

Analiza utjecaja udjela kisika u korijenskoj zaštiti na svojstva zavarenog spoja

Frajzman, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:713689>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Frajzman

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Marko Frajzman

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također, zahvaljujem se tehničkom suradniku Daliboru Denkoviću i tehničkoj suradnici Dubravki Ulagi na pomoći tijekom izrade eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Veliko hvala obitelji i prijateljima na podršci za vrijeme cijelog studiranja.

Marko Frajzman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO FRAJZMAN**

Mat. br.: 0152209847

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja udjela kisika u korijenskoj zaštiti na svojstva zavarenog spoja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of oxygen influence in root protection on properties of weld joint**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati specifičnosti korijenske zaštite zavara koja se primjenjuje kod TIG zavarivanja. Navesti koji su uvjeti za primjenu obzirom na vrstu osnovnog materijala u korelaciji s vrstom zaštitnih plinova. Dati pregled postojećih sustava za korijensku zaštitu te opisati moguće nepravilnosti i utjecaj kisika na područje zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu oblikovati odgovarajući plan pokusa za određivanje utjecaja kisika pri korijenskoj zaštiti na svojstva zavarenog spoja. Ispitivanja provesti na visokolegiranim Cr-Ni čelicima uz primjenu različitih mješavina za korijensku zaštitu. Koncentraciju kisika odrediti uz pomoć odgovarajuće mjerne opreme (oksimetar) te ustanoviti vremensku zavisnost promjene koncentracije obzirom na protok i vrstu zaštitnog plina. Na uzorcima provesti odgovarajuća ispitivanja s posebnim naglaskom na korozijsku postojanost. Zaključno, definirati i odrediti preporuke za dozvoljenu koncentraciju kisika te procijeniti utjecaj na korozijsku postojanost.

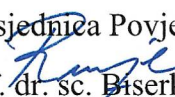
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc.  Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
 Biserka Runje
prof. dr. sc.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS OZNAKA	IX
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	3
2.1. Oprema za TIG zavarivanje	3
2.2. Princip rada TIG postupka zavarivanja.....	4
2.3. Vrste netaljivih elektroda od volframa.....	6
2.4. Vrste struja pri TIG zavarivanju	7
2.5. Inačice TIG postupka zavarivanja.....	8
2.5.1. A-TIG.....	8
2.5.2. TIP-TIG.....	10
2.5.3. K-TIG.....	11
2.5.4. Orbitalno TIG zavarivanje	12
3. AUSTENITNI Cr-Ni ČELICI	15
3.1. Podjela visokolegiranih Cr-Ni čelika	15
3.2. Struktura i kemijski sastav austenitnih Cr-Ni čelika.....	16
3.3. Svojstva i primjena austenitnih Cr-Ni čelika	17
4. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA	19
4.1. Dodatni materijal u TIG zavarivanju	19

4.2. Greške u zavarenim spojevima	21
4.2.1. Tople pukotine	21
4.2.2. Interkristalna korozija	23
4.2.3. Noževa korozija	24
4.2.4. Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom	26
5. ZAŠTITNI PLINOVI U ZAVARIVANJU	27
5.1. Uloga zaštitnih plinova u zavarivanja	27
5.2. Vrste zaštitnih plinova	28
5.2.1. Argon (Ar).....	28
5.2.2. Helij (He)	28
5.2.3. Vodik (H ₂).....	29
5.2.4. Dušik (N ₂)	29
5.2.5. Kisik (O ₂)	30
5.2.6. Ugljični dioksid (CO ₂).....	30
5.3. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja	30
5.4. Kriteriji za izbor zaštitnog plina.....	32
6. UTJECAJ UDJELA KISIKA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA KOD AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA.....	34
6.1. Općenito o korijenskoj zaštiti	34
6.2. Plinovi za korijensku zaštitu	35
6.3. Naprave za korijensku zaštitu	36
6.4. Mjerenje kisika tijekom zavarivanja	41
6.5. Dozvoljena razina kisika tijekom zavarivanja	43
7. UTJECAJ KISIKA NA SVOJSTVA ZAVARA KOD AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA	44
7.1. Nastanak pobojenja na austenitnim Cr-Ni čelicima.....	44
7.2. Utjecaj pobojenja na korozijsku postojanost.....	45
7.3. Sprječavanje nastanka pobojenja uporabom zaštitnih plinova	47

8. OBRADA POVRŠINE AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA NAKON ZAVARIVANJA ...	49
8.1. Mehanička obrada	50
8.2. Kemijska obrada	52
8.3. Elektrokemijska obrada.....	53
9. EKSPERIMENTALNI DIO	55
9.1. Opis eksperimenta.....	55
9.2. Osnovni materijal.....	55
9.3. Oprema za navarivanje.....	57
9.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje	57
9.3.2. Automat za zavarivanje "BUG-O systems"	58
9.4. Priprema uzoraka za navarivanje	59
9.5. Navarivanje uzoraka	62
9.6. Vizualna analiza površine uzorka	67
9.8. Vizualna analiza korijena navarenog sloja.....	69
9.9. Priprema za ispitivanje uzoraka na rupičastu koroziju	74
9.10. Ispitivanje na rupičastu koroziju prema normi ASTM G48-99a	75
9.11. Analiza rezultata ispitivanja na rupičastu koroziju prema normi ASTM G46-94	78
9.11.1. Vizualni pregled uzoraka prema ASTM G46-94.....	79
9.11.2. Mjerenje gubitka mase	83
9.12. Izrada makroizbruska	86
9.13. Makroanaliza ispitnih uzoraka	88
10. ZAKLJUČAK.....	91
11. LITERATURA	92
PRILOZI.....	95

POPIS SLIKA

Slika 1 Uobičajena oprema za TIG zavarivanje [1]	3
Slika 2 Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2]	4
Slika 3 Uspostava električnog luka kod TIG zavarivanja [2]	5
Slika 4 Položaj pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [3]	6
Slika 5 Izgled električnog luka kod klasičnog TIG postupka (lijevo) i kod A-TIG postupka (desno) [4]	9
Slika 6 Poprečni presjek zvara: a) bez premaza, b) s premazom [5]	9
Slika 7 Shematski prikaz dodavača žice za TIP-TIG zavarivanje [6]	10
Slika 8 Pištolj za TIP-TIG zavarivanje [7]	11
Slika 9 Klasični TIG postupak (lijevo), K-TIG postupak (desno) [8]	12
Slika 10 Primjer otvorene glave za orbitalno TIG zavarivanje [10]	13
Slika 11 Primjer zatvorene glave za orbitalno TIG zavarivanje [11]	13
Slika 12 Mikrostruktura austenitnih Cr-Ni čelika [13]	16
Slika 13 Pravilan položaj dodatnog materijala kod TIG zavarivanja [14]	19
Slika 14 Dodatni materijal kod TIG zavarivanja prema HRN EN ISO 14343:2017 [15]	20
Slika 15 Solidifikacijska pukotina u zoni taljenja kod čelika X5 CrNiMo 17-12-2 [17]	22
Slika 16 Likvacijska pukotina u zoni utjecaja topline kod čelika X2 CrNi 18-9	22
Slika 17 Interkristalna korozija u zoni utjecaja topline čelika X5 CrNi 18-10 [12]	23
Slika 18 Raspad zvara čelika X5 CrNi 18-10 [18]	23
Slika 19 Noževa korozija austenitnog stabiliziranog čelika [12]	25
Slika 20 Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom na čeliku X2 CrNiMo 17-12-2 [12]	26
Slika 21 Izgled profila zvara i oblik električnog luka s različitim zaštitnim plinovima [22]	29
Slika 22 Primjena različitih plinova za korijensku zaštitu uslijed zavarivanja titan stabiliziranih Cr-Ni čelika [24]	33
Slika 23 Razlika u zavarivanju s korijenskom zaštitom i bez nje [24]	34
Slika 24 Oprema za zaštitu korijena zvara kod sučeonog zavarivanja [25]	36
Slika 25 Oprema za zaštitu korijena zvara kod zavarivanja cijevi [25]	37

Slika 26 Primjena čepa za korijensku zaštitu [25]	38
Slika 27 Primjena prstenastog razdjelnika u korijenskoj zaštiti [25]	38
Slika 28 Primjena zaštitnih balona za korijensku zaštitu [25]	39
Slika 29 Primjena zaštitnih brana od vodotopivog papira [25]	40
Slika 30 Šablona za zavarivanje malih cijevi [25]	40
Slika 31 Mjerenje razine kisika u cijevi sa PurgEye 100 [26]	41
Slika 32 Mjerenje razine kisika u cijevi tijekom orbitalnog TIG zavarivanja [27].....	42
Slika 33 Utjecaj koncentracija kisika u plinu na pojavu pobojenja [28].....	43
Slika 34 Shematski prikaz pobojenja na austenitnom Cr-Ni čeliku [2]	46
Slika 35 Izgled površine nakon 1. mehaničke obrade 2. kemijske obrade 3. elektrokemijske obrade [31]	50
Slika 36 Brušenje zavora nakon zavarivanja [33]	51
Slika 37 Ručno četkanje zavora nakon TIG zavarivanja [34]	51
Slika 38 Kemijsko čišćenje zavora nakon zavarivanja s pastom [34].....	53
Slika 39 Ručno elektrolitičko čišćenje zavora [35]	54
Slika 40 Kupke za elektrolitičko čišćenje [35].....	54
Slika 41 Rezanje uzoraka na pili BS 350 GH	56
Slika 42 Uzorci nakon rezanja	56
Slika 43 Izvor struje za zavarivanje "MagicWave 230i"	57
Slika 44 Identifikacijska pločica izvora struje za zavarivanje "MagicWave 230i"	57
Slika 45 "BUG-O systems" automat za zavarivanje	58
Slika 46 Očišćeni i zabrtvljeni uzorci	59
Slika 47 Otvor na aluminijskoj ljepljivoj traci	59
Slika 48 Umetanje crijeva za dovod zaštitnog plina	60
Slika 49 Mjerenje razine kisika u cijevi uz pomoć oksimetra „PRO OX-100“	60
Slika 50 Podešavanje protoka plina za korijensku zaštitu.....	61
Slika 51 Podešavanje struje navarivanja	65
Slika 52 Regulator protoka plina za zaštitu električnog luka.....	65
Slika 53 Podešavanje brzine navarivanja	65

Slika 54 Navarivanje uzoraka	66
Slika 55 Mjerenje temperature površine navara.....	66
Slika 56 Uzorci nakon provedenog navarivanja	67
Slika 57 Uzdužno rezanje uzoraka na mehaničkoj pili „BS 350 GH“	68
Slika 58 Mjerenje temperature uzoraka tijekom rezanja.....	68
Slika 59 Korijenska strana navarene cijevi uzorka A	69
Slika 60 Korijenska strana navarene cijevi uzorka B.....	69
Slika 61 Korijenska strana navarene cijevi uzorka C.....	69
Slika 62 Korijenska strana navarene cijevi uzorka D	70
Slika 63 Korijenska strana navarene cijevi uzorka E.....	70
Slika 64 Korijenska strana navarene cijevi uzorka F	70
Slika 65 Korijenska strana navarene cijevi uzorka G	70
Slika 66 Korijenska strana navarene cijevi uzorka H	71
Slika 67 Korijenska strana navarene cijevi uzorka I.....	71
Slika 68 Korijenska strana navarene cijevi uzorka J.....	71
Slika 69 Uzorci nakon uzdužnog rezanja.....	72
Slika 70 Uzorci nakon rezanja na zahtijevane dimenzije prema normi ASTM G48-99a	74
Slika 71 Čišćenje i sušenje uzoraka	75
Slika 72 Mjerenje mase uzoraka prije ispitivanja na koroziju	76
Slika 73 Ispitni uzorci u željezovom kloridu	77
Slika 74 Uzorci nakon 72 h ispitivanja u željezovom kloridu	78
Slika 75 Uzorci nakon ispiranja i čišćenja četkom	78
Slika 76 Uzorci nakon pripreme prema normama ASTM G48-99a i ASTM G46-94.....	79
Slika 77 Mjerenje mase uzoraka nakon nagrivanja.....	83
Slika 78 Uzorci za izradu makroizbruska	86
Slika 79 Makrosnimak uzorka A.....	88
Slika 80 Makrosnimak uzorka B.....	88
Slika 81 Makrosnimak uzorka C.....	89
Slika 82 Makrosnimak uzorka D.....	89

Slika 83 Makrosnimak uzorka E	89
Slika 84 Makrosnimak uzorka F	89
Slika 85 Makrosnimak uzorka G.....	89
Slika 86 Makrosnimak uzorka H.....	90
Slika 87 Makrosnimak uzorka I	90
Slika 88 Makrosnimak uzorka J	90

POPIS TABLICA

Tablica 1 Podjela volframovih elektroda prema HRN EN ISO 6848:2015 [2]	6
Tablica 2 Osnovne karakteristike TIG zavarivanja ovisno o struji i polaritetu [2].....	7
Tablica 3 Najčešće korišteni austenitni Cr-Ni čelici [12]	18
Tablica 4 Standardni zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja [23]	31
Tablica 5 Standardni zaštitni plinovi za korijensku zaštitu [23]	35
Tablica 6 Različite boje pobojenja čelika X5 CrNi 18-10 [28].....	45
Tablica 7 Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje austenitnih Cr-Ni čelika [23].....	47
Tablica 8 Plinovi za korijensku zaštitu kod TIG zavarivanja austenitnih čelika [23].....	48
Tablica 9 Kemijski sastav čelika X5 CrNi 18-10 [36]	55
Tablica 10 Mehanička svojstva čelika X5 CrNi 18-10 [36].....	56
Tablica 11 Parametri navarivanja tijekom izvođenja eksperimenta.....	62
Tablica 12 Unos topline tijekom navarivanja uzoraka.....	64
Tablica 13 Slike korijenskih prolaza uzorka sa zadanim parametrima navarivanja	69
Tablica 14 Masa uzoraka prije nagrizanja.....	76
Tablica 15 Gubitak mase uzoraka	85
Tablica 16 Makrosnimke ispitnih uzoraka nakon nagrizanja.....	88

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
A_5	mm	Istezljivost
c	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
I	A	Struja navarivanja
k		Koeficijent toplinske iskoristivosti
Q	kJ/cm	Unos topline tijekom navarivanja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
U	V	Napon navarivanja
v	cm/min	Brzina navarivanja
λ	W/mK	Toplinska vodljivost

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AC	<i>Izmjenična struja</i>
ASTM	<i>Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. American society for testing and material)</i>
DC	<i>Istosmjerna struja</i>
DM	<i>Dodatni materijal u zavarivanju</i>
ELC	<i>Visokolegirani Cr-Ni čelik sa sniženim sadržajem ugljika (engl. extra low carbon)</i>
EN	<i>Europska norma (engl. European standard)</i>
GTAW	<i>Engl. gas tungsten arc welding</i>
HRN	<i>Hrvatske norme</i>
ISO	<i>Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. International organization for standardization)</i>
MAG	<i>Elektrolučni postupak zavarivanja taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina</i>
MIG	<i>Elektrolučni postupak zavarivanja taljivom žicom u zaštiti inertnog plina</i>
OM	<i>Osnovni materijal u zavarivanju</i>
REL	<i>Ručno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom</i>
PA	<i>Horizontalni položaj zavarivanja</i>
ppm	<i>Engl. parts per million</i>
TIG	<i>Elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom od volframa u zaštiti inertnog plina</i>
WIG	<i>Njem. wolfram inert gas schweissen</i>

SAŽETAK

U ovom radu je analizirana problematika TIG zavarivanja visokolegiranih Cr-Ni čelika s posebnim naglaskom na korijensku zaštitu. Svrha rada je utvrditi utjecaj kisika pri korijenskoj zaštiti na svojstva zavarenog spoja ovisno o različitim parametrima zavarivanja.

U teorijskom dijelu, opisan je TIG postupak zavarivanja pri čemu je posebna pozornost usmjerena na zavarivanje austenitnih visokolegiranih Cr-Ni čelika i probleme koji se mogu pojaviti tijekom toga. Detaljno je opisan utjecaj kisika u korijenskoj zaštiti na svojstva zavarenog spoja i utjecaj pravilnog izbor zaštitnog plina s obzirom na vrstu osnovnog materijala. Izvršen je pregled postojećih sustava za korijensku zaštitu i metoda obrade površine nakon zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je navarivanje uzoraka izrezanih iz cijevi od visokolegiranog Cr-Ni čelika oznake X5 CrNi 18-10 (HRN EN 10088-3:2015). Navarivanje uzoraka je provedeno automatiziranim TIG postupkom s različitim unosima topline, različitim plinovima za korijensku zaštitu i različitim koncentracijama kisika u plinu za korijensku zaštitu. Nakon navarivanja, provedena je vizualna analiza uzoraka te ispitivanje na rupičastu koroziju sukladno normi ASTM G48-99a i izrada makroizbrusaka. Uzorci ispitivani na rupičastu koroziju su analizirani sukladno normi ASTM G46-94, a na makroizbruscima je provedena kvalitativna vizualna analiza. Na kraju eksperimentalnog dijela, dane su preporuke za pravilno zavarivanje ovisno o koncentraciji kisika i unosu topline.

Ključne riječi: TIG, visokolegirani Cr-Ni čelici, pobojenje, korijenska zaštita

SUMMARY

This paper analyses the problematics of TIG welding of high-alloyed Cr-Ni steels with special emphasis on root protection. Purpose of this analysis is to determine the influence of oxygen on the properties of the welded joint, depending on the different parameters of welding.

In the theoretical part, the TIG welding process is described, with special attention focused on the welding of austenitic high-alloyed Cr-Ni steels and the potential problems which may occur during the process. The influence of oxygen in root protection on the properties of the welded joint and the influence of the correct choice of shielding gas, considering the type of basic material, are described in details. An overview of the existing systems for root protection and surface treatment methods after welding was carried out.

In the experimental part, welding of samples cut from pipes made of high-alloyed Cr-Ni steel marked X5CrNi-18-10 (HRN EN 10088-3:2015) was conducted. The welding of the samples was carried out by an automated TIG process with different heat inputs, different root protection gases and different concentrations of oxygen in the root protection gas. After welding, visual analysis of samples, along with testing for pitting corrosion, according to ASTM G48-99a standard and production of macrographs were carried out. Samples tested for pitting corrosion were analyzed according to ASTM G46-94 standard while a qualitative visual analysis was performed on the macrographs. At the end of my research, recommendations were given for proper welding, depending on the oxygen concentration and heat input.

Key words: TIG, stainless steel, heat tint, root protection

1. UVOD

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom od volframa u zaštiti u zaštiti inertnog plina spada u skupinu elektrolučnih postupaka zavarivanja te je još poznat pod kraticom TIG. Pošto ovaj postupak spada u skupinu elektrolučnih postupaka ima široku primjenu u industriji gdje se koriste proizvodne tehnologije zavarivanja i navarivanja. Za razliku od svojih srodnih postupaka kao što su REL, MAG, MIG i ostali, TIG postupak se ističe u odnosu na ostale po visokoj razini kvalitete zavarenog spoja koja se može postići njime ali isto tako i izraženom osjetljivošću na pojavu grešaka u zavarenim i navarenim spojevima. Samim time, pravilna tehnika rada, ispravni parametri zavarivanja i povoljni uvjeti okoline daju TIG postupku zavarivanja prednost u odnosu na sve ostale ali isto tako i nedostatak. Njegova primjena je posebno izražena kod zavarivanja i navarivanja metala kao što su aluminij i njegove legure, visokolegiranih Cr-Ni čelika, titana, bakra i njegovih legura te ostalih metala koji zahtijevaju posebne uvijete zavarivanja. Samim time, da bi se postigla što bolja produktivnost ovog postupka te još više proširilo područje njegove primjene, razvijene su razne inačice TIG postupka zavarivanja.

Visokolegirani Cr-Ni čelici spadaju u skupinu najraširenijih vrsta čelika i metala općenito koji se danas koriste u gotovo svim granama industrije. Takvu široku primjenu im omogućuje njihova izrazito dobra korozijska postojanost zbog koje se često nazivaju i nehrđajući čelici. Da bi se ta korozijska postojanost ostvarila, potrebna je njihova pravilna primjena ovisno o uvjetima okoline i pravilna tehnologija obrade i spajanja. Široku primjenu u industriji im također omogućuju varijacije koje se mogu postići u njihovoj mikrostrukturi pa samim time, postoji i više inačica visokolegiranih Cr-Ni čelika. Međutim, glavni kriterij korozijske postojanosti visokolegiranih čelika je sadržaj glavnog legirnog elementa kroma, u njihovoj mikrostrukturi.

Narušavanjem sadržaja kroma u mikrostrukturi visokolegiranih Cr-Ni dolazi do pojave raznih problema koji su povezani s pojavama različitih oblika korozije koji se mogu pojaviti na površini ili unutar samog metala. Time ovi čelici gube svoju laskavu titulu nehrđajućih i postaju izrazito osjetljivi na razne uvijete koji se mogu pojaviti u atmosferi kojoj su izloženi. Takav scenarij se može izbjeći pravilnom tehnologijom obrade, spajanja i zaštite.

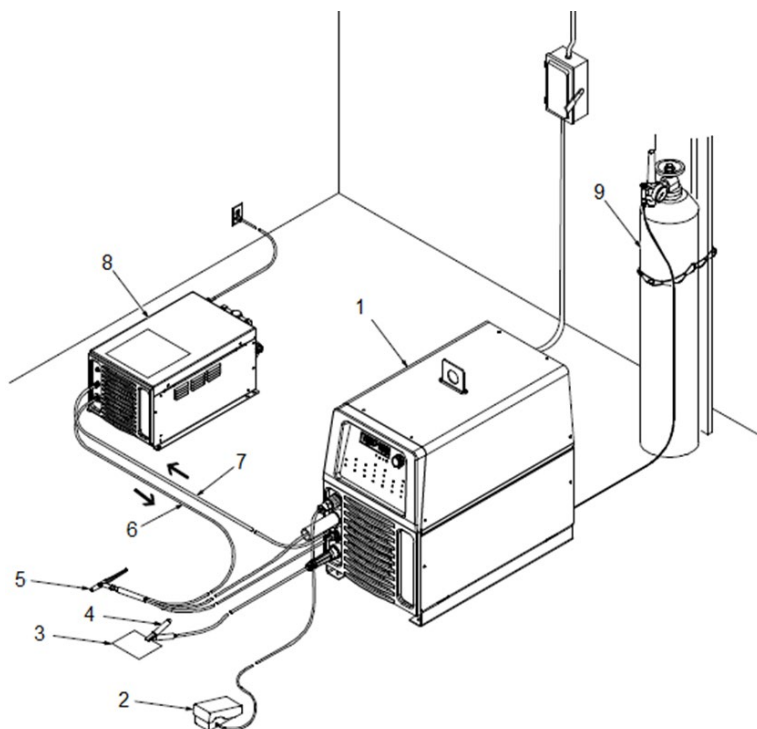
Tehnologija spajanja ima posebno izražen utjecaj na korozijska svojstva visokolegiranih Cr-Ni čelika pri čemu najveći utjecaj ima tehnologija zavarivanja. Razlog tome je svakako unos topline koji nastaje tijekom zavarivanja, ali i nepravilni parametri koji narušavaju mikrostrukturu ovih čelika. Time TIG postupak zavarivanja i ova grupa čelika postaju savršena kombinacija kada je u pitanju tehnologija zavarivanja. Pravilna provedba zavarivanja ne radi štetan utjecaj na korozijsku postojanost visokolegiranih Cr-Ni čelika te time oni zadržavaju svoju titulu nehrđajućih čelika. Međutim, da bi se postigao taj cilj, potrebno je voditi računa o mnogim čimbenicima kao što su parametri zavarivanja, uvjeti okoline tijekom i nakon zavarivanja te pravilna obrada i zaštita nakon zavarivanja. Parametri zavarivanja koji najviše utječu na korozijsku postojanost ovih čelika su brzina i struja zavarivanja, zaštitni plinovi u električnom luku i korijenu te unos topline. Uvjeti okoline koji najviše utječu na korozijsku postojanost ovih čelika su agresivnost okoline, vremenski uvjeti tijekom zavarivanja i prisutnost štetnih plinova. Samim time, pravilna obrada i zaštita nakon zavarivanja ima za cilj ukloniti negativne produkte koji si mogli nastati iz prethodna dva uvjeta. Time pravilna provedba parametara zavarivanja, eliminiranje štetnih utjecaja iz okoline i ispravna obrada i zaštita nakon zavarivanja čine visokolegirane Cr-Ni čelike korozijski postojanim i nakon zavarivanja.

