

Razvoj opreme za TIG zavarivanje

Grgurev Rumbak, Matej

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:871574>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Grgurev Rumbak

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.
Dr. sc. Maja Jurica, mag. ing.

Student:

Matej Grgurev Rumbak

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na predanom znanju togom studija te pomoći i strpljenju pri izradi Završnog rada, a pogotovo izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i višoj asistentici dr. sc. Maji Jurici.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studija.

Matej Grgurev Rumbak



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: **MATEJ GRGUREV RUMBAK**

Mat. br.: 0035212989

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **RAZVOJ OPREME ZA TIG ZAVARIVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **TIG WELDING EQUIPMENT DEVELOPMENT**

Opis zadatka:

Na temelju dostupne literature detaljno opisati TIG postupak zavarivanja kao i opremu koja se koristi. Navesti specifičnosti postupka kao i razne inačice postupka koje su razvijene kao odgovor na zahtjev industrije. Veliku pozornost obratiti na opremu koja se koristi odnosno izvore struje. Navesti i objasniti prednosti i nedostatke novorazvijene opreme za TIG zavarivanje, te koja su im područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno definirati odgovarajuću opremu za TIG zavarivanje te provesti ispitivanja mogućnosti odabrane opreme. Analizirati rad odabrane opreme za zavarivanje i kvalitetu dobivenih zavarenih spojeva. Na temelju dobivenih podataka potrebno je ocijeniti primjenjivost opreme za različite uvjete rada, te navesti moguću primjenu analiziranih načina rada u industriji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum 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

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. TIG ZAVARIVANJE.....	2
2.1. Uvod u TIG postupak zavarivanja	2
2.2. Princip rada TIG zavarivanja	3
2.3. Oprema za TIG zavarivanje	6
2.3.1. TIG izvori struje.....	6
2.3.2. Pištolj za TIG	13
2.3.3. Zaštitni plin	15
2.3.4. Volframova elektroda	19
2.4. Pogreške u zavarenim spojevima TIG postupkom	25
2.5. Varijante TIG postupaka zavarivanja	26
2.5.1. TIP TIG zavarivanje.....	27
2.5.2. A-TIG.....	29
2.5.3. TIG zavarivanje impulsnim strujama.....	30
2.5.4. Visokofrekventno impulsno TIG zavarivanje.....	31
2.5.5. K-TIG.....	32
2.5.6. Orbitalno TIG zavarivanje	33
3. EKSPERIMENTALNI DIO	35
3.1. Opis eksperimenta.....	35
3.2. Osnovni materijal	35
3.3. Oprema za zavarivanja.....	36
3.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje	36
3.3.2. „BUG-O Systems“ automat	37
3.4. Postupak ispitivanja	38
3.4.1. Utjecaj promjene AC balansa	39
3.4.2. Rezultati ispitivanja utjecaja AC balansa.....	40
3.4.3. Analiza utjecaja AC balansa	43
3.4.4. Utjecaj promjene frekvencije zavarivanja.....	43
3.4.5. Rezultati ispitivanja utjecaja frekvencije	45
3.4.6. Analiza utjecaja frekvencije.....	48
4. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [4]	4
Slika 4.	Izvođenje sučeonog (lijevo) i preklopnog spoja(desno) [6].....	5
Slika 2.	Pištolj sa automatskim dodavanjem žice Masterweld AWT3000 [5]	5
Slika 3.	Položaj pištolja i žice kod ručnog TIG zavarivanja [3].....	5
Slika 5.	Izvođenje kutnog (lijevo) i rubnog spoja (desno) [6].....	6
Slika 6.	Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje [4]	6
Slika 7.	A) Negativan polaritet; B) Pozitivan polaritet [1].....	8
Slika 8.	Usporedba (A) neujednačenog AC valnog oblika i (B) ujednačenog AC valnog oblika [1]	9
Slika 9.	Zavar izveden sa $f=60$ Hz [7]	10
Slika 10.	Zavar izveden sa $f=200$ Hz [7]	10
Slika 11.	TIG pištolj sa pripadajućim dijelovima [9]	13
Slika 12.	Plinska sapnica bez mrežice (lijevo) i sa mrežicom (desno) [10]	18
Slika 13.	Geometrija elektrode [12]	21
Slika 14.	Različiti oblici vrhova elektrode [1].....	23
Slika 15.	Priprema ravnog vrha elektrode [12].....	23
Slika 16.	Pravilno izbrusen vrh (lijevo), nepravilno (desno) [7].....	24
Slika 17.	Brušenje volframove elektrode [12].....	24
Slika 18.	Nepravilno rezanje elektrode [1].....	25
Slika 19.	Shematski prikaz gibanja koje ostvaruje dodavač žice [13].....	27
Slika 20.	Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [13].....	28
Slika 21.	Poprečni presjek zavara izvedenih strujom 300 A; a) bez premaza; b) sa TiO_2 premazom [15]	29
Slika 22.	Struja u ovisnosti o vremenu kod impulsnog zavarivanja [16]	30
Slika 23.	Električni luk 1) Klasični TIG; 2) $f_H=20$ kHz; 3) $f_H=80$ kHz; [18].....	31
Slika 24.	Izgled zavara 1) Klasični TIG; 2) $f_H=20$ kHz; 3) $f_H=40$ kHz; 4) $f_H=80$ kHz; [18]	31
Slika 25.	Shematski prikaz K-TIG postupka [19]	32
Slika 26.	Glave za orbitalno TIG zavarivanje: otvorena (lijevo) i zatvorena (desno) [20] ..	33
Slika 27.	„EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“	36
Slika 28.	„BUG-O Systems“ automat.....	37
Slika 29.	Upravljački dio uređaja za zavarivanje [23].....	39
Slika 30.	Uzorak 1	40
Slika 31.	Uzorak 2	40
Slika 32.	Uzorak 3	40
Slika 33.	Tračna pila (lijevo) i uređaj za brušenje (desno)	41
Slika 34.	Stereo mikroskop LEICA MZ6	41
Slika 35.	Makroizbrusak 1) Uzorak 1, 2) Uzorak 2, 3) Uzorak 3	42
Slika 36.	Upravljački dio uređaja za zavarivanje [23].....	44
Slika 38.	Uzorak 4	45
Slika 39.	Uzorak 5	45
Slika 37.	Uzorak 2	45
Slika 40.	Uzorak 6	46
Slika 41.	Makroizbrusak uzorka 2	46
Slika 42.	Makroizbrusak uzorka 4.....	47
Slika 43.	Makroizbrusak uzorka 5.....	47

Slika 44. Makroizbrusak uzorka 6.....	48
---------------------------------------	----

POPIS TABLICA

Tablica 1. Izbor zaštitnog plina i upotreba [10]	15
Tablica 2. Preporuke za izbor promjera plinske sapnice i protoka [11]	17
Tablica 3. Vrijeme protoka plina nakon zavarivanja [11]	18
Tablica 4. Tipovi i boja volframovih elektroda [11]	19
Tablica 5. Podaci za ispitivanje primjenjivosti volframove elektrode [12]	21
Tablica 6. Greške, uzrok i rješenje kod TIG postupka [11]	25
Tablica 7. Kemijski sastav aluminijskog AlMg4.5Mn [21]	35
Tablica 8. Mehanička svojstva aluminijskog AlMg4.5Mn [22]	35
Tablica 9. Tehničke karakteristike stroja [23]	37
Tablica 10. Parametri zavarivanja	38
Tablica 11. Parametri tijekom zavarivanja uzoraka 1, 2 i 3	39
Tablica 12. Geometrijske značajke zavarivanja	43
Tablica 13. Parametri tijekom zavarivanja uzoraka 2, 4, 5 i 6	44
Tablica 14. Geometrijske značajke zavarivanja	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezanje
AC	-	Alternating current (izmjenična struja)
Al	-	Aluminij
Ar	-	Argon
Cr	-	Krom
Cu	-	Bakar
d	mm	Promjer elektrode
DC	-	Direct current (istosmjerna struja)
f	Hz	Frekvencija
Fe	-	Željezo
H	-	Vodik
He	-	Helij
I	A	Jakost struje
ISO	-	International Organization for Standardization
MAG	-	Metal Active Gas
Mg	-	Magnezij
MIG	-	Metal Inert Gas
Mn	-	Mangan
N	-	Dušik
O	-	Kisik
PA	-	Položaj zavarivanja
REL	-	Ručno elektrolučno zavarivanje
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Granica razvlačenja
Si	-	Silicij
t	sec	Vrijeme
T	K[°C]	Temperatura
Th	-	Torij
Ti	-	Titan
TIG	-	Tungsten Inert Gas
U	V	Napon
VF	-	Visokofrekventni
Zn	-	Cink
Zr	-	Cirkonij

SAŽETAK

Svrha ovog rada je detaljnije obraditi TIG postupak zavarivanja. Teorijski dio rada obuhvaća princip rada TIG postupka, potrebnu opremu za uspješnu primjenu, parametre kojima se upravlja, te greške koje se najčešće pojavljuju i kako ih spriječiti. Spomenute su i neke od modernih inačica TIG postupka i njihova primjena.

Eksperimentalnim dijelom su ispitane određene mogućnosti uređaja za zavarivanja „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“, a to su mogućnost promjene frekvencije izmjenične struje i podešavanje vremena provedenog na negativnom polaritetu izmjenične struje. Izvedeni su navari na 6 uzoraka od aluminijske oznake 5083 i promatran je utjecaj frekvencije i AC balansa na promjenu dimenzija zavara i zonu čišćenja oksida.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, izmjenična struja, frekvencija, AC balans.

SUMMARY

The purpose of this paper is to elaborate on the TIG welding process. The theoretical part of the paper covers the principle of work of the TIG process, the necessary equipment for successful application, the parameters that are managed, and the most common defects and how to prevent them. Some of the modern versions of the TIG process and their application are also mentioned.

The experimental part examines the specific capabilities of the welding power supply „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“, this are the ability to change the AC frequency and the adjustment of the time spent on the negative polarity of AC. Welds are made on 6 samples of aluminium grade 5083, and the influence of frequency and AC balance on the weld dimensions was observed.

Key words: TIG welding, AC, frequency, AC balance.

1. UVOD

Ovim radom detaljno je opisan postupak i oprema za TIG zavarivanje i njegove moderne inačice. Tungsten Inert Gas ili skraćeno TIG, je postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnog plina uz primjenu netaljive volframove elektrode sa ili bez dodatnog materijala.

TIG zavarivanje je razvijeno početkom Drugog svjetskog rata, kao odgovor na probleme vezane uz zavarivanje materijala poput aluminijske i magnezijске. Danas TIG zavarivanje nudi široku paletu materijala koji se mogu spajati ovim postupkom. Razvijene su mnoge inačice postupka omogućavajući mu razne nove primjene i poboljšanja postojećih. Primjena TIG postupka zavarivanja danas je u raznim područjima, neka od njih su: nuklearna industrija, zrakoplovna industrija, prehrambena industrija... TIG zavarivanje će se primjenjivati još dugo vremena zbog svojih specifičnih karakteristika, te će se trendovi razvoja i modernizacije postupaka nastaviti tražeći mu nove primjene.

Eksperimentalni dio rada obuhvaća ispitivanje nekih mogućnosti modernog uređaja za TIG zavarivanje „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“. Te mogućnosti su namještanje odgovarajuće frekvencije i opcije kod uporabe izmjenične struje vezano uz postotak vremena provedenog na negativnom polaritetu. Na uzorcima od aluminijske oznake 5083 izvedeni su navari automatiziranim TIG postupkom bez dodatnog materijala. Ispitivanja su provedena u laboratoriju Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

2. TIG ZAVARIVANJE

2.1. Uvod u TIG postupak zavarivanja

Za početak krenuto je od samog imena postupka „TIG“, što je skraćenica za „Tungsten Inert Gas“. Iz tog naziva se zaključuje da je ovo elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom od volframa uz zaštitu s inertnim plinom, sa ili bez dodatnog materijala. TIG postupak zavarivanja se smatra najfleksibilnijim postupkom zavarivanja u pogledu široke palete materijala koji se mogu s ovim postupkom spajati. Omogućava nam zavarivanje gotovo svih materijala, kao što su aluminij, magnezij i njihove legure, titan, kositar, silicij, ugljične čelike, legirane čelike, nehrđajuće čelike, bakrene i niklove legure, aluminijske bronce pa čak i lijevano željezo (iako vrlo rijetko za lijevano željezo). TIG postupkom moguće je spajanje mnogo materijala sa zavarima koji su jednake ili bolje kvalitete u odnosu na ostale postupke zavarivanja. Postupak je moguće izvoditi ručnim ili automatiziranim postupkom. Pored ovakve fleksibilnosti spajanja velikog broja materijala TIG postupka zavarivanja i dalje se neće koristiti u dosta slučajeva. Objašnjenje za taj problem se krije u tome što je oprema dosta skuplja u odnosu na npr. plinsko zavarivanje i ručno elektrolučno (REL). Idući razlog je taj što recimo MIG/MAG postupak zavarivanja iako nema toliku fleksibilnost u pogledu materijala, nudi puno veći depozit dodatnog materijala. TIG zavarivanje ima mogućnost uporabe kontinuirane dobave žice, čime povećavamo depozit, ali to nam samo uvodi dodatni uređaj koji mora predgrijavati dodatni materijal i dodavati ga u električni luk, tako da je MIG/MAG i dalje u prednosti. Mnogo je prednosti i nedostataka ovog postupka, te su navedene u nastavku [1].

Prednosti [2]:

- Primjenjiv za zavarivanje svih materijala,
- Nema rasprskavanja kapljica,
- Zavarivanje u svim položajima,
- Zavarivanje u radionici i na terenu,
- Visoka kvaliteta zavara,
- Nema troske, dima i isparavanja,
- Raspon debljina uobičajeno 1-6 mm,

- Brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka,
- Mogućnost automatizacije,
- Moguće predgrijavanje dodatnog materijala.

Nedostaci [2]:

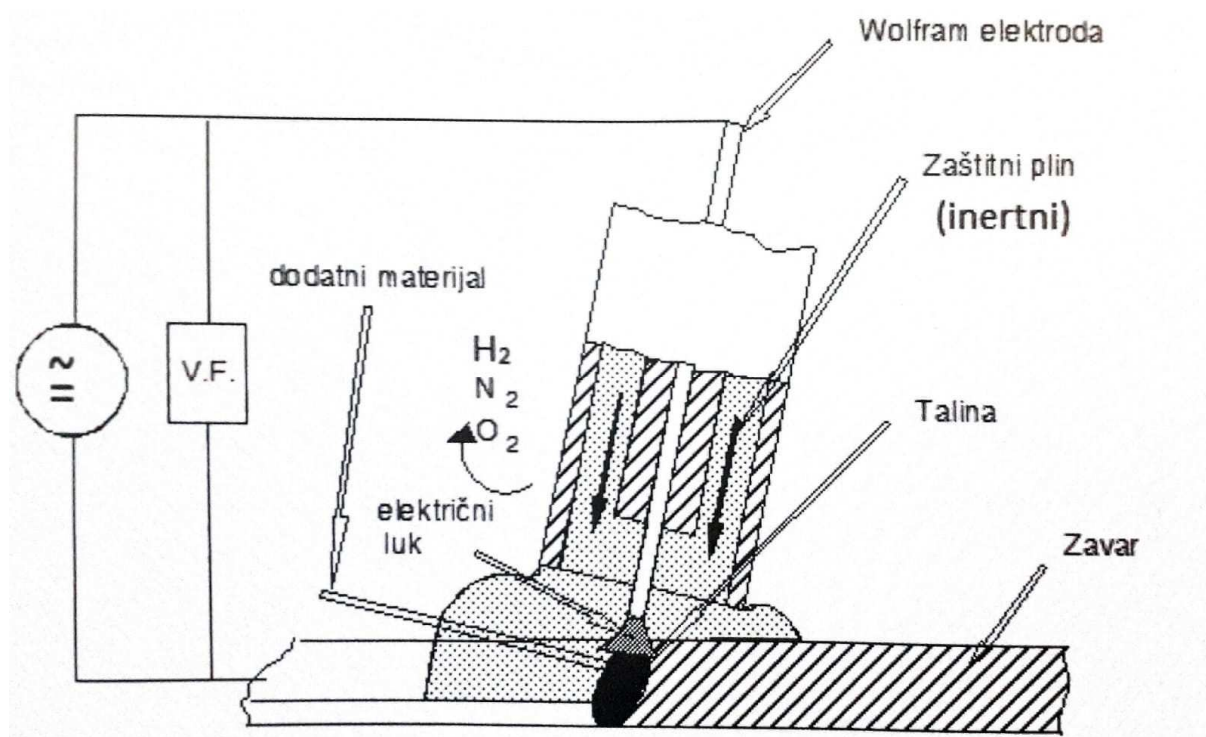
- Neekonomičnost za veće debljine (mala količina nataljenog materijala),
- Otežan rad na otvorenom (vjetar),
- Kvaliteta pripreme spoja (geometrija, odmašćivanje),
- Čistoća površine,
- Utjecaj ljudskog faktora – zavarivač.

