

MIG zavarivanje nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

Lesničar, Dejan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:998528>

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

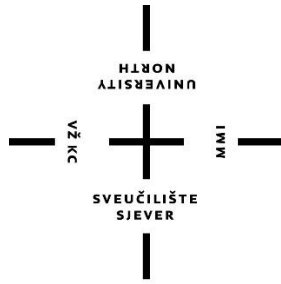
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





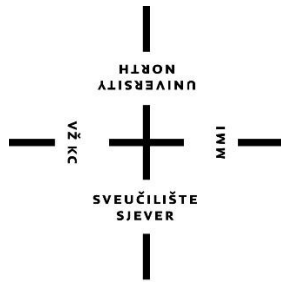
Sveučilište Sjever

Diplomski rad br. 126/STR/2024

MIG zavarivanje nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

Dejan Lesničar, 2105/336

Varaždin, listopad 2024. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Diplomski rad br. 126/STR/2024

MIG zavarivanje nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

Student:

Dejan Lesničar, 2105/336

Mentor:

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj., IWE

Varaždin, listopad 2024. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Dejan Lesničar	JMBAG	0336021034
DATUM	26.09.2024.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	MIG zavarivanje nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	MIG welding of stainless steel X5CrNi18-10		

MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Boris Jalušić, član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva		
	5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	126/STR/2024
OPIS	<p>U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupke zavarivanja koje se koriste na nehrđajućim čelicima. Posebnu pozornost posvetiti MIG/MAG zavarivanju, odabiru parametara i zaštitnih plinova za taj postupak. Objasniti odabir dodatnog materijala za zavarivanje i oblikovanje pripreme zavarenih spojeva. Opisati korozijska svojstva i ispitivanje otpornosti na koroziju na nehrđajućim čelicima.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim MIG postupkom zavarivanja kroz različita stanja pokusa definirati utjecaj parametara zavarivanja pri izradi kutnog spoja na nehrđajućem čeliku X5CrNi18-10. Navesti sve utjecajne parametre u svim stanjima eksperimenta. Na izrađenim zavarenim spojevima provesti ispitivanje makrostrukture i određivanje geometrije zavarenog spoja. Također provesti proizvoljno ispitivanje otpornosti na koroziju. Prema rezultatima ispitivanja donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>

ZADATAK URUČEN

26.09.2024.



POTPIS MENTORA

M. Bušić

Predgovor

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na savjetima, pomoći, utrošenom vremenu i prenesenom znanju kroz cijeli studij i za ovaj diplomski rad. Isto tako zahvaljujem i ostalim profesorima koji su mi prenijeli svoje znanje tijekom studija strojarstva na Sveučilištu Sjever.

Također zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci i motivaciji koja mi je pružena tijekom studiranja i pisanja ovog diplomskog rada.

Sažetak

Ovaj diplomski rad bavi se proučavanjem MIG zavarivanja nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10, jednog od najčešće korištenih nehrđajućih čelika u industriji. Na početku rada prikazana je kratka povijest zavarivanja, s posebnim naglaskom na razvoj tehnologija i procesa zavarivanja. Teoretski dio rada posvećen je zavarljivosti nehrđajućih čelika, MIG/MAG postupku zavarivanja, ključnim parametrima zavarivanja, načinima prijenosa metala, izboru zaštitnih plinova te važnosti pravilne zaštite od korozije. U eksperimentalnom dijelu rada opisan je postupak zavarivanja nehrđajućeg čelika MIG metodom, koji je proveden u laboratoriju Sveučilišta Sjever. Zavareno je ukupno pet uzoraka, koji su kasnije rezani, brušeni i polirani. Uzorci su potom pripremljeni za ispitivanje na mikroskopu elektrokemijskim nagrizanjem. Na temelju dobivenih rezultata donijeti su zaključci o utjecaju parametara na geometriju zavarenog spoja i postojanost na koroziju. Na kraju eksperimentalnog dijela provedeno je korozijsko ispitivanje uzoraka u klorovodičnoj kiselini.

Ključne riječi: MIG zavarivanje, nehrđajući čelik, X5CrNi18-10, zavarljivost, parametri zavarivanja, prijenos metala, zaštitni plinovi, korozija, rezanje, poliranje, analiza

Abstract

This thesis focuses on the study of MIG welding of stainless steel X5CrNi18-10, one of the most commonly used stainless steels in the industry. The paper begins with a brief history of welding, with a particular emphasis on the development of welding technologies and processes. The theoretical part of the thesis is dedicated to the weldability of stainless steels, the MIG/MAG welding process, key welding parameters, methods of metal transfer, the selection of shielding gases, and the importance of proper corrosion protection. The experimental part of the work describes the MIG welding procedure of stainless steel, which was conducted in the laboratory of the University North. A total of five samples were welded, then cut, ground, and polished. The samples were subsequently prepared for microscopic examination by electrochemical etching. Based on the obtained results, conclusions were drawn regarding the impact of parameters on the weld joint geometry and corrosion resistance. At the end of the experimental part, corrosion testing of the samples was conducted in hydrochloric acid.

Key words: MIG welding, stainless steel, X5CrNi18-10, weldability, welding parameters, metal transfer, shielding gases, corrosion, cutting, polishing, analysis

Popis oznaka i kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
<i>EN</i>	<i>Europska norma</i>	
<i>ISO</i>	<i>Međunarodna organizacija za standardizaciju</i>	
<i>OM</i>	<i>Osnovni materijal</i>	
<i>DM</i>	<i>Dodatni materijal</i>	
<i>Cr</i>	<i>krom</i>	
<i>Ni</i>	<i>nikal</i>	
<i>MIG</i>	<i>Elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštiti inertnog plina</i>	
<i>MAG</i>	<i>Elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštiti aktivnog plina</i>	
<i>TIG</i>	<i>Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina</i>	
<i>CO₂</i>	<i>ugljkov dioksid</i>	
<i>O₂</i>	<i>kisik</i>	
<i>Mo</i>	<i>molibden</i>	
<i>Si</i>	<i>silicij</i>	
<i>C</i>	<i>ugljik</i>	
<i>I</i>	<i>jakost struje</i>	<i>A (amper)</i>
<i>U</i>	<i>napon</i>	<i>V (volt)</i>
<i>S</i>	<i>brzina zavarivanja</i>	<i>mm/min</i>

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Povijest zavarivanja.....	3
3. Proces zavarivanja i zavarljivost	4
3.1. Priprema za zavarivanje nehrđajućih čelika.....	7
3.2. Zavarivanje nehrđajućih čelika	7
3.3. Postupci zavarivanja nehrđajućih čelika	8
3.4. Greške kod zavarivanja nehrđajućih čelika.....	10
3.5. Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika	11
3.6. Odabir dodatnog materijala.....	13
4. MIG/MAG postupak zavarivanja.....	18
4.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja	20
4.2. Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja	21
4.3. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG zavarivanju.....	22
4.3.1. Prijenos materijala kratkim spojem	23
4.3.2. Prijenos materijala prijelaznim lukom.....	23
4.3.3. Prijenos materijala štrcajućim lukom	24
4.3.4. Prijenos materijala impulsnim lukom.....	25
5. Zaštitni plinovi	26
5.1. Inertni plinovi.....	27
5.1.1. Argon.....	27
5.1.2. Helij	28
5.2. Aktivni plinovi	29
5.2.1. Kisik (O ₂).....	29
5.2.2. Vodik (H ₂)	29
5.2.3. Ugljični dioksid (CO ₂).....	29
5.3. Smjese plinova	30
5.3.1. Argon/Helij.....	30

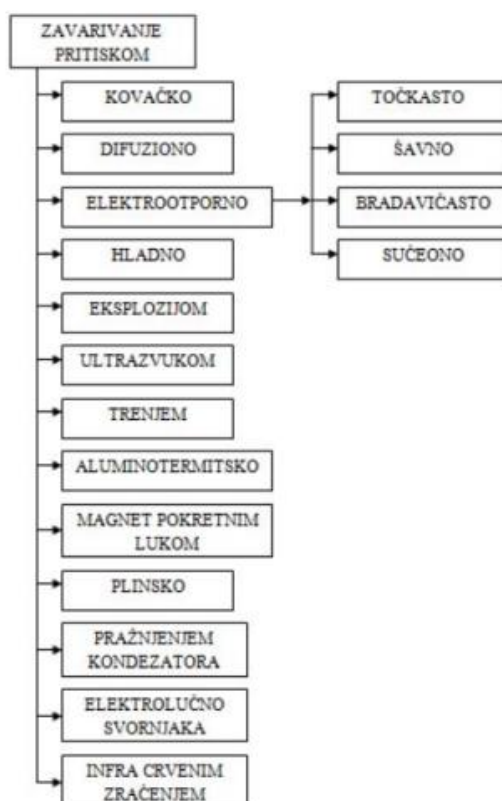
5.3.2. Argon/Ugljikov dioksid	31
5.3.3. Argon/Kisik	32
6. Zaštita od korozije	33
6.1. Općenito o koroziji.....	33
6.2. Korozija s obzirom na mehanizam djelovanja	34
6.3. Oblici korozije kod metalnih materijala.....	34
6.3.1. Opća korozija.....	34
6.3.2. Lokalna korozija	35
6.3.3. Selektivna korozija	35
6.3.4. Interkristalna korozija.....	36
6.4. Zaštita od korozije i njena prevencija nakon zavarivanja	37
6.5. Uzročnici korozije nakon zavarivanja.....	37
6.6. Završne obrade zavara radi zaštite od korozije	38
7. Eksperimentalni dio.....	40
7.1. Osnovni i dodatni materijal za zavarivanje.....	40
7.2. Oprema za eksperimentalni rad.....	43
7.2.1. Uređaj za zavarivanje	43
7.2.2. Uređaj za automatsko pravocrtno zavarivanje.....	44
7.2.3. Tračna pila	45
7.2.4. Stroj za poliranje.....	45
7.2.5. Stereomikroskop	46
7.3. Postupak eksperimentalnog rada.....	47
7.4. Rezultati eksperimenta.....	55
7.5. Korozijsko ispitivanje	60
8. Zaključak	63
Literatura	64
Popis slika	67
Popis tablica	70

1. Uvod

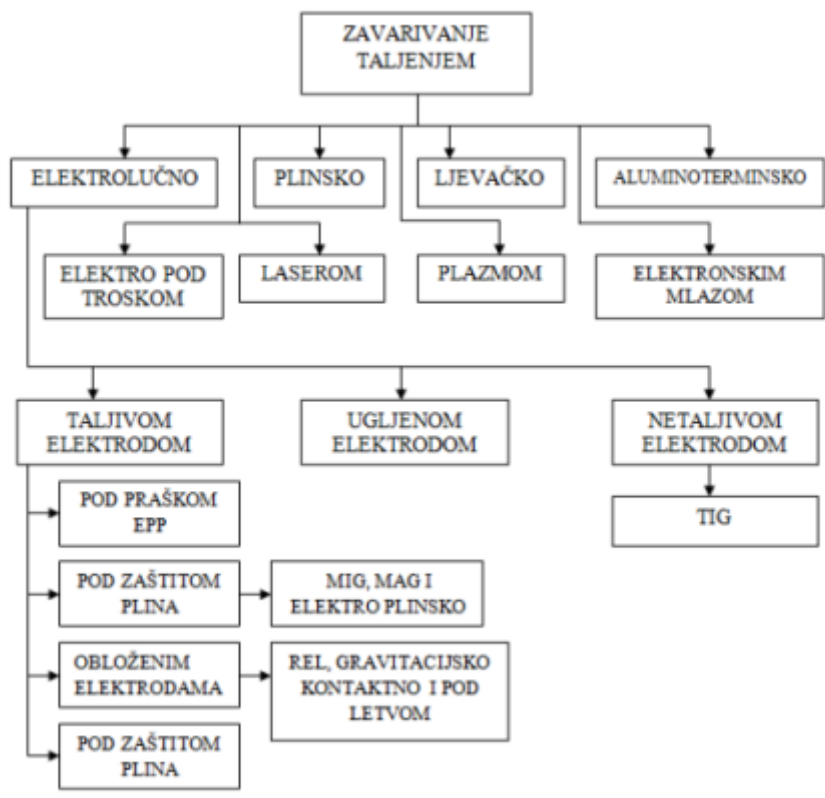
Zavarivanje je danas jedna od najkorištenijih metoda spajanja dvaju ili više različitih ili sličnih materijala primjenom topline. Zbog vrlo različitih mogućnosti primjene zavarivanje se koristi u puno industrijskih grana. Razvijanje određenih industrija poput kemijske, naftne, brodogradnje rezultiralo je istraživanjem zavarivanja raznorodnih materijala. Konstrukcije su u tim industrijama izložene različitim opterećenjima i naprezanjima, zbog toga su potrebne različite kombinacije čelika za ispunjavanje uvjeta eksploatacije.

Kod zavarivanja nailazi se na različite probleme, kao što je nastanak zaostalih naprezanja zbog samog zavarivanja kojim se smanjuju mehanička svojstva i sigurnost spojeva, a time i do pojave pukotina. Kako bi se spriječila pojava pukotina jako je važno prilikom zavarivanja dobro proučiti svojstva materijala koja su odabrana kao osnovni i dodatni materijal kod zavarivanja. Također, bitno je i dobro izabrati tehniku rada i samim time i postupak zavarivanja.

Na slici 1 moguće je vidjeti podjelu postupaka zavarivanja pritiskom i na slici 2 podjelu zavarivanja taljenjem.



Slika 1. Podjela zavarivanja pritiskom [1]



Slika 2. Podjela zavarivanja taljenjem [1]

2. Povijest zavarivanja

Postupci zavarivanja koji se danas koriste otkriveni su u 20. i 21. stoljeću. Postupak zavarivanja kovanjem i zavarivanja lijevanjem bio je poznat čak i u starom vijeku. Korištenje metala nije bilo moguće tako dugo dok čovjek nije stekao znanje kako izdvajati metale iz rude postupkom taljenja. Elementarni bakar se počeo koristiti čak prije 10000 godina, dok je 5000 godina prije Krista u Perziji i Afganistanu započeto izdvajanje bakra, a na srednjem istoku otkrivena je bronca. Broncu možemo okarakterizirati kao mnogo tvrđu od bakra, pa samim time i puno korisniju od bakra za upotrebu. Postupak zavarivanja razvijao se kao sastavni dio kovačkih, zlatarskih i ljevačkih vještina, pri izradi stvari koje su bile potrebne u tadašnjem načinu života, to je bilo različito oruđe za rad, nakit, posude, građevine i slično [1].

Postupci pri kojima se zavaruje uz zaštitne plinove počinju se primjenjivati i razvijati najviše nakon Drugog svjetskog rata, primjerice MIG/MAG postupak razvijen je baš nakon Drugog svjetskog rata. Hladno zavarivanje pritiskom počinje se primjenjivati od 1948. godine. Noviji postupci javljaju se nakon 1950. godine, a to su: zavarivanje pod troskom, snopom elektrona, laserom i ultrazvukom, plazmom i trenjem [1].