2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

2.1. Oprema za TIG zavarivanje

TIG postupak zavarivanja je skraćenica za engl. Tungsten Inert Gas, što predstavlja elektrolučni postupak zavarivanja s netaljivom elektrodom od volframa u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Električni luk se uspostavlja između netaljive elektrode od volframa i radnog komada, pri čemu dolazi do taljenja osnovnog i po potrebi dodatnog materijala. U praksi se uz oznaku TIG koriste i druge oznake pa se tako ovaj postupak može označavati kraticom GTAW od engl. Gas Tungsten Arc Welding, te kraticom WIG od njem. Wolfram Inert Gas schweissen.

Na Sliku 1 prikazana je standardna oprema za ručni postupak TIG zavarivanja koja se većinom koristi. Brojevima označena oprema redom predstavlja: 1 - izvor struje za zavarivanje, 2 - upravljačka papučica, 3 - radni komad, 4 - stezna kliješta, 5 - pištolj za zavarivanje, 6 - izlazno crijevo rashladne tekućine, 7 - ulazno crijevo rashladne tekućine, 8 - uređaj za hlađenje, 9 - spremnik za zaštitni plin.

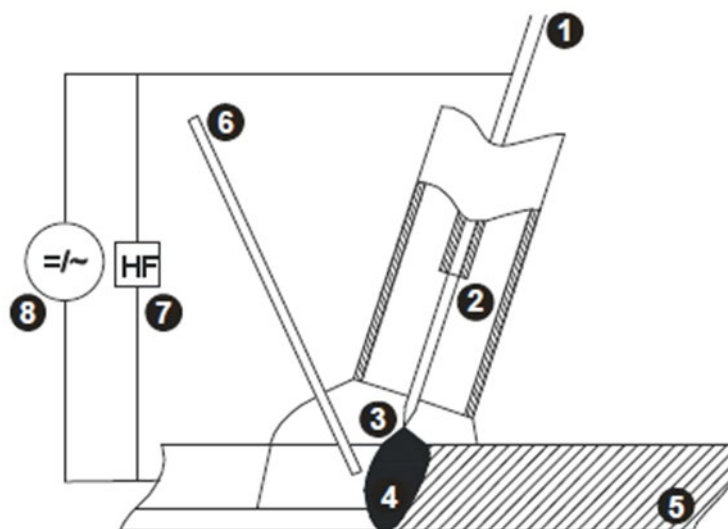


Slika 1 Uobičajena oprema za TIG zavarivanje [1]

2.2. Princip rada TIG postupka zavarivanja

TIG postupak zavarivanja može biti izveden u tri različita oblika, a to su ručno, poluautomatsko i automatsko zavarivanje. U sve te tri izvedenice prvi i osnovni korak je uspostavljanje električnog luka. Da bi se omogućilo uspostavljanje električnog luka između netaljive elektrode od volframa i radnog komada, prvo je potrebno spojiti vodiče iz izvora za zavarivanje na radni komad i na pištolj za zavarivanje.

Slika 2 prikazuje shematski prikaz TIG postupka zavarivanja s njegovim karakterističnim dijelovima koji omogućuju sam postupak zavarivanja. Brojevima su redom prikazani karakteristični dijelovi: 1 - netaljiva volframova elektroda, 2 - kontaktna vodilica i sapnica, 3 - zaštitna plinska atmosfera, 4 – talina zavara, 5 – ostvareni zavar, 6 - dodatni materijal, 7 - visokofrekventni generator, 8 - Izvor struje za zavarivanje.



Slika 2 Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2]

Uspostavljanje električnog luka može biti izvedeno na tri različita načina, a to su „lift arc“, kratkim spojem i visokofrekventnim uspostavljanjem električnog luka. Od ova tri navedena načina, uspostavljanje kratkim spojem se gotovo više ni ne koristi dok se „lift arc“ koristi jako malo. Uspostavljanje električnog luka po „lift arc“ principu funkcionira tako da se netaljiva elektroda od volframa prisloni na radni komad i njezinim podizanjem od radnog komada dolazi do uspostavljanja električnog luka. Visokofrekventno uspostavljanje električnog luka se danas najviše koristi u praksi. Ovaj princip se zasniva na uspostavljanju električnog luka uz pomoć visokofrekventnog generatora koji se uključuje samo u jako kratkom vremenu, neposredno pred sam početak zavarivanja.

Nakon što dođe do uspostavljanja električnog luka između volframove elektrode i radnog komada, visokofrekventni generator se isključuje, a proces zavarivanja se odvija s dodatnim materijalom kojeg predstavlja žica ili bez njega.

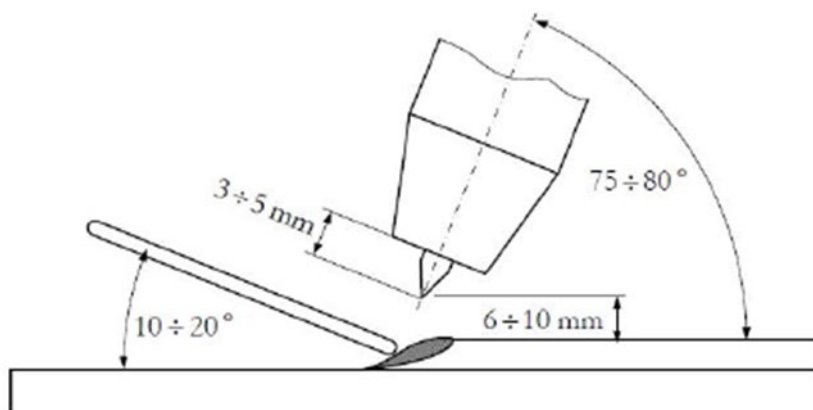
Slika 3 prikazuje dva koraka tijekom uspostavljanja električnog luka po principu visokofrekventnog generatora. Samim time, lijevo su prikazane iskre koje nastaju kao posljedica djelovanja rada visokofrekventnog generatora, a desno je prikazan uspostavljen električni luk u atmosferi zaštitnog plina.



Slika 3 Uspostava električnog luka kod TIG zavarivanja [2]

Da bi se omogućili povoljni uvjeti tijekom zavarivanja, potreban je zaštitni plin koji se pušta kroz sapnicu neposredno prije uspostave električnog luka i stvara zaštitnu atmosferu. Ona kao takva, ima nekoliko uloga, od kojih se svakako ističu lakša ionizacija za uspostavljanje luka te zaštita volframove elektrode i same taline zavora.

Uz zaštitni plin tijekom zavarivanja, važan je i pravilan položaj pištolja za zavarivanje te dodatnog materijala u odnosu na radni komad koji se zavaruje. Slika 4 prikazuje pravilan položaj pištolja, odnosno netaljive elektrode i radnog komada. Kut između radnog komada i netaljive elektrode, odnosno pištolja za zavarivanje treba se kretati u rasponu od 75° do 80° . Pravilno dodavanje dodatnog materijala mora biti pod kutem od 10° do 20° u odnosu na radni komad. Uz pravilne nagibe elektrode i dodatnog materijala, važan je vrh volframove elektrode koji se mora nalaziti izvan sapnice pištolja 3 do 5 mm. Razmak samog vrha netaljive elektrode i radnog komada mora se kretati u rasponu od 6 do 10 mm. [2]



Slika 4 Položaj pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [3]

2.3. Vrste netaljivih elektroda od volframa

Kod TIG postupka zavarivanja, volframova elektroda ima ulogu provodnika električne struje s pištolja za zavarivanje na radni komad. Tijekom zavarivanja ne dolazi do njenog taljenja, ali s vremenom ipak dolazi do njenog trošenja, uslijed brušenja vrha zbog gubitka geometrije ili same erozije vrha. Iako se naziva volframova elektroda, ona je većinom legura volframa s određenim dodacima koji su prikazani u Tablica 1.

Tablica 1 Podjela volframovih elektroda prema HRN EN ISO 6848:2015 [2]

Boja	Legirni element (Legirni oksid)
Zelena	Nema (čisti volfram)
Smeđa, bijela	Cirkonij (ZrO_2)
Crna, plava, zlatan	Lantan (La_2O_3)
Siva	Cerij (CeO_2)
Žuta, narančasta, crvena	Torij (ThO_2)

Elektrode od čistog volframa koriste se kod zavarivanja s AC izvorom struje, te za zavarivanje aluminijskih legura i legura lakih metala.

Volframove elektrode koje su legirane s torijem (ThO_2) mogu provoditi veće struje za razliku od čistog volframa, koriste se kod DC izvora struje te se odlikuju lakšim uspostavljanjem i stabilnijim električnim lukom. Primjenjuju se za zavarivanje visokolegiranih i Cr-Ni čelika.

Elektrode koje su legura volframa s cirkonijem (ZrO_2) imaju bolju provodnost struje od elektroda od čistog volframa, ali slabije od elektroda legiranih s torijem. Primjenjuje se prvenstveno kod zavarivanja aluminija, aluminijskih legura i legura lakih metala s AC strujom.

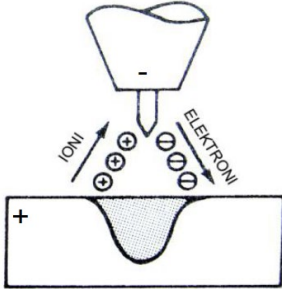
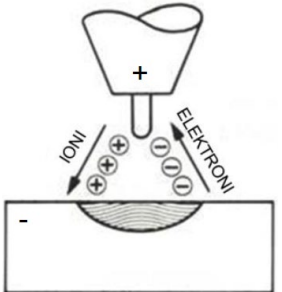
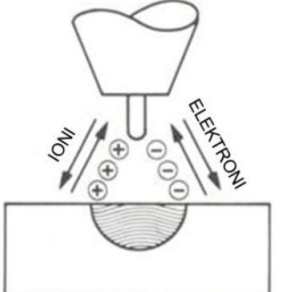
Elektrode koje su legura volframa i lantana (La_2O_3) koriste se kod AC i DC izvora struje. Prvenstveno se koriste kod automatskih postupaka zavarivanja kao što su robotizirano ili orbitalno zavarivanje. Ova vrsta elektrode je također pogodna za niske struje zavarivanja kao i za plazma i mikroplazma postupke zavarivanja.

Elektrode koje su legura volframa i cerija (CeO_2) koriste se kod AC i DC izvora struje. Karakterizira ih široka primjena uz vrlo lako uspostavljanje električnog luka.

2.4. Vrste struja pri TIG zavarivanju

TIG postupak zavarivanja koristi izmjeničnu struju i istosmjernu struju s pozitivnim i negativnim polom na elektrodi. Sam izbor vrste struje ovisi o materijalu koji se zavaruje zbog razlika u prijenosu iona i elektrona tijekom zavarivanja.

Tablica 2 Osnovne karakteristike TIG zavarivanja ovisno o struji i polaritetu [2]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet elektrode	Negativan (-)	Pozitivan (+)	AC
Prijenos elektrona i iona između elektrode i radnog komada			
Efekt čišćenja oksida	NE	DA	DA-svaki pol ciklusa
Omjer raspodjele topline između elektrode i radnog komada	70 % topline je na radnom komadu 30 % topline je na vrhu elektrode	30% topline je na radnom komadu 70 % topline je na vrhu elektrode	50 % topline je na radnom komadu 50 % topline je na vrhu elektrode
Penetracija	Duboka ali uža penetracija	Manja dubina ali šira penetracija	Srednja

Primjena istosmjernje struje sa spajanjem volframove elektrode na minus pol, primjenjuje se u širokom spektru uporabe. Koristi se za gotovo sve vrste materijala osim aluminija i magnezija te njihovih legura. Pošto je elektroda spojena na minus pol, većina topline se nalazi na radnom komadu te je samim time u ovom slučaju moguće postići i najveće opterećenje elektrode. Spajanjem elektrode na plus pol, primjenjuje se samo u posebnim slučajevima. Pošto se spajanjem elektrode na plus pol, većina topline nalazi na njoj znatno se smanjuje mogućnost opterećenja elektrode tijekom rada.

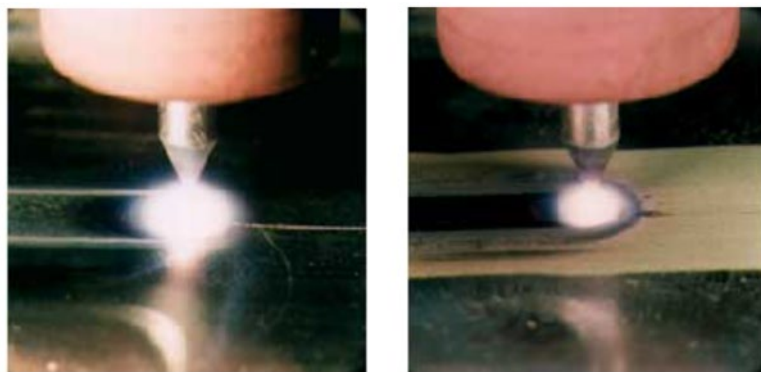
Primjena izmjenične struje je zastupljena kod zavarivanja aluminija i magnezija te njihovih legura. Zbog samog načina prijenosa iona i elektrona u jednom ciklusu omogućuje se uklanjanje oksida s površine osnovnog materijala. Efekt čišćenja se dešava svakih pola ciklusa kada se ioni zabijaju u površinu oksida, pri čemu dolazi do njezinog razbijanja. To je posebno važno kod aluminija pošto je temperatura taljenja njegovog oksida i do četiri puta veća od temperature taljenja osnovnog materijala.

2.5. Inačice TIG postupka zavarivanja

2.5.1. A-TIG

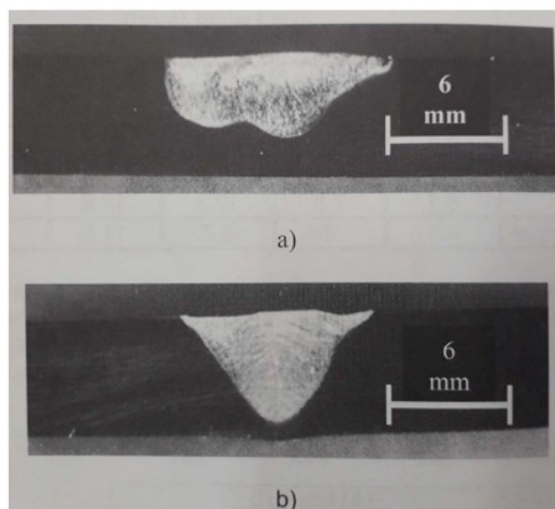
Klasični TIG postupak zavarivanja ima jedan nedostatak u okviru slabije produktivnosti u odnosu na druge elektrolučne postupke kao što su MIG i MAG. Sukladno tome, razvijena je inačica TIG postupka pod nazivom A-TIG (engl. activated tungsten inert gas) u cilju povećanja penetracije, a samim time, i produktivnosti postupka. Povećanje penetracije se postiže nanošenjem tankog sloja premaza na radni komad prije samog početka zavarivanja. Premaz djeluje na električni luk tako da ga sužava i time dovodi do veće gustoće struje i povećanje sile električnog luka. To za posljedicu ima promjene u gibanju taline pošto dolazi do strujanja taline od ruba prema sredini te sukladno tome to gibanje taline prema sredini zavora daje veću penetraciju.

Slika 5 prikazuje razliku koja nastaje u izgledu samog električnog luka bez premaza kod klasičnog TIG postupka i s premazom kod A-TIG postupka čime se postiže veća penetracija. Na slici je jasno vidljiva razlika između baznog postupka i njegove inačice prema obliku i veličini električnog luka pošto kod A-TIG postupka dolazi do sužavanja električnog luka te je samim time, on uži kao što je vidljivo i na Slika 5



Slika 5 Izgled električnog luka kod klasičnog TIG postupka (lijevo) i kod A-TIG postupka (desno) [4]

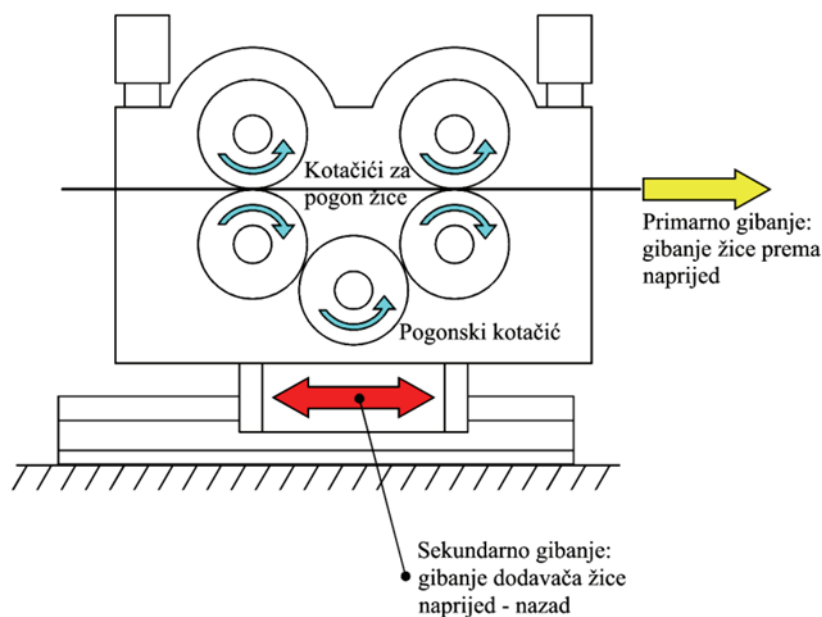
Slika 6 daje jasni uvid u razliku koja nastaje kod uporabe premaza i njegovog utjecaja na penetraciju i širinu zavora, prema baznom postupku bez premaza, koji daje širi zavar s manjom penetracijom. Također, vrijedi napomenuti da je i sam oblik zavora pravilnijeg i ljepšeg oblika po poprečnom presjeku kod A-TIG postupka u odnosu na bazni TIG postupak, što je jasno vidljivo i na Slika 6.



Slika 6 Poprečni presjek zavora: a) bez premaza, b) s premazom [5]

2.5.2. TIP-TIG

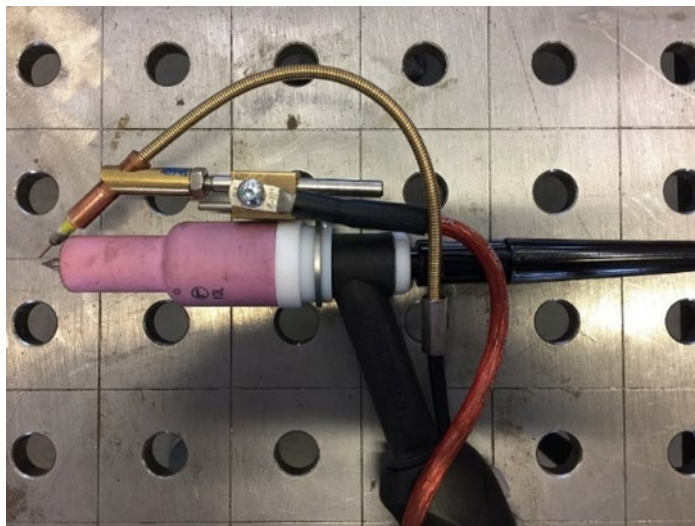
Ova inačica TIG postupka zavarivanja nastala je kao odgovor na zahtjeve za većom produktivnošću i samom automatizacijom TIG postupka zavarivanja. TIP-TIG se razlikuje od klasičnog TIG postupka zavarivanja u tome što ima automatski dovod dodatnog materijala (Slika 7), odnosno žice za razliku od klasičnog kod kojeg se dovod žice radi rukom zavarivača. Također, još jedna razlika nastaje u tome što je kod TIP-TIG postupka žica predgrijana. Automatsko dodavanje žice se sastoji od primarnog i sekundarnog dovoda žice.



Slika 7 Shematski prikaz dodavača žice za TIP-TIG zavarivanje [6]

Primarni dovod žice se odvija tako da se gibanje žice odvija kontinuirano prema naprijed, a kod sekundarnog dovoda žice, samo gibanje žice odvija naprijed-nazad. Kombinacijom primarnog i sekundarnog dovoda žice, postiže se složeno gibanje u obliku vibracija u pravcu taline zavara. Rezultat dovoda žice, odnosno dodatnog materijala na ovakav način je svakako poboljšano staljivanje osnovnog i dodatnog materijala te se također omogućuje lakši izlaz plinova i nečistoća iz taline zavara. Samim time, smanjuje se mogućnost pojave grešaka u zavarenom spoju u okviru pora i nečistoća. Automatskim dovodom žice može se postići i do tri puta veća brzina zavarivanja i količina depozita u odnosu na klasični TIG postupak zavarivanja.

Slika 8 prikazuje pištolj koji se koristi kod TIP-TIG postupka zavarivanja. Pištolj je po svojem osnovnom obliku isti kao kod klasičnog TIG zavarivanja. Jedina razlika je u tome što se na njemu nalazi sustav za automatski dovod žice koji omogućuje da se žica kontinuirano dovodi u električni luk tijekom zavarivanja.

