

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

NIKOLA BABIĆ

**Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri
robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304**

Zagreb, 2015.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Ivice Garašića, i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2014./2015.

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	istezljivost
d	mm	promjer elektrode
I	A	jakost struje
KU	J	udarni rad loma
Q	kJ/mm	unos topline
Re	N/mm ²	granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
T_t	°C	temperatura tališta
U	V	napon
v_r	cm/min	brzina rezanja
v_z	mm/min	brzina zavarivanja
w	%	maseni udio
Z	%	kontrakcija
σ	N/mm ²	površinska napetost
ϕ	mm	promjer sapnice

SADRŽAJ

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	I
SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. TIG postupak zavarivanja	2
1.1.1. Osnovni dijelovi uređaja za TIG zavarivanje	3
1.1.2. Princip rada TIG postupka zavarivanja.....	4
1.1.3. Volframove elektrode i zaštitni plinovi	6
1.1.4. Električni luk.....	8
1.1.5. Robotizirano TIG zavarivanje.....	10
1.2. TIG zavarivanje uz pomoć aktivnog talila (A – TIG).....	12
1.2.1. Svojstva i sastav aktivnog talila.....	12
1.2.2. Princip rada A – TIG postupka zavarivanja.....	13
1.2.3. Mehanizmi utjecaja aktivnog talila	15
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA	18
3. MATERIJALI I METODE.....	19
3.1. Sustav za robotizirano A – TIG zavarivanje.....	20
3.2. Osnovni materijal i zaštitni plin	21
3.3. Priprema istraživanja.....	24
3.3.1. Promjenjivi parametri	24
3.3.2. Konstantni parametri.....	27
3.4. Plan pokusa i provedba navarivanja.....	27
3.5. Ispitivanje navara	31
3.5.1. Vizualna kontrola.....	31
3.5.2. Ispitivanje geometrijskih značajki navara.....	31
3.5.3. Određivanje kemijskog sastava metala navara pretražnom elektronskom mikroskopijom (SEM) uz energijski disperzivni spektrometar (EDS).....	32
3.6. Određivanje matematičkih modela promjena mjerenih vrijednosti.....	34
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	35
4.1. Rezultati vizualne kontrole	35
4.2. Geometrijske značajke poprečnog presjeka navara	38
4.3. Rezultati određivanja kemijskog sastava metala navara energijski disperzivnom spektrometrijom (EDS).....	42
4.4. Analiza matematičkih modela promjena mjerenih vrijednosti	44
5. ZAKLJUČCI	51
ZAHVALE	53
POPIS LITERATURE	54
SAŽETAK.....	57
ABSTRACT	58

ŽIVOTOPIS	59
-----------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [5].....	4
Slika 1.2	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [6]	5
Slika 1.3	Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad.....	6
Slika 1.4	Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [4].....	7
Slika 1.5	Smjer gibanja nosilaca naboja i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje [9]	8
Slika 1.6	Gibanje elektrona i iona kod električnog luka istosmjerne struje zavarivanja uz elektrodu na minus polu [10].....	9
Slika 1.7	Robotska stanica za TIG / MIG / MAG zavarivanja [11]	11
Slika 1.8	Shematski prikaz pripreme aktivnog talila, miješanja te nanošenja talila na ploču koja se zavaruje [16].....	14
Slika 1.9	Shema postupka A – TIG zavarivanja i FBTIG zavarivanja [17].....	14
Slika 1.10	Marangonijev efekt strujanja fluida [18].....	16
Slika 1.11	Mehanizam kontrakcije električnog luka [13].....	17
Slika 3.1	Dijagram tijeka svih provedenih ispitivanja.....	19
Slika 3.2	Robotska stanica OTC Almega AX-6 s instaliranom opremom za TIG navarivanje	20
Slika 3.3	Prikaz površinske pripreme osnovnog materijala, lijevo-neočišćeno, desno-očišćeno	22
Slika 3.4	Aktivacijski prahovi za pripravu premaza.....	26
Slika 3.5	Aktivacijske komponente korištene u ovom istraživanju.....	26
Slika 3.6	Koraci u planiranju pokusa.....	28
Slika 3.7	Prikaz točaka putanje vrha elektrode – navarivanje	29
Slika 3.8	Ispolirani makrozoruci nakon nagrizanja	32
Slika 3.9	Princip rada SEM-a [23].....	33
Slika 3.10	Tescan Vega TS5136 – pretražni elektronski mikroskop (SEM).....	34
Slika 4.1	Lice navara izvedenog u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % Ar / 5 % H (aktivacijski premaz s 100 % SiO ₂).....	37
Slika 4.2	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % SiO ₂ (1A).....	38
Slika 4.3	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % SiO ₂ + 50 % Cr ₂ O ₃ (2A).....	39
Slika 4.4	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % Cr ₂ O ₃ (3A).....	39
Slika 4.5	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % SiO ₂ + 50 % TiO ₂ (4A)	39
Slika 4.6	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % TiO ₂ (5A)	40
Slika 4.7	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % Cr ₂ O ₃ + 50 % TiO ₂ (6A)	40
Slika 4.8	Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 33 % SiO ₂ + 33 % Cr ₂ O ₃ + 33 % TiO ₂ (7A)	41
Slika 4.9	Dijagram promjene dubine navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza	41
Slika 4.10	Dijagram promjene širine navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza	42
Slika 4.11	Dijagram promjene masenih udjela kemijskih elemenata u metalu navara ispitivanih uzoraka.....	44

Slika 4.12	2D prikaz matematičkog modela dubine penetracije	45
Slika 4.13	3D prikaz matematičkog modela dubine penetracije	46
Slika 4.14	2D prikaz matematičkog modela udijela kroma u metalu navara	47
Slika 4.15	3D prikaz matematičkog modela udijela kroma u metalu navara	48
Slika 4.16	2D prikaz matematičkog modela udijela nikla u metalu navara	49
Slika 4.17	3D prikaz matematičkog modela udijela nikla u metalu navara	50

POPIS TABLICA

Tablica 1.1	Označavanje volframovih elektroda [8]	6
Tablica 3.1	Tehničke specifikacije izvora struje OTC DA300P	21
Tablica 3.2	Mehanička svojstva niskougličnog austenitnog čelika (ELC) [21].....	22
Tablica 3.3	Kemijski sastav osnovnog materijala iskazan u masenim udjelima.....	22
Tablica 3.4	Osnovni oblici polinoma za mješavine od tri sastojka i pripadajuće simpleks - rešetke. η - odzivna funkcija, β , γ - koeficijenti jednadžbe, x- udio pojedinačnog sastojka [22].....	25
Tablica 3.5	Točke pokusa s udjelima aktivacijskih komponenata	29
Tablica 3.6	Parametri robotiziranog TIG navarivanja ispitnih uzoraka	30
Tablica 4.1	Izgled navara svih ispitnih uzoraka u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar	36
Tablica 4.2	Rezultati EDS analize kemijskog sastava metala navara	43

1. UVOD

Zavarivanje je nezaobilazna tehnologija spajanja materijala u gotove proizvode koji su nužno potrebni čovjeku (transportna sredstva, kotlovi, brodovi, termoenergetska postrojenja i ostale konstrukcije). Pred tehnologa zavarivanja su postavljeni strogi zahtjevi pri projektiranju i izvedbi tehnologije zavarivanja. Prije svega to su zahtjevi kvalitete i pouzdanosti (sigurnosti) zavarenog spoja na konstrukciji, minimalnih troškova izrade, minimalanog utroška materijala i energije te minimalnog onečišćenja okoliša. Jedan od postupaka spajanja koji to omogućuju je TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja. TIG postupak je elektrolučni postupak zavarivanja gdje se toplinom generiranom u električnom luku tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal [1]. U stručnoj literaturi se često može naći i skraćenica GTAW koja u originalnom nazivu na engleskom znači *Gas Tungsten Arc Welding*. U njemačkoj stručnoj literaturi se često nailazi na skraćenicu WIG *Wolfram Inert Gas Schweißen*. 1941. godine V.H. Pavlecka i Russ Meredith su razvili prvi TIG pištolj za efikasno držanje volframove elektrode i dobavu zaštitnog plina na mjesto zavarivanja [2]. TIG postupak zavarivanja zbog značajnih prednosti se konstantno razvija i modificira kako bi se smanjili nedostaci postupka i povećala ekonomska isplativost uporabe postupka. U ovom radu je korišten robotizirani TIG postupak koji se sve češće koristi u industriji zbog visoke preciznosti i mogućnosti zavarivanja širokog spektra materijala.

Primjena TIG postupka zavarivanja je vrlo raširena u zavarivanju aluminija i Al – legura, magnezija i Mg – legura, bakra i Cu – legura, nehrđajućih čelika, titana i Ti – legura; praktično u zavarivanju gotovo svih metala. Ovaj postupak zavarivanja se također često primjenjuje u zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih čelika npr. kod izvođenja korijena zavara na cijevnim i sličnim spojevima. Zbog visoke cijene zaštitnih plinova He i Ar, TIG postupak se primjenjuje kada se navedeni metali teže zavaruju ostalim postupcima.

Zbog sve većih zahtjeva za produktivnošću započeto je s intezivnim istraživanjima na području A – TIG zavarivanja pri kojem se primjenjuju aktivacijski premazi. Međutim, veliki problem je određivanje optimalnog sastava ovog premaza. Ovaj rad predstavlja inicijalno istraživanje za razvoj optimalnog sastava aktivacijskog premaza u suradnji s tvrtkom Elektroda Zagreb d.d., jedinim proizvođačem dodatnog materijala za zavarivanje u Republici Hrvatskoj.

1.1. TIG postupak zavarivanja

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak pri kojem se električni luk uspostavlja i održava između netaljive elektrode izrađene od volframa ili volframovih legura i osnovnog materijala [1]. Mjesto zavarivanja tj. zagrijana zona, rastaljeni osnovni materijal te dodatni materijal se tijekom procesa štite od štetnog djelovanja okolne atmosfere na način da se neaktivni (inertni) plinovi upuhuju kroz keramičku sapnicu koaksijalno smještenu oko netaljive volframove elektrode. Inertni zaštitni plin je najčešće argon (Ar), helij (He) ili rijede mješavina argona i helija.

Osnovne prednosti TIG postupka zavarivanja su [3]:

- Koncentriranost električnog luka, smanjena zona utjecaja topline (ZUT),
- Nema prskanja, nema troske,
- Minimalna količina štetnih plinova,
- Zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,
- Mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala,
- Mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
- Mogućnost zavarivanja materijala malih debljina,
- Pogodno za izvođenje reparaturnih radova,
- Pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom,
- Odličan izgled zavarenog spoja.

Nedostaci TIG postupka zavarivanja su [3]:

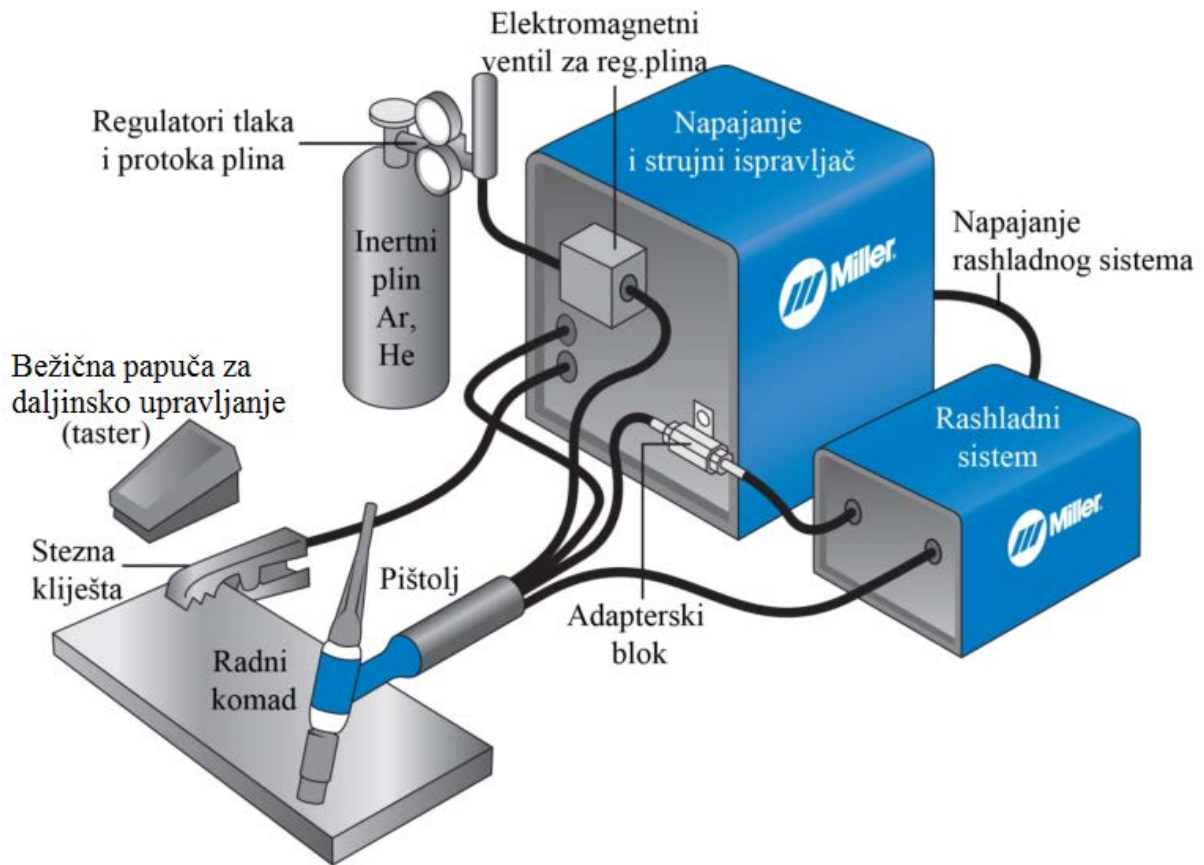
- Mala brzina zavarivanja i mali depozit dodatnog materijala,
- Neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm),
- Zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- Visoka cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- Zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duga i skupa izobrazba zavarivača,
- Otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima,
- Potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima.

TIG postupak zavarivanja je najčešće ručni postupak zavarivanja iako se u zadnje vrijeme teži ka poluautomatizaciji i potpunoj automatizaciji (robotizaciji) samog procesa. Kod ručnog postupka zavarivač pomiče pištolj i u prednji rub taline u pravilnim vremenskim razmacima dodaje dodatni materijal. Poluautomatizirani postupak je vrlo sličan ručnom postupku osim što se u ovom slučaju dodatni materijal dodaje iz dodavača žice uz pomoć elektromotora. Automatizirani TIG postupak se primjenjuje u serijskoj proizvodnji. Pištolj poluautomata se stavlja na robotsku ruku koja je numerički programirana i upravljiva pomoću adekvatnog CAD/CAM sučelja koje je instalirano na upravljačko računalo. Preko upravljačkog računala možemo nadzirati sami proces zavarivanja i mijenjati ključne parametre tijekom samog procesa (brzina dodavanja žice, jakost struje zavarivanja i sl.) [4].

Parametri zavarivanja kod TIG postupka su: vrsta električne struje, jakost struje zavarivanja, količina zaštitnog plina i brzina zavarivanja, vrsta i promjer volframove elektrode.

1.1.1. Osnovni dijelovi uređaja za TIG zavarivanje

Slika 1.1 prikazuje osnovne dijelove uređaja za TIG zavarivanje. Kontrolni ormarić u kojem se nalazi transformatorsko napajanje, strujni ispravljač, upravljačka elektronika i sistem za rashlađivanje pištolja su priključeni na električnu mrežu. Izvori struje za TIG zavarivanje mogu biti transformatori, ispravljači i inverteri. Izvori imaju konstantnu strujnu karakteristiku i mogu obavljati impulsno TIG zavarivanje [4]. Ovisno o materijalu koji se zavaruje, mora se pripaziti na koji pol (- / + / AC) je priključena elektroda. Drugi kraj se spaja na radni komad uz pomoć steznih kliješta kako bi se zatvorio strujni krug. Zaštitni inertni plin se nalazi u atestiranoj čeličnoj boci s regulatorom protoka na koji se nadovezuju mjerni instrumenti. Zaštitni plin (Ar, He) izlazi iz sapnice pištolja te tako štiti područje zavara i volframovu elektrodu od kontaminacije okolnim plinovima iz atmosfere. Moderni uređaji imaju integrirani sustav hlađenja pištolja pomoću tekućine za hlađenje. Svi uređaji su spojeni s pištoljem pomoću polikabla i preko njega se provodi kontrola procesa. Danas postoje i bežični prekidači koji olakšavaju rad.

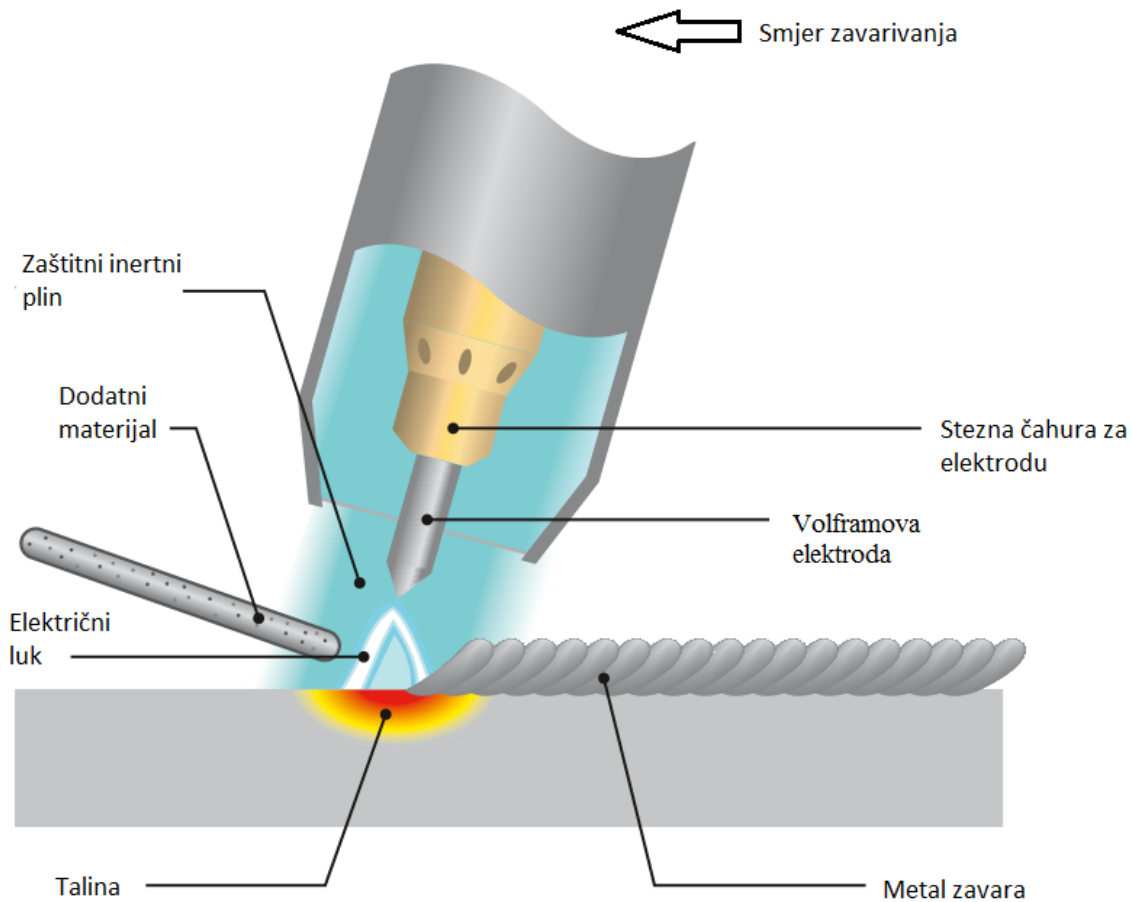


Slika 1.1 Dijelovi uređaja za TIG zavarivanje [5]

1.1.2. Princip rada TIG postupka zavarivanja

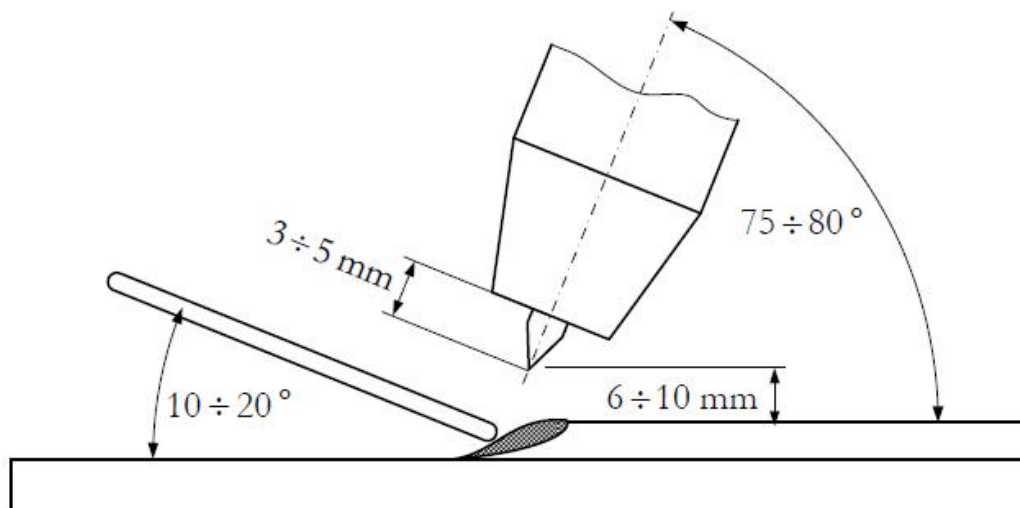
Energija potrebna za taljenje metala dovodi se pomoću električnog luka koji se održava između volframove elektrode i radnog komada pod zaštitom inertnog plina (slika 1.2). Električni luk se uspostavlja pritiskom na prekidač kada se pištolj nalazi na točno određenom razmaku od osnovnog materijala. Tada upravljačka elektronika šalje visokofrekventnu struju pomoću visokofrekventnog (VF) generatora koja u inertnoj struji plinova lako ionizira takvu atmosferu te omogućuje jednostavnu uspostavu električnog luka. Električni luk doseže temperaturu u rasponu 3000 – 10000 °C kojom tali osnovni materijal. Nehrđajući čelici se uvijek zavaruju s istosmjernom strujom (DC) s elektrodom na minus polu. U ovakvim uvjetima radni komad je na udaru elektrona, dok je elektroda, obično od volframa legiranog s torijevim oksidom (2 % ThO₂), otporna na trošenje. Dodatni materijal je obično u obliku šipke, za ručne, ili u obliku namotane žice, za automatizirane postupke. Inertni plin, koji štiti ZUT od atmosferskih utjecaja, omogućuje jako stabilan električni luk. Ovisno o osnovnom materijalu zaštitni plin je argon (Ar), helij (He), te njihove kombinacije s vodikom (H) i dušikom (N). Prestankom pritiska na prekidač pištolja prekida se električni luk, a zaštitni plin

ostaje istjecati iz sapnice još neko vrijeme štiteći tako vrh elektrode i talinu od naglog hlađenja [6,7].



