- komadnog ormarića s upravljačkim uređajem i visokofrekventnim impulsnim generatorom
- pištolja za zavarivanje s volframovom elektrodom i pripadajućim snopom cijevi (cijev za hlađenje, cjevovoda za dovod plina, kabela za dovod struje i vodovoda za upravljanje)

- boce sa zaštitnim plinom i pripadajućim redukcijskim ventilom i mjeračem protoka plina.

Slika 2. prikazuje dijelove uređaja za TIG zavarivanje.



Slika 2. Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [5]

TIG postupak se može upotrebljavati za zavarivanje legiranih čelika debljine manje od 0,1 mm, nelegiranih čelika i lakih metala ispod 0,5 mm, molibdena, titana, cirkonija, bakra i njegovih legura te nikla i njegovih legura [3].

2.1. Izvori struje zavarivanja - vrsta struje, polaritet elektrode

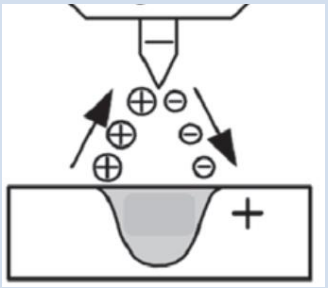
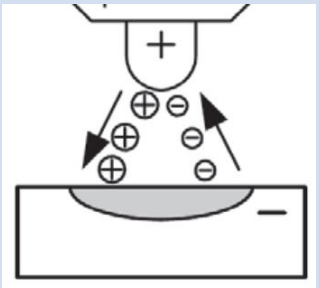
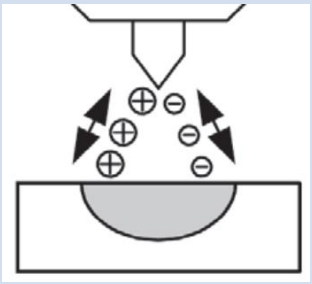
O primijenjenoj vrsti struje zavarivanja te polaritetu elektrode ovisi raspodjela topline u električnom luku (raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada).

Slijedom toga moguća su tri slučaja [1]:

1. istosmjerna struja – elektroda na "-" polu (DCEN, eng. *Direct Current Electrode Negative*)
2. istosmjerna struja – elektroda na "+" polu (DCEP, eng. *Direct Current Electrode Positive*)
3. izmjenična struja.

Tablica 1. prikazuje karakteristike TIG zavarivanja u ovisnosti o vrsti struje i polariteta.

Tablica 1. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [1]

Vrsta struje	**DC**	**DC**	**AC**
Polaritet	-	+	
			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	Uska, duboka	Plitka, široka	Srednje široka, srednje duboka
Kapacitet elektrode	Odličan Npr: Ø 3.2/400 A	Loš Npr: Ø 6.4/120 A	Dobar Npr: Ø 3.2/255 A

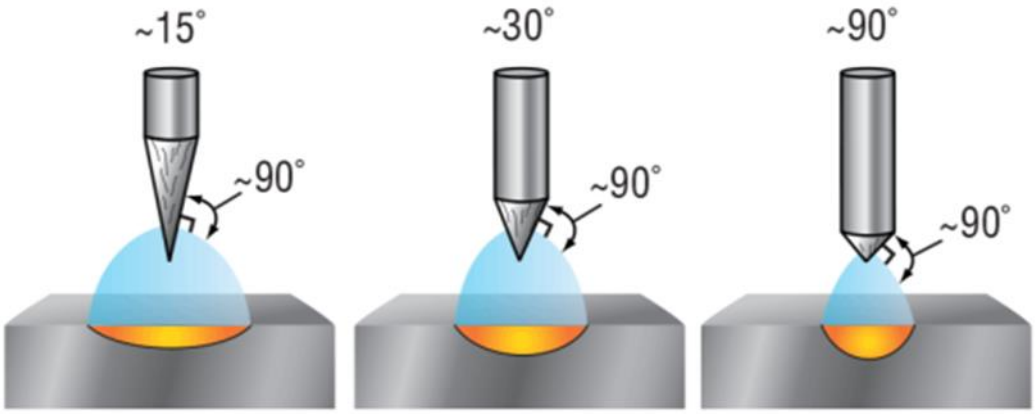
Osim pravilnog izbora legirane elektrode, jednako je važna i priprema iste. Priprema se sastoji od zaobljenja vrha prilikom čega valja imati na umu da geometrija netaljive elektrode direktno utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja aluminija, magnezija i legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljatu geometriju vrha elektrode (oblik stošca, visina stošca ovisi o zahtjevima geometrije luka). Prilikom izrade geometrije elektrode pravilnom tehnologijom brušenja izbjegavaju se nestabilnosti luka ili kontaminacija drugim metalima [1].

Slika 3. prikazuje moguće oblike vrha elektrode, a na slici 4. je prikazan utjecaj kuta elektrode na izgled zavara.



Slika 3. Oblici vrha elektrode [3]

Ako se zavaruje istosmjernom strujom, vrh elektrode treba biti zašiljen kao što se vidi na lijevoj strani slike 3., a za izmjeničnu treba biti nakošen pod kutem od 45° kao što se vidi na slici 3. nadesno [3].



Slika 4. Utjecaj kuta elektrode na izgled zavara [6]

2.2. Osnovne smjernice u tehnici rada

TIG postupkom mogu se zavarivati različiti metali primjenom različitih vrsta žlijebova i u svim položajima zavarivanja. Površina osnovnog materijala se prije zavarivanja mora očistiti od ulja, masnoća, boja ili zaštitnih premaza da bi se dobio zavareni spoj zadovoljavajućih mehaničkih osobina. Aluminij, magnezij i titan, koji po površini brzo stvara oksidnu prevlaku, treba zavariti neposredno nakon čišćenja. Dodatni materijal također mora biti očišćen. Zagrijani kraj žice uvijek mora biti u atmosferi električnog luka kako ne bi oksidirao [3].

2.2.1. Vrsta i promjer volframove elektrode

Elektroda se bira prema debljini i vrsti metala koji se zavaruje. Ako se zavaruje aluminij i magnezij te njihove legure, u pravilu treba uzimati elektrodu od čistog volframa (zelena ili cirkorirana elektroda), a vrh elektrode treba zaobliti. Ako se zavaruju ostali metali u pravilu treba uzimati toriranu elektrodu (žutu, crvenu, ljubičastu, narančastu) i vrh elektrode zašiljiti pod određenim kutem. Elektrode valja zašiljiti na što finijem brusu. Preporuča se zašiljeni vrh polirati finim brusnim papirom.

Promjer elektrode bira se prema debljini materijala odnosno vrsti i jakosti struje zavarivanja. Tako, npr. za zavarivanje nehrđajućeg čelika debljine lima 1,5 mm, odgovara torirana elektroda ∅ 1,6 mm [2].

2.2.2. Jakost struje zavarivanja

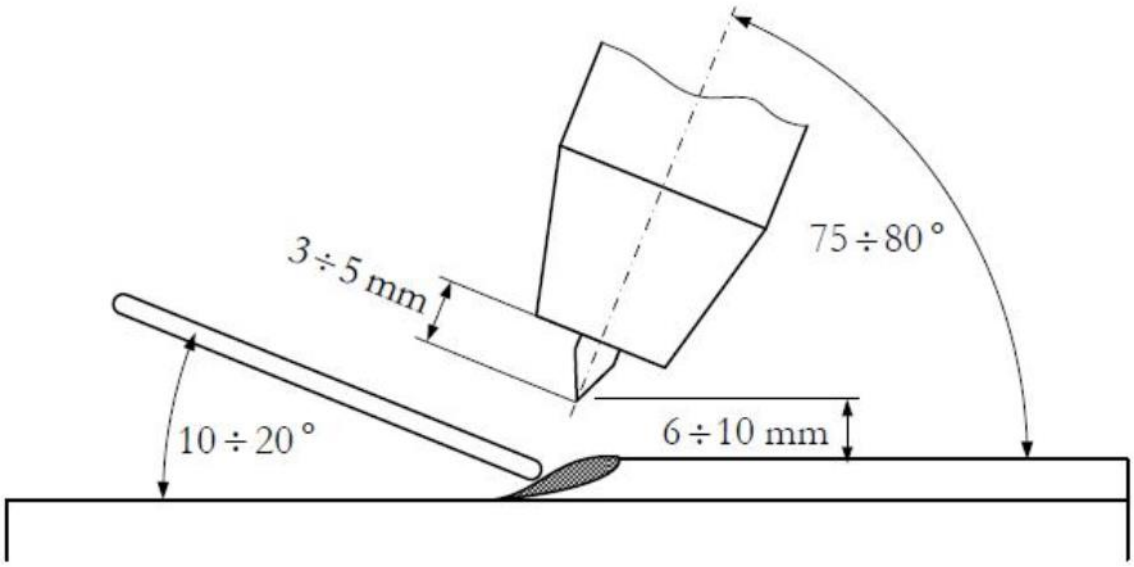
Struja zavarivanja se bira prema vrsti i debljini materijala, obliku i dimenzijama spoja te položaju zavarivanja. Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika, sučeljeni spoj, vodoravni položaj, približna jakost struje iznosi blizu 30 A po mm debljine lima. Jakost struje zavarivanja u pravilu se utvrđuje na probnim uzorcima. Kod strojnog TIG zavarivanja jakost struje zavarivanja je veća nego kod ručnog zavarivanja onoliko za koliko se mogu povećati brzine zavarivanja [2].

2.2.3. Brzina zavarivanja kod ručnog TIG zavarivanja

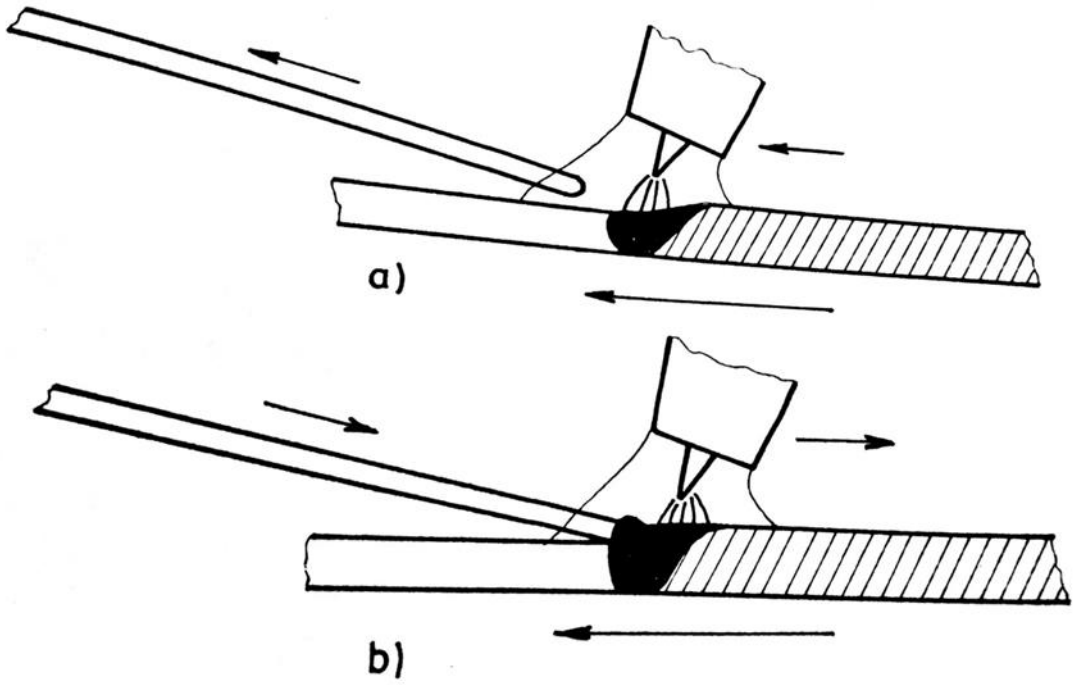
Brzina iznosi 16,67 - 25 cm/min. Brzina zavarivanja je najpovoljnija kada je duljina taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode. Kod prisilnog položaja ova je znatno manja, toliko da se talina ne „cijedi“ pod utjecajem gravitacijske sile. Kod strojnog zavarivanja brzine su veće, uz veće jakosti struje zavarivanja. Brzina zavarivanja utječe na dubinu protaljivanja i na izgled površine zavara [2].

2.2.4. Položaj pištolja i dodatne žice

Kod ručnog TIG zavarivanja položaj pištolja i dodatne žice je prikazan na slici 5. Nagib se koristi kod svih položaja zavarivanja. Kod strojnog zavarivanja položaj držača elektrode je uglavnom potpuno okomit [2]. Na slici 6. su prikazane tehnike rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja.