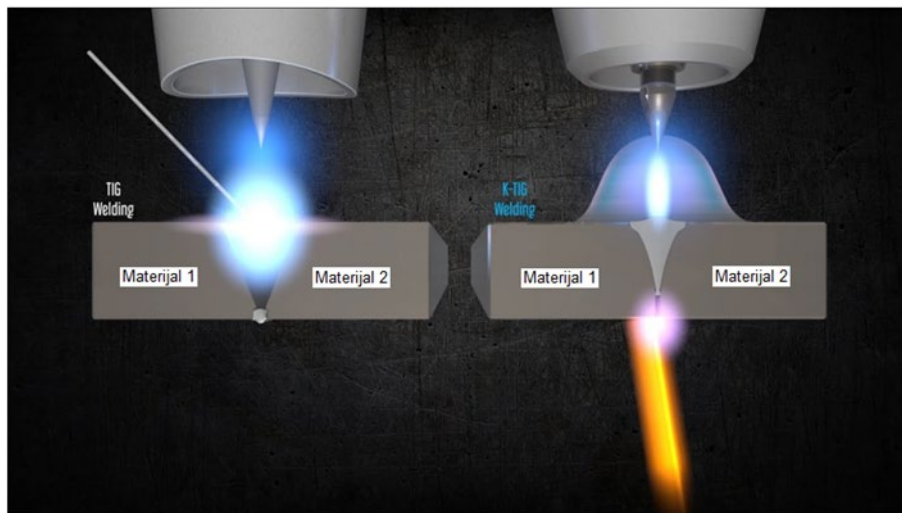


Slika 8 Pištolj za TIP-TIG zavarivanje [7]

2.5.3. K-TIG

Ova inačica TIG postupka zavarivanja je zapravo podvrsta TIP-TIG postupka zavarivanja pod nazivom engl. TIP-TIG focus. K-TIG je automatizirani postupak zavarivanja pri čemu je glavna karakteristika postizanje „efekta ključanice“ (engl. keyhole) tijekom zavarivanja. Za razliku od klasičnog TIG postupka, kod ove inačice se ne radi gotovo nikakva priprema spoja prije zavarivanja, već se ciljano tali materijal uz pomoć električnog luka te se postiže rupa u obliku ključanice (Slika 9). Kontinuiranim povlačenjem električnog luka dolazi do zatvaranja rupe iza luka i time se stvara sam zavareni spoj. Tijekom samog zavarivanja nije potrebno koristiti dodatni materijal, pošto se sam zavareni spoj stvara taljenjem osnovnog materijala. Ova inačica TIG zavarivanja se koristi za zavarivanje u jednom prolazu u horizontalnom položaju. Glavna prednost K-TIG postupka je značajno povećanje produktivnosti u odnosu na klasični TIG postupak, a sama primjena je izražena na materijalima slabije toplinske vodljivosti kao što su visokolegirani čelici i titan.

Slika 9 prikazuje razliku koja nastaje tijekom zavarivanja klasičnim TIG postupkom i kod zavarivanja K-TIG postupkom po poprečnom presjeku metala zavara. Jasno je vidljivo, da kod K-TIG postupka metal zavara ima puno manju širinu u odnosu na klasični te nema skoro nikakve pripreme spoja prije zavarivanja ili uporabe dodatnog materijala kao što je to slučaj kod klasičnog TIG postupka .

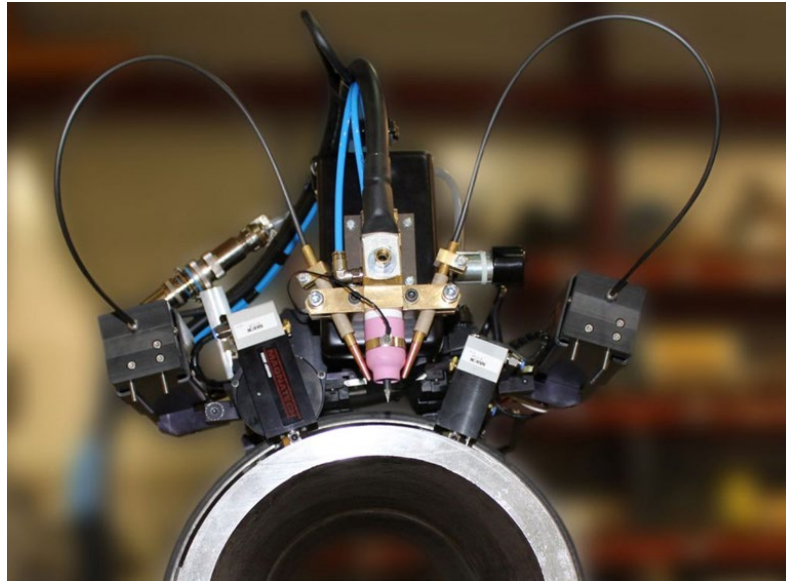


Slika 9 Klasični TIG postupak (lijevo), K-TIG postupak (desno) [8]

2.5.4. Orbitalno TIG zavarivanje

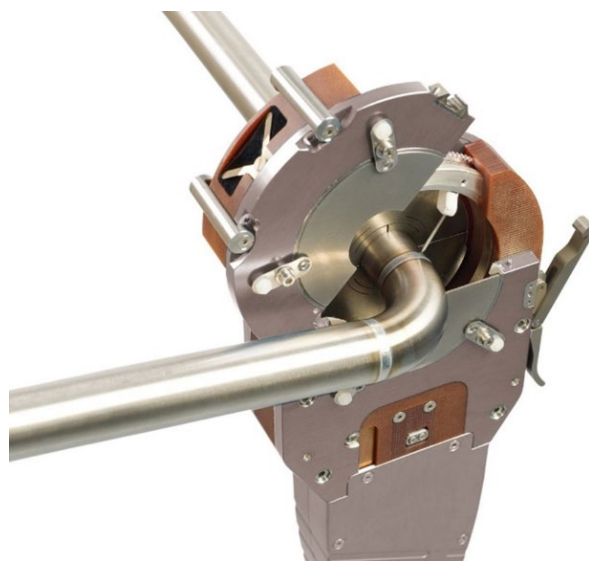
Zavarivanje cijevi klasičnim TIG postupkom iako je moguće, nema zadovoljavajuću razinu produktivnosti, te je u tu svrhu razvijen postupak orbitalnog TIG zavarivanja. Kod ovog postupka zavarivanja, cijevi koje se zavaruju su stegnute i pozicionirane u odgovarajućem položaju za zavarivanje. Na mjesto spoja cijevi se postavlja glava uređaja za orbitalno TIG zavarivanje koja može biti u otvorenoj (Slika 10) ili zatvorenoj (Slika 11) izvedbi. Upravljanje parametrima zavarivanja se provodi uz pomoć računala.

Izvedba s otvorenom glavom (Slika 10) za orbitalno TIG zavarivanje se prvenstveno koristi kod zavarivanja materijala koji iz tehnoloških razloga imaju potrebu da se prilikom zavarivanja koristi dodatni materijal. Nagib netačjive elektrode se može podešavati u rasponu koji se kreće od 30° do 45° što prije svega omogućuje zavarivanje kutnih zavarenih spojeva. Razmak između netačjive elektrode i radnog komada se održavati mehaničkim putem ili automatsko. [9]



Slika 10 Primjer otvorene glave za orbitalno TIG zavarivanje [10]

Izvedba sa zatvorenom glavom (Slika 11) je prvenstveno namijenjena za izvođenje zavarivanja u potpuno zatvorenom sustavu. Komora u kojoj se izvodi sam proces zavarivanja se ispunjava zaštitnim plinom za zavarivanje, čime se postiže da je zavareni spoj tijekom samog procesa zavarivanja u potpunosti zaštićen od djelovanja atmosfere. Ovakva izvedba orbitalnog TIG zavarivanja se prvenstveno koristi kod zavarivanja Cr-Ni čelika čime se postiže visoka zaštita lica i korijena zavora od djelovanja atmosfere i samim time, postiže se visoka kvaliteta zavora. [9]



Slika 11 Primjer zatvorene glave za orbitalno TIG zavarivanje [11]

Zaštitni plinovi koji se koriste prilikom zaštite korijena u otvorenoj izvedbi i za ispunu komore u zatvorenoj izvedbi su većinom argon, helij, vodik i dušik. U Europi je posebno izražena primjena mješavine argona i vodika, argona i dušika te i čistog argona. Primjena helija je umanjena zbog njegove relativno visoke cijene.

Primjenom orbitalnog TIG zavarivanja postiže se puno bolja kvaliteta zavara u odnosu na klasični ručni postupak zavarivanja uz visoku produktivnost samog postupaka. Jedan od mogućih problema koji se mogu pojaviti, a to je posebno istaknuto kod izvedbe sa zatvorenim glavom je pojava sustavne greške u zavarenom spoju. To je posljedica samog načina zavarivanja pošto nije potreban zavarivač, a operater na stroju ne vidi sam tijek zavarivanja.

3. AUSTENITNI Cr-Ni ČELICI

3.1. Podjela visokolegiranih Cr-Ni čelika

Razvoj visokolegiranih Cr-Ni čelika počinje od 1912. godine kada ih je razvila i patentirala Njemačka tvrtka Krupp i od tada su u konstantnoj primjeni i razvoju u različitim dijelovima i tipovima industrije. Naziv koji još ova grupa čelika poprima su nehrđajući čelici od engleskog naziva „stainless steel“ ili tehnički ispravniji naziv korozijski postojani čelici. Ovi čelici spadaju u klasu legura na bazi Fe, te obično sadrže [12]:

- od 12 do 27 % Cr
- od 4 do 25 % Ni
- 1 do 2 % Mn
- Prisutna je i mala količina ugljika
- Nečistoće

Dodavanjem još nekih legiranih elemenata kao što su molibden, bakar, aluminij, volfram i dušik, može se modificirati struktura i time poboljšati određena svojstva kao što su korozijska postojanost, te čvrstoća i žilavost na niskim temperaturama. Sam izraz korozijski postojani čelici koristi se za čelike koji su postojani određeni vremenski period na djelovanje agresivnog medija koji djeluje na njihovu površinu. Uvjet korozijske postojanosti ovih čelika temelji se na sposobnosti stvaranja zaštitne prevlake koja se sastoji od kromovih oksida. Međutim, potpuna korozijska postojanost ispunjava se s dva uvjeta [12]:

1. Sadržaj Cr mora biti barem 12 % u čvrstoj otopini
2. Homogena monofazna mikrostruktura

Visokolegirani Cr-Ni čelici mogu se klasificirati prema mikrostrukтури na pet osnovnih grupa, a to su [12]:

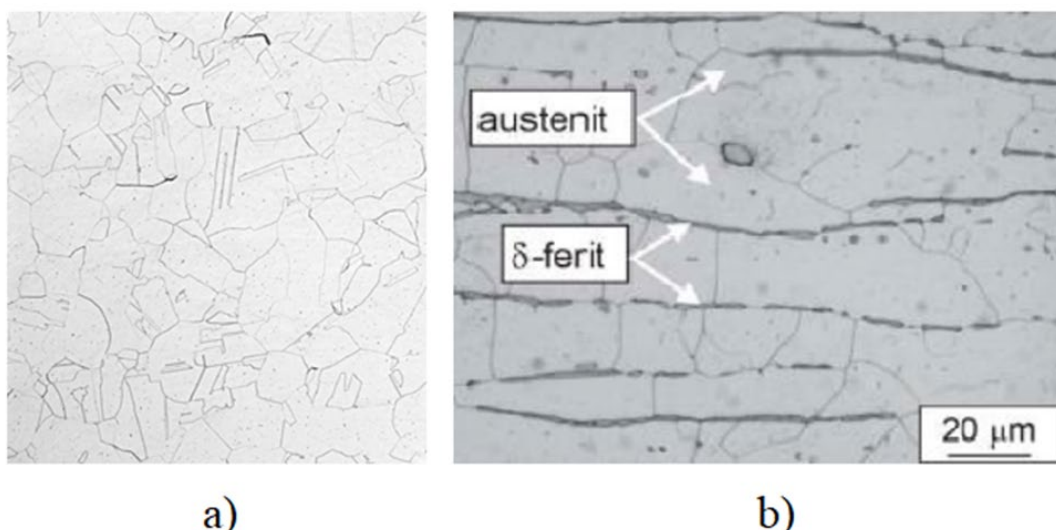
- Feritni čelici
- Austenitni čelici
- Dupleks čelici
- Martenzitni čelici
- Precipitacijski očvršnuti čelici

3.2. Struktura i kemijski sastav austenitnih Cr-Ni čelika

Austenitni Cr-Ni čelici spadaju u jednu od grupa visokolegiranih Cr-Ni čelika. Kako bi se postigla austenitna mikrostruktura, udio ugljika mora biti što manji pa se on kreće u granicama od 0,02 do 0,15 % C jer se tada uvelike smanjuje mogućnost pojave interkristalne korozije tijekom unošenja velike količine topline u materijal (zavarivanje). Maseni udjeli kroma i nikla moraju biti što je moguće veći, jer krom povećava korozijsku postojanost, a nikal dovodi do nastanka austenitne mikrostrukture.

Dodavanjem Ni u leguru Fe i Cr postiže se proširenje austenitnog područja i povećava se njegova stabilnost na nižim temperaturama. Općenito govoreći austenitni Cr-Ni čelici sadrže 12 do 25 % Cr te 8 do 25 % Ni pri čemu je sadržaj Ni posebno važan za održavanje stabilne austenitne strukture u rasponu temperatura od 1100 °C pa sve do sobne temperature, čime se sprječava stvaranje martenzita u strukturi. Uz to treba napomenuti da je nikl izrazito γ -geni element te uz visok sadržaj nikla kao legirnog elementa nema faznih transformacija tijekom hlađenja što znači da se struktura ne može zakaliti toplinskom obradom, niti se ne može usitniti zрно normalizacijskim žarenjem.

Slika 12 a) prikazuje tipičnu mikrostrukturu austenitnog čelika pri čemu se struktura sastoji od 100% austenita, a Slika 12 b) prikazana mikrostruktura koja se sastoji od austenita te određenog udjela δ -ferita, pri čemu su trakaste nakupine δ -ferita usmjerene paralelno u smjeru valjanja.



Slika 12 Mikrostruktura austenitnih Cr-Ni čelika [13]

3.3. Svojstva i primjena austenitnih Cr-Ni čelika

Visokolegirani Cr-Ni čelici pojavljuju se u nekoliko stotina različitih vrsta što im daje i široko područje primjene, najviše zbog dobre korozijske postojanosti i dobrih mehaničkih svojstava. Najviše s primjenjuju u:

- prehrambenoj industriji zbog visokog stupnja sterilnosti materijala (mljekare, pivovare, uljare, pogoni za preradu mesa)
- graditeljstvu (fasadni elementi, nosive konstrukcije, nadstrešnice, stepeništa)
- brodogradnji (osovine brodskih vijaka, kormila, crpke)
- farmaceutskoj i kemijskoj industriji, medicini (izrade kirurških instrumenata)
- dekorativne svrhe (unutarnje i vanjsko uređenje ograda, rukohvata, te pribora za jelo i različiti predmeti u kućanstvu)

Austenitni Cr-Ni čelici su mekani i nemagnetični metali koje karakterizira relativno niska vrijednost granice tečenja te granice razvlačenja zbog malog udjela ugljika, visoka plastičnost, žilavost i dobra korozijska postojanost [13]. Primjenom legiranih elemenata se može postići relativno velika otpornost na puzanje pri povišenim i visokim temperaturama. Ova skupina metala ima i dobra svojstva pri niskim temperaturama i dobro se zavaruje jer ne dolazi do povećanja zrna u zoni utjecaja topline.

U Tablica 3 prikazani su najčešće korišteni austenitni čelici od kojih su svakako najpoznatiji predstavnici X5 CrNi 18-10 i X5 CrNiMo 17-12-2 koji se najviše koriste u strojarskoj praksi. Ovu vrstu čelika karakterizira vrlo dobra korozijska postojanost pri djelovanju atmosferskih agresivnih medija, te oksidirajućih sredstava, a uz to ima vrlo dobra mehanička svojstva, vrlo dobru zavarljivost te vrlo dobru čvrstoću na povišenim temperaturama.

Tablica 3 Najčešće korišteni austenitni Cr-Ni čelici [12]

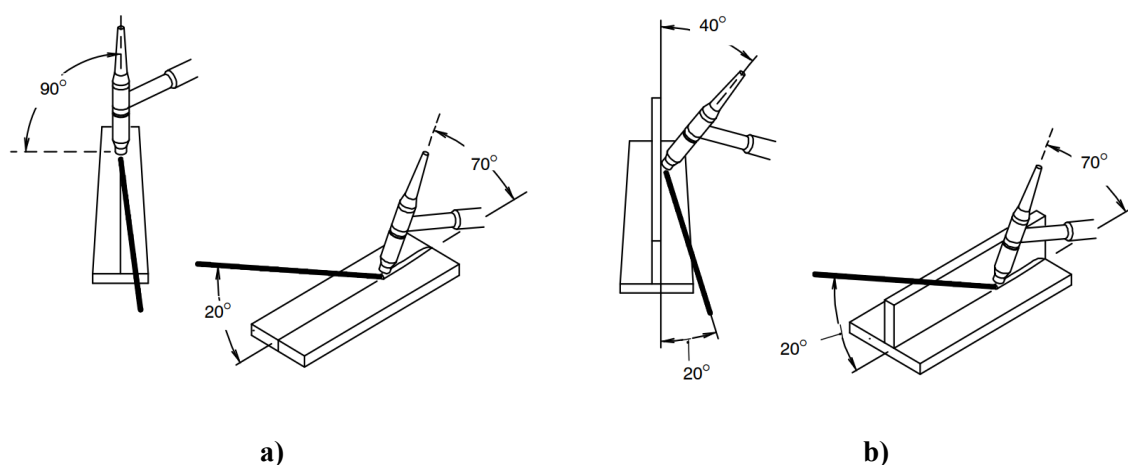
Oznaka prema EN 10027-1	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Ostali
X10 CrNi 18-8	Max. 0,15	2,0	16-18	6-8	
X5 CrNi 18-10	Max. 0,08	2,0	17-19	8-10	
X2 CrNi 18-9	Max. 0,03	2,0	18-20	8-12	
X15 CrNiSi 20-12	Max. 0,20	2,0	22-24	12,15	
X5 CrNiMo 17-12-2	Max. 0,08	2,0	16-18	10-14	2-3 % Mo
X2 CrNiMo 17-12-2	Max. 0,03	2,0	16-18	10-14	2-3% Mo
X6 CrNiTi 18-10	Max. 0,08	2,0	17-19	9-12	(5 x % C) Ti min.
X6 CrNiNb 18-10	Max. 0,08	2,0	17-19	9-13	(10 x % C) Nb-Ta min.

4. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA

4.1. Dodatni materijal u TIG zavarivanju

Svaki elektrolučni postupak zavarivanja je specifičan po tome što se kod njega zavareni spoj ostvaruje taljenjem osnovnog i dodatnog materijala uslijed djelovanja topline koju stvara električni luk te su najbolji primjeri takvih postupaka MAG, MIG i REL. Međutim, to ne mora uvijek biti tako, postupci kao što su plazma i TIG zavarivanje mogu se primjenjivati bez dodatnog materijala te samim taljenjem dodatnog materijala napraviti zavareni spoj. Naravno, uz varijantu bez dodatnog materijala, postoji ona s dodatnim materijalom. Kod TIG postupka zavarivanja se dodatni materijal koristi u obliku žice koja se dodaje u područje električnog luka mehanizirano ili rukom zavarivača. [14]

Samim time, kvaliteta zavarenog spoja uvelike ovisi o pravilnom izboru dodatnog materijala i njegovom pravilnom dodavanju u električni luk tijekom zavarivanja. Uslijed zavarivanja sučeljenih i kutnih spojeva, pravilno dodavanje dodatnog materijala mora biti pod kutem od 10° do 20° u odnosu na radni komad kao što prikazuje Slika 13. Također, uz sam nagib dodatnog materijala, vrlo važna je i brzina njegovog dodavanja u električni luk koja prvenstveno ovisi o samoj brzini zavarivanja, koja pak ovisi o jačini struje, položaju zavarivanja i potrebnoj debljini ispune zavarenog spoja. [14]



Slika 13 Pravilan položaj dodatnog materijala kod TIG zavarivanja [14]

Slika 14 prikazuje detaljan popis dodatnog materijala (žice) koji se može koristiti kod TIG zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika. Sama klasifikacija dodatnog materijala se vrši prema normi HRN EN ISO 14343:2017. U normi je također definiran kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala. Samim time, svaka vrsta čelika ima definiranu određenu vrstu dodatnog materijala koju je dozvoljeno koristiti uslijed zavarivanja tog čelika [15].

Označavanje legure prema		Kemijski sastav, %											
Nazivni sastav ISO 14343-A	Vrsta legure ISO 14343-B	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Nb ^d	Ostalo
—	209	0,05	0,90	4,0 to 7,0	0,03	0,03	20,5 to 24,0	9,5 to 12,0	1,5 to 3,0	0,10 to 0,30	0,75	—	V 0,10 to 0,30
—	218	0,10	3,5 to 4,5	7,0 to 9,0	0,03	0,03	16,0 to 18,0	8,0 to 9,0	0,75	0,08 to 0,18	0,75	—	—
—	219	0,05	1,00	8,0 to 10,0	0,03	0,03	19,0 to 21,5	5,5 to 7,0	0,75	0,10 to 0,30	0,75	—	—
—	240	0,05	1,00	10,5 to 13,5	0,03	0,03	17,0 to 19,0	4,0 to 6,0	0,75	0,10 to 0,30	0,75	—	—
—	308	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,5 to 22,0	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	—	—
—	308Si	0,08	0,65 to 1,00	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,5 to 22,0	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	—	—
19 9 L	(308L)	0,03	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,02	19,0 to 21,0	9,0 to 11,0	0,5	—	0,5	—	—
(19 9 L)	308L	0,03	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,5 to 22,0	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	—	—
19 9 L Si	(308LSi)	0,03	0,65 to 1,2	1,0 to 2,5	0,03	0,02	19,0 to 21,0	9,0 to 11,0	0,5	—	0,5	—	—
(19 9 L Si)	308LSi	0,03	0,65 to 1,00	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,5 to 22,0	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	—	—
—	308N2	0,10	0,90	1,0 to 4,0	0,03	0,03	20,0 to 25,0	7,0 to 11,0	0,75	0,12 to 0,30	0,75	—	—
19 9 Nb	(347)	0,08	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,02	19,0 to 21,0	9,0 to 11,0	0,5	—	0,5	10 × C to 1,0	—
(19 9 Nb)	347	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,0 to 21,5	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	10 × C to 1,0	—
19 9 Nb Si	(347Si)	0,08	0,65 to 1,2	1,0 to 2,5	0,03	0,02	19,0 to 21,0	9,0 to 11,0	0,5	—	0,5	10 × C to 1,0	—
(19 9 Nb Si)	347Si	0,08	0,65 to 1,00	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,0 to 21,5	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	10 × C to 1,0	—
—	347L	0,03	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,0 to 21,5	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	10 × C to 1,0	—
—	347H	0,04 to 0,08	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	19,0 to 21,5	9,0 to 11,0	0,75	—	0,75	10 × C to 1,0	—
—	316	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	—	—
—	316Si	0,08	0,65 to 1,00	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	—	—
19 12 3 L	(316L)	0,03	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,02	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,5 to 3,0	—	0,5	—	—
(19 12 3 L)	316L	0,03	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	—	—
19 12 3 L Si	(316LSi)	0,03	0,65 to 1,2	1,0 to 2,5	0,03	0,02	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,5 to 3,0	—	0,5	—	—
(19 12 3 L Si)	316LSi	0,03	0,65 to 1,00	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	—	—
—	316LCu	0,03	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	1,0 to 2,5	—	—
19 12 3 Nb	(318)	0,08	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,02	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,5 to 3,0	—	0,5	10 × C to 1,0	—
(19 12 3 Nb)	318	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	8 × C to 1,0; 0,2 min.	—
—	318L	0,03	0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,0 to 3,0	—	0,75	8 × C to 1,0; 0,2 min.	—
19 12 3 Nb Si	—	0,08	0,65 to 1,2	1,0 to 2,5	0,03	0,02	18,0 to 20,0	11,0 to 14,0	2,5 to 3,0	—	0,5	10 × C to 1,0	—
—	317	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,5 to 20,5	13,0 to 15,0	3,0 to 4,0	—	0,75	—	—
(18 15 3 L)	317L	0,03	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,5 to 20,5	13,0 to 15,0	3,0 to 4,0	—	0,75	—	—
—	321	0,08	0,30 to 0,65	1,0 to 2,5	0,03	0,03	18,5 to 20,5	9,0 to 10,5	0,75	—	0,75	—	Ti 9 × C to 1,0; 0,2 min.