Slika 1.2 Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [6]

Slika 1.3 prikazuje točno definirani, pravilan, položaj elektrode i dodatnog materijala. Kut pištolja za optimalno zavarivanje treba biti od 75° do 80° . Dodatni materijal se mora dodavati pod kutem od 10° do 20° . Ono što je specifično kod ovog postupka za razliku od ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja je to da se prijenos kapljice metala ne odvija kroz električni luk već se dodatni materijal (žica ili šipka) dodaje u prednji rub taline gdje se potom tali pod električnim lukom i spaja sa talinom zavara prvenstveno zbog mehanizma površinske napetosti. Vrh volframove elektrode istaknut je iznad keramičke sapnice 3 do 5 mm. Propisani razmak između vrha elektrode i radnog komada je 6 do 10 mm.



Slika 1.3 Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad

1.1.3. Volframove elektrode i zaštitni plinovi

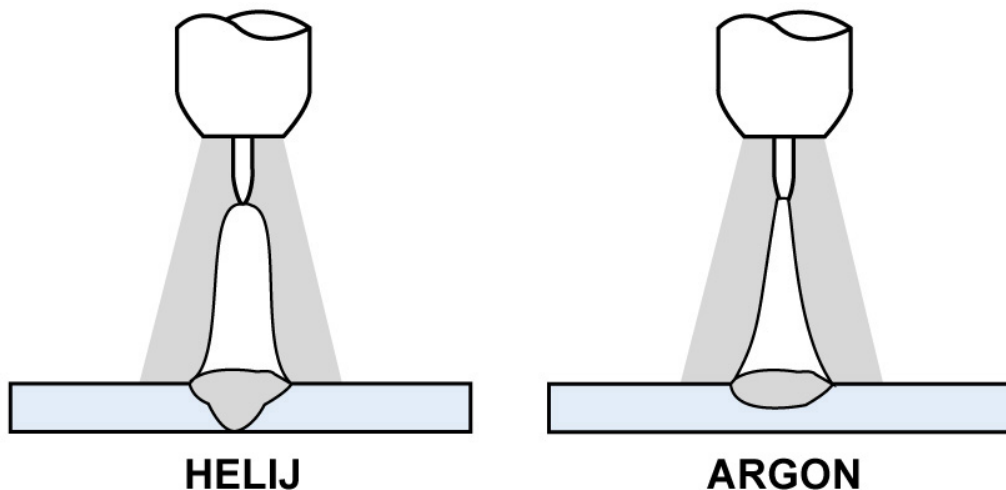
Volframova elektroda je provodnik električne struje s pištolja na radni komad. Ona je netaljiva, ali uslijed erozije vrha, te zbog njegovog prljanja u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Talište volframa je $T_t = 3410^\circ\text{C}$. Izrađuju se iz čistog volframa ili volframa s dodacima torijevog oksida (ThO_2), cirkonijevog oksida (ZrO_2), lantanovog oksida (La_2O_3) ili cerijevog oksida (CeO_2). Elektrode su klasificirane po legirnim elementima te se identificiraju pomoću boja (Tablica 1.1.).

Tablica 1.1 Označavanje volframovih elektroda [8]

Oznaka (ISO)	Boja	Dodatak oksida (%)	Legirni oksid	Legirni element
W	Zelena	---	---	---
WC 20	Siva	1,8 – 2,2	CeO_2	Cerij
WL 10	Crna	0,9 – 1,2	La_2O_3	Lantan
WZ 4	Smeđa	0,3 – 0,5	ZrO_2	Cirkonij
WT 10	Žuta	0,8 – 1,2	ThO_2	Torij
WT 40	Narančasta	3,8 – 4,2	ThO_2	Torij

Elektrode legirane s torijem mogu provoditi 20% jaču električnu struju nego čiste volfram elektrode. Lakše je paljenje luka i luk je stabilniji, a koristi se s izvorima istosmjerne struje (DC). Elektrode legirane s cerijevim oksidom (CeO_2) i s lantanovim oksidom (La_2O_3) su se pojavile '80-ih godina u SAD-u jer za razliku od torija nisu radioaktivne (α zračenje). Obje se koriste s izvorima izmjenične i istosmjerne struje. Elektrode legirane s cirkonijevim oksidom (ZrO_2) po svojstvima su između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom. Vrsta i promjer volframovih elektroda bira se prema debljini i prema vrsti metala koji se zavaruje.

Zadatak zaštitnog plina je da osigura ionizaciju između elektrode i radnog komada, te da štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Najčešće korišteni zaštitni plin je argon. Argon se koristi kod zavarivanja čelika, nehrđajućih čelika, aluminija i titana. Argon daje stabilni električni luk, ali manju dubinu protaljivanja od helija. Heliju je nedostatak visoka cijena i mala specifična masa kao i veći potencijal ionizacije. Slika 1.4 prikazuje razlike u obliku i učinku električnog luka kod helija i argona.



Slika 1.4 Oblik i učinak električnog luka kod helija (He) i argona (Ar) [4]

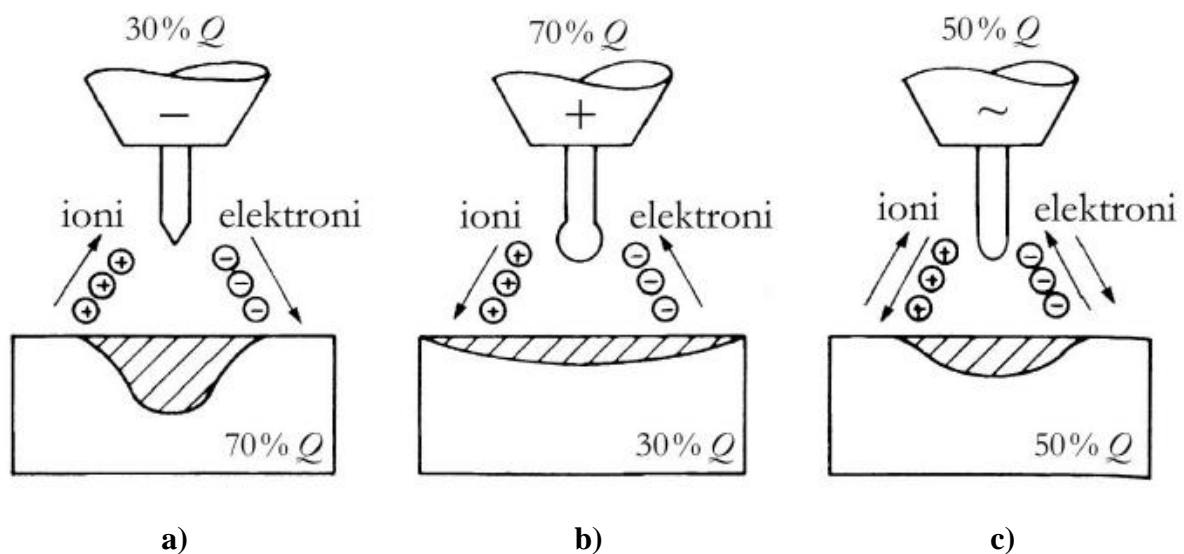
Određivanje protoka zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti metala koji se zavaruje, vrsti zaštitnog plina, položaju zavarivanja i obliku spoja. Protok plina treba biti optimalni jer premala količina plina ne može istjerati sav zrak s mjesta zavarivanja. Preveliki protok plina osim što je neekonomičan, štetan je jer uzrokuje vrtloženje plina što smanjuje zaštitu taline jer dolazi do uvlačenja zraka u takav (turbulentan) proces.

1.1.4. Električni luk

Električni luk kod TIG zavarivanja je intenzivno izbijanje u jako ioniziranoj smjesi plinova i para materijala koje potječu od dodatnog materijala, zaštitnih plinova i aktivnih talila (kod A – TIG postupka) [1]. Uspostavlja se između elektrode (volframove netaljive elektrode) i radnog komada. U njemu nema prijenosa kapljica metala te rasprskavanja ovih kapljica kao kod ostalih elektrolučnih postupaka pa je rezultat toga vrlo čist i kvalitetan zavar te smanjeno isparavanje i dimovi. Ionizirani prostor u kojem se odvija pražnjenje naboja može se smatrati kao jedan vodič čija je vodljivost ovisna okolišini nosilaca naboja.

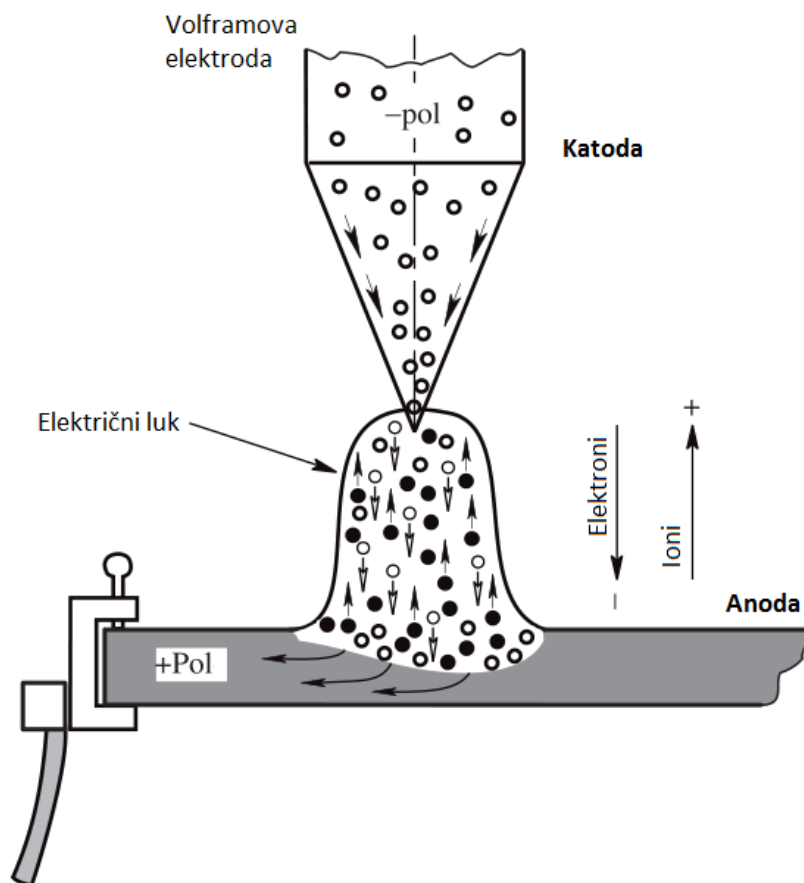
Uspostavljanje električnog luka kod TIG postupka zavarivanja se može ostvariti sa i bez dodira vrha elektrode s radnim komadom u električnom luku. U pravilu se koristi uspostavljanje električnog luka bez dodira vrha elektrode uz pomoć visokofrekventne električne struje. Izvor struje je dodatno opremljen visokonaponskim generatorom koji je paralelno spojen u strujni krug, a funkcija mu je da kod primaknutog vrha elektrode radnom komadu „prebaci“ električnu iskrinu i tako omogući početnu ionizaciju te uspostavljanje električnog luka [1].

Zavarivanje TIG postupkom se može izvesti istosmjernom električnom strujom kada je elektroda spojena na minus pol (DC – *Electrode Negative*), te kada je elektroda spojena na plus pol (DC – *Electrode Positive*) i izmjeničnom električnom strujom (AC). Slika 1.5 prikazuje sva tri slučaja te raspodjelu topline Q za dane uvjete polarizacije.



Slika 1.5 Smjer gibanja nosilaca naboja i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje [9]

a) **Električni luk istosmjerne struje zavarivanja uz elektrodu na minus polu** primjenjuje se za zavarivanje svih metala osim magnezija, aluminijskih i njihovih legura. U ovom slučaju elektroni se gibaju s negativne elektrode (katode) na pozitivni radni komad (anodu), a pozitivni ioni se gibaju prema negativnoj elektrodi (Slika 1.6). Između elektrona s većom kinetičkom energijom i iona dolazi do kolizije zbog koje dolazi do razvijanja toplinske energije. Isto tako se elektroni s velikom kinetičkom energijom zabijaju u radni komad te dolazi do generiranja toplinske energije, Q . Ioni koji udaraju u elektrodu zbog manje kinetičke energije proizvode manju toplinu. Na radnom komadu generira se 70 % ukupne topline dok na elektrodi 30 % ukupne topline [10]. Budući da se vrh elektrode manje zagrijava može biti zašiljen kako bi se dobio koncentrirani električni luk koji utječe na dublje protaljšivanje.



Slika 1.6 Gibanje elektrona i iona kod električnog luka istosmjerne struje zavarivanja uz elektrodu na minus polu [10]

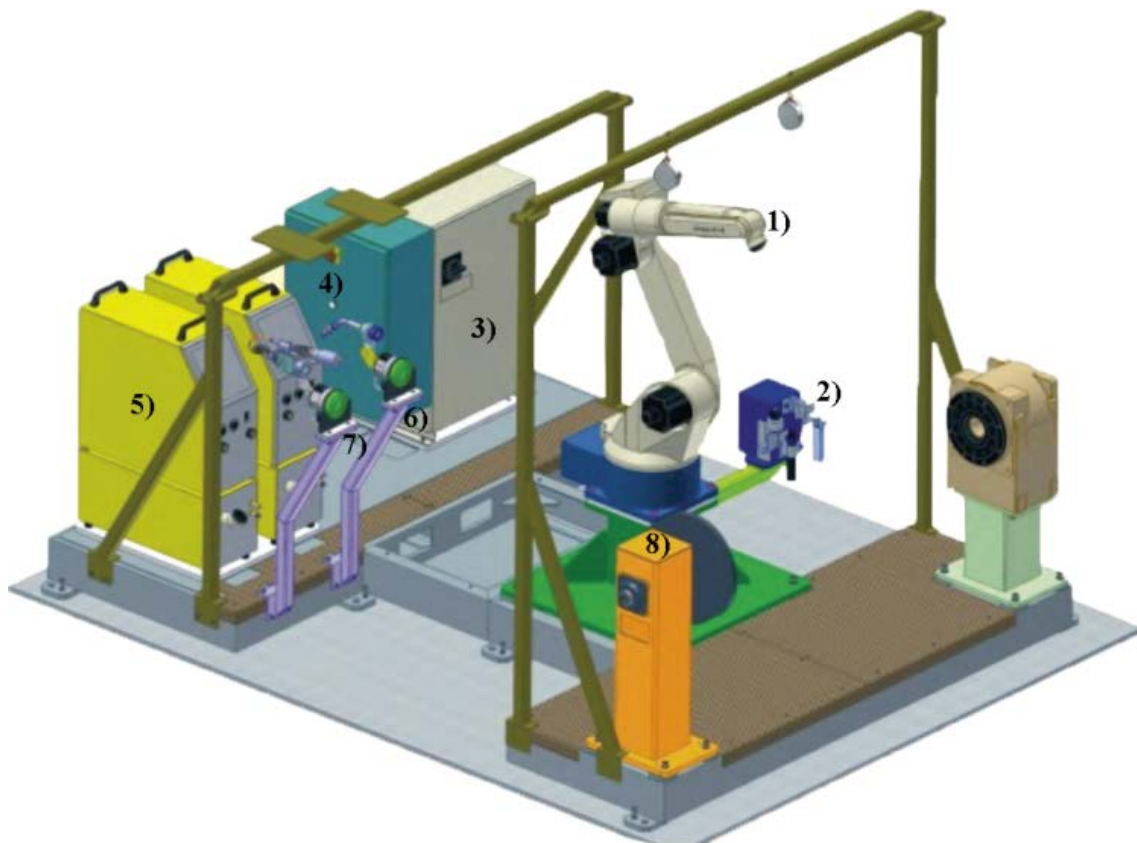
- b) Električni luk istosmjernje struje zavarivanja s elektrodom na plus polu** se koristi vrlo rijetko i u posebnim slučajevima kada je potrebno razaranje površinskih oksida na aluminiju i ostalim lakim metalima. Ovaj slučaj se ne upotrebljava jer je elektroda jako opterećena i električni luk je nestabilan.
- c) Električni luk izmjenične struje zavarivanja** se primjenjuje kod zavarivanja aluminija, magnezija i njihovih legura. Ovo je najbolji način za zavarivanje metala s oksidnim slojevima s većim talištem od samog metala zato što kod toka elektrona prema elektrodi dolazi do razaranja oksidnog površinskog sloja, a kod toka na radni komad stvaraju duboko protaljšivanje i tako se dobiva čisti zavareni spoj.

1.1.5. Robotizirano TIG zavarivanje

Visoki zahtjevi poput visoke kvalitete, preciznosti, produktivnosti, ekonomičnosti i sl. su razlozi za ubrzanom robotizacijom pojedinih tehnologija zavarivanja. Zbog navedenih nedostataka ručnog TIG postupka koji se žele izbjeći, robotizirani TIG postupak postaje pravilo u specijaliziranoj i visokoserijskoj proizvodnji. Zbog ovih razloga kao i zbog eliminacije ljudskog utjecaja eksperimentalni rad će se izvoditi pomoću robotiziranog TIG postupka. Slika 1.7 prikazuje osnovne dijelove robotske stanice OTC Almega AX V6 za TIG / MIG / MAG zavarivanja u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Sastavni dijelovi robotske stanice su:

1. Robotska ruka OTC Almega,
2. Automatska kalibracija i čišćenje pištolja,
3. Robotsko upravljanje OTC AX – 21,
4. Sigurnosne i upravljačke komponente,
5. TIG i MIG/MAG izvori struje,
6. MIG/MAG pištolj,
7. TIG pištolj,
8. Pozicioner Varstroj P250K ROBO.



Slika 1.7 Robotska stanica za TIG / MIG / MAG zavarivanja [11]

Upravljanje robotom se vrši preko integriranog PLC (eng. *Programmable Logic Controller*) kontrolera koji prepoznaje samo interne naredbe unutar sustava tj. naredbe dobivene s privjeska za učenje ili naredbe dobivene putem offline programiranja. Uz pomoć privjeska za učenje mogu se lako nadzirati stvarni – realni parametri zavarivanja poput struje i napona, brzine dodavanja žice, broj koraka programa, itd. Isto tako je moguće u realnom vremenu otkloniti nastale greške jednostavnom promjenom jedne ili više naredbi.

TIG roboti su manjih dimenzija od ostalih robota zato što im je maksimalna nosivost oko 20 kg. Najčešće imaju izveden pogonski sistem s AC servo motorima, ponovljivost im iznosi manje od $\pm 0,08$ mm, imaju najmanje 6 osi, a unutar robota integriran je apsolutni koder položaja koji olakšava pozicioniranje robota u prostoru. Radno područje koje robot obuhvaća, ovisno o namjeni robota, iznosi od 2 - 9 m² x 340°, a pozicija montaže može biti stojeća, viseća ili bočna [11].

1.2. TIG zavarivanje uz pomoć aktivnog talila (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 jako smanjuje proizvodnost postupka. Pokušaji da se poveća produktivnost pomoću povećanja jakosti struje zavarivanja i smanjivanja brzine zavarivanja su se pokazali neuspjelim. Zbog tih razloga su se tražili alternativni načini poboljšavanja produktivnosti TIG postupka.