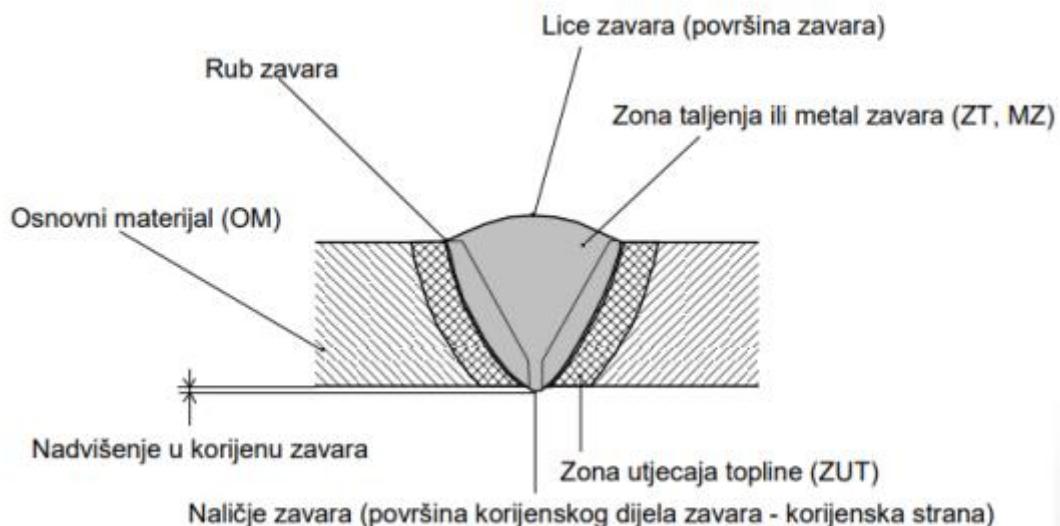
MIG postupak je razvijen na „Battell Memorial Institute“ 1948. godine u Sjedinjenim Američkim državama kao Sigma postupak što znači „Shielded Inert Gas Metal Arc“. Međutim, smatra se da su počeci bili već 1920. godine kad je prvi puta provedeno zavarivanje golom žicom gdje je dodavanje žice bilo regulirano naponom električnog luka. Godine 1926. opet je proveden sličan postupak, no nije ga bilo moguće primijeniti u praksi. 1953. počinje razvoj zavarivanja čelika istom opremom kao kod MIG zavarivanje, koji se temelji na primjenjivanju čeličnih elektroda kao dodatnog materijala i plina CO₂ kao zaštitne atmosfere mjesta zavara. Takav proces koji se razvio u nekadašnjem SSSR-u i postaje najvažniji proces spajanja nerastavljivih čeličnih konstrukcija. MIG/MAG postupak se i danas razvija najviše od svih drugih konvencionalnih postupaka zavarivanja [1].

3. Proces zavarivanja i zavarljivost

Zavarivanje se definira kao postupak spajanja dvaju ili više pozicija ili dijelova, taljenjem ili pritiskom, s mogućim dodatnim materijalom. Danas zavarivanje koristi puno različitih industrija, a najviše u automobilske industriji. Bez zavarivanja današnji svijet je nezamisliv. Samim postupkom zavarivanja moguće je spajati i metalne i nemetalne materijale. Kada materijal ispunjava zahtjeve svojim mehaničkim i drugim potrebnim svojstvima tada se smatra da je materijal zavarljiv. Zavareni spojevi su nerastavljivi i sastoje se od zone taljenja i zone utjecaja topline. U zoni taljenja se javlja kristalizacija i skrućivanje, a zona utjecaja topline je dio osnovnog materijala kod kojeg dolazi do promjene kristalne strukture pod utjecajem topline koja se unosi zavarivanjem. Širina utjecaja topline zavisi od unosu topline, a najviše se kreće između 2 i 8 mm [2].

Zavarljivost možemo podijeliti na sljedeće:

- dobra zavarljivost – ukoliko je moguće zavarivanje bez specijalnih radnji koje moramo prije samog postupka obaviti,
- slaba zavarljivost – ako su potrebne specijalne radnje i različite mjere opreza ,
- jako slaba zavarljivost – ukoliko je potrebno izvesti radnje zbog kojih praktički i nije moguće zavariti, a da bude ekonomski prihvatljivo,

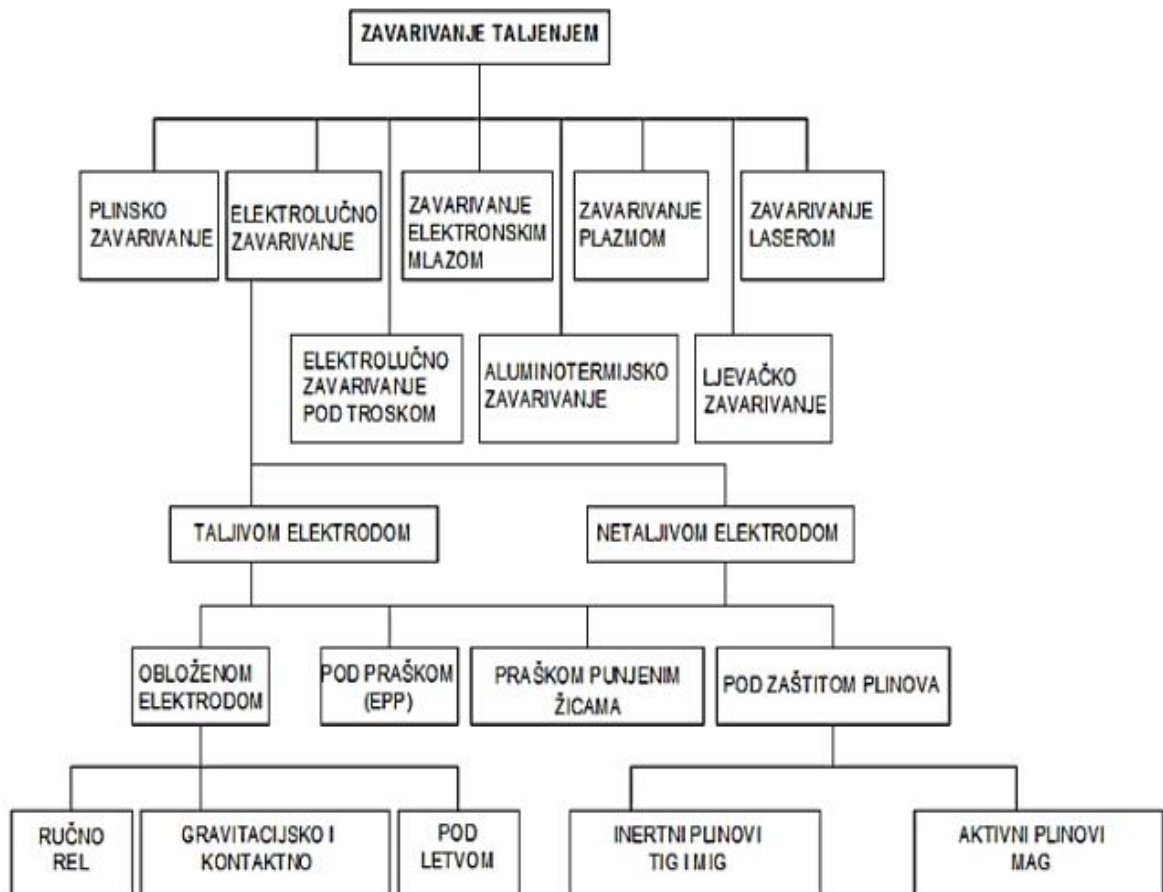


Slika 3. Zavareni spoj i njegovi dijelovi [2]

Postupke zavarivanja moguće je podijeliti prema načinu spajanja:

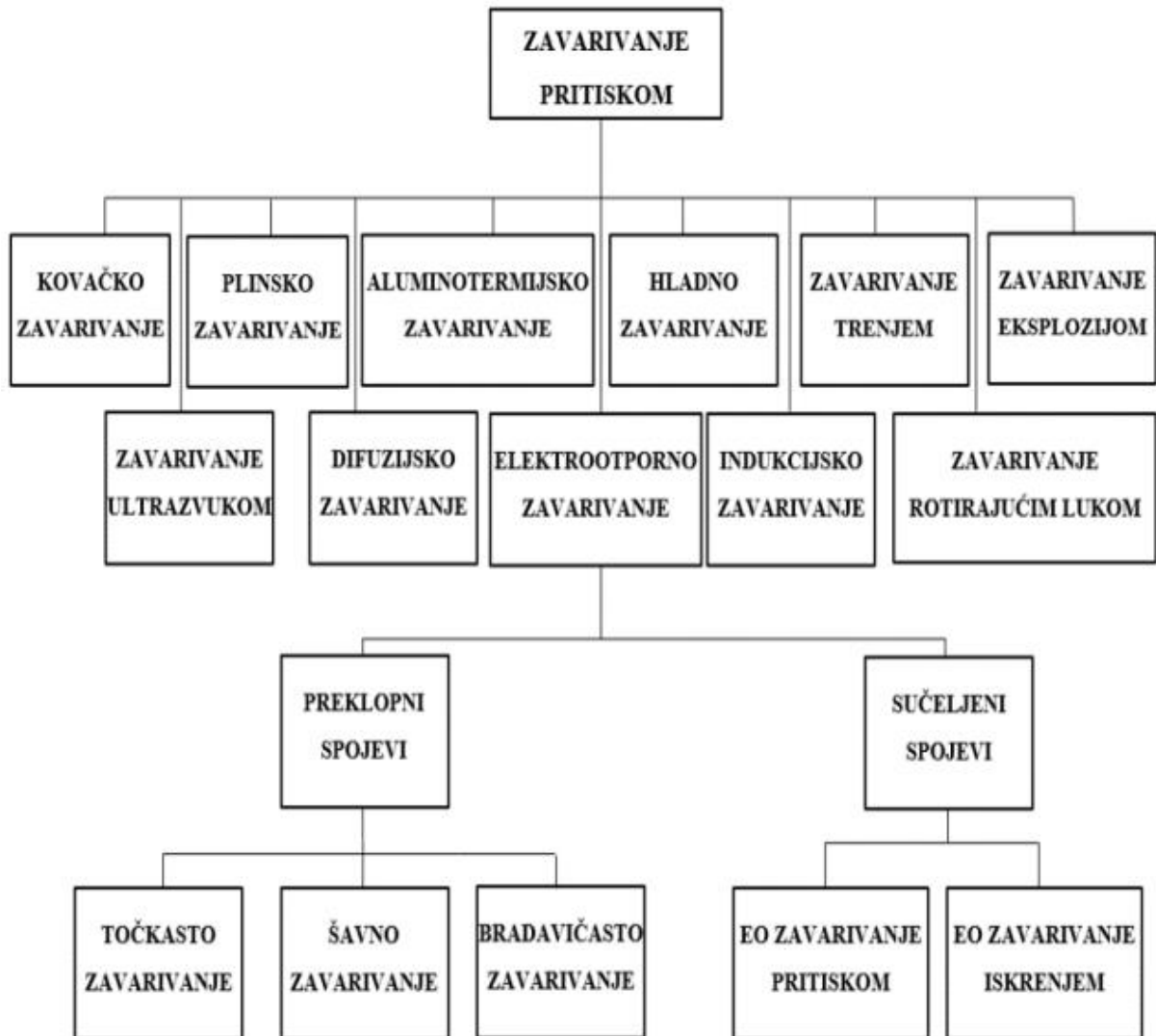
- zavarivanje taljenjem,
- zavarivanje pritiskom,

Zavarivanje taljenjem je postupak zavarivanja u kojem se materijali tale na mjestu spoja i spajaju se uz dodatni materijal ili bez njega. Ovaj postupak koristi toplinsku energiju za spajanje materijala [2].



Slika 4. Zavarivanje taljenjem [2]

Zavarivanje pritiskom je postupak zavarivanja u kojem se materijali spajaju na mjestu spoja pomoću pritiska ili udara, bez obzira na to jesu li u čvrstom ili omekšanom stanju. Za spajanje materijala koristi se toplinsko-mehanička ili isključivo mehanička energija [2].



Slika 5. Zavarivanje pritiskom [2]

3.1. Priprema za zavarivanje nehrđajućih čelika

Priprema površine za zavarivanje nehrđajućeg čelika iznimno je važna, a isto tako i čistoća same površine. Nehrđajući čelici jako su osjetljivi na druge ugljične čelike i zbog toga alate koji se koriste nije poželjno koristiti i kod zavarivanja drugih ugljičnih čelika. Sve to bitno je zbog izbjegavanja pojave korozije. Brušenje ugljičnog čelika u blizini također može izazvati koroziju.

Sljedeće što je jako bitno kod pripreme je odabir dodatnog materijala za zavarivanje i zbog toga je bitno znati koja je vrsta osnovnog materijala koji se zavaruje. Često se koristi dodatni materijal s istom oznakom kao što je osnovni.

Brušenje treba izvesti abrazivnim alatom bez prisustva željeza. Četkanje se obavlja četkama od nehrđajućeg čelika, a alat poput brusnih diskova, turpija, listova pile, žičanih četki koji je koje je korišten za ugljične čelike ne smije se koristiti na nehrđajućim čelicima. Površinski oksidi moraju se ukloniti mehaničkim metodama, kemijskim čišćenjem ili nekim drugim načinom. Površine moraju biti čiste, bez površinskih oksida, organskih onečišćenja, diskontinuiteta boje i materijala koji bi mogli utjecati na samu kvalitetu zavara. Svi ovi zahtjevi za čistoću jako su bitni za zavarivanje nehrđajućeg čelika.

Temperatura je isto jako bitna za postupak zavarivanja i potrebno je pratiti i za osnovni i za dodatni materijal. Ako temperatura nije unutar potrebnih propisanih parametara, moguća je pojava pogrešaka u zavarenom spoju.

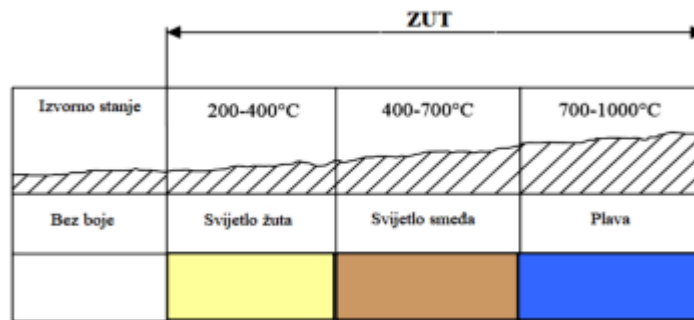
3.2. Zavarivanje nehrđajućih čelika

Pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika su sljedeća:

- mjesto zavara mora biti čisto i glatko obrađeno, bez prisustva masnoće, vlage i drugih nečistoća,
- pjeskarenje treba obavljati čistim pijeskom,
- odabir dodatnog materijala je vrlo važan,

Nehrđajuće čelike moguće je zavarivati korištenjem izmjenične i istosmjerne struje uz što kraći električni luk. Unos topline mora biti ograničen jer može utjecati na korozijsku otpornost i time dovesti do izobličenja materijala. Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika dolazi do obojenosti zavara i područja oko zavara zbog oksidacije. Tada se stvara debeli sloj kromovog oksida koji uzrokuje osiromašenje površine kromom, što može dovesti do nastanka korozije. Na višim temperaturama dolazi do stvaranja debljeg sloja oksida. Iako se otpornost

na koroziju i debljina oksidnog sloja ne mogu direktno izmjeriti, može se reći da je tamnija boja pokazatelj debljeg sloja oksida, kao što je prikazano na slici 6. Do debljine 20 nm oksidni sloj je metalnog sjaja, a pasivni krom – oksidni sloj na površine sam nastaje okvirno nakon šest tjedana. Kako bi se nakon zavarivanja uklonila troska i srh sa zavarenih dijelova te očuvala njihova korozijska postojanost, potrebno je materijal jetkati i pasivirati posebnim kemijskim sredstvima pripremljenim za tu svrhu.



Slika 6. Okvirni prikaz promjene boje oksidnog sloja kod povećanja temperature [22]

3.3. Postupci zavarivanja nehrđajućih čelika

Zavarivanje nehrđajućeg čelika predstavlja poseban izazov. Da bi se postigli čisti zavari i trajno stabilni spojevi s minimalnim rizikom od korozije, važno je najprije točno odrediti vrstu nehrđajućeg čelika. Nakon toga, način i postupak zavarivanja moraju biti jako dobro usklađeni. Zavarivanje se obično izvodi metodama TIG, MIG, FCAW (zavarivanje praškom punjenom žicom), plazma zavarivanje, EPP i lasersko zavarivanje. Metode zavarivanja pritiskom koje se koriste su elektrootporno točkasto, šavno i visokofrekventno zavarivanje.