Slika 5. Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [7]



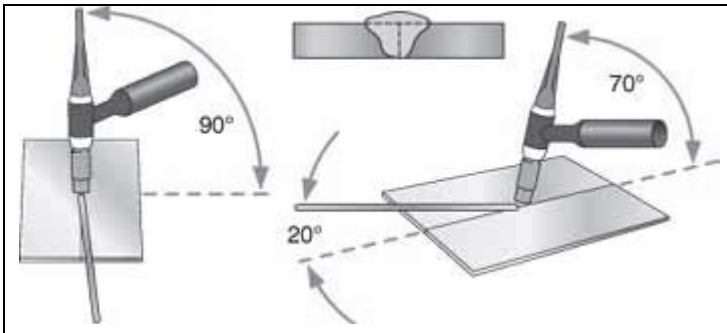
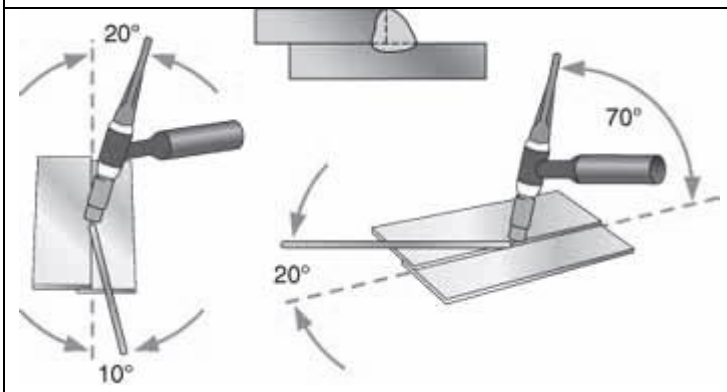
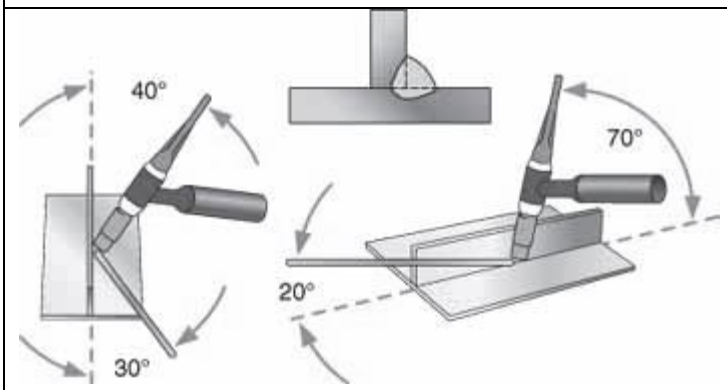
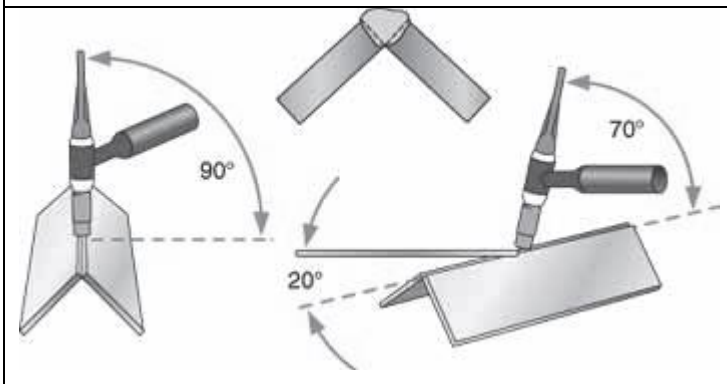
Slika 6. Prikaz tehnike rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja[2]:

a) od kretanja pištolja naprijed izmaknuti žicu, pretaliti osnovni materijal

b) povući pištolj malo unazad, a žicu dodati u rub taline itd; proces se nastavlja

U tablici 2. su prikazane tehnike izvođenja TIG zavarivanja.

Tablica 2.Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [1]

	Izvođenje sučeljenog spoja
	Izvođenje preklopnog spoja
	Izvođenje kutnog spoja
	Izvođenje rubnog spoja

2.3. Zaštitni plinovi

Osim čistih, samo od jedne komponente sastavljenih zaštitnih plinova postoji još velik broj korištenih višekomponentnih mješavina čiji sastav utječe na postupak zavarivanja i određene rezultate zavarivanja kao što su temperatura luka, oblik zavara, pojava pora, rasprskavanje, oblik kapljice i njen prijelaz, površinska naprezanja, oksidni sloj i hrapavost površine zavara.

Zaštitni plin ili mješavina na kraju se odabire s obzirom na vrstu postupka zavarivanja i usklađuje se prema parametrima zavarivanja, kao i prema vrsti osnovnog i dodatnog materijala, debljini limova, izvoru struje i drugim uvjetima [3].

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Iako se u izvornom obliku TIG procesa koristio helij, danas je argon taj koji je dominantan u primjeni. Oba plina su inertna te daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala.

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ali to nije jedina njegova prednost. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također, 1,4 puta je teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a ista karakteristika doprinosi i potrebi za manjim protokom prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95 %, iznimno 99,997 %.

Helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veću nego što je slučaj s argonom. Dobra strana helija kao zaštitnog plina je vrlo dobra toplinska vodljivost te daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i toplinski input (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama). Ova karakteristika posebno dolazi do izražaja prilikom zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti (npr.bakar) te zavarivanja pozicija većih debljina. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99 %.

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija, a primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima dani su u tablici 3 [1].

Tablica 3. Karakteristike zavarivanja s plinovima Ar i He [1]

Karakteristika	**Ar**	**Mješavina Ar/He**	**He**
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100 % Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100 % Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100 % Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100 % He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100 % He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100 % He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100 % Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100 % Ar	veća nego 100 % Ar

3. A-TIG

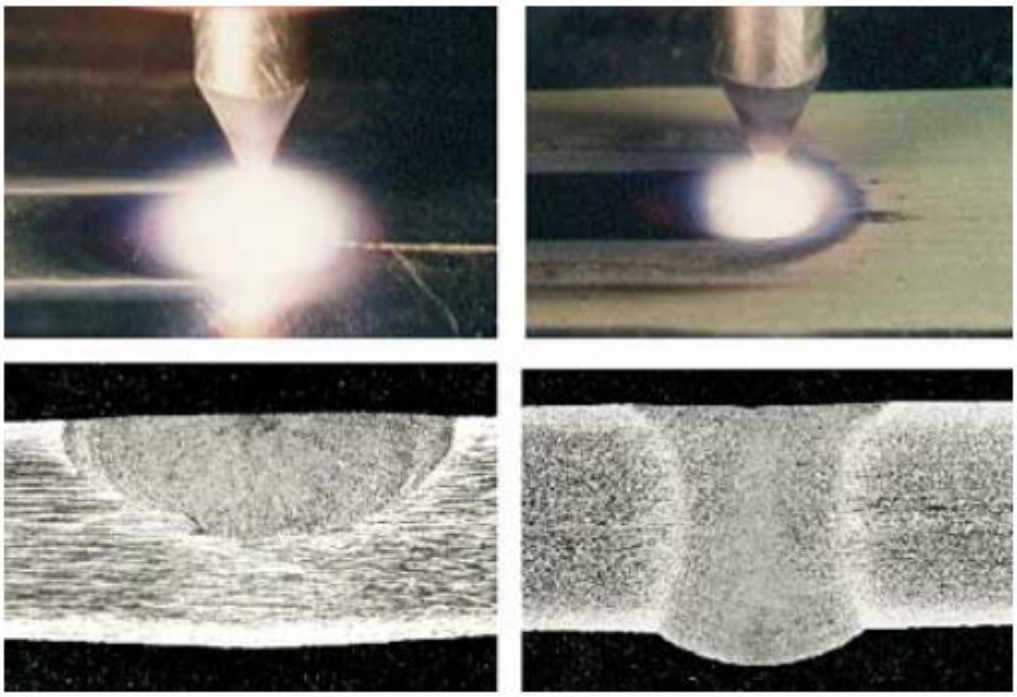
TIG postupak zavarivanja ima određene nedostatke poput male penetracije i malog depozita, a posljedica toga je smanjena produktivnost u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja koji se koriste u proizvodnji. Za debljine veće od 3 mm potrebno je zavarivati u više prolaza i to uvelike smanjuje produktivnost postupka. Pokušaji da se poveća produktivnost pomoću povećanja jakosti struje zavarivanja i smanjivanja brzine zavarivanja pokazali su se neuspjelima. Zbog tih razloga istražuju se alternativni načini poboljšanja produktivnosti TIG postupka. Razlog istraživanja i primjene premaza u zavarivanju leži u tome da priprema zavara nije potrebna (rubovi se ne trebaju čistiti), a postignuta veća penetracija omogućuje manji broj prolaza. Adekvatnom primjenom aktivnog premaza moguće je kod TIG postupka postići potpunu protaljenost materijala debljine 12 mm u jednom prolazu.

Neki od razloga rijetke primjene A – TIG postupka su nedostatak informacija o sastavu aktivnog premaza i njegovom utjecaju na formiranje zavara, mogućnost loše kvalitete zavara i utjecaj debljine nanosa aktivnog premaza na stabilnost električnog luka [8].

A-TIG talila prvi put su primijenjena 1950-ih na "*EO Paton Institute of Electric Welding* " u bivšem Sovjetskom Savezu. Prvi objavljeni znanstveni radovi datiraju iz 1965. i 1966.g. u njima se detaljno proučio i opisao utjecaj aktivnog premaza na zavarivanje titanovih legura [9].

Tvrdnje o znatnom povećanju produktivnosti u odnosu na konvencionalni TIG postupak dolaze od smanjivanja vremena zavarivanja bilo kroz broj prolaza ili kroz brzinu zavarivanja.

Nedostatci korištenja aktivacijskog premaza uključuju grublju površinu zavara i potrebu za čišćenjem zavara nakon zavarivanja. Kod mehaniziranih postupaka zavarivanja, korijen zavara je značajno manje gladak nego što bi to bilo kod konvencionalnog TIG postupka, ali je kod ručnih postupaka zavarivanja hrapavost površina slična. Postoji lagani ostatak troske na površini zavara što često zahtjeva snažno ribanje žičanom četkom [16]. Slika 7. prikazuje karakterističnI izgled luka kod A-TIG i konvencionalnog TIG zavarivanja i usporedbu dubine penetracije kod nehrđajućeg čelika.



Slika 7. Karakteristični izgled luka kod A-TIG i konvencionalnog TIG zavarivanja i usporedba dubine penetracije kod nehrđajućeg čelika debljine 6 mm (desno: konvencionalni TIG, lijevo: A-TIG [16]

3.1. Princip rada A-TIG zavarivanja

Slika 8. prikazuje shematski postupak određivanja sastava aktivnog premaza, miješanja te nanošenja premaza na ploču koja se zavaruje [10].

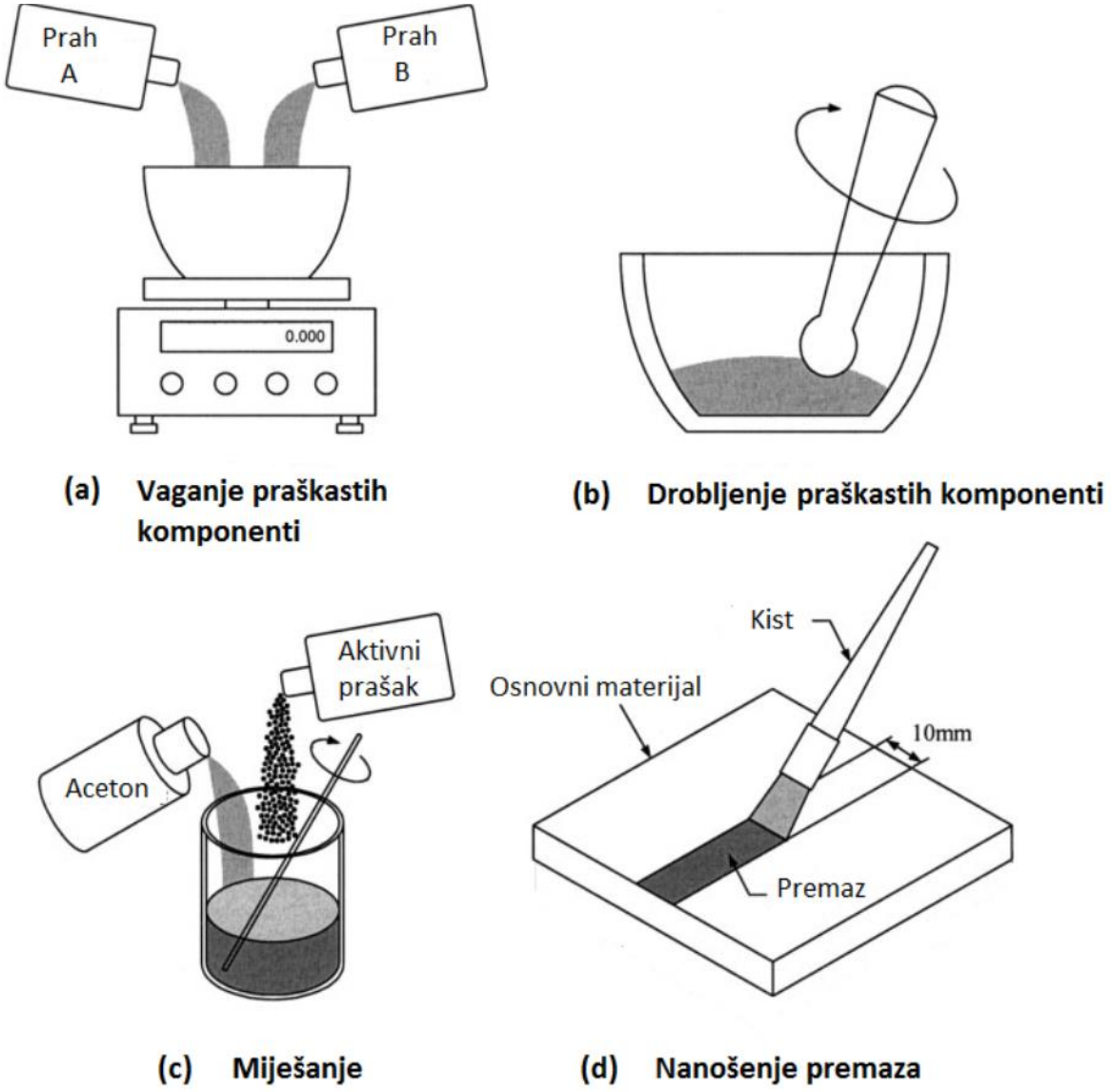
Postupak se sastoji od [10]:

a) određivanja udjela praškastih komponenti

b) usitnjavanje i homogenizacija praškastih komponenti

c) mješanje praškastih komponenti s acetonom kako bi se omogućilo kvašenje

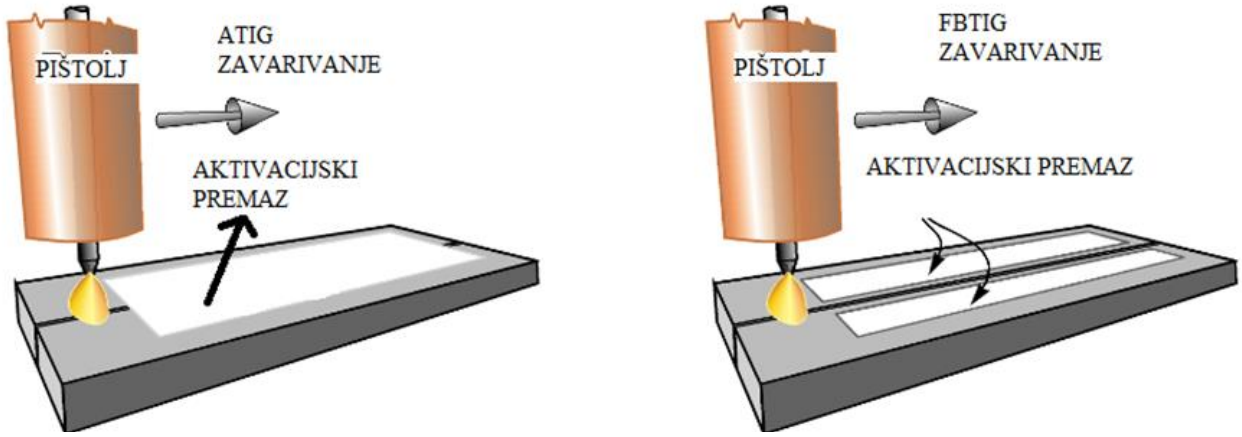
d) nanošenje dobivenog aktivnog premaza pomoću kista tj. manualno ili automatski.



Slika 8. Shematski prikaz priprave aktivnog talila, miješanja te nanošenja talila na ploču koja se zavaruje [10]

3.2. Načini nanošenja aktivacijskog premaza

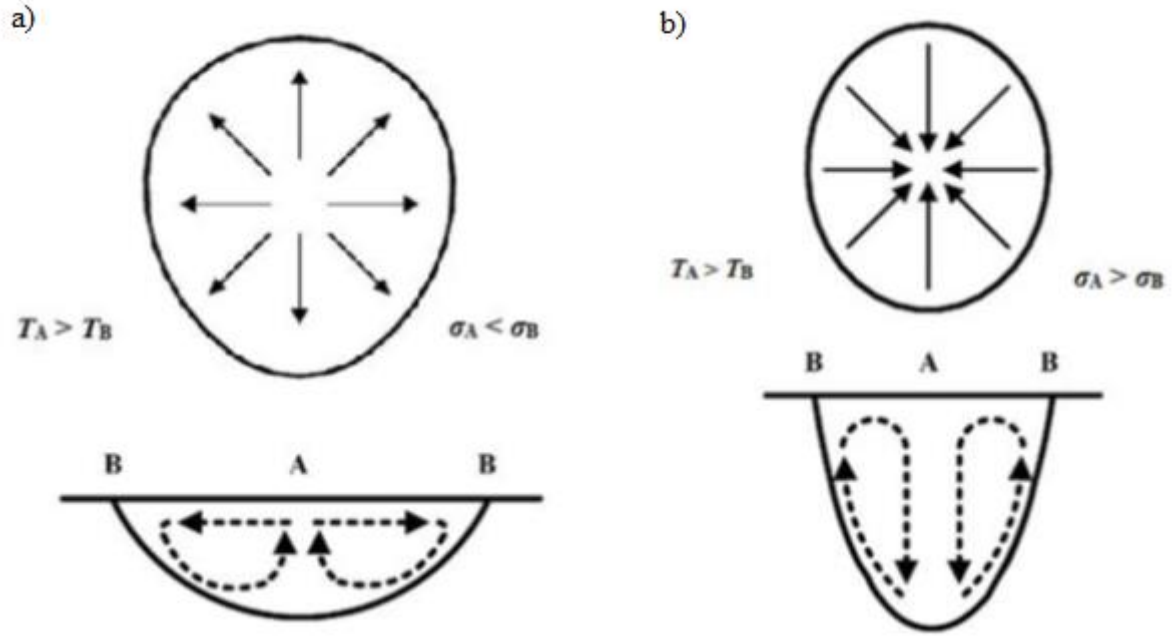
Kod A-TIG postupka zavarivanja, premaz pokriva mali udio površine oko zavara koja gleda prema elektrodi. Aktivacijski premaz može kontinuirano prekrivati zavar kao na slici 9. lijevo (ATIG) ili nekontinuirano preko male širine površine oko zavara, slika 9. desno (FBTIG – eng. *Flux bounded welding*). Pri nanošenju se mora paziti da premaz ne curi unutar spoja i da je debljina premaza što više ujednačena kako bi se osigurala optimalna stabilnost procesa. Nakon nanošenja premaz se brzo suši što je i preduvjet za zavarivanje [11].



Slika 9. Shema ATIG i FBTIG zavarivanja [12]

3.3. Mehanizmi utjecaja aktivnog premaza na zavareni spoj

Postoji jako malo informacija o svojstvima i sastavu aktivnog talila u dostupnoj stručnoj literaturi. Aktivni premaz koji se koristi pri A–TIG zavarivanju sastoji se od različitih komponenata u prahu koje se naknadno miješaju s acetonom ili etanolom. Takvo talilo tj. aktivacijski premaz ima odlična svojstva kvašenja površine što utječe na oblik taline, a sastav talila se mijenja ovisno o površini gdje se namjerava primijeniti. Još nije u potpunosti razjašnjeno kakav utjecaj ima kvašenje površine na učinkovitost premaza da zaštiti površinu taline. Vjeruje se da samo kvašenje površine zavara i promjena površinske napetosti talila nemaju nikakvu poveznicu s Marangonijevim efektom strujanja taline materijala unutar taline. Ali je zato Marangonijev efekt strujanja fluida iskorišten za objašnjavanje različitih profila penetracije zavara. Glavni razlog promjene strujanja taline materijala jest u različitim toplinskim koeficijentima površinskih napetosti – TKPN taline. Slika 10. prikazuje Marangonijev efekt u talini zavara [8].

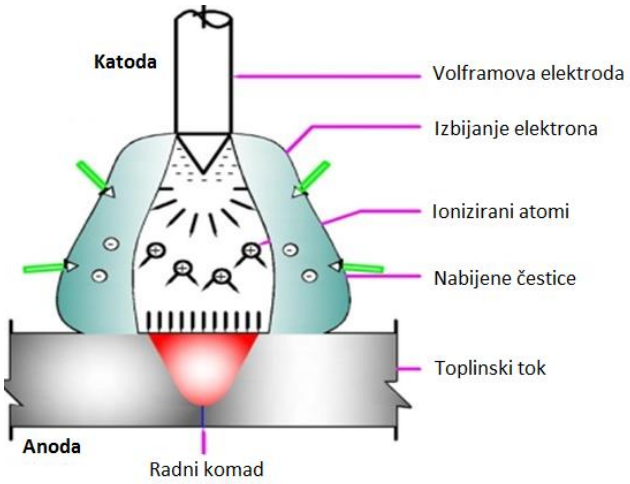


Slika 10. Marangonijev efekt strujanja fluida [8]: a) Centrifugalni b) Centripetalni

Kada se koristi TIG proces bez aktivnog talila TKPN poprima negativnu vrijednost. To znači da hladnija periferna strana taline ima veću površinsku napetost od same sredine. Zbog takve raspodjele površinskih napetosti generira se centrifugalni Marangonijev efekt u talini zavara (slika 10.a)). U takvim uvjetima, tok taline se lakše odvija od centra taline zavara prema rubovima tvoreći široki i plitki profil zavara. Kada se koristi aktivno talilo tj. A–TIG postupak zavarivanja, vrijednost TKPN-a se mijenja iz negativne u pozitivnu. Stoga su površinske napetosti veće u centru taline zavara nego na rubovima. Posljedica takvih raspodjela površinskih napetosti je smjer strujanja taline iz rubnih krajeva taline prema sredini tj. centripetalni Marangonijev efekt (slika 10.b)). Zbog toga profil zavara ima znatno veću penetraciju i suženi oblik [8].

A.G. Simonik je u jednom od svojih radova pokušao zavariti titan A-TIG postupkom s aktivnim premazima napravljenih od kalcijeva fluorida i aluminijeva fluorida. Tim istraživanjem pokušao je dokazati svoju teoriju da se efikasnost talila temelji na suženju električnog luka. Simonik je isto dokazao da kompomente od kojih je napravljeno talilo znatno utječu na kvalitetu električnog luka što ujedno utječe i na veću temperaturu formiranja-nastajanja molekula.

Lucas i Howse nadopunili su Simonikov princip apsorpcije elektrona koje za posljedicu imaju suženje električnog luka i povećanje penetracije zavara. Njihov mehanizam se temeljio na konceptu da električni luk kod TIG postupka ima četiri regije što je prikazano na slici 11 [13].



Slika 11. Mehanizam kontrakcije električnog luka [14]

Plazmeni stup - područje je ioniziranog zaštitnog plina unutar kojeg struja nosi elektrone i ione.

Anoda i katoda - potrebna je velika razlika potencijala kako bi se održala konstantna struja.

Katoda - bombardirana je pozitivno nabijenim ionima koji dodatno temperaturno opterećuju elektrodu.

Anoda - zbog velike razlike potencijala elektroni veoma brzo ubrzavaju i predaju svu kinetičku energiju anodi (radnom komadu).

Potrebna toplina bez koje se ne može formirati talina proizlazi iz transfera kinetičke energije elektrona koji se apsorbiraju u površini radnog komada. Količina unesene topline u osnovni materijal definirana je stečenom energijom elektrona tijekom ubrzavanja i sudaranja istih o površinu. Uži električni luk povećat će temperaturu na anodi/radnom komadu, što će za posljedicu imati veću gustoću struje pri većem naponu električnog luka.

Smatra se da talilo za vrijeme isparavanja sužuje električni luk tako da zahvaća elektrone u vanjskom dijelu luka baš kako je predložio Simonik. Efekt apsorpcije elektrona odvija se tako da se elektroni vežu uz isparavajuće molekule i disocirane atome čineći tako negativno nabijene čestice. Tako pričvršćeni elektroni mogu zauzeti mjesta samo u "hladnijem" perifernom dijelu električnog snopa gdje imaju znatno manju energiju. U samom centru električnog snopa ionizacija dominira što omogućuje znatno veće temperature i energiju elektrona. Prema tome ograničava struju u središnjem dijelu luka što povećava gustoću struje i rezultira užim lukom na anodi/radnom komadu (ostvarena je veća penetracija).

Širina samog električnog luka ovisit će o molekulama i atomima koji će imati veliki poprečni presjek. Tako će spojevi koji sadrže halogene elemente imati veliki afinitet prema elektronima kad disociraju. Iako imaju nešto manji poprečni presjek za prihvaćanje elektrona i znatno veću disociranu temperaturu, metalni oksidi su jednako efikasni pri sužavanju električnog luka jer pružaju znatno veći broj isparavajućih molekula i atoma koji se nalaze u vanjskom dijelu električnog luka [14].