1960-ih godina Paton Welding Institute u Ukrajini je počeo razvijati TIG zavarivanje uz pomoć aktivnog talila tj. A – TIG postupak zavarivanja [12]. A – TIG postupak zavarivanja je postupak u kojem se tanki sloj premaza aktivnog talila nanese na osnovni materijal i to samo na područje koje će se naknadno zavarivati [13]. U literaturi se može naći i skraćenica FCGTAW za originalni naziv *Flux Coated Gas Tungsten Arc Welding*. Iako su provedena ispitivanja utjecaja aktivnog talila i dobili pozitivni rezultati, primjena A – TIG postupka je rijetka praksa u industriji zapadnoeuropskih zemalja dok je u Hrvatskoj gotovo nema. Neki od razloga rijetke primjene modificiranoga A – TIG postupka su nedostatak informacija o sastavu aktivnog talila, nedostatak informacija o njegovom utjecaju na formiranje zavara, mogućnost loše kvalitete zavara i utjecaj debljine premaza aktivnog talila na stabilnost električnog luka [14].

Prednosti A – TIG postupka zavarivanja s aktivnim talilom prema istraživanjima i teorijskim informacijama su mogućnost zavarivanja bez pripreme spoja (rubovi se ne trebaju čistiti) i veća penetracija što omogućuje manji broj prolaza (na taj način se povećava produktivnost). Zbog ovih prednosti tvrtka Elektroda Zagreb d.d. u suradnji s Fakultetom strojarstva i brodogradnje u Zagrebu počela je istraživati utjecaj i sastav aktivnog talila kod A – TIG postupka zavarivanja s ciljem stvaranja novog proizvoda.

1.2.1. Svojstva i sastav aktivnog talila

Postoji jako malo informacija o svojstvima i sastavu talila u dostupnoj stručnoj literaturi. Aktivno talilo se sastoji 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 primjeniti. Kako bi talilo utjecalo na povećanje gustoće energije u električnom

luku te samim time na povećanje penetracije, talila moraju sadržavati velike elektrone poput oksida, halida i fluorida [14].

Komponente koje mogu činiti sastav aktivnog talila za A – TIG zavarivanje nehrđajućih čelika su [15]:

- Titanijev(IV) oksid (TiO_2),
- Silicijev(IV) oksid (SiO_2),
- Kromov(III) oksid (Cr_2O_3),
- Niklov(II) oksid (NiO),
- Bakrov(II) oksid (CuO).

Prema teorijskim osnovama jedan od zahtjeva za efektivnost aktivnog talila je da talište talila bude približno slično talištu osnovnog materijala. Isto tako talilo ne smije tvoriti stabilne čvrste faze s talinom zavara koje bi štetile kozmetici zavara i svojstvima zavarenog spoja [14].

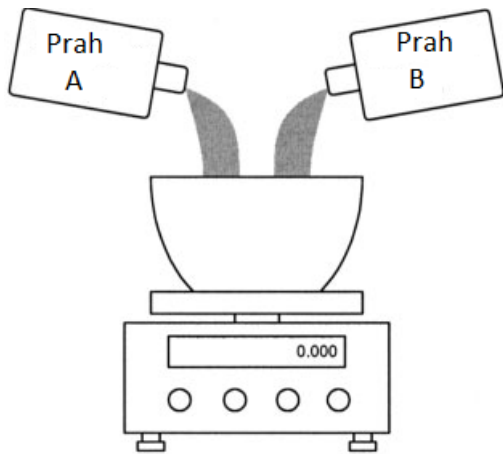
1.2.2. Princip rada A – TIG postupka zavarivanja

Slika 1.8 prikazuje shematski postupak određivanja sastava aktivnog talila, miješanja te nanošenja talila na ploču koja se zavaruje.

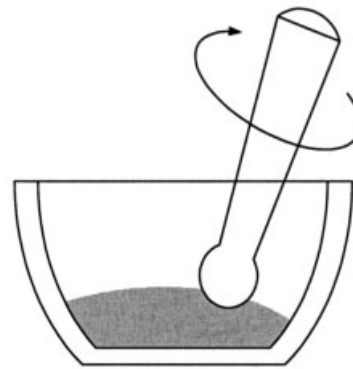
Postupak se sastoji od:

- 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 talila pomoću kista tj. manualno ili automatski. 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.

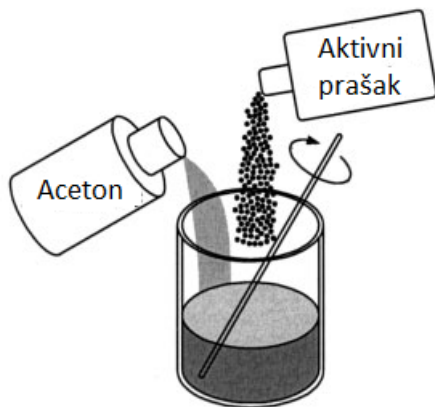
Nakon navedenog postupka TIG pištoljem se prolazi preko premazane površine. Slika 1.9 prikazuje shemu zavarivanja kod A – TIG postupka i kod FBTIG postupka. FBTIG je skraćunica za inačicu A – TIG postupka zavarivanja čiji je originalni naziv Flux – Bonded TIG. Razlika između ova dva postupka je jedino u području u kojem se nanosi premaz. Dok se kod A – TIG postupka premaz nanosi preko cijele površine koja se zavaruje, kod FBTIG postupka se ostavlja određena praznina po kojoj se vrši zavarivanje. FBTIG je postupak koji ima određene prednosti u odnosu na A – TIG kod ručnog izvođenja zbog manje ovisnosti stabilnosti procesa o debljini premaza [14, 17].



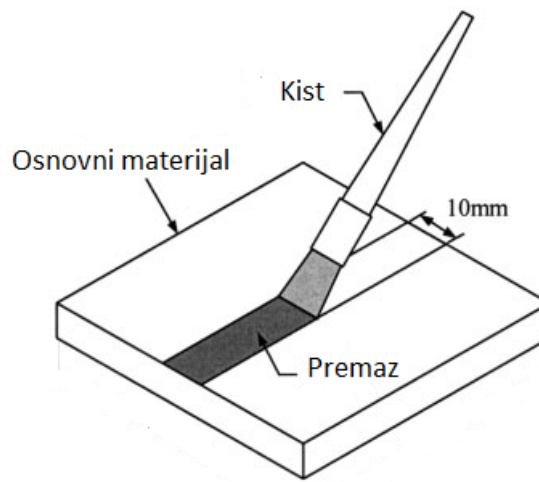
(a) Vaganje praškastih komponenti



(b) Drobljenje praškastih komponenti

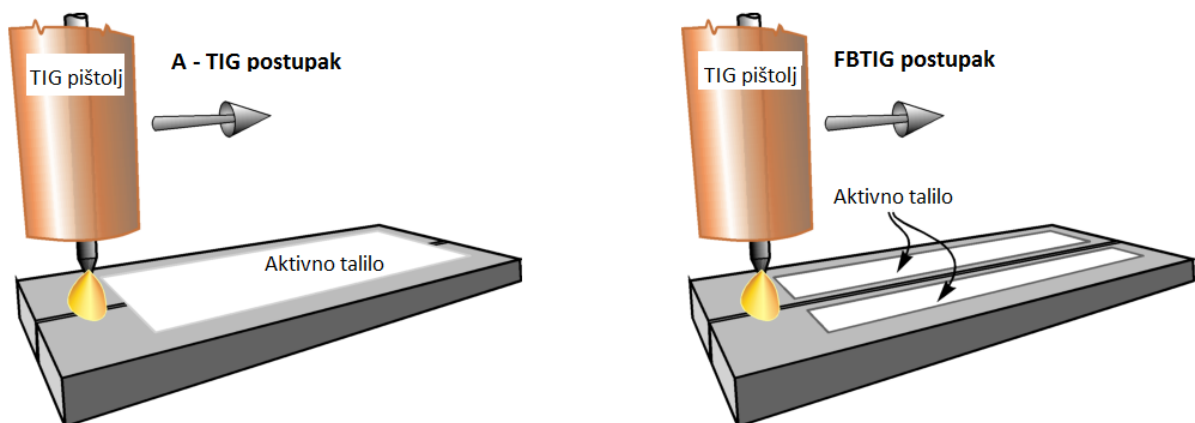


(c) Miješanje



(d) Nanošenje premaza

Slika 1.8 Shematski prikaz pripreve aktivnog talila, miješanja te nanošenja talila na ploču koja se zavaruje [16]



Slika 1.9 Shema postupka A – TIG zavarivanja i FBTIG zavarivanja [17]

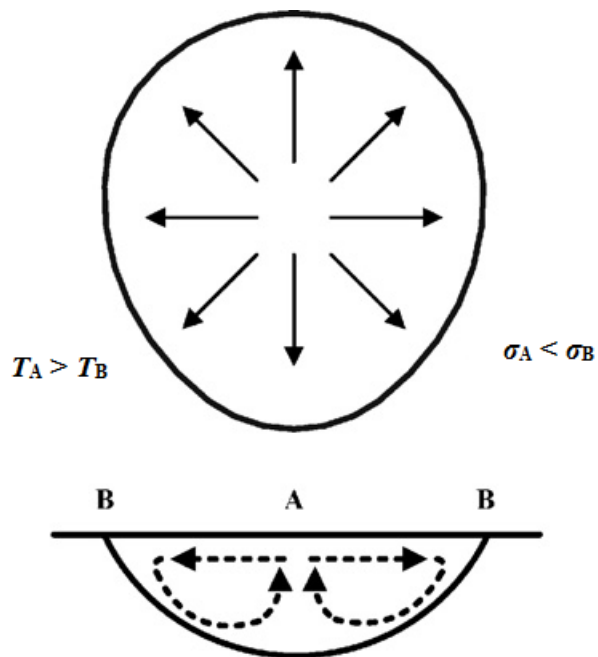
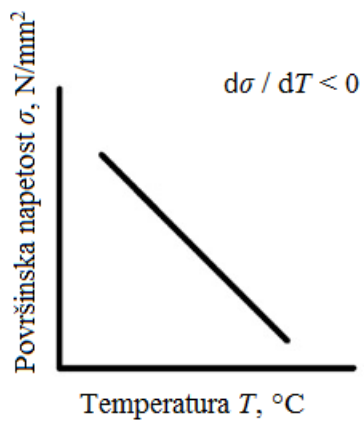
1.2.3. Mehanizmi utjecaja aktivnog talila

U literaturi nije potpuno objašnjeno kako aktivno talilo utječe na oblik taline zavara. Mnogi istraživači su se složili da postoje dva glavna mehanizma utjecaja aktivnog talila. Prvi mehanizam su objasnili pomoću Marangonijevog efekta strujanja fluida dok se drugim mehanizmom smatra povećanje energije električnog luka zbog kontrakcije tj. suženja električnog luka [18-20].

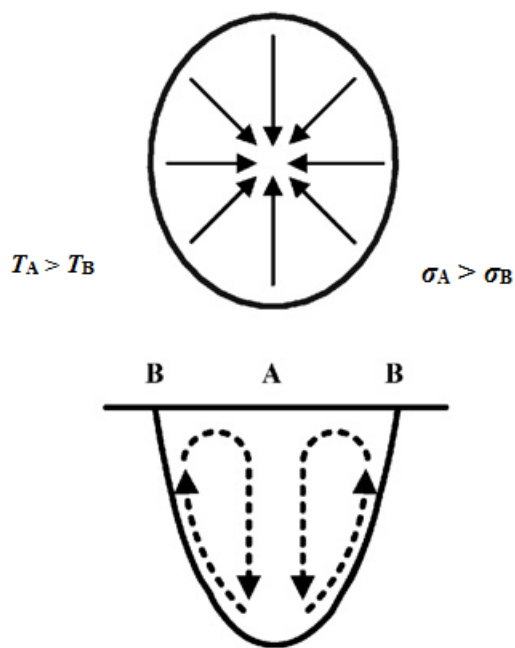
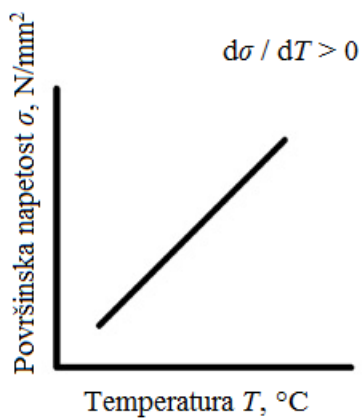
Marangonijev efekt strujanja fluida je iskorišten za objašnjavanje različitih profila taline kod TIG i A – TIG postupaka zavarivanja. Marangonijev efekt se odnosi na Toplinski Koeficijent Površinske Napetosti – TKPN taline.

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 1.10a). U takvim uvjetima, tok taline se lakše odvija od centra taline zavara prema rubovima tvoreći široki i plitki profil zavara [18].

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 1.10b). Zbog toga će profil zavara imati znatno veću penetraciju i suženi oblik [12,18].



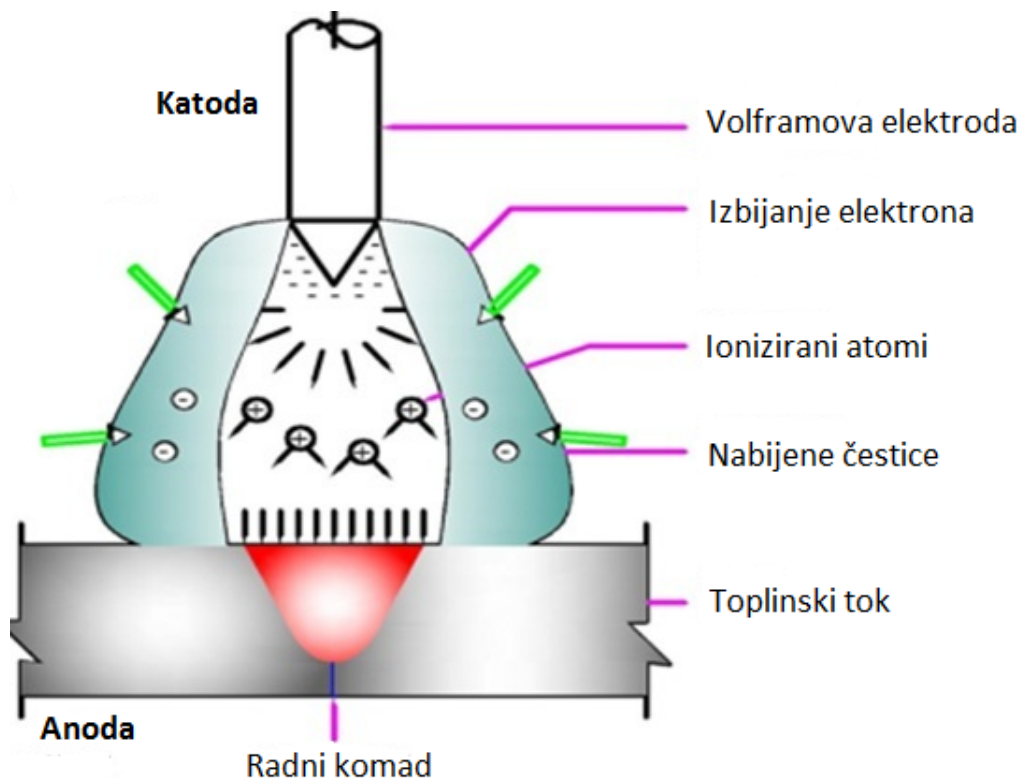
a) Centrifugalni Marangonijev efekt



b) Centripetalni Marangonijev efekt

Slika 1.10 Marangonijev efekt strujanja fluida [18]

Kontraktcija električnog luka (Slika 1.11) je izravna posljedica ionizacije i disocijacije komponenti aktivnog talila [20]. Zbog suženja električnog luka povećava se gustoća toplinske energije u središtu taline zavara zbog većeg broja elektrona koji većim brzinama udaraju u talinu zavara generirajući toplinsku energiju. Druga posljedica kontrakcije je povećanje temperature električnog luka. Korištenje aktivnog talila s fluoridima, kloridima i oksidima pospješuje mehanizam kontrakcije električnog luka. Disocirani fluoridi imaju afinitet prema elektronima. Prisustvo oksida uzrokuje kontrakciju plazmenog stupa i povećanje temperature luka. Kontraktcija električnog luka ovisi o efektu apsorpcije elektrona koja se odvija tako da se elektroni vežu uz isparavajuće molekule i disocirane atome tvoreći 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. Kao posljedica ostvarena je veća penetracija. [19]



Slika 1.11 **Mehanizam kontrakcije električnog luka** [13]

2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Cilj ovog istraživanja je razjasniti poboljšanje učinkovitosti i produktivnosti TIG postupka zavarivanja korištenjem aktivacijskih premaza. U tu svrhu potrebno je izvesti navarivanje robotiziranim A – TIG postupkom te utvrditi utjecaj različitih sastava aktivacijskog premaza na austenitni čelik AISI 304. Određene su tri komponente aktivacijskog premaza koje se koriste za izradu obloga elektroda:

- SiO_2 – Silicijev(IV) oksid-Kvarc A04,
- Cr_2O_3 – Kromov(III) oksid - A16,
- TiO_2 – Titanijev(IV) oksid-Rutil A01.

Optimalni udjeli komponenti aktivacijskog premaza određivat će se pokusom s mješavinama pomoću modela simpleks – rešetke. Analizom dobivenih podataka, parametara i rezultata uzoraka potrebno je odrediti utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara i tehnološku primjenjivost premaza pri robotiziranom zavarivanju u industrijskoj proizvodnji.

Specifični ciljevi rada su određivanje utjecaja sastava aktivacijskog premaza na navareni spoj:

- vizualnom kontrolom navara,
- analiziranjem geometrijskih značajki navara,
- određivanjem kemijskog sastava metala navara energijski disperzivnom spektrometrijom (EDS).

Među ostalim ciljevima ovog istraživanja može se navesti kvantitativno opisivanje utjecaja sastava mješavine na geometriju (dubinu) navara i kemijski sastav metala navara matematičkim modelom.

3. MATERIJALI I METODE

Ispitivanja u ovom radu su provedena u Laboratoriju za zavarivanje i Laboratoriju za zaštitu materijala, Zavoda za zavarene konstrukcije te Laboratoriju za tribologiju, Zavoda za materijale pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

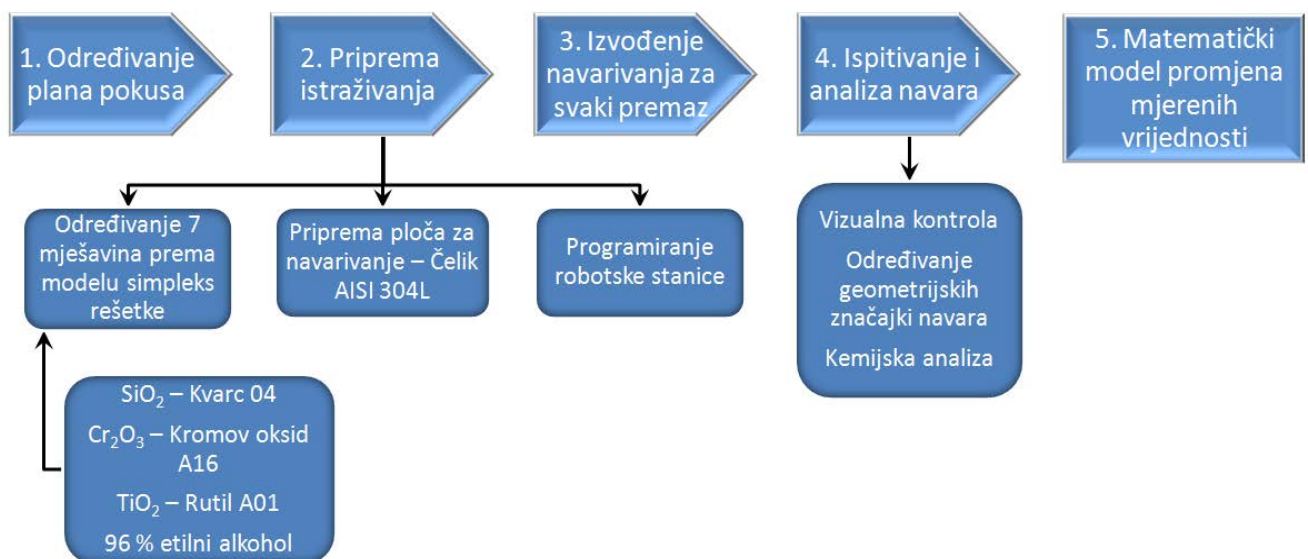
U svrhu eksperimentalnog rada je određen model izvođenja pokusa. Kod planiranja pokusa potrebno je pretpostaviti da sastav aktivacijskog premaza ima utjecaj na promatrana svojstva navara. Očekuje se da će se promjenom sastava mijenjati i promatrana svojstva navara.

Pripremljene su mješavine aktivacijskih premaza te je nakon precizne pripreme izvedeno navarivanje robotiziranim A – TIG postupkom za svaku pojedinu smjesu aktivacijskog premaza.