Navedene prednosti i nedostaci određuju primjenu ovoga postupka, te iako je on pogodan za velik broj materijala on neće uvijek biti prvi izbor, mnogo je postupaka koji za pojedine primjene imaju bolja svojstva od TIG postupka zavarivanja. No, danas ipak prvi kriteriji za odabir postupka je raspoloživost opreme, odnosno kakvu opremu već imamo u radioni.

2.2. Princip rada TIG zavarivanja

TIG postupak omogućava ručno, poluautomatsko ili automatsko zavarivanje. Prvi korak procesa je uspostava električnog luka. Električna struja dolazi iz izvora struje zavarivanja, jedan kraj vodiča je spojen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje, odnosno na volframovu elektrodu. Uspostava električnog luka je moguća na tri načina, danas se uglavnom koristi samo jedan, a to je visokofrekventno (VF) uspostavljanje luka. To omogućava poseban uređaj koji na pritisak prekidača daje visokofrekventnu električnu struju. Drugi načini su „lift arc“ i kratkim spojem. „Lift arc“ funkcionira na način da se elektroda prisloni na metal i njenim podizanjem, odnosno odvajanjem od metala uspostavlja se luk. Ovaj način se može naći još u uporabi za razliku od paljenja kratkim spojem koji se lagano zaboravlja. Zavarivač u jednoj ruci drži pištolj za zavarivanje, a u drugoj dodatni materijal u obliku žice. Pritiskom na prekidač pištolja, prvo dolazi do puštanja zaštitnog plina kako bi postigli odgovarajuću atmosferu, koja se daje što lakše ionizirati za uspostavljanje luka i

daljnje zavarivanje. Zaštitni plin još služi za zaštitu vrha volframove elektrode i štiti talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima. Za to se koriste inertni plinovi, argon (Ar) i helij (He). Nakon puštanja zaštitnog plina uspostavlja se električni luk između osnovnog materijala i volframove elektrode. Pištolj se drži malo iznad mjesta zavarivanja. Električni luk tali osnovni materijal, a zavarivač povremeno dodaje dodatni materijal u prednji rub taline osnovnog materijala, te se ona tamo tali i tvori zavareni spoj zajedno s talinom osnovnog materijala. Zavarivač pomiče pištolj duž pripremljenog mjesta zavarivanja odgovarajućom tehnikom, te ponovnim pritiskom na prekidač prekida električni luk, dok zaštitni plin još kratko vrijeme teče i štiti talinu i vrh elektrode tijekom hlađenja. Za to vrijeme pištolj mora biti iznad mjesta zavarivanja. Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnih plinova prikazan je na slici 1 [3].



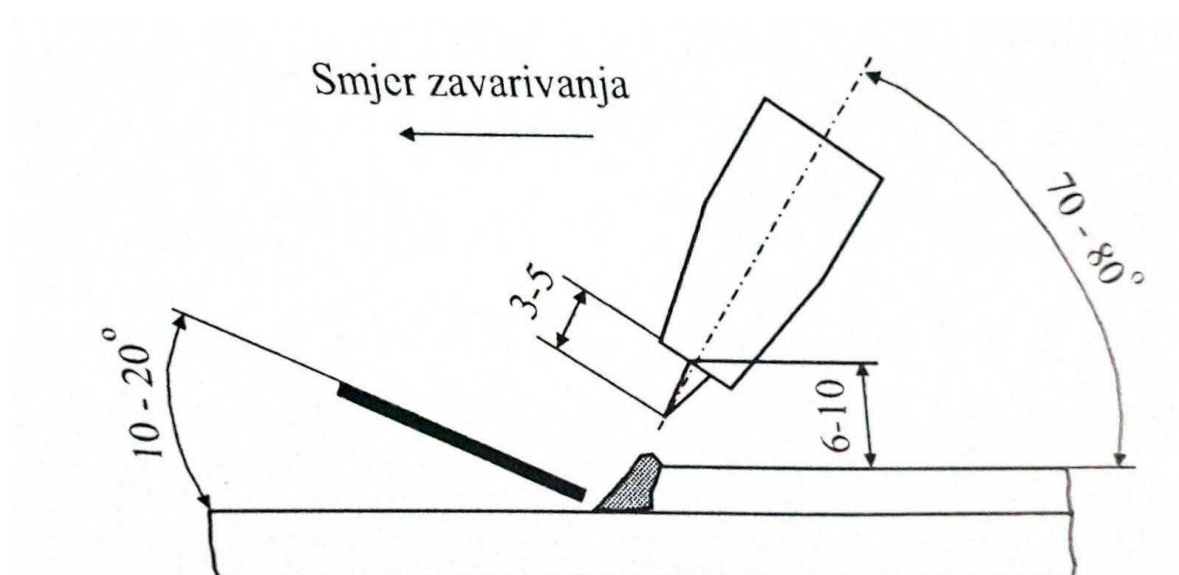
Slika 1. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [4]

Poluautomatsko zavarivanje je slično kao i ručni postupak, jedino se dodatni materijal dodaje u talinu pomoću elektromotornog sustava za dovod žice, a za automatsko zavarivanje potrebno je takav pištolj učvrstiti na automat za zavarivanje ili robot. Prikaz pištolja sa automatskim dodavanjem žice je na slici 2 [3].

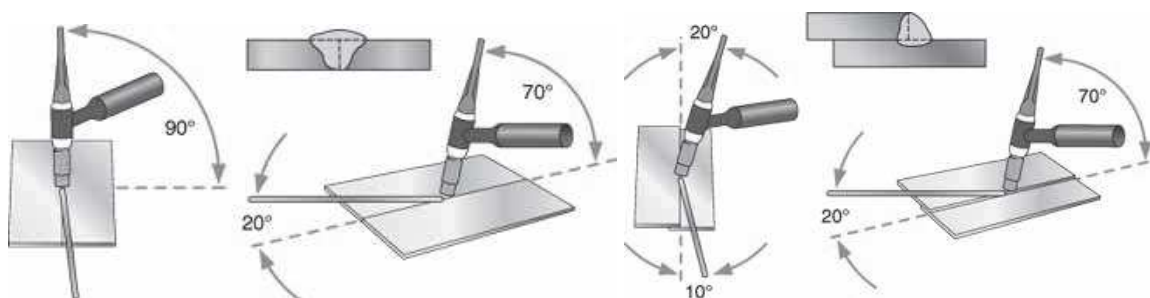


Slika 2. Pištolj sa automatskim dodavanjem žice Masterweld AWT3000 [5]

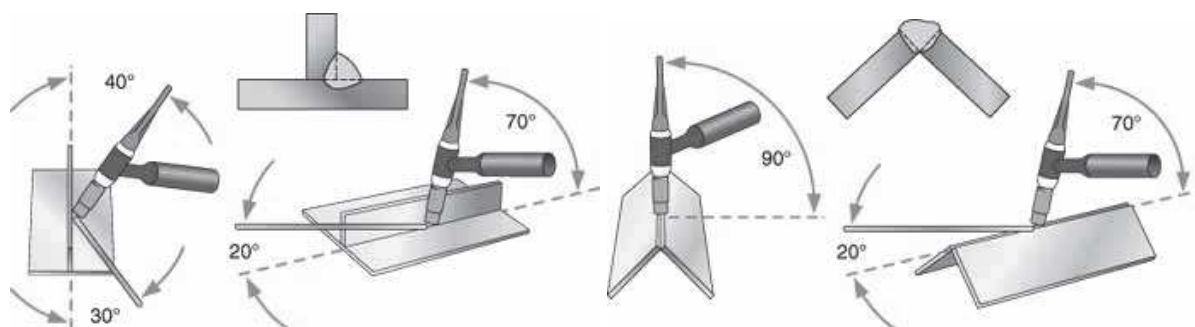
Položaj pištolja i dodatnog materijala kod TIG zavarivanja prikazan je na slici 3. Vođenje je lijevom tehnikom rada, pištolj je blago nagnut, te se talina gura prema naprijed sa ili bez dodavanja dodatnog materijala. Na slikama 4 i 5 su prikazane tehnike izvođenja TIG zavarivanja na spojevima.



Slika 3. Položaj pištolja i žice kod ručnog TIG zavarivanja [3]



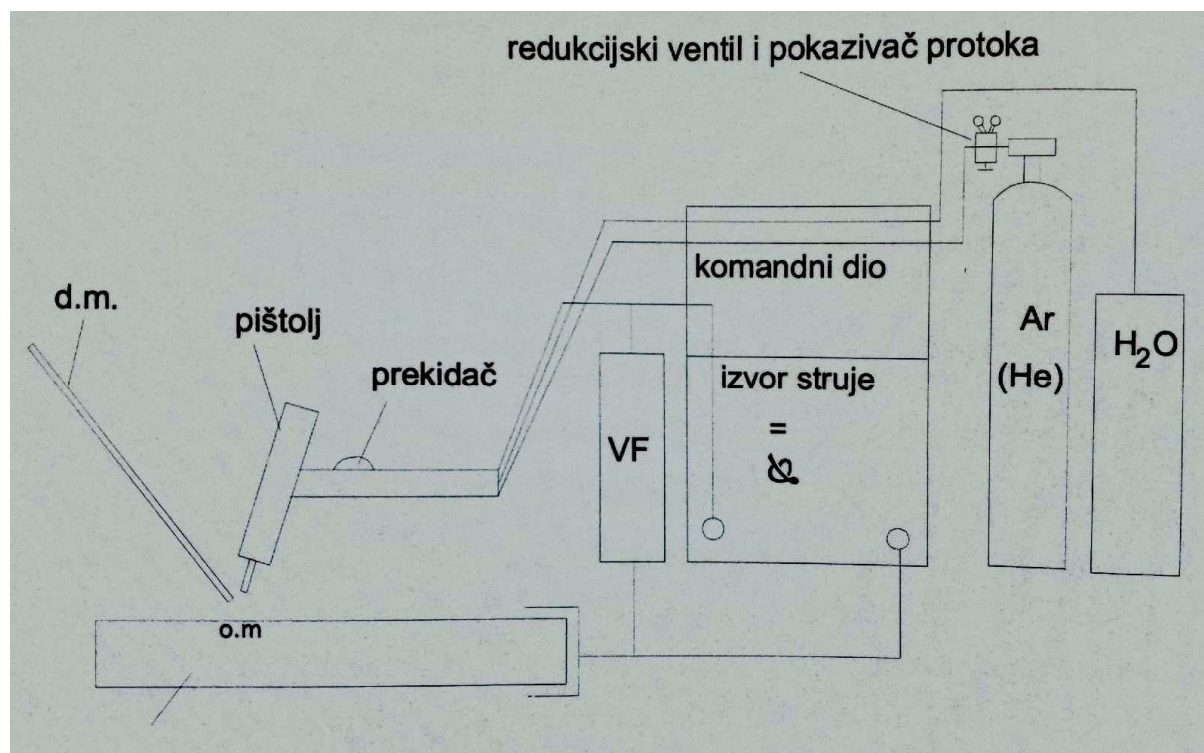
Slika 4. Izvođenje sučeonog (lijevo) i preklopnog spoja(desno) [6]



Slika 5. Izvođenje kutnog (lijevo) i rubnog spoja (desno) [6]

2.3. Oprema za TIG zavarivanje

Osnovnu opremu za TIG postupak zavarivanja čine: izvor struje, komandni dio, zaštitni plin i pištolj za zavarivanje. Pojednostavljen prikaz opreme za TIG zavarivanje je prikazana na slici 6.



Slika 6. Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje [4]

2.3.1. TIG izvori struje

Izvori struje koji se koriste za TIG zavarivanje su istosmjerni, izmjenični i kombinirani, odnosno ispravljači, transformatori, rotacijski pretvarači, inverteri i agregati. Ukoliko se radi

o ručnom zavarivanju potrebno je imati strmo padajuću statičku karakteristiku, koja nam neovisno o promjeni dužine luka uslijed zavarivanja osigurava približno konstantnu struju [4].

Izmjenična struja AC:

Ukoliko se upotrebljava AC aparat za zavarivanje, izvor struje mora sadržavati posebne strujne krugove koji će održavati električni luk prilikom promjene polariteta izmjenične struje. Bez tih strujnih krugova bilo bi izrazito teško održavati električni luk jer valna karakteristika struje prođe preko nula ampera 120 puta u sekundi (pri struji 60 Hz) prilikom promjene polariteta. Jedan od načina održavanja električnog luka je osigurati veoma visoku frekvenciju na uobičajenu 60 Hz izmjeničnu struju zavarivanja, što znači da će TIG izvor struje koštati više od izvora potrebnog za REL zavarivanje (ručno elektrolučno), ali takav izvor omogućava upotrebu i za REL postupak zavarivanja, te nudi veću fleksibilnost[1].

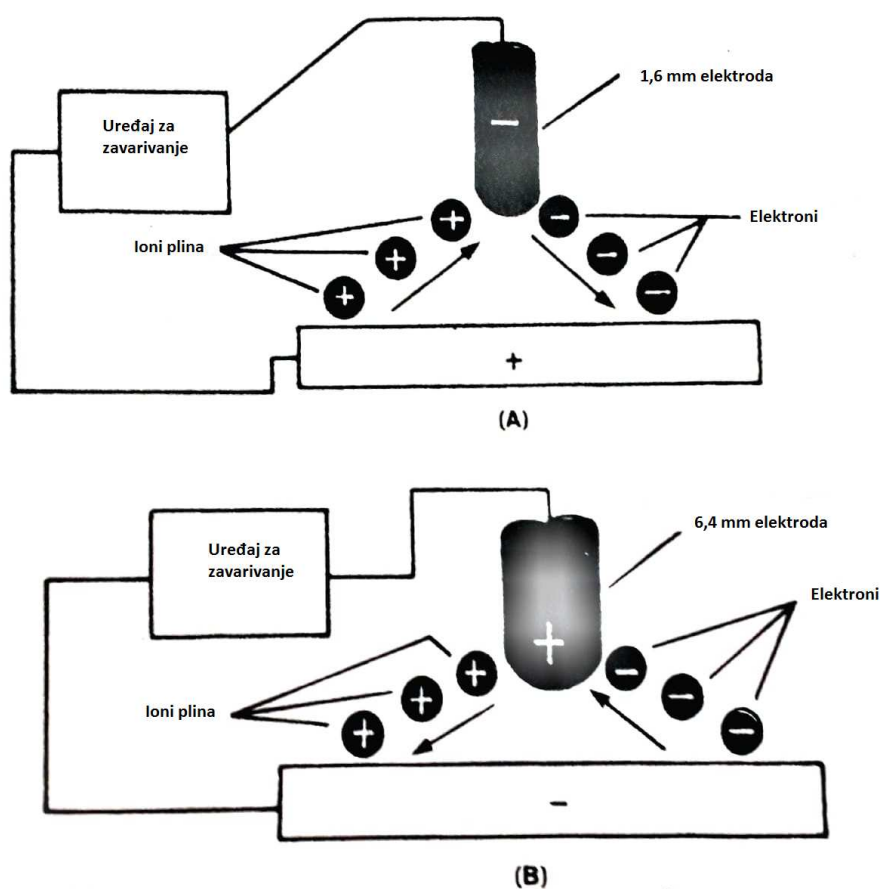
Istosmjerna struja DC:

Kod primjene istosmjerne struje imamo dvije mogućnosti, jedna je elektroda na pozitivnom polaritetu, a druga je elektroda na negativnom polaritetu. U praksi se češće susrećemo s elektrodom na negativnom polaritetu.

Negativni polaritet na elektrodi, a pozitivan na osnovnom materijalu nam osigurava da je veći udio topline $\approx 70\%$ na pozitivnom kraju (osnovnom materijalu), a manji udio $\approx 30\%$ na negativnom (elektroda). Elektroda sa negativnim polaritetom je hladnija nego kad je spojena na pozitivan pol. Time nam je moguća primjena elektroda manjih promjera bez da se pregriju. Npr. elektroda promjera 1,6 mm ima mogućnost rada na 125 A, što bi elektroda na pozitivnom polu mogla jedino s duplo većim promjerom. Zavarivanjem s elektrodom na negativnom polaritetu osigurava užu talinu i veću penetraciju, razlog tome je što elektroni putuju s volframove elektrode i penetriraju u osnovni materijal, rezultat je uži zavar i zona utjecaja topline, veća dubina zavora, manje deformacija i veće brzine zavarivanja.