4. Aktivacijski premazi

Premazi su se godinama koristili za fino podešavanje kemijskog sastava zavara metala, osiguravanje stabilnosti luka i za zaštitu u industriji zavarivanja. Međutim, primjena aktivacijskih premaza u TIG zavarivanju je i dalje rijetka praksa. Neki od razloga su nedostatak podataka o sastavu premaza, o njegovoj ulozi u nastajanju zavara, moguća promjena izgleda zavara i nestabilnost zavarivanja s promjenom debljine nanešenog premaza.

Premazi se mogu umiješati i drastično utjecati na formaciju zavara na više načina, posebice modificirajući površinsku napetost, njene temperaturne gradijente i ograničavajući luk koji bi povećao gustoću snage i posljedično penetraciju zavara.

Iz teorijskih razmatranja može se pretpostaviti da je jedan od zahtjeva za učinkovitost aktivacijskog premaza ta da njegova temperatura taljenja treba biti blizu temperature osnovnog materijala, te premaz ne smije tvoriti stabilne čvrste faze s talinom zavara koje bi štetile kozmetici zavara i svojstvima zavarenog spoja [11].

4.1. Sastav aktivacijskog premaza

Aktivacijski premazi se uobičajeno sastoje od slijedećih oksida [15]:

- kromov (III) oksid (Cr_2O_3)
- manganov (II) oksid (MnO_2)
- cinkov oksid (ZnO)
- vanadijev (V) oksid (V_2O_5)
- niklov (II) oksid (NiO)
- kalcijev oksid (CaO)
- bakrov (I) oksid (Cu_2O)
- titanovi oksidi (TiO, TiO_2, Ti_2O_3)
- silicijev (IV) oksid (SiO_2)
- aluminijev (III) oksid (Al_2O_3)
- željezov (III) oksid (Fe_2O_3)

- sumpor (S)
- aluminij (Al)
- selenij (Se).

Te od halogenida [15]:

- kalcijev fluorid (CaF_2)
- aluminijev fluorid (AlF_3)
- magnezijev fluorid (MgF_2)
- kadmijev klorid (CdCl)
- magnezijev klorid ($MgCl_2$)
- natrijev volframat (Na_2WO_4).

4.2. Dostupnost aktivacijskih premaza

Nema sumnje da aktivacijski premazi imaju potencijal smanjiti troškove proizvodnje. No, zato što se premaz gleda kao dodatni (konstantni) trošak i nanošenje premaza kao dodatni postupak, industrija je do današnjeg dana spora u iskorištavanju prednosti povećane penetracije zavara [16].

PWI (eng. *Paton Welding Institute*) aktivacijski premazi su komercijalno dostupni te NJC (eng. *Navy Joining Center*) premazi se mogu naći kod EWI (eng. *Edison Welding Institute*), Miller Electric-a (ITW) i Liburdi Engineering-a. PWI premazi se proizvode ili u obliku aerosolnog spreja ili kao pasta (praškasti premaz pomiješan s acetonom) te se apliciraju na površinu s kistom. NJC premazi su također dostupni u praškastom obliku i pomiješani s izopropanolom koji isparava kad se nanese na površinu. Dispenzeri su također postali dostupni za direktno nanošenje na površinu metala [16].

Postoje dva PWI premaza koja su konstruirana za zavarivanje sljedećih materijala i prikazana su u tablici 4 [16]. Četiri NJC premaza s prikladnim materijalima su prikazana u tablici 5.

Tablica 4. PWI premazi [16]

PATIG - S-A	**C Mn Čelik**
	Niskolegirani čelici
	Cr Mo Čelik
	Nehrđajući čelik
PATIG - N-A	Niklove legure

Tablica 5. NJC premazi s prikladnim materijalima [16]

FASTIG™	**Nehrđajući čelik**
SS-7	C Mn Čelik
CS-325	Niskolegirani čelik
	Cr Mo Čelik
Fi-600	Niklove legure

Tvrtka koja se može izdvojiti u proizvodnji aktivacijskih premaza, a da se nalazi u blizini Hrvatske je Juvar d.o.o. te je lokalizirana u Sloveniji.

Juvar d.o.o. je visokotehnološka tvrtka specijalizirana za kvalitetu zavara i povećanje produktivnosti. Osnovana je 2014.godine s izazovom poboljšanja zavarivanja debljih komada nehrđajućeg čelika koje inače oduzima dosta vremena te povećava trošak.

2011. godine odmah nakon što je nastala ideja u suradnji sa strojarskim fakultetom i stručnjacima iz zavarivačke industrije krenulo se u razvijanje industrijskog proizvoda za drastično povećanje produktivnosti.

2013. godine su prvi uzorci Quicktig aktivacijskog premaza testirani, prihvaćeni i odobreni od strane industrijskih korisnika [18].



Slika 12. Aktivacijski premaz za nehrđajući čelik – za 80 m zavara [18]



Slika 13. Aktivacijski premaz za titan – za 50 m zavara [18]

Tvrtke koje surađuju s Juvar-om [18]:

Numip d.o.o. – zadnjih 20 godina ima značajnu ulogu u generiranju kako nuklearne tako i konvencionalne energije te također u farmaceutskoj i procesnoj industriji. Tvrde kako priprema rubova nije potrebna da su znatno umanjili vrijeme zavarivanja i proizvodnje i to do 40 %. Quicktig aktivacijski premaz im je omogućio ručno zavarivanje cijevi debljih od 2 mm u jednom prolazu bez pripreme spoja [18, 20].

Akrapovič d.o.o. – tvrtka prepoznata po visokoj inovativnosti u tehnologiji materijala. Proizvodi tvrtke su konstruirani i prozvedeni za motocikle i automobile visokih performansi. Svjedoče kako koriste aktivacijski premaz Quicktig pri zavarivanju titana debljine 3,5 mm. Prednost pri korištenju premaza je to što nema prethodne pripreme pa to pruža veliku uštedu vremena i materijala. Brzina zavarivanja je ista kao i kod konvencionalnog TIG zavarivanja. Penetracija je puno bolja i zavar je uži. Ušteda je oko 10 % [18, 21].

5. Eksperimentalni rad

Eksperimentalni dio rada je proveden u Laboratoriju za zavarivanje i u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Svrha eksperimentalnog dijela je bila ispitati, proučiti i izvesti zaključke o utjecaju aktivacijskih premaza s različitim udjelima komponenti na austenitni visokolegirani nehrđajući čelik, AISI 304. Cilj eksperimenta je dokazati da premazi osiguravaju veću penetraciju. Potrebno je također definirati utjecaj udjela komponenti u premazu na geometriju dobivenog zavara i korozijsku otpornost. Rezultati au se uspoređivali s uzorkom zavarenim konvencionalnim TIG postupkom, dok su se ostala četiri uzorka navarila pomoću automatiziranog A-TIG postupka kako bi bili osigurani jednaki uvjeti za sve uzorke.

Istraživanje je provedeno u kontroliranim uvjetima, po sljedećem rasporedu:

1. strojna obrada uzoraka
2. navarivanje
3. analiza geometrijskih značajki
4. korozijsko ispitivanje.

5.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal koji se koristio u ovom ispitivanju je visokolegirani austenitni nehrđajući čelik X5CrNi18-10 (AISI 304). Ovaj tip čelika je jedan od najčešće korištenih u industriji.

Uzorci su izrezani na tračnoj pili u dimenzijama od 160 x 50 x 10 mm što je prikazano na slici 14.



Slika 14. Rezanje uzoraka na tračnoj pili

Otporan je na kiseline, te je zbog niskog udjela ugljika interkristalično otporan nakon zavarivanja kod debljine limova do 6 mm i bez naknadne toplinske obrade. Upotrebljava se pri temperaturama do 300 °C. Prilikom rezanja potrebno je zbog tendencije ka hladnom očvršćivanju primjeniti oštro brušene alate od brzoreznog čelika ili od tvrdog metala. Čelik je otporan na vodu, vodenu paru, vlažnost zraka, konzumne kiseline, kao i na slabe organske i anorganske kiseline i ima mnogostrane mogućnosti primjene, npr. u prehrambenoj industriji, u proizvodnji pića, u mljekarstvu, pivarstvu i podrumarstvu, u farmakološkoj i kozmetičkoj industriji, u izradi kemijskih aparata, arhitekturi, automobilskoj industriji, za kućanske predmete i aparate, za kirurške instrumente, sanitarne uređaje itd [22]. Kemijski sastav te fizička i mehanička svojstva osnovnog materijala su prikazana u tablicama 6.-8.

Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala AISI 304 [23]

Kemijski elementi	Udio (%)
Ugljik (C)	0,07
Krom (Cr)	17,5 – 19,5
Mangan (Mn)	2,0
Silicij (Si)	1,0
Fosfor (P)	0,045
Sumpor (S)	0,015
Nikal (Ni)	8,0 – 10,5
Dušik (N)	0,1
Željezo (Fe)	ostatak

Tablica 7. Mehanička svojstva AISI 304 [24]

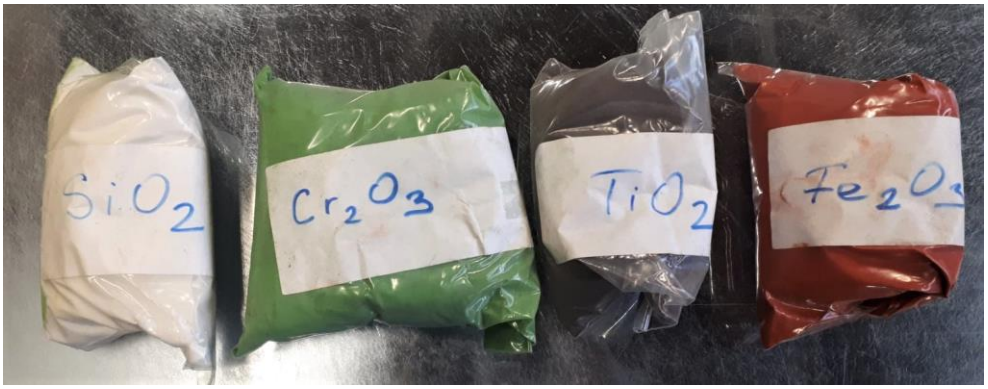
Oznaka čelika		Mehanička svojstva				
EN	**AISI**	R_m ,min N/mm^2	$R_{p0,2}$, min N/mm^2	A_5, min %	Z, min %	KU, min J
X2CrNi18-19	304	450...700	175	50	60	85

Tablica 8. Fizička svojstva osnovnog materijala [23]

Svojstva	Vrijednost
Gustoća	8,0 kg/m^2
Talište	1450 ℃
Toplinska rastezljivost	17,2 x 10^{-6} / K
Modul elastičnosti	193 GPa
Toplinska vodljivost	16,2 W/mK
Električni otpor	0,072 x 10^{-6} Ωm

5.2. Priprema aktivacijskog premaza

U eksperimentalnom dijelu rada korištene su visokokoncentrirane suspenzije praškastih komponenti u etilnom alkoholu (96 postotni etilni alkohol). Omjer praškaste i tekuće komponente je 2:1, tj. 4 ml svake praškaste mješavine dodano je u 8 ml 96 postotnog etilnog alkohola u čistoj plastičnoj bočici te promješano (slika 17.). Komponente potrebne za izradu aktivacijskog premaza su prikazane na slikama 15. i 16. Udijeli oksida su prikazani u tablici 9.



Slika 15. Praškaste aktivacijske komponente



Slika 16. Etanol denaturirani 96 %

Tablica 9. Udijeli komponenata u aktivacijskom premazu

	Udijeli komponenata (%)			
	SiO_2	Cr_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3
1A	-	-	-	-
2A	25	25	25	25
3A	75	25	-	-
4A	75	-	25	-
5A	75	-	-	25



Slika 17. Pripremljeni aktivacijski –TIG premazi

5.3. Oprema za zavarivanje

Radno mjesto na kojem se provodilo navarivanje pomoću automatiziranog TIG postupka nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U nastavku će sva oprema potrebna za proces biti navedena, prikazana i opisana.

5.3.1. Izvor struje za zavarivanje

Uređaj koji je korišten u postupku zavarivanja prikazan je na slici 18. Radi se o uređaju naziva Magic Wave 230i EF proizvedenog od strane tvrtke Fronius. MagicWave je u potpunosti digitalizirani TIG AC/DC izvor napajanja koji se koristi posebno za primjene aluminija. Pored različitih kategorija snage od 170 A do 500 A, uređaji se razlikuju i po svojoj pokretljivosti - od prijenosnog uređaja do stacionarnog kompletnog sustava velike snage. MagicWave odlikuje se izuzetno robusnim dizajnom i izuzetno razumljivim konceptom rada. MagicWave 230i je poveziv s drugim uređajima putem Bluetooth-a, bežičnog LAN-a i NFC-a, poput kaciga za zavarivanje, daljinskih upravljača i mobilnih telefona [25]. Tehnički podatci uređaja prikazani su u tablici 10.