Nakon strojne pripreme uzoraka izvedena su ispitivanja i analize:

- Vizualna kontrola;
- Analiza geometrijskih značajki;
- Kemijska analiza na energijski disperzivnom spektrometru (EDS)

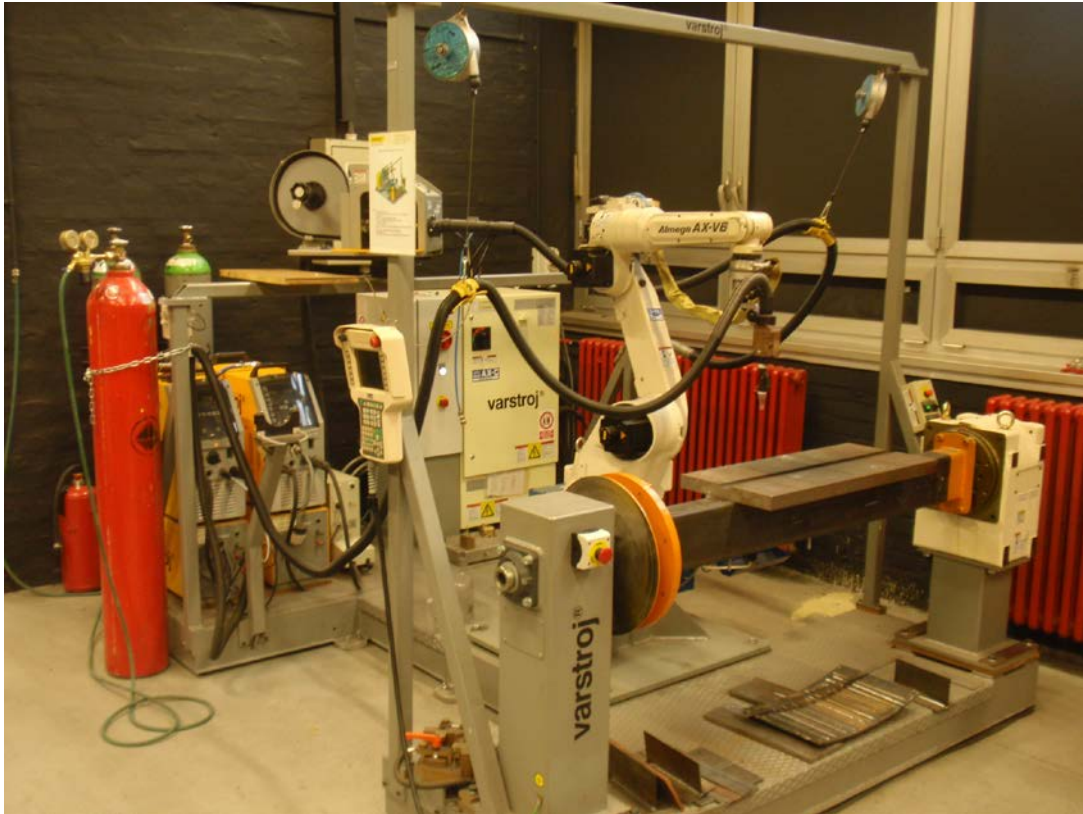
Nakon analize geometrijskih značajki i kemijskog sastava izveden je matematički model pomoću programskog paketa Design Expert i grafički prikaz utjecaja sastava mješavine aktivacijskog premaza na promatrana svojstva. Na slici 3.1 prikazan je dijagram toka svih provedenih ispitivanja i analiza u okviru ovog rada.



Slika 3.1 Dijagram tijeka svih provedenih ispitivanja

3.1. Sustav za robotizirano A – TIG zavarivanje

Robotska stanica i sva dodatna oprema uključujući izvor struje za TIG zavarivanje, pištolj i upravljačko sučelje koji su korišteni u ovom eksperimentalnom radu su prikazani na slici 3.2. Korištena je robotska stanica OTC Almega AX-6 koja je opisana u poglavlju 1.1.5. – Robotizirano TIG zavarivanje.



**Slika 3.2 Robotska stanica OTC Almega AX-6 s instaliranom opremom za TIG
navarivanje**

Izvor struje korišten pri izvođenju pokusa je OTC DA300P. Tehničke specifikacije izvora struje su prikazane u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Tehničke specifikacije izvora struje OTC DA300P

Tip izvora struje	DA 300P
Priključni napon	3 x 400 V
Maksimalna snaga	11,9 kVA
Struja zavarivanja	max 300 A
Intermitencija	40 %
Napon praznog hoda	58 V
Frekvencija	50 – 200 Hz
Dimenzije	640 x 250 x 544 mm
Težina	44 kg

3.2. Osnovni materijal i zaštitni plin

Kao osnovni materijal korišten je nehrđajući čelik. Utvrđen kemijski sastav je prikazan u tablici 3.3. Prema utvrđenom sastavu čelik pripada vrsti X5CrNi18-10 (AISI 304). Radi se o austenitnom čeliku dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti zbog malog udjela ugljika. Čelik kvalitete AISI 304 je izabran zbog svoje široke primjene u prehrambenoj industriji (pivovare, vinarije, mljekare), naftnoj industriji i arhitekturi. U tablici 3.2 su prikazana mehanička svojstva čelika.

Neka svojstva austenitnih čelika su [21]:

- Nemagnetičnost;
- Dobra oblikovljivost u hladnom stanju (visoka A_5 , Z i KU a mala R_e i R_m), a hladnom deformacijom se mogu očvrstnuti;
- Uz dodatno legiranje Mo, W i V pokazuju dobru otpornost na puzanje pri temperaturama > 600 °C;
- Zbog dobre žilavosti pri sniženim temperaturama primjenjuju se u kriogenoj tehnici;
- Otpornost na organske i anorganske kiseline, lužine i soli;
- Osjetljivost na plinove koji sadrže sumpor za razliku od feritnih čelika.

Tablica 3.2 Mehanička svojstva niskougličnog austenitnog čelika (ELC) [21]

Oznaka čelika		Mehanička svojstva				
EN	AISI	R_m , min	$R_{p0,2}$, min	A_5 , min	Z, min	KU, min
		N/mm ²	N/mm ²	%	%	J
X2CrNi18-9	304 L	450...700	175	50	60	85

Tablica 3.3 Kemijski sastav osnovnog materijala iskazan u masenim udjelima

Kemijski element	C	Cu	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	V	Fe
w, %	0,08	0,34	18	7,81	1,32	0,262	0,32	0,19	ostatak

Debljina ploča iznosila je 5 mm, a ploče su izrezane iz iste šarže kako bi se isključio utjecaj promijenjenog kemijskog sastava kod usporedbe rezultata. Austenitne ploče su izrezane na zračnoj plazma rezačici, uz primjenu hafnijeve elektrode. Nakon rezanja dimenzije ploča su iznosile 5 x 300 x 500 mm. Površina osnovnog materijala za navarivanje u eksperimentalnom radu očišćena je od površinskih oksida brusnim papirima (od grubljeg prema finijem gradijentu). Slika 3.3 prikazuje izgled površine prije (lijevi dio slike) i poslije (desni dio slike) čišćenja.

**Slika 3.3 Prikaz površinske pripreme osnovnog materijala, lijevo-neočišćeno, desno-očišćeno**

Austenitni čelici prilikom navarivanja u zoni utjecaja topline stvaraju okside koji kasnije mogu uzrokovati neke oblike korozije. Zbog toga je potrebno osigurati odgovarajući protok inertnog plina, koji će štititi navar tijekom navarivanja od utjecaja vanjske atmosfere. U eksperimentalnom radu kao zaštitni plin se koristio čisti argon (Ar), a preliminarno je provedeno navarivanje u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % argona i 5 % vodika kako bi se još više povećao intenzitet električnog luka i time penetracija. Uzorci u ovisnosti o zaštitnoj atmosferi su označeni s: **A** – 100 % Ar; **B** – 95 % Ar / 5 % H.

3.3. Priprema istraživanja





3.3.1. Promjenjivi parametri

Osnovni problem ovog istraživanja je sastav aktivacijskog premaza za izvođenje A – TIG postupka zavarivanja. U ovom radu kao aktivacijski premazi korištene su visokokoncentrirane suspenzije praškastih komponenti u etilnom alkoholu. Kod planiranja pokusa pretpostavilo se da promatrani utjecaj aktivacijskog premaza na određeno svojstvo (npr. penetraciju), ovisi o sastavu aktivacijskog premaza, točnije o udjelima pojedinih komponenti u premazu. Određivanjem funkcionalne ovisnosti mjenog svojstva o promjenljivim varijablama (udjeli sastojaka u aktivacijskom premazu) nastoji se pronaći takvu kombinaciju udjela sastojaka pri kojoj će se postići najpovoljnija, maksimalna ili minimalna, vrijednost promatranog svojstva.

Model pokusa je simpleks-rešetka. Pod pojmom simpleks-rešetke se smatra pravilan geometrijski oblik (kvadrat, trokut, točka, duljina i sl.) po kojem su ravnomjerno raspoređene točke pokusa. U slučaju "čiste mješavine" postoji samo jedan sastojak i simpleks je točka. Čine li mješavinu dva sastojka, simpleks je jednodimenzijski, a predstavlja ga duljina. Simpleks mješavine s tri sastojka dvodimenzijski je i predstavljen je trokutom, itd.

Cilj provođenja pokusa s mješavinama je dobivanje matematičkog modela i grafičkog prikaza utjecaja sastava mješavine na promatrano svojstvo. Izvođenjem pokusa u svim stanjima, odnosno svim mogućim kombinacijama udjela sastojaka određene mješavine, dobiva se kontinuirana ploha koja spaja visine izmjerenih svojstava u svim točkama unutar modela simpleks-rešetke i naziva se odzivnom plohom. Odzivna funkcija je funkcija koja opisuje odzivnu plohu. Svakoj funkciji moguće je pridružiti odgovarajući polinom i odrediti koeficijente jednadžbe [22]. U tablici 3.4 prikazani su osnovni oblici polinoma, za mješavine od tri sastojka koje se koriste u ovom radu.

Tablica 3.4 Osnovni oblici polinoma za mješavine od tri sastojka i pripadajuće simpleks - rešetke. η - odzivna funkcija, β , γ - koeficijenti jednadžbe, x - udio pojedinačnog sastojka [22]

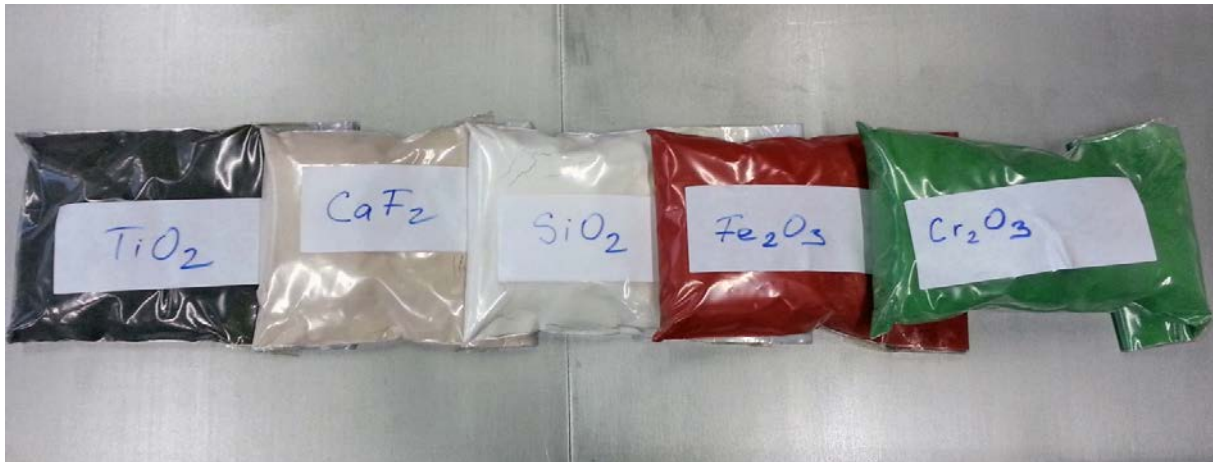
Naziv polinoma	polinom	Simpleks rešetka
linearni	$\eta = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \quad (4.1)$	
kvadratni	$\eta = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 \quad (4.2)$	
posebni kubni	$\eta = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \gamma_{12}x_1x_2(x_1 - x_2) + \gamma_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + \gamma_{23}x_2x_3(x_2 - x_3) + \beta_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.3)$	
puni kubni	$\eta = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.4)$	

Sastav aktivacijskog premaza

U svrhu istraživanja Elektroda Zagreb d.d. donirala je pojedine komponente u obliku sitnog praška koje primjenjuju u izradi obloženih elektroda.

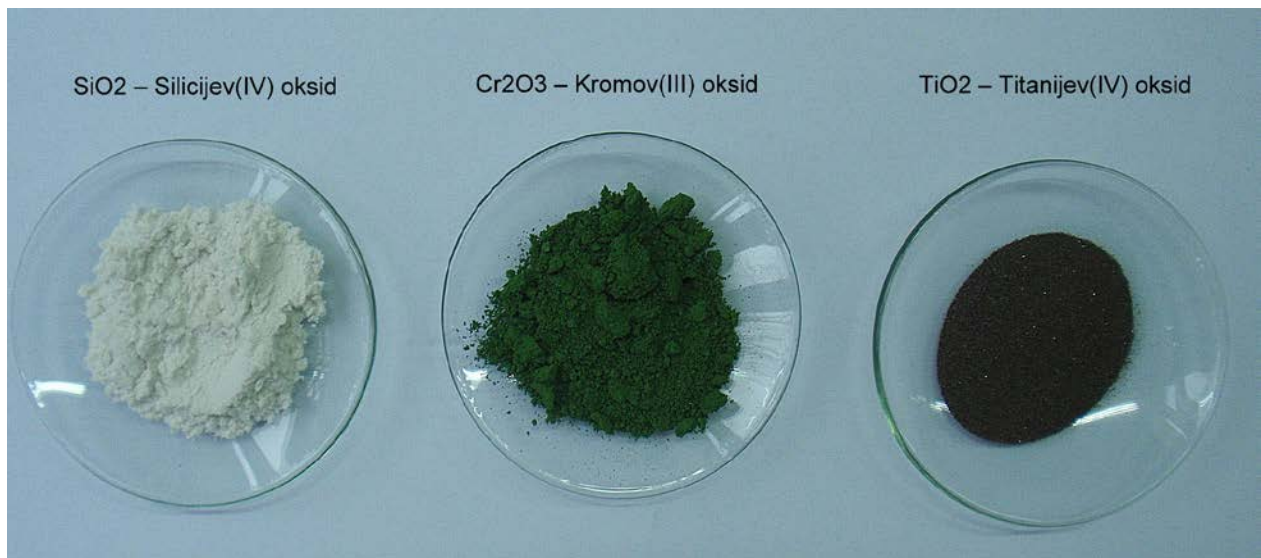
Na slici 3.4 prikazani su aktivacijski prahovi:

- SiO_2 – Silicijev(IV) oksid - Kvarc, tvornička oznaka: 04;
- Fe_2O_3 – Željezov(III) oksid, tvornička oznaka: A20;
- Cr_2O_3 – Kromov(III) oksid, tvornička oznaka: A16;
- TiO_2 – Titanijev(IV) oksid- Rutil, tvornička oznaka: A01;
- CaF_2 – Kalcijev(II) fluorid - Flušat, tvornička oznaka: B03.



Slika 3.4 Aktivacijski prahovi za pripravu premaza

Za istraživanje su odabrane tri komponente: SiO_2 , Cr_2O_3 i TiO_2 . Aktivacijski prahovi CaF_2 i Fe_2O_3 nisu korišteni zbog nestabilnosti procesa pri preliminarnom ispitivanju. Na slici 3.5 prikazane su izabrane aktivacijske komponente. Nakon određivanja udjela pojedinih praškastih aktivacijskih komponenti prema planu pokusa potrebno je prirediti aktivacijsku pastu tj. premaz. Aktivacijska pasta je pripremljena u obliku visoko koncentrirane suspenzije praškastih komponenata u etilnom alkoholu. Omjer čvrste faze (praškastih komponenti) i tekuće (etilni alkohol) u svim premazima je 1:2. Dakle, 20 g pojedine praškaste mješavine dodano je u 40 ml 96 %-tnog etilnog alkohola u čistu plastičnu bočica.



Slika 3.5 Aktivacijske komponente korištene u ovom istraživanju

Vrijednosti napona zavarivanja su varirale ovisno o korištenom aktivacijskom premazu.

3.3.2. Konstantni parametri

Protok plina: 9 l/min

Brzina navarivanja: $v_z = 10$ cm/min

Jakost struje: $I = 100$ A

Zaštitni plin: 100 % argon; za preliminarno ispitivanje je korištena i mješavina 95 % argon / 5 % vodik

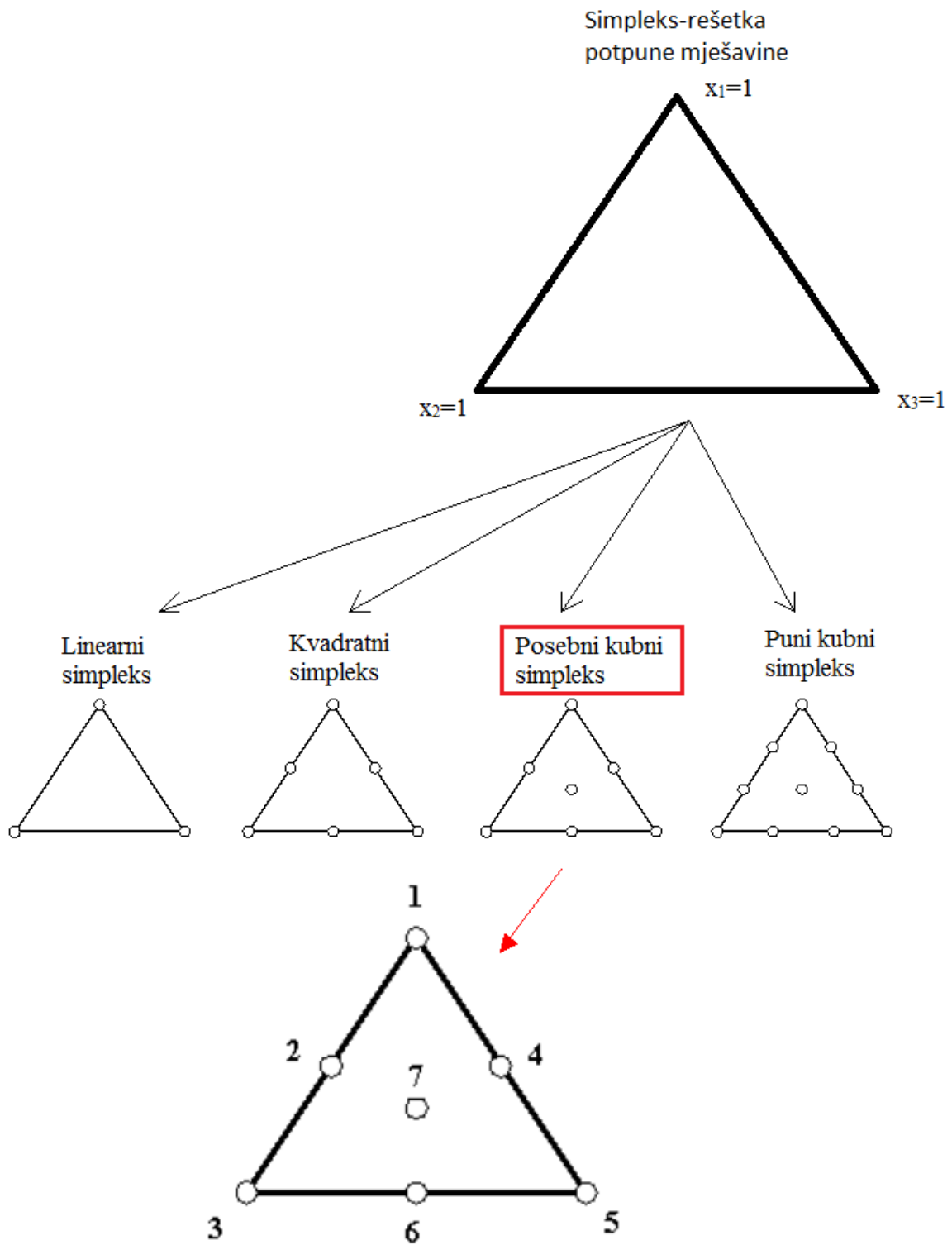
Izbor volframove elektrode

Austenitni čelici se zavaruju istosmjernom strujom s elektrodom na (–) polu, s jačinom struje u rasponu od 70 – 250 A ovisno o debljini materijala i promjeru elektrode. Za potrebe eksperimentalnog rada korištena je volframova elektroda legirana s torijevim oksidima. Otporne su na veće struje, imaju stabilan luk kod DC struje i dugog su vijeka trajanja. Dodatni materijal se nije koristio a promjer elektrode je iznosio $d = 1,6$ mm. Izvučeni dio vrha elektrode iznosio je 4 mm, a udaljenost između vrha elektrode i radnog komada iznosila je 7 mm.