Pozitivan polaritet na elektrodi, a negativan na osnovnom metalu ima prednost u tome što čisti površinu od oksida koji su nepoželjni prilikom zavarivanja. Primjer takvih materijala su aluminij, magnezij i titan, te njihove legure. Kod pozitivnog polariteta elektroni putuju s negativnog pola (osnovni materijal), kreću se prema gore i udaraju u pozitivnu volframovu elektrodu, osiguravajući da oksidi na površini ne formiraju čvrsti film na zavaru. To se naziva

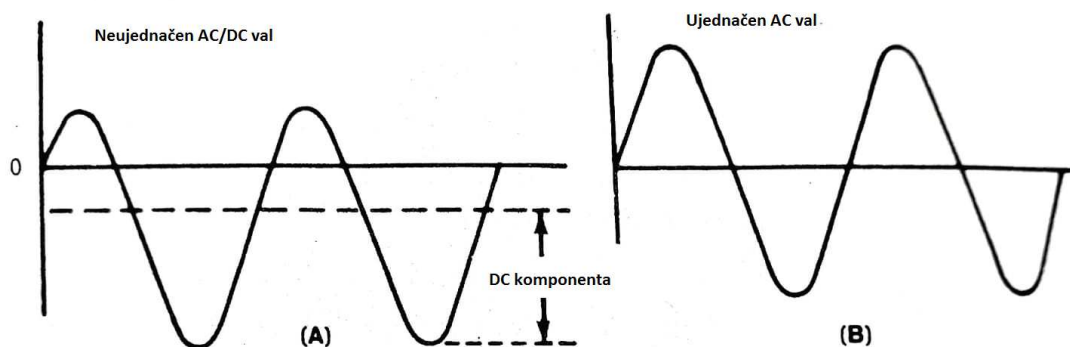
čišćenje oksidnog filma, te se ista takva pojava čišćenja događa i kod uporabe AC struje (jer je pola vremena na plus polu, a pola na minus polu), te se i AC struja koristi za zavarivanje aluminija, magnezija i titana. Uporaba elektrode na pozitivnom polaritetu dovodi do većeg zagrijavanja volframove elektrode, te sam zavar je plitak i širok. Volframove elektrode nisu jeftine, te zbog zagrijavanja se moraju upotrebljavati elektrode većih promjera, tako npr. za struju od 125 A potrebno je imati elektrodu promjera 6,4 mm, što je puno veći promjer od zavarivanja s negativnim polaritetom. Tako da pozitivan polaritet ima ograničavajuću primjenu. Gibanje elektrona prikazano je na slici 7 [1].



Slika 7. A) Negativan polaritet; B) Pozitivan polaritet [1]

Kao što je rečeno negativan polaritet elektrode osigurava njeno manje zagrijavanje, dok je na pozitivnom suprotno. Primjenom izmjenične struje reklo bi se da će zagrijavanje elektrode biti negdje na pola između prva dva navedena slučaja, no to nije tako. Volframova elektroda uzrokuje da izmjenična struja bude neuravnotežena. To je tako jer struja lakše proteče kroz elektrodu kada je na negativnom polaritetu nego obrnuto. Primjenom istog napona kroz elektrodu na negativnom polu će poteći puno više elektrona nego kroz elektrodu na

pozitivnom polu. Što znači da će pola vremena napon biti veći od očekivanog, a pola vremena manji od očekivanog, to uzrokuje neujednačeno zagrijavanje elektrode i neujednačen valni oblik izmjenične struje (slika 8).

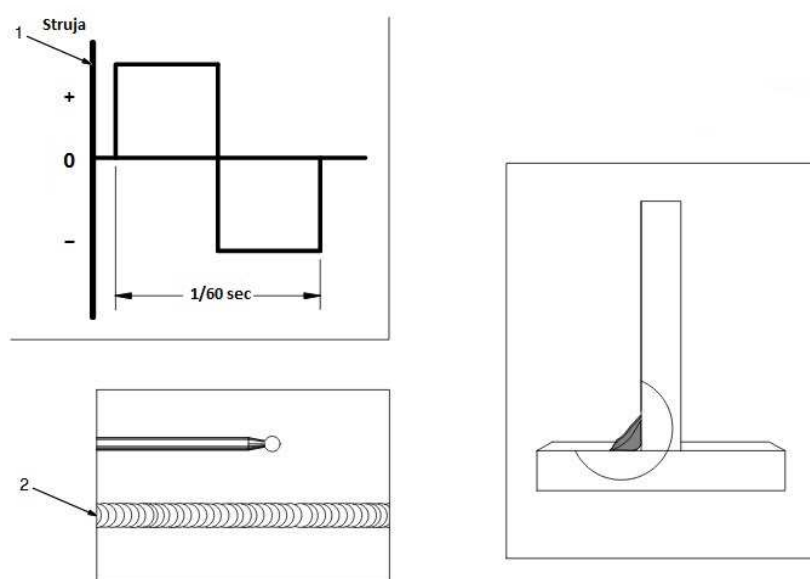
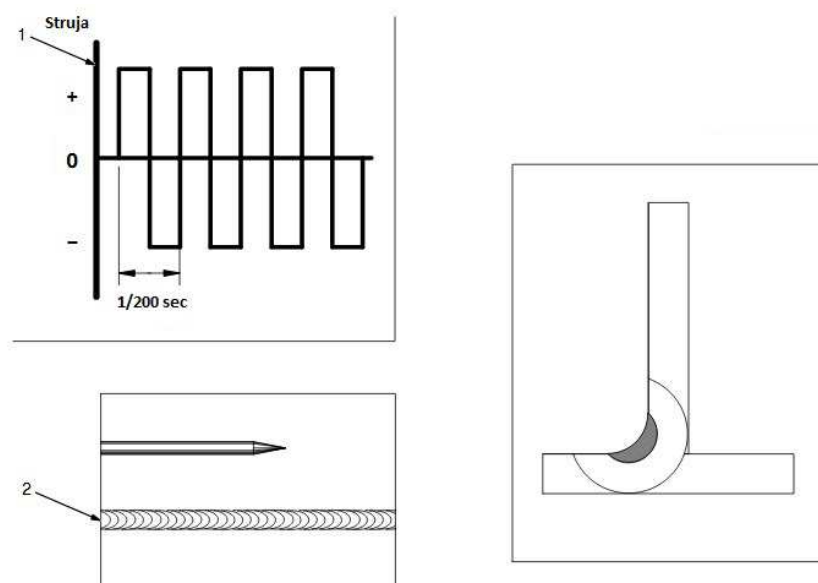


Slika 8. Usporedba (A) neujednačenog AC valnog oblika i (B) ujednačenog AC valnog oblika [1]

TIG postupak zavarivanja zahtjeva primjenu ujednačenog AC valnog oblika, tako da nisu svi izvori izmjenične struje prikladni za TIG zavarivanje. Ukoliko koristimo izvor struje za REL, potrebno je u uputama proizvođača potražiti da li izvor sadrži posebne dodatke za ujednačeni AC valni oblik ili ne. Ukoliko je nužno koristiti neujednačeni način to je moguće, no preporuka je da se nikada ne prelazi struja veća od 50% kapaciteta uređaja, jer će doći do pregrijavanja [1].

Danas je trend fleksibilnost, te su najtraženiji uređaji s mogućnosti AC/DC zavarivanja s polaritetom po izboru. Postoje uređaji na kojima je moguće ručno promijeniti polaritet, a i izvedbe s prekidačem. Bitno je napomenuti da promjena tipa struje i polariteta nikako ne smije biti za vrijeme zavarivanja [1].

Moderni uređaji nude i opcije promjene frekvencije, čime se utječe na oblik zavora. Povećanjem frekvencije se dobiva uži i dublji zavar. Utjecaj frekvencije prikazan je na slikama 9 i 10. Na slikama su oznakom 1 označeni valni oblici struje, a oznakom 2 izgled zavora. Vidljivo je da sa 60 Hz zavar nema dovoljnu penetraciju u aluminij, a s 200 Hz zavar je puno uži i ima dobru penetraciju u materijal. Tako da nižim AC frekvencijama se postiže širi zavar s manjom penetracijom, a s višim AC frekvencijama uži zavar s većom penetracijom [7].

Slika 9. Zavar izveden sa $f=60$ Hz [7]Slika 10. Zavar izveden sa $f=200$ Hz [7]

Karakteristike koje većina TIG uređaja posjeduje [1]:

- On/off prekidač,
- Kontinuirana promjena struje,
- Prekidač za promjenu polariteta,
- VF(visoko frekventni) uspostava el. luka,
- Pomoćne kontrole za zaštitni plin i hlađenje vodom, ampermetar,

- Tajmeri za uključivanje/isključivanje zaštitnog plina prije i poslije zavarivanja na određeno vrijeme,
- Promjenu valnog oblika struje ,
- Promjena struje pomoću nožne pedale.

Prema načinu pretvorbe energije uređaji za zavarivanje dijele se na [8]:

- Transformatore,
- Ispravljače,
- Rotacijske pretvarače,
- Agregate,
- Invertere.

Unutar ovih osnovnih grupa ima još puno podjela ovisno o upravljanju strujom i naponom. Postoje uređaji koji su primjenjivi samo za određeni tip zavarivanja, dok ima i uređaja koji imaju široki spektar mogućnosti, kao što su REL, TIG, MIG. Uređaji su različiti ovisno o namjeni, nekima je prioritet obavljanje više različitih postupka, ali ni jedan velikim kapacitetom, oni žrtvuju intermitenciju i visoke struje u zamjenu za fleksibilnost. Manja intermitencija i niske struje zavarivanja znače manje bakra i željeza u konstrukciji uređaja, održavajući niske troškove. Drugi strojevi koji su dizajnirani za jedan proces zavarivanja mogu koštati puno više, ali imaju 100% intermitenciju i jako visoke struje [1].

Transformatori:

Služe za pretvorbu visokih napona i malih struja gradske mreže u male napone i visoke struje potrebne za zavarivanje.

Najjednostavniji tip AC transformatorskog izvora struje ima nekoliko priključaka za spojiti elektrodu kako bi dobili izmjeničnu struju za zavarivanje. Svaki priključak daje samo jednu vrijednost struje, što pojednostavljuje konstrukciju uređaja, a time i cijenu, ali uvelike smanjuje fleksibilnost. Prilikom odabira visokih struja, napon otvorenog kruga pada (čak do 50 V). Smanjen napon na visokoj struji i nemogućnost finog upravljanja struje čini ovakve transformatore neprikladnim za TIG zavarivanje.

Drugi tip AC transformatora sadrži pomični dio unutar stroja koji se pomiče u transformatorskoj zavojnici te osigurava puni raspon struja. Ovakvi strojevi su konstruirani

samo za REL zavarivanje. Ako se koristi za TIG potrebno je paziti da se ne prijede 50% raspoložive struje zavarivanja. Npr. uređaj klase 200 A ne bi smio koristiti struju veću od 100 A za TIG zavarivanje [1].

Ispravljači:

Ulaz u ispravljač je izmjenična struja, a kao izlaz može dati i AC i DC, te istosmjerna struja može biti polariteta po želji. Sastoje se od transformatora i ispravljačkog dijela. Prvo se transformira struja pomoću transformatora za zavarivanje, a onda se ispravlja pomoću poluvodičke diode, tiristora, tranzistora, itd. Prednost uporabe ispravljača je stabilniji električni luk, ali su skuplji od transformatora, manji im je stupanj iskorištenja i osjetljiviji su na pad napona [8].

Rotacijski pretvarači:

Glavna namjena im je za rad na terenu i područjima s nestabilnom električnom mrežom. Pomoću generatora ili elektromotora pretvaraju struju iz električne mreže u struju pogodnu za zavarivanje. Mogu se i kombinirati s ispravljačem što nam daje mogućnost izmjenične i istosmjerne struje. Nedostatak im je visoka cijena, buka i niži stupanj iskorištenja, ali u usporedbi s ispravljačem lako transformiraju struju napona 380 V na 50 V [8].

Agregati za zavarivanje:

Pružaju rad neovisan o električnoj mreži. Idealni za montažu na terenu. Upotrebljavaju benzinski ili dizel motor koji pokreće generator te daje struju za zavarivanje. Nedostatak je viša cijena u odnosu na transformatore i ispravljače [8].

Inverteri za zavarivanje:

Moderni izvori struje koji se danas sve više upotrebljavaju zbog niza prednosti koje nude. Nude mogućnosti istosmjerne ili izmjenične struje, te opciju visokofrekventne impulsne struje. Glavna prednost invertera je mala težina i dimenzije. Sastoji se od ispravljača koji ispravlja struju gradske mreže, tiristora koji istosmjernu struju „sjecka“ i daje impulse do 50 kHz, te slijedi transformiranje na napon pogodan za zavarivanje [8].

2.3.2. Pištolj za TIG

Pištolj za TIG je elektronički uređaj, te jednako kao i izvori struje ima odgovarajuću intermitenciju, to je maksimalna struja pri kojoj može zavarivati, uobičajeno je ponuđeno više jačina struje, jer manje struje unose manje topline pa se mogu duže koristiti.

Maksimalna struja za TIG pištolj je najveća struja zavarivanja kod koje neće doći do ozbiljnijeg zagrijavanja, pri upotrebi najvećeg promjera torirane volframove elektrode za koju je pištolj konstruiran, te najduže keramičke sapnice najvećeg mogućeg promjera za odgovarajući pištolj, uz primjenu negativnog polariteta s helijem kao zaštitnim plinom (helij postiže više temperature od argona). Sve ovo se mjeri dok se zavaruje zavar na nehrđajućem čeliku u PA položaju, koji stvara otežane uvjete zavarivanja za pištolj.

U praksi prilikom korištenja pištolja, ali s elektrodom od čistog volframa na izmjeničnoj struji, potrebno je imati na umu da će intermitencija biti manja nego u ranije navedenim uvjetima. Razlog tome je puno veće zagrijavanje zbog izmjenične struje, jednako tako i pri zavarivanju s pozitivnim polaritetom.

TIG pištolj se sastoji od dijela za prihvata (držača) koji je izoliran i kroz njega prolazi žica za struju spojena na izvor, cijevi za dovod zaštitnog plina, zaštitne kape, sapnice za plin, kontaktne sapnice i držača za kontaktne sapnice. Izgled TIG pištolja s pripadajućim dijelovima prikazan je na slici 11 [1].



Slika 11. TIG pištolj sa pripadajućim dijelovima [9]

Sapnica za plin:

Zadaća sapnice za plin jest usmjeravanje zaštitnog plina prema metalu zavora, ali i zaštita vrha volframove elektrode. Danas se koriste sapnice napravljene od keramike, dok su nekada bile od stakla. Keramički materijal danas u upotrebi je aluminij-oksidsna keramika, koja je ujedno otporna i na visoke temperature i električki je vodljiva. Ta su svojstva izrazito bitna jer sapnica sadržava elektrificiranu volframovu elektrodu, a i vrući ionizirani zaštitni plin [1].

Zaštitna kapa:

Na stražnjem kraju TIG pištolja za zavarivanje nalazi se zaštitna kapa, čija je glavna svrha zaštita volframove elektrode. Postoje razne veličine zaštitnih kapa, neke su izrazito duge kako bi mogle prihvatiti cijelu volframovu elektrodu, što je puno ekonomičnije i brže jer nije potrebno skraćivanje elektroda, samo povremeno nabrusiti vršni kraj kada se potroši. Ali ukoliko posao nalaže zavarivanje u uskim prostorima onda je praktičnija upotreba kratkih zaštitnih kapa [1].

Sustav za hlađenje:

Upotrebljava se kod pištolja koji rade na visokim strujama, tada sadrže dvije dodatne cijevi za dovod i odvod vode za hlađenje. Upravo po tome je i jedna od podjela TIG pištolja, hlađeni vodom ili zrakom.

Zrakom hlađeni pištolj ovisi o zraku koji ga okružuje, tako da intermitencija pištolja ovisi o veličini plinske sapnice. Ukoliko se koristi kratka sapnica potrebno je imati na umu da će maksimalna struja biti manja od propisane, kao i ako se zavarivanje odvija u uskom prostoru, kao što je na primjer V spoj, u kojem dolazi do puno većeg reflektiranja topline.

Vodom hlađeni pištolj omogućavaju upotrebu manjih dimenzija pištolja za zavarivanje većim strujama. Voda za hlađenje se doprema kroz prolaze u glavi pištolja kako bi odvodila toplinu. Toplina iz kontaktne sapnice se prenosi na glavu pištolja gdje se odvodi pomoću vode za hlađenje ili je voda u kontaktu s jednim dijelom kontaktne sapnice. Voda za hlađenje odvodi se u crijevo koje ujedno izolira kabel za zavarivanje. Takva izvedba omogućava uporabu manjih kablova za danu intermitenciju. Uporaba vodom hlađenog pištolja nikako nije dozvoljena kao zrakom hlađenog, jer bez vode koja okružuje kabel njegov kapacitet za struju se značajno smanjuje [1].

Vođenje TIG pištolja je moguće ručno i automatizirano. Automatizirano vođenje se upotrebljava kada je potrebna velika preciznost vođenja električnog luka, ali i kada su potrebne velike brzine zavarivanja kako bi se dobio odgovarajući spoj. Konstrukcija pištolja je ista kao i kod ručnog vođenja, samo umjesto dijela za prihvat pištolja ima izvedbu držača ovisno o aparatu ili robotu na koji se pričvršćuje [1].

2.3.3. Zaštitni plin

Zaštitni plinovi koji se upotrebljavaju za TIG zavarivanje su inertni plinovi, argon i helij. Moguća je i njihova kombinacija ukoliko se žele iskoristiti njihove pojedine karakteristike, te se još i upotrebljavaju dodaci dušika i vodika u posebnim primjenama. Čistoća argona i helija mora biti viša od 99,995%. Temperature kondenzacije ovih plinova su $-56,6^{\circ}\text{C}$ ili niže. Temperatura kondenzacije je temperatura pri kojoj se zrcalo počinje magliti kada se plin usmjeri na njega. Svrha uporabe zaštitnog plina je zaštititi metal zavora od zraka, ali i zaštita volframove elektrode od oksidacije.