Slika 18. Uređaj za TIG zavarivanje Fronius tipa MagicWave 230i EF

Tablica 10. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje MagicWave 230i EF [25]

Tip izvora struje	MagicWave 230i EF
Struja zavarivanja/radni ciklus [10 min/40 °C]	230 A/35 %
Struja zavarivanja/radni ciklus [10 min/40 °C]	195 A/60 %
Struja zavarivanja/radni ciklus [10 min/40 °C]	165 A/100 %
Radni napon	10,1-19,2 V
Napon otvorenog kruga	100,0 V
Mrežna frekvencija	50-60 Hz
Mrežni napon	230 V
Glavni osigurač	16 A
Širina	210,0 mm
Dužina	558,0 mm
Težina	17,0 kg
Stupanj zaštite	IP23

5.3.2. Oprema za automatiziranje postupka zavarivanja

Zbog nedostataka ručnog TIG postupka te potrebe za preciznošću i visokom kvalitetom postupak se proveo pomoću automatiziranog TIG postupka čime se eliminirao faktor ljudskog utjecaja. Zbog povećane produktivnosti i ekonomičnosti automatizirani i poluautomatizirani TIG postupci sve više pronalaze svoje mjesto u visokoserijskoj i specijaliziranoj proizvodnji.

Za eksperimentalni postupak se upotrijebio sustav za automatsko upravljanje „*Bugo systems*“ prikazan na slici 19. Za prikazani uređaj je pričvršćen pištolj za zavarivanje te se giba paralelno uz radni komad uz pomoć nosača, također postoji mogućnost namještanja udaljenosti vrha elektrode od radnog komada, na samom uređaju za automatiziranje se namješta brzina zavarivanja.



Slika 19. „Bugo Systems“, uređaj za automatiziranje postupka zavarivanja

5.3.3. Zaštitni plin

Za praktični dio završnog rada koristio se stopostotni argon kao zaštitni plin tijekom postupka zavarivanja. Argon je inače najčešće korišten zaštitni plin koji se upotrebljava prilikom zavarivanja čelika, nehrđajućih čelika, titanovih legura i aluminijevih legura. Za provedeni postupak zavarivanja koristio se Argon 4.8 oznake I1 prema ISO14175 proizvođača Messer prikazan na slici 20. U ovom slučaju je protok plina bio konstantan parametar i iznosio je 9 l/min.



Slika 20. Zaštitni plin

5.3.4. Netaljiva volframova elektroda

S obzirom na debljinu materijala i jakost struje korištene tijekom ispitivanja korištena je torirana elektroda promjera 3,2 mm čije je maksimalno strujno opterećenje 380 A. Torirane elektrode mogu se opterećivati većim jakostima struje zavarivanja, imaju nižu granicu minimalnog opterećenja i trajnije su. Pravilno opterećivanje volframove elektrode jakosti električne struje zavarivanja daje joj dulji vijek trajanja i smanjuje onečišćenje zavarenog spoja volframom [2]. Razmak između elektrode i radnog komada postavio se na 3 mm udaljenosti.

5.4. Proces navarivanja

Postupak navarivanja je proveden nad 5 uzoraka osnovnog materijala AISI 304 dimenzija 160x50x10 mm. Uzorci su izrezani iz iste šarže kako bi se zagarantirao nepromijenjeni kemijski sastav tijekom usporedbe rezultata. Navarivanje je provedeno neutralnom tehnikom zavarivanja (nagib pištolja od 90°) automatiziranim postupkom TIG zavarivanja u jednom prolazu kako bi se osigurali isti uvjeti za sve uzorke. Prije samog navarivanja provelo se nanošenje aktivacijskog premaza kistom u 3 sloja na određenoj liniji navarivanja (slika 21). Razmak pištolja za zavarivanja od uzorka je namješten na 3 mm. Uzorak broj 1 je navaren konvencionalnim TIG postupkom tako da se na njega nije nanosio aktivacijski premaz.

Prije samog početka navarivanja na pripremljene uzorke, sva četiri aktivacijska premaza su nanešena na dodatnu, rezervnu ploču kako bi se osiguralo da unaprijed zadani parametri navarivanja odgovaraju.



Slika 21. Pripremljeni uzorci s nanešenim aktivacijskim premazima

Na slici 22. je prikazano probno navarivanje i rezultat istog na slici 23.



Slika 22. Probno navarivanje



Slika 23. Probni navareni uzorak

5.4.1. Konstantni parametri tijekom postupka navarivanja

Konstantni parametri koji su se koristili za navarivanje:

- promjer elektrode: d = 3,2 mm
- udaljenost vrha elektrode od uzorka: l = 3 mm
- neutralna tehnika rada (nagib pištolja od 90°)
- protok plina: 9 l/min
- polaritet i vrsta struja: (-) DC (eng. *Direct Current*)
- jakost struje: 160 A
- brzina zavarivanja: 10 cm/min

5.4.2. Promjenjivi parametri tijekom postupka navarivanja

Promjenjivi parametri i njihovi iznosi prikazani su u tablici 11.

- unos topline: unos topline je ovisan o dva parametra, a to su jakost struje i brzina zavarivanja. Računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v \times 1000}$$

Q: unos topline, kJ/mm

U: napon, V

I: jakost struje zavarivanja, A

v: brzina zavarivanja, mm/min

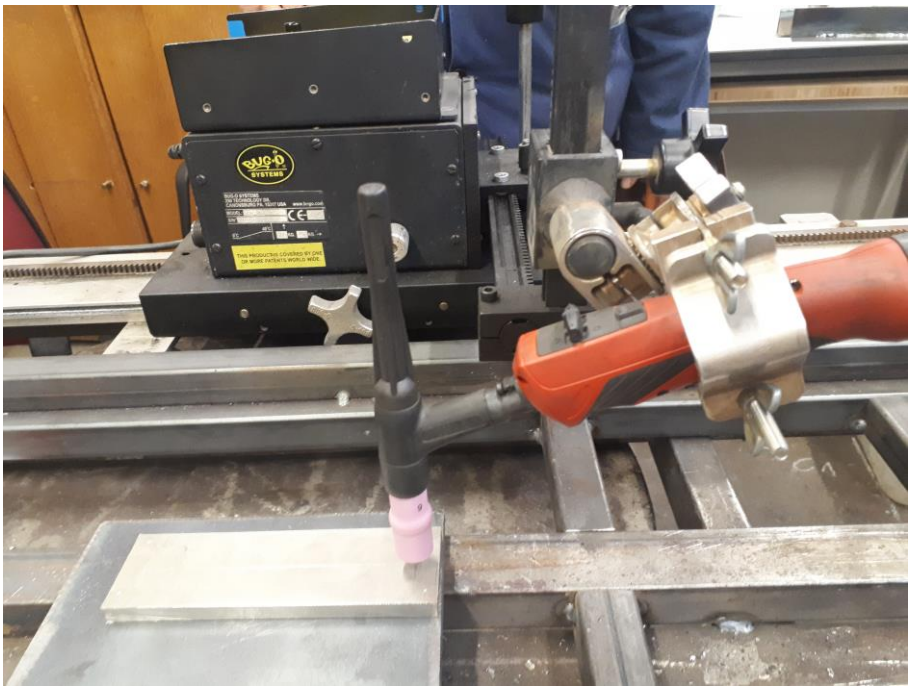
k: koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (k = 0,6 za TIG postupak)

- aktivacijski premaz: za svaki unos topline ima određeni navar s nanešenim aktivacijskim premazom (A-TIG postupak) i bez premaza (konvencionalni TIG postupak).

Tablica 11. Promjenjivi parametri prilikom navarivanja

Uzorak	Premaz	Brzina navarivanja, cm/min	Struja, A	Napon, V	Unos topline, kJ/mm
1A	NE	10	160	11,3	0,651
2A	DA	10	160	13	0,749
3A	DA	10	160	12,4	0,714
4A	DA	10	160	12,8	0,737
5A	DA	10	160	12,7	0,732

Prije nego što su se uzorci navarili očišćeni su detaljno etanolom od masnoća. Nakon toga je nanešen aktivacijski premaz u 3 sloja i ostavljen da se osuši. Priprema za navarivanje je prikazana na slici 24.



Slika 24. Priprema za navarivanje uzorka 1

Rezultati navarivanja su prikazani u tablici 12.

Tablica 12. Navareni uzorci

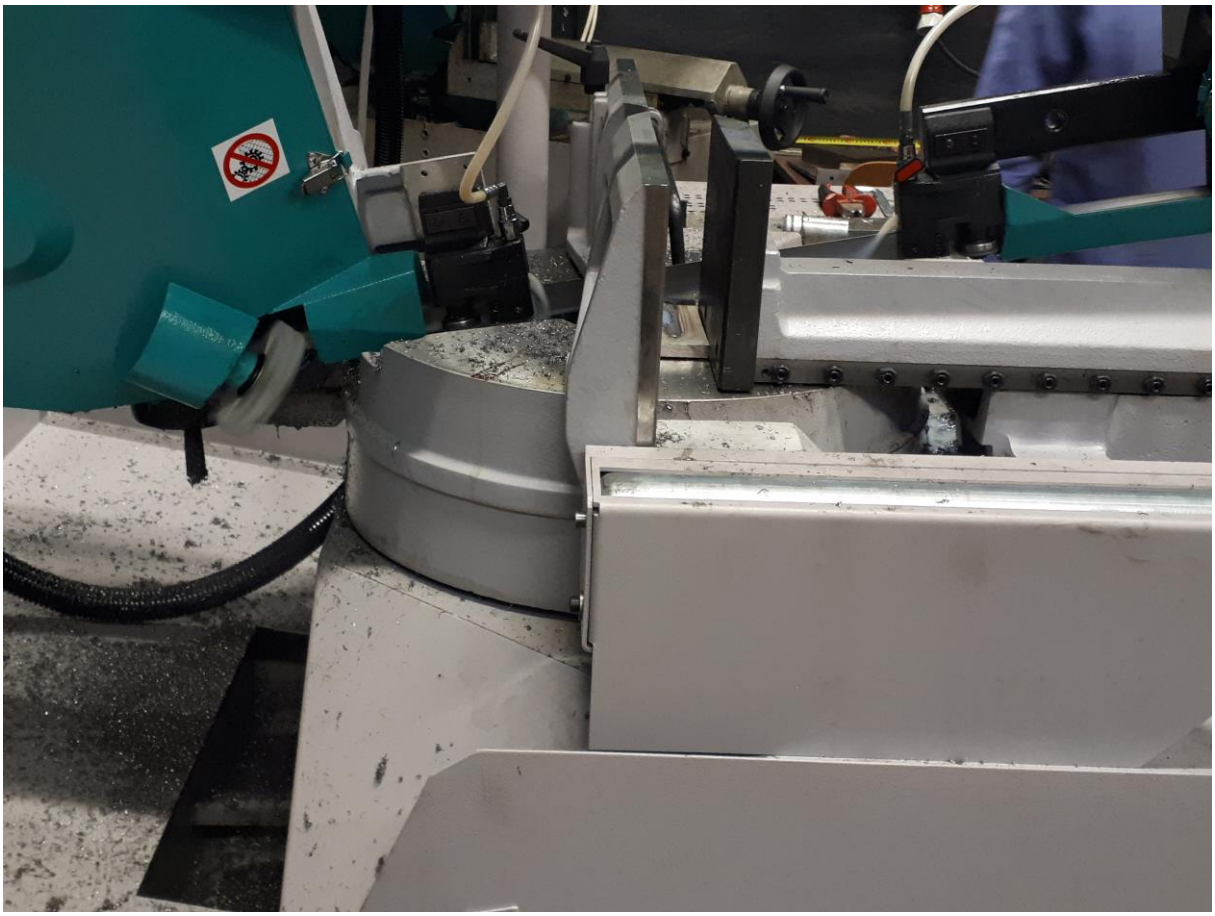
UZORAK	
1A	
2A	
3A	
4A	
5A	

5.5. Analiza geometrijskih značajki

U svrhu ispitivanja geometrijskih značajki izrađeni su makroizbrusci poprečnog presjeka.