3.4. Plan pokusa i provedba navarivanja

Postoje različiti modeli pokusa prikladni za istraživanje zavarivačkih procesa. Primjena prikladnog plana pokusa je od presudne važnosti za dobivanje racionalnih odzivnih funkcija.

Promjenjiva varijabla u ovom istraživanju je vrsta odnosno sastav aktivacijskog premaza za izvođenje A – TIG postupka zavarivanja. Odabrano je 7 mješavina na temelju simpleks rešetke $\{3, m_s\}$ za tri komponente aktivacijskog premaza. Slika 3.6 prikazuje redosljed koraka kod planiranja pokusa, odabir i smještaj točaka pokusa na simpleks-rešetki.



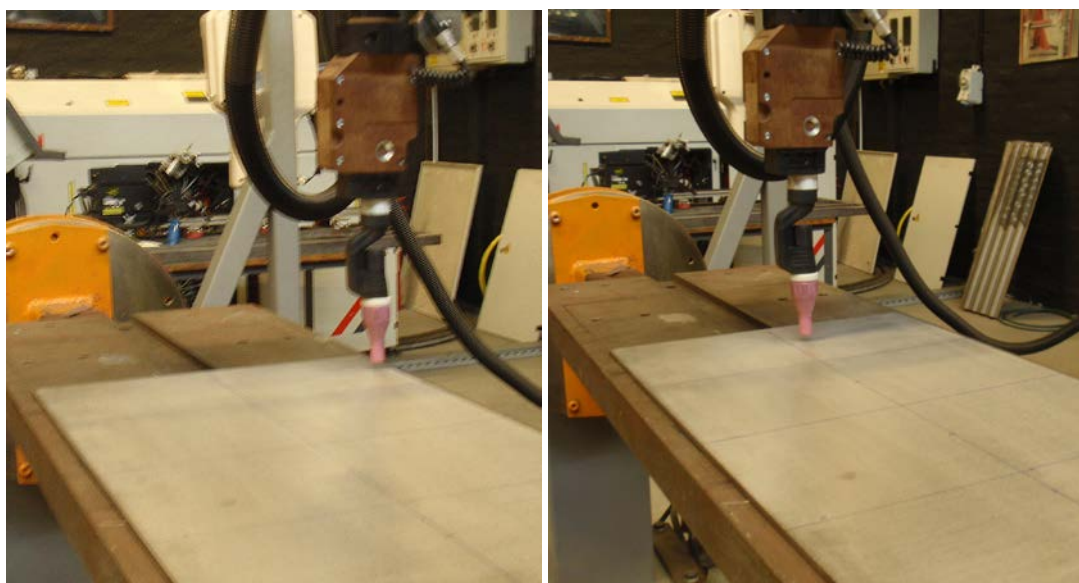
Slika 3.6 Koraci u planiranju pokusa

Tablica 3.5 prikazuje udjele aktivacijskih premaza za svaku točku pokusa.

Tablica 3.5 Točke pokusa s udjelima aktivacijskih komponenata

Točke pokusa (Slika 3.6)	Udjeli aktivacijskih komponenata, %		
	x_1 (SiO ₂)	x_2 (Cr ₂ O ₃)	x_3 (TiO ₂)
1	100	0	0
2	50	50	0
3	0	100	0
4	50	0	50
5	0	0	100
6	0	50	50
7	33,33	33,33	33,33

Precizna priprema je prethodila prije samog robotiziranog navarivanja radnih komada. Prije navarivanja putanja vrha elektrode se definirala offline metodom programiranja, a parametri procesa navarivanja (I , U , v_z) su usklađeni sukladno putanji vrha elektrode. Definirana putanja navarivanja iznosila je 12 cm. Prilikom programiranja težnja je bila napraviti što efikasniji program robota koji ima što kraća vremena i putanju manipulacije ne ugrožavajući tako najbitniju putanju i parametre navarivanja. Slika 3.7 prikazuje točku gdje počinje proces navarivanja – lijevo i točku u kojoj proces navarivanja završava.



Slika 3.7 Prikaz točaka putanje vrha elektrode – navarivanje

Prije samog navarivanja na površinu ispitnog uzorka kistom je nanešen A – TIG premaz u smjeru navarivanja širine oko 20 mm. Moglo se uočiti da je faktor granulacije praška bio ključan u kvaliteti dispergiranja čestica u suspenziji. Tako su finije čestice („u obliku praha“) SiO_2 i Cr_2O_3 bile bolje dispergirane u alkoholnoj suspenziji te su se jednoličnije mogle nanositi na površinu nego oni premazi koji su sadržavali grublje čestice („u obliku finoizrnatog pijeska“) TiO_2 . Nakon obavljenog navarivanja, ispitne ploče su ostavljene 24 h kako bi kristalizacija bila što potpunija prije bilo kakvog daljnjeg ispitivanja.

Tablica 3.6 prikazuje parametre robotiziranog TIG navarivanja austenitnih ploča AISI 304 s različitim aktivacijskim premazima i nazivima uzoraka. Uzorak označen brojem 0 je izveden bez aktivacijskog premaza dok su uzorci 1 – 7 označeni prema planu pokusa ovisno o vrsti korištenog aktivacijskog premaza. Iz tablice se može uočiti da su svi parametri konstantni kod svih izvedenih navarivanja dok se jedino napon struje mijenjao ovisno o vrsti korištenog aktivacijskog premaza.

Tablica 3.6 Parametri robotiziranog TIG navarivanja ispitnih uzoraka

Uzorak	Premaz	Vrsta i polaritet struje	Zaštitni plin	Protok plina, l/min	Brzina navarivanja, cm/min	Napon, V
0A	-	DC -	100 % Ar	9	10	11,3
1A	SiO_2	DC -	100 % Ar	9	10	13,3
2A	$\text{SiO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3$	DC -	100 % Ar	9	10	13,3
3A	Cr_2O_3	DC -	100 % Ar	9	10	12,2
4A	$\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$	DC -	100 % Ar	9	10	12,6
5A	TiO_2	DC -	100 % Ar	9	10	12
6A	$\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	DC -	100 % Ar	9	10	12
7A	$\text{SiO}_2+\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	DC -	100 % Ar	9	10	12,2

3.5. Ispitivanje navara

Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na navarene spojeve provedeno je:

- Vizualnom kontrolom,
- Ispitivanjem geometrijskih značajki navara,
- Određivanjem kemijskog sastava navara provedeno je na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM) uz energijski disperzivni spektrometar (EDS).

3.5.1. Vizualna kontrola

Vizualna metoda je jednostavna metoda za osiguravanje kvalitete zavara, ali ne daje podatke o poprečnom presjeku zavara ili navara. Vizualna kontrola daje prvi dojam o izgledu navara. Ako se vizualnom kontrolom primjete određene nepravilnosti poput površinskih pukotina, nadvišenja/ulegnuća, štrcanja, obojenja površine zavara i sl. navari se mogu odbaciti i daljnja ispitivanja nisu potrebna.

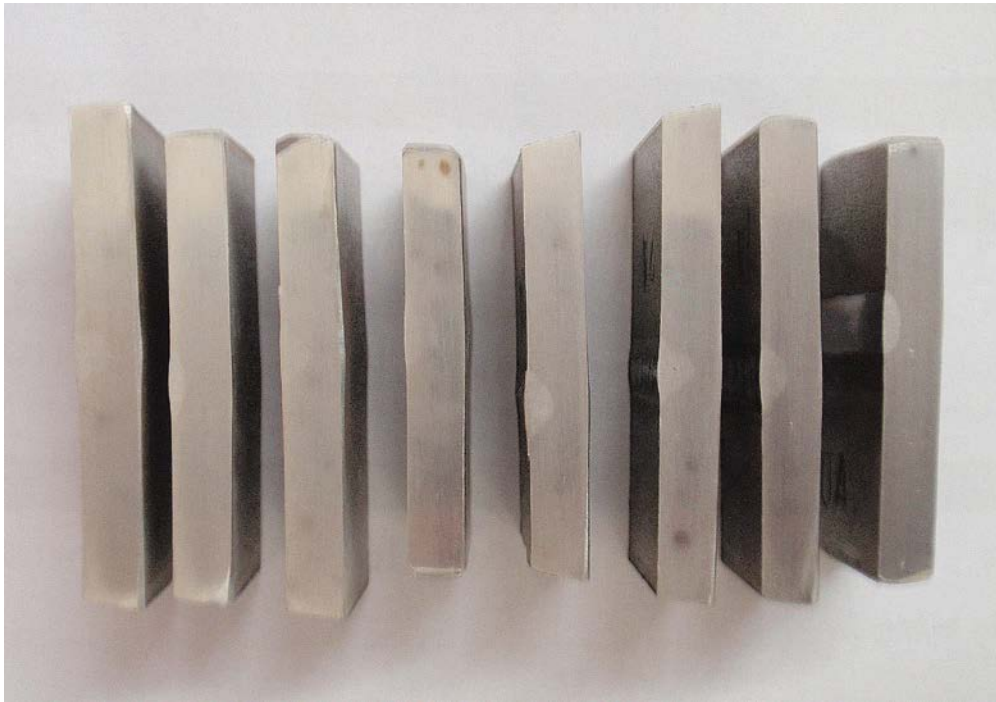
3.5.2. Ispitivanje geometrijskih značajki navara

Za ispitivanje geometrijskih značajki navara izrađeni su makroizbrusci poprečnog presjeka slijedom tehnoloških operacija:

1. Izrezivanje uzoraka je izvršeno na zračnoj plazma rezačici. Rezanje je izvršeno sa sapnicom promjera $\phi = 1,1$ mm; jakost struje je iznosila 70 A, a brzina rezanja $v_r = 90$ cm/min.
2. Površina makrouzoraka očišćena je od srhova i grubo izbrušena na rotirajućoj ploči hrapavosti P80, P160, P280,
3. Strojno poliranje makrouzoraka gradijentnim nizom brusnih papira do P600,
4. Elektrokemijsko nagrivanje u 10 % oksalnoj kiselini – $H_2C_2O_4 \times 2H_2O$ u vremenskom razdoblju od 5 min, pri naponu 12 V i struji 1 – 2 A. Prekid reakcije nagrivanja nakon 5 min izvršen je ispiranjem uzoraka u toploj vodi.

Nakon nagrivanja makrouzoraka do izražaja su došla područja zahvaćena utjecajem električnog luka tj. područje navara, zona staljivanja i zona utjecaja topline. Uloga makroizbrusaka je da ukaže i jasno predoči promjene u širini i penetraciji navara kod različitih mješavina aktivacijskih premaza. Mjerenje geometrije navara izvršeno je na slikama

makrouzbrusaka s povećanjem 50×. Slika 3.8 prikazuje makroizbruske nakon izlaganja elektrokemijskom nagrivanju.



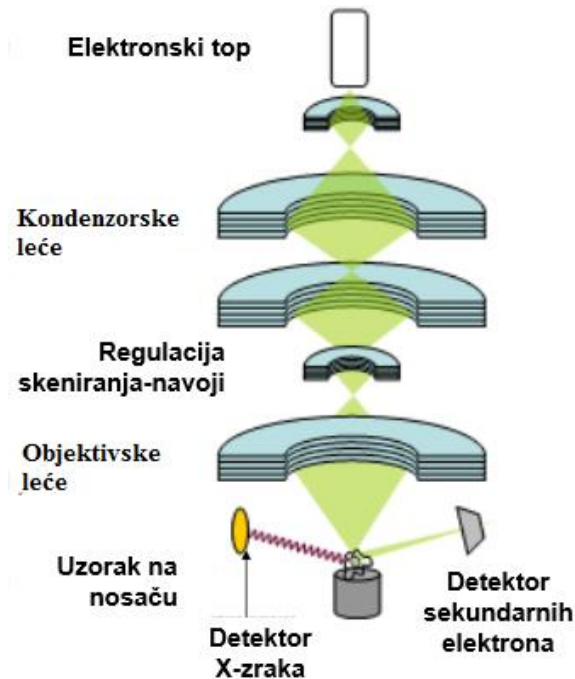
Slika 3.8 Ispolirani makroizbrusci nakon nagrivanja

3.5.3. Određivanje kemijskog sastava metala navara pretražnom elektronskom mikroskopijom (SEM) uz energijski disperzivni spektrometar (EDS)

Određivanje kemijskog sastava navara je izvedeno za svaki navareni uzorak tj. za sve mješavine aktivacijskih premaza kako bi se odredio utjecaj aktivacijskog premaza na kemijski sastav navara. Određivanje kemijskog sastava je izvršeno pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa.

Pretražna elektronska mikroskopija (SEM) jedna je od najčešće korištenih metoda u karakterizaciji površine materijala. SEM uređaji rade na povećanjima od 10 do preko 500000, pa osim morfologije mogu poslužiti i za saznavanje informacija o kemijskom sastavu materijala blizu njegove površine. U standardnom SEM ispitivanju generira se snop primarnih elektrona fokusiran u točku promjera oko 5 nm, sa energijama elektrona koje variraju od 100 eV do 50 keV. U slučaju neelastičnog rasipanja primarni elektroni predaju dio svoje energije elektronima u materijalu, čime se stvaraju uvjeti za njihovu emisiju u vidu sekundarnih elektrona koji obično imaju energiju manju od 50 eV. Dio neelastično predate energije primarnih elektrona dovodi i do pobuđivanja elektrona iz elektronskih ljuski atoma, a tako pobuđeni atomi vraćaju se u osnovno stanje (snopom fotona X zračenja). Dio elastično rasutih

primarnih elektrona vraća se iz materijala kroz površinu (s vjerojatnošću proporcionalnoj atomskom broju). Slika 3.9 prikazuje princip rada SEM.



Slika 3.9 Princip rada SEM-a [23]

Skeniranje površine se ostvaruje prelaženjem uskog snopa primarnih elektrona preko površine uzorka. U svakoj točki uzorka u interakciji atoma primarnog snopa i atoma uzorka dolazi do stvaranja signala koji se detektira. Signal se mapira na ekranu, a svaka točka interakcije odgovara posebnoj slici na ekranu. Oštrina slike ovisi o jačini signala sa uzorka (energija sekundarnih elektrona).

Određivanje kvantitativnog i kvalitativnog kemijskog sastava SEM-om se postiže uz pomoć energetske disperzivnog spektrometra (EDS) [23]. Energijska disperzivna spektrometrija (EDS - eng. *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) je analitička metoda koja se koristi za analizu kemijskih elemenata prisutnih u nekom uzorku ili kemijsku karakterizaciju uzorka. Princip rada zasniva se na činjenici da svaki element ima jedinstvenu atomsku strukturu koja daje jedinstvenu kombinaciju vrhova za njegov rendgenski spektar. Kako bi se potaknula emisija karakterističnih rendgenskih zraka iz uzorka, rendgenska zraka visoke energije se upućuje na uzorak [23]. EDS analiza kemijskog sastava uzoraka obavljena je s Tescan Vega TS5136 modelom skenirajućeg elektronskog mikroskopa koji se nalazi u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Slika 3.10 prikazuje Tescan Vega TS5136 SEM i radno mjesto gdje je obavljena kemijska analiza uzoraka.



Slika 3.10 Tescan Vega TS5136 – pretražni elektronski mikroskop (SEM)

3.6. Određivanje matematičkih modela promjena mjerenih vrijednosti

Rezultati mjerenja geometrijskih karakteristika navara i udijeli kemijskih elemenata dobivenih A – TIG postupkom i kemijskom analizom statistički su obrađeni pomoću programskog paketa DESIGN EXPERT 7.0.0. U ovom istraživanju je određen matematički model dubine penetracije te matematički model udjela legiranih elemenata Cr i Ni u metalu navara za svaku točku pokusa. Iz statističke analize izmjerenih podataka u svih 7 točaka pokusa dobiven je odgovarajući model. Model može biti linearan, kvadratni ili srednja vrijednost ukoliko nema značajnog utjecaja istraživanih čimbenika.

Na temelju F-testa i maksimalne vrijednosti koeficijenta determinacije, („*Adjusted R-Squared*” i „*Predicted R-Squared*”) određen je najpovoljniji model. Nakon toga je bilo potrebno odrediti značajnost modela i članova odzivnog polinoma analizom varijance („*ANOVA for Mixture Model*”).

Ovako utvrđen matematički model omogućava vrlo zornu grafičku interpretaciju, kao i optimiranje razmatranih parametara. Za grafičko prikazivanje odabran je način interpretacije konturnom plohom i 3D površinom.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati vizualne kontrole

Dobiveni su dobri rezultati navarivanja austenitnih ploča AISI 304 robotiziranim A – TIG postupkom u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar. Tablica 4.1 prikazuje lice navara i stražnju stranu navara svih uzoraka navarenih u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar.

Iz tablice se može vidjeti da su lica navara kod svih vrsta mješavina vrlo pravilna i bez nadvišenja osim kod uzorka 4A gdje je korištena mješavina aktivacijskih komponenti od 50 % SiO₂ i 50 % TiO₂. Lice navara uzorka 4A ima mjestimična nadvišenja i ulegnuća. Površinske pukotine i otvorene pore nisu utvrđene. Pobojenost je uočena kod svih navara gdje nije korišten aktivacijski premaz s aktivacijskom komponentom Cr₂O₃ zbog izrazite zelene boje te aktivacijske komponente.

Sa stražnje strane navara se moglo utvrditi da niti jedan navar nije protalio ploču debljine 5 mm pri zadanim parametrima navarivanja. Prema jednakoj širini pobojanosti sa stražnje strane navara može se pretpostaviti da je unos topline, a samim time i penetracija po cijeloj dužini svakog navara jednolika.

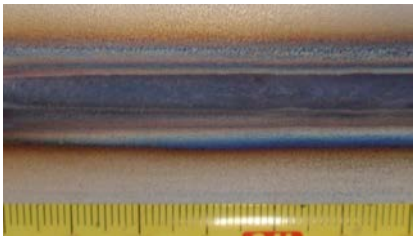
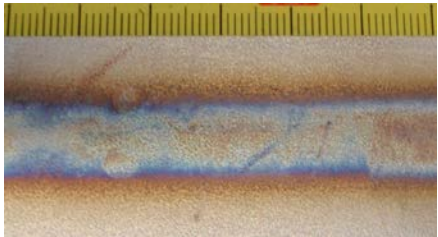
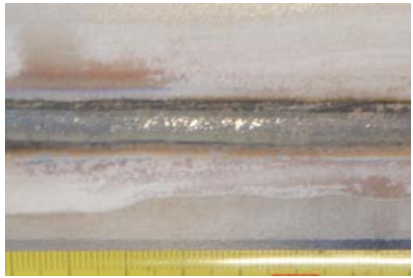
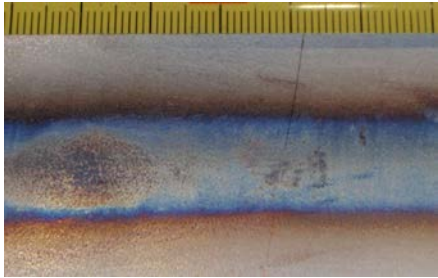
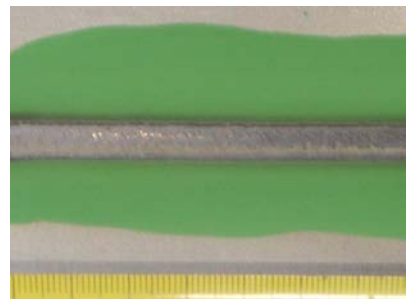
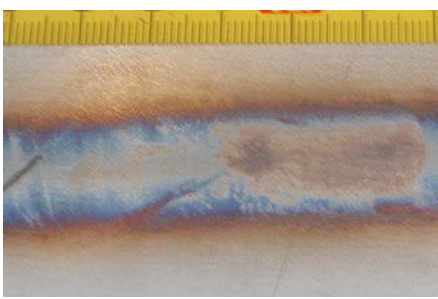

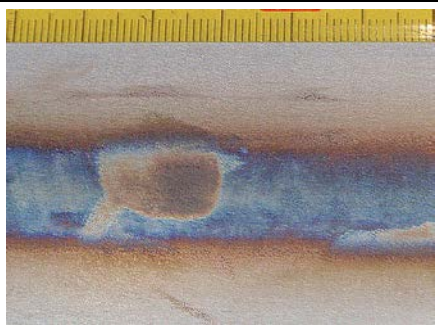

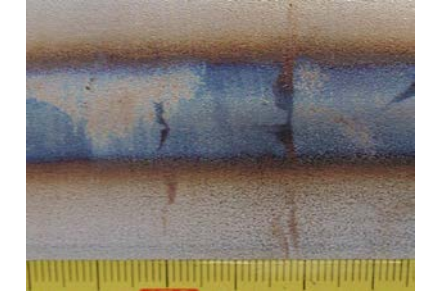
Rezultati preliminarnog ispitivanja u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % Ar / 5 % H nisu pokazali dobre rezultate. Slika 4.1 prikazuje navar premazan aktivacijskim premazom sa 100 % SiO₂. Sa slike se može uočiti nepravilno lice navara s puno nadvišenja i otvorenih pora. Nadvišenja pri navarivanju A – TIG postupkom ne bi smjelo biti uopće jer se nije koristio nikakav dodatni materijal koji bi prouzročio nastanak nadvišenja. Nastanak nadvišenja pri korištenju aktivacijskog premaza se može pripisati razvijenoj vodenoj pari koja ostaje zarobljena u metalu navara uzrokujući poroznost:



Reakcijom SiO₂ i vodika nastao je SiO i vodena para je nastala reakcijom vodika s disociranim kisikom iz silicijevg dioksida [24]. Pošto su i ostali aktivacijski premazi oksidi, isto vrijedi kod svih ispitivanih premaza. Zbog navedenih nepravilnosti se došlo do zaključka da je zaštitna atmosfera s vodikom neadekvatna za izvođenje A – TIG postupka.