Slika 14 Dodatni materijal kod TIG zavarivanja prema HRN EN ISO 14343:2017 [15]

4.2. Greške u zavarenim spojevima

Zavarljivost austenitnih Cr-Ni čelika prvobitno ovisi o njihovom kemijskom sastavu, a pri čemu značajan utjecaj imaju nečistoće kao što su sumpor i fosfor jer mogu prouzročiti razne vrste pukotina od metala zavara pa sve do osnovnog materijala. Tijekom zavarivanja dolazi do unošenja velike količine topline, što uzrokuje promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline, odnosno mijenja se sama mikrostruktura osnovnog materijala. Promjena mikrostrukture nastaje uslijed izlučivanja karbida i drugih štetnih faza na granicama zrna što stvara preduvjet za nastanak interkristalne korozije. A u zavaru i oko njega dolazi do velikih razlika u temperaturama uslijed naglog zagrijavanja i hlađenja tijekom zavarivanja što može dovesti do pojave različitih vrsta pukotina. [16]

Glavni problemi koji se nameću kod zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika su [16]:

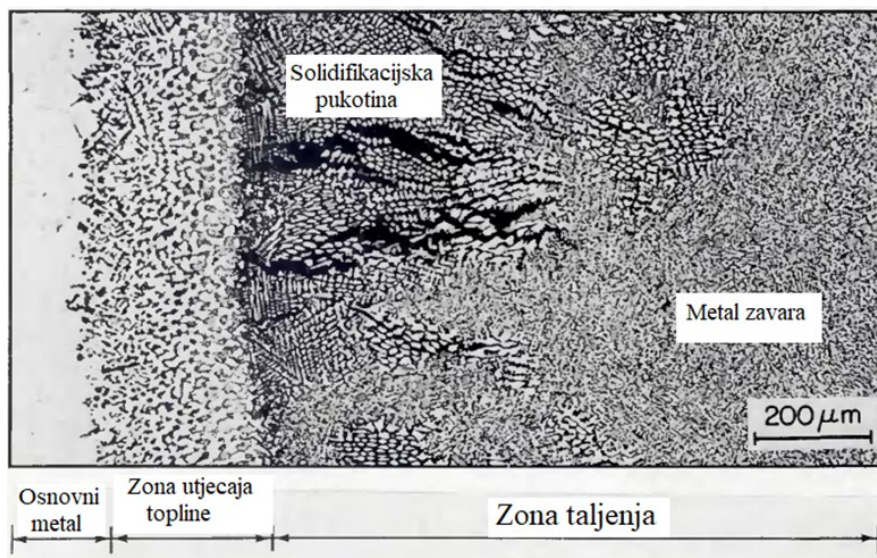
- Tople pukotine
- Interkristalna korozija
- Noževa korozija
- Napetosna korozija

4.2.1. Tople pukotine

Do pojave toplih pukotina dolazi pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno viskom temperaturama koje se mogu kretati od temperature kristalizacije pa do približno 900 °C. Pri čemu se tople pukotine najčešće protežu uzdužno uz liniju samog zavara, a u zoni utjecaja topline većinom poprečnog karaktera. Tople pukotine mogu se načelno podijeliti u dvije skupine, a to su [3]:

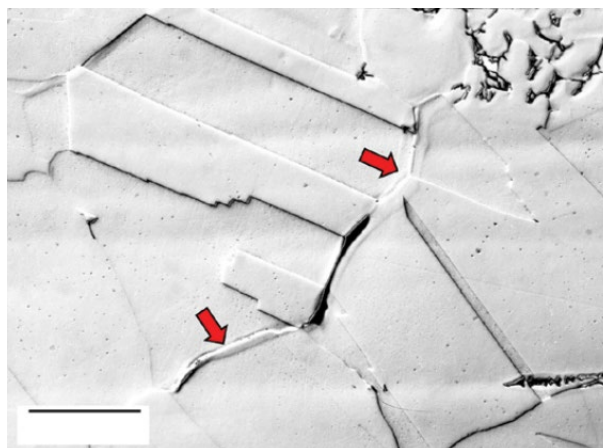
- Kristalizacijske pukotine
- Podsolidusne ili likvacijske pukotine

Slika 15 prikazuje kristalizacijske pukotine koje nastaju pri kristalizaciji u zoni taljenja. Glavni razlog pojave ove vrste toplih pukotina je prisutnost niskotaljivih faza na granicama kristala pri primarnoj kristalizaciji. Stezanjem za vrijeme hlađenja dolazi do pojave mikropukotina na granici kristala u unutrašnjosti prolaza, koje pri daljnjem hlađenju imaju obično tendenciju širenja i izlaska na površinu čime postaju makropukotine. Razmjer širenja pukotine ovisi o stanju naprezanja i svojstvima materijala uz vrh početne pukotine. [3], [16]



Slika 15 Solidifikacijska pukotina u zoni taljenja kod čelika X5 CrNiMo 17-12-2 [17]

Slika 16 prikazuje podsolidusne ili likvacijske pukotine koje nastaju na temperaturama taljenja ispod solidusa osnovnog materijala koji se zavaruje, pa sve do temperature taljenja faza uzrokovanih onečišćenjima. Većinom nastaju tijekom zavarivanja u više prolaza pri čemu u zoni utjecaja topline ili u zoni taljenja dolazi do taljenja niskotaljivih faza izlučenih na granicama kristala. [12], [16]

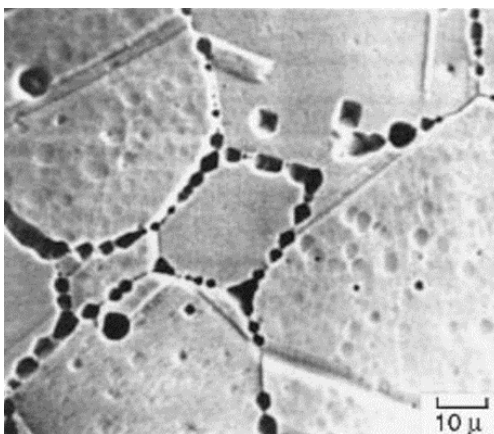


Slika 16 Likvacijska pukotina u zoni utjecaja topline kod čelika X2 CrNi 18-9

Pojava toplih pukotina može se uvelike smanjiti uporabom dodatnog materijala kojim će se postići čista austenitna ili austenitno-feritna struktura što se može postići austenitnim Cr-Ni elektrodama. Uporabom takvog dodatnog materijala postiže se depozit koji sadrži 3 do 12 % δ -ferita, čime se uveliko poveća otpornost na tople pukotine. [12]

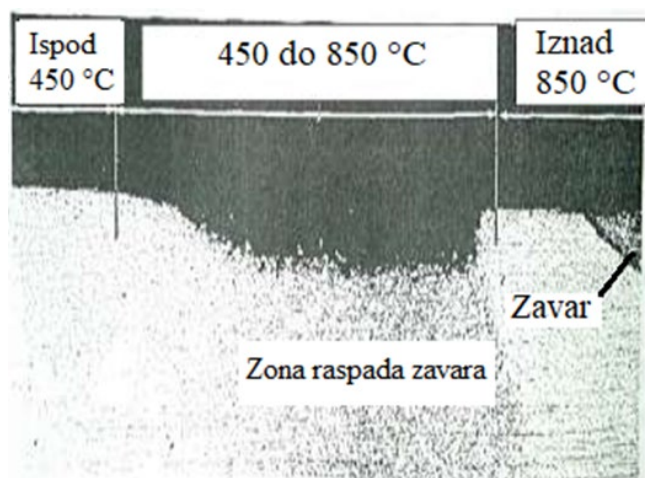
4.2.2. Interkristalna korozija

Jedna od karakterističnih pojava kod austenitnih Cr-Ni čelika je pojava interkristalne korozije (Slika 17) prilikom zavarivanja u zoni utjecaja topline. Do pojave interkristalne korozije na granicama zrna dolazi uslijed prisutnosti agresivnog medija uslijed nedovoljne količine kroma ($<12\%$ Cr) u strukturi. [3]



Slika 17 Interkristalna korozija u zoni utjecaja topline čelika X5 CrNi 18-10 [12]

Ovaj oblik korozije dovodi do pojave poznate pod nazivom raspad zavora (engl. weld decay). Do raspada zavora dolazi uslijed izlučivanja Cr karbida na granicama zrna u rasponu temperatura koje se mogu kretati od 450 do 850 °C (Slika 18), pri čemu se to najčešće događa na temperaturi od 650 °C (Slika 18). Izlučeni Cr karbidi sprečavaju dislokaciju atoma na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što dovodi do smanjenja žilavosti i istežljivost austenitne strukture. [3]



Slika 18 Raspad zavora čelika X5 CrNi 18-10 [18]

Pojavu raspada zavara može se izbjeći na nekoliko načina [3]:

- Legiranjem karbidotvorcima kao što su Nb, Ti, Ta kojima se tvore stabilni karbidi, a uz to ovi elementi imaju veći afinitet prema ugljiku za razliku od kroma pa će se oni prvi vezati za ugljik, a krom ostati jednoliko raspoređen po strukturi
- Smanjenjem sadržaja ugljika u strukturi ($<0,03\%$ C) čime se dobiva jedna podgrupa čelika poznata pod nazivom ELC (engl. extra low carbon) čelici čime je nepovoljno djelovanje ugljika u strukturi uvelike smanjeno
- Toplinskom obradom (gašenjem) čime se postiže rastvaranje karbida tijekom zagrijavanja i držanja te brzim hlađenjem nakon toga, čime se postiže struktura austenita bez izlučenog kroma na granicama zrna vezanog u Cr karbid
- Smanjenjem unosa topline tijekom zavarivanja, što se može postići eliminacijom predgrijavanja te što nižom temperaturom između prolaza

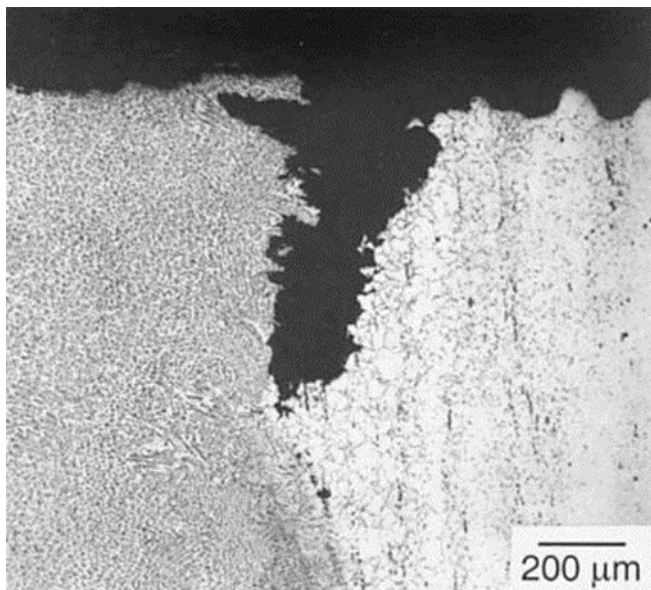
4.2.3. Noževa korozija

Stabilizirani austenitni Cr-Ni čelici kao što su X6 CrNiTi 18-10 i X6 CrNiNb 18-10 nemaju izraženu osjetljivost prema propadanju zavara kao npr. čelik X5 CrNi 18-10, ali zato imaju izraženu osjetljivost na drugačiju vrstu interkristalne korozije. Taj oblik korozije poznat je pod nazivom noževa korozija (engl. knife line corrosion) te se pojavljuje nakon zagrijavanja u području temperatura između 500 i 700 °C. Noževa korozija je isto kao i raspad zavara posljedica nakupljanja Cr karbida na granicama zrna, pri čemu se noževa korozija u odnosu na raspad zavara razlikuje u dva aspekta, a to su [12]:

- Noževa korozija pojavljuje se između zone utjecaja topline i zone taljenja kod zavarivanja u više prolaza
- Ovaj oblik pojavljuje se samo na stabiliziranim Ti i Nb čelicima

Do pojave ovog oblika korozijskog napada dolazi prilikom zavarivanja u više prolaza, a može se pojaviti uz granicu taljenja u zoni utjecaja topline ili uz zonu taljenja. Ova se uska zona tijekom zavarivanja zagrijava na temperaturu iznad 1300 °C, što za posljedicu ima otapanje i raspadanje ugljika koji je bio vezan s Ti i Nb u karbide (TiC i NbC) u krutini. Brzim hlađenjem dolazi, ali u vrlo maloj količini do ponovnog stvaranja karbida (TiC i NbC), a ostatak Ti, Nb i ugljika ostaje otopljen u novonastaloj krutini. [3]

Ponovnim unošenjem topline tijekom zavarivanja dolazi do ponovnog zagrijavanja zone koja je prethodno bila zagrijana na temperaturu iznad 1300 °C, pri čemu se tijekom zagrijavanja na temperaturi koja se kreće u granicama od 500 do 700 °C počinje izlučivati kromom bogati karbid ($M_{23}C_6$). Izlučivanje ovog karbida uzrokuje nastanak interkristalne korozije u obliku uske linije, koja ima oblik oštre linije nastale rezom noža pa se stoga naziva noževa korozija. Primjer noževe korozije na austenitnom stabiliziranom čeliku prikazan je na Slika 19. [3]



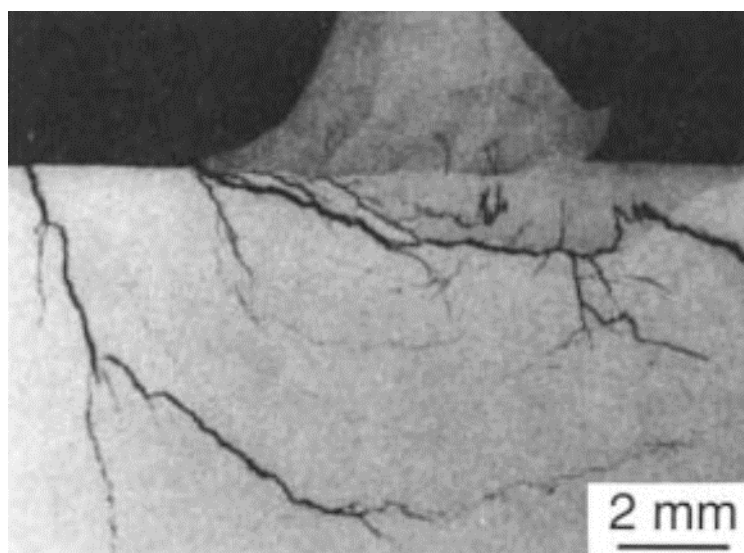
Slika 19 Noževa korozija austenitnog stabiliziranog čelika [12]

Pojavu noževe korozije na austenitnim stabiliziranim čelicima moguće je izbjeći na nekoliko načina [12]:

- Toplinskom obradom nakon zavarivanja (žarenjem) na temperaturama između 1000 i 1100 °C što pospješuje otapanje Cr karbida, budući da TiC i NbC nastaju u ovom temperaturnom rasponu
- Smanjenjem sadržaja ugljika u strukturi ($C < 0,04 \%$)
- Dodavanjem La i Ce austenitnom stabiliziranom čeliku može smanjiti mogućnost nastanka noževe korozije. Njihovim dodavanjem se ubrzava nakupljanje karbida u unutrašnjosti zrna te se time ostvaruje manji broj slobodnih atoma ugljika koji bi se kao karbid mogli nakupljati po granicama zrna.

4.2.4. Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom

Metali koji imaju visoki sadržaj legirnih elemenata imaju samim time i nisku toplinsku vodljivost pa stoga austenitni Cr-Ni čelici imaju uz nisku toplinsku vodljivost i visoki koeficijent toplinskog širenja. Ove dvije karakteristike stvaraju problem tijekom zavarivanja, zbog unošenja velike količine topline u materijal, što pak može dovesti do pojave zaostalih napetosti u materijalu. Kombinacijom zaostalih napetosti koje su nastale tijekom zavarivanja i izloženošću materijala djelovanju agresivne okoline u eksploataciji stvara sve preduvjete za nastanak napetosne korozije. Pukotine koje nastaju uslijed djelovanja napetosne korozije većinom su locirane u zoni utjecaja topline te su transversalne i razgranate što dovodi do njihovog širenja daleko u osnovni materijal. Na Slika 20 vrlo su jasno prikazane pukotine koje mogu nastati u zoni utjecaja topline i u osnovnom materijalu kao posljedica djelovanja napetosne korozije. [12]



Slika 20 Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom na čeliku X2 CrNiMo 17-12-2 [12]

Rješenja koja se nameću za otklanjanje ovog problema su svakako toplinska obrada kao što je popuštanje zaostalih naprezanja, ali pri tome treba uzeti u obzir moguće nakupljanje Cr karbida po granicama zrna, pošto se ovaj tip toplinske obrade odvija u rasponu temperatura od 600 do 750 °C. Bolja metoda za izbjegavanje napetosne korozije svakako je prvo eliminacija Cr karbida zagrijavanjem austenitnih Cr-Ni čelika na temperaturu oko 1000 °C čime se postiže njihovo rastvaranje. Međutim tijekom hlađenja može doći ponovno do nastanka napetosne korozije pa u svrhu sprječavanja toga potrebno je ostvariti sporo hlađenje. [12], [19]

5. ZAŠTITNI PLINOVI U ZAVARIVANJU

5.1. Uloga zaštitnih plinova u zavarivanja

Svi elektrolučni postupci zavarivanja koriste na neki način zaštitne plinove kako bi osigurali zaštitu taline tijekom samog procesa zavarivanja od djelovanja atmosfere i nečistoća. Sama važnost zaštitnih plinova kod zavarivanja može se uočiti i u samim nazivima nekih od najpoznatijih elektrolučnih postupaka zavarivanja. Pa tako sama kratica TIG postupka zavarivanja dolazi od engleskog naziva „Tungsten Inert Gas“, što u prijevodu znači „elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina“. Kod postupaka kao što su MAG i MIG se veličina važnosti zaštitnog plina također može uočiti u samom nazivu postupka. Pa tako MAG predstavlja skraćenicu od engleskog naziva „Metal Active Gas“ što u prijevodu znači „elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina“. MIG predstavlja skraćenicu od engleskog naziva „Metal Inert Gas“ što pak u prijevodu znači „elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina“. Na temelju navedenog možemo zaključiti kolika je zapravo veličina važnosti zaštitnog plina u zaštiti metala zavara tijekom zavarivanja od nečistoća koje se mogu pojaviti u lokalnoj atmosferi.

Zaštita rastaljenog metala zavara mora obavezno obuhvatiti uklanjanje potencijalno reaktivnih plinova iz okolne atmosfere. Stoga zaštita metala zavara mora obavezno uključivati uklanjanje nečistoća iz okolne atmosfere. Važnost toga očituje se u smanjenju pojava pora koje imaju značajan utjecaj na samu kvalitetu zavarenog spoja, pošto one mogu djelovati kao početne točke za širenje pukotina te mogu značajno djelovati kod dinamički opterećenih konstrukcija na smanjenje mogućih ciklusa opterećenja. Sama uloga zaštitnih plinova tijekom zavarivanja poprima i jedan širi spektar namjene osim zaštite od nečistoća. Zaštitni plinovi također imaju i utjecaj na stabilizaciju električnog luka te poboljšavaju prijenos metala. Uz to, zaštitni plinovi također svojom interakcijom s osnovnim i dodatnim materijalom mogu pozitivno utjecati na mehanička svojstva metala zavara i zone utjecaja topline kao što su čvrstoća i žilavost. Uloga zaštitnih plinova se također ističe u korozijskoj postojanosti što zavarenog spoja, što zone utjecaja topline. Zaštitni plinovi uz to imaju i izrazito važnu ulogu u formiranju metala zavara te sama njihov izbor ima značajan utjecaj na profil i dubinu penetracije tijekom zavarivanja. [20]

Sama uloga i utjecaj zaštitnih plinova tijekom zavarivanja se može podijeliti na tri osnovne skupine [21]:

- Električno-fizikalna svojstva električnog luka
- Metalurške procese u talini zavara
- Tehnološke parametre

5.2. Vrste zaštitnih plinova

Zaštitni plinovi u zavarivanju se dijele na dvije vrste, na aktivne i inertne. Razlika između aktivnih i inertnih plinova je u tome što inertni plinovi ne reagiraju s metalom zavara i okolinom, odnosno oni su neutralni tijekom procesa zavarivanja. Aktivni plinovi mogu reagirati s okolinom i s metalom zavara. Najzastupljeniji aktivni plinovi u zavarivanju su vodik, dušik, kisik i ugljični dioksid, a dva najzastupljenija predstavnika inertnih plinova argon i helij [20].