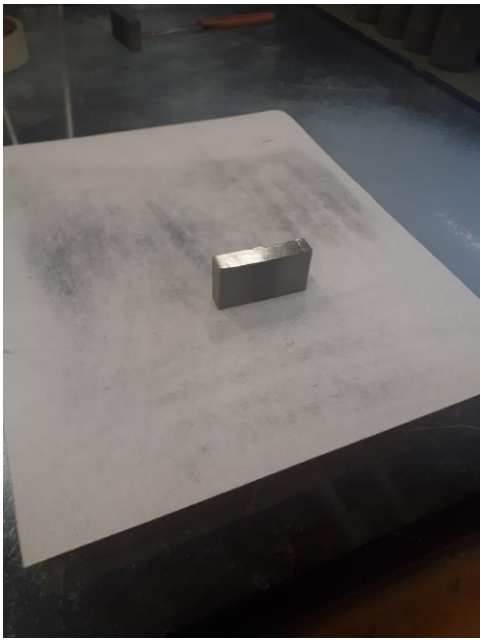
Redoslijed postupka:

1. Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili s vodenim hlađenjem na duljinu 25 mm (slika 25.),



Slika 25. Izrezivanje makrouzoraka

2. Površina makrouzoraka je izbrušena i očišćena od srhova postepenim ručnim postupkom brušenja (slika 27.). Upotrijebljeni su se brusni papiri P100, P150, P240, P400 redoslijedom kako je i nabrojeno (slika 26.),



Slika 26. Brušenje uzorka na brusnom papiru P150



Slika 27. Izgled izbrušenih makrouzoraka

3. Izvelo se elektrokemijsko nagrizanje u desetpostotnoj oksalnoj kiselini ($C_2H_2O_4$) prikazanoj na slici 28. u trajanju od 90 s pri naponu od 9 V. Nakon nagrizanja uzorci su očišćeni u toploj vodi te osušeni papirom. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje je prikazana na slici 29.



Slika 28. Desetpostotna oksalna kiselina



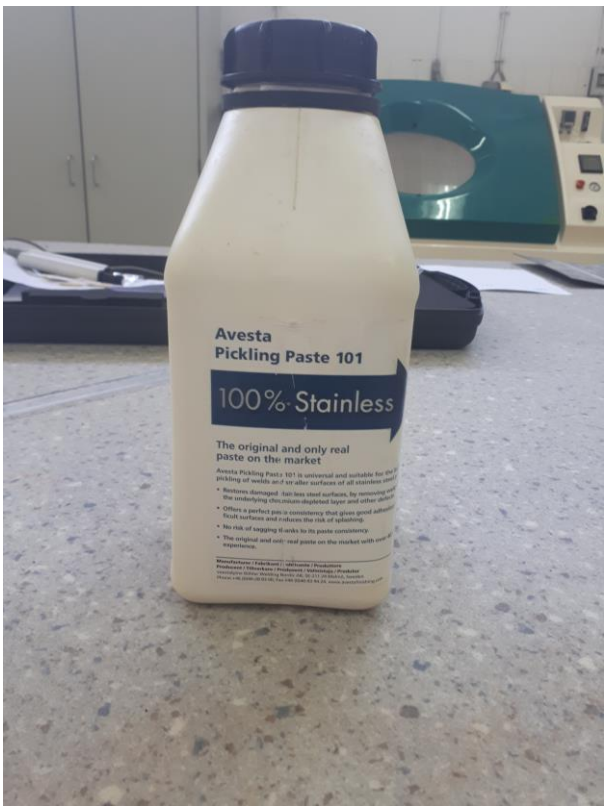
Slika 29. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje

Svrha nagrizanja makrouzoraka je u tome da se izraze područja zahvaćena električnim lukom (područje navara, zona staljivanja i zona utjecaja topline). Zadatak makroizbrusaka je taj da prikažu promjene u penetraciji i širini zavara kod uzoraka s različitim primijenjenim aktivacijskim premazima.

5.6. Korozijsko ispitivanje

U svrhu ispitivanja otpornosti na koroziju tj. *pitting* (rupičasta korozija) uzoraka s različitim aktivacijskim premazima iskorišteni su dijelovi koji su ostali nakon izrade makrouzoraka.

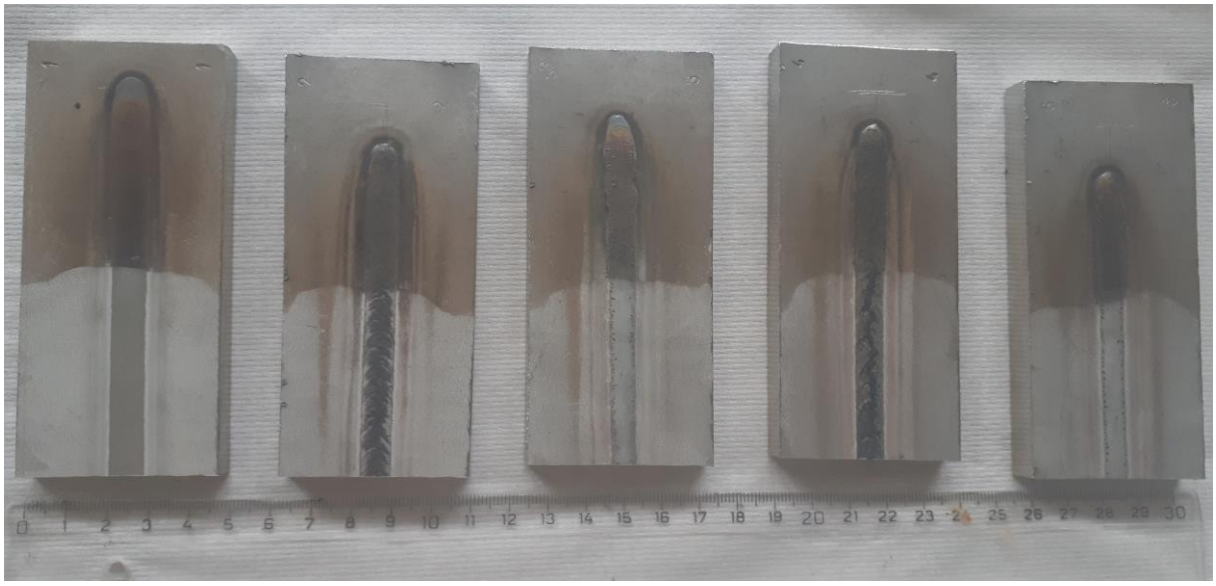
Prije provedbe samog ispitivanja bilo je potrebno kemijski očistiti uzorke što je napravljeno pomoću paste prikazane na slici 30. Uzorci su bili premazani pastom do polovice površine (slika 31.) te je pasta ostavljena da djeluje 30 minuta nakon čega su se uzorci očistili pod mlazom tople vode i osušili papirnatim ubrusima. Izgled uzoraka nakon čišćenja je prikazan na slici 32.



Slika 30. Pasta za kemijsko čišćenje

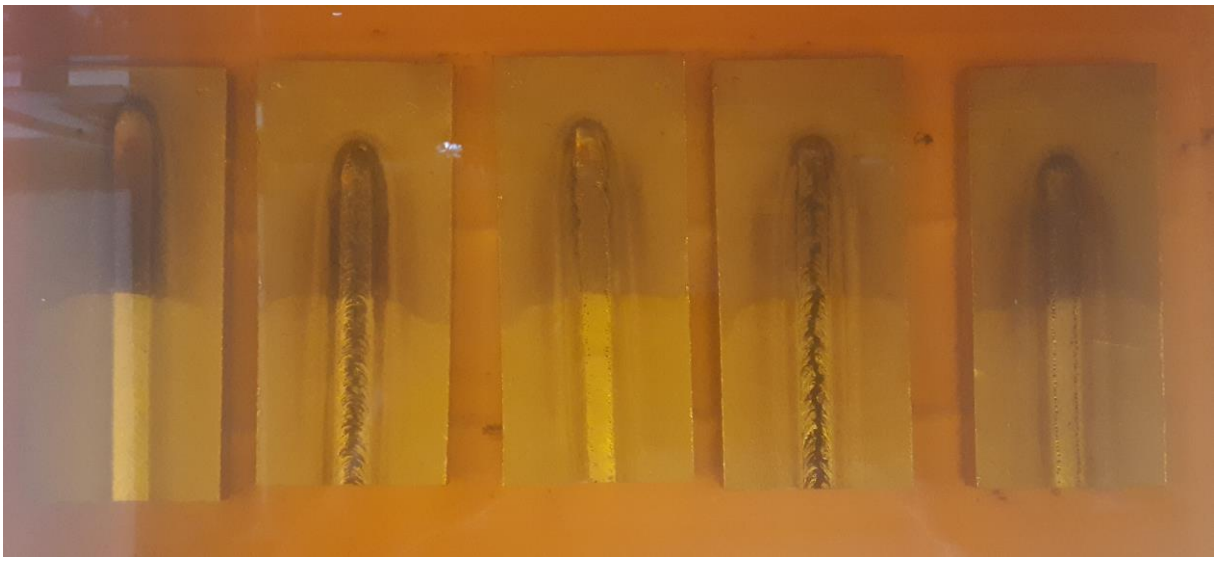


Slika 31. Uzorci premazani pastom



Slika 32. Uzorci nakon djelovanja paste

Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zaštitu materijala. Provedeno je uranjanjem uzoraka u kadicu s desetpostotnom otopinom željezovog (III) klorid-heksahidrata u trajanju od 48 h na sobnoj temperaturi od 25 °C kako je i prikazano na slici 33.



Slika 33. Pripremljeni uzorci uronjeni u desetpostotnu otopinu željezovog (III) kloridheksahidrata

6. Analiza rezultata ispitivanja

6.1. Rezultati analize geometrijskih značajki

Pomoću makroizbrusaka može se uvidjeti geometrija zavarenog spoja, intenzitet taljenja osnovnog materijala te zona taljenja materijala.

Slike 35.-39. prikazuju makroizbruske s nanešenim aktivacijskim premazom te na njima izmjerenu širinu i dubinu zavara (penetraciju). Korišteni parametri za svaki pojedini uzorak mogu se vidjeti u poglavlju 5.5.2. u tablici 11.

Također se udijeli komponenti u aktivacijskim premazima mogu vidjeti u poglavlju 5.3. tablica 9.

Makrouzorak 1 koji je navaren konvencionalnim TIG postupkom uvjerljivo ima najmanju penetraciju (2,1 mm), ali i najveću širinu zavara (7,8 mm).

Makrouzorak 2 ima najveću širinu zavara (6,9 mm) no zato ima najmanju penetraciju (3,8 mm) od svih makrouzoraka navarenih A-TIG postupkom.

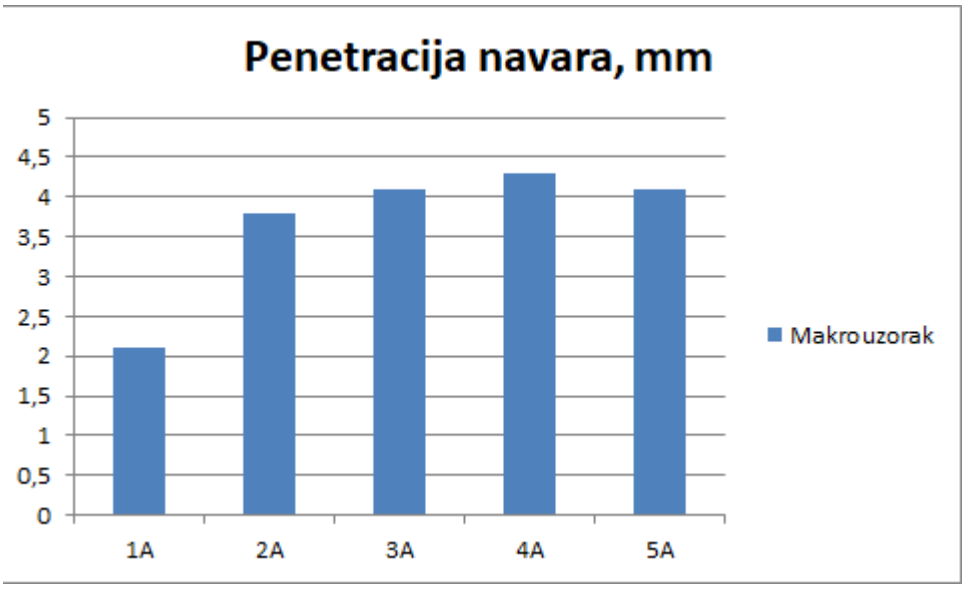
Makrouzorak 4 ima najveću penetraciju (4,3 mm) od svih uzoraka.

Makrouzorak 3 ima najmanju širinu (5,9 mm) zavara.

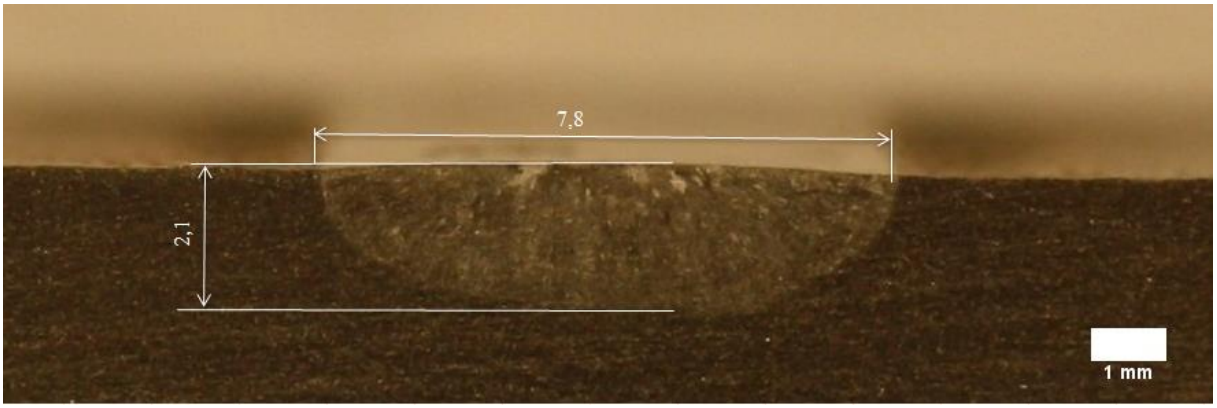
S obzirom na dostupnu literaturu, a i rezultate analize poprečne površine makrouzoraka lako je zaključiti da su najprikladniji oblici za pripremu spoja kao što je i bilo za očekivati I i V.