Daljnje istraživanje i ispitivanja su se provodila na uzorcima izvedenim u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar.

Tablica 4.1 Izgled navara svih ispitnih uzoraka u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar

Uzorak	Premaz, %	Lice navara	Stražnja strana navara
0A	/		
1A	SiO ₂ 100		
2A	SiO ₂ /Cr ₂ O ₃ 50/50		
3A	Cr ₂ O ₃ 100		
4A	SiO ₂ /TiO ₂ 50/50		

(nastavak tablice 4.1)

5A	TiO ₂ 100		
6A	Cr ₂ O ₃ /TiO ₂ 50/50		
7A	SiO ₂ /Cr ₂ O ₃ / TiO ₂ 33/33/33		



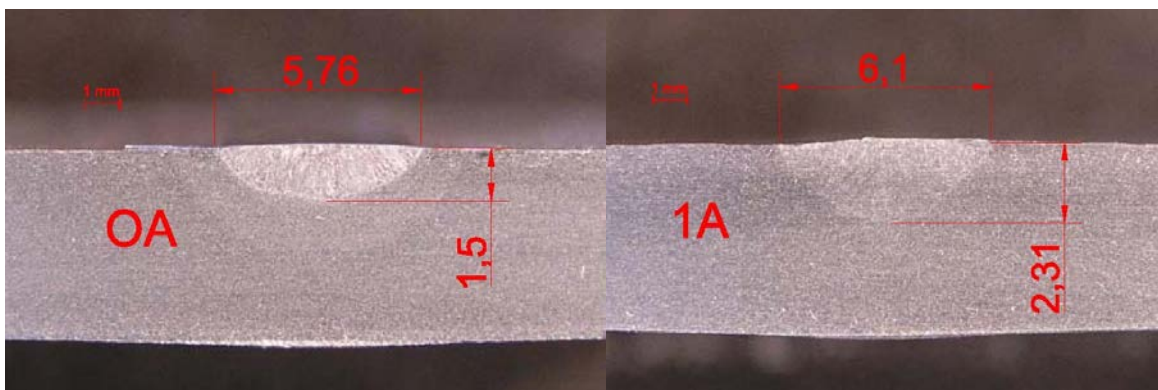
Slika 4.1 Lice navara izvedenog u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % Ar / 5 % H (aktivacijski premaz s 100 % SiO₂)

4.2. Geometrijske značajke poprečnog presjeka navara

Na slikama 4.2 – 4.8 su uspoređene geometrijske značajke makroizbrusaka navara bez premaza (lijevo) i navara s aktivacijskim premazima (desno) za svaku točku pokusa u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar.

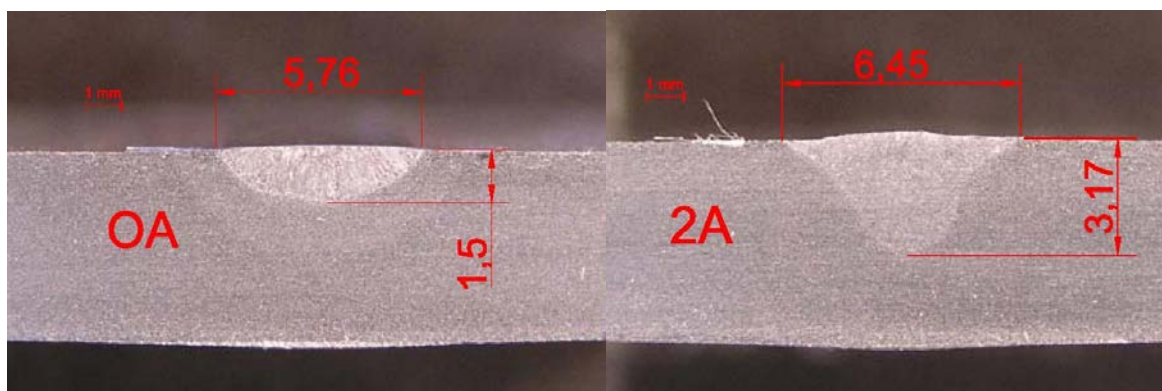
Uzorak 0A je izveden bez aktivacijskog premaza te se može vidjeti da je penetracija 1,5 mm što je vrlo malo jer bi bilo potrebno svaki lim deblji od 1,5 mm zavarivati u više prolaza (pri istim parametrima) što znatno poskupljuje tehnologiju. Širina navara je kod ovog uzorka najmanja i iznosi 5,76 mm. Prema obliku penetracije navara se vidi da je zona jezgre električnog luka šira u odnosu na širinu zone jezgre luka i oblik penetracije kod uzorka s aktivacijskim premazima. Ovaj uzorak je na slikama uspoređen sa svakim uzorkom izvedenim s A – TIG postupkom kako bi se jasnije uočile razlike u geometrijskim značajkama.

Slika 4.2 prikazuje uzorak 1A. Uzorak 1A je izveden s aktivacijskim premazom koji je sadržavao aktivacijsku komponentu 100 % SiO₂. Primjenom ovog aktivacijskog premaza dubina penetracije iznosi 2,31 mm dok se širina navara neznatno povećala na 6,1 mm.



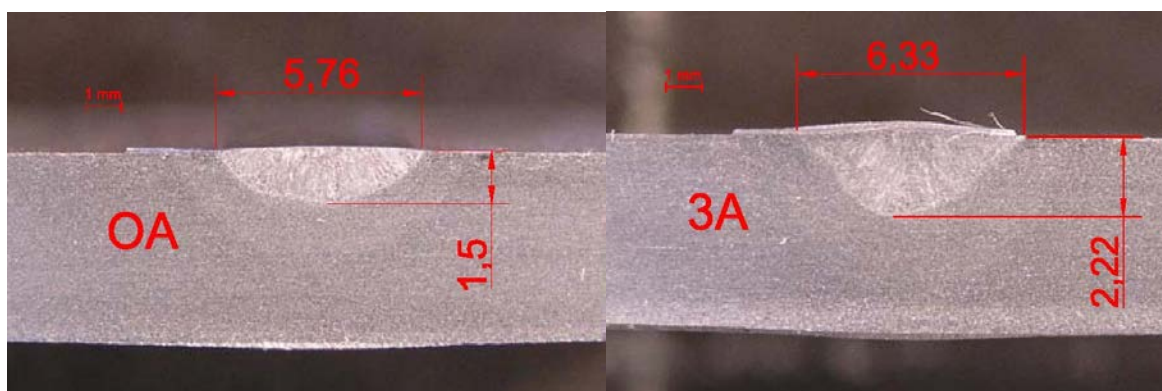
Slika 4.2 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % SiO₂ (1A)

Uzorak 2A je izveden s aktivacijskim premazom koji je prema planu pokusa sadržavao mješavinu aktivacijskih komponenti 50 % SiO₂ i 50 % Cr₂O₃. Primjenom ovog aktivacijskog premaza dobivena je najveća penetracija u odnosu na sve ostale premaze od 3,17 mm što je 210 % dubine penetracije navara kod uzorka izvedenog bez aktivacijskog premaza. Na slici 4.3 se može primjetiti kako se širina navara s dubinom navara naglo smanjuje tj. širina zone jezgre električnog luka je bila pri izvođenju navara jako uska. Iz oblika metala navara (uvara) može se također vidjeti posljedica djelovanja centrifugalnog Marangonijevog efekta na uzorku 0A koji daje širok oblik penetracije navara dok se na uzorku 2A može jasno vidjeti posljedica djelovanja centripetalnog Marangonijevog efekta na oblik penetracije navara.



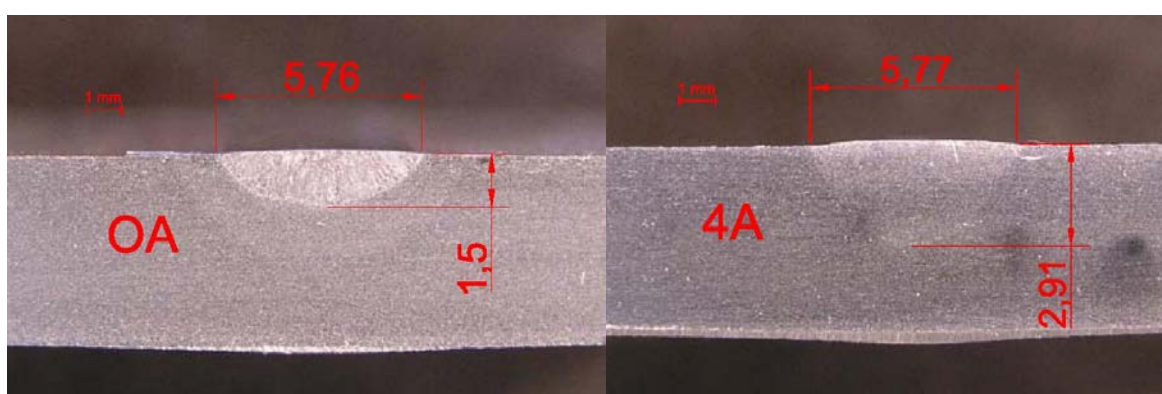
Slika 4.3 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % SiO_2 + 50 % Cr_2O_3 (2A)

Uzorak 3A izveden s aktivacijskim premazom sa 100 % Cr_2O_3 prikazan na slici 4.4 također ima znatno veću širinu i penetraciju navara od uzorka bez premaza. Na slici se može uočiti nadvišenje navara koje je kod ovog uzorka najizraženije.



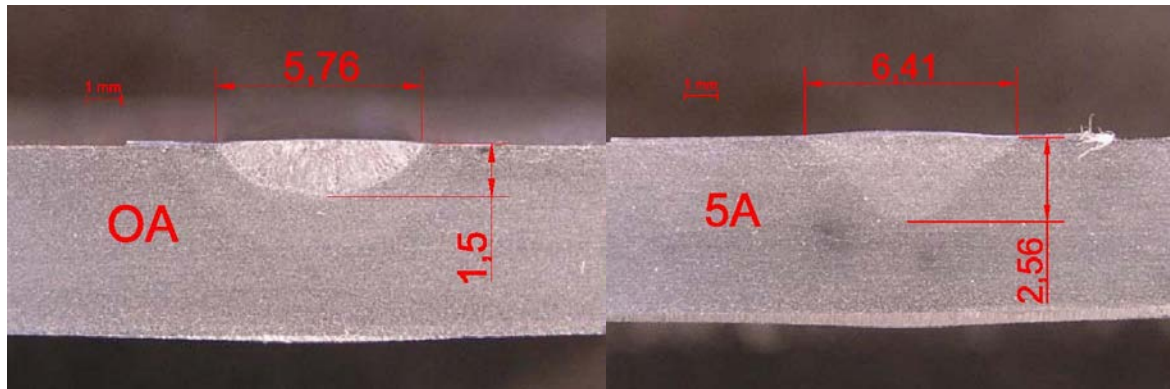
Slika 4.4 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % Cr_2O_3 (3A)

Slika 4.5 prikazuje uzorak 4A izveden s mješavinom aktivacijskih komponenti od 50 % SiO_2 i 50 % Cr_2O_3 . Ovaj uzorak ima dubinu penetracije od 2,91 mm te je oblik penetracije vrlo pravilan i simetričan.



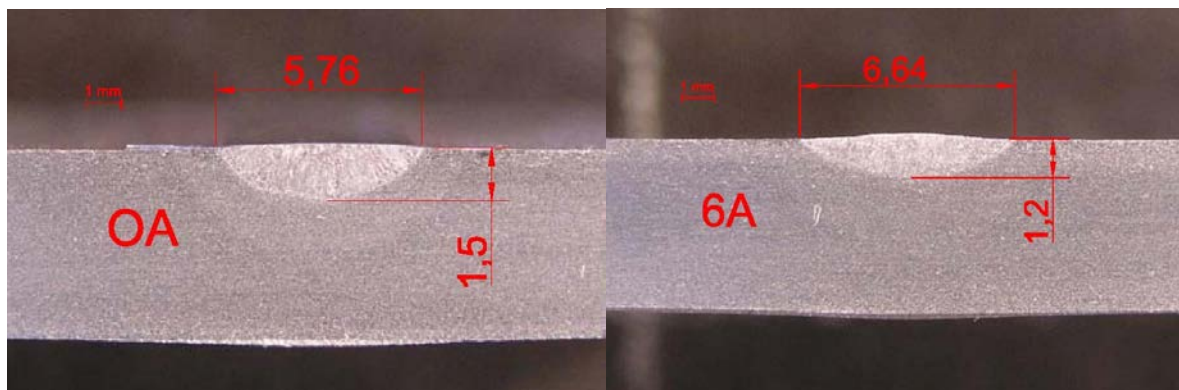
Slika 4.5 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % SiO_2 + 50 % TiO_2 (4A)

Uzorak 5A (slika 4.6) je izveden s aktivacijskim premazom od 100 % TiO_2 a dubina penetracije ovog uzorka iznosi 2,56 mm dok je širina navara 6,41 mm.



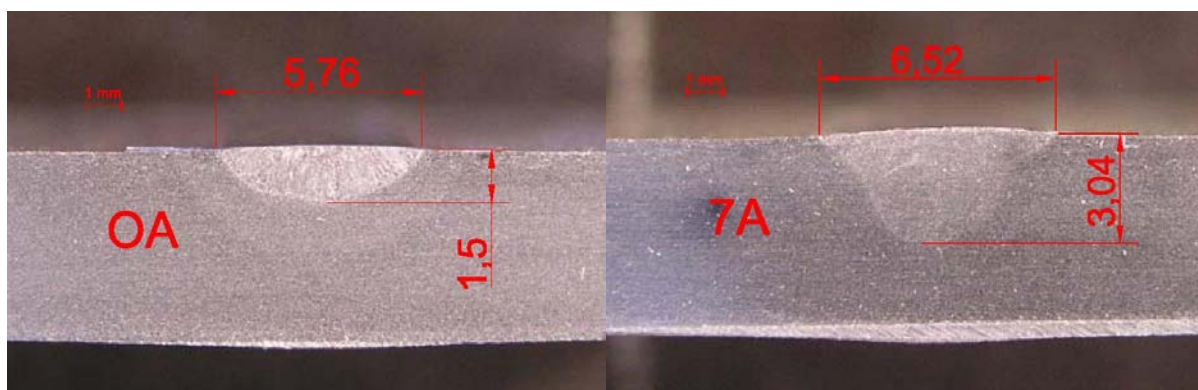
Slika 4.6 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 100 % TiO_2 (5A)

Uzorak 6A prikazan na slici 4.7 izveden je s aktivacijskim premazom koji je sadržavao 50 % Cr_2O_3 i 50 % TiO_2 . Dubina penetracije ovog uzorka je najmanja i iznosi 1,2 mm što znači da je manja i od dubine penetracije kod uzorka 0A gdje nije korišten aktivacijski premaz. Prema obliku penetracije se može zaključiti da je kod ovog premaza širina električnog luka najveća što može biti rezultat stvaranja para i plinova u električnom luku.



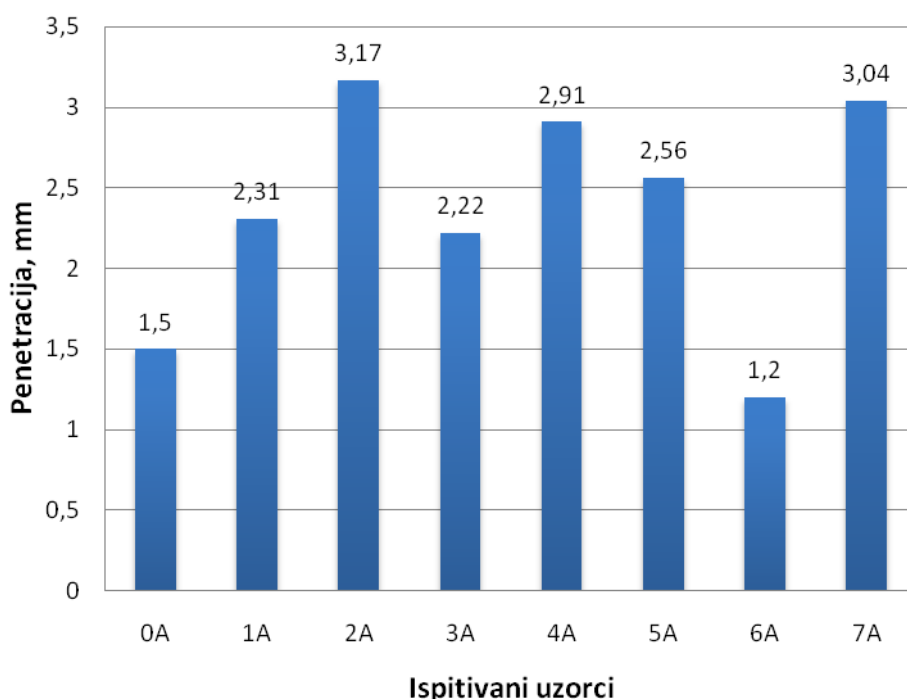
Slika 4.7 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 50 % Cr_2O_3 + 50 % TiO_2 (6A)

Uzorak 7A (Slika 4.8) gdje je korišten aktivacijski premaz mješavine svih ispitivanih komponenti tj. 33 % SiO_2 i 33 % Cr_2O_3 te 33 % TiO_2 . Ovaj aktivacijski premaz je također pokazao dobre rezultate jer se dubina penetracije s primjenom ovog premaza udvostručila u odnosu na uzorak bez premaza. Ovaj tip premaza je uzrokovao središnji smještaj penetracije što je izrazito dobro jer zbog tog svojstva može imati univerzalnu primjenu.



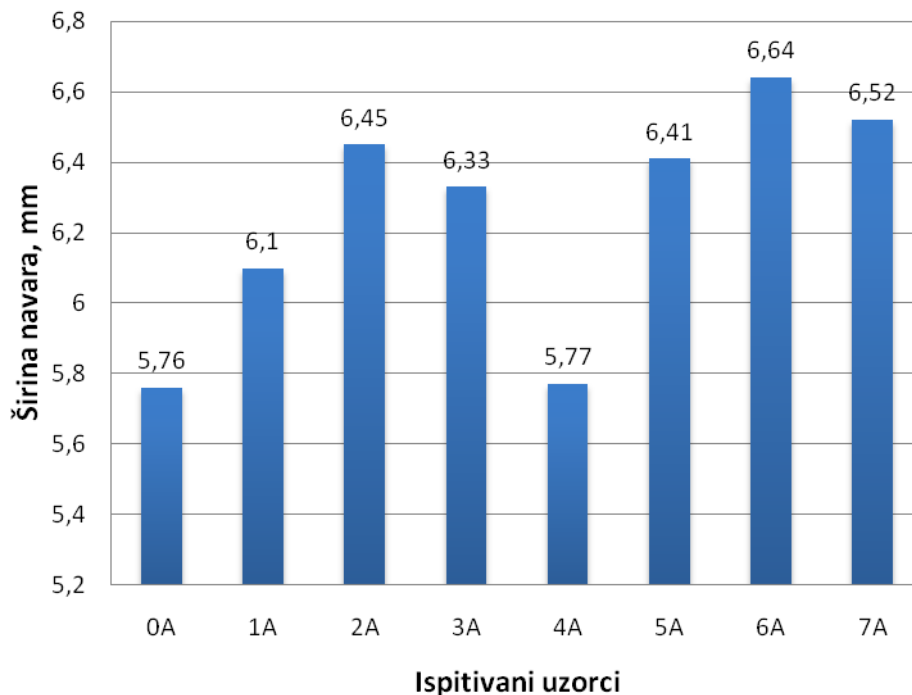
Slika 4.8 Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (0A) i s aktivacijskim premazom 33 % SiO₂ + 33 % Cr₂O₃ + 33 % TiO₂ (7A)

Slika 4.9 prikazuje dijagram dubina penetracije za svaki uzorak. Iz dijagrama se jasno može vidjeti da je kod uzorka 2A dubina navara tj. penetracija najveća dok je kod uzorka 6A najmanja.



Slika 4.9 Dijagram promjene dubine navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza

Slika 4.10 prikazuje dijagram promjene širine navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza. S dijagrama je vidljivo da je najširi navar na uzorku 6A gdje je ujedno i najmanja penetracija dok je na uzorku 4A širina navara najmanja u odnosu na druge ispitivane uzorke.



Slika 4.10 Dijagram promjene širine navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza

4.3. Rezultati određivanja kemijskog sastava metala navara energijski disperzivnom spektrometrijom (EDS)

EDS analizom detektirani su prisutni kemijski elementi u metalu navara. Tablica 4.2 prikazuje masene udjele kemijskih elemenata u metalu navara za svaki pojedini uzorak. Na dnu tablice su prikazani dozvoljeni rasponi udjela svakog elementa za čelik kvalitete AISI 304 [25].