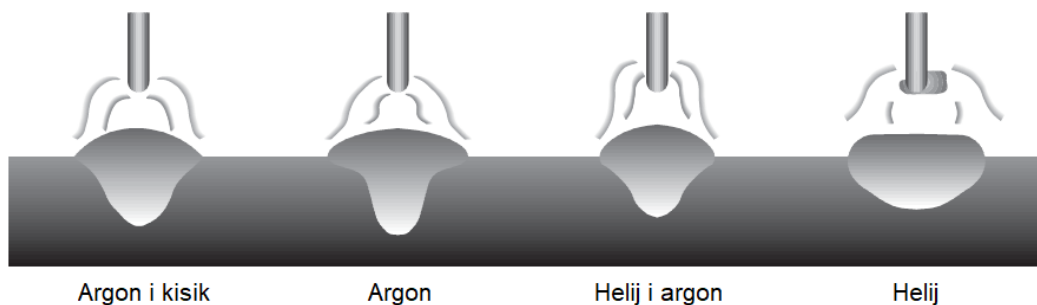
5.2.1. Argon (Ar)

Utjecaj argona kao inertnog plina je izražena kroz njegovu nisku toplinsku vodljivost koja za posljedicu ima stvaranje uskog električnog luka tijekom zavarivanja (Slika 21). Uz nisku toplinsku vodljivost, argon se odlikuje s izvrsnom električnom vodljivošću koja omogućuje veće varijacije u duljini električnog luka uz održavanje njegove stabilnosti što posebno dolazi do izražaja kod ručnih postupaka zavarivanja. Primjena argona kod izmjenične struje zavarivanja omogućuje odličan efekt čišćenja uz odličnu stabilnost luka što naposljetku daje kvalitetan zavar lijepog izgleda. Argon se često koristi kao mješavina s drugim inertnim i aktivnim plinovima kao što su helij, dušik, vodik i kisik. [20], [22]

5.2.2. Helij (He)

Poput argona, helij je također inertan plin koji se odlikuje visokom toplinskom vodljivošću te ima visoki ionizacijski potencijal. U odnosu na argon, zahtjeva veći napon električnog luka za istu visinu struje i istu duljinu električnog luka. Time se postiže veća temperatura u samom luku i dobiva se širi luk što poboljšava dubinu prodiranja i širinu zavara (Slika 21). Uporaba helija kao zaštitnog plina općenito je istaknuta na višim vrijednostima struje zavarivanja koje se koriste kod zavarivanja debljih materijala. Posebno je naglašena primjena kod materijala koji imaju visoku toplinsku vodljivost i relativno visoke temperature taljenja. [20], [22]

Primjena helija u Europi nije toliko izrađena kao argona zato što je kod korištenja helija potreban veći protok plina, a sama cijena helija je veća od argona. [20], [22]



Slika 21 Izgled profila zavora i oblik električnog luka s različitim zaštitnim plinovima [22]

5.2.3. Vodik (H_2)

Vodik kao plin je najlakši poznati element te je izrazito zapaljiv u određenim kombinacijama. Različite eksplozivne smjese mogu nastati kada dođe do miješanja vodika s kisikom, zrakom ili drugim oksidantima. Vodik je aktivan plin te se prvenstveno koristi u malim količinama za različite plinske mješavine za plazma rezanje, a u zavarivanju se koristi prvenstveno zbog svoje visoke toplinske vodljivosti. Prvenstveno se koristi kod zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika iz serije 300. [22]

5.2.4. Dušik (N_2)

Dušik kao plin je najzastupljeniji plin u Zemljinoj atmosferi s udjelom od 78 %. Dušik je u principu inertan plin ali na temperaturama koje nastaju u električnom luku on postaje reaktivan te može reagirati s određenim metalima kao što su prije svega aluminij, magnezij i titan. Dušik se ne koristi kao primarni plin u plinskim mješavinama ali se zato obično koristi kao pomoćni plin kod laserskog rezanja. Sama primjena dušika je izražena u zavarivanju s raznim smjesama plinova. Primjena dušika kao primarnog plina prvenstveno je izražena kod plinova za korijensku zaštitu niskolegiranih i visokolegiranih čelika. [22]

5.2.5. Kisik (O_2)

Kisik je drugi najzastupljeniji plin u Zemljinoj atmosferi te spada u aktivne plinove. Može se spajati s gotovo svim vrstama elemenata osim nekih rijetkih elemenata i inertnih plinova. Jedna od glavnih karakteristika kisika je njegovo svojstvo da izrazito podržava izgaranje te je zbog toga idealan plin ako se želi postići povećanje temperature plamena i električnog luka. Kisik se uglavnom koristi kao pomoćni plin u smjesi s argonom kako bi se postigla veća stabilnost električnog luka te poboljšalo vlaženje i postigao povoljniji oblik zrna pri zavarivanju Cr-Ni čelika. Također, kisik pridonosi povećanju brzine zavarivanja. [22]

5.2.6. Ugljični dioksid (CO_2)

Ugljični dioksid je treći najzastupljeniji plin u Zemljinoj atmosferi te spada u aktivne plinove. Za razliku od drugih aktivnih plinova, ugljični dioksid ne podržava izgaranje. Prvenstveno se koristi kao zaštitni plin kod MAG postupka zavarivanja bilo kao primarni ili kao sekundarni plin. Uglavnom se koristi u plinskoj mješavini s argonom, čime se poboljšava produktivnost i dubina penetracije kod MAG postupak zavarivanja. [22]

5.3. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja

Kako je već navedeno, sam naziv ovog postupka sadrži u sebi vrstu plina koji se koristi kao zaštita tijekom zavarivanja, a to je inertni plin. Plinovi kao što su vodik, helij i argon te njihove različite mješavine su najviše zastupljeni plinovi koji se koriste tijekom procesa zavarivanja kao zaštitni plinovi. Ta zaštita se može očitovati u zaštiti samog metala zavara ili za zaštitu korijena zavarenog spoja.

U Tablica 4 prikazani su standardni zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG postupka zavarivanja za zaštitu električnog luka i metala zavara za različite vrste materijala.

Tablica 4 Standardni zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja [23]

Komercijalna oznaka zaštitnog plina	Oznaka prema HRN EN ISO 14175:2008	Sastav [%]	Primjena
Argon 4.6	I1	Ar 100 %	Visoko legirani i nelegirani čelici, alumijski materijali, ostali ne željezni metali
Argon 4.8	I1	Ar 100 %	
Inoxline H2	R1	Ar 98 % H ₂ 2 %	Visokolegirani čelici, austenitni čelici
Inoxline H5	R1	Ar 95 % H ₂ 5 %	
Inoxline H7	R1	Ar 92,5 % H ₂ 7,5 %	
Inoxline He3 H	R1	Ar 95,5 % He 3 % H ₂ 1,5 %	
Inoxline N2	N2	Ar 97,5 % N ₂ 2,5 %	Duplex i superduplex čelici
Inoxline N1	N2	Ar 98,75 % N ₂ 2,5 %	
Aluline He30	I3	Ar 70 % He 30 %	Aluminij, bakar, nikal, čelici (orbitalno zavarivanje), TIG zavarivanje istosmjernom strujom
Aluline He50	I3	Ar 50 % He 50 %	
Aluline He70	I3	Ar 30 % He 70 %	
Argon He90	I3	Ar 10 % He 90 %	

5.4. Kriteriji za izbor zaštitnog plina

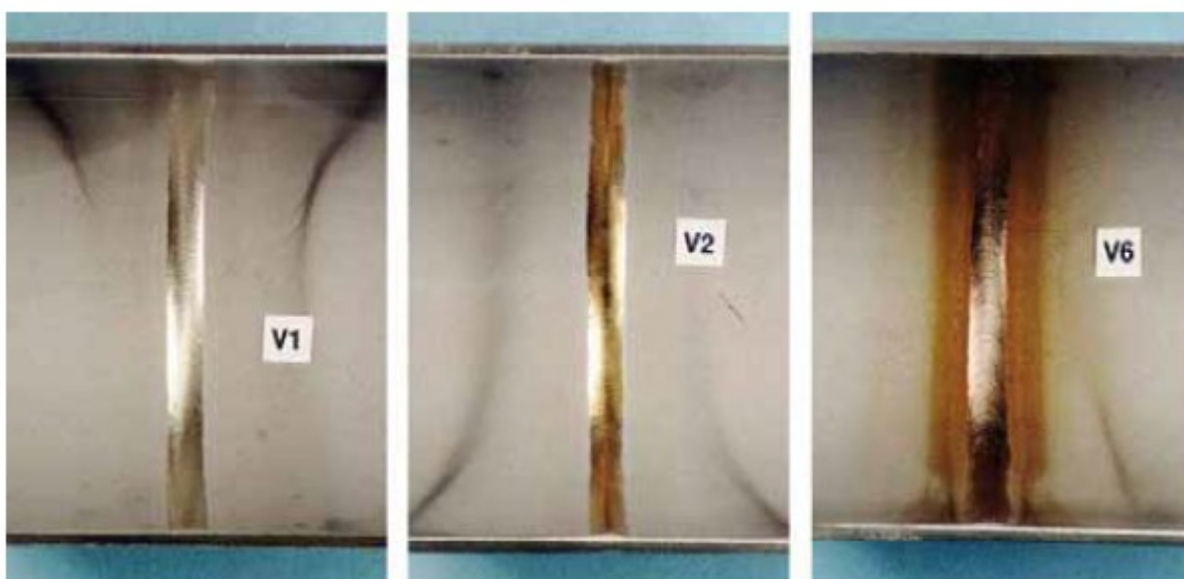
Osiguranje odgovarajuće korozijske postojanosti cijelog zavarenog spoja, zahtjeva cijelo ukupnu zaštitu cijelog područja unosa topline tijekom zavarivanja. Samim time, potrebno je osigurati zaštitu korijena zavora, površine zavora i zone utjecaja topline gdje se može pojaviti oksidacija površinskih i podpovršinskih slojeva. Ta zaštita mora se osigurati za vrijeme cijelog procesa zavarivanja što uključuje period od trenutka uspostave električnog luka, do trenutka kada osnovni materijal i materijal zavora ne dođu na određenu temperaturu. Temperaturne granice se taku kreću oko 250 °C za visokolegirane Cr-Ni čelike, oko 200 °C za materijale kao što su titan, cirkonij i slični. Također, potrebno je voditi računa o određenim kriterijima prilikom izbora zaštitnog plina. Samim time, kriteriji o kojima treba voditi računa prilikom izbora zaštitnog plina i plina za korijensku zaštitu su [24]:

- Kompatibilnost s osnovnim materijalom
- Relativna gustoća plina
- Ekonomski aspekt

Kompatibilnost s osnovnim materijalom nam je važna zbog toga što interakcija između zaštitnog plina i plina za korijensku zaštitu može nastati ne samo u području metala zavora i korijena zavora, nego i na relativno hladom dijelu osnovnog metala. Samim time, nije svaki zaštitni plin prikladan na svakom metalu. Iz toga proizlaze različita ograničenja okvira izbora zaštitnog plina prema metalu koji se zavaruje. Zaštitni plinovi koji sadrže npr. vodik u svom sastavu, nisu prikladni kod zavarivanja titana koji je sklon upijanju plina te upijanjem vodika može prouzročiti njegovu krhkost ili nastanak poroznosti u zavarenom spoju. Zaštitni plinovi koji sadrže vodik također mogu prouzročiti štetne posljedice kod njihove uporabe tijekom zavarivanja finoizrnatih konstrukcijskih čelika čija granica tečenja prelazi 420 N/mm². Njihovom uporabom na finoiznatim konstrukcijskim čelicima dolazi do pojave krhkosti strukture uslijed apsorbiranja vodika u mikrostrukturu. Međutim, primjena zaštitnih plinova za korijensku zaštitu koji sadrže vodik do maksimalno 5 % može biti primijenjena kod zavarivanja austenitnih ili duplex čelika ali uz određene uvijete. Vrlo je važno da vodik koji se nalazi u zaštitnom plinu ne dospije u područje električnog luka. Također, vrijedi napomenuti da tijekom zavarivanja titan stabiliziranih austenitnih čelika kao što su npr. X2 CrNiMoTi 17-12-2 treba voditi računa da zaštitni plin ne sadrži dušik koji može prouzročiti pojavu žutih mrlja na korijenu zavora.

Do pojave žutih mrlja dolazi uslijed spajanja titana iz osnovnog materijala i dušika iz zaštitnog plina u titanijev nitrid koji je izrazito tvrdi površinski sloj koji se taloži u korijenu zavora. Može se razlikovati u odnosu na pobojenja koja nastaju na površini uslijed osiromašenja površine kromom po tome što žute mrlje nastaju isključivo na metalu zavora, a ne na osnovnom metalu.

Slika 22 prikazuje utjecaj različitih plinova za korijensku zaštitu na samu površinu metala zavora i osnovnog metala tijekom zavarivanja titan stabiliziranog čelika. Pod V1 je prikazan izgled korijena uslijed primjena čistog argona kao plina za korijensku zaštitu te se jasno može vidjeti površina bez ikakvih pobojenja ili drugih štetnih produkata. Naredna slika (V2) prikazuje izgled korijena zavora ako se koristi čisti dušik kao plin za korijensku zaštitu. Na Slici se jasno može vidjeti pojava žutih mrlja na korijenu zavora koje ne nastaju i na osnovnom materijalu u zoni utjecaja topline. Posljednja slika prikazuje nastanak pobojenja oko korijena zavora ako se koristi argon kao plin za korijensku zaštitu uz prisutnost kisika od 100 ppm O_2 . Samim time, Slika 22 prikazuje jasnu razliku između pojave žutih mrlja kao posljedice interakcije dušika i titana te pojavu pobojenja kao posljedice interakcije kisika i kroma.



Slika 22 Primjena različitih plinova za korijensku zaštitu uslijed zavarivanja titan stabiliziranih Cr-Ni čelika [24]

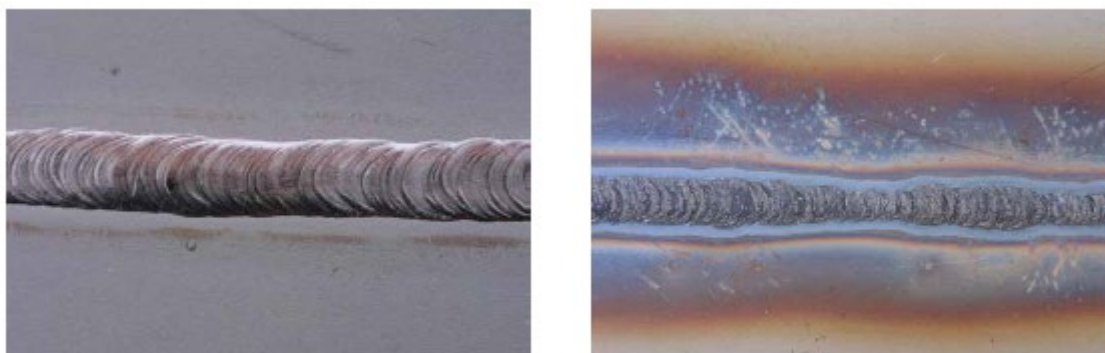
6. UTJECAJ UDJELA KISIKA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA KOD AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA

6.1. Općenito o korijenskoj zaštiti

Postizanje što bolje kvalitete zavora tijekom zavarivanja sastoji se od mnogo različitih parametara kao što su sami parametri zavarivanja, zaštitni plin, položaj zavarivanja, razina uvježbanosti zavarivača ili operatera na stroju za zavarivanje. Naravno, svi ovi parametri su međusobno povezani i zajedno pridonose što boljoj kvaliteti zavora. Jedan od koraka koji vodi osiguranju bolje kvalitete korijena zavora, a time i samog zavora je tzv. „pročišćavanje cijevi“. Ovaj postupak ima za cilj umanjiti sadržaj atmosferskog zraka u cijevi tako da se ona ispunjava inertnim zaštitnim plinom. Ispunjenje cijevi ili zaštitne komore s inertnim plinom se stvara povoljno okruženje za početak zavarivanja. Međutim, tijekom samog procesa zavarivanja potrebno je pratiti sadržaj inertnog plina u cijevi pošto može doći do porasta razine atmosferskog zraka, a time i kisika što može imati štetan učinak na kvalitetu zavora.

Međutim, pravilnim odabirom zaštitnog plina može se osigurati uklanjanje nečistoća i zraka iz atmosfere u području zone fuzije tijekom korijenskog prolaza. Time se u velikoj mjeri sprječava njihov eventualni štetni učinak na mehanička i korozijska svojstva zavora te na estetski izgled korijena zavora. Kako bi se osigurala kvalitetna zaštita, atmosfera oko korijena zavora mora biti inertna i na atmosferskom talku. Zaštita korijena se u većini slučajeva koristi kod zavarivanja cijevi, ali se također može koristiti kod zavarivanja sučeonih spojeva.

Slika 23 prikazuje razliku koja nastaje kod zavarivanja Cr-Ni čelika ako se koristi korijenska zaštita (slika lijevo) i ako se ona ne koristi (slika desno).



Slika 23 Razlika u zavarivanju s korijenskom zaštitom i bez nje [24]

6.2. Plinovi za korijensku zaštitu

Zaštitni plinovi koji se koriste u sklopu korijenske zaštite, definirani su zajedno s zaštitnim plinovima prema normi HRN EN ISO 14175:2008. Ova norma je na snazi od 2008. godine kada je zamijenila prethodni europski standard EN 439. Plinovi koji se obično koriste u sklopu korijenske zaštite zavariva se označavaju kraticama „I“, „R“, „N“ te kao takvi imaju zajednički naziv formirajući plinovi, odnosno, plinovi za pročišćavanje cijevi. Samo označavanje ovih vrsta plinova treba imati na umu kako ne bi došlo do zabune te bi se oni kao takvi zamijenili s plinovima čije je primarna zaštita električnog luka. Samim time, plinovi za korijensku zaštitu koji se najčešće koriste su prikazani u Tablica 5.

Tablica 5 Standardni zaštitni plinovi za korijensku zaštitu [23]

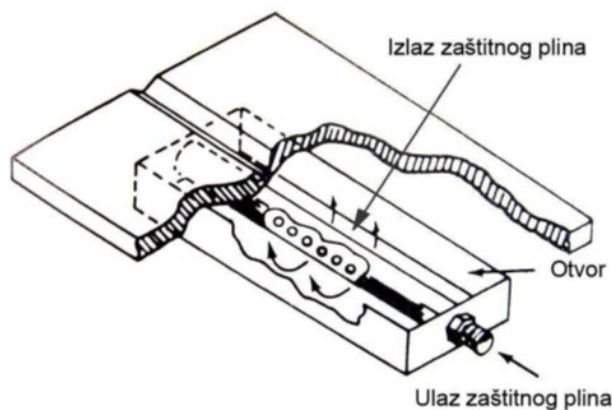
Komercijalna oznaka zaštitnog plina	Oznaka prema HRN EN ISO 14175:2008	Sastav [%]	Primjena
Argon 4.6	I1	Ar 100 %	Austenitni Cr-Ni čelici, feritni Cr čelici, duplex čelici, čelici povišene i visoke čvrstoće, aluminij i njegove legure
Argon 4.8	I1	Ar 100 %	
Forming gas H5	N5	N ₂ 95 % He ₂ 5 %	Niskolegirani i visokolegirani čelici
Forming gas H8	N5	N ₂ 92 % He ₂ 8 %	
Forming gas H12	N5	N ₂ 88 % He ₂ 12 %	
Forming gas H15	N5	N ₂ 85 % He ₂ 15 %	
Inoxline H2	R1	Ar 98 % He 2 %	Austenitni Cr-Ni čelici, nikal i njegove legure
Inoxline H5	R1	Ar 95 % He 5 %	

Na temelju podataka prikazanih u Tablica 5 može se vidjeti da su plinovi za korijensku zaštitu prvenstveno podijeljeni prema svom sastavu i čistoći. Sukladno tome, prethodno spomenuta oznaka „I“, odnosi se za plinove koji se sastoje od čistog argona, pri čemu on može biti u dvije klase čistoće, a to su 4.6 i 4.8. Oznaka „N“ se odnosi na plinove koji predstavljaju određenu plinsku mješavinu s helijem, pri čemu se sadržaj helija može kretati od 5 do 15 %. Vrijedi napomenuti da je dušik kao plin, izrazito gama-geni element te kao takav doprinosi stvaranju austenitne mikrostrukture. Treća oznaka „R“ se odnosi na plinsku mješavinu argona i helija, pri čemu se sadržaj helija u plinskoj mješavini može kretati od 2 do 5%. Samim time, može se zaključiti da se u sklopu korijenske zaštite, koriste isključivo inertni plinovi.

6.3. Naprave za korijensku zaštitu

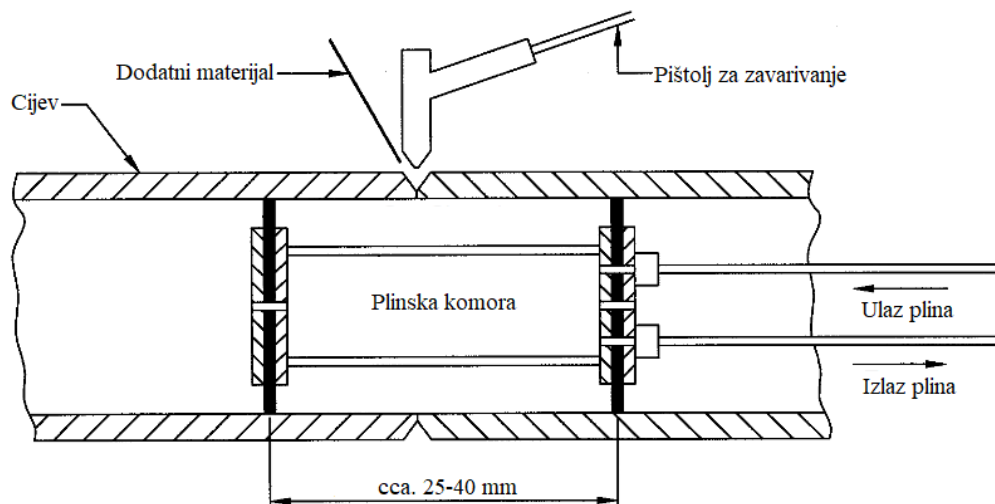
Međutim, da bi se osigurala zaštitna atmosfera, potrebna je i primjena odgovarajućih naprava koje će omogućiti da se zaštitni plin zadrži na mjestu zavarivanja te da se spriječi ulazak plinova iz lokalne atmosfere.