Kako je za uzorak 4 penetracija 4,3 mm tu vidimo mogućnost Y oblika zavara što nam predstavlja veliku prednost nad V oblikom zavara koji bi bio prisutan kod konvencionalnog TIG zavarivanja. Tu možemo uvidjeti kako A-TIG povećava produktivnost, a i ekonomičnost s obzirom na potrošnju materijala.

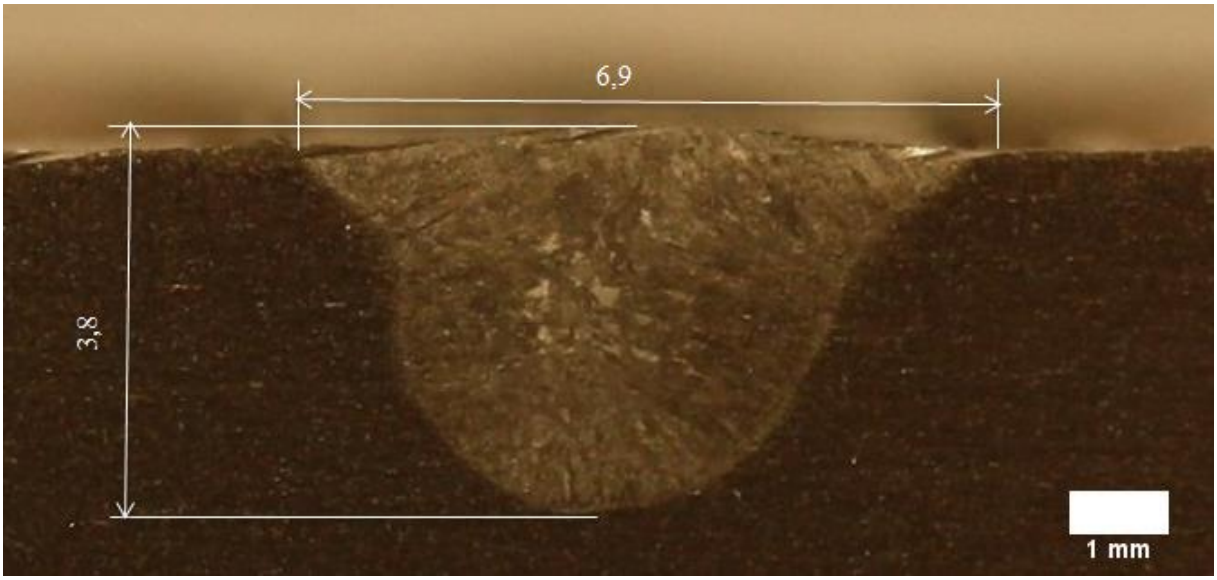
Rezultati su u grafički prikazani na slici 34.



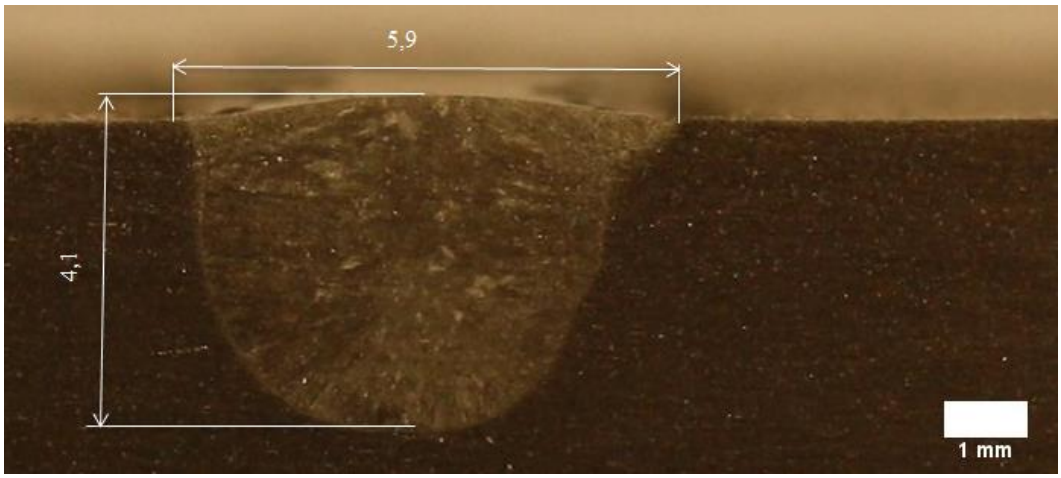
Slika 34. Grafički prikaz penetracije navara pojedinih makrouzoraka