Slika 7. TIG zavarivanje cijevi od nehrđajućeg čelika [23]

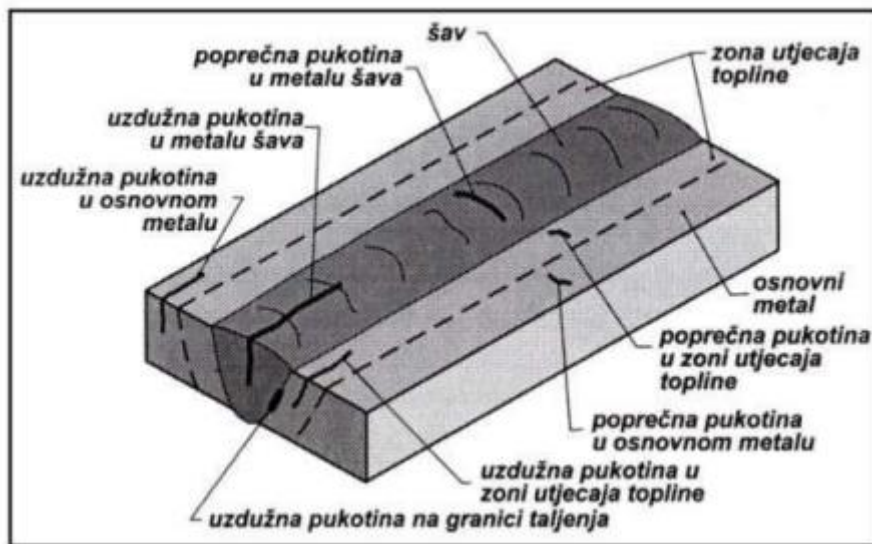


Slika 8. MIG/MAG zavarivanje cijevi od nehrđajućeg čelika [23]

3.4. Greške kod zavarivanja nehrđajućih čelika

Razumijevanje čestih grešaka prilikom zavarivanja je prvi korak prema njihovoj prevenciji. Zavarivanje nehrđajućih čelika gotovo se ne razlikuje od zavarivanja ugljičnih čelika, no potrebna je veća pažnja i kontrola prilikom zagrijavanja i hlađenja. Posebno je važno odabrati odgovarajući dodatni materijal s obzirom na osnovni materijal koji se koristi.

Najčešće greške prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika su pukotine, čak i prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, koji se najviše koriste. To se događa jer austenitnim čelicima nedostaje ferit koji otapa nečistoće, a njihova prisutnost može rezultirati pukotinama. Kako bi se izbjegle pukotine u tim metalima, posebno u potpuno austenitnim strukturama, preporučuje se odabir dodatnog materijala koji sadrži ferit.



Slika 9. Moguća mjesta pojava pukotina [17]

3.5. Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika

Svojstva i kvaliteta zavarenog spoja kod različitih vrsta čelika najviše ovise o odabiru dodatnog materijala. Izbor dodatnog materijala je posebno otežan zbog bitno različitih svojstava osnovnih materijala. Dodatni materijal može imati svojstva koja su manje ili više slična legiranom osnovnom materijalu, ili može biti potpuno različit od bilo kojeg osnovnog materijala, ovisno o vrsti čelika koji se zavaruje i uvjetima u kojima će se koristiti. Pravilnim odabirom dodatnog materijala treba spriječiti nastanak difuzije koja uzrokuje krhkost i pojavu pukotina [4].

Dodatni materijali za zavarivanje su:

- žičane elektrode,
- obložene elektrode,
- prah,
- praškom punjena žica,
- zaštitni plinovi,



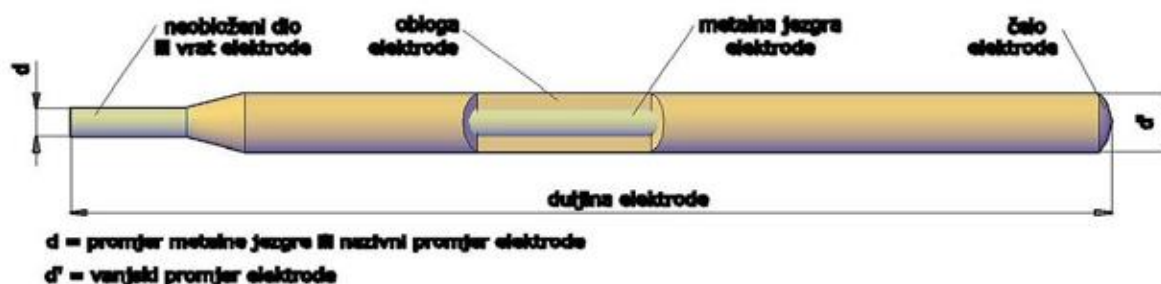
Slika 10. Prikaz dodatnog materijala tvrtke Lincoln Electric [4]

Tablica 1. Preporučeni dodatni materijali prema vrsti nehrđajućeg čelika [24]

OM		DM		
EN10088		EN1600	EN12072	EN12073
Naziv	Broj	Obložene elektrode	Žice	Praškom punjene žice
X5CrNi18-10	1.4301	E 19 9	G 19 9	T 19 9
X5CrNi18-9	1.4307	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X5CrNi19-11	1.4306	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X5CrNiTi18-10	1.4541	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	E 19 13 4 N L	G 19 13 4 L	T 13 13 4 N L
X10CrNi18-8	1.4310	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi18-7	1.4318	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	E 22 12	G 22 12 H	T 22 12 H
X8CrNi25-21	1.4845	E 25 20	G 25 20	T 25 20
X25CrNiMo18-15-4	1.4438	E 19 13 4 N L	G 19 13 4 L	T 13 13 4 N L
X2CrTi12	1.4512	E 19 9 L	G 19 9 L	T 13 Ti
X6Cr17	1.4016	E17 ili 19 9 L	G 17 ili 19 9 L	T 17 ili 19 9 L
X3CrTi17	1.4510	E 23 12 L	G 23 12 L	T 23 12 L
X2CrMoTi18-2	1.4521	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrTiNb18	1.4509	E 23 12 L	G 23 12 L	T 23 12 L
X6CrMo17-1	1.4113	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 Nb
X2CrNiN23-4	1.4362	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X12Cr13	1.4006	E 13 ili 19 9 L	G 13 ili 19 9 L	T 13 ili 19 9 L
X20Cr13	1.4021	E 13 ili 19 9 L	G 13 ili 19 9 L	T 13 ili 19 9 L
X30Cr13	1.4028	E 13 ili 19 9 L	G 13 ili 19 9 L	T 13 ili 19 9 L

*Oznaka G za MIG/MAG, W za TIG, P za plazma i S za EPP

OBLOŽENA ELEKTRODA



Slika 11. Dijelovi obložene elektrode [4]

3.6. Odabir dodatnog materijala

Prilikom izbora dodatnog materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika, najveća paleta dodatnih materijala dostupna je u obliku elektrode. Elektrode omogućuju legiranje i iz obloge. Uobičajene vrste obloženih elektroda za zavarivanje austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika su one s rutilnom oblogom. Elektrode za zavarivanje feritnih i martenzitnih materijala često imaju bazičnu oblogu. Nehrđajuće elektrode mogu biti obložene nehrđajućom žicom jednakog ili sličnog sastava [4].

Kod zavarivanja istovrsnih nehrđajućih materijala, dodatni materijali obično imaju jednak ili nešto viši sadržaj legirajućih elemenata od osnovnog materijala. Preveliko odstupanje u legiranju između osnovnih i dodatnih materijala moglo bi u korozivnim medijima uzrokovati nastajanje galvanske korozije [4].

Za gotovo svaki austenitni nehrđajući čelik postoji odgovarajući dodatni materijal, no mnoge vrste proizvode samo nekolicina tvrtki. Većina legura dodatnog materijala koje su dostupne kao obložene elektrode također su dostupne u obliku pune žičane elektrode, žice s metalnom jezgrom ili prahom punjene žice. Ako odgovarajući dodatni materijal iste kategorije nije dostupan, odabire se onaj koji je više legiran od osnovnog materijala. Kada se zahtijevaju maksimalna čvrstoća i korozijska postojanost, dodatni materijal bi trebao biti jednak ili sličan osnovnom materijalu [4].

Preporučuje se da se austenitni precipitacijski očvrnuti čelici nakon zavarivanja ne obrađuju toplinski zbog mogućnosti pojave pukotina. Ovi materijali su teško zavarljivi, odnosno smatraju se nezavarljivima. U takvim slučajevima mogu se koristiti dodatni materijali

na bazi nikla i konvencionalnih austenitnih legura, posebno ako visoka čvrstoća zavara nije potrebna [4].

Za zavarivanje osnovnih martenzitnih i poluaustenitnih materijala, zavar treba naknadno obrađivati toplinskim procesom starenja [4].

Kod feritnih nehrđajućih čelika često se koriste nehrđajući austenitni dodatni materijali radi povećanja duktilnosti [4].

Prilikom zavarivanja dvaju različitih osnovnih nehrđajućih materijala, biraju se dodatni materijali koji su sastavom bliži ili jednako legirani kao više legirani osnovni materijal [4].

Za zavarivanje stabiliziranih i nestabiliziranih osnovnih materijala preporučuje se primjena stabiliziranih dodatnih materijala kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka interkristalne korozije [4].

Kod zavarivanja nehrđajućih materijala s nikalnim čelicima preporučuju se dodatni materijali na bazi nikla [4].

Zavarivanje nehrđajućih materijala s nelegiranim, toplinski postojanim ili sitnozrnatim čelicima često rezultira nastankom krhkih struktura ako se ne primjenjuje dodatni materijal ili ako se koriste uobičajeni nehrđajući dodatni materijali [4].

Tablica 2. Preporuka dodatnog materijala prema oznaci feritnog nehrđajućeg čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
405	405-Cb	Žarenje poboljšava duktilnost toplinski zahvaćenih zona OM i metala zavara. Metal zavarivanja tipa 405 sadrži kolumbij umjesto aluminija za smanjenje očvrnuća
	430	
	309	Ovi austenitni zavareni metali su mekani i duktilni. Međutim, toplinski zahvaćena zona OM ima ograničenu duktilnost
	310	
	410 - NiMo	
430	430	Žarenje koje se koristi za poboljšanje duktilnosti zavarenih spojeva. Zavareni metal je mekan i duktilni, ali toplinski zahvaćene zone OM imaju ograničenu duktilnost
	308	
	309	
	310	
430F	430	Primjenjuju se napomene na obične metale tipa 430
430F Se	308	Primjenjuju se napomene na obične metale tipa 430
	309	
	312	
446	446	Zavareni metal tipa 308 može se koristiti, ali neće pokazivati otpor jednak OM. Mora se uzeti u obzir razlika u koeficijentima proširenja osnovnog i zavarenog metala
	308	
	309	
	310	

Tablica 3. Preporuka dodatnoga materijala prema oznaci austenitnog nehrđajućeg čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
201	308	Tip 308 materijala često se naziva i 18-8 i 19-9 kompozicijom. Prave analize zavara zahtijevaju maksimalno 0.08 % C, minimalno 19% Cr i minimalno 9% Ni. Tip 310 je moguće koristiti, no postoji opasnost da pokupi silicij od OM što može uzrokovati tople pukotine.
202		
301	308	
302		
304		
305		
308		
302B	309	
304L	347 308L	
303	312	
303Se		
309	309	
309S		
310	309	
310S	310 316	
316	310	Zavari izrađeni elektrodama tipa 316, 316L, 317, 317-Cb i 318 povremeno može pokazati lošu otpornost na koroziju u zavarenom stanju. U takvim slučajevima otpornost zavara na koroziju metal se može obnoviti toplinskim tretmanima.
316L	316 - Cb 316L	
317	317	
317L	317-Cb	
321	321 347	Obložene elektrode tipa 321 ne proizvode se redovito jer se titan ne može lako oporaviti tijekom taloženja.
347	347	Potreban je oprez pri zavarivanju debljih presjeka zbog mogućih pukotina u ZUT.
348	347	Ta ograničen na 0,1 maksimalno, Co ograničen na 0,2 maksimalno za nuklearne potrebe.

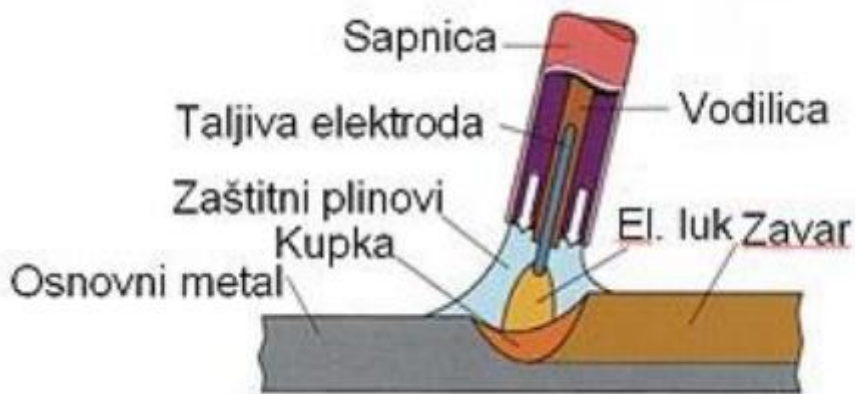
Tablica 4. Preporuka dodatnog materijala prema oznaci martenzitnog nehrđajućeg čelika [25]

OM (AISI)	DM (AISI)	Napomene
403 410	410	Žarenje omekšava i daje duktilnost toplinski zahvaćenim zonama i zavaru. Zavareni metal reagira na toplinsku obradu na sličan način kao OM
	309	Ovi austenitni zavareni metali mekani su i duktilni u zavarenom spoju. Međutim, zone zahvaćene toplinom OM bit će ograničene duktilnosti.
	310	
	410-NiMo	
416	410	Primjenjuju se napomene na OM tipa 410
416Se	308	Primjenjuju se napomene na OM tipa 410
	309	
	312	
420	420	Izbjegava pažljivo zagrijavanje i toplinsku obradu nakon zavarivanja pucanje.
431	410	Izbjegava pažljivo zagrijavanje i toplinsku obradu nakon zavarivanja pucanje.
	308	Zahtijeva pažljivo zagrijavanje. Ponovno servisiranje u zavarenom stanju zahtijeva razmatranje očvrnutih zona pod utjecajem topline
	309	
	310	

4. MIG/MAG postupak zavarivanja

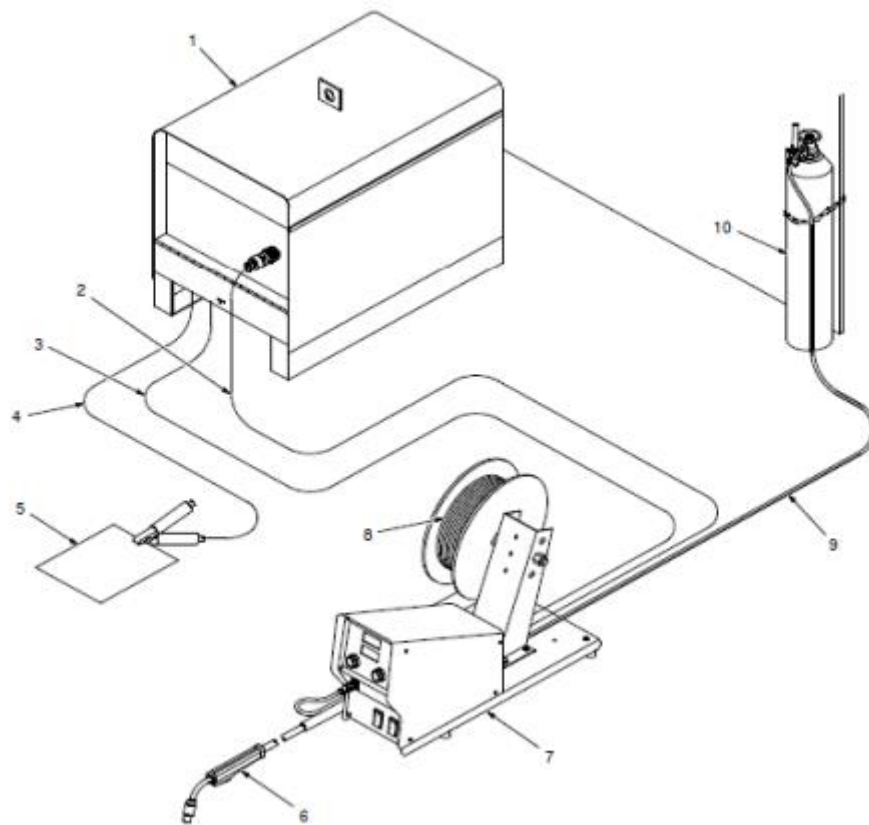
MIG/MAG postupak zavarivanja, poznat i kao GMAW (Gas Metal Arc Welding), je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. Ovaj postupak omogućuje spajanje metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog i dodatnog metala, a za zaštitu rastaljenog metala koriste se inertni, aktivni plinovi ili njihove mješavine. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja, električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice koja je spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Zaštitni plinovi, inertni (Ar ili He) ili aktivni (CO₂ ili mješavine), osiguravaju zaštitnu atmosferu [5].

Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevi paketa i pištolja do mjesta zavarivanja gdje se uspostavlja električni luk. Žica je ujedno i elektroda i dodatni materijal. Kada se žica tali ona popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak MIG/MAG zavarivanja može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski [5]. Na slici 12 možemo vidjeti shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja.



Slika 12. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja [5]

Za zavarivanje na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje često se koristi "push-pull" sustav koji uključuje dodatni pogon za dodavanje žice u pištolju. Ovaj sustav se također često koristi i na manjim udaljenostima s mekanijim materijalima ili tanjim materijalima. Sapnica na pištolju koristi se za dovod plinova na mjesto zavarivanja [5].



Slika 13. Uređaj za zavarivanje postupkom MIG/MAG [8]

Na slici 13 prikazan je uređaj za zavarivanje MIG/MAG postupkom i na njemu su označeni sljedeći dijelovi:

1. izvor struje,
2. kabel za napajanje uređaja za kontrolu,
3. kabel uređaja za ulaganje,
4. kabel za uzemljenje,
5. radni komad,
6. pištolj za zavarivanje,
7. uređaj za održavanje konstantne brzine dobave žice,
8. kolut sa žicom,
9. crijeva za plin,
10. boca za zaštitni plin,



Slika 14. Proces MIG/MAG zavarivanja u praksi [3]

4.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja

Zbog brojnih prednosti MIG/MAG postupak je danas jedan od najkorištenijih u industriji.

Prednosti MIG/MAG postupka su [6]:

- ovaj postupak zavarivanja može se primijeniti na sve vrste materijala,
- mogućnosti za podešavanje parametara i izbor načina prijenosa materijala su široke,
- moguće zavarivati u svim položajima,
- zavarivanje različitih debljina materijala,
- visoka učinkovitost i proizvodnost,
- postupak zavarivanja pogodan za automatizaciju procesa,
- postupak moguće koristiti i za lemljenje,
- primjena praškom punjene žice,
- minimalno štrcanje,
- jednostavno i brzo čišćenje zavarenih spojeva,
- estetski jako dobar izgled zavarenih spojeva,
- niža cijena dodatnih materijala,

Osim prednosti koje postupak nudi, postoje i neka od ograničenja koja otežavaju primjenu takvog postupka zavarivanja.

Nedostaci MIG/MAG postupka su [6]:

- kod prijenosa metala kratkotrajnim spojevima postiže se manji toplinski input,
- prijenos metala štrcajućim lukom dovodi do većeg toplinskog inputa,
- zavarivanje nije moguće u prisilnim položajima kod upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom,
- prijenos metala štrcajućim lukom može izazvati pogreške u zavarenim spojevima tijekom terenskih radova zbog vanjskih utjecaja,
- postoji problem u dovodu materijala pri zavarivanju aluminijskih legura,
- neodgovarajuća tehnika i parametri zavarivanja mogu dovesti do brojnih pogrešaka,
- uređaji i oprema za zavarivanje su složeni,

4.2. Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja

Kako bi dobili dobru kvalitetu zavarenog spoja bitno je pravilno odabrati parametre zavarivanja, a kod MIG/MAG postupka zavarivanja najvažniji parametri su sljedeći [6] [7]:

- jakost struje I , izražena u amperima (A), ključna je za određivanje načina prijenosa metala, stabilnost električnog luka, penetraciju i depozit rastaljenog metala. Njezin iznos ovisi o promjeru žice, debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, te o željenom načinu prijenosa metala. Može se kretati od nekoliko desetaka A do nekoliko stotina A.
- brzina zavarivanja v_z , izražena u metrima po sekundi (m/s), ključni je parametar koji utječe na produktivnost postupka zavarivanja i stoga ga treba pažljivo i pravilno odabrati. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja. Profil zavara ovisi o brzini zavarivanja – (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a penetracija manja, dok smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi, a penetracija veća).
- slobodni kraj žice, mm - duljina slobodnog kraja žice igra važnu ulogu u zavarivanju. Prekratak slobodni kraj žice može uzrokovati prevelik protok struje, što dovodi do pregrijavanja žice i poteškoća u kontroliranju zavarivanja. S druge strane, predug slobodni kraj žice može uzrokovati smanjenje protoka struje, što dovodi do manje penetracije i manje učinkovitosti zavarivanja. Stoga je važno održavati konstantnu

duljinu slobodnog kraja žice kako bi se osigurala konzistentnost i kvaliteta zavarenog spoja.

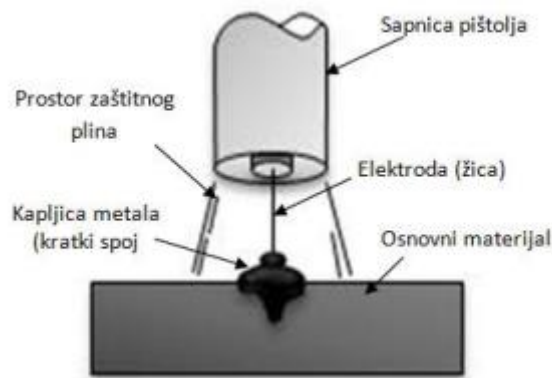
- napon U , u V - napon također utječe na stabilnost električnog luka. U općenitom smislu, veći napon dovodi do dužeg električnog luka i šireg zavara s manjom penetracijom, dok niži napon dovodi do kraćeg električnog luka i užeg zavara s većom penetracijom. Međutim, vrijednost napona koja se koristi u zavarivanju ovisi o materijalima koji se spajaju, debljini materijala, vrsti elektrode, kao i o načinu prijenosa metala. Osim toga, visoki napon može dovesti do oštećenja elektrode i materijala, a nizak napon može utjecati na kvalitetu zavarenog spoja. Stoga je važno odabrati optimalnu vrijednost napona za svaki specifični zavareni spoj.
- protok i vrsta zaštitnog plina, l/min - protok zaštitnog plina igra ključnu ulogu u zaštiti zavarenog spoja od negativnih utjecaja okoline kao što su zrak, vlaga, kisik i drugi plinovi. Osim toga, zaštitni plin također ima važnu ulogu u oblikovanju zavara i održavanju stabilnosti električnog luka. Protok zaštitnog plina se mora prilagoditi jakosti struje zavarivanja, uvjetima u kojima se vrši zavarivanje i karakteristikama spoja koji se zavaruje. U slučaju veće struje zavarivanja, potrebno je povećati protok zaštitnog plina kako bi se osigurala adekvatna zaštita i kvaliteta zavarenog spoja.
- promjer i vrsta žice, mm – ovisi i vrsti i debljini materijala kojeg zavarujemo i o jakosti struje.

4.3. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG zavarivanju

Kada je u pitanju MIG/MAG zavarivanje, razumijevanje procesa prijenosa metala izuzetno je važno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost u procesu zavarivanja. Načini prijenosa metala ovise o raznim čimbenicima, uključujući napon, jakost struje, polaritet, sastav i promjer žice. Postoje dva mehanizma prijenosa materijala od elektrode do radnog komada - slobodni let i premošćivanje. Kod prijenosa slobodnim letom, može se razlikovati štrcajući i impulsni luk, dok se kod premošćivanja može razlikovati prijenos metala kratkim spojevima i mješovitim lukom. Razumijevanje ovih mehanizama prijenosa materijala može biti ključno za postizanje kvalitetnog i učinkovitog procesa zavarivanja [8].

4.3.1. Prijenos materijala kratkim spojem

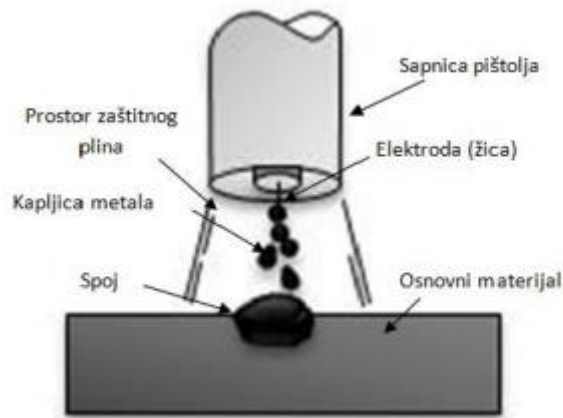
Kod prijenosa metala kratkim spojevima, elektroda tj. žica koja se dovodi se tali uslijed uzastopno ponavljajućih kratkih spojeva, obično između 100 i 200 kratkih spojeva u sekundi. Ovaj način prijenosa metala karakterizira nizak unos topline i karakteristične vrijednosti napona (13 - 21 V) i jakosti struje zavarivanja (50 - 170 A) koje su manje od napona i jakosti struje zavarivanja kod drugih načina prijenosa metala. Ovaj prijenos metala idealan je za zavarivanje tanjih materijala debljine od 0,6 mm do 5,0 mm, zbog malog unosa topline. Promjeri elektroda koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm [8] [9].



Slika 15. Shema prijenosa metala kratkim spojem [11]

4.3.2. Prijenos materijala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom odvija se kombiniranim djelovanjem kratkih spojeva i štrcajućeg luka, što uzrokuje taljenje žice koja se kontinuirano dovodi. Uobičajene jakosti struje kod ovog načina prijenosa su 170 – 235 A, a naponi se kreću od 22 V do 25 V, ovisno o promjeru elektrode. Međutim, ovaj način prijenosa metala ima niz nedostataka koji uključuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju od elektrode i padaju u talinu, što uzrokuje rasprskavanje i ograničava položaj zavarivanja samo na horizontalne položaje. Također, lošije je kvašenje taline, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina. Zavar je često izbrazdan i nepravilan. Zbog svih ovih nedostataka, ovaj način prijenosa metala se rijetko koristi u praksi i pokušava se izbjeći [8][9].

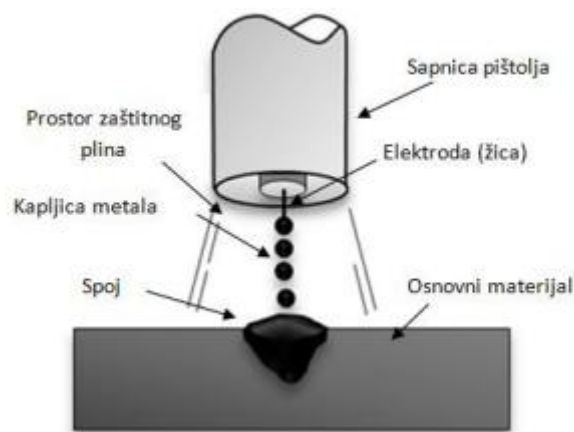


Slika 16. Shema prijenosa materijala prijelaznim lukom [11]

4.3.3. Prijenos materijala štrcajućim lukom

Prijenos metala ovim postupkom zahtijeva jaku struju i velike napone električnog luka. Karakteristika ovog načina prijenosa je da rastaljene kapljice metala s vrha elektrode lete slobodno kroz atmosferu luka. Stvaraju se male kapi taline koje se gibaju aksijalno s obzirom na elektrodu, dok elektroda nema fizički, direktni kontakt s osnovnim materijalom. Sile koje se javljaju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeravaju ih prema radnom komadu [10].

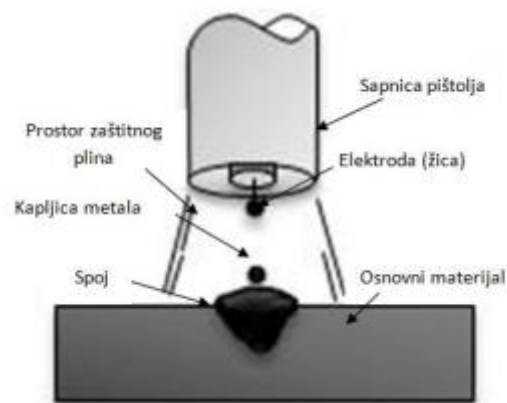
Ovakav prijenos metala omogućuje unos veće količine energije u proces. To dovodi do povećanja struje, koja zagrijava materijal i povećava "pinch efekt", a smanjuje sile koje otežavaju odvajanje rastopljene kapljice. Promjer kapljice je manji od promjera žice (elektrode) kojom se zavaruje [10].



Slika 17. Shema prijenosa materijala štrcajućim lukom [11]

4.3.4. Prijenos materijala impulsnim lukom

Izvor struje generira impuls, a njegova jakost se mijenja od maksimalne vršne vrijednosti do vrijednosti osnovne struje. Kada je vrijednost struje maksimalna, dodatni materijal se odvaja u obliku kapljice i slobodnim letom putuje prema radnom komadu. Nakon toga, vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost, što osigurava srednju vrijednost unosa topline. Ova tehnika se može primijeniti za zavarivanje u svim položajima i za materijale koji su tanji od onih koji se zavaruju prijelaznim lukom, zbog njegovog srednjeg unosa topline.



Slika 18. Shema prijenosa materijala impulsnim lukom [11]

5. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se koriste u ovom postupku zavarivanja igraju ključnu ulogu u zaštiti mjesta zavarivanja i rastopljenih kapljica metala od utjecaja okolne atmosfere tijekom prolaska kroz električni luk. Važno je poznavati utjecaj svakog pojedinog zaštitnog plina kako bi se mogao procijeniti njihov učinak. Ti plinovi utječu na održavanje električno-fizikalnih svojstava električnog luka te na prijenos metala s elektrode na radni komad, metalurške procese u talini i tehnološke parametre. Izbor odgovarajućeg zaštitnog plina za određenu primjenu je izuzetno važan, a kriterij za izbor plina uključuje, ali nije ograničen na sljedeće parametre [11]:

- legirane žičane elektrode,
- željeni profil penetracije,
- položaj zavarivanja,
- debljina materijala,
- izgled zavara,
- način zavarivanja i prijenosa metala,
- cijena plina,
- mehanička svojstva taloženog metala zavara,

Plinove dijelimo na aktivne ili inertne. Kod primjene inertnih plinova, nema reakcije rastaljenog metala s plinom i oni se više koriste kod zavarivanja osjetljivih materijala. S druge strane, kod primjene aktivnih plinova dolazi do reakcije između plina i rastaljenog metala. Kod povećanja topline u električnom luku, zaštitni plinovi reagiraju na različite načine. Neki plinovi šire jezgru luka, dok drugi skupljaju, što ovisi o toplinskoj vodljivosti plina. Postoje tri osnovna svojstva koja treba razumjeti prilikom procjene svojstava zaštitnog plina, a to su [11]:

- ionizacija
- toplinska vodljivost
- kemijska reakcija plina s osnovnim materijalom

Prema normi HRN EN 439:1999, najčešće korišteni zaštitni plinovi su navedeni u tablici 5, koja prikazuje njihovu primjenu, ponašanje i karakteristike električnog luka. Kod korištenja aktivnih plinova potrebna je posebna pažnja zbog pojave oksidacije. Ova pojava karakteristična je za konvencionalne postupke zavarivanja i posebno je izražena kada se koristi CO₂ kao zaštitni plin [12][21].

Tablica 5. Primjena, karakteristike i ponašanje električnog luka [26]

Plin	Ponašanje	Primjena	Karakteristika luka
Ar+CO ₂ (2,5%)	Praktički interno	Visokolegirani Cr-Ni čelici	Prijenos u štrcajućem luku
Ar+H ₂ (6.667%)	Redukcijsko	Visokolegirani čelici, Ni	Velika dubina uvarivanja
Ar+CO ₂ (99,9%)	Oksidirajuće	Ugljični i niskolegirani čelici	Moguće rasprskavanje
Ar+CO ₂ (65%)	Oksidirajuće	Ugljični i niskolegirani čelici	Moguće rasprskavanje

Količina zaštitnog plina ovisi o uvjetima zavarivanja, obliku i mjestu spoja, jačini struje zavarivanja te promjeru žice. Na otvorenom prostoru, potrošnja plina značajno se povećava. Okvirne količine plina prikazane su u tablici 6, ali u praksi mogu odstupati zbog navedenih parametara [13].