Zaštita korijena kod sučeonog zavarivanja postiže se primjenom kućišta koje ima s jedne strane otvor koji dolazi sa strane korijena žljeba (Slika 24). Pričvršćivanjem kućišta na radni komad, ono se ispunjava zaštitnim plinom koji zatim izlazi prema korijenu žljeba. Osiguranjem zaštitne atmosfere u kućištu, moguće je započeti postupak zavarivanja bez opasnosti da dođe do eventualnog onečišćenja. Tijekom samog procesa zavarivanja vrlo je važno pratiti tlak u kućištu pošto se samim zavarivanjem zatvara žljeb te se time i smanjuje izlazak zaštitnog plina iz kućišta. Samim time, prilikom zavarivanja zadnjih nekoliko centimetara može doći do izbacivanja taline prema gornjoj strani žljeba kao posljedica velikog tlaka plina u kućištu. [25]



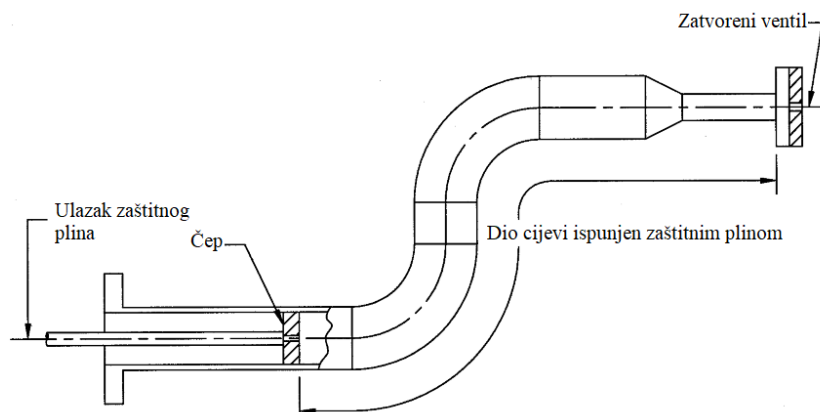
Slika 24 Oprema za zaštitu korijena zavares kod sučeonog zavarivanja [25]

Tijekom zavarivanja cijevi postoje različita rješenja kojima se može osigurati zaštita korijena. Na Slika 25 prikazana je naprava koja se postavlja u cijev prije zavarivanja te zabrtvi cijev s jedne i s druge strane korijena. Nakon toga se u taj zatvoreni prostor upuhuje zaštitni plin koji stvara zaštitnu atmosferu te zaštitni plin izlazi prema korijenu žljeba. Tijekom samog procesa zavarivanja također je potrebno obratiti pozornost na tlak unutar zabrtvenog prostora cijevi. [25]



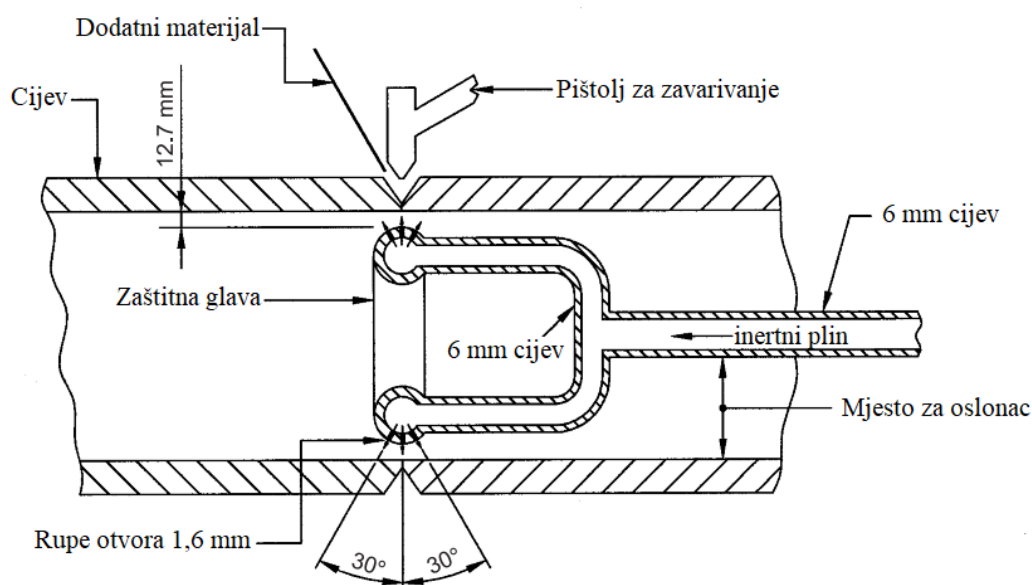
Slika 25 Oprema za zaštitu korijena zvara kod zavarivanja cijevi [25]

Tijekom različitih reparaturnih zavarivanja cijevi, često postoji nemogućnost korištenja naprave prikazane na Slika 25 zbog same nemogućnosti njenog postavljanja u cijev. U tom slučaju, postoji više različitih načina na koje se može postići zaštita korijena zvara tijekom zavarivanja, a jedan od takvih je prikazan na Slika 26. Tijekom zavarivanja cijevi manjih promjera, a veće duljine, česta je primjena uklonjivog čepa koji se postavlja s jedne ili obje strane cijevi i kroz koji prolazi zaštitni plin kojim se ispunjava cijev. Druga strana cijevi se eventualno može zatvori jednostavnim zatvaranjem uz pomoć ventila, ako je to moguće te se taj prostor ispuni zaštitnim plinom. Naravno, ova metoda se vrlo rijetko koristi te je njena primjena izražena samo u specijalnim situacijama gdje ne postoji mogućnost korištenja ostale opreme za korijensku zaštitu. [25]



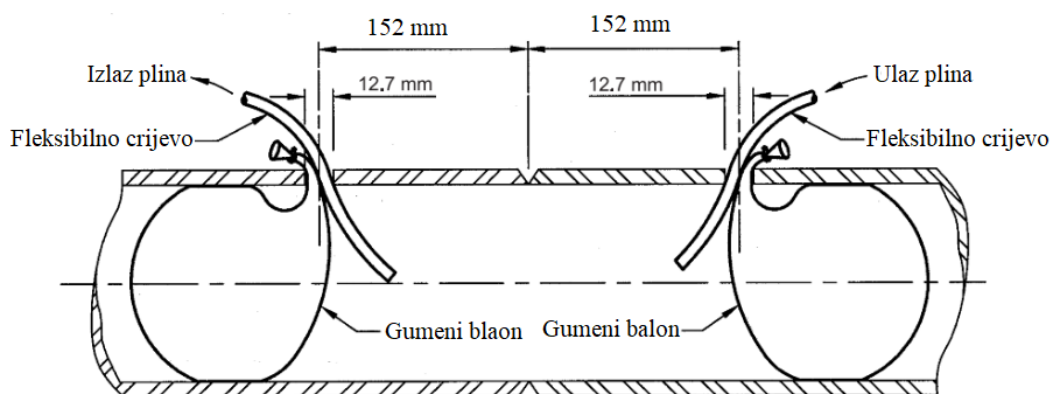
Slika 26 Primjena čepa za korijensku zaštitu [25]

Korijenska zaštita cijevi velikog promjera, često se postiže uporabom prstenastog razdjelnika koji je prikazana na Slika 27. Prstenasti razdjelnik se postavlja u cijev tako da se zaštitna glava dovede na mjesto žljeba te se puštanjem inertnog plina stvara lokalna zaštitna atmosfera. Važno je napomenuti da se kod ove metode ne ispunjava čitava cijev sa zaštitnom plinom, nego se kontinuiranim dovodom plina stvara lokalna atmosfera u korijenu žljeba. [25]



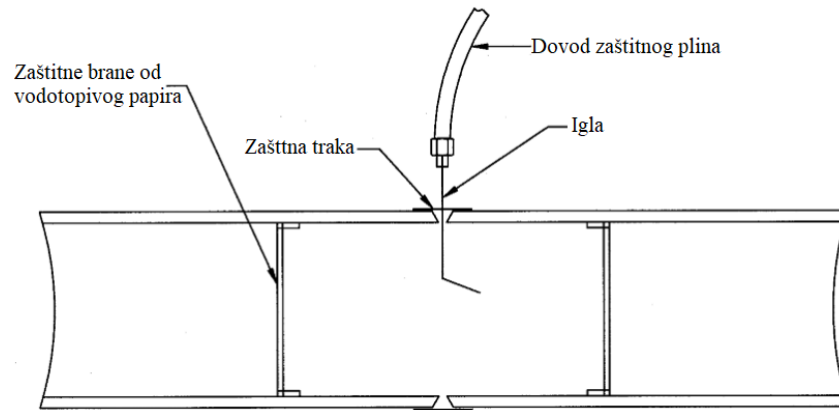
Slika 27 Primjena prstenastog razdjelnika u korijenskoj zaštiti [25]

Jedna od metoda koja se može vrlo jednostavno primijeniti na terenu u sklopu korijenske zaštite zavora je primjena zaštitnih balona (Slika 28). Ova metoda je bazirana na bušenju dviju rupa na cijevi sa svake strane zavora, kroz koje se zatim umeću zaštitni baloni i fleksibilna crijeva za dovod i odvod plina. Umetnuti baloni se zatim ispunjavaju plinom, čime se stvara zatvoren prostor koji se zatim može ispuniti zaštitnim plinom. Zaštitni plin se dovodi kroz fleksibilno crijevo čime se stvara zaštitna atmosfera u korijenu zavora. Jedno fleksibilno crijevo služi za dovod zaštitnog plina, a drugo ima ulogu ventilacijskog otvora uz pomoć kojeg se sprječava prekomjerno povećanje tlaka u zatvorenom prostoru. Nakon provedenog zavarivanja, baloni i crijeva se uklanjaju iz cijevi, a izbušene rupe se zatvaraju posebnim čepovima. Vrijedi napomenuti da je ova metoda prikladna za cijevi manjeg promjera i manjih radnih talkova. [25]



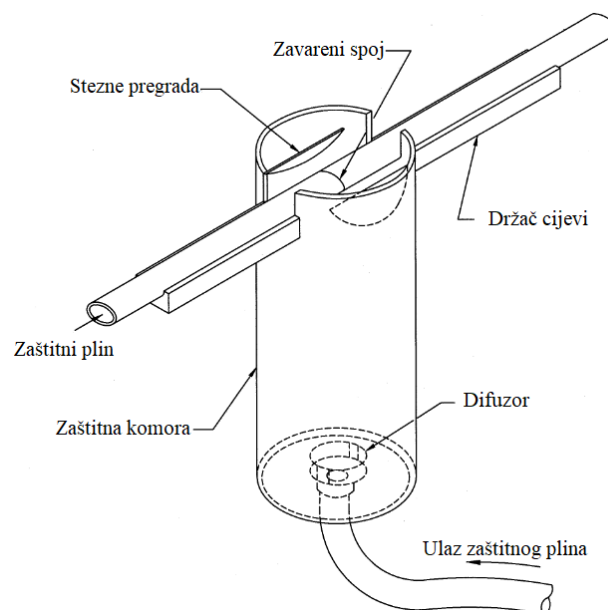
Slika 28 Primjena zaštitnih balona za korijensku zaštitu [25]

Tijekom zavarivanja vodovodnih cijevi, česta je primjena zaštitnih brana od vodotopivog papira u sklopu korijenske zaštite zavora (Slika 29). Ova metoda se zasniva na uporabi zaštitnih brana od vodotopivog papira uz pomoć kojih se stvara zatvoren prostor u korijenu zavora. Zaštitni plin se dovodi kroz iglu koja pak prolazi kroz zaštitnu traku koja se stavlja na lice žljeba zavora. Tijekom zavarivanja korijenskog prolaza, zaštitna traka se kontinuirano uklanja sve dok se ne postigne kontinuirani korijenski prolaz po cijelom obodu cijevi. Nakon provedenog zavarivanja, kroz cijev se može pustiti voda koja svojim djelovanjem rastopi i rastvori zaštitne brane. Jedan od većih problema ove metode korijenske zaštite je loše brtvljenje zaštitnih brana te je također potrebno obratiti pozornost da se ne postigne pre veliki tlak zaštitnog plina u cijevi koji može oštetiti zaštitne brane te time narušiti čistoći zaštitne atmosfere. [25]



Slika 29 Primjena zaštitnih brana od vodotopivog papira [25]

Slika 30 prikazuje šablonu za zavarivanje cijevi manjih duljina i manjih promjera. Specifičnost ove šablone je u tome što osim stezanja cijevi, omogućuje svojim dizajnom i odgovarajuću korijensku i površinsku zaštitu zavora. [25]



Slika 30 Šablona za zavarivanje malih cijevi [25]

6.4. Mjerenje kisika tijekom zavarivanja

Praćenje razine kisika tijekom zavarivanja provodi se posebnim uređajem koji se naziva oksimetar. Pri čemu je sama uloga ovog uređaja da precizno mjeri sadržaj kisika u atmosferi inertnog plina. Samo mjerenje se provodi tako da se cjevčica uređaja postavi u cijev ili komoru koja je ispunjena inertnim plinom te se u intervalima od 10 do 20 s crpi uzorak plina iz zaštitne atmosfere. To se postiže pomoću pumpe koje može biti automatska te se nalazi unutar uređaja te time omogućuje zavarivaču da nesmetano prati sadržaj kisika. Međutim, pumpa može biti izvedena da se crpljenje plina provodi ručno (Slika 31). Unutar uređaja se nalazi senzor kisika čije se očitavanje zatim prikazuje na LCD monitoru.



Slika 31 Mjerenje razine kisika u cijevi sa PurgEye 100 [26]

Slika 32 prikazuje razine kisika u cijevi tijekom zavarivanja Cr-Ni čelika s orbitalnim TIG postupkom zavarivanja. Sam postupak mjerenja se provodi kontinuirano kako bi se razina kisika držala u propisanim granicama i time izbjegla pojava oksidacije, nepravilnog formiranja zrna zavora, loš oblik zavora pa čak može doći i do pojave korozije u jako kratkom vremenu nakon provedenog zavarivanja



Slika 32 Mjerenje razine kisika u cijevi tijekom orbitalnog TIG zavarivanja [27]

Sama kvaliteta mjerenja uvelike ovisi o kvaliteti senzora za kisik koji je ugrađen u uređaj. Pri čemu ti senzori mogu biti izvedeni kao elektrokemijska ćelija ili cirkonijev senzor. Prilikom uporabe senzora izvedenog kao elektrokemijska ćelija, plin reagira s radnom elektrodom i time stvara elektrokemijsku reakciju. Time dolazi do nastanka struje koja je proporcionalna razini kisika. Primjenom ovog senzora može se postići razlučivost očitavanja od 0,01 % ili 100 ppm.

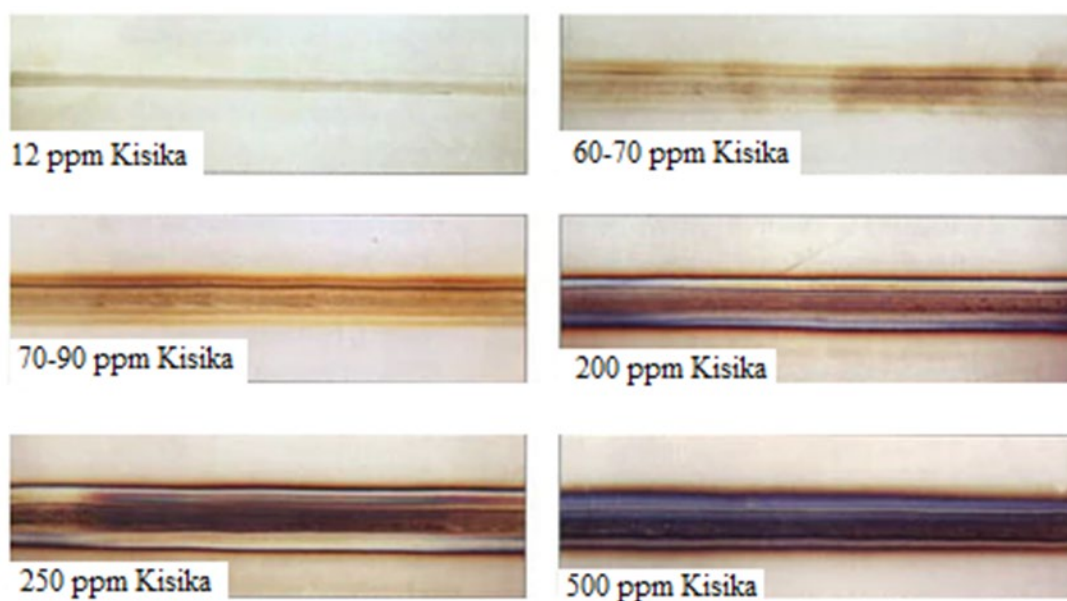
Za razliku od elektrokemijskih ćelija, uporabom cirkonija omogućuje se gibanje ionima kisika. Tijekom toga dolazi do stvaranja elektrokemijskog napona koji varira u svojoj vrijednosti ovisno o koncentraciji kisika kojoj je cirkonij izložen. Uporabom ovog senzora može se postići bolja razlučivost očitavanja koja može biti čak i do 0,0001 % ili 1 ppm.

6.5. Dozvoljena razina kisika tijekom zavarivanja

Zaštitni plinovi u zavarivanju se klasificiraju prema njihovoj čistoći, a to se prikazuje dvoznamenkastom oznakom. Primjeri toga mogu biti argon 4.6, argon 4.8, argon 5.0 itd. Prva znamenka u oznaci predstavlja broj devetica od koji se čistoća plina sastoji, a druga oznaka predstavlja prvi broj koji slijedi nakon broja devetica određenog prvom oznakom. Samim time, primjer takvog označavanja je komercijalna oznaka argon 4.8 što znači, ako koristimo 100 % inertnog plina u cijevi, plin će se sastojati od 99,998 % argona te će okolni zrak činiti 0,002 % što odgovara vrijednosti 20 ppm. [19]

Međutim, dozvoljena razina kisika u zaštitnom plinu za korijensku zaštitu može varirati ovisno o zahtjevima za kvalitetu zavora. Prema najstrožim zahtjevima za kvalitetom, sadržaj kisika u plinu ne smije prelaziti 20 ppm. Naravno, u većini slučajeva gornja granica se kreće do 100 ppm pa u nekim slučajevima i do 200 ppm. Razine kisika kod kojih dolazi do poroznosti se kreću u rasponu od 500 do 800 ppm što predstavlja da je sadržaj kisika u plinu može kretati u rasponu od 0,5 do 0,8 % što znači da zaštitni plin nije više inertan. [19]

Na Sliku 33 prikazani su različiti primjeri pojave oksida na površini ovisno o sadržaju kisika u plinu tijekom zavarivanja. Samim time, može se vidjeti i povezanost povećane koncentracije kisika s tamnijom bojom nastalog oksida na površini. Tamnija nijansa pobojenja daje i značajno slabiju korozijsku postojanost.



Slika 33 Utjecaj koncentracija kisika u plinu na pojavu pobojenja [28]

7. UTJECAJ KISIKA NA SVOJSTVA ZAVARA KOD AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA

7.1. Nastanak pobojenja na austenitnim Cr-Ni čelicima

Pojava pobojenja ili engl. heat tint, povezana je s toplinskom vodljivošću, gustoćom i specifičnom toplotom metala koji se zavaruje. Ova tri parametra zajedno definiraju toplinsku difuzivnost koja predstavlja brzinu promjene temperature tijela ili tijekom širenja topline [29]. Metali koji se odlikuju dobrom i visokom toplinskom difuzivnošću imaju sposobnost bržeg hlađenja, a samim time, zona utjecaja topline tijekom zavarivanja se smanjuje. Međutim, materijali koji imaju nižu vrijednost toplinske difuzivnosti se samim time i puno sporije hlade što uzrokuje povećanje zone utjecaja topline. Samojoj pojavi pobojenja mogu doprinijeti četiri različita faktora [16]:

- Sadržaj kroma u čeliku
- Razina kisika
- Hrapavost površine
- Premazi, hrđa i nečistoće na površini

Ova četiri faktora također utječu na samu intenzivnost i nijansu boje koje će se pojaviti. Sukladno tome, povećanjem sadržaja kroma u metalu raste otpornost metala na oksidaciju pa će samim time boje uslijed pobojenja biti manje intenzivne ili će sama njihova pojava biti spriječena. Prisutnost kisika u lokalnoj atmosferi je sam uzrok pojave pobojenja te se primjenom odgovarajućih zaštitnih plinova može smanjiti pojava pobojenja. Veća hrapavost površine omogućuje i veću oksidaciju površine što će za urok imati i pojavu tamnijih boja tijekom pobojenja metala. Tvari kao što su premazi, hrđa i različite vrste nečistoća koje se mogu pojaviti na površini metala i mogu uzrokovati promjenu boje, ali zato ne utječu na proširenje zone utjecaja topline. [12]

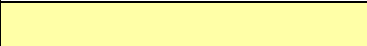
7.2. Utjecaj pobojenja na korozijsku postojanost

Austenitni Cr-Ni čelici predstavljaju skupinu materijala s vrlo dobrom korozijskom postojanošću koji su ovisno o svom kemijskom sastavu postojani u gotovo svim uvjetima agresivne okoline. Sama njihova korozijska postojanost leži u tankom oksidnom sloju koji nastaje na površini i daje joj pasivnost. Taj oksidni sloj je nepropustan, nevidljiv golim okom, debljine svega par nanometara te se uglavnom sastoji od krom-oksida. Sam sadržaj kisika u atmosferi je dovoljan za stvaranje i održavanje ovog zaštitnog sloja.

Tijekom procesa zavarivanja dolazi do oksidacije te se samim time povećava debljina oksidnog sloja na površini. Uslijed zagrijavanja kojeg uzrokuje toplina električnog luka može doći do zadebljanja oksidnog sloja i do sto puta. Veličina zadebljana oksidnog sloja u zoni utjecaja topline prvenstveno ovisi o temperaturi, vremenu trajanja zagrijavanja i koncentraciji kisika u zaštitnom plinu, pri čemu se sam proces oksidacije odvija na temperaturama koje se kreću iznad 300 °C. Oksidni sloj u pasivnom stanju ima metalni sjaj te se njegova debljina kreće oko 20 nm. Međutim, pri zadebljanju dolazi do promjene boje pa tako one mogu varirati od svijetložute, smeđe pa sve do tamnoplave. Svakako treba napomenuti da boje koje nastaju uslijed pobojenja su vrlo slične bojama koje nastaju tijekom toplinske obrade.

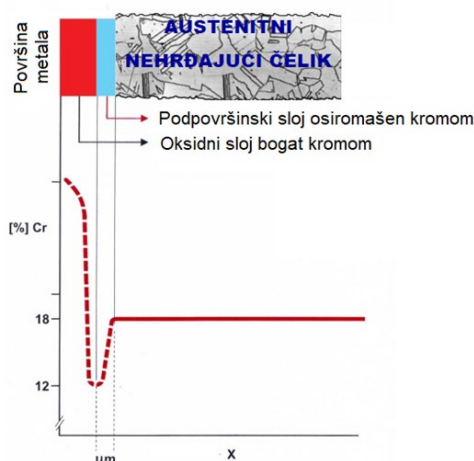
U Tablica 6 prikazane su različite toplinske nijanse boja koje se mogu pojaviti na čeliku X5 CrNi 18-10 uslijed pobojenja njegove površine. Prije svega vrijedi napomenuti da sama toplinska nijansa oksida ovisi prije svega o unesenoj toplini, sadržaju kisika u plinu te o samom materijalu koji se zavaruje. Prema tome, različite toplinske nijanse odražavaju različite debljine i sastav oksida. [29]

Tablica 6 Različite boje pobojenja čelika X5 CrNi 18-10 [28]

Boja toplinske nijanse		Temperatura, °C
Blijedo žuta		290
Slamnato žuta		340
Tamno žuta		370
Smeđa		390
Ljubičasto smeđe		420
Tamno ljubičasta		450
Plava		540
Tamno plava		600

Međutim, različite površinske nepravilnosti i nesavršenosti koje nastaju tijekom procesa zavarivanja mogu drastično utjecati na taj zaštitni sloj tako da mu smanje korozijsku postojanost na određene lokalne tipove korozije. Nastanak pobojenja na površini je rezultat samog zadebljanja oksidnog sloja bogatog kromom na površini. Formiranjem pobojenja na površini, dolazi po povlačenja kroma iz podpovršinskih slojeva na površinu (Slika 34). Time nastaje podpovršinski sloj osiromašen kromom što za posljedicu ima povećanje osjetljivosti na koroziju, pri čemu je izražena pojava rupičaste korozije i korozije u zazoru. Visoka koncentracija kisika u lokalnoj atmosferi uzrokuje dodatni gubitak kroma u površinskom sloju te se tako pojavljuje oksidni sloj bogat željezom. Pojava korozije na ovakvom oksidnom sloju počinje vrlo brzo nakon njegovog izlaganja vlažnoj atmosferi. [30]

Slika 34 prikazuje shematski prikaz pada sadržaja kroma u podpovršinskom sloju koji može pasti čak i ispod sadržaja kroma od 12 % čime se zapravo gubi jedan od glavnih uvjeta za korozijsku postojanost austenitnih čelika.