Argon je najčešće upotrebljavani plin za TIG zavarivanje zbog toga što osigurava manji napon električnog luka od helija za sve iznose struja i dužine električnoga luka. Ujedno i osigurava tiše i glađe vođenje električnog luka, te je i paljenje električnog luka puno lakše nego s helijem. Argon je puno teži od helija te zbog toga možemo koristiti manji protok plina za pognute pozicije zavarivanja, dok je u slučaju nadglavnog zavarivanja bolje upotrebljavati helij, jer zbog svoje manje težine zadržava se duže na mjestu zavarivanja. Helij se upotrebljava za zavarivanje težih konstrukcija jer kod njih veći napon električnog luka je prednost. Argon se upotrebljava za zavarivanje tankih konstrukcija zbog toga što unosi manje topline i time se postižu manje deformacije, ujedno su i manje šanse da će se pregorjeti osnovni metal [1]. U tablici 1 su prikazana uputstva za izbor zaštitnog plina te njihove karakteristike, a u tablici 2 preporuke za izbor promjera plinske sapnice i protoka.

Tablica 1. Izbor zaštitnog plina i upotreba [10]

Osnovni materijal	Debljina	Ručno ili automatizirano	Zaštitni plin	Karakteristike
Aluminijske i magnezijeve legure	Mala	Ručno	Čisti argon	-najlakše paljenje el. luka -kontrola penetracije -čistoća i izgled uskih zazora

	Velika	Ručno	75 Ar – 25 He	-veći unos topline s dobrim paljenjem el. luka zbog argona, ali s većim brzinama zavarivanja
	Opća primjena	Ručno	Čisti argon	-najlakše paljenje el. luka -kontrola penetracije -čistoća i izgled uskih zazora
	Mala	Automatizirano	50 Ar – 50 He	-veće brzine zavarivanja ispod 20 mm debljine, s dobrim paljenjem i stabilnosti el. luka
Cu legure Cu-Ni legure Ni legure	Velika	Automatizirano	Čisti helij	-najveće brzine zavarivanja -veća penetracija na negativnom polu -zahtjevno paljenje el. luka -potreban velik protok
	Mala	Ručno	Čisti argon	-dobra kontrola taline -izgled zavora -penetracija uskih zazora
	Velika	Ručno	75 Ar – 25 He	-veći unos topline sa dobrim paljenjem luka zbog argona, ali sa većim brzinama zavarivanja
	Opća primjena	Ručno	75 Ar – 25 He	-veći unos topline s dobrim paljenjem luka zbog argona, ali s većim brzinama zavarivanja
	Velika	Automatizirano	25 Ar – 75 He	-veće brzine zavarivanja ispod 20 mm debljine, sa dobrim paljenjem i stabilnosti el. luka
Niskougljične legure i niskolegirani čelici	Mala	Ručno	Čisti argon	-najlakše paljenje el. luka -kontrola penetracije -čistoća i izgled uskih zazora
	Velika	Ručno	75 Ar – 25 He	-veći unos topline s dobrim paljenjem el. luka zbog argona, ali s većim brzinama zavarivanja

	Opća primjena	Ručno	Čisti argon	-lagano paljenje el. luka -kontrola penetracije -čišćenje i izgled
Nehrđajući čelici	Mala	Ručno	Ar za $t < 1,6^*$; 95 Ar – 5 H za $t > 1,6^*$;	-argon s dodatkom vodika povećava unos topline i poboljšava izgled zavora, uz manji protok plina -poboljšava razlijevanje taline -minimizira zajede uz zavar
	Velika	Ručno	75 Ar – 25 He	-veći unos topline s dobrim paljenjem el. luka zbog argona, ali s većim brzinama zavarivanja

* t – debljina materijala;

Tablica 2. Preporuke za izbor promjera plinske sapnice i protoka [11]

Debljina materijala (mm)	Promjer plinske sapnice (mm)	Protok zaštitnog plina	
		Argon (L/min)	Helij (L/min)
< 1	9,5	3,4	7,5
1 - 3	9,5	4,5	9,5
3 – 5	12,5	5,6	11,8
5 - 9	12,5	7,0	14,2
9 - 12	16,0	8,0	16,5
> 12	25,0	12,0	21,0

Zaštita plinom nije bitna samo tijekom zavarivanja, ključnu ulogu ima i prije početka i nakon završetka zavarivanja, razlog tome je što želimo spriječiti kontaminaciju bazena taline i volfraove elektrode stvarajući zaštitnu atmosferu. Preporuka za izbor vremena protoka plina nakon zavarivanja dana je u tablici 3.

Tablica 3. Vrijeme protoka plina nakon zavarivanja [11]

Promjer elektrode (mm)	Vrijeme protoka plina nakon zavarivanja
0,25	5 sec
0,5	5 sec
1,0	5 sec
2,0	8 sec
2,4	10 sec
3,0	15 sec

Protok plina varira ovisno o promjeru sapnice, zaštitnom plinu i uvjetima zavarivanja. No i uz odgovarajući protok učinkovitost plinske zaštite može biti uvelike smanjena ako je slobodni kraj elektrode prevelik. Nedovoljan protok plina, prevelik slobodan kraj elektrode, nedovoljno vrijeme protoka plina nakon zavarivanja, sve to može dovesti do kontaminacije zavara zrakom. Slobodni kraj elektrode ne bi smio biti veći od promjera plinske sapnice [1].

Učinkovitost plinske zaštite je moguće poboljšati uporabom plinskih sapnica s mrežicom kojom se omogućava da plin izlazi jednolikim tokom iz sapnice, umjesto turbulentnim koji se

**Slika 12. Plinska sapnica bez mrežice (lijevo) i sa mrežicom (desno) [10]**

raspršuje odmah nakon izlaza iz sapnice. Jednoliki tok plina daje mogućnost većeg slobodnog kraja elektrode, čime se olakšava vidljivost i bolji pristup mjestu zavarivanja, te sve to uz manji protok plina. Usporedba plinske sapnice bez mrežice i sa mrežicom dana je na slici 12 [10].

2.3.4. Volframova elektroda

Postoji nekoliko različitih tipova volframovih elektroda i njegovih legura. Svaki tip ima određene prednosti i nedostatke. Odabir odgovarajućeg materijala elektrode ovisi o puno toga, kao npr. tip zavarivanja, sastav osnovnog materijala, jačina struje itd. Svaka elektroda ima odgovarajuću boju u skladu s materijalom od kojeg je napravljena. Vrste volframovih elektroda i njihove boje su prikazane u tablici 4. Uobičajeni promjeri volframovih elektroda su 1, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, a dužina im je uglavnom 175 mm, te se prodaju uglavnom u kutiji po 10 komada [12].

Tablica 4. Tipovi i boja volframovih elektroda [11]

AWS razred	Sastav volframove elektrode	Boja
EWP	Čisti volfram	Zelena
EWTh-1	1% torija	Žuta
EWTh-2	2% torija	Crvena
EWZr	0,25 do 0,5 % cirkonija	Smeđa
EWCe-2	2% cerija	Narančasta
EWL-1	1% lantana	Crna
EWG	Neodređeni	Siva

U nastavku su navedene karakteristike nekoliko tipova elektroda radi odabira primjene, no treba imati na umu da je najbolji način određivanja optimalnog tipa elektrode provedba ispitivanja u odgovarajućoj situaciji.

Čisti volfram:

Elektroda od čistog volframa sadrži minimalno 99,5 % volframa, bez dodatnih legiranih elemenata. Ima vrlo slabu električnu vodljivost što znači puno veći otpor prolasku struje, što

dovodi do povećanog zagrijavanja. Temperatura vrha elektrode je dosta velika, pa dolazi do porasta zrna, što dovodi do nestabilnog luka, otežanog paljenja električnog luka i kratkog radnog vijeka. Čisti volfram se koristi samo s izmjeničnom strujom. Njegova električna vodljivost poboljšava se legirnim elementima npr. torijem [1], [12].

Volframova elektroda legirana s torijem:

Ovaj tip volframove elektrode sadrži torijeve okside (ThO_2) i jedan je od najupotrebljivanih tipova u industriji, no zbog opasnosti od radioaktivnog zračenja mnogi prelaze na alternativna rješenja. Volframova elektroda legirana s 2% torija je vrlo dobra za opću namjenu, manje se zagrijava, što umanjuje šansu za kontaminaciju metala zavara s volframom. Ovaj tip elektrode je bolji od čistog volframa zbog toga što torij osigurava 20% veću električnu vodljivost, duži vijek trajanja i manje su šanse onečišćenja zavara. Električni luk se lakše pali, i stabilniji je od čistog volframa i legiranog s cirkonijem. Održavaju oštri vrh tijekom zavarivanja. Preporučuje se zavarivanje s negativnim polaritetom, ali je i moguće sa izmjeničnom strujom, no to nije tako uobičajeno [1], [12].

Volframova elektroda legirana s cirkonijem:

Sadrže malu količinu cirkonijevih oksida (ZrO_2) i njihova svojstva u pogledu zavarivanja su negdje između čistog volframa i volframa legiranog s torijem. Najčešće se upotrebljava s izmjeničnom strujom i pruža stabilniji električni luk od čistog volframa, te je mala mogućnost kontaminacije zavara volframom. Veoma je koristan prilikom zavarivanja aluminijsa izmjeničnom strujom pod zaštitom s čistim argonom [1], [12].

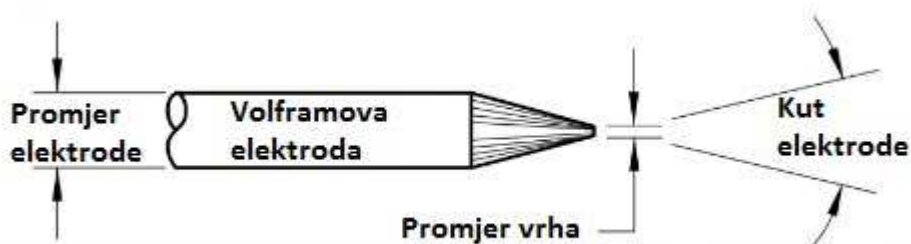
Kao što je već spomenuto najbolji način za određivanje najadekvatnijeg tipa volframove elektrode je ispitivanjem. Prilikom ispitivanja potrebno je pratiti sljedeće podatke dane u tablici 5.

Tablica 5. Podaci za ispitivanje primjenjivosti volframove elektrode [12]

Paljenje električnog luka	Lakoća prvog paljenja
	Lakoća ponovnog paljenja nakon prethodne uporabe
Radni vijek	Maksimalan broj paljenja
	Postojanost geometrije vrha elektrode
Kvaliteta zavora	Oblik električnog luka
	Stabilnost električnog luka
	Kvaliteta zavarenog spoja
	Dubina taline
Potrošnja energije	Usporedba potrošnje energije

Geometrija elektrode:

Volframove elektrode mogu biti različite geometrije. Odabir najbolje geometrije zahtjeva kompromis između: kraćeg ili dužeg vijeka trajanja elektrode, lakšeg i težeg paljenja električnog luka, plitke ili duboke penetracije, uskog ili širokog oblika električnog luka. Za najbolje rezultate elektrode je najbolje provest ispitivanje. Geometrija elektrode bi trebala biti kritični parametar za proces zavarivanja, i trebalo bi se držati uskih tolerancija geometrije za svaki zavar (slika 13) [12].

**Slika 13. Geometrija elektrode [12]**

- a) **Promjer elektrode:** veći promjer elektrode može podnijeti više struje i radni vijek im je duži od manjih promjera, ali manji promjeri olakšavaju paljenje električnog luka. Uporaba struja koje su veće od preporučenih uzrokuje ubrzano trošenje

volframove elektrode. Povećanjem trošenja raste i mogućnost onečišćenja metala zavara volframom. Ukoliko je struja preslaba, električni luk će biti nestabilan.

Upotrebom istosmjerne struje pozitivnog polariteta potreban je veći promjer elektrode jer se vrh puno više zagrijava [12].

- b) **Vrh elektrode:** oblik vrha elektrode je vrlo bitan parametar u zavarivanju. Dobrim izborom veličine vrha elektrode može se dosta poboljšati postupak zavarivanja. Povećanjem promjera vrha eliminira se lutanje luka, a i povećava penetracija i radni vijek elektrode, ali zato je paljenje el. luka otežano.

Neki zavarivači bruse elektrodu na šiljasti vrh, time si olakšavaju paljenje luka, ali riskiraju smanjenje učinkovitosti zavarivanja zbog taljenja vrha i mogućnosti kontaminacije zavara. Šiljasti vrh je poželjan kod malih struja zavarivanja ili kratkih ciklusa, ali za sve ostale situacije je poželjno pripremiti ravni vrh [12].

Krivi odabir vrha elektrode dovodi do [12]:

- kontaminacije zavara volframom,
- smanjena radnog vijeka elektrode,
- stabilnosti električnog luka,
- različitim naponima na elektrodama zbog neujednačenih vrhova .

- c) **Kut elektrode:** različiti kutovi nude različite oblike električnog luka i utječu na penetraciju.

Ravni vrh s većim kutom elektrode ima sljedeće prednosti [12]:

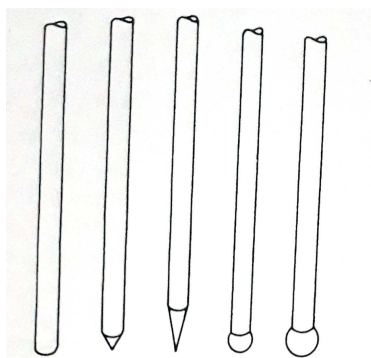
- duži radni vijek,
- bolja penetracija,
- uži električni luk,
- može podnijeti veće struje bez trošenja.

Oštre elektrode s manjim kutom osiguravaju [12]:

- širi električni luk,
- konstantan električni luk.

Elektrode većeg promjera i većih struja imaju kut 25° do 45° , kako bi povećale radni vijek i osigurali stabilniji električni luk. Za manje struje se koriste šiljastiji vrhovi s kutom elektrode 10° do 25° [12].

- d) Završna obrada kuta:** što je manja hrapavost površine vrha elektrode to će biti bolja svojstva zavarivanja. Gruba površina rezultira nestabilnim električnim lukom [12].

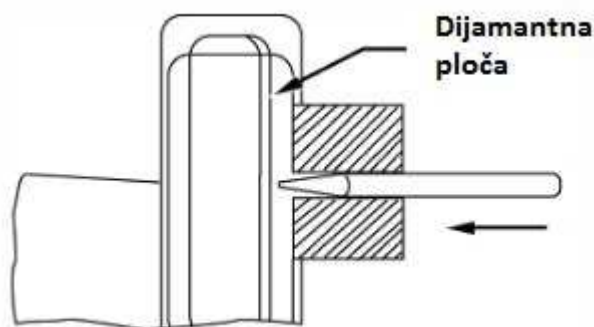


Slika 14. Različiti oblici vrhova elektrode [1]

Tehnike rezanja i brušenja volframovih elektroda:

Nepravilno rezanje i brušenje elektroda uzrokuje lutanje luka, pukotine, neujednačen zavar i volframove uključke. Pravilnim postupcima poboljšava se stabilnost i paljenje luka. Za obradu se uvijek trebaju koristiti dijamantne ploče, jer je sam volfram tvrd pa je potreban još tvrdi materijal za glatku obradu [12].

- a) Priprema vrha: ukoliko se priprema vrh od korištene elektrode kojoj je vrh kontaminiran, potrebno je stari vrh odrezati prije obrade na odgovarajuću geometriju. Na slici 15 je prikazana priprema ravnog vrha.



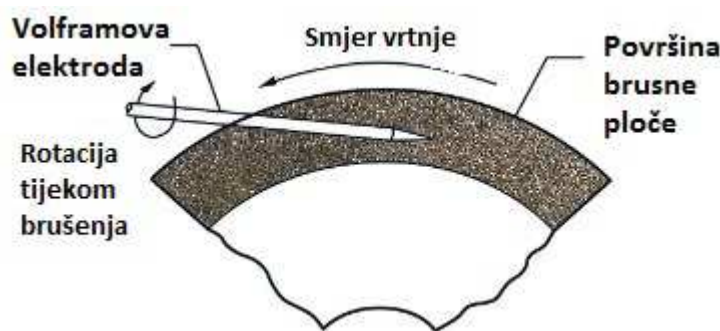
Slika 15. Priprema ravnog vrha elektrode [12]

- b) Priprema kuta: najbitnija stavka obrade kuta je da brušenje mora biti uzdužno. Poprečnim brušenjem negativno se utječe na stabilnost luka i formiranje luka na vrhu elektrode. Volframove elektrode se proizvode tako da zrna idu uzdužno tako da poprečno brušenje je suprotno od zrna. U tom slučaju se električni luk koji započinje prije vrha, širi i luta, što uzrokuje pregrijavanje elektrode i ubrzano trošenje. Uzdužnim brušenjem elektroni mirno putuju s manjim poteškoćama prema vrhu elektrode. Električni luk se pali usmjereno i ostaje uzak, koncentriran i stabilan. Elektrode su tada izložene manjim toplinskim utjecajima te traju duže [12].