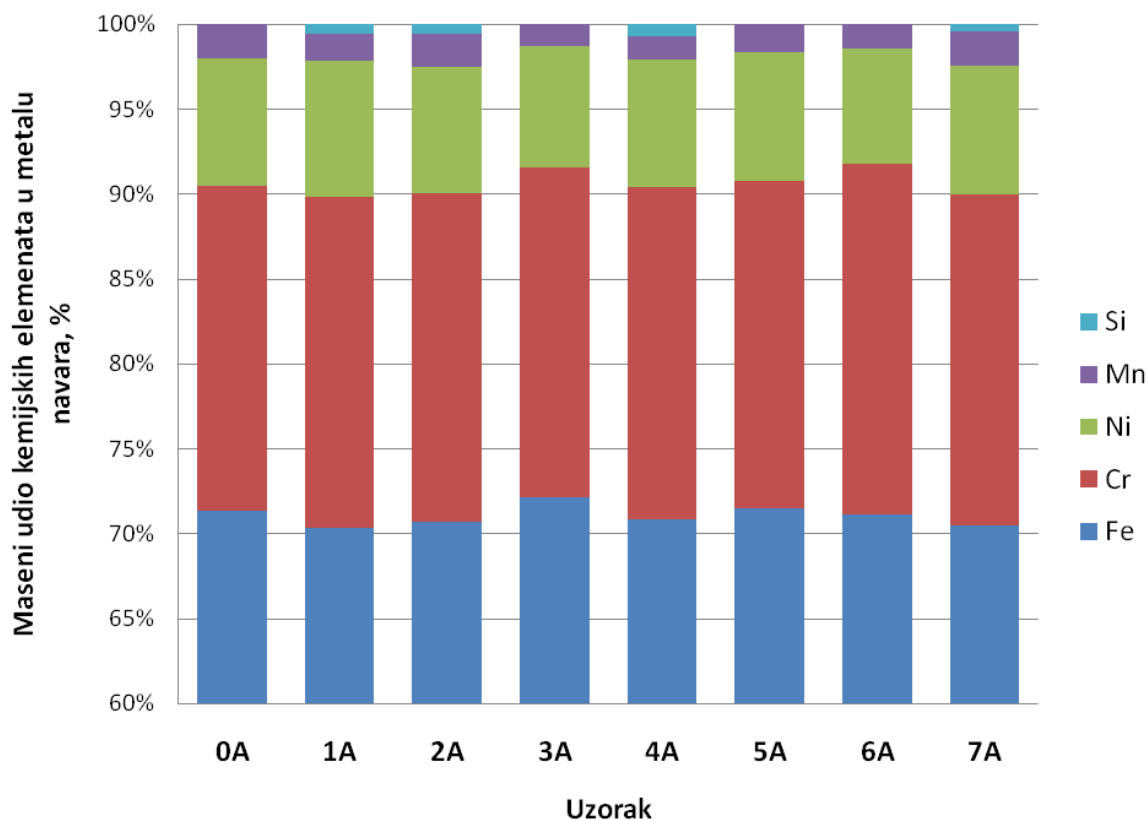
Iz tablice se može primjetiti da je udio željeza (Fe) najmanji u uzorku 7A gdje iznosi 65,08 % što je nešto manje od minimalnog sastava za čelik AISI 304. Udio kroma (Cr) je isto tako najmanji u uzorku 7A gdje iznosi 17,96 % dok je u uzorku 6A najveći i iznosi 19,53 %. Za čelik AISI 304 dozvoljeni raspon udjela nikla (Ni) je od 8 % do 10,5 %. Rezultati dobiveni EDS analizom pokazuju da u niti jednom uzorku udio nikla nije u tom rasponu, nego je uvijek nešto manji. To ne znači nužno da ovaj čelik nije kvalitete AISI 304 jer svaki proizvođač odredi svoje raspone udjela kemijskih elementata, no poželjniji je što veći udio nikla jer on povisuje žilavost i smanjuje toplinsku rastezljivost čelika. Udio mangana (Mn) je u svim uzorcima manji od 2 %. U uzorcima gdje se koristio aktivacijski premaz s komponentom SiO₂ EDS analizom je detektiran udio silicija (Si). Silicij je dobar dezoksidator te povisuje čvrstoću, otpornost na trošenje i granicu elastičnosti. Udio silicija u niti jednom uzorku ne

prelazi maksimalnu vrijednost od 1 %. Iako se kod određenih navarivanja koristio aktivacijski premaz s TiO_2 u nijednom metalu navara nije detektiran udio titana (Ti).

Tablica 4.2 Rezultati EDS analize kemijskog sastava metala navara

Uzorak	Aktivacijska komponente premaza; udio u mješavini, %	Udio kemijskog elementa, %					
		Si	Cr	Ni	Mn	Fe	
0A	/	-	18,49	7,28	1,95	ostatak	
1A	SiO_2 ; 100	0,54	18,15	7,52	1,45	ostatak	
2A	$\text{SiO}_2/\text{Cr}_2\text{O}_3$; 50/50	0,55	18,22	6,98	1,80	ostatak	
3A	Cr_2O_3 ; 100	-	18,60	6,88	1,23	ostatak	
4A	$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$; 50/50	0,67	18,96	7,26	1,36	ostatak	
5A	TiO_2 ; 100	-	18,60	7,32	1,57	ostatak	
6A	$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$; 50/50	-	19,53	6,42	1,36	ostatak	
7A	$\text{SiO}_2/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$; 33/33/33	0,37	17,96	6,98	1,91	ostatak	
Ograničenja udjela kemijskih elemenata čelika AISI 304		Min.	-	18	8	-	-
		Max.	1	20	10,5	2	-

Slika 4.11 prikazuje dijagram masenih udjela kemijskih elemenata prema podacima iz tablice 4.2. Iz dijagrama i tablice se može primjetiti da aktivacijski premazi ne utječu puno na kemijski sastav metala navara tj. razlike u udjelima kemijskih elemenata nisu velike između ispitivanih uzoraka. Mali utjecaj premaza na kemijski sastav čelika znači da se neće mijenjati mikrostruktura, a samim time se neće smanjivati mehanička svojstva čelika zavarenog pomoću A – TIG postupka.



Slika 4.11 Dijagram promjene masenih udjela kemijskih elemenata u metalu navara ispitivanih uzoraka

4.4. Analiza matematičkih modela promjena mjerenih vrijednosti

Matematički model ovisnosti dubine penetracije navara o masenim udjelima aktivacijskih komponenti u premazu glasi:

$$\begin{aligned}
 \text{Penetracija} = & 0,022882 \times SiO_2 + 0,021982 \times Cr_2O_3 + 0,025382 \times TiO_2 \\
 & + 4,05510 \times 10^{-4} \times SiO_2 \times Cr_2O_3 + 2,6831 \times 10^{-4} \times SiO_2 \times TiO_2 \\
 & - 3,97682 \times 10^{-4} \times Cr_2O_3 \times TiO_2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

Gdje je:

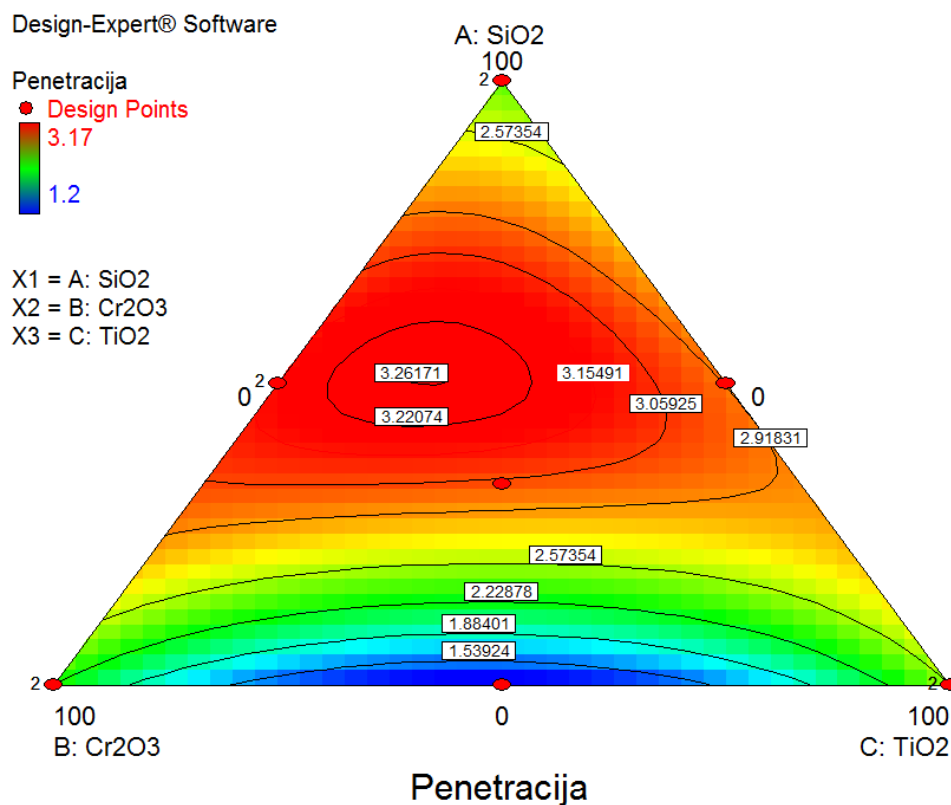
Penetracija – dubina navara, mm

SiO_2 – maseni udio $w(SiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

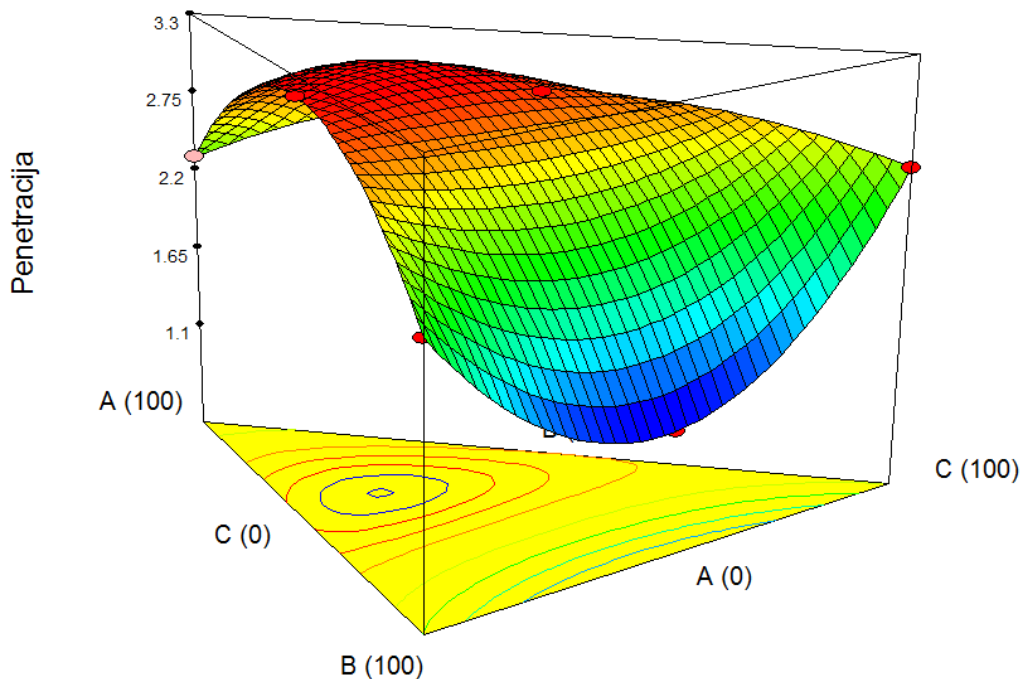
Cr_2O_3 – maseni udio $w(Cr_2O_3)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

TiO_2 – maseni udio $w(TiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

Slika 4.12 prikazuje 2D prikaz matematičkog modela dubine penetracije dok slika 4.13 prikazuje 3D prikaz matematičkog modela dubine penetracije. (NAPOMENA: programski paket DESIGN EXPERT ne dopušta korištenje indeksa, $\text{SiO}_2 = \text{SiO}_2$, $\text{Cr}_2\text{O}_3 = \text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{TiO}_2 = \text{TiO}_2$). Model dobro opisuje utjecaj vrste mješavine na dubinu penetracije navara. U grafičkim prikazima plavom bojom je označeno područje najmanje penetracije, a kako penetracija raste tako područje prelazi u crvenu boju. Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da je najveća dubina postignuta s mješavinom komponenti SiO_2 i Cr_2O_3 te mješavinom sa sve tri komponente dok se najmanja penetracija postigla uporabom mješavine komponenata Cr_2O_3 i TiO_2 . Iz matematičkog modela proizlazi optimalni sastav mješavine aktivacijskog premaza: 51 % SiO_2 , 32 % Cr_2O_3 i 17 % TiO_2 . Pomoću optimalnog sastava mješavine tri ispitivane aktivacijske komponente prema matematičkom modelu se može ostvariti penetracija od 3,265 mm za zadane parametre navarivanja.



Slika 4.12 2D prikaz matematičkog modela dubine penetracije



Slika 4.13 3D prikaz matematičkog modela dubine penetracije

Matematička funkcija masenog udijela kroma u metalu navara ovisno o masenim udjelima aktivacijskih komponenti u premazu je:

$$\begin{aligned}
 Cr = & 0,18150 \times SiO_2 + 0,18600 \times Cr_2O_3 + 0,18600 \times TiO_2 - 6,2 \times 10^{-5} \times SiO_2 \\
 & \times Cr_2O_3 + 2,34 \times 10^{-4} \times SiO_2 \times TiO_2 + 3,72 \times 10^{-4} \times Cr_2O_3 \times TiO_2 \\
 & - 2,955 \times 10^{-5} \times SiO_2 \times Cr_2O_3 \times TiO_2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Gdje je:

Cr – maseni udio $w(Cr)$ u metalu navara, %

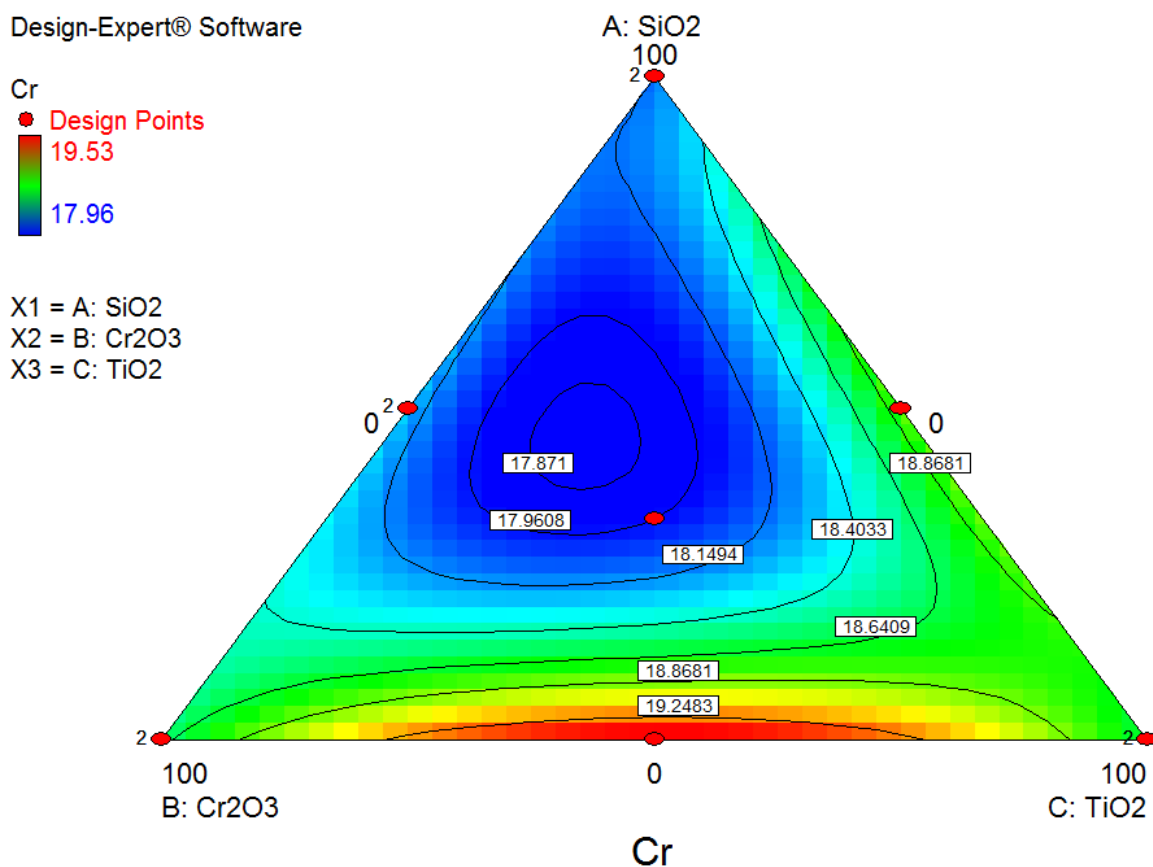
SiO_2 – maseni udio $w(SiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

Cr_2O_3 – maseni udio $w(Cr_2O_3)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

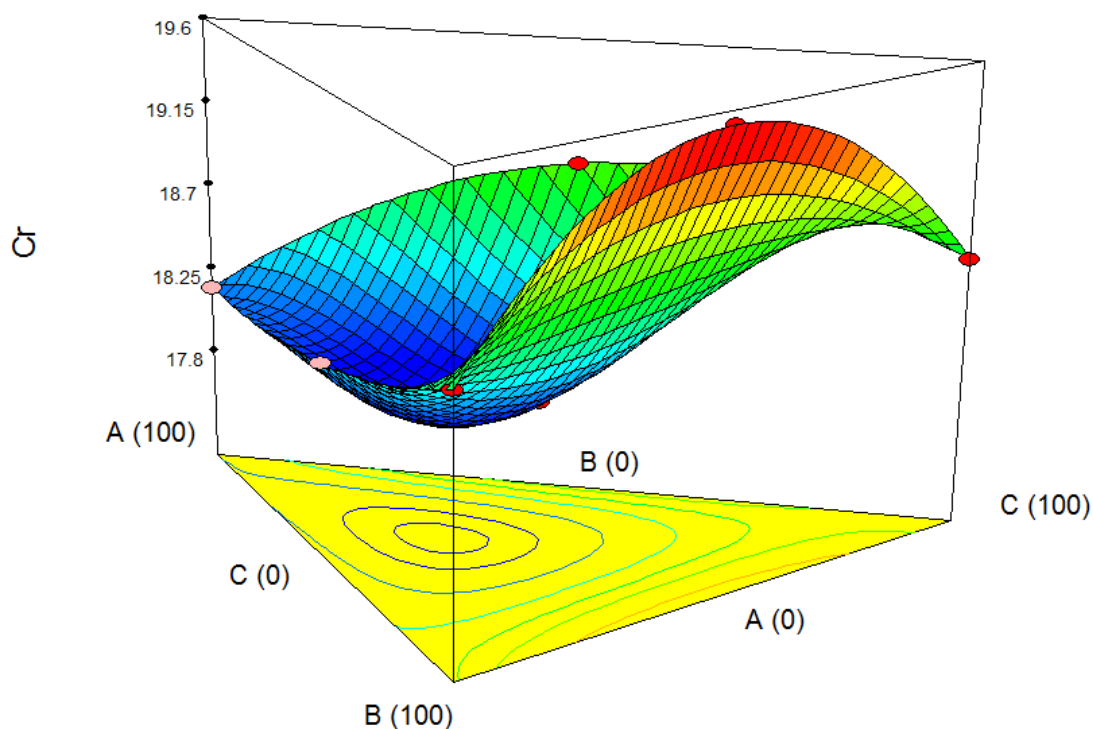
TiO_2 – maseni udio $w(TiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

Slika 4.14 prikazuje 2D prikaz matematičkog modela masenog udjela kroma a slika 4.15 prikazuje 3D prikaz matematičkog modela masenog udjela kroma u metalu navara prema simpleks-rešetki. Sa slike 4.14 se vidi da je raspon u kojem se kreću udijeli kroma od 17,96 %

do 19,53 % što je vrlo neznajno te stoga se matematičkim modelom ne može precizno opisati utjecaj sastava aktivacijskog premaza na maseni udio kroma u metalu navara. Iz grafičkog prikaza se može vidjeti da je najveći udio kroma u metalu navara pri čijem se navarivanju primjenio aktivacijski premaz s 50 % Cr_2O_3 i 50 % TiO_2 . U sredini i prema vrhu simpleks rešetke udio kroma je najmanji i ne prelazi 18 % te je to područje na slici obojano plavom bojom. Udio kroma u metalu navara je prikazan skalom od plave do crvene boje gdje plava boja prikazuje područja s malim udjelima kroma dok crvena boja prikazuje područja s najviše izmjerenim udjelima kroma.