Slika 34 Shematski prikaz pobojenja na austenitnom Cr-Ni čeliku [2]

Sam utjecaj pobojenja na korozijsku postojanost, prvenstveno ovisi o agresivnosti atmosfere kojoj su dijelovi izloženi. Za blaže oblike agresivnosti atmosfere ove pojave ne izazivaju značajnu štetu te samim time nije ni nužno njihovo uklanjanje, a agresivna atmosfera koja sadrži kloride predstavlja glavni aktivator korozije. Međutim, kako bi se osigurala korozijska postojanost zavarenih dijelova u eksploataciji, neophodno je uklanjanje pobojenja s površine čelika. Samo osiguranje potpune korozijske postojanosti čelika postiže se uklanjanjem zazora, svih vrsta nečistoća te pobojenja čija je boja tamnija od svijetložute. Prema tome, sama obrada nakon zavarivanja je iznimno važna kako bi se osigurala dugotrajna korozijska postojanost čelika. [30]

7.3. Sprječavanje nastanka pobojenja uporabom zaštitnih plinova

Tijekom zavarivanja, štetan utjecaj kisika može se znatno smanjiti pravilnim izborom zaštitnog plina i plina za korijensku zaštitu ako je to potrebno. Kao zaštitni plin tijekom zavarivanja austenitnih čelika s TIG postupkom zavarivanja, najčešće se koristi čisti argon. Pošto je argon plemeniti plin, on uspješno uklanja kisik iz atmosfere električnog luka i taline zavara. Utjecaj kisika se također može svesti na minimum ukoliko se argonu doda mali sadržaj vodika. Sadržaj vodika u plinskoj mješavini s argonom se obično kreće od 2 do 10%. Samim time, postiže se reakcija vodika s kisikom tijekom samog procesa zavarivanja te na temperaturama iznad 500 °C nastaje vodena para koja ispari uslijed visokih temperatura uzrokovanih električnim lukom. U praksi to čini zaštitne plinove s određenim sadržajem vodika bolje efikasnim u sprječavanju štetnog djelovanja kisika od čistog plina kao što je argon. U Tablica 7 prikazan je popis zaštitnih plinova za TIG postupak zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika koji se najviše koriste u praksi. Uz navedene plinove mogu postojati i neke druge plinske mješavine, ali one se prvenstveno koriste u specijalne svrhe.

Tablica 7 Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje austenitnih Cr-Ni čelika [23]

Komercijalna oznaka zaštitnog plina	Oznaka prema HRN EN ISO 14175:2008	Sastav, %
Argon 4.6	I1	Ar 100 %
Argon 4.8	I1	Ar 100 %
Inoxline H2	R1	Ar 98 % H ₂ 2 %
Inoxline H5	R1	Ar 95 % H ₂ 5 %
Inoxline H7	R1	Ar 92,5 % H ₂ 7,5 %
Inoxline He3 H	R1	Ar 95,5 % He 3 % H ₂ 1,5 %

Uz primjenu zaštitnog plina za zaštitu metala zavara i električnog luka od utjecaja kisika, također je vrlo važna i zaštita korijena zavara. Za zaštitu korijena zavara koriste se tzv. „formni“ plinovi. Plinovi koji se koriste za korijensku zaštitu su uglavnom čisti argon ili plinska mješavina dušika i helija, pri čemu se sadržaj helija može kretati od 5 do 15 %. U praksi je vrlo česta primjena čistog argona kao zaštitnog plina za metal zavara, a kao plin za korijensku zaštitu koristi mješavina dušika i helij.

U Tablica 8 prikazan je popis zaštitnih plinova za korijensku zaštitu kod TIG postupak zavarivanja austenitnih Cr-Ni čelika koji se najviše koriste u praksi. Uz navedene plinove mogu postojati i neke druge plinske mješavine, kao što su mješavine argona i helija, ali one kao takve se koriste samo u nekim specijalnim slučajevima

Tablica 8 Plinovi za korijensku zaštitu kod TIG zavarivanja austenitnih čelika [23]

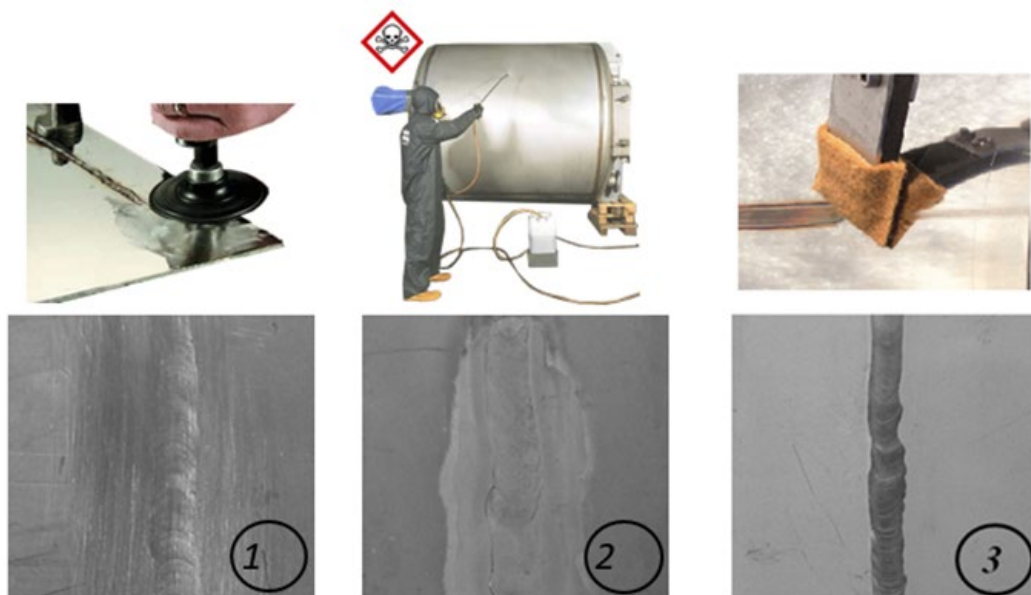
Komercijalna oznaka zaštitnog plina	Oznaka prema HRN EN ISO 14175:2008	Sastav [%]
Argon 4.6	I1	Ar 100 %
Argon 4.8	I1	Ar 100 %
Forming gas H5	N5	N ₂ 95 % He ₂ 5 %
Forming gas H8	N5	N ₂ 92 % He ₂ 8 %
Forming gas H12	N5	N ₂ 88 % He ₂ 12 %
Forming gas H15	N5	N ₂ 85 % He ₂ 15 %

8. OBRADA POVRŠINE AUSTENITNIH Cr-Ni ČELIKA NAKON ZAVARIVANJA

Jedan od glavnih uzročnika pojave korozijskih oštećenja kao što je rupičasta korozija na austenitnim Cr-Ni čelicima je loše i nepravilno čišćenje nakon zavarivanja. Pošto tijekom zavarivanja, uslijed velikog unosa topline u materijal dolazi do uništenja zaštitnog pasivnog sloja. A prisustvom kisika u lokalnoj atmosferi dolazi do nastanka debelog oksidnog sloja slabije korozijske postojanosti te podpovršinski sloj osiromašen kromom. Stoga je u svrhu osiguranja korozijske postojanosti austenitnih čelika vrlo važno da se taj oksidni sloj i podpovršinski sloj uklone. Pošto do pobojenja i nastanka oksida dolazi uslijed reakcije austenitnog Cr-Ni čelika i kisika iz atmosfere, sam nastanak pobojenja može se značajno umanjiti primjenom inertnih plinova kao što su argon i helij. Međutim, pogrešnim parametrima zavarivanja ili pogriješkama tijekom samog procesa zavarivanja i dalje može doći do nastanka pobojenja na površini. Prema „rule of thumb“ postoji poveznica između toplinske nijanse pobojenja i razine korozijske postojanosti nastalog oksida. Naime, tamnija boja pobojenja predstavlja deblji sloj oksida što naravno daje slabiju korozijsku postojanost.

Osim nastanka pobojenja na površini, tijekom zavarivanja može doći do pojave različitih oblika nečistoća i nepravilnosti na površini metala. Prema tome, česta je pojava različitih površinskih pora, kraterskih pora, prskanja, troske, različitih pukotina uzrokovanih nedovoljnim staljivanjem, tople pukotine, itd. Svi ovi pojavni oblici na površini imaju značajan utjecaj na korozijsku postojanost te mehanička svojstva austenitnih čelika. Prema tome metode za čišćenje površine nakon zavarivanja se dijele na mehaničku, kemijsku i elektrokemijsku obradu.

Slika 35 prikazuje različite izgled površine austenitnog Cr-Ni čelika, pri čemu je pod 1. prikazan izgled površine nakon mehaničke obrade brušenjem bez poliranja. Pod 2. je prikazan postupak kemijske obrade nagrivanjem, dok je pod 3. prikazan izgled površine nakon elektrolitičkog čišćenja s četkom spojenom na izmjeničnu struju.



Slika 35 Izgled površine nakon 1. mehaničke obrade 2. kemijske obrade 3. elektrokemijske obrade [31]

8.1. Mehanička obrada

Mehaničkim postupcima čišćenja površine nakon zavarivanja se uglavnom postiže vizualna čistoća površine, pri čemu se ne mora postići i tražena korozijska postojanost. Prije bilo kakve vrste mehaničke obrade potrebno je ukloniti tragove boja, nečistoća i masnoća s površine te dobro osušiti samu površinu. Postupci kao što su brušenje i četkanje spadaju u postupke mehaničke obrade koji se najčešće koriste u praksi.

Postupkom brušenja (Slika 36) se dobiva hrapava površina, pri čemu sama hrapavost površine ovisi o korištenom zrnju. Samim time, što je brušenje s finijom granulacijom to se može postići bolja korozijska postojanost. Međutim, samim postupkom brušenja se ne mogu ukloniti svi oksidi s površine te je iz tog razloga potrebno provesti postupak poliranja čime se postiže najbolja mehanička obrada površine, a samim time se postiže i jako dobra korozijska postojanost. Naravno, najvažnija stvar je da brušenje i poliranje uklone nastale okside s površine, ali tijekom samog poliranja može doći do samog poliranja oksida čime on poprima izgled sjajne metalne površine. Samim time, oksid ostaje na površini te daje lošu korozijsku postojanost. [32]



Slika 36 Brušenje zavora nakon zavarivanja [33]

Postupak ručnog četkanja (Slika 37) površine austenitnih Cr-Ni čelika može biti jednostavan i učinkovit način uklanjanja ostataka metalnih kapljica, troske i oksida. Međutim, tijekom ovog postupka čišćenja površine vrlo je važno obratiti pažnju na materijal od kojeg je izrađena sama četka za čišćenje. Samim time, se četke od nelegiranog čelika ne smiju koristiti za čišćenje površine austenitnih čelika zato što može doći do kontaminacije površine i samim time se pospješiti nastanak korozije na površini. Naravno, uz sam materijal četke potrebno je obratiti pozornost i tijekom samog čišćenja površine da se ne stvara veliki pritisak četke na površinu. Pošto time dolazi do razvijanja povišene temperature uslijed trenja te se na tim mjestima može kasnije pojaviti rupičasta ili napetosna korozija. [32]



Slika 37 Ručno četkanje zavora nakon TIG zavarivanja [34]

Uz navedene postupke brušenja, poliranja i četkanja u sklopu mehaničke obrade površine još se koriste postupci pjeskarenja i sačmarenja. Međutim nakon takve vrste obrade obavezno mora biti provedeno čišćenje površine. Naravno mehanička obrada se rijetko koristi kao samostalna, nego se ona u većini slučajeva koristi u kombinaciji s kemijskom ili elektrokemijskom obradom površine. [32]

8.2. Kemijska obrada

Ovaj tip obrade površine nakon zavarivanja se temelji na kontroliranom nagrivanju i selektivnom uklanjanju nehomogenih površinskih slojeva. Općenito se kemijskom obradom postiže površina bolje korozijske postojanosti u odnosu na mehaničku obradu. Ova vrsta obrade površine se može provesti na više načina, a najčešća se koriste metode nagrivanja, elektro poliranja, selektivnog nagrivanja i donekle pasiviranja površine. Nagrivanje područja niske korozijske postojanosti općenito daje najbolje rezultate te samim time i najbolju korozijsku postojanost. Sama prednost nagrivanja je u tome što se uspješno i jednoliko uklanjanju površinski slojevi. Međutim, tijekom nagrivanja potrebno je posebno obratiti pozornost na jačinu kiseline pošto može doći do prekomjernog nagrivanja, što može dovesti do nastanka površinskih nepravilnosti i samim time i grube površine. [32]

Kupke u kojima se provodi kemijska obrada se uglavnom sastoje od mješavina različitih vrsta kiselina, dok na samu efikasnost uklanjanja utječu i ostali parametri kao što su temperatura kupke, kemijski sastav čelika i karakter oksida na površini. Najčešće vrste kiselina koje se koriste za kemijsku obradu Cr-Ni čelika su 0,5-5 % fluorovodična kiselina te 8-20 % dušična kiselina. Pri čemu se te kiseline koriste ne temperaturama od 25 do 65 stupnjeva. Što je veći sadržaj legiranih elemenata, to se koristi fluorovodična kiselina s većom koncentracijom i na višoj temperaturi. [32]

Često u praksi nije moguće staviti zavarene spojeve u kupke s kiselinom pa je iz tog razloga potrebno koristiti metode kao što je prskanje kiseline ili premazivanje pastom za nagrivanje (Slika 38). Pri čemu paste za nagrivanje sadrže iste aktivne kiseline kao i kupke za nagrivanje. Međutim, na terenu je teško postići višu temperaturu kada se primjenjuje pasta za nagrivanje te je zbog toga potrebno mehaničkim putem odstraniti toplinsku nijansu koja je nastala na površini prije nanošenja paste. Nakon završetka kemijske obrade površine, vrlo je važno površinu isprati deioniziranom ili pročišćenom vodom kako bi se spriječilo prekomjerno i štetno daljnje nagrivanje površine. [32]



Slika 38 Kemijsko čišćenje zavora nakon zavarivanja s pastom [34]

8.3. Elektrokemijska obrada

Elektrokemijski postupak čišćenja zavora se može smatrati brzim i učinkovitim postupkom čišćenja površine od nastalih oksida tijekom zavarivanja. Međutim, ovaj postupak je vrlo sličan samoj kemijskoj obradi dok se sam postupak elektrokemijskog čišćenja površine obavezno obavlja nakon prethodnog mehaničkog čišćenja. Samo čišćenje površine može se provoditi ručno uz pomoć četke ili pak uporabom posebnih elektrolitičkih kupki. Ručni postupak čišćenja koji se provodi uz pomoć četke se može smatrati izrazito je jednostavnim ali i učinkovitim. Postupak se temelji na nanošenju elektrolitičke tekućine na površinu zavora i oko njega uz pomoć vodljive četke koja može biti spojena na istosmjernu ili izmjeničnu struju čime se postiže željeno čišćenje i pasivizacija površine. Spajanjem četke na izmjeničnu struju postiže se čišćenje površine od debelih oksida (Slika 39), a ako se pak četka spoji na istosmjernu struju onda se površina može obraditi do stanja visokog sjaja kao što je prikazano na Slika 39. Provedenim čišćenjem površine s istosmjernom strujom, mogu se postići vrijednosti hrapavosti površine $Ra < 0,02$ mikrometara. [32]



Slika 39 Ručno elektrolitičko čišćenje zavora [35]

Osim uporabe četke, može se također koristiti i posebna elektrolitička kupka (Slika 40) koju ne treba miješati s kupkom za nagrizanje koja se koristi kod kemijskog postupak. Ovaj postupak se provodi tako da se metalni dijelovi, ako je to moguće, uranjaju u elektrolitičku tekućinu gdje dolazi do kemijske reakcije kojom se uklanjanju oksidi, hrđa i druge nečistoće s površine metala. Nakon provedenog čišćenja površine, nužno je provesti ispiranje tretirane površine. Naravno, uporaba elektrolitičke kupke je ograničena samom veličinom komada na kojem je potrebno provesti čišćenje nakon zavarivanja.



Slika 40 Kupke za elektrolitičko čišćenje [35]

9. EKSPERIMENTALNI DIO

9.1. Opis eksperimenta

Zadatak u sklopu eksperimentalnog dijela rada bio je osmisliti plan pokusa i provesti eksperiment u laboratoriju prema određenim kriterijima zadanim u zadatku. Cilj eksperimenta je bio utvrditi utjecaj udjela kisika pri korijenskoj zaštiti, za vrijeme navarivanja na svojstva navarenog spoja. Eksperiment je izveden uz pomoć automatiziranog TIG postupka bez dodatnog materijala s različitim plinovima za korijensku zaštitu, strujama i brzinama navarivanja. Tijekom provođenja eksperimenta bile su konstantne vrijednosti protoka plina za zaštitu električnog luka, udaljenost vrha volframove elektrode od osnovnog materijala te se položaj navarivanja tijekom izvođenja eksperimenta nije mijenjao.

9.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal tijekom navarivanja korišten je visokolegirani Cr-Ni čelik, oznake X5 CrNi 18-10 (W.Nr. 1.4301). On pripada u skupinu austenitnih čelika, pri čemu se odlikuje izvrsnom mogućnošću oblikovanja deformiranjem te izvlačenjem i vrlo je dobro zavarljiv. Njegova glavna karakteristika je njegova visoka otpornost na koroziju u atmosferskim utjecajima, slatkoj vodi i morskoj vodi s nižim sadržajem klorida. Samim time, njegova primjena je izražena u područjima kemijske industrije, industrije mineralnih ulja, petrokemije, automobilske industrije te u proizvodnji različitih kućanskih elemenata kao što su sudoperi, ograde, lonci, tave, pribor za jelo, itd. Ova vrste čelika poznata je još pod nadimkom 18/8, koji je dobio na temelju svog kemijskog sastava od 18 % kroma i 8 % nikla. Ostali legirni elementi koji se nalaze u sklopu ove legure su mangan, silicij, dušik, fosfor i sumpor. Detaljan kemijski sastav čelika X5 CrNi 18-10 prikazan je u Tablica 9, a određena mehanička svojstva su prikazana u Tablica 10.

Tablica 9 Kemijski sastav čelika X5 CrNi 18-10 [36]

	C	Mn	P	S	Cr	Si	N	Ni
Min. [%]	-	-	-	-	18,00	-	-	8,00
Maks. [%]	0,08	2,00	0,040	0,030	20,00	0,75	0,110	11,00

Tablica 10 Mehanička svojstva čelika X5 CrNi 18-10 [36]

R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , mm	λ , W/mK	c , J/kgK
520-720	195	35-40	16,2	500

Uzorci korišteni u ovom eksperimentu izrezani su iz cijevi (Slika 41) pomoću mehaničke pile "BS 350 GH", a njihove dimenzije nakon rezanja (Slika 42) su sljedeće:

- Duljina: 70-73 mm
- Unutarnji promjer: 15 mm
- Debljina stijenke cijevi: 3 mm

**Slika 41 Rezanje uzoraka na pili BS 350 GH****Slika 42 Uzorci nakon rezanja**

9.3. Oprema za navarivanje

9.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje

Eksperiment je izveden automatiziranim TIG postupkom zavarivanja, a kao izvor struje za TIG zavarivanje je korišten uređaj "MagicWave 230i" koji se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na Slika 43 prikazan je izvor struje za zavarivanje koji je korišten tijekom eksperimenta, a na Slika 44 prikazana je identifikacijska pločica izvora struje za zavarivanje "MagicWave 230i" na kojoj su napisani osnovni podaci o uređaju.



Slika 43 Izvor struje za zavarivanje "MagicWave 230i"



Slika 44 Identifikacijska pločica izvora struje za zavarivanje "MagicWave 230i"

9.3.2. Automat za zavarivanje "BUG-O systems"

Navarivanje uzoraka izvedeno je na automatu za zavarivanje "BUG-O systems" koji se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Razlog primjene automata u ovom eksperimentu je kako bi se izbjegle eventualne pogreške zavarivača i dobili što točniji rezultati ispitivanja te osigurala ponovljivost tijekom eksperimenta. Automat za zavarivanje "BUG-O systems" je izveden kao uređaj koji ima ugrađen prihvatač pištolja za zavarivanje ili rezanje te različite oblike postolja i stega za ispitne uzorke. Ima mogućnost pravocrtnog gibanja čime se simulira gibanje ruke zavarivača tijekom zavarivanja. Na samom uređaju je moguće podešavati brzinu gibanja pištolja za zavarivanje te sam položaj pištolja. Slika 45 prikazuje automat za zavarivanje koji je korišten tijekom izvođenja ovog eksperimenta.



Slika 45 "BUG-O systems" automat za zavarivanje

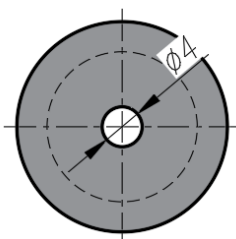
9.4. Priprema uzoraka za navarivanje

Prije samog procesa navarivanja, uzorke je prvo potrebno temeljito očistiti i odmastiti te zabrtviti kako bi se koncentracija kisika u cijevi lakše mogla kontrolirati. Čišćenje površine uzoraka provedeno je uz pomoć 70 % etilnog alkohola čime su otklonjene eventualne nečistoće s površine. Vrlo je važno da uzorak bude čist i odmašćen s vanjske i unutarnje strne. Nakon čišćenja, uzorci su pušteni 5 minuta da se osuše. Nakon čišćenja, uzorci su zabrtvljeni s jedne strane uz pomoć thermaflex aluminijske ljepljive trake kako je prikazano na Slika 46.