- za male jačine struja je kao kod kratkog luka, a potrošnja može biti do 12 l/min,
- za srednje jačine, potrošnja može biti do 15 l/min,
- za velike jačine struja je kao kod štrcajućeg luka, a može biti do 20 l/min,

Tablica 6. Okvirna količina potrošenog plina [26]

Promjer žice [mm]	Potrošnja plina [l/min]
0,8	6-8
1	8-10
1,2	10-12
1,6	14-16

5.1. Inertni plinovi

5.1.1. Argon

Argon koji ima oznaku (Ar) je plin bez mirisa, boje i okusa i ne spada pod otrovne plinove. Najčešće se koristi kao inertni plin u zaštiti tijekom postupka zavarivanja. Plin ne reagira s osnovnim materijalom tijekom zavarivanja. Također, ima nisku toplinsku vodljivost, dok mu je potrebna toplinska energija (energija ionizacije) niska pa se lako ionizira. S obzirom na to da ima veću gustoću od zraka, omogućuje prijenos metala manjim kapljicama, osigurava ravni zavar te smanjuje štrcanje. Argon se može koristiti u kombinaciji sa svim metalima.

Argon je plin koji je standardiziran i ima propisanu kvalitetu i proizvodi se u četiri moguće kvalitete, a to su:

- 4.8 – 99,998% Ar
- 5.0 – 99,999% Ar
- 6.0 – 99,9999% Ar
- 7.0 – 99,99999% Ar

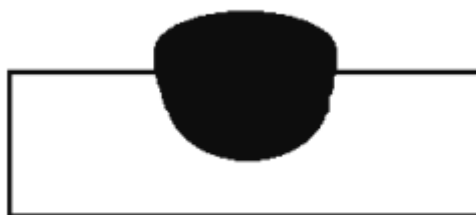
Argon se može koristiti sam ili u smjesi s drugim inertnim ili aktivnim plinovima [13]. Na slici 19 možemo vidjeti geometriju zavora kad koristimo argon kao zaštitni plin.



Slika 19. Utjecaj zaštitnog plina argona na geometriju zavora [14]

5.1.2. Helij

Helij je inertni plin, isto kao i argon. U zraku se nalazi u vrlo malim količinama, samo 0,0005%. Stoga se helij proizvodi iz prirodnih plinskih izvora koji sadrže visok postotak helija (preko 0,4%). S obzirom na to da je proizvodnja helija skupa, njegova primjena je ograničena. Helij se uglavnom koristi kao dodatni plin u smjesi s drugim plinovima kada su potrebne posebne prednosti kod zavarivanja. Helij se može koristiti za zavarivanje sa svim metalima. Za razliku od argona, helij se teško ionizira. Njegova toplinska vodljivost je puno veća, što znači da se stvaraju širi i dublji profili penetracije. Mješavine helija i argona najčešće se koriste za zavarivanje aluminija debljeg od 25 mm. Slika 20 prikazuje utjecaj helija kao zaštitnog plina na penetraciju, odnosno geometriju zavora [11].



Slika 20. Utjecaj helija na geometriju zavora [14]

5.2. Aktivni plinovi

Plinovi koji prilikom odvijanja postupka zavarivanja uzrokuju reakcije s rastaljenim metalom nazivaju se aktivni plinovi, a neki od tih plinova su kisik, vodik i ugljični dioksid.

5.2.1. Kisik (O₂)

Kisik se prilikom zavarivanja koristi kao manja komponenta u zaštitnim plinskim mješavinama. Kisik reagira s rastaljenim metalom, te pri tome formira okside. Ako se kisik koristi u malim količinama (1-5%) u kombinaciji s argonom, pruža dobru stabilnost luka i poboljšava izgled zavara. Pri visokim temperaturama kisik stvara metalne okside što nije baš poželjno. Za stabilizaciju električnog luka neophodni su neki oksidirajući elementi [14].

5.2.2. Vodik (H₂)

Vodik se dodaje u maloj količini oko 1-5% u mješavini s argonom kao zaštita pri zavarivanju nehrđajućeg čelika i legura nikla. Zahvaljujući većoj toplinskoj vodljivosti vodika, postiže se bolje kvašenje i omogućuju se veće brzine zavarivanja. Budući da je vodik zapaljiv plin, njegov sadržaj u plinskim mješavinama ne smije prelaziti 5%. Kod austenitnih čelika, velike količine vodika mogu uzrokovati poroznost materijala. Vodik se često koristi u kombinaciji s argonom i helijem, uz mali dodatak CO₂ koji stabilizira električni luk. Također, vodik kemijski smanjuje okside, što rezultira vrlo čistom površinom zavara [14].

5.2.3. Ugljični dioksid (CO₂)

Ugljični dioksid je plin bez boje i mirisa. Kod zavarivanja se koristi kao zaštitni plin pojedinačno ili u smjesama. Dobiva se kao nusproizvod u određenim kemijskim procesima. Kada se pročisti tek se onda može koristiti u zavarivanju. Ugljični dioksid se je lako dostupan pa time i relativno jeftin što dokazuje široku primjenu u zavarivanju. Kako bi zavar bio kvalitetan čistoća plina mora biti 99.8%. Pri normalnoj sobnoj temperaturi CO₂ je inertan plin, ali pri visokim temperaturama iznad 1600 °C koje su prisutne u električnom luku se raspada na ugljični monoksid i slobodni kisik koji reagira s rastaljenim metalom. Štetno stvaranje oksida može se spriječiti legiranjem dodatnog materijala odnosno žice s dezoksidantima poput silicija i mangana [14].

5.3. Smjese plinova

Smjese plinova se dijele prema broju komponenata pa prema tome postoje dvokomponentne i trokomponentne smjese zaštitnih plinova. Plinovi koji se koriste u smjesama imaju svoja pojedinačna svojstva, ali u kombinaciji sa drugim plinovima daju smjesu određene prednosti, koje su potrebne pri određenom režimu zavarivanja [15].

Dvokomponentne smjese plinova su:

- Ar/He
- Ar/O₂
- Ar/CO₂

Trokomponentne smjese plinova su:

- Ar/He/O₂
- Ar/CO₂/O₂

5.3.1. Argon/Helij

Dvokomponentna smjesa plinova, koja se koristi češće, koristi se kod zavarivanja aluminija, nikla i legura na bazi nikla te nekih drugih materijala. Način prijenosa može biti štrcajućim lukom i pulsirajućim prijenosom metala. U tablici 7 prikazane su dvije smjese argona i helija te njihove karakteristike [15].

Tablica 7. Karakteristike smjesa argona i helija [15]

Udjeli plinova	Karakteristike smjese
Argon (75%) / Helij (25%)	Poboljšavanje prodiranje spoja kod aluminija, nikla i bakra
	Više fluidnosti u kupci taline nego kod 100% argona
Argon (25%) / Helij (75%)	Više toplinske vodljivosti i fluidnosti u kupci taline
	Širok profil penetracije

5.3.2. Argon/Ugljikov dioksid

Kod smjese argon/ugljikov dioksid mogu se primijeniti svi načini prijenosa metala. Najčešće se koristi dvokomponentna smjesa zaštitnih plinova u zavarivanju. U tablici 8 prikazane su dvije smjese argona i ugljikovog dioksida s karakteristikama [15].

Tablica 8. Karakteristike smjese argona i ugljičnog dioksida [15]

Udjeli plinova	Karakteristike smjese
Argon (75%) / Ugljikov dioksid (25%)	Kratki spoj
	Poboljšava zavarljivost kuglica rastopljenog metala
	Smanjuje štrcanje
Argon (80%) / Ugljikov dioksid (20%)	Poboljšava zavarljivost kuglica rastopljenog metala
	Smanjuje štrcanje
Argon (98%) / Ugljikov dioksid (2%)	Veća brzina zavarivanja
	Viša fluidnost taline
	Štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala
Argon (95%) / Ugljikov dioksid (5%)	Pulsirajući način prijenosa metala
	Viša fluidnost taline
Argon (90%) / Ugljikov dioksid (10%)	Širok profil penetracije
	Smanjuje dubinu prodiranja
Argon (82%) / Ugljikov dioksid (18%)	Širok raspon debljina zavarivanja
	Široki luk - poboljšanje profila penetracije duž vara
	Dobar u primjeni kod kratkod spoja ili STT postupka

5.3.3. Argon/Kisik

Mješavine plinova argona i kisika postižu aksijalni prijenos raspršivanjem pri niskoj jakosti struje u usporedbi s mješavinom argona i ugljičnog dioksida. Kapljice metala su manje, a talina fluidnija. Ova smjesa često se koristi kod tankih materijala, a prednost imaju nehrđajući i ugljični čelici. U tablici 9 prikazane su smjese argona i kisika u različitim omjerima i njihove karakteristike [15].

Tablica 9. Karakteristike smjesa argona i kisika [15]

Udjeli plinova	Karakteristike smjese
Argon (99%) / Kisik (1%)	Koristi se za nehrđajuće čelike
	Stabilan luk, prijenos finije kapljice rastaljenog dodatnog materijala
	Pojava sivog sloja na zavaru radi oksidacije
Argon (95%) / Kisik (5%)	Štrcajući luk kod težih dijelova zavarivanja
	Osnovni materijal treba biti s malo kamenca
Argon (98%) / Kisik (2%)	Upotreba kod brzog zavarivanja nehrđajućih čelika
	Upotreba gdje je potreban niski udio elektroda
	Štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala

6. Zaštita od korozije

6.1. Općenito o koroziji

Korozija je spontano razaranje materijala uzrokovano djelovanjem okolnog medija. Naziv dolazi od grčke riječi „corrodere“, što znači nagristi. Danas, korozija predstavlja jedan od ključnih faktora u globalnoj krizi materijala i energije, te uzrokuje znatne gospodarske gubitke u svakoj zemlji. S obzirom na to da je područje korozije vrlo široko i raznovrsno, postoje različite podjele korozije:

- prema izgledu koruzijskog napada: jednolika i lokalizirana,
- prema mehanizmu djelovanja: kemijska i elektrokemijska,
- prema korozivnim okolinama: atmosferska korozija, korozija a tlu, korozija u elektrolitima i neelektrolitima,
- posebni oblici korozije: kontaktna korozija, korozija u procjepu...

O brzini i vrsti korozije utječu:

Unutrašnji faktori:

- stanje materijala i naprezanja,
- sastav materijala i ujednačenost sastava po presjeku,
- stanje površine,
- čistoća materijala,
- mikrostruktura,
- zaostala naprezanja,

Vanjski faktori:

- vrsta medija i sastav,
- prisutnost bakterija u mediju,
- promjena sastava medija u radnim uvjetima,
- temperatura okolnog medija i promjena temperature,
- tlak okolnog medija i promjene tlaka,
- brzina i smjer strujanja medija ili dijela u mediju,
- sadržaj kisika u mediju i odzračivanje,
- oblik dijela i primijenjeni postupci oblikovanja i spajanja,
- vrste spojeva, zaostala naprezanja,

- vrste materijala u dodiru,
- djelovanje elektromagnetskog polja i radioaktivnog zračenja

6.2. Korozija s obzirom na mehanizam djelovanja

Kemijska korozija nastaje uslijed djelovanja agresivnih korozivskih elemenata na površinu materijala i odvija se u neelektrolitima, odnosno u medijima koji ne provode električnu struju. Ova vrsta korozije prepoznaje se po vanjskoj promjeni izgleda materijala i stvaranju opne na njegovoj površini.

Elektrokemijska korozija je proces koji se javlja u metalima i legurama kada su u dodiru s elektrolitima, poput vode i vodenih otopina kiselina, lužina i soli. Ovaj proces uključuje reakcije oksidacije i redukcije.

6.3. Oblici korozije kod metalnih materijala

Prema geometrijskom obliku korozivskog razaranja, koroziju dijelimo na:

- opća korozija,
- lokalna korozija,
- selektivna korozija,
- interkristalna korozija

6.3.1. Opća korozija

Opća korozija karakterizira se ravnomjernim smanjenjem debljine metala, pri čemu je cijela površina materijala izložena agresivnoj sredini pod približno jednakim uvjetima, uzimajući u obzir unutarnje i vanjske faktore. Brzina ove vrste korozije mjeri se dubinom prodiranja korozije u metal tijekom određenog vremenskog razdoblja.



Slika 21. Primjer opće korozije spremnika [19]

6.3.2. Lokalna korozija

Lokalna korozija nastaje na mikroskopskoj razini, najčešće na granici zrna materijala, te ubrzano djeluje na malom lokalnom području. U ovom slučaju, zrna materijala djeluju kao katode, dok granice zrna funkcioniraju kao anode.

Lokalna korozija dijeli se na:

- pjegastu koroziju,
- rupičastu ili pitting koroziju,
- kontaktnu koroziju,
- potpovršinsku koroziju

6.3.3. Selektivna korozija

Selektivna korozija pojavljuje se mjestimično na površini i širi se prema unutrašnjosti presjeka dijela ili može biti još neugodnije budući da se ne vidi da započinje negdje u unutrašnjosti dijela materijala. Selektivna korozija napada različitom brzinom komponente, odnosno faze, višekomponentnih ili višefaznih materijala.

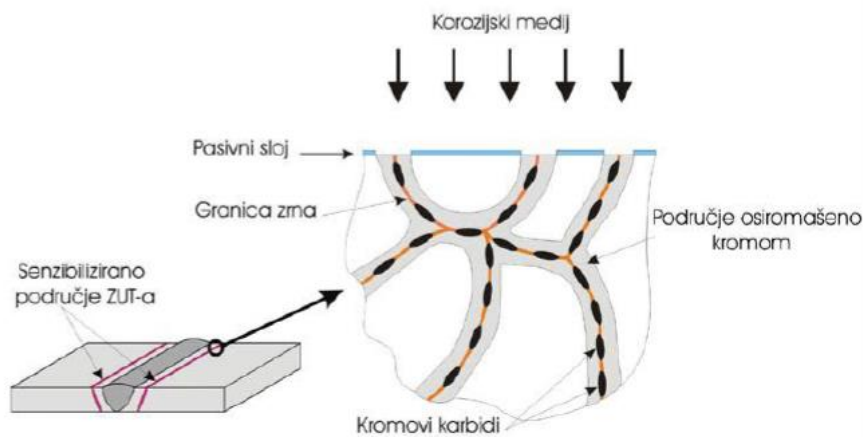


Slika 22. Selektivna korozija - primjer zavarenog spoja Cr - Ni čelika [19]

6.3.4. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija razara materijal na granicama zrna (granula, kristala) šireći se na taj način u dubinu. Ova vrsta korozije najopasniji je oblik korozije jer može dugo ostati neprimjećena, a naglo dovodi do smanjenja čvrstoće i žilavosti materijala, te loma ili čak raspada materijala u zrna [20].

Ovoj vrsti korozije su podložni austenitni i feritni nehrđajući čelici, dok martenzitni nisu. Duljim držanjem nehrđajućih austenitnih čelika između 550°C do 800°C dolazi do senzibilizacije austenita, tj. do stvaranja uvjeta za formiranje karbida po granicama zrna prilikom ohlađivanja iz tog temperaturnog intervala. Ako je %C previsok, a brzina ohlađivanja preniska, tada se stvaraju i izlučuju Cr- karbidi, tj. pojavljuje se druga faza – karbid, a istovremeno se osiromašuju područja uz granice zrna na Cr, nakon čega ta granična područja više ne ispunjavaju nužne uvjete otpornosti na koroziju [20].



Slika 23. Primjer interkristalne korozije u području zavarenog spoja [19]

6.4. Zaštita od korozije i njena prevencija nakon zavarivanja

U normalnim atmosferskim uvjetima ili u okruženjima s prisutnom vodom, nehrđajući čelici zadržavaju svoju otpornost na koroziju ako su korišteni odgovarajući materijali, proizvodni procesi i naknadni tretmani nakon zavarivanja. Ipak, u određenim uvjetima mogu zahrđati. Proizvodi od nehrđajućeg čelika zahtijevaju redovito čišćenje kako bi zadržali svoj netaknuti izgled i otpornost na koroziju. Neodržavanje često dovodi do nakupljanja korozivnih čestica, što može uzrokovati pojavu mrlja i potaknuti razvoj korozije. Za osiguranje otpornosti na koroziju u zahtjevnim i agresivnim okruženjima koriste se visokolegirani nehrđajući čelici [20].