Slika 4.14 2D prikaz matematičkog modela udijela kroma u metalu navara



Slika 4.15 3D prikaz matematičkog modela udijela kroma u metalu navara

Matematička funkcija masenog udijela nikla u metalu navara ovisno o sastavu aktivacijskog premaza:

$$\begin{aligned}
 Ni = & 0,0757 \times SiO_2 + 0,0688 \times Cr_2O_3 + 0,0732 \times TiO_2 - 9,8 \times 10^{-5} \times SiO_2 \times Cr_2O_3 \\
 & - 7,4 \times 10^{-5} \times SiO_2 \times TiO_2 - 2,72 \times 10^{-4} \times Cr_2O_3 \times TiO_2 + 5,85 \times 10^{-6} \\
 & \times SiO_2 \times Cr_2O_3 \times TiO_2
 \end{aligned} \quad (4)$$

Ni – maseni udio $w(Ni)$ u metalu navara, %

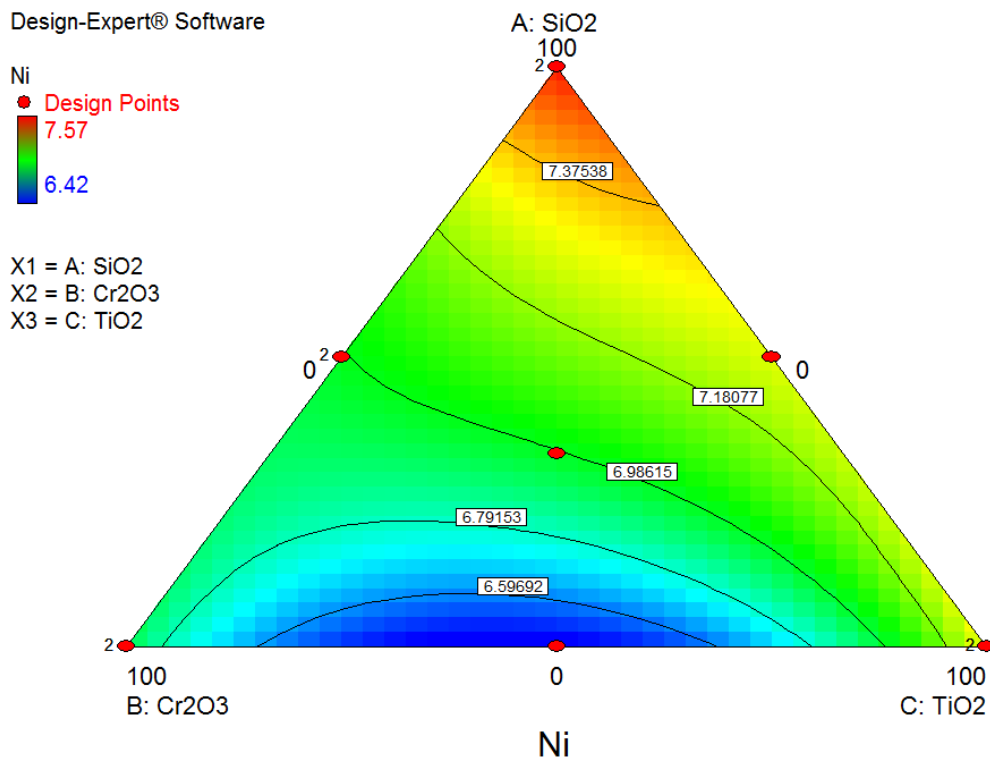
SiO_2 – maseni udio $w(SiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

Cr_2O_3 – maseni udio $w(Cr_2O_3)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

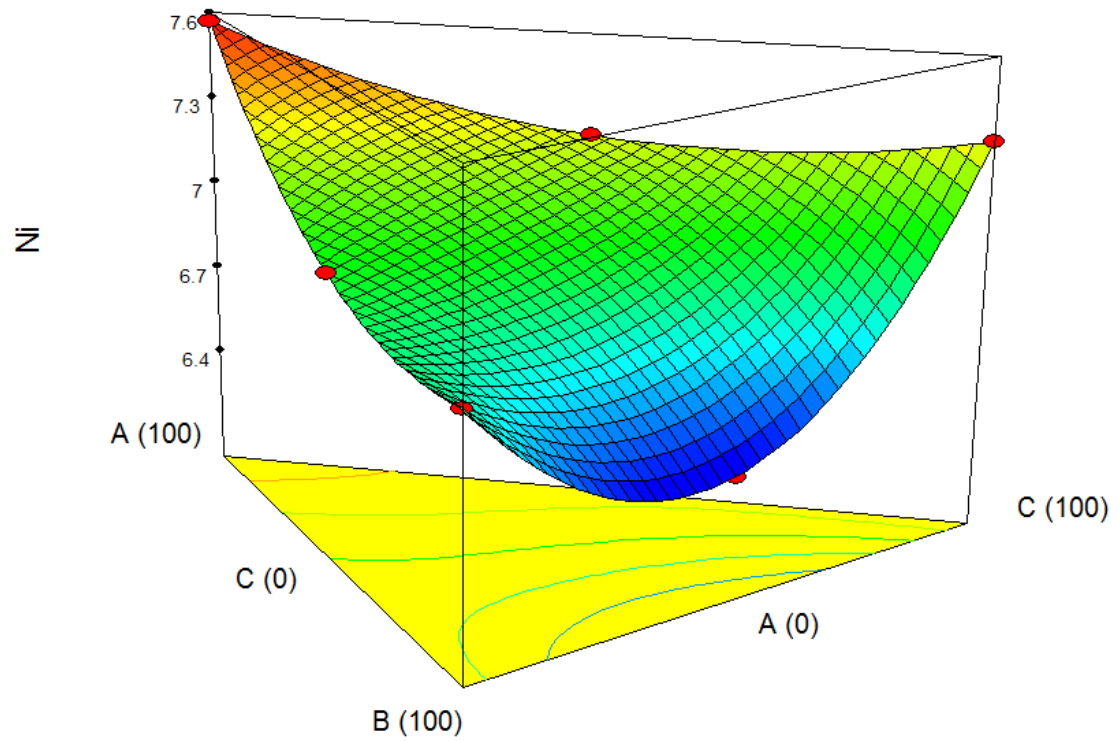
TiO_2 – maseni udio $w(TiO_2)$ u mješavini aktivacijskih komponenti premaza, %

Slika 4.16 prikazuje 2D prikaz matematičkog modela masenog udjela nikla, a slika 4.17 prikazuje 3D prikaz matematičkog modela masenog udjela nikla u metalu navara prema simpleks rešetki. Sa slika se može vidjeti da je raspon promjene udijela nikla u uzorcima od 6,42 % do 7,57 % što je vrlo neznačajno te matematički model nije primjenjiv. Udio nikla je

najveći kod navara s aktivacijskim premazom sa 100 % SiO₂. S 3D prikaza matematičkog modela udjela nikla je uočljivo kako sa smanjenjem udjela aktivacijske komponente SiO₂ u aktivacijskom premazu pada i udio nikla u metalu navara.



Slika 4.16 2D prikaz matematičkog modela udijela nikla u metalu navara



Slika 4.17 3D prikaz matematičkog modela udijela nikla u metalu navara

5. ZAKLJUČCI

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi utjecaj sastava aktivacijskog premaza na austenitni čelik pri robotiziranom A – TIG navarivanju. Robotiziranim navarivanjem se eliminirao ljudski utjecaj na sljedivost procesa navarivanja. U istraživanju je odabrano 7 mješavina na temelju simpleks-rešetke $\{3, m_s\}$ za tri komponente aktivacijskog premaza (SiO_2 , Cr_2O_3 i TiO_2). Analizom dobivenih podataka, parametara i rezultata utvrdio se utjecaj različitih mješavina aktivacijskog premaza na svojstva navara i tehnološku primjenjivost premaza pri robotiziranom navarivanju u industrijskoj proizvodnji. Na temelju provedenog ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Pri miješanju aktivacijskih komponenti moglo se uočiti da je faktor granulacije praška bio ključan u kvaliteti dispergiranja čestica u suspenziji. Grubo-zrnate čestice („u obliku fino-zrnatog pijeska“) TiO_2 slabo su se disperzirale u alkoholnoj suspenziji, a nakon nanošenja i hlapljenja alkohola dio čestica je otpuhan u struji inertnog plina tijekom navarivanja. Daljnjim istraživanjem primjene vodenog stakla mogao bi se riješiti problem otpuhivanja čestica.
- Vizualnom kontrolom navara izvedenih u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar utvrdilo se da su lica navara kod svih vrsta mješavina vrlo pravilna i bez nadvišenja osim kod uzorka 4A gdje je korištena mješavina aktivacijskih komponenti od 50 % SiO_2 i 50 % TiO_2 . Sa stražnje strane navara se moglo utvrditi da niti jedan navar nije provario ploču debljine 5 mm pri zadanim parametrima navarivanja. Rezultati vizualne kontrole navarivanja u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % Ar / 5 % H su doveli do zaključka da je zaštitna atmosfera s vodikom neadekvatna za izvođenje A – TIG postupka navarivanja zbog razvijanja vodene pare u metalu navara. Daljnje istraživanje navara izvedenih u ovoj atmosferi nije provedeno.
- Analizom geometrijskih karakteristika navara utvrdilo se da svaka ispitana mješavina A – TIG premaza kvalitetno utječe na sam navar povećavajući penetraciju postupka. Aktivacijski premaz s 50 % Cr_2O_3 i 50 % TiO_2 kod uzorka 6A je postigao najmanju dubinu penetracije. Klasičnim TIG postupkom postignuta je penetracija navara od 1,5 mm. Primjenom mješavine aktivacijskih komponenti 50 % SiO_2 i 50 % Cr_2O_3

dobivena je najveća penetracija u odnosu na sve ostale premaze od 3,17 mm što je 210 % penetracije navara kod uzorka izvedenog bez aktivacijskog premaza.

- Iz rezultata dobivenih SEM – EDS analizom kemijskog sastava se može zaključiti da nijedna mješavina aktivacijskih premaza ne utječe značajno na kemijski sastav metala navara tj. razlike u udjelima kemijskih elemenata nisu velike između ispitivanih uzoraka. Mali utjecaj premaza na kemijski sastav čelika znači da se neće mijenjati mikrostruktura, a samim time se neće smanjivati mehanička svojstva čelika zavarenog pomoću A – TIG postupka.
- Pomoću matematičkih modela se matematički opisao utjecaj sastava mješavine aktivacijskog premaza na dubinu navara te udjele glavnih legiranih elemenata, kroma i nikla, u metalu navara. Pomoću modela se došlo do zaključka da je 51 % SiO_2 , 32 % Cr_2O_3 i 17 % TiO_2 optimalni sastav aktivacijskog premaza koji bi rezultirao najvećom penetracijom od 3,27 mm. Utjecaj sastava mješavine premaza na masene udjele Cr i Ni se pokazao neznatniji te matematički modeli nisu primjenjivi.

Novo spoznaje i rezultati dobiveni ovim eksperimentom otvaraju nova područja istraživanja poput:

- primjena vodenog stakla kao veziva aktivacijskih komponenti,
- utjecaj debljine sloja premaza na stabilnost procesa,
- ekonomska isplativost A – TIG postupka,...

Smatram da se daljnjim istraživanjima može odrediti optimalni sastav aktivacijskog premaza i pomoću njega znatno poboljšati učinkovitost i produktivnost TIG postupka te da rezultati predstavljaju kvalitetnu bazu za stvaranje proizvoda u suradnji s tvrtkom Elektroda Zagreb d.d.

ZAHVALE

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na susretljivosti, pomoći, podršci i prilici za pisanje ovog rada. Svojim vodstvom i komentarima uvelike je unaprijedio kvalitetu ovog rada.

Zahvaljujem se asistentici dr. sc. Tanji Tomić na ukazanoj podršci, pristupačnosti, susretljivosti i vođenju kroz rad, te asistentici mag. ing. Maji Jurici na pomoći prilikom rada na robotskoj stanici.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Lidiji Ćurković i doc. dr. sc. Suzani Jakovljević za pomoć oko izrade i analize kemijskog sastava, tehničkom suradniku Ivanu Vovku koji mi je pomogao oko realizacije pojedinih ispitivanja, te tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije koji su mi pomogli tijekom izvođenja eksperimentalnog rada.

Za kraj želim zahvaliti svojoj djevojci Katarini na punoj podršci i strpljenju tijekom izrade rada.

POPIS LITERATURE

- [1] Kralj, Slobodan: *Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2] Allgood, Lee E.: The Lincoln Electric Company, *Gas Tungsten Arc Welding, Welding fundamentals and processes*, ASM Handbook, Volume 06A, 2011.
- [3] Horvat, Marko; Kondić, Veljko; Brezovečki, Dražen: *Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja*, Technical journal 8, 4(2014), 426-432, 2014.
- [4] Čolić, Luka: *Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A – TIG postupkom*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] *TIG handbook*, <http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/>, dostupno 8.2.2015.
- [6] *BOConline UK*, <http://www.boconline.co.uk/en/processes/manufacturing-processes/welding-process/welding.html>, dostupno 8.2.2015.
- [7] Vlahov, Marko: *TIG zavarivanje nehrđajućih čelika*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [8] M. Živčić: Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - *TIG zavarivanje*; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1985.
- [9] O'Brien, R. L.: *Welding Handbook 8th Edition Vol. 2 – Welding processes (AWS - American Welding Society)*, Miami, (74 – 106 str.), 1992.
- [10] *TIG welding – Method and Application*, <http://www.austwelding.com.au/Technical%20pages/tigwelding.pdf>, dostupno 9.2.2015.
- [11] *Varstroj: Mehanizacija i robotizacija*, http://www.varstroj.si/tl_files/pdf/Katalogi/Katalog_2010_ARV_CRO.pdf dostupno 9.2.2015.
- [12] Berthier, A.; Paillard, P.; Carin, M.; F. Valensi, F.; Pellerin S.: *TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 1: Identification of Marangoni effect*, Science nad Technology of Welding and joining, Vol. 17, No. 8, 2012.

- [13] Zuber, M.; Chaudhri, V.; Suri, V. K.; Patil, S. B.: *Effect of Flux Coated Gas Tungsten Arc Welding on 304L*, IACSIT, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 6, No. 3, June 2014.
- [14] 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.
- [15] Muthukumaran, Vasudevan; Nadu, Tamil; Bhaduri, Arun Kumar: *Penetration enhancing Flux formulation for Tungsten Inert Gas (Tig) Welding of Austenitic Stainless Steel and its Application*, United States Patent, Patent No.: US 8,097,826 B2, Jan. 17, 2012.
- [16] Huang, H. Y.; Shyu, S. W.; K. H. Tseng, K. H.; Chou, C. P.: *Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, No. 5, 2005.
- [17] Sandor, Tamas; Dobransky, Janos; Nagy – Hinst, Adrian: *Weld pool characteristics of the ATIG – welded joints*, ESAB Hungary Ltd., Hungary
- [18] Tseng, Kuang-Hung; Hsu, Chih-Yu: *Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds*, Journal of Materials Processing Technology, 211 (2011), 503–512, 2011.
- [19] Berthier, A.; Paillard, P.;Carin, M.; F. Valensi, F.; Pellerin S.: *TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation Part 2: arc constriction and arc temperature*; Science nad Technology of Welding and joining, Vol. 17, No. 8, 2012.
- [20] Loureiro, A. R. ; Costa, B. F. O. ; Batista, A. C.; Rodrigues, A.: *Effect of activating flux and shielding gas on microstructure of TIG welds in austenitic stainless steel*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 4, 2009.
- [21] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB Zagreb, 2007
- [22] Bauer, Branko: *Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje*, Doktorski rad, FSB Zagreb, 2006.
- [23] *Elektronski mikroskopi – SEM*,
http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni_materijali/EMUMF/predavanja/SEM.pdf, dostupno 14.03.2015.
- [24] Gardner, Richard: *The Kinetics of Silica Reduction in Hydrogen*, Journal of solid state chemistry 9, New York, 336 -344, 1973.

[25] *North American Stainless, Long Products Stainless Steel Grade Sheet*,
<http://www.northamericanstainless.com/wp-content/uploads/2010/10/Grade-304-304L.pdf>, dostupno 23.03.2015.

SAŽETAK

Autor: Nikola Babić

Naslov rada: Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304

U ovom radu provedeno je istraživanje utjecaja sastava aktivacijskog premaza na geometrijska svojstva navara i kemijski sastav metala navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju. Navarivanje je izvedeno na robotskoj stanici OTC Almega AX-6, a kao osnovni materijal korišten je nehrđajući austenitni čelik kvalitete AISI 304 debljine 5 mm. Promjenjiva je varijabla u ovom istraživanju vrsta odnosno sastav aktivacijskog premaza za izvođenje A – TIG postupka zavarivanja. Istraživanje je provedeno prema modelu pokusa s mješavinama. U planu pokusa odabrano je 7 mješavina na temelju simpleks-rešetke $\{3, m_s\}$ za tri komponente aktivacijskog premaza. Nakon analize dobivenih podataka određen je matematički model dubine penetracije te matematički model udjela glavnih legiranih elemenata, kroma i nikla, u metalu navara pomoću programskog paketa DESIGN EXPERT. Aktivacijske komponente u obliku sitnog praška korištene u istraživanju su: SiO_2 , Cr_2O_3 i TiO_2 .

Vizualnom kontrolom navara izvedenih u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar utvrdilo se da su lica navara kod svih vrsta mješavina vrlo pravilna. Rezultati vizualne kontrole navarivanja u zaštitnoj atmosferi mješavine 95 % Ar / 5 % H doveli su do zaključka da je zaštitna atmosfera s vodikom neadekvatna za izvođenje A – TIG postupka navarivanja zbog razvijanja vodene pare u metalu navara. Daljnje istraživanje navara izvedenih u ovoj atmosferi nije provedeno.

Analizom geometrijskih karakteristika navara utvrdilo se da svaka ispitana mješavina A – TIG premaza kvalitetno utječe na sam navar povećavajući penetraciju postupka osim mješavine s 50 % Cr_2O_3 i 50 % TiO_2 . Primjenom mješavine aktivacijskih komponenti 50 % SiO_2 i 50 % Cr_2O_3 dobivena je najveća penetracija od 3,17 mm, što je 210 % penetracije navara kod uzorka izvedenog bez aktivacijskog premaza.

Rezultati SEM-EDS analize kemijskog sastava pokazuju da nijedna mješavina aktivacijskih premaza ne utječe značajno na kemijski sastav metala navara.

Ključne riječi: A – TIG postupak, robotizirano zavarivanje, nehrđajući čelik AISI 304

ABSTRACT

Author: Nikola Babić

Title: The Effect of Activating Flux Composition on Weld Properties for Robotized A – TIG Bead-on-Plate Welding on AISI 304 (Grade Stainless) Steel

The aim of the present study was to investigate the effect of activating flux composition on the weld geometry properties and chemical composition for robotized A – TIG Bead-on-Plate welding. The welding was performed on the OTC Almega AX-6 robotic station on 5 mm thick AISI 304 austenitic stainless steel. The changing variable in this research was the type or composition of activating flux for performing the A – TIG welding process. The study was conducted according to the model experiment with mixtures. In experiment design, 7 mixtures at simplex-lattice {3,ms} were selected for the three components of the activating flux. After analyzing the obtained data, the mathematical model of the penetration depth as well as the mathematical model for content of chromium and nickel, was determined using the DESIGN EXPERT software package. The activation components in the form of fine powder that were used in the research are: SiO₂, Cr₂O₃ and TiO₂.

The visual inspection of weld beads executed in the protective atmosphere of shielding gas Ar determined that the weld beads were correct shaped for all used mixtures. The visual inspection results of Bead-on-Plate with shielding gas 95 % Ar / 5 % H led to the conclusion that shielding gas with hydrogen is inadequate to perform A - TIG welding because of the development of water vapor in the metal weld beads. Further investigation of welds derived in this atmosphere has not been conducted.

The analysis of the weld bead geometry determined that each tested mixture of A - TIG flux affects weld bead well by increasing penetration depth, except the mixture with 50 % Cr₂O₃ and 50 % TiO₂. By using a mixture of activation components 50 % SiO₂ and 50 % Cr₂O₃ the highest penetration (3,17 mm) compared to other coatings was obtained; as much as 210 % compared to conventional practices.

SEM-EDS analysis showed that none of the activation mixture coating has a significant effect on the chemical composition of metal weld beads.

Key words: A – TIG process, robotic welding, stainless steel AISI 304

ŽIVOTOPIS

Nikola Babić rođen je 6. prosinca 1992. godine u Zagrebu. Nakon završene osnovne škole, upisuje prirodoslovno-matematičku gimnaziju Tina Ujevića u Kutini. Maturirao je 2011. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Dobitnik je nagrade „Davorin Bazjanac“ za izvrsnost u studiranju u akademskoj godini 2013./2014. Od 2014. godine radi na Katedri za alatne strojeve kao demonstrator. Preddiplomski studij završava s najvećom pohvalom (SUMMA CUM LAUDE Baccalaureus) 2015. godine, obranom završnog rada: „*Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja*“ pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Ivice Garašića. Dodjeljena mu je Medalja FSB-a za poseban uspjeh u preddiplomskom studiju. Iste godine upisuje diplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Aktivno se služi engleskim, a razumije i piše njemački jezik.