Slika 16. Pravilno izbrusen vrh (lijevo), nepravilno (desno) [7]

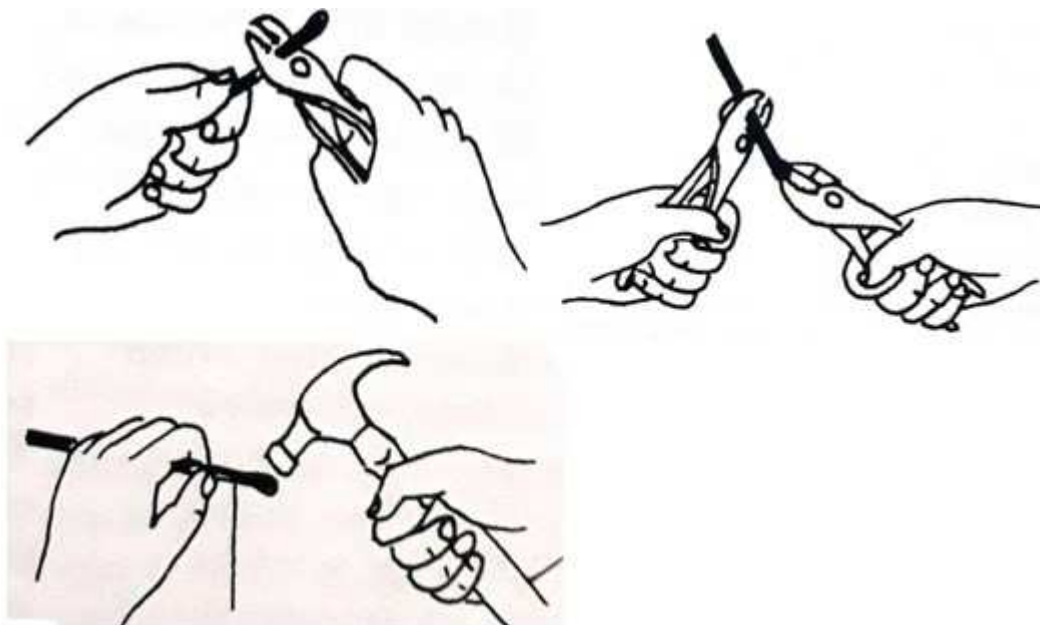
Za najbolju stabilnost luka, brušenje dijamantnom pločom bi trebalo biti uzdužno sa elektrodom pod 90° na os brusne ploče, kao što je prikazano na slici 17. Dijamantna ploča se mora koristiti samo za brušenje volframovih elektroda kako se one ne bi kontaminirale stranim česticama tijekom brušenja.



Slika 17. Brušenje volframove elektrode [12]

- c) Rezanje elektrode: vrlo često zanemarena važnost pravilnog rezanja. Kontaminacija vrha elektrode je vrlo čest problem te su zavarivači primorani odrezati dio, jer samim brušenjem neće postići željeni učinak. Volfram je vrlo tvrd materijal, te je bitno koristiti dijamantnu reznu ploču radi čistog i ujednačenog

reza. U praksi se vrlo često koriste nepravilne tehnike rezanja, te su neke od njih prikazane na slici 18 [12].



Slika 18. Nepravilno rezanje elektrode [1]

2.4. Pogreške u zavarenim spojevima TIG postupkom

Vodič za pogreške, njihov uzrok i rješenje kod TIG postupka prikazan je u tablici 6.

Tablica 6. Greške, uzrok i rješenje kod TIG postupka [11]

Problem	Uzrok	Rješenje
Preveliko trošenje elektrode	1. Neodgovarajuća veličina elektrode za danu struju 2. Krivi polaritet 3. Kontaminacija elektrode 4. Neodgovarajući zaštitni plin	1. Uporaba veće elektrode 2. Uporaba veće elektrode ili promjena polariteta 3. Uklanjanje kontaminacije i ponovna priprema elektrode 4. Promijeniti plin
Nepravilan luk	1. Krivi napon (luk prevelik) 2. Premala struja za danu veličinu elektrode 3. Kontaminacija elektrode	1. Održavati kratki luk 2. Uporaba manje elektrode ili povećanje struje 3. Uklanjanje kontaminacije i ponovna priprema elektrode

Uključci volframa ili oksida u metalu zavora	1. Loša tehnika paljenja elektrode kratkim spojem 2. Prevelika struja za danu veličinu elektrode 3. Slučajan kontakt elektrode i taline 4. Prevelik slobodni kraj elektrode	1. Uporaba bakrene ploče za početak ili VF paljenje luka 2. Uporaba veće elektrode ili smanjiti struju 3. Održavati pravilnu duljinu luka i dodatnog materijala 4. Smanjit slobodni kraj elektrode
Porozitet u metalu zavora	1. Zarobljene nečistoće, vodik, zrak, dušik 2. Neispravno crijevo za plin ili loše brtvljenje 3. Vlažan dodatni materijal 4. Dodatni materijal je prljav ili mastan 5. Kontaminiran zaštitni plin	1. Ne zavarivati mokre materijale 2. Provjerit crijevo i spojeve radi curenja 3. Sušiti dodatni materijal u peći 4. Zamijeniti dodatni materijal
Neadekvatna zaštita	1. Začepljeno crijevo ili curenje u crijevu ili pištolju 2. Prevelika brzina zavarivanja izlaže metal zavora atmosferi 3. Vjetar 4. Prevelik slobodni kraj elektrode 5. Prevelike turbulencije u protoku plina	1. Uklonit začepljenje i curenje 2. Koristiti manje brzine zavarivanja i povećat protok plina 3. Zakloniti mjesto zavarivanja 4. Smanjit slobodni kraj elektrode, uporaba veće keramičke sapnice 5. Koristit mrežice za ujednačeni protok

2.5. Varijante TIG postupaka zavarivanja

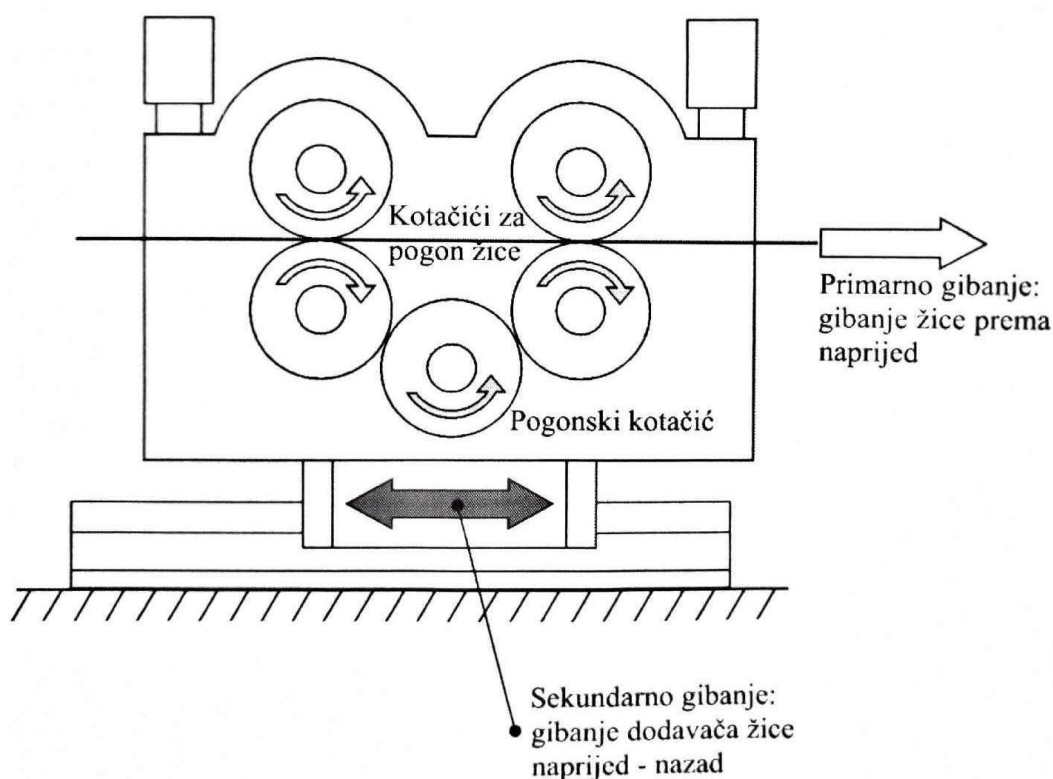
Ljudi i industrija kao i uvijek teže napretku, konstantno se razvijaju i ispituju nove varijante postupaka s ciljem poboljšanja brzine, kvalitete i naravno troškova. Uvijek se

pokušava ostvariti maksimum od ta tri cilja, te je to dovelo do nastanka pojedinih inačica TIG postupka za specifičnu primjenu.

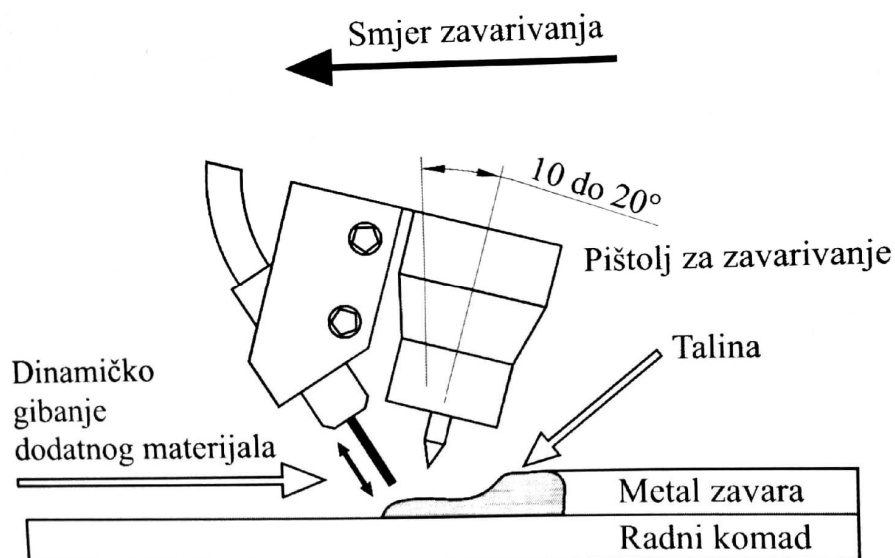
2.5.1. TIP TIG zavarivanje

TIP TIG postupak je nastao kao odgovor na zahtjeve tržišta za većom produktivnošću i automatizacijom TIG postupka. Postupak je nadogradnja klasičnog TIG postupka s uređajem za automatsko dodavanje žice (slika 19). Postupak dodavanja žice se sastoji od dva dijela. Primarno gibanje žice je kontinuirano prema naprijed, a sekundarno je gibanje naprijed-nazad. Rezultat ovakvog gibanja dodatnog materijala je smanjenje utjecaja površinske napetosti taline, što znači poboljšano spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala, a nečistoćama i plinovima je olakšan izlaz iz rastaljenog metala. Tehnika rada prikazana je na slici 20.

Vrlo je efikasno pri zavarivanju konstrukcijskih čelika, nehrđajućih, titana i aluminija te njegovih legura [13].



Slika 19. Shematski prikaz gibanja koje ostvaruje dodavač žice [13]



Slika 20. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [13]

TIP TIG postupkom ostvaruje se [13]:

- veći depozit u odnosu na klasični TIG,
- visoka kvaliteta zavora,
- dobar estetski izgled i geometrija zavora bez potrebe za naknadnom obradom,
- smanjen unos topline u radni komad što rezultira smanjenjem deformacija radnog komada te manji negativni utjecaj na mikrostrukturu,
- manjim unosom topline umanjeno je stvaranje metalnih para i plinova.

Podešavanje parametara uređaja za dodavanje dodatnog materijala [13]:

- brzina dodavanja dodatnog materijala,
- frekvencija osciliranja dodatnog materijala,
- početna brzina dodatnog materijala,
- povrat dodatnog materijala.

Postoje dvije varijante TIP TIG postupka:

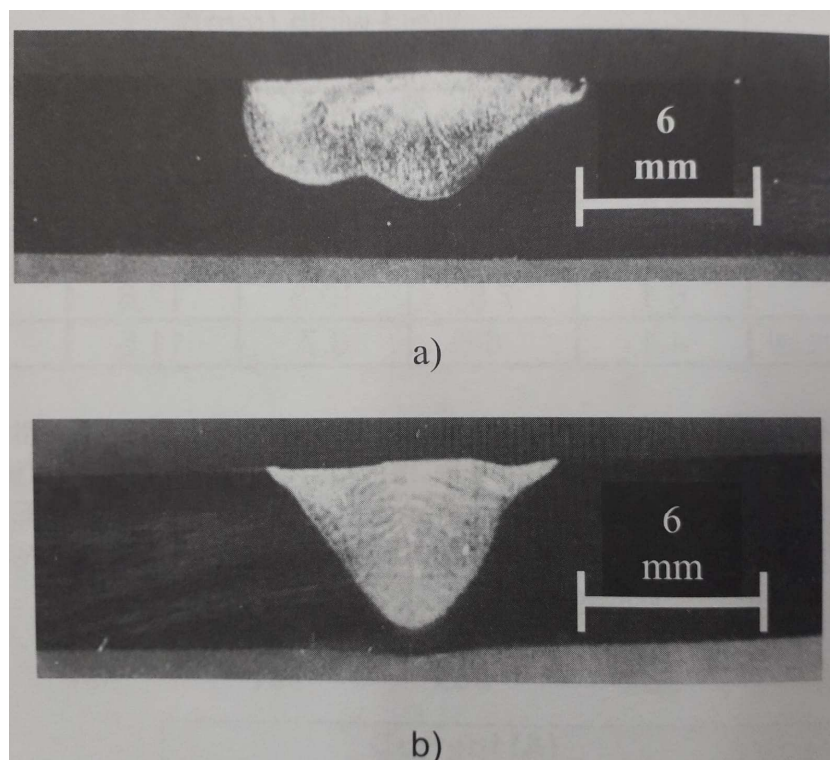
- TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom
- TIP TIG zavarivanje s vrućom žicom

Karakteristike TIP TIG zavarivanja s vrućom žicom [13]:

- velika količina nataljenog materijala (do 4,5 kg/h),
- relativno niži unos topline uslijed čega dobivamo užu ZUT,
- minimalne deformacije radnog komada i minimalno odgaranje legirnih elemenata uslijed niskog unosa topline,
- mogućnost primjene tehnologije uskog žlijeba i za veće debljine stijenki.

2.5.2. A-TIG

A-TIG je modificirani postupak TIG zavarivanja razvijen s ciljem povećanja produktivnosti tako da poveća penetraciju. Povećanje penetracije se ostvaruje nanošenjem tankog sloja premaza na mjesto zavarivanja. Premaz uzrokuje veće gustoće struje i sile električnog luka u talini, što rezultira promjenama strujanja u talini od ruba prema sredini, te daje veću penetraciju [14].



Slika 21. Poprečni presjek zavora izvedenih strujom 300 A; a) bez premaza; b) sa TiO_2 premazom [15]

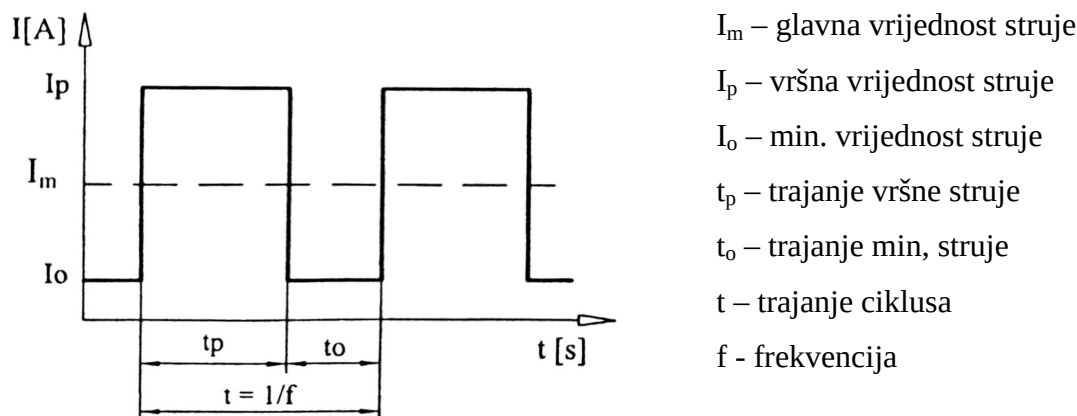
Ovaj postupak nije doživio veliku primjenu u industriji usprkos svojim prednostima. Razlog tome je što se nanošenje premaza vidi kao dodatni utrošak vremena i naravno sam

premaz je trošak. Dodatno tome premaz ostavlja ostatke na zavarenom spoju koje je potrebno ukloniti. Tako da usprkos povećanju penetracije, te smanjenju broja prolaza, značajna uporaba A-TIG postupka u praksi nije ostvarena. Na slici 21 je prikazan utjecaj premaza na geometriju zavora [14].