6.5. Uzročnici korozije nakon zavarivanja

Zavarivanje je jedna od najčešćih metoda spajanja i izrade metalnih proizvoda. Iako vrlo korisno, zavarivanje može ozbiljno oštetiti antikorozivna svojstva površina od nehrđajućeg čelika. Taljenje uzrokovano visokim temperaturama tijekom zavarivanja uklanja pasivni sloj čelika, čime se smanjuje njegova otpornost na koroziju [20].

Zbog toga je važno obratiti pozornost na uklanjanje korozije, unakrsnu kontaminaciju i toplinsko obojenje (oksidaciju). Ako se korozija već pojavila na zavaru, potrebno ju je potpuno ukloniti, zajedno sa svim kontaminirajućim česticama nastalim tijekom industrijske obrade metala. Potrebno je voditi računa o repasivizaciji površine. U normalnim uvjetima, zaštitni pasivni sloj će se sam obnoviti ako je blago oštećen. Međutim, tijekom zavarivanja mogu se pojaviti različite komplikacije koje otežavaju ili potpuno onemogućuju repasivizaciju [20]

Tipične površinske nepravilnosti:

- nepravilnosti zavora,
- kontaminacija željezom,
- gruba površina,
- oksidacija radi visokih temperatura,
- organska kontaminacija,



Slika 24. Oksidacija uz zavar [20]

6.6. Završne obrade zavora radi zaštite od korozije

Za čišćenje i zaštitu nehrđajućih čelika mogu se koristiti različite mehaničke i kemijske metode, ili njihove kombinacije. Prilikom korištenja mehaničkih metoda čišćenja često ostaje gruba površina. S druge strane, kemijske metode proizvode najbolje rezultate jer uklanjaju sve vrste nečistoća s površine, no njihova primjena je relativno ograničena zbog ekoloških razloga [20].

Neke od metoda zaštite od korozije su:

- sačmarenje,
- pjeskarenje,
- četkanje,
- odmašćivanje,
- kemijsko nagrivanje,
- elektrokemijsko poliranje



Slika 25. Postupak pjeskarenja [27]

7. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio odrađen je najviše u prostorijama laboratorija na Sveučilištu Sjevera, a jedan dio u poduzeću NDK d.o.o. iz Štrigove. U eksperimentalnom dijelu rada korišten je materijal nehrđajući čelik X5Cr-Ni18-10, lim debljine 5 mm. Automatiziranim MIG postupkom zavarena su dva komada lima pod različitim parametrima pa je tako obrađeno ukupno 5 uzoraka. Nakon zavarivanja svaki od 5 uzoraka izrezan je tračnom pilom na dva dijela. Manji uzorak je nakon rezanja brušen i odrađeno je elektrokemijsko nagrizanje. Nakon toga svaki od uzoraka promatran je na mikroskopu. Na uzorcima koji su obrađeni provedeno je korozijsko ispitivanje.

7.1. Osnovni i dodatni materijal za zavarivanje

Osnovni materijal koji je korišten u eksperimentalnom dijelu je nehrđajući čelik X5CrNi18-10. Radi se o austenitnom krom-nikal nehrđajućem čeliku koji je također poznat pod oznakom AISI 304 ili 1.4301. Ova vrsta nehrđajućeg čelika ima jako dobru otpornost na koroziju u prirodnim uvjetima kao što je voda ili vlaga, sve dok nema sadržaja soli ili klora. Ta vrsta čelika danas je jedna od najkorištenijih čelika u metalnoj industriji, može se strojno obrađivati i na različite načine, npr. hladnim oblikovanjem. Lako se zavaruje, može se kovati i valjati. Ovaj nehrđajući čelik nije otporan na interkristalnu koroziju kada je zavaren, nemagnetičan je i može se jako slabo magnetizirati.

Tablica 10. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

Standard	Čelik	C ≤	Si ≤	Mn ≤	P ≤	S ≤	Cr	Ni	N ≤	OST.
EN 10088-3	X5CrNi18- 10	0,07	1,0	2,0	0,045	0,030	17,5- 19,5	8,0 10,5	0,11	Fe

Za eksperimentalni dio upotrijebljeno je 10 komada limova dimenzije 150 x 80 mm debljine 5 mm. Na slici ispod prikazan je atest materijala. Limovi su rezani pomoću strojnih škara.



Slika 27. Žica za zavarivanje EN ISO 14343-A-G 19 9 LSi [28]

Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ostalo
%	≤ 0,02	1,95	0,8	20,0	10,0	67,2

7.2. Oprema za eksperimentalni rad

7.2.1. Uređaj za zavarivanje

Za proces zavarivanja korišten je uređaj marke Fronius, model „TransSteel 3000 Pulse“



Slika 28. Uređaj za zavarivanje Fronius [28]

Tablica 12. Specifikacije uređaja za zavarivanje

Maksimalna struja zavarivanja	300 A
Minimalna struja zavarivanja	10 A
Struja zavarivanja/radni ciklus[10min/40°C]	300 A / 40%
Struja zavarivanja/radni ciklus[10min/40°C]	240 A / 100%
Radni napon	14,5 - 29 V
Napon praznog hoda	59 V
Mrežna frekvencija	50 - 60 Hz
Mrežni napon	3 x 380 V / 400 V / 460 V
Mrežni osigurač	35 A
Dimenzija / š	300 mm
Dimenzija / d	747 mm
Masa	36 kg
Stupanj zaštite	IP23

7.2.2. Uređaj za automatsko pravocrtno zavarivanje

Za pravocrtno zavarivanje korišten je „RAIL BULL“, uređaj proizvođača „PROMOTECH“. Ovaj uređaj omogućuje precizno pomicanje pištolja duž vodilice tijekom zavarivanja. Namijenjen je za zavarivanje i rezanje pločevina te za kružno zavarivanje radijusa većih od 5000 mm. Ugrađeni sustav njihanja omogućuje lagane pokrete pištolja u lijevo-desno smjeru tijekom zavarivanja. Može se postaviti i na zakrivljene površine pomoću fleksibilnih vodilica, a primjenjuje se na magnetskim i nemagnetskim površinama uz korištenje magneta ili vakuumskih prihвата.



Slika 29. Uređaj za automatsko pravocrtno zavarivanje [28]

7.2.3. Tračna pila

Za rezanje zavarenih komada korištena je tračna pila u tvrtci NDK d.o.o marke „BOMAR“.



Slika 30. Tračna pila [28]

7.2.4. Stroj za poliranje

Za poliranje primjeraka koje je odrađeno u laboratoriju Sveučilišta Sjever korišten je stroj marke „METKON“, model „FORCIPOL 1V“ kao na slici.



Slika 31. Stroj za poliranje [28]

7.2.5. Stereomikroskop

Za obradu geometrije zavarenih spojeva korišten je stereomikroskop s kamerom marke „OLYMPUS“, model „SZX10“.



Slika 32. Stereomikroskop [28]

7.3. Postupak eksperimentalnog rada

Limovi koji su korišteni za eksperiment najprije su rezani na mjeru 150 x 80 mm na strojnim škarama u tvrtci NDK d.o.o u Štrigovi. Za rezanje korištene su strojne škare marke Ermaksan. Nakon toga u laboratoriju Sveučilišta Sjever odrađeno je zavarivanje 5 ispitnih uzoraka. Osnovni materijal, lim postavljen je u preklopni spoj kao na slici prije početka zavarivanja.



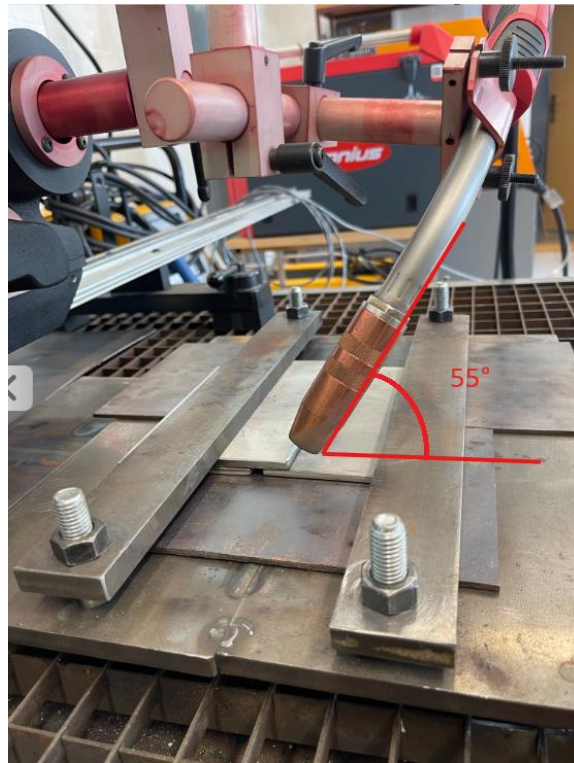
Slika 33. Prikaz pozicioniranog ispitnog uzorka spremnog za zavarivanje [28]

Nakon pozicioniranja i stezanja na radnom stolu, slijedi zavarivanje. U ovom eksperimentu koristio se zaštitni plin Argon 4.8 u boci kao na slici proizvođača Messer. Zaštitni plin je bitan jer može utjecati na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i na otpornost na koroziju zavara. Protok plina kod eksperimenta postavljen je na 17 l/min.



Slika 34. Argon 4.8 u boci proizvođača Messer [28]

Prije početka zavarivanja potrebno je bilo pozicionirati pištolj u ruku na uređaju za automatsko zavarivanje. Udaljenost sapnice od radnog komada je 16 mm, a pištolj je postavljen pod kutom nagiba 55 stupnjeva u odnosu na horizontalnu os.



Slika 35. Položaj pištolja u odnosu na obradni komad [28]

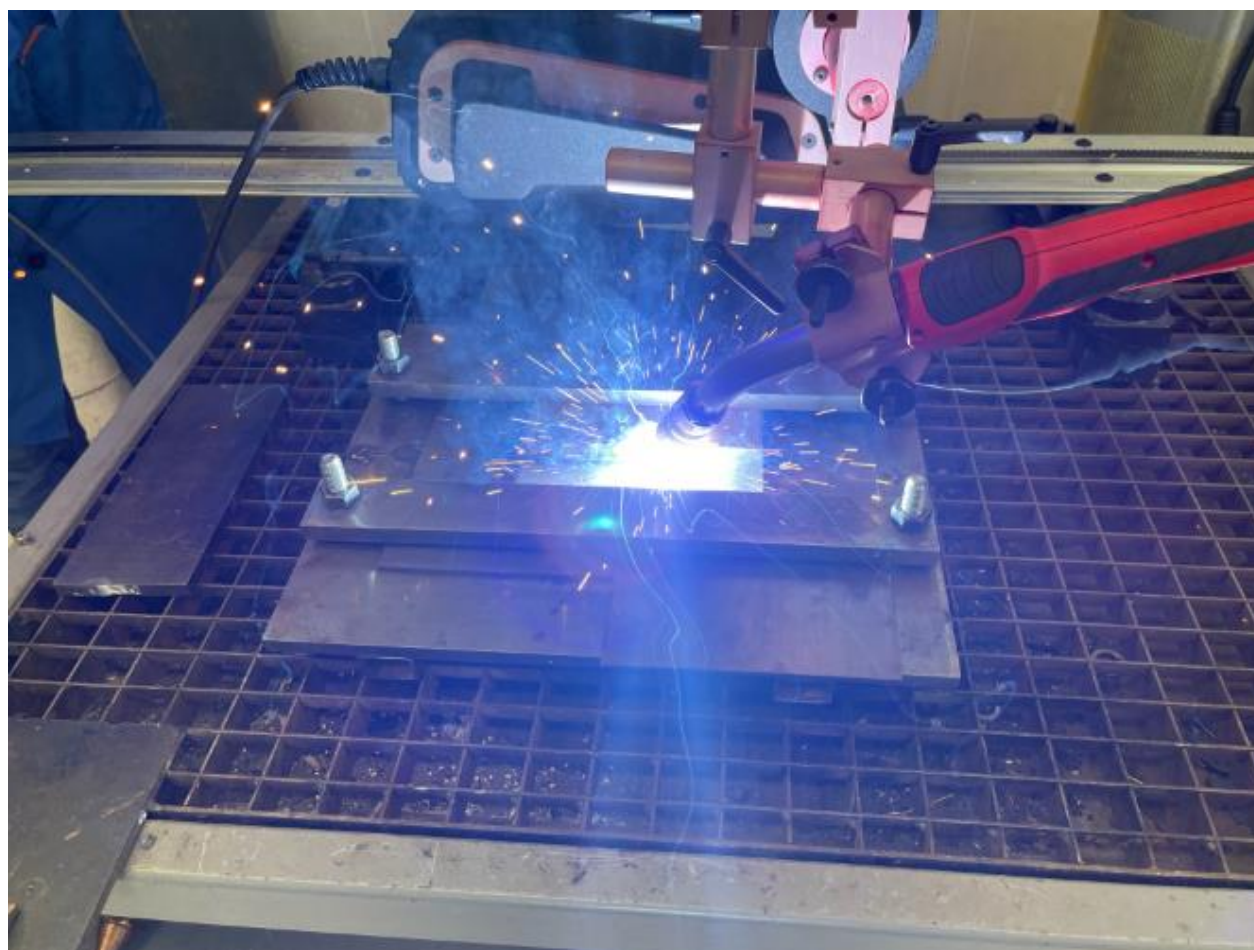


Slika 36. Udaljenost sapnice od radnog komada [28]

U nastavku se može vidjeti tablica parametara koji su postavljeni za svaki od ukupno 5 odrađenih pokusa.

Tablica 13. Parametri zavarivanja za svaki uzorak

UZORAK	JAKOST STRUJE (A)	NAPON (V)	BRZINA (cm/min)	BRZINA ŽICE(m/min)
1	180 A (174 A)	25,1 V	50 cm/min	9 m/min
2	186 A (179 A)	25,6 V	50 cm/min	9,5 m/min
3	196 A (214 A)	26,1 V	50 cm/min	10,1 m/min
4	204 A (202 A)	26,6 V	50 cm/min	10,6 m/min
5	204 A (202 A)	26,6 V	<u>43 cm/min</u>	10,6 m/min



Slika 37. Postupak zavarivanja [28]



Slika 38. Komad nakon zavarivanja [28]

Nakon zavarivanja obradak je trebalo ohladiti i zatim očistiti zavar, to je odrađeno metalnom četkom. Nakon toga komad je bio spreman za rezanje na tračnoj pili. Taj postupak primijenjen je na svih 5 zavarenih komada. Na svaki komad ugraviran je broj uzorka kako kasnije ne bi došlo do zabune kod rezanja i ispitivanja.



Slika 39. Očišćeni komad nakon zavarivanja [28]

Iz svakog od 5 zavarenih komada na tračnoj pili izrezan je manji dio koji korišten za ispitivanje. Dimenzija ispitnog uzorka bile su 40 x 15 mm. Nakon rezanja na uzorcima je bilo oštih rubova i ostataka koji su prouzročeni rezanjem na tračnoj pili. Rubove je bilo potrebno ručnom turpijom izbrusiti kako ne bi oštetili brusni papir.