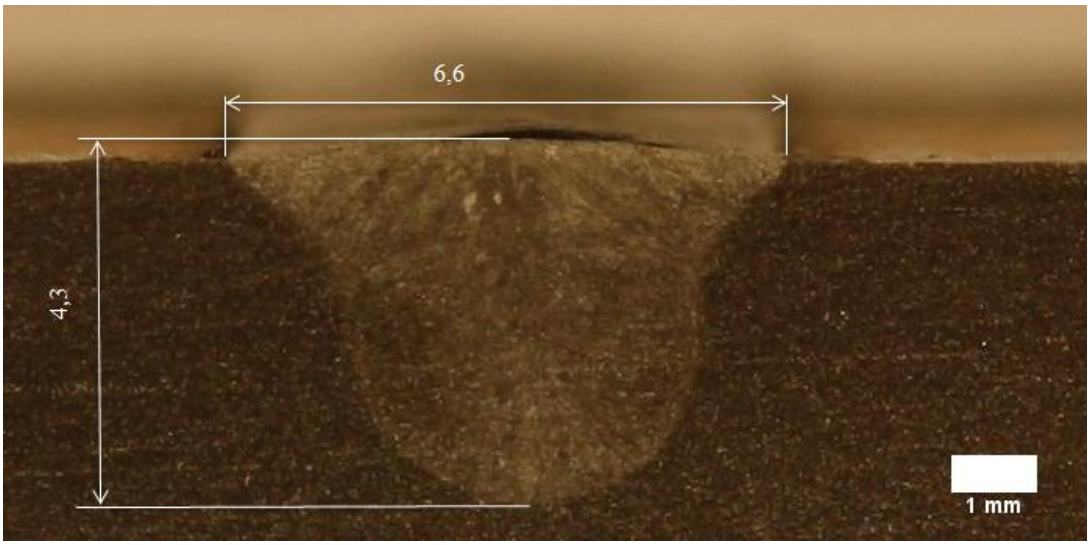
Slika 35. Makrouzorak 1



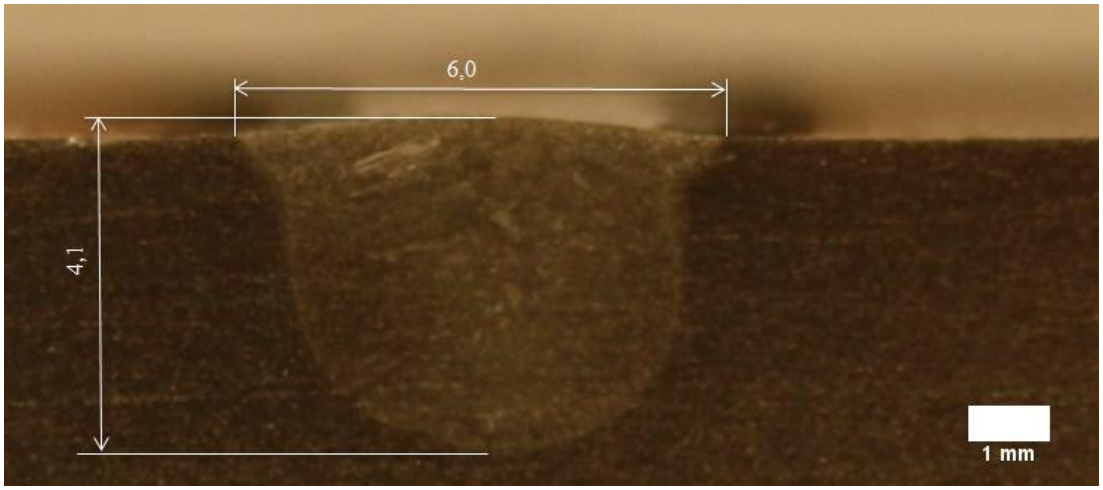
Slika 36. Makrouzorak 2



Slika 37. Makrouzorak 3



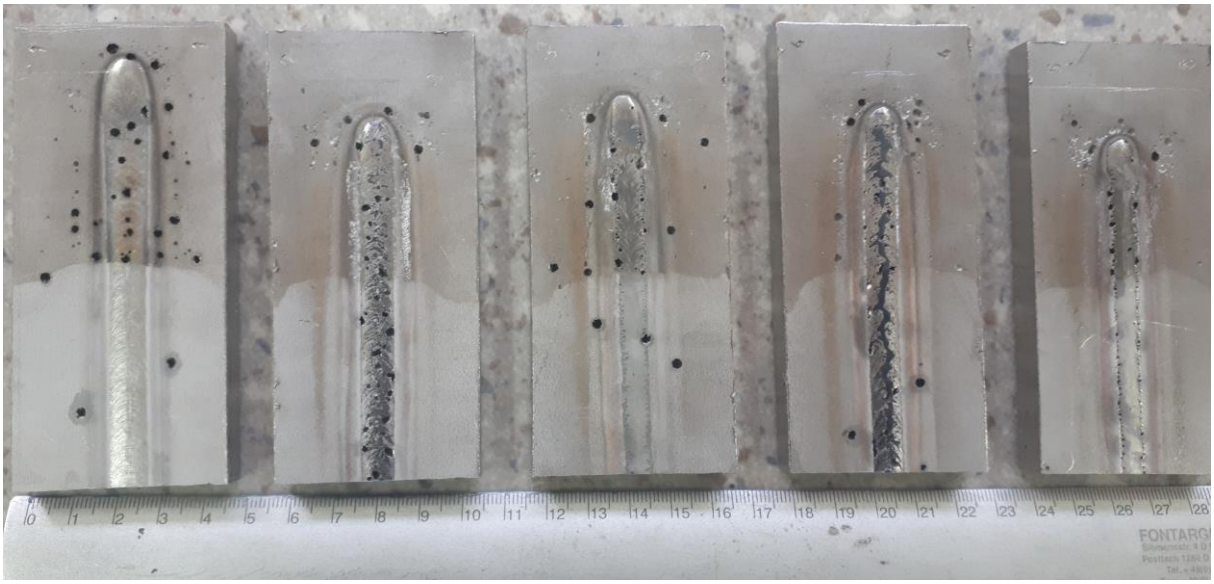
Slika 38. Makrouzorak 4



Slika 39. Makrouzorak 5

6.2. Rezultati korozijskih ispitivanja navarenih uzoraka

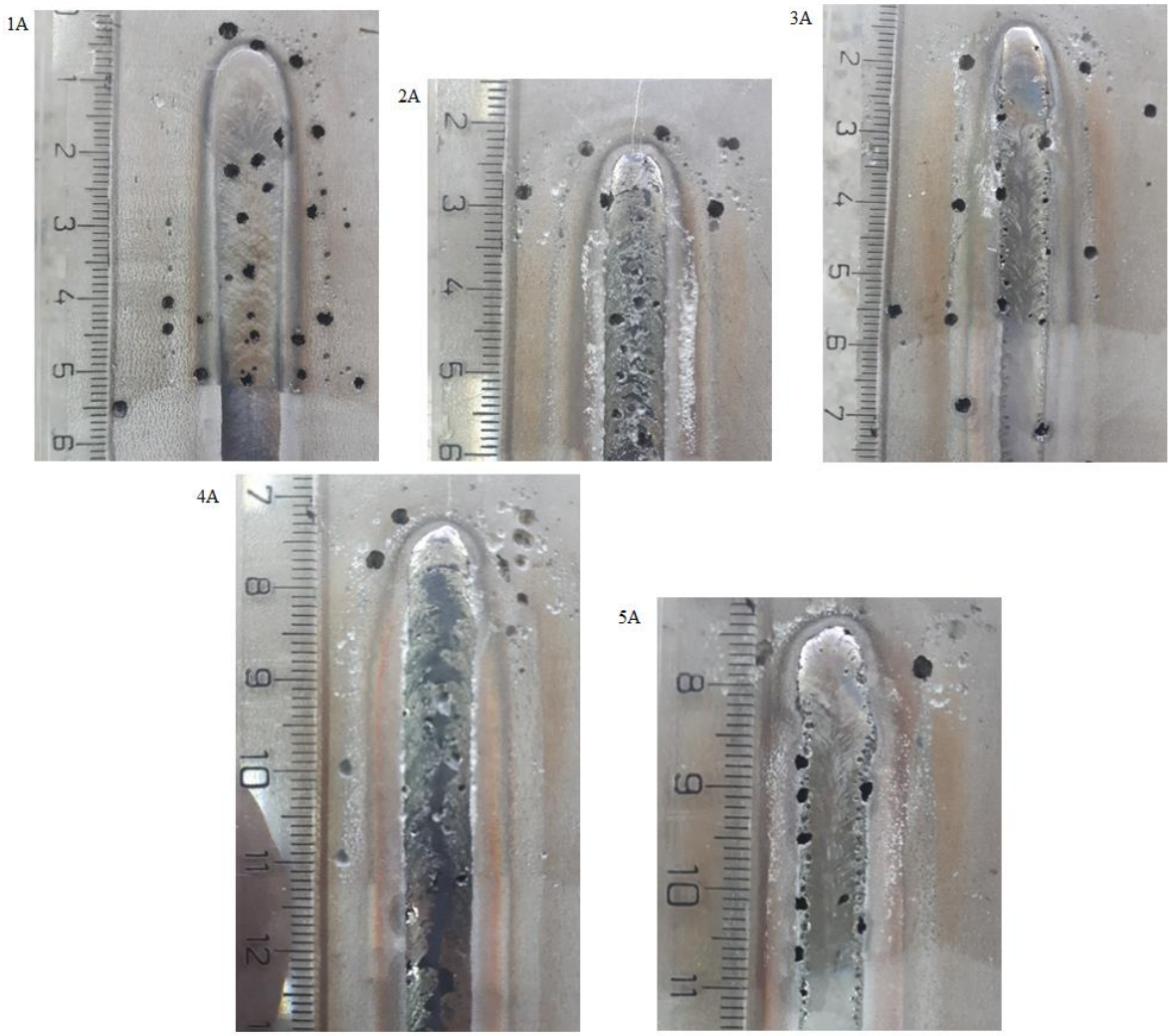
Nakon 48 sati provedenih na sobnoj temperaturi od 25 °C uzorci su izvađeni iz otopine desetpostotnog željezovog (III) klorid-heksahidrata. Uzorci se nakon vađenja iz otopine ispiru pod mlazom mlake vode. Nastale rupice na uzorcima čiste se iglom pod mlazom vode kako kasnije ne bi došlo do iscjeđivanja korozijskih produkata iz istih. Za kraj su uzorci osušeni papirnatim ubrusima i fenom za nastavak analize. Prilikom čišćenja rupica (pitova) potrebno je paziti da se ne ogrebe površina uzorka kako se prilikom razmatranja oštećenja ne bi ta ista ogrebotina zamijenila za korozijsko oštećenje. Izgled uzoraka nakon 48 sati uranjanja u otopini prikazan je na slici 40.



Slika 40. Izgled očišćenih površina uzoraka nakon 48 h u otopini

Odmah se može primijetiti iz prikazane slike koliki je utjecaj kemijsko čišćenje površine imalo na otpornost rupičastoj koroziji. Donja polovica površine svih uzoraka skoro pa i nema rupa (pitova) u usporedbi s gornjim dijelom neočišćene površine, tj. postotak oštećenja je u usporedbi i više od 50 % manji u odnosu na gornju polovicu uzorka.

Na slici 41. su prikazana oštećenja svakog pojedinog uzorka te su se zbog prethodno objašnjene pojave razmatrale osobito gornje polovice uzoraka koje nisu bile izložene djelovanju kemijske paste.



Slika 41. Izgled navarenih uzoraka nakon 48-satnog izlaganja agresivnoj otopini

Odmah se može primijetiti kako uzorak 1A koji je navaren konvencionalnim TIG postupkom ima najveći broj oštećenja kako u svim dijelovima zavara (metal zavara i zona utjecaja topline) tako i na osnovnom materijalu.

Uzorak 4A se pokazao kao najbolji što se tiče otpora rupičastoj koroziji i nastalih oštećenja. Najveći pitovi se nalaze na osnovnom materijalu te u manjoj mjeri u zoni utjecaja topline dok je metal zavara skoro ostao i netaknut.

Kod uzorka 5A je primijećena izuzetna lokaliziranost oštećenja na samim rubovima metala zavara slijedeći ga skoro po cijeloj duljini.

Uzorak 3A ima oštećenja ravnomjerno raspoređena i po osnovnom materijalu i po metalu zavara, a i po zoni utjecaja topline. Iako metal zavara ima ponajviše rupe po rubu, slično uzorku 5A.

Kod uzorka 2A je sam metal zavara najviše nastradao te također ima dosta rupa po zoni utjecaja topline.

Može se zaključiti kako je uzorak 1 A na koji nije nanesen aktivacijski premaz pokazao najlošija svojstva što je bilo i za očekivati. Od uzoraka s aktivacijskim premazima može se izdvojiti uzorak 4A kao onaj s najboljim rezultatima i svojstvima, tj. silicijev (IV) oksid i titanov (IV) oksid u omjeru 75 : 25 rezultira s najmanjim oštećenjima.

Što se tiče uzorka koji je najmanje ispunio očekivanja rezultati navode na uzorak 5A, iako možda ima manji broj pitova nego li uzorak 3A, kod uzorka 5A se većina nalazi na samom metalu zavara što nas navodi na zaključak da je problem u slabijoj kvaliteti aktivacijskog premaza (silicijev (IV) oksid i željezov (III) oksid u omjeru 75:25).

7. Zaključak

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj pojedinog aktivacijskog premaza na geometriju navara i korozijsku otpornost austenitnog nehrđajućeg čelika. Analizom dobivenih podataka, parametara navarivanja i dobivenih rezultata utvrđen je utjecaj različitih mješavina aktivacijskog premaza na svojstva navara i tehnološku primijenjivost premaza pri automatiziranom navarivanju u industrijskoj proizvodnji.

U cilju uspoređivanja mjerljivih rezultata različitih aktivacijskih premaza u odnosu na uzorak bez premaza izvršeno je automatizirano navarivanje nehrđajućih čelika. Automatizacijom postupka zavarivanja postignuta je dosljednost i ponovljivost procesa kod svih uzoraka, a isključen je faktor ljudskog utjecaja.

Analizom dobivenih rezultata utvrđeno je da svaki od ispitanih A-TIG premaza pozitivno utječe na sam navar. Svi uzorci s aktivacijskim premazima su imali veći unos topline od onog bez premaza zbog povećanog napona unatoč istoj duljini električnog luka prilikom postupka navarivanja, s tim da se uzorak 2A može izuzeti kao onaj s najvećim unosom topline (0,749 kJ/mm). Uzorak 2A imao je podjednak udio od 25 % svih primjenjenih oksida u eksperimentu.

Analizom geometrijskih karakteristika navara utvrđeno je da svaki ispitani premaz također pozitivno utječe na sam navar povećavajući penetraciju. Aktivacijski premaz s 75 % silicijevog ˙(IV) oksida i 25 % torijevog (IV) oksida kod uzorka 4A je postigao najveću penetraciju u odnosu na sve ostale premaze s duljinom od 4,3 mm. Konvencionalnim TIG postupkom postignuta je penetracija navara od 2,1 mm što je gotovo za 50 % manje od penetracije navara kod uzorka 4A. Primjenom mješavine aktivacijskih komponenti u kojoj je svaka imala 25 % na uzorku 2A postignuta je najmanja penetracija od 3,8 mm u odnosu na ostale uzorke gdje su primijenjeni aktivacijski premazi.

Rezultati korozijskih ispitivanja navarenih uzoraka pokazali su kako aktivacijski premaz ima utjecaj na korozijsku otpornost navarenih uzoraka. Razlike u odnosu na uzorak 1A navaren konvencionalnim TIG postupkom nisu bile drastične no i dalje se uzorak 4A kao i kod geometrijske analize pokazao kao najbolji s najmanjim oštećenjima na području samog metala zavara. Veći utjecaj na smanjenje rupičaste korozije imala je prethodna obrada uzoraka kemijskim čišćenjem što je značajno umanjilo oštećenja na području primjene same paste.

Na kraju se može donijeti zaključak da je A-TIG postupak primjenjiv za zavarivanje nehrđajućih visokolegiranih austenitnih čelika. Eksperiment je dokazao povećanu penetraciju TIG zavarivanja s aktivacijskim premazom i to preko 100 % u odnosu na konvencionalni TIG postupak, također utječe na povećanje korozijske otpornosti.. Dobiveni rezultati navode na to da će primjena aktivacijskog premaza rezultirati povećanom produktivnošću, a time i ekonomičnošću. Kod zavarivanja velikih serija u automatiziranoj proizvodnji uvećani trošak zbog primjene premaza vjerojatno bi bio zanemariv kad se uzmu u obzir prednosti kojima sam postupak rezultira. Daljnjim istraživanjima može se odrediti optimalni sastav aktivacijskog premaza pomoću kojeg bi se poboljšala učinkovitost i produktivnost TIG zavarivanja visokolegiranog austenitnog nehrđajućeg čelika.

LITERATURA

[1] Horvat M, Kondić V, Brezovečki D. Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. Available from: https://hrcak.srce.hr cited 05.01.2020.

[2] M. Živčić; Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1985.

[3] Lončar Đ, Starčević M. Zavarivanje u zaštiti plinova TIG, MIG, MAG. Zagreb, 1983.

[4] http://www.zavarivanje.info/cd/11940/zavarivanje-moderni-postupci-mig-mag-tig-rel-autogeno .dostupno 05.01.2020.

[5] https://pdfs.semanticscholar.org/d869/d301f87e593ddf1cb1ff922cdd5c873524aa.pdf?_ga=2.251606214.1978931494.1578243064-414397642.1578243064 dostupno 05.01.2020.

[6] https://www.millerwelds.com/Training/PresentationsQuizzes/GTAW-TIG/GTAW_7_Electrodes/presentation.html dostupno 05.01.2020.

[7] Kralj, Slobodan: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

[8] Garašić I, Kožuh Z, Jurica M, Tomić T, Čolić L, Babić N. Optimizacija sastava aktivacijskog premaza za A-TIG navarivanje. Dostupno s: https://www.sfsb.unios.hr/uploads/DTZ/radovi/2015/Gara%c5%a1i%c4%87%20-%20OPTIMIZACIJA%20SASTAVA%20AKTIVACIJSKOG%20PREMAZA%20ZA%20A-TIG%20NAVARIVANJE.pdf .dostupno 09.01.2020.

[9] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-a-tig-welding-2000 .dostupno 09.01.2020.

[10] Babić, N. Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304, Zagreb, 2015.

[11] Ruckert, Guillaume; Perry, Nicolas; Sire, Stephane; Marya, Surendar: Enhanced Weld Penetrations In GTA Welding with Activating Fluxes Case studies: Plain Carbon & Stainless Steels, Titanium and Aluminum, THERMEC 2013, United States., pp-202, 2013.

[12] Sandor, Tamas; Dobransky, Janos; Nagy – Hinst, Adrian: Weld pool characteristics of the ATIG – welded joints, ESAB Hungary Ltd., Hungary

[13] Čolić L. Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.

[14] http://ijetch.org/papers/691-K072.pdf , dostupno 5.1.2020.

[15] Klobčar D, Tušek J, Bizjak M, Bušić M. Effect of TIG welding tith and without active flux on the properties of AISI 304 welded joints. 41. Međunarodna konferencija HDTZ; Opatija, Hrvatska, 8.-11.6.2016. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[16] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/activating-flux-improving-the-performance-of-the-tig-process-february-2000 .dostupno 15.01.2020.

[17] https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/tig-welding dostupno 25.01.2020.

[18] http://quicktig.com/how-to-use dostupno 25.01.2020.

[19] http://www.enoop.si/about-us dostupno 25.01.2020.

[20] https://www.numip.si/en/the-company dostupno 25.01.2020.

[21] http://www.akrapovic.com/en/about/akrapovic dostupno 25.01.2020.

[22] http://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/glavne-karakteristike-najznacajnijih-nehrdjajucih-celika-inoxa.html dostupno 4.02.2020.

[23] https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304-14301.html dostupno 04.02.2020.

[24] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2007

[25] https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/tig/magicwave/magicwave-230i dostupno 05.02.2020.

[26] https://www.docsity.com/en/welding-symbols-welding-technology-inspection-lecture-handout/86735/ dostupno14.02.2020.

PRILOZI..

I. CD-R disc