2.5.3. TIG zavarivanje impulsnim strujama

Impulsno zavarivanje je modificirana verzija zavarivanja kod koje se struja izmjenjuje između niskog i visokog nivoa tijekom zavarivanja. Ovisnost struje o vremenu je prikazana slikom 22. Impulsi su kvadratnog oblika, što je slučaj kod tranzistorskih izvora struje [16]. Glavna prednost ovog postupka je u smanjenom unosu topline, što znači i manje deformacije materijala, te mogućnost lakše kontrole taline [16]. Impulsno TIG zavarivanje se smatra najteže izvedivim postupkom u industriji, zbog toga što zavarivač mora održavati kratak električni luk, a za to je potrebna izrazito velika vještina i pažnja prilikom zavarivanja kako bi se izbjegao kontakt elektrode i osnovnog materijala. Postupak je značajno sporiji od ostalih, a i značajno kompleksniji. Zbog toga se najčešće koristi kod automatiziranog zavarivanja.

Upotrebljava se uglavnom za zavarivanje vrlo tankih materijala od nehrđajućeg čelika, neželjenih metala poput aluminija, magnezija i bakra te njihovih legura [17].



Slika 22. Struja u ovisnosti o vremenu kod impulsnog zavarivanja [16]

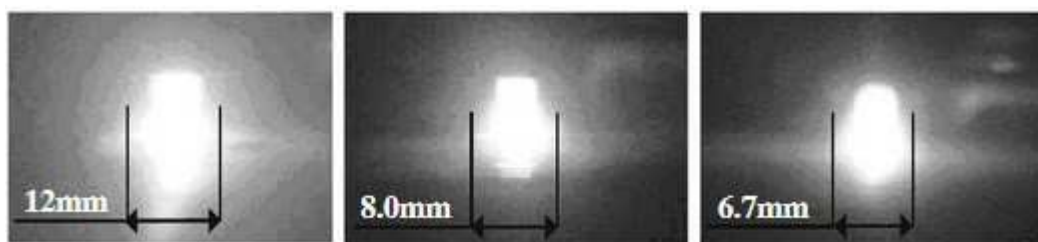
Parametri impulsnog zavarivanja [16]:

- vršna vrijednost struje (osigurava unos topline za taljenje osnovnog metala),
- minimalna vrijednost struje (osigurava održavanje električnog luka),
- frekvencija,

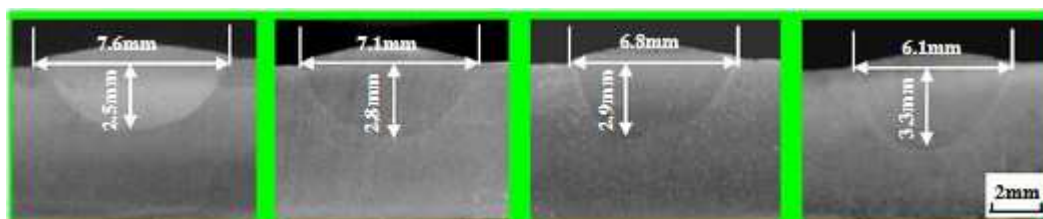
- trajanje vršne struje (mora biti dovoljno dugo da se osigura taljenje osnovnog metala),
- trajanje minimalne vrijednosti struje (određeno trajanjima vršne struje i frekvencije),
- brzina zavarivanja,
- valni oblik impulsne struje.

2.5.4. Visokofrekventno impulsno TIG zavarivanje

Otkriveno je da povećanjem frekvencije impulsne struje dolazi do značajnog radijalnog smanjenja plazme luka zbog radijalne elektromagnetske sile uzrokovane visokim frekvencijama, koja uzrokuje suženje. Rezultat toga je smanjenje širine zavora, te zone utjecaja topline i povećanje penetracije. Primjenu pronalazi na područjima gdje se želi ostvariti povoljniji omjer širine i penetracije, i manje deformacije materijala. Prikaz električnog luka povećanjem frekvencije je na slici 23, a izgled zavora na slici 24 [18].



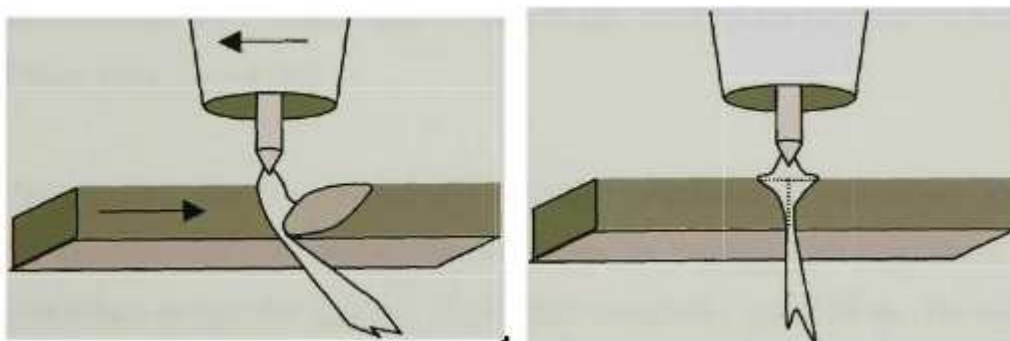
Slika 23. Električni luk 1) Klasični TIG; 2) $f_H=20$ kHz; 3) $f_H=80$ kHz; [18]



Slika 24. Izgled zavora 1) Klasični TIG; 2) $f_H=20$ kHz; 3) $f_H=40$ kHz; 4) $f_H=80$ kHz; [18]

2.5.5. K-TIG

Postupak je zavarivanja koji koristi „efekt ključanice“ (engl. Keyhole). Cilj je protaliti rupu u materijalu te povlačenjem električnog luka omogućiti zatvaranje rupe iza luka tvoreći zavareni spoj (slika 25). K-TIG je automatiziran proces za zavarivanje u PA položaju. Koristi se za zavarivanje željeznih i neželjeznih legura u rasponu debljina od 3 do 12 mm. Moguće je i zavarivanje cijevi, ali uz upotrebu okretaljki. Idealan je za materijale male toplinske provodljivosti, poput nehrđajućih čelika i titana. Dobiva se kvaliteta zavara kao s klasičnim TIG postupkom, ali uz puno veću produktivnost. Ostale prednosti su minimalna potreba za dodatnim materijalom, I priprema spoja, te zavar se obavlja u samo jednom prolazu [19].



Slika 25. Shematski prikaz K-TIG postupka [19]

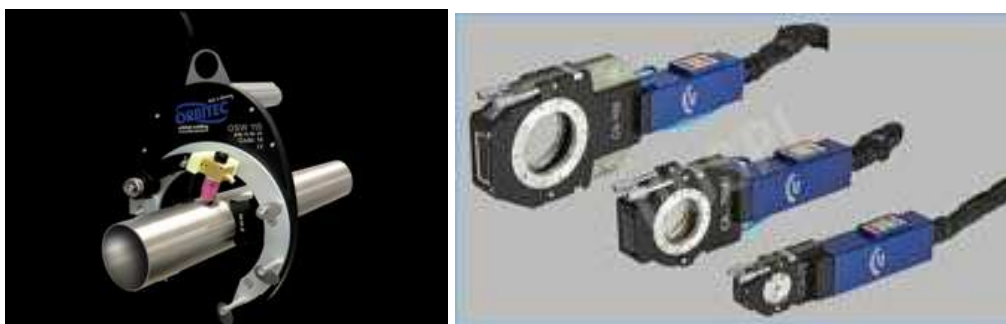
Karakteristike procesa su [19]:

- automatiziran proces zavarivanja,
- PA položaj zavarivanja,
- samo jedan prolaz,
- I priprema spoja,
- minimalna potreba za dodatnim materijalom,
- brzine zavarivanja do 500 mm/min za materijale do 6,4 mm,
- zavarivanje nehrđajućih čelika i titana do 12 mm debljine,
- cijena opreme približna MIG/MAG postupku, a znatno manja od plazma zavarivanja,
- potpuna penetracija,
- robusna oprema,
- precizna priprema spoja,
- visoka kvaliteta spoja u skladu s TIG postupkom.

2.5.6. Orbitalno TIG zavarivanje

Orbitalno TIG zavarivanje je postupak koji se u velikoj mjeri koristi za zavarivanje cjevovoda. Cjevovodi su vrlo zahtjevni u pogledu zavarivanja, a pogotovo kada se radi o cjevovodima za transport opasnih fluida. Ukoliko bi došlo do pogreške i curenja fluida, moglo bi doći do katastrofalnih posljedica. Ručno zavarivanje cijevi nema zadovoljavajuću produktivnost. Kako bi savladali ove probleme razvijen je postupak orbitalnog TIG zavarivanja. Razvijanje i prva primjena postupka uslijedila je u zrakoplovnoj industriji.

Kod orbitalnog zavarivanja cijevi su stegnute u poziciji za zavarivanje, a glava za orbitalno zavarivanje rotira elektrodu i električni luk po pripremljenom spoju kako bi dobili zavareni spoj. Sustav za orbitalno zavarivanje se sastoji od izvora za zavarivanje i glave za orbitalno zavarivanje. Moderni postupci orbitalnog zavarivanja nude upravljanje procesom pomoću kompjutera. Njime se upravlja parametrima, strujom zavarivanja, brzinom gibanja motora glave, zaštitnim plinom, itd. Orbitalne glave za zavarivanje su uglavnom zatvorenog tipa, te se zaštitni plin pušta u komoru koja okružuje zavareni spoj. Postoje dva tipa orbitalnog zavarivanja s otvorenom i zatvorenom glavom za orbitalno zavarivanje (slika 26) [20].



Slika 26. Glave za orbitalno TIG zavarivanje: otvorena (lijevo) i zatvorena (desno) [20]

Prednosti orbitalnog TIG zavarivanja [20]:

- bolja kvaliteta zavara od ručnog postupka zavarivanja,
- jednostavna izobrazba za operatera, nije potreban zavarivač,
- visoka produktivnost,
- prikladna tehnologija za uske prostore, uvjete slabe vidljivosti, opasne lokacije,
- praćenje zavara i ponovljivost.

Primjena orbitalnog zavarivanja je u mnogim područjima kao što su: zrakoplovna industrija, prehrambena industrija, kotlogradnja, nuklearna industrija, farmaceutska industrija, poluvodička itd.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu rada cilj je bio ispitati neke od mogućnosti i primjenu uređaja za TIG zavarivanje „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“. Eksperiment je proveden u laboratoriju Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Materijal izabran za provedbu ispitivanja je aluminij oznake 5083, na kojem su izvedeni navari TIG postupkom, uz „BUG-O SYSTEMS“ uređaja za vođenje pištolja za zavarivanje. Ispitivanje je provedeno na šest uzoraka navarenih različitim parametrima koje nam omogućava uređaj za zavarivanje. Promatrao se utjecaj frekvencije i balansa polariteta izmjenične struje. Usporedba uzoraka je provedena vizualnom kontrolom.

3.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal odabran za eksperiment je aluminij oznake 5083 ili AlMg4.5Mn. Kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 7. Debljina materijala je 10 mm, te je izrezano 6 uzoraka dimenzija 130x50 mm. Materijal je visoko otporan u kemijskom i morskom okruženju, pokazuje izuzetnu otpornost u ekstremnim uvjetima. Ima najveću čvrstoću od svih toplinski neobradivih legura, te ju zadržava nakon zavarivanja. Ne preporuča se uporaba na temperaturama iznad 65°C. Mehanička svojstva prikazana su tablicom 8 [21].

Tablica 7. Kemijski sastav aluminija AlMg4.5Mn [21]

%	Mn	Fe	Cu	Mg	Si	Zn	Cr	Ti	Al
Min	0,40			4,00			0,05	0,15	Ostatak
Max	1,00	0,40	0,10	4,90	0,40	0,25	0,25	0,15	Ostatak

Tablica 8. Mehanička svojstva aluminija AlMg4.5Mn [22]

Oznaka materijala	Mehanička svojstva				
ISO	Debljina mm	R _m , min N/mm ²	R _{p0,2} , min N/mm ²	A ₅ , min %	HB, max
AlMg4.5Mn	10	270	115	16	75

3.3. Oprema za zavarivanja

3.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje

„EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“ je modularni AC/DC TIG inverter aparat za zavarivanje, hlađen plinom ili vodom. Ima mogućnosti TIG i REL zavarivanja, te različite inačice ovih postupaka. Nudi opcije upravljanja valnim oblikom izmjenične struje: sinusni, trapezoidni i kvadratni, te frekvencijom i balansom. Ima mogućnost impulsnog TIG zavarivanja i pripajanja, te su to samo neki od mnogih funkcija koje uređaj nudi. Dolazi sa praktičnim kolicima za olakšani transport. Izgled aparata je prikazan na slici 27, a tehnički podaci u tablici 9.



Slika 27. „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“

Tablica 9. Tehničke karakteristike stroja [23]

	TIG		MMA	
Raspon struje	3 A - 230 A		5 A - 180 A	
Intermitencija:	40 °C	25 °C	40 °C	25 °C
- 40 %	230 A	–	180 A	–
- 45 %	–	230 A	–	180 A
- 60 %	200 A	210 A	150 A	160 A
- 100 %	170 A	190 A	120 A	140 A
Napon otvorenog kruga	45 V			
Glavna frekvencije	50 Hz / 60 Hz			
Priključni napon	1 x 230 V (-40 % - +15 %)			
Iskoristivost	85 %			
Dimenzije stroja	539 x 210 x 415			
Masa stroja	18.8 kg			

3.3.2. „BUG-O Systems“ automat

Automat za zavarivanje „BUG-O Systems“ je upotrebljavan kako bi osigurali ponovljivost postupka na svih 6 uzoraka. To je jednostavan uređaj na koji se pričvrsti pištolj za zavarivanje ili rezanje, te on jednolikim pravocrtnim gibanjem služi kao zamjena za zavarivača. Na njemu je moguće podešavati brzinu gibanja pištolja i njegov položaj. Automat korišten u ovo radu prikazan je na slici 28.

**Slika 28. „BUG-O Systems“ automat**

3.4. Postupak ispitivanja

Prvi korak ispitivanja je podešavanje opreme za provođenje eksperimenta, a to je sklapanje pištolja za zavarivanje, odabir sapnice, volframove elektrode, slobodni kraj elektrode. Nakon toga je bilo potrebno pričvrstiti ga u držač automata za zavarivanje, a to znači namjestiti nagib pištolja, udaljenost od površine uzorka, te podesiti sam automat. Odrediti mu brzinu gibanja, početnu i krajnju točku zavarivanja.

Zatim je uslijedila priprema površine uzoraka. Kako se u eksperimentu izvodilo navarivanja na aluminijsku ploču debljine 10 mm, nije bila potrebna strojna obrada niti nikakva specijalna priprema, već samo čišćenje i odmašćivanje površine, za što je upotrebljavan etilni alkohol.

Parametri zavarivanja koje nećemo mijenjati tijekom ispitivanja prikazani su u tablici 10.

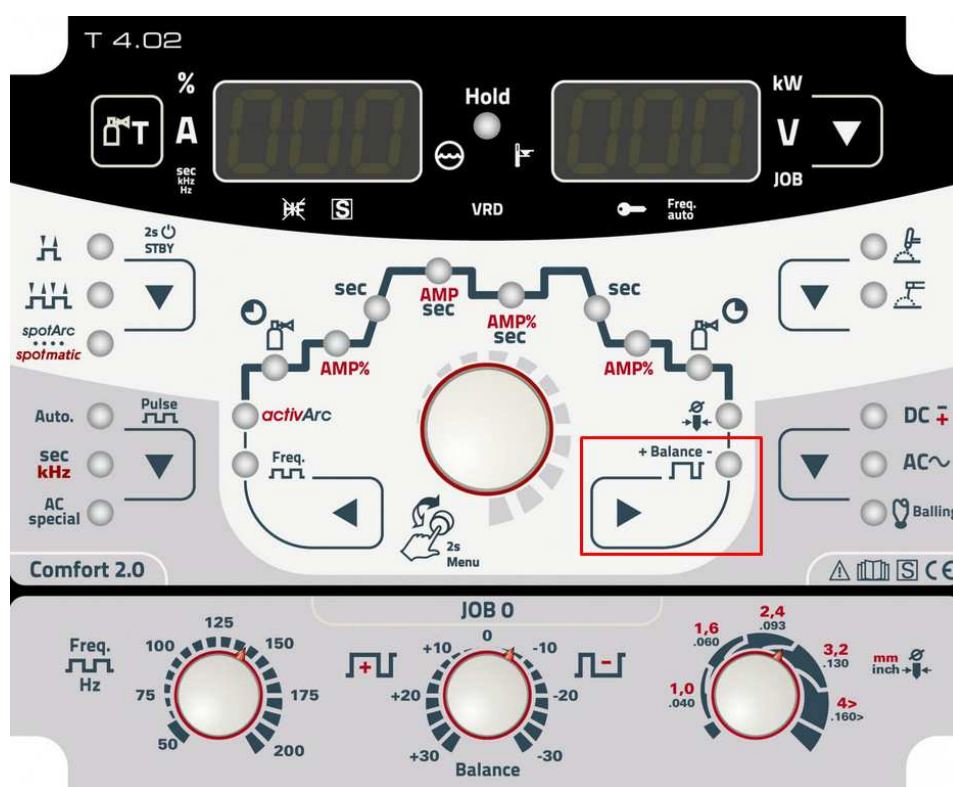
Tablica 10. Parametri zavarivanja

Parametar:	Vrijednost:
Struja zavarivanja	150 A
Napon zavarivanja	16 V
Vrsta struje	AC
Brzina zavarivanja	10 cm/min
Zaštitni plin	Argon
Protok zaštitnog plina	9 L/min
Volframova elektroda	zelena
Promjer elektrode	3,2 mm
Slobodni kraj elektrode	3 mm
Keramička sapnica, promjer	11 mm
Visina električnog luka	5 mm
Nagib pištolja	90°
Osnovni materijal	AlMg4.5Mn, 10 mm

3.4.1. Utjecaj promjene AC balansa

Uređaj „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“ nudi opcije variranja balansa izmjenične struje, odnosno postotak boravka elektrode na pozitivnom, odnosno negativnom polaritetu. Cilj ispitivanje je vidjeti kakav utjecaj ima na penetraciju i efekt čišćenja oksidnog sloja.