Slika 40. Skidanje oštih rubova turpijom [28]

Sljedeći korak prije promatranja uzoraka bio je poliranje na rotirajućoj brusilici. Površina je nakon rezanja tračnom pilom bila dosta gruba, pa je bilo potrebno poliranje različitim granulacijama brusnog papira. Na stroju za brušenje podešeni su okretaji na 140 okr/min. Najprije je korišten brusni papir P120, pa poslije njega P180, P400, P800 i zadnje P1200. Prilikom poliranja korištena je voda kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

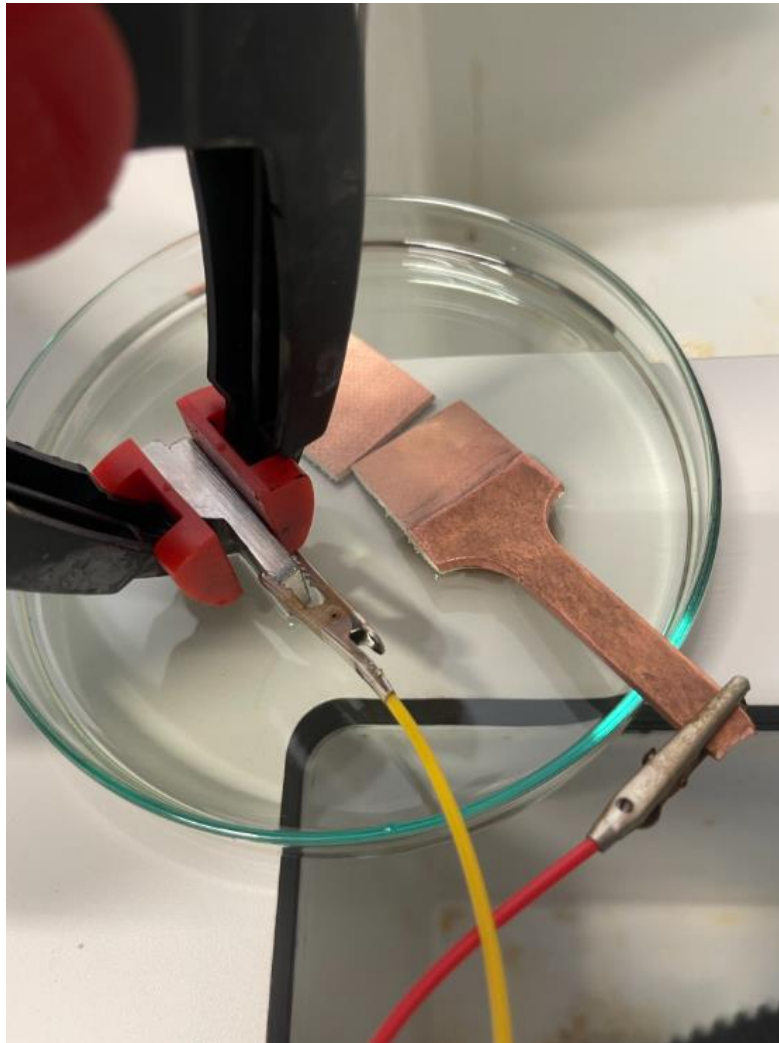


Slika 41. Poliranje uzoraka [28]



Slika 42. Uzorci nakon poliranja [28]

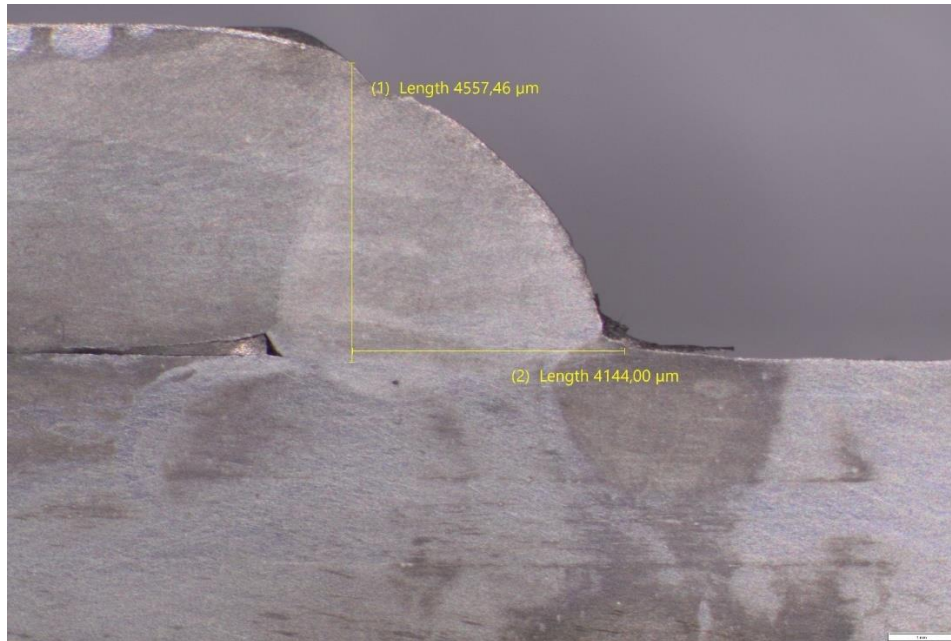
Prije analize na mikroskopu odradilo se elektrokemijsko nagrivanje uzoraka u 19% solnoj kiselini HCl. Dodavanjem struje radilo se elektrokemijsko nagrivanje. Napon struje bio je 12 V, i struja jačine 1,2 A, jedan pol spojen na bakar, a drugi na radni komad i nagrivanje je trajalo 30 sekundi. Taj postupak primijenjen je za sve uzorke.



Slika 43. Postupak elektrokemijskog nagrivanja [28]

7.4. Rezultati eksperimenta

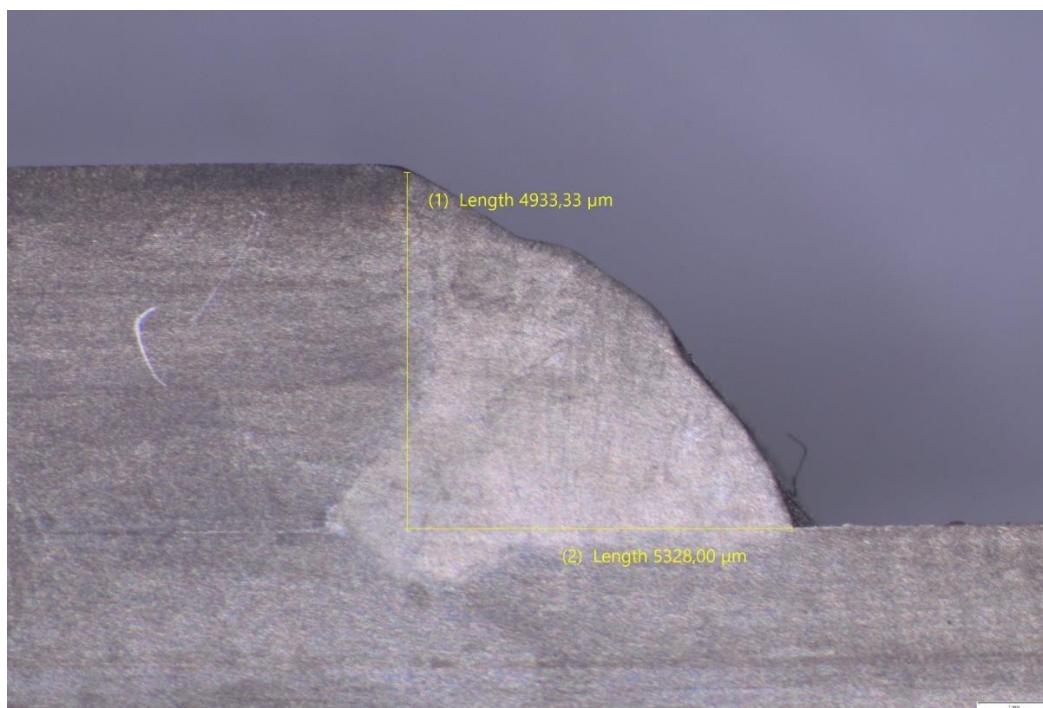
Postupkom elektrokemijskog nagrivanja uzorci su spremni za promatranje na mikroskopu. Podešeno je povećanje na mikroskopu 12 puta. U nastavku su prikazane slike snimljene na mikroskopu. Na svakom uzorku izmjerene su dimenzije „z1“ i „z2“ i time je izračunata vrijednost debljine zavarenog sloja „a“.



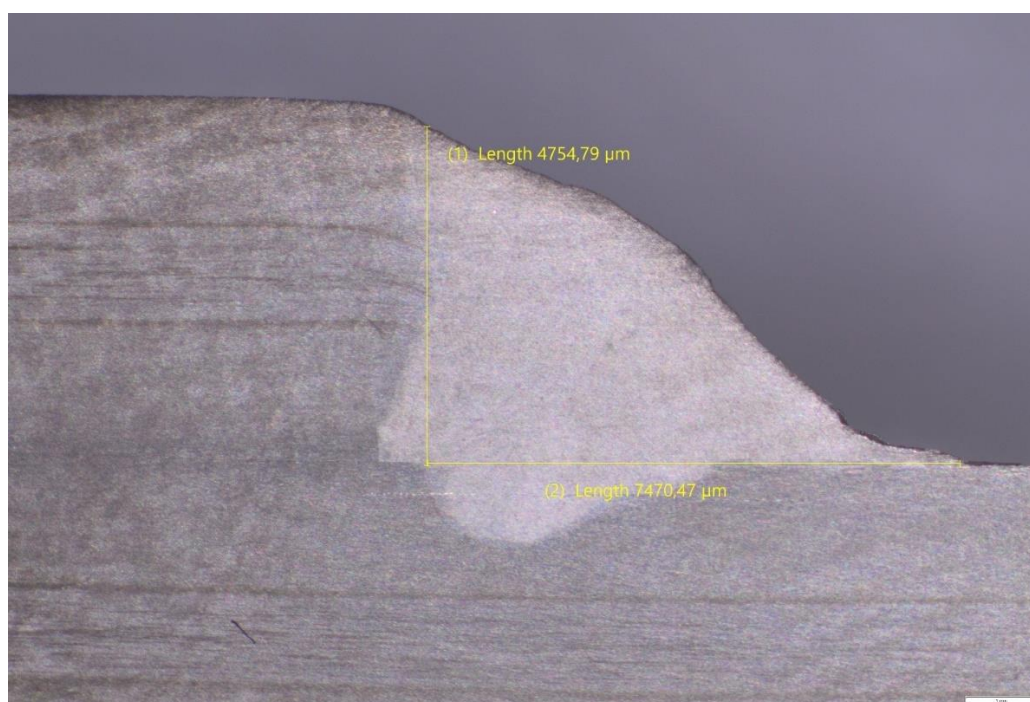
Slika 44. Uzorak 1 [28]



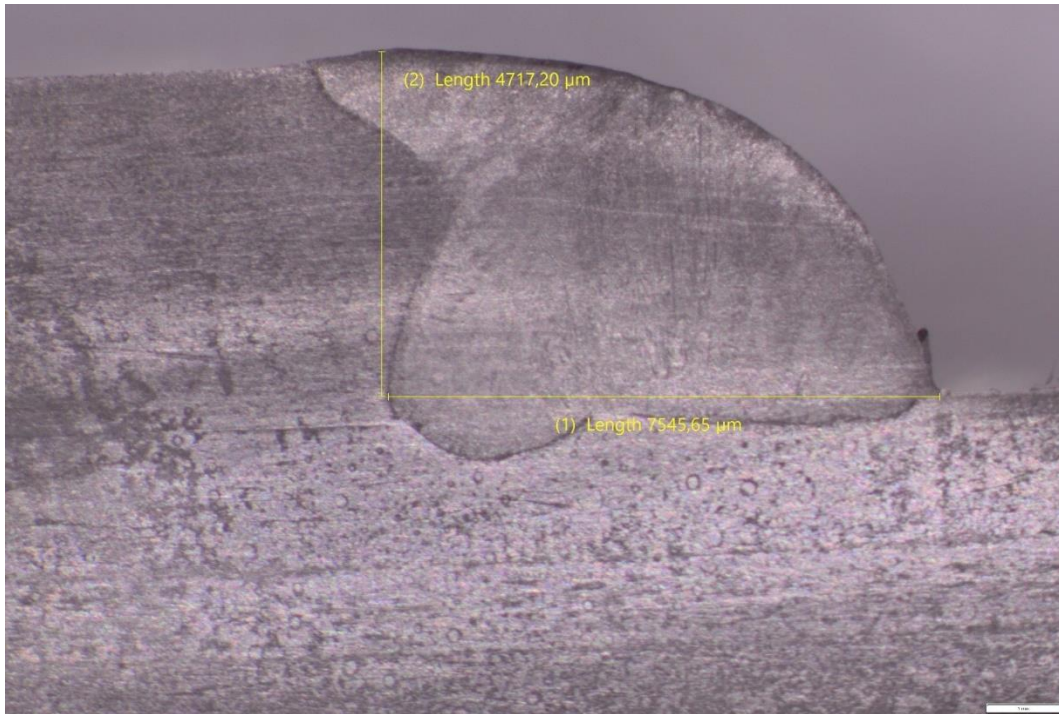
Slika 45. Uzorak 2 [28]



Slika 46. Uzorak 3 [28]



Slika 47. Uzorak 4 [28]



Slika 48. Uzorak 5 [28]

Izmjerenim vrijednostima „z1“ i „z2“ dobivena je vrijednost debljine zavara „a“ prikazana u tablici u nastavku.

Tablica 14. Izmjerene vrijednosti uzoraka

UZORAK	z1	z2	a (mm)
1	4,56 mm	4,14 mm	3,07 mm
2	4,81 mm	5,7 mm	3,68 mm
3	4,93 mm	5,3 mm	3,62 mm
4	4,75 mm	7,47 mm	4,00 mm
5	4,72 mm	7,56 mm	4,01 mm

Analiza utjecaja različitih parametara zavarivanja na debljinu zavara pruža uvid u kako promjene u jakosti struje, napona, brzini dovoda žice i brzini pomaka utječu na konačnu debljinu zavara. Iz provedenih pokusa jasno je da povećanje jakosti struje od 180 A do 204 A rezultira značajnim povećanjem debljine zavara. U uzorku 1, s najnižom jakosti struje, debljina zavara iznosi 3,07 mm, dok u uzorku 4, s višom jakosti struje, debljina raste na 4,00 mm. Ovaj trend pokazuje da veća struja dovodi do intenzivnijeg taljenja materijala, što rezultira debljim zavarom.

Povećanje napona od 25,1 V do 26,6 V također doprinosi rastu debljine zavara. U uzorku 4, gdje je napon najviši, zabilježena je debljina od 4,00 mm, što ukazuje na to da viši napon može povećati širinu i dubinu zavara, te posljedično njegovu debljinu.

Brzina dovoda žice, iako povećana u nekim uzorcima, pokazuje manje izražen utjecaj na debljinu zavara u usporedbi s promjenama u struji i naponu. Na primjer, u uzorku 5, povećana brzina žice u kombinaciji sa smanjenjem brzine pomaka rezultira u debljini zavara od 4,01 mm, što ukazuje na to da brzina žice sama po sebi nije presudna, već je važna u kontekstu ostalih parametara.

Smanjenje brzine pomaka sa 50 cm/min na 43 cm/min također igra ključnu ulogu u povećanju debljine zavara. U uzorku 5, smanjenje brzine pomaka pištolja za zavarivanje omogućava veće nakupljanje materijala, što doprinosi većoj debljini zavara. Ovo jasno pokazuje da brzina pomaka uz istovremeno povećanje brzine dovoda žice može značajno povećati debljinu zavara.

Izračunata je vrijednost količine unesene topline.

Količina unesene topline dobiva se prema sljedećoj formuli:

$$Q = \left(\frac{U \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \text{Efficiency}$$

U – napon (V)

I – jačina struje (A)

S – brzina zavarivanja (mm/min)

Efikasnost – iznosi 0,8 za MIG zavarivanje

Tablica 15. Količina unesene topline

UZORAK	JAKOST STRUJE (A)	NAPON (V)	BRZINA (cm/min)	BRZINA ŽICE (m/min)	<u>Q (kJ/mm)</u>
1	180A (174A)	25,1V	50 cm/min	9 m/min	0,43 kJ/mm
2	186A (179A)	25,6V	50 cm/min	9,5 m/min	0,45 kJ/mm
3	196A (214A)	26,1V	50 cm/min	10,1 m/min	0,49 kJ/mm
4	204A (202A)	26,6V	50 cm/min	10,6 m/min	0,52 kJ/mm
5	204A (202A)	26,6V	<u>43 cm/min</u>	10,6 m/min	0,61 kJ/mm

Analiza količine unesene topline (Q) u odnosu na debljinu zavara ukazuje na značajnu povezanost između toplinske energije i konačne dimenzije zavara. Količina unesene topline, izražena u kJ/mm, pokazuje trend rasta s povećanjem jakosti struje, napona, i uz promjene u brzini pomaka i brzini dovoda žice.

U uzorku 1, s količinom unesene topline od 0,43 kJ/mm, zabilježena je debljina zavara od 3,07 mm. Povećanje toplinske energije na 0,45 kJ/mm u uzorku 2 rezultiralo je povećanjem debljine zavara na 3,68 mm. Ovaj trend se nastavlja s daljnjim povećanjem količine unesene topline do 0,61 kJ/mm u uzorku 5, gdje je debljina zavara porasla na 4,01 mm. Ovi rezultati potvrđuju da veća količina unesene topline omogućava intenzivnije otapanje dodatnog materijala i baznog materijala, što rezultira debljim zavaram.