Mogućnosti uređaja u variranju balansa se kreću u rasponu od 40 – 90 % na negativnom polaritetu. Postupak odabira ovog načina rada na uređaju je vrlo brz i jednostavan, kao i brza promjena parametra balansa. Na slici 29 je prikazan upravljački dio upotrebljavanog uređaja, te je označeno mjesto na kojem se upravlja AC balansom. Pritiskom na strelicu se pomaknemo na balans, te jednostavnim okretanjem kotačića namjestimo željenu vrijednost.



Slika 29. Upravljački dio uređaja za zavarivanje [23]

Za ispitivanje su uzete vrijednosti AC balansa 40, 65 i 90% na negativnom polaritetu. Parametri tijekom zavarivanja za uzorke 1, 2 i 3 su prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Parametri tijekom zavarivanja uzoraka 1, 2 i 3

Uzorak	Postotak vremena na negativnom polu [-]	Struja [A]	Napon [V]
1	40	150	16,3
2	65	150	13,5
3	90	150	13,0

3.4.2. Rezultati ispitivanja utjecaja AC balansa

Uzorci 1, 2 i 3 nakon navarivanja su prikazani na slikama 30, 31 i 32.



Slika 30. Uzorak 1



Slika 31. Uzorak 2



Slika 32. Uzorak 3

Nakon hlađenja uzorci su poprečno odrezani na polovici zavora kako bi mogli dobiti makroizbrusak. Uzorci su rezani na tračnoj pili prikazanoj na slici 33. Te zatim izbrušeni kako bi se dobila ujednačena površina na kojoj bi nakon nagrizanja bila vidljiva penetracija. Brušenje je odrađeno pomoću uređaja „Struers Labopol-6“ koji služi za mokro brušenje i poliranje. Uzorci su mokro brušeni brusnim papirom granulacije 150 i 300.

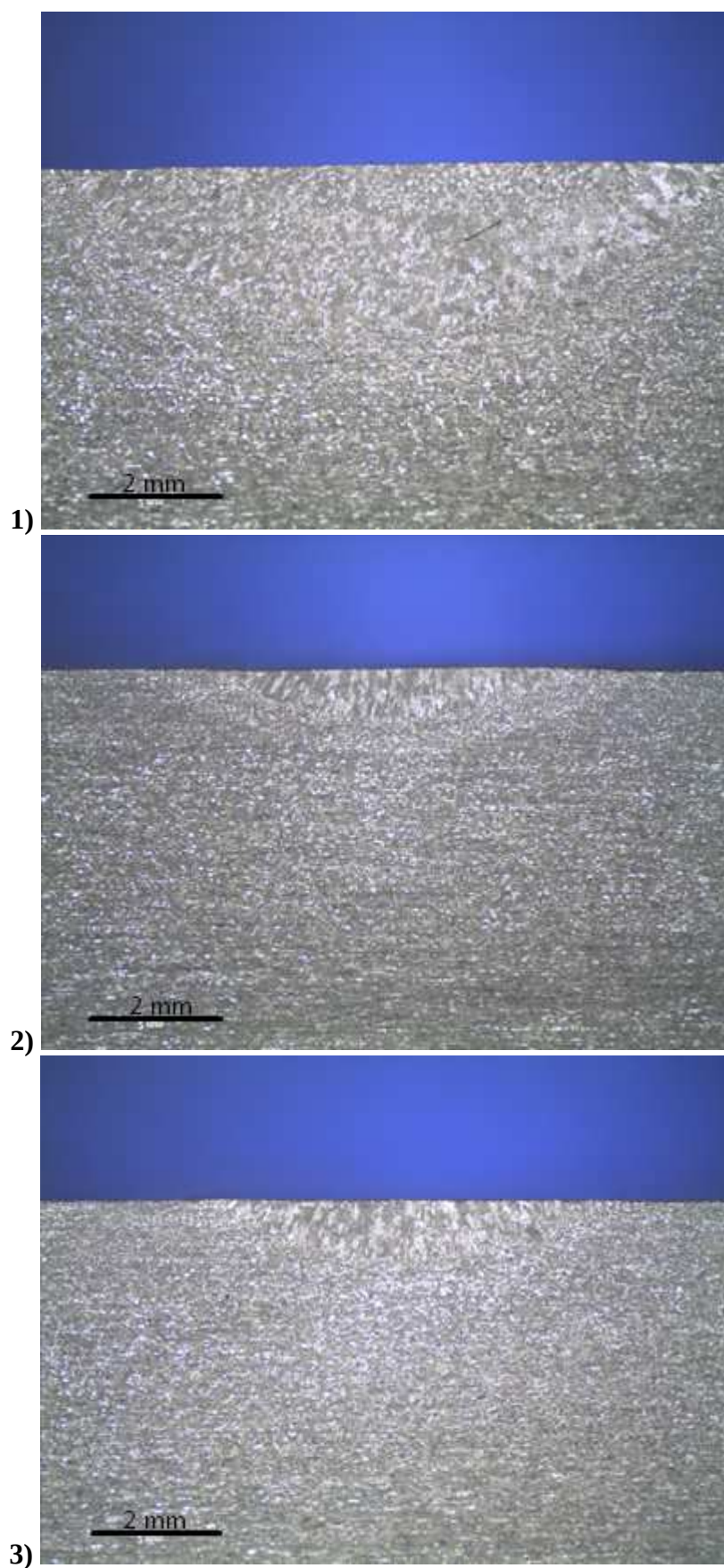


Slika 33. Tračna pila (lijevo) i uređaj za brušenje (desno)

Nakon brušenja uzorci su nagrizani u otopini za nagrizanje aluminijske zavare, te zbog slabe uočljivosti zavora i ZUT-a za detaljniji pregled korišten je stereo mikroskop LEICA MZ6 (slika 34). Makroskopski uzorci su prikazani na slici 35.



Slika 34. Stereo mikroskop LEICA MZ6



Slika 35. Makroizbrusak 1) Uzorak 1, 2) Uzorak 2, 3) Uzorak 3

3.4.3. Analiza utjecaja AC balansa

Geometrijske značajke zavora su prikazane u tablici 12.

Tablica 12. Geometrijske značajke zavora

Uzorak	Širina zavora (mm)	Penetracija (mm)	Čišćenje (mm)
1	10,31	2,70	4,15
2	5,50	0,79	4,58
3	4,03	0,65	1,96

Iz rezultata ispitivanja vidi se da se širina zavora smanjuje očekivano, no penetracija se jednako tako smanjuje. Povećanjem vremena negativnog polariteta izmjenične struje očekivana je veća penetraciju zbog većeg unosa topline u materijal. Razlog smanjenja penetracije je što je za sve uzorke korištena ista volframova elektroda, bez priprema vrha nakon svakog zavora. Na elektrodi se tijekom zavarivanja prvog uzorka formirala kuglica najvećeg promjera, zbog većeg boravka na pozitivnom polaritetu. Ta elektroda se trebala odrezati i pripremiti jednak vrh za zavarivanje svakog uzorka. To je bitno jer se vrh elektrode manje deformira kad je elektroda više vremena na negativnom polaritetu, jer tada se ona manje zagrijava.

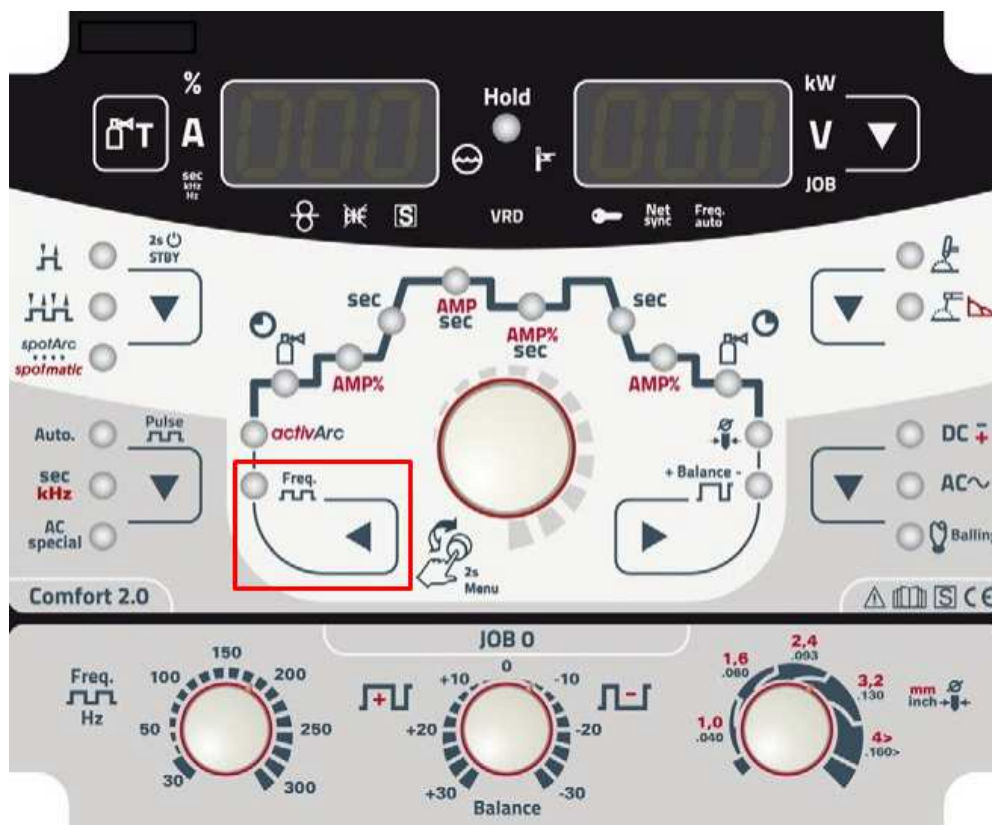
Čišćenje oksidnog filma je najmanje na uzorku 3, zbog manjeg provedenog vremena elektrode na pozitivnom polu koji uzrokuje čišćenje. Uzorci 1 i 2, imaju podjednako čišćenje, razlikuje se samo ovisno o području na kojem mjerimo, a to varira zbog različitog unosa topline, na početku zavarivanja uzoraka materijal i elektroda su bili potpuno hladni, te tokom zavarivanja materijal se postepeno zagrijava, te na malim uzorcima nemamo veliku ujednačenost zavora. I također se ne može garantirati isti sastav i debljine oksidnog sloja kao ni uvjeti skladištenja uzoraka, iako su iz jedne ploče, neki dijelovi su možda bili pokriveni, zamašćeni ili nešto slično (što je utjecalo na stvaranje različitih područja oksidnog filma).

3.4.4. Utjecaj promjene frekvencije zavarivanja

Još jedna od mogućnosti uređaja za zavarivanje „EWM Tetrix 230 AC/DC Comfort 2.0 puls“ jest variranje frekvencije. Promjenom frekvencije bi trebali utjecati na penetraciju, te nam je cilj eksperimenta vidjeti efekt na aluminiju oznake 5083.

Promjena frekvencije je jednako kao i promjena AC balansa vrlo jednostavna i brza, u samo nekoliko koraka, pritiskom na strelicu označenoj na slici 36 pomaknemo se u područje

definiranja frekvencije, te okretanjem kotačića podesimo željenu vrijednost u rasponu od 50 – 200 Hz.



Slika 36. Upravljački dio uređaja za zavarivanje [23]

Za ispitivanje su uzete vrijednosti frekvencije 50, 100, 150 i 200 Hz i AC balans 65% na negativnom polaritetu. Parametri tijekom zavarivanja za uzorke 2, 4, 5 i 6 su prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Parametri tijekom zavarivanja uzoraka 2, 4, 5 i 6

Uzorak	Frekvencija [Hz]	Struja [A]	Napon [V]
2	50	150	13,5
4	100	145	12,5
5	150	138	14,1
6	200	133	14,5

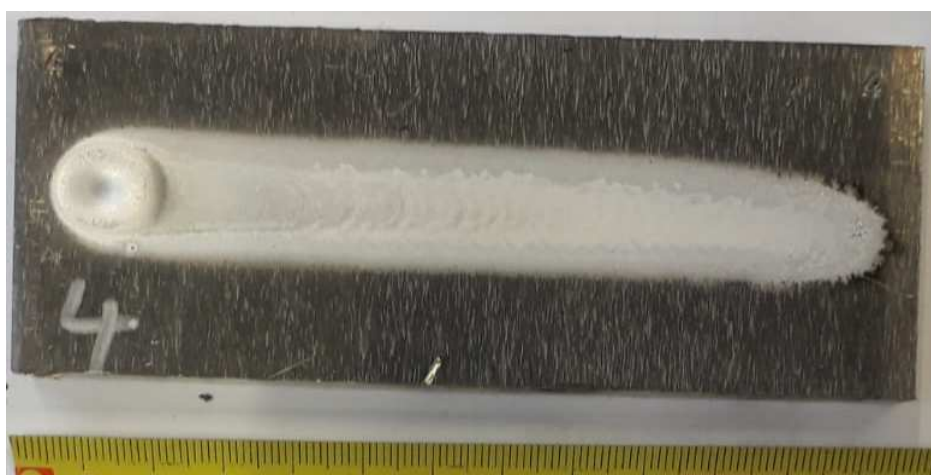
Jednakim postupkom kao i za uzorke kod ispitivanja AC balansa su obrađeni uzorci. Te na slikama 37, 38, 39 i 40 su prikazani uzorci nakon navarivanja.

3.4.5. Rezultati ispitivanja utjecaja frekvencije

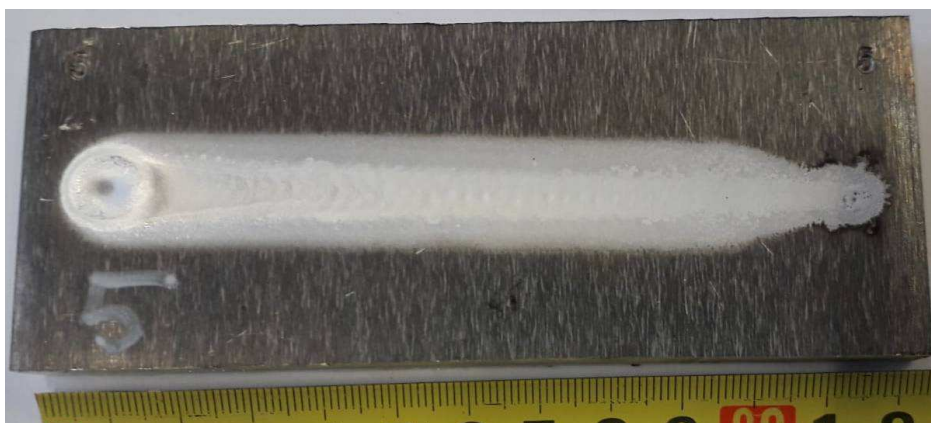
Izgled zavara uzoraka dobivenih ispitivanjem prikazan je na slikama 37, 38, 39 i 40.