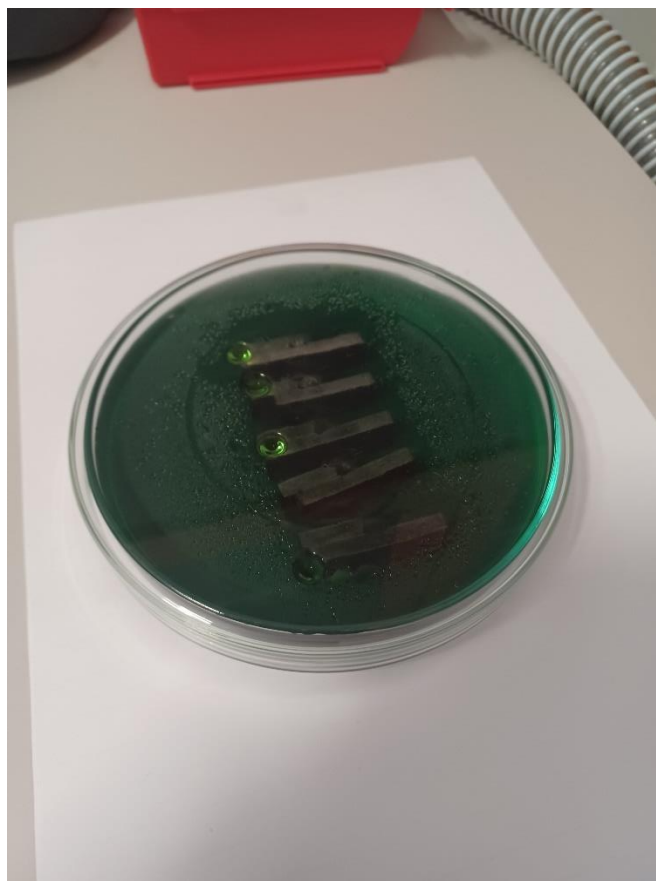
Povećanje količine unesene topline može se pripisati višim jakostima struje i napona, kao i promjenama u brzini pomaka i brzini dovoda žice. Na primjer, u uzorku 4, povećanje toplinske energije na 0,52 kJ/mm uzrokovalo je rast debljine zavara na 4,00 mm, što ukazuje na to da povećanje toplinske energije doprinosi većem nakupljanju materijala i stvaranju debljih slojeva. U uzorku 5, smanjenje brzine pomaka uz povećanje brzine dovoda žice dodatno je povećalo količinu unesene topline na 0,61 kJ/mm i rezultiralo debljinom zavara od 4,01 mm.

7.5. Korozijsko ispitivanje

Nakon ispitivanja na mikroskopu na tim istim ispitnim uzorcima provedeno je korozijsko ispitivanje. Ispitivanje se provodilo na način da su se usporedili uzorci prije i poslije izlaganja 19% - tnoj klorovodičnoj kiselini. Uzorci su bili izloženi 24 sata na sobnoj temperaturi.



Slika 49. Uzorci uronjeni u kiselinu na početku [28]



Slika 50. Uzorci nakon 24 sata [28]

Nakon izlaganja uzoraka od nehrđajućeg čelika AISI 304 u 19%-tnoj klorovodičnoj kiselini tijekom 24 sata, primijećena je promjena boje otopine u zelenu. Ova promjena boje može se pripisati kemijskoj reakciji između klorovodične kiseline i metalnih elemenata prisutnih u leguri nehrđajućeg čelika. Reakcijom kiselina otapa zaštitni sloj oksida na površini čelika, pri čemu dolazi do otpuštanja željeza i kroma u obliku njihovih klorida, koji su poznati po tome da otopinama daju zelenu nijansu. Ova promjena ukazuje na postupnu degradaciju površine uzoraka u prisutnosti agresivnog medija, što je ključno zapažanje u ispitivanju otpornosti na koroziju.

Uzorci su izvađeni iz otopine i primijećeno je da su matirani tj. nemaju sjaj nehrđajućeg čelika kao prije ispitivanja i na sebi imaju crnilo koje se može izbrisati. Površina na uzorcima je hrapava.



Slika 51. Izvađeni uzorci nakon ispitivanja [28]

Površina uzoraka je matirana, izgubila je karakterističan sjaj nehrđajućeg čelika te je prekrivena crnim slojem koji se može obrisati. Taj sloj sastoji se od produkata korozije, nastalih otapanjem pasivnog sloja oksida s površine čelika. Ovaj sloj obično štiti čelik od korozije, a nakon njegovog uklanjanja kiselina je uzrokovala daljnje nagrivanje metala, što je rezultiralo hrapavom i neravnom površinom uzoraka. Ove promjene ukazuju na korozijsku osjetljivost materijala u uvjetima izloženosti agresivnom mediju poput klorovodične kiseline.

Nakon izlaganja klorovodičnoj kiselini, uzorci su pokazali znakove dekapiranja – proces u kojem se uklanja zaštitni oksidni sloj s površine nehrđajućeg čelika. Ova reakcija ostavila je uzorke matirane i prekrivene crnim talogom, koji je produkt korozije. Površina je postala hrapava i nagrivena jer je kiselina otopila pasivni sloj, izlažući metal daljnjoj koroziji. Kako bi se obnovila otpornost na koroziju, uzorci bi trebali proći postupak pasivizacije.

8. Zaključak

Zavarivanje je ključni proces u modernoj industriji, koji omogućava povezivanje materijala na učinkovit i pouzdan način. Suvremene zavarivačke tehnologije donose brojne prednosti, uključujući povećanu brzinu zavarivanja, manju potrošnju materijala i veću preciznost, što značajno olakšava proizvodne procese. Automatizacija i napredne metode zavarivanja smanjuju rizik od grešaka te omogućuju postizanje visokih standarda kvalitete.

Kada je riječ o MIG zavarivanju nehrđajućeg čelika, kao što je X5CrNi18-10, ovaj postupak nudi izvrsnu otpornost na koroziju i visoka mehanička svojstva, što ga čini idealnim rješenjem za široku primjenu. MIG zavarivanje omogućava brzo i učinkovito stvaranje kvalitetnih spojeva, a pravilno podešavanje zavarivačkih parametara, poput vrste plina i brzine žice, ključno je za postizanje optimalnih rezultata. Uzimajući u obzir sve ove prednosti, jasno je da je MIG zavarivanje nehrđajućih čelika izuzetno važno za održavanje konkurentnosti i kvalitete u modernoj industriji.

Nakon provedbe eksperimenta dolazi se do zaključka da svi analizirani parametri zavarivanja, jakost struje, napon, brzina dovoda žice i brzina pomaka imaju značajan utjecaj na debljinu zavara. Povećanje jakosti struje i napona, uz pravilno podešavanje brzine dovoda žice i brzine pomaka doprinosi većoj debljini zavara dok smanjenje brzine pomaka dodatno povećava debljinu. Također, količina unesene topline igra ključnu ulogu u određivanju debljine zavara. Veća količina toplinske energije omogućava bolju kontrolu nad dimenzijama zavara i povećava mogućnost stvaranja debljih slojeva metala. Ovi rezultati naglašavaju važnost pažljivog usklađivanja svih parametara za postizanje željene kvalitete i dimenzija zavara.

Na temelju rezultata korozijskog ispitivanja, može se zaključiti da izlaganje nehrđajućeg čelika AISI 304 klorovodičnoj kiselini dovodi do značajnih promjena na površini materijala. Kiselina otapa zaštitni oksidni sloj, što uzrokuje koroziju, oslobađanje metalnih iona, i promjenu boje otopine. Površina uzoraka gubi sjaj, postaje hrapava i prekrivena slojem korozijskih produkata. Ovi rezultati potvrđuju važnost pravilne zaštite od korozije i ukazuju na potrebu za naknadnom pasivizacijom čelika kako bi se obnovila njegova otpornost na koroziju u agresivnim uvjetima.

U Varaždinu, listopad 2024.

Dejan Lesničar




IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, DEJAN LESNIČAR (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom M16 ZAVARIVANJE VEHRBAJUĆEG ČELIKA XSGC1618-10 (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)



(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

Literatura

- [1] Z. Lukačević: Zavarivanje, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, SFSB, Slavonski Brod, 1998
- [2] Zavarljivost – Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarljivost>, dostupno 12.09.2021.
- [3] Zavarivanje – Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>, dostupno 21.09.2021.
- [4] M. Gojić, Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2008.
- [5] M. Bušić, skripta sa predavanja tehnologije 3
- [6] G. Brumec: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010
- [7] Hrivnak, I. "Theory of weldability of metals and alloys", Materials science monography 74, Elsevier, 1992.
- [8]] Jurica M.: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [9] Garašić I.: MIG/MAG zavarivanje, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [10] Rudan, M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005.
- [11] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294
- [12] I. Herak: Primjena i specifičnosti MAG-STT postupka zavarivanja, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008
- [13] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992
- [14] Klas Weman, Gunnar Linden: MIG welding guide, Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridge, 2006.
- [15] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwires/SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, dostupno:24.10.2021.
- [16] IRT3000, „Nehrđajući dodatni materijali - izazov ili klasika“, 23.02.2018., https://irt3000.si/hr/vijesti/2018022307401673/nehrc4%91aju%28%87i_dodatni_materijali__izazov_ili_klasika/, dostupno 12.09.2021.

- [17] Problematika podvodnog zavarivanja cjevovoda čelika X70 - PDF Бесплатно скидање, <https://docplayer.rs/206723541-Problematika-podvodnog-zavarivanja-cjevovoda-čelikax70.html>, dostupno 27.09.2021.
- [18] Schaeffler-Delong diagram, predicting the phase structure for different... | Download Scientific Diagram, https://www.researchgate.net/figure/Schaeffler-Delong-diagram-predicting-the-phasestructure-for-different-alloys-and_fig1_228624267, dostupno 27.09.2021.
- [19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrode_za_zavarivanje
- [20] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523750-0-im6_korozija_12.pdf
- [21] Outokumpu, Handbook of Stainless Steel, str. 1–89, 2013, <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-stainless-steelhandbook.pdf>, dostupno 18.01.2022.
- [22] Norma HRN EN 439:1999 Dodatni i potrošni materijali – Zaštitni plinovi za elektrolučno zavarivanje i rezanje
- [23] G. Rihar, M. Uran, i M. Jovanovic, „Remote visual examination of stainless pipelines for pharmaceutical industry“, 8th Int. Conf. Slov. Soc. Non-Destructive Test. Appl. Contemp. Non-Destructive Test. Eng., izd. April, 2005.
- [24] <https://www.laser-ing.hr/blog/antikorozivna-zastita-metala/>
- [25] D. Hilton, Mig Welding of Stainless Steel, 1985.
- [26] AISI, A DESIGNERS' HANDBOOK SERIES No9002 WELDING OF STAINLESS STEELS AND OTHER JOINING METHODS, 1988.
- [27] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [28] <https://blasttehnika.hr/obrada-povrsina/pjeskarenje/>
- [29] Dejan Lesničar – vlastita arhiva fotografija

Popis slika

<i>Slika 1. Podjela zavarivanja pritiskom [1]</i>	<i>1</i>
<i>Slika 2. Podjela zavarivanja taljenjem [1].....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 3. Zavareni spoj i njegovi dijelovi [2].....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 4. Zavarivanje taljenjem [2].....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 5. Zavarivanje pritiskom [2]</i>	<i>6</i>
<i>Slika 6. Okvirni prikaz promjene boje oksidnog sloja kod povećanja temperature [22].....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 7. TIG zavarivanje cijevi od nehrđajućeg čelika [23]</i>	<i>9</i>
<i>Slika 8. MIG/MAG zavarivanje cijevi od nehrđajućeg čelika [23].....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 9. Moguća mjesta pojava pukotina [17]</i>	<i>10</i>
<i>Slika 10. Prikaz dodatnog materijala tvrtke Lincoln Electric [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 11. Dijelovi obložene elektrode [4]</i>	<i>13</i>
<i>Slika 12. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja [5]</i>	<i>18</i>
<i>Slika 13. Uređaj za zavarivanje postupkom MIG/MAG [8].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 14. Proces MIG/MAG zavarivanja u praksi [3]</i>	<i>20</i>
<i>Slika 15. Shema prijenosa metala kratkim spojem [11].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 16. Shema prijenosa materijala prijelaznim lukom [11]</i>	<i>24</i>
<i>Slika 17. Shema prijenosa materijala štrcajućim lukom [11].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 18. Shema prijenosa materijala impulsnim lukom [11].....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 19. Utjecaj zaštitnog plina argona na geometriju zavara [14].....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 20. Utjecaj helija na geometriju zavara [14].....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 21. Primjer opće korozije spremnika [19]</i>	<i>35</i>
<i>Slika 22. Selektivna korozija - primjer zavarenog spoja Cr - Ni čelika [19].....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 23. Primjer interkristalne korozije u području zavarenog spoja [19]</i>	<i>37</i>

<i>Slika 24. Oksidacija uz zavar [20]</i>	38
<i>Slika 25. Postupak pjeskarenja [27]</i>	39
<i>Slika 26. Atest materijala [28]</i>	41
<i>Slika 27. Žica za zavarivanje EN ISO 14343-A-G 19 9 LSi [28]</i>	42
<i>Slika 28. Uređaj za zavarivanje Fronius [28]</i>	43
<i>Slika 29. Uređaj za automatsko pravocrtno zavarivanje [28]</i>	44
<i>Slika 30. Tračna pila [28]</i>	45
<i>Slika 31. Stroj za poliranje [28]</i>	45
<i>Slika 32. Stereomikroskop [28]</i>	46
<i>Slika 33. Prikaz pozicioniranog ispitnog uzorka spremnog za zavarivanje [28]</i>	47
<i>Slika 34. Argon 4.8 u boci proizvođača Messer [28]</i>	48
<i>Slika 35. Položaj pištolja u odnosu na obradni komad [28]</i>	49
<i>Slika 36. Udaljenost sapnice od radnog komada [28]</i>	49
<i>Slika 37. Postupak zavarivanja [28]</i>	50
<i>Slika 38. Komad nakon zavarivanja [28]</i>	51
<i>Slika 39. Očišćeni komad nakon zavarivanja [28]</i>	51
<i>Slika 40. Skidanje oštih rubova turpijom [28]</i>	52
<i>Slika 41. Poliranje uzoraka [28]</i>	53
<i>Slika 42. Uzorci nakon poliranja [28]</i>	53
<i>Slika 43. Postupak elektrokemijskog nagrivanja [28]</i>	54
<i>Slika 44. Uzorak 1 [28]</i>	55
<i>Slika 45. Uzorak 2 [28]</i>	55
<i>Slika 46. Uzorak 3 [28]</i>	56
<i>Slika 47. Uzorak 4 [28]</i>	56

<i>Slika 48. Uzorak 5 [28].....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 49. Uzorci uronjeni u kiselinu na početku [28]</i>	<i>60</i>
<i>Slika 50. Uzorci nakon 24 sata [28]</i>	<i>61</i>
<i>Slika 51. Izvađeni uzorci nakon ispitivanja [28].....</i>	<i>62</i>

Popis tablica

<i>Tablica 1. Preporučeni dodatni materijali prema vrsti nehrđajućeg čelika [24]</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 2. Preporuka dodatnog materijala prema oznaci feritnog nehrđajućeg čelika [25]</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 3. Preporuka dodatnoga materijala prema oznaci austenitnog nehrđajućeg čelika [25]</i>	<i>16</i>
<i>Tablica 4. Preporuka dodatnog materijala prema oznaci martenzitnog nehrđajućeg čelika [25]</i>	<i>17</i>
<i>Tablica 5. Primjena, karakteristike i ponašanje električnog luka [26]</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 6. Okvirna količina potrošenog plina [26]</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 7. Karakteristike smjesa argona i helija [15]</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 8. Karakteristike smjesa argona i ugljičnog dioksida [15]</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 9. Karakteristike smjesa argona i kisika [15]</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 10. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10</i>	<i>40</i>
<i>Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 12. Specifikacije uređaja za zavarivanje</i>	<i>43</i>
<i>Tablica 13. Parametri zavarivanja za svaki uzorak</i>	<i>50</i>
<i>Tablica 14. Izmjerene vrijednosti uzoraka</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 15. Količina unesene topline</i>	<i>59</i>