Slika 37. Uzorak 2



Slika 38. Uzorak 4

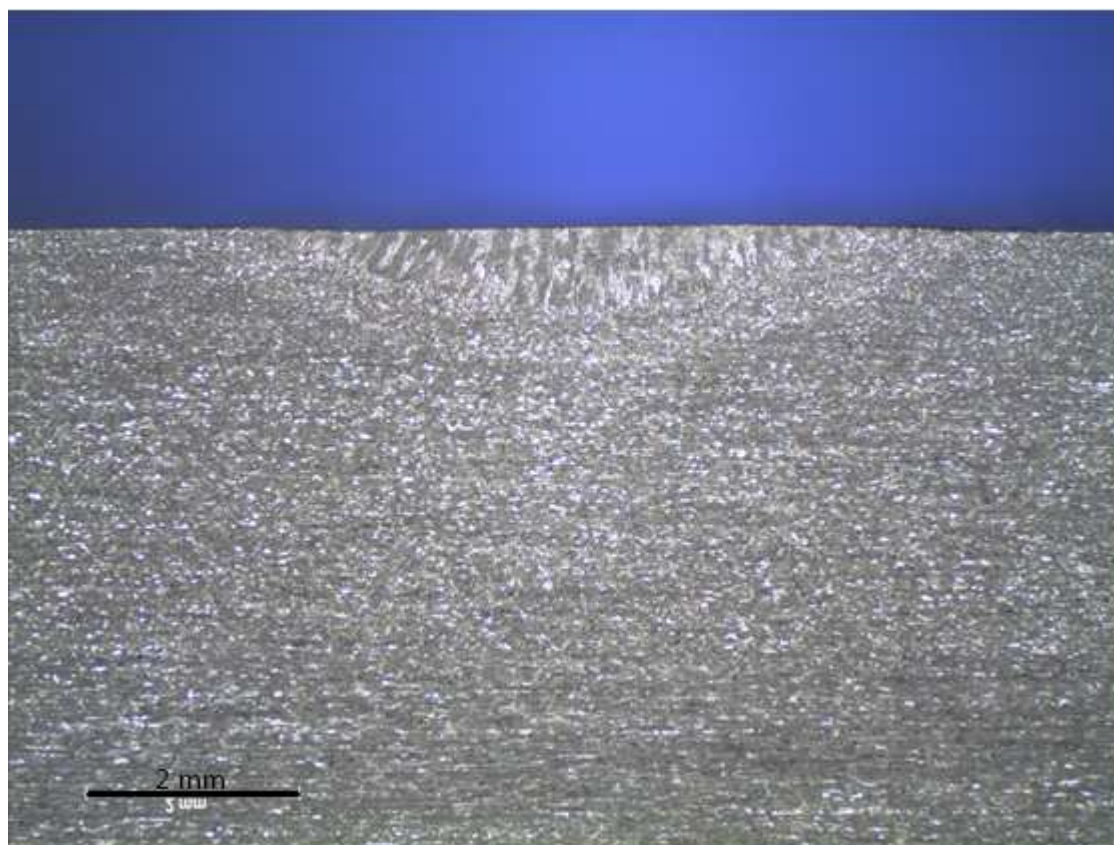


Slika 39. Uzorak 5

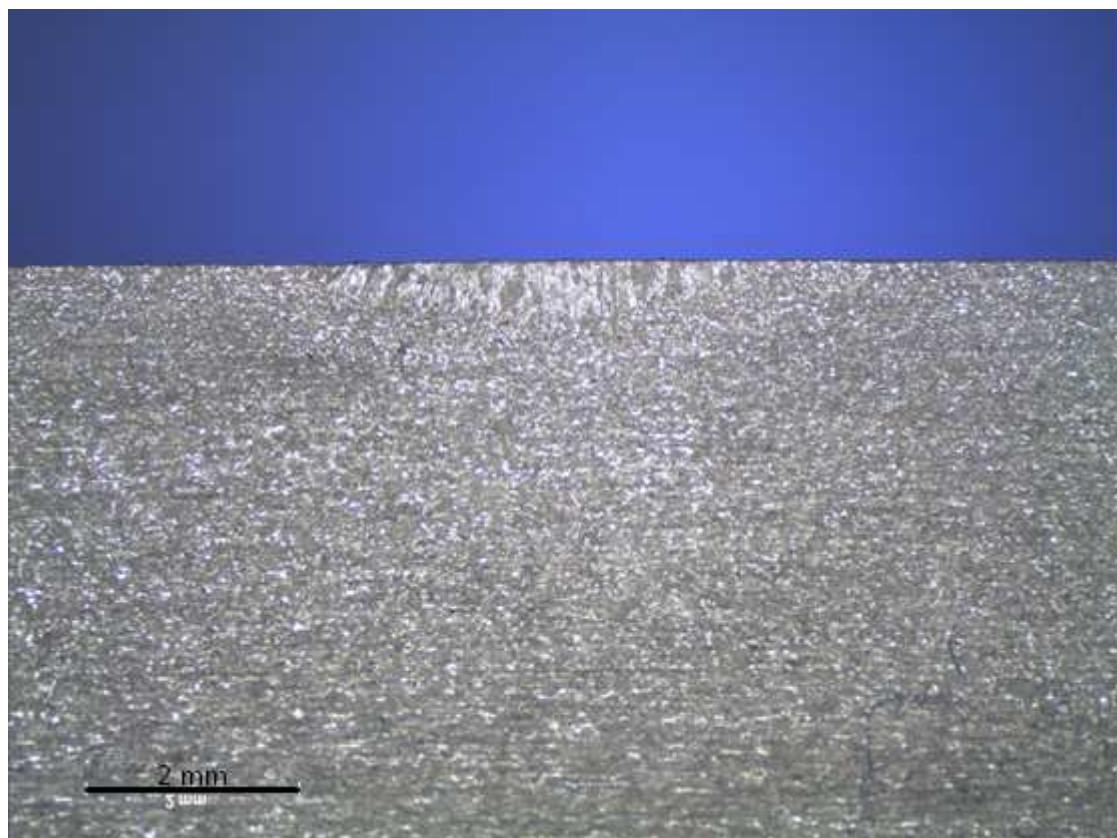


Slika 40. Uzorak 6

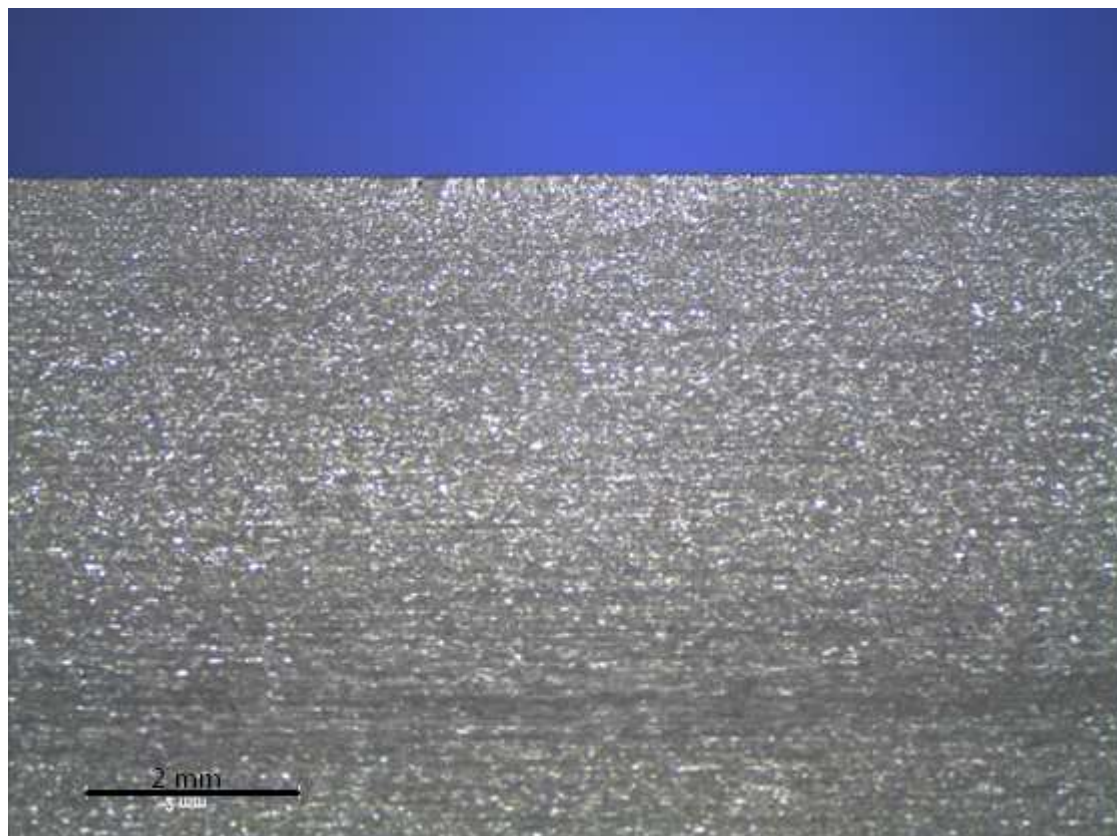
Makroskopski prikaz uzoraka je na slikama 41, 42 i 43.



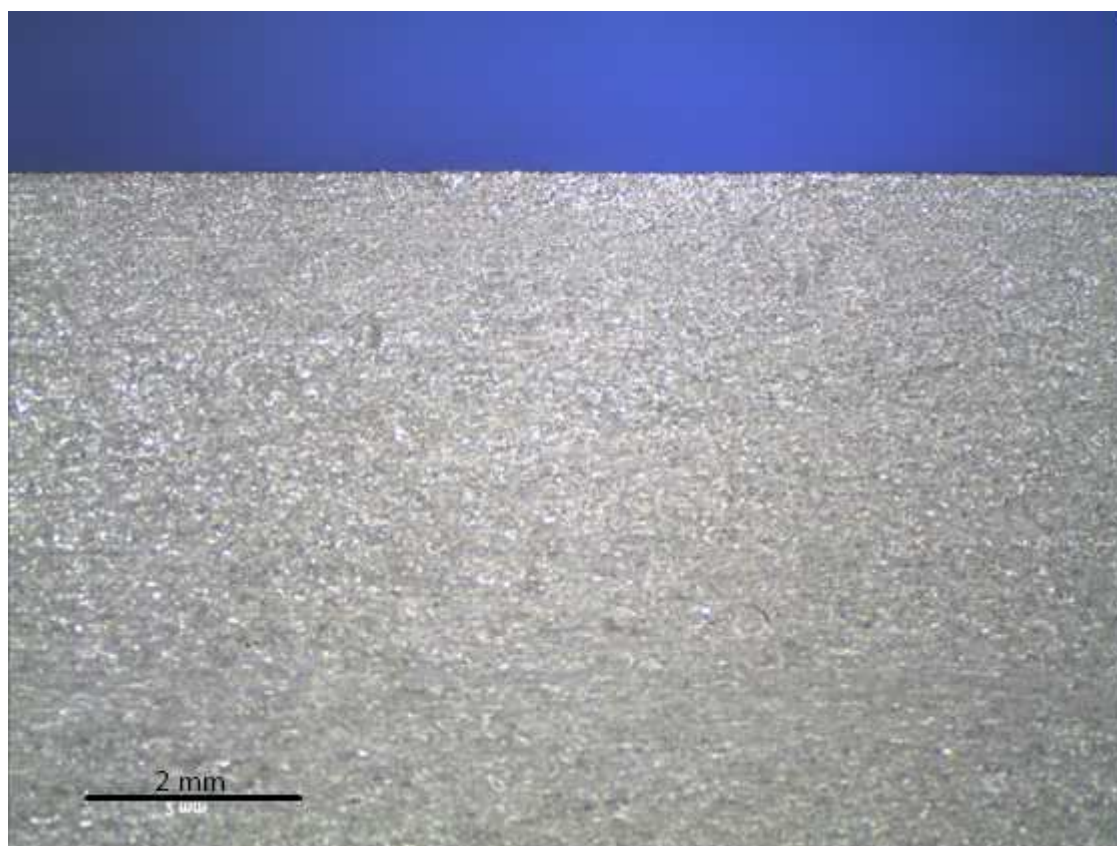
Slika 41. Makroizbrusak uzorka 2



Slika 42. Makroizbrusak uzorka 4



Slika 43. Makroizbrusak uzorka 5



Slika 44. Makroizbrusak uzorka 6

3.4.6. Analiza utjecaja frekvencije

Geometrijske značajke zavora su prikazane u tablici 14.

Tablica 14. Geometrijske značajke zavora

Uzorak	Širina zavora (mm)	Penetracija (mm)	Čišćenje (mm)
2	5,50	0,79	4,58
4	2,90	0,51	4,13
5	-	-	4,46
6	-	-	4,30

Frekvencija ne bi smjela utjecati na veličinu zone čišćenja, te to vidimo i u rezultatima ispitivanja jer su vrijednosti vrlo slične, tj. nema značajnijih promjena.

Povećanjem frekvencije bi trebali dobiti povoljniji omjer širine i penetracije, no u našem slučaju to se nije dogodilo. Vizualnom kontrolom nakon zavarivanja se vidjelo da se širina očekivano smanjila, te je pretpostavljeno da se penetracija u skladu s tim povećala, no nakon

izrade makroizbrusaka vidljivo je da to nije tako. Penetracija se znatno smanjila, te je na uzorku 6 jedva vidljiva ikakva promjena. Ukoliko bi se radila daljnja ispitivanja preporučuje se korištenje još većih frekvencija koje nam uređaj omogućava.

4. ZAKLJUČAK

Kroz Završni rad je opisan TIG postupak zavarivanja. Obuhvaćene su sve bitne stavke postupka, kao što su princip rada, potrebna oprema, parametri postupka i njihov odabir, te greške koje je moguće očekivati. TIG postupak zavarivanja zahtjeva vrlo veliku količinu znanja i iskustva kako bi se osigurala njegova pravilna primjena u praksi, no i to naravno ne garantira stopostotni učinak, jer je zavarivanje vrlo kompleksan proces na koji utječe jako velik broj čimbenika.

U eksperimentalnom dijelu rada zavareni su uzorci s različitim parametrima zavarivanja (udio negativnog polariteta i frekvencije) u svrhu definiranja njihovog utjecaja na profil zavara. Povećavan je udio negativnog polariteta u periodi (prilikom zavarivanja izmjeničnom strujom) od 40% do 90%, i time je dobiveno smanjenje širine zavara s 10,31 mm na 4,03 mm, smanjenje penetracije s 2,70 mm na 0,65 mm, te smanjenje čišćenja oksidnog sloja sa 4,15 mm na 1,96 mm. Očekivano povećanje penetracije nije postignuto, vjerojatno radi nepravilne geometrije elektrode. Utjecaj frekvencije na profil zavara ispitan je variranjem parametara od 50 Hz do 200 Hz gdje su dobiveni navari širine 5,50 mm i penetracije 0,79 mm (za iznos frekvencije od 50 Hz), te navar zanemarive penetracije (za frekvenciju od 200 Hz).

Preporuka za daljnje istraživanje bi bilo ponoviti ispitivanja s adekvatnom pripremom vrha elektrode prije zavarivanja svakog uzorka i korištenjem većih frekvencija koje uređaj može ponuditi.

LITERATURA

- [1] Smith D.: Welding skills and technology, McGraw.Hill Book Co., Singapore 1986.
- [2] Garašić I., Predavanja TIG zavarivanje, Zagreb, 2018.
- [3] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak, 2003.
- [4] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2012.
- [5] <http://www.masterweld.co.uk/Catalogue/Welding-Supplies/TIG-torches-spares/Replacement-TIG-Torches/Masterweld-TIG-Torches-with-Autofeed/Masterweld-AWT300-with-Autofeed>; 2020.
- [6] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical journal 8, 4(2014), 426-432, 2014.
- [7] Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Miller, 2018.
- [8] Samardžić I., Analiza tehnološkiosti zavarenih konstrukcija, SFSB. Slavonski Brod.
- [9] <http://weldersupply.blogspot.com>; 11.11.2015.
- [10] Technical specifications for TIG welding, CK Worldwide, May 2008.
- [11] Jeyaprakash N., Haile A., Arunprasath M.: The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review, The IJES, 2015.
- [12] Tungsten guidebook, Diamond Ground Products, June 2013.
- [13] Kralj S., Kožuh Z., Garašić I., Panjković V.: Automatizirano TIP TIG zavarivanje, Zbornik radova: Robotizacija i automatizacija u zavarivanju i ostalim tehnikama, Slavonski Brod, 2009.
- [14] V. Kumar, B. Lucas, D. Howsw, S. Raghunathan, L. Vilarinho: Investigation of the A-TIG Mechanism and the Productivity Benefits in TIG Welding, 15th International Conference on the Joining of Materials, Helsingor, Denmark, 2009.
- [15] A. Rodrigues, A. Loureiro, A. Batista: Effect of Activating Fluxes on Bead Geometry and on Microstructure of a-TIG Welds, Benefits of new methods and trends in welding to economy, productivity and quality, Prague, 2005.
- [16] N. Šakić, N. Štefanić: Methods of optimization of welding processes: state of the art and future trends, EUROJOIN 4, Cavtat-Dubrovnik, 2001.
- [17] P.K. Baghel, D.S. Nagesh: Pulse TIG welding: Process, Automation and Control, Journal of Welding and Joining 2017; 35(1): 43-48.

- [18] B.J. Qi, M.X. Yang, B.Q. Cong, F.J. Liu: The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel, Springer-Verlag, London, 2012.
- [19] B.L. Jarvis: Keyhole gas tungsten arc welding: a new process variant, University of Wollongong, 2001.
- [20] D.A. Kumar, B. Varshini, R. Harshita: Technology Development In Welding – Orbital Welding, GMR Institute of Technology, Andhra Pradesh, India, 2019.
- [21] <https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/5xxx/5083.pdf>, 24.9.2018.
- [22] <http://hr.signi-aluminio.com/aluminum-plate-sheet/marine-aluminum-plate-sheet/5083-mmmarine-grade-aluminum-plate-sheet.html>, 5.9.2018.
- [23] https://www.ewm-sales.com/en/TIG_welding_machines/Tetrix_AC_DC/Tetrix_230_AC_DC_Comfort_2_0_puls_5P_TM--090-000239-00502.html, 4.9.2017.