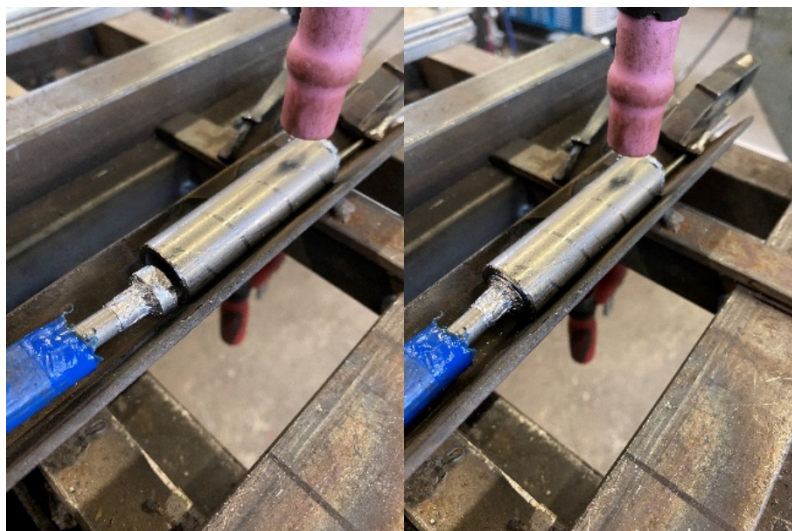
Slika 46 Očišćeni i zabrtvljeni uzorci

Međutim, prije samog procesa navarivanja, na uzorcima je potrebno napraviti otvor sa strane gdje se nalazi aluminijska ljepljiva traka kako bi se omogućio izlaz kisika iz cijevi tijekom ispuhivanja cijevi. Slika 47 prikazuje detaljan prikaz oblika i dimenzije otvora cijevi na strani aluminijske ljepljive trake. Naravno, može se koristiti i neki drugi način zatvaranja cijevi te samim time i drugačiji oblik otvora.



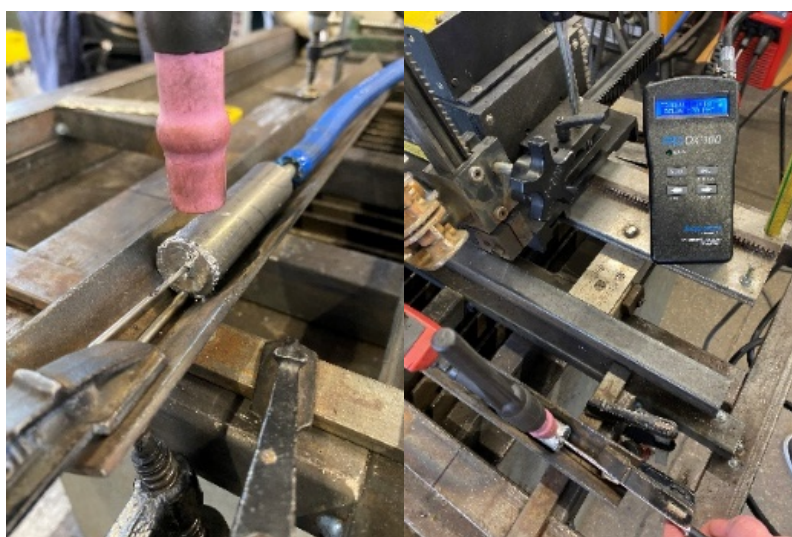
Slika 47 Otvor na aluminijskoj ljepljivoj traci

Nakon što su uzorci očišćeni i pripremljeni za navarivanje, pristupa se njihovom postavljanju u automat za zavarivanje. Uzorak se prvo postavlja u postolje automata kutnog oblika kako bi se spriječilo njihovo eventualno pomicanje tijekom izvođenja navarivanja. U tako postavljene uređaje umeće se crijevo za dovod plina za korijensku zaštitu kao što je prikazano na Slika 48.



Slika 48 Umetanje crijeva za dovod zaštitnog plina

Samim time, može se otvoriti ventil boce sa zaštitnim plinom i provesti propuhivanje uzorka u trajanju od jedne minute. Nakon toga se može pristupiti mjerenju razine kisika u cijevi. U prethodno napravljen otvor cijevi se umeće sonda oksimetra te se u kontinuiranom modu prati koncentracija kisika u cijevi kao što je prikazano na Slika 49. Razina kisika u cijevi se prati sve dok se ne postigne ciljana vrijednost.



Slika 49 Mjerenje razine kisika u cijevi uz pomoć oksimetra „PRO OX-100“

Međutim, da bi se postigla ciljana vrijednost kisika u cijevi, potrebno je obratiti pozornost na protok plina za korijensku zaštitu. Tijekom ispuhivanja cijevi je poželjno da se razina protoka plina kreće oko 9 l/min. Nakon ispuhivanja cijevi poželjno je da se razina protoka plina smanji na 4 do 6 l/min kako bi se izbjegle velike turbulencije plina unutar cijevi.



Slika 50 Podešavanje protoka plina za korijensku zaštitu

Vrlo je važno da se mjerenje kisika u cijevi provodi u dva navrata tako da se sonda prvo ubaci u uzorak te se prati razina kisika do željene vrijednosti. Nakon toga je poželjno da se sonda izvadi iz uzorka te ostavi na atmosferskom zraku da izmjeri razinu kisika okoline te se opet postavlja u uzorak kako bi se provjerila prethodno izmjerena razina kisika u cijevi.

9.5. Navarivanje uzoraka

Proces TIG navarivanja proveden je na deset uzoraka u obliku cijevi od austenitnog Cr-Ni čelika oznake X5 CrNi 18-10, pri čemu je debljina stijenke cijevi 3 mm. Tijekom samog procesa navarivanja korišten je čisti argon kao zaštitni plin u električnom luku, pri čemu je njegova oznaka Argon 4.8, pri čemu je njegov protok za svih deset uzoraka iznosio 8 l/min. Međutim, u korijenskoj zaštiti korištena su dva plina, jedan od njih je također čisti argon veće razine čistoće uz komercijalnu oznaku argon 5.0, a drugi korišteni plin je mješavina argona i vodika, pri čemu se mješavina sastojala od 95 % argona i 5 % vodika te je njegova komercijalna oznaka inoxline H5. Visina električnog luka je za svih deset uzoraka iznosila 3 mm. Također, tijekom navarivanja svih deset uzoraka, volframova elektroda je bila spojena na minus pol (-) istosmjerne struje. Navarivanje je izvedeno u horizontalnom položaju (PA) za svih deset uzoraka. Ostali promjenjivi parametri tijekom navarivanja navedeni u Tablica 11. U sklopu samog eksperimenta, uzorci A i E su postavljeni kao bazni uzorci za svaki korišteni plin za korijensku zaštitu, a samim time, svi ostali uzorci su varijacije pojedinačnih parametara navedenih u Tablica 11, bilo za argon 5.0 (B,C I, J) ili inoxline H5 (D, F, G, H).

Tablica 11 Parametri navarivanja tijekom izvođenja eksperimenta

Oznaka uzorka	Jakost struje, A	Zaštitni plin za korijensku zaštitu	Protok plina, l/min	Brzina navarivanja cm/min	Razina kisika u korijenu zavora, ppm
A	70	Argon 5.0	6	13	<100
B	70	Argon 5.0	9	13	500
C	75	Argon 5.0	6	13	<100
D	70	Inoxline H5	10	13	500
E	70	Inoxline H5	6	13	<100
F	75	Inoxline H5	4,5	13	<100
G	70	Inoxline H5	4,5	17	<100
H	70	Inoxline H5	4,5	9	<100
I	70	Argon 5.0	6	17	<100
J	70	Argon 5.0	6	9	<100

Uz navedene parametre navarivanja, vrlo važan parametar koji može imati značajan utjecaj na kvalitetu navarenog sloja je unos topline u navarivanju. Da bi se izračunao unos topline, prvo je potrebno izračunati napon (1) tijekom navarivanja na temelju zadane struje prema formuli [2]:

$$U = 10 \cdot 0,04 \cdot I \quad (1)$$

Gdje je

U	V	napon navarivanja
I	A	jakost struja navarivanja

Nakon izračunatog napona navarivanja prema formuli (1), računa se unos topline (2) tijekom navarivanja prema formuli [2]:

$$Q = k \cdot \frac{I \cdot U \cdot 60}{v} \quad (2)$$

Gdje je:

Q	kJ/cm	unos topline
k		koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011-1, $k=0,6$ za TIG postupak)
I	A	jakost struje navarivanja
U	V	napon navarivanja
v	cm/min	brzina navarivanja

Vrlo je važno napomenuti da je izračunati unos topline teorijskog karaktera, pošto na stvarni unos topline utječu još mnogi drugi parametri od kojih su najzastupljeniji vrsta zaštitnog plina, protok zaštitnog plina, visina električnog luka i mnogi dugi. Međutim, realan vrijednost unosa topline ne bi se smjela značajno mijenjati u odnosu teoretsku vrijednost.

U Tablica 12 su prikazane izračunate vrijednosti napona navarivanja prema formuli (1) i unosa topline tijekom navarivanja prema formuli (2).

Tablica 12 Unos topline tijekom navarivanja uzoraka

Oznaka uzorka	Jakost struje, A	Napon navarivanja, V	Brzina navarivanja cm/min	Unos topline, kJ/cm
A	70	12,8	13	2,48
B	70	12,8	13	2,48
C	75	13	13	2,70
D	70	12,8	13	2,48
E	70	12,8	13	2,48
F	75	13	13	2,70
G	70	12,8	17	1,89
H	70	12,8	9	3,58
I	70	12,8	17	1,89
J	70	12,8	9	3,58

Sam cilj navarivanja je bio utvrditi utjecaj različitih parametara prikazanih u Tablica 11 i Tablica 12 (Struje navarivanja, brzine navarivanja, vrste plina za korijensku zaštitu, razine kisika u korijenu i unosa topline) na pojavu pobojenja na korijenskoj strani navara. Također, ovisno o intenzitetu pojave pobojenja utvrditi utjecaj navedenih parametara navarivanja na koroziju postojanost ispitnih uzoraka.

Prije samog početka navarivanja, potrebno je podesiti parametre kao što su struja navarivanja (Slika 51), protok plina za zaštitu električnog luka (Slika 52) i brzina navarivanja (Slika 53).



Slika 51 Podešavanje struje navarivanja



Slika 52 Regulator protoka plina za zaštitu električnog luka



Slika 53 Podešavanje brzine navarivanja

Podešenim parametrima navarivanja prema planu pokusa za pojedini uzorak može se pristupiti navarivanju uzoraka.

Navarivanje uzoraka od austenitnog Cr-Ni čelika oznake X5 CrNi 18-10 izvedeno je prema parametrima prikazanim u Tablica 11. u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Proces samog navarivanja uzoraka, prema zadanim parametrima prikazan je na Slika 54. Nakon provedenog navarivanja vršeno je kontinuirano mjerenje temperature površine navara u svrhu praćenja tijeka hlađenja uzoraka (Slika 55). Važno je napomenuti da je plin za korijensku zaštitu ostavljen na istom protoku i nakon navarivanja u svrhu zaštite korijena navara sve dok temperatura površine nije pala ispod 100 °C. Mjerenje temperature tijekom hlađenja površine navara je provedeno uz pomoć beskontaktnog termometara. Nakon što je temperatura pala ispod 100 °C dovod plina se prekinuo te se uzorak stavio na hlađenje do sobne temperature.



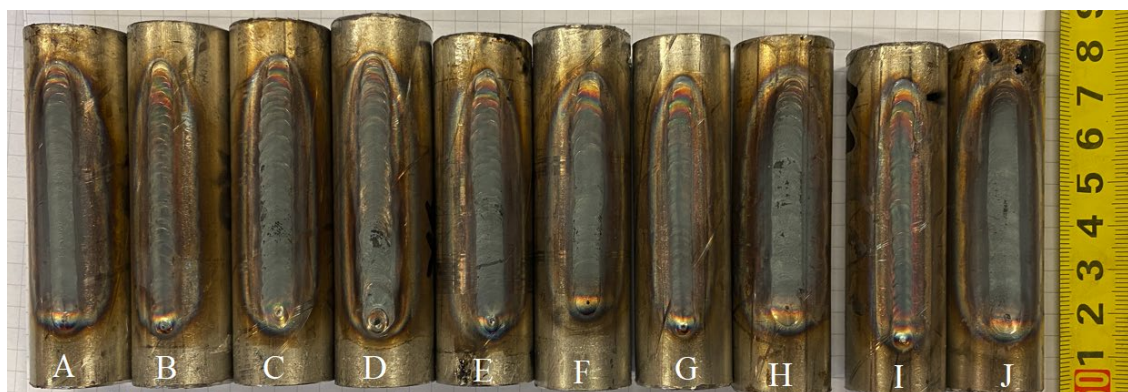
Slika 54 Navarivanje uzoraka



**Slika 55 Mjerenje temperature površine
navara**

9.6. Vizualna analiza površine uzorka

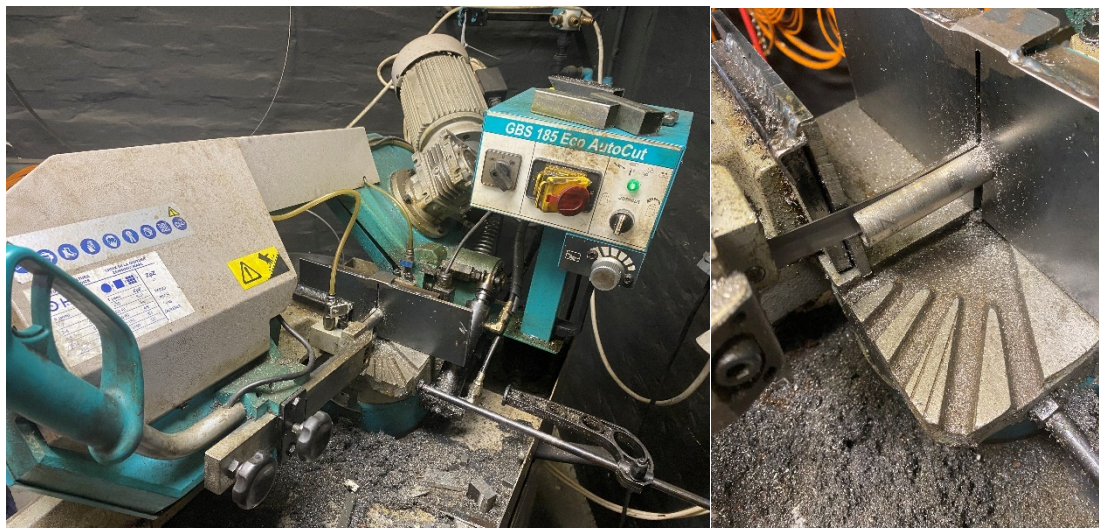
Nakon provedenog navarivanja, na uzorcima je provedena kvalitativna vizualna analiza. Samim time, može se uočiti jasna razlika u obliku i širini navarenog sloja te su jasno vidljive razlike u nastanku pobojenja ovisno o različitim parametrima tijekom navarivanja kao što je vidljivo na Slika 56. Uzrok tome su svakako razlike u unosu topline koje su nastale uslijed porasta struje navarivanja na 75 A (Uzorci C i F) u odnosu na uzorke koji su imali struju navarivanja 70 A (Uzorci A, B, D, E). Međutim, do te razlike također dolazi uslijed smanjenju brzine navarivanja na 9 cm/min (Uzorci H i J) u odnosu na uzorke kod kojih je brzina navarivanja bila 17 cm/min (Uzorci G i I) pošto je kod njih jasno vidljiva manja širina navarenog sloja u odnosu na one gdje je bila 9 cm/min (Uzorci H i J). Samim time, vezano uz brzinu navarivanja, pojava pobojenja na površini je izraženija kod uzoraka kod koji je navareni sloj nastao većom brzinom navarivanja (Uzorci G i I).



Slika 56 Uzorci nakon provedenog navarivanja

9.7. Obrada uzoraka nakon navarivanja

U svrhu daljnje analize uzoraka potrebno je njihovo uzdužno rezanje kako bi se mogao analizirati korijen navarenog sloja. Postupak uzdužnog rezanja uzoraka provodi se na mehaničkoj pili „BS 350 GH“ kao što je prikazano na Slika 57. Postupak se provodi suhim rezanjem kako bi se u što većoj mjeri izbjegla kontaminacija korijena navara s različitim mastima i nečistoćama koje bi eventualno mogle naštetiti dobivenim rezultatima.



Slika 57 Uzdužno rezanje uzoraka na mehaničkoj pili „BS 350 GH“

Tijekom samog procesa uzdužnog rezanja, posebna pozornost se posvetila na temperaturu koja se razvijala u području rezne površine uzorka. U tu svrhu, tijekom cijelog procesa rezanja uzoraka, mjerila se temperatura rezne površine uz pomoć termopara kao što se može vidjeti na Slika 58. Samim time, na temelju rezultata mjerenja, temperatura površine uzorka nije prelazila 120 °C tijekom cijelog procesa rezanja te kao takva nije mogla naštetiti nastalim oksidnim slojevima uslijed navarivanja na površini.



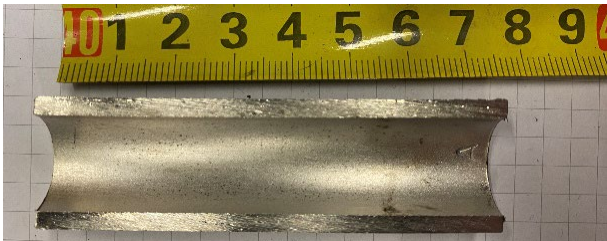
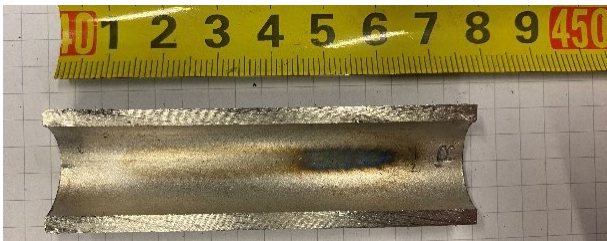
Slika 58 Mjerenje temperature uzoraka tijekom rezanja

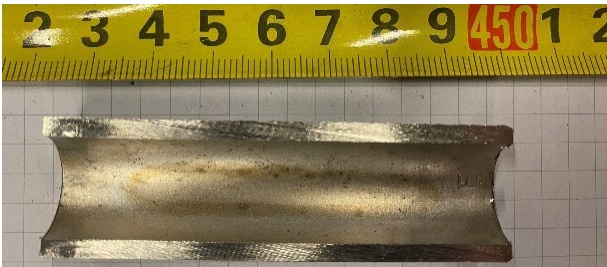
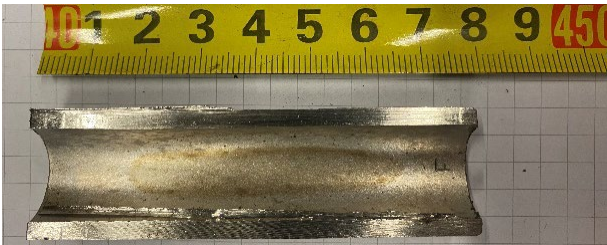
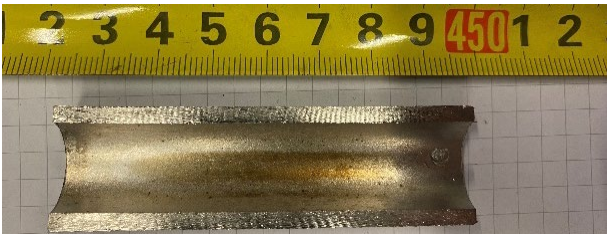
Nakon provedenog postupka rezanja, uzorci su pažljivo očišćeni od produkata rezanja te pripremljeni za vizualnu analizu korijena navarenog sloja.

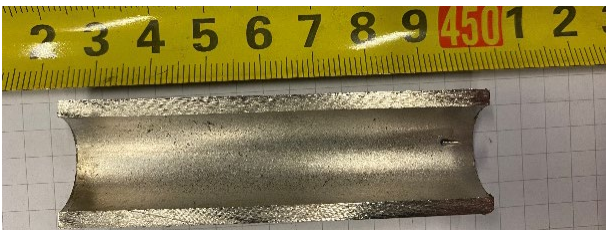
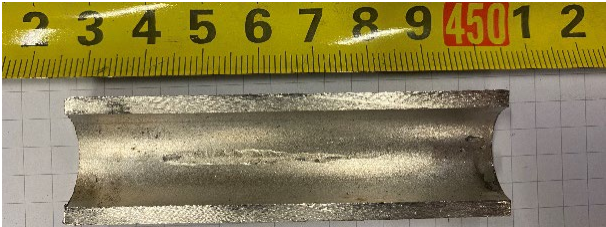
9.8. Vizualna analiza korijena navarenog sloja

Tablica 13 prikazuje slike uzorka nakon uzdužnog rezanja gdje se jasno može vidjeti utjecaj različitih parametara navarivanja na uzorke kojima su oni bili navarivani.

Tablica 13 Slike korijenskih prolaza uzorka sa zadanim parametrima navarivanja

Oznaka uzorka	Jakost struje, A	Zaštitni plin za korijensku zaštitu	Protok plina, l/min	Brzina navarivanja cm/min	Razina kisika u korijenu navara, ppm
A	70	Argon 5.0	6	13	<100
	 Slika 59 Korijenska strana navarene cijevi uzorka A				
B	70	Argon 5.0	9	13	500
	 Slika 60 Korijenska strana navarene cijevi uzorka B				
C	75	Argon 5.0	6	13	<100
	 Slika 61 Korijenska strana navarene cijevi uzorka C				

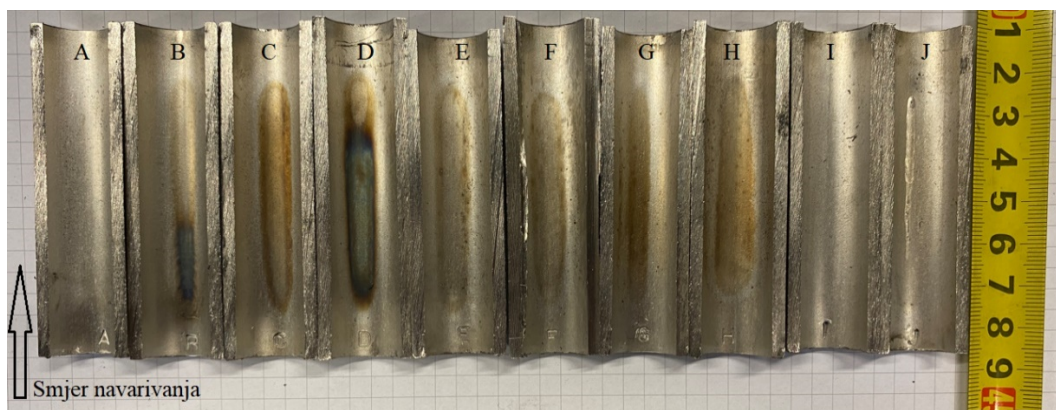
D	70	Inoxline H5	10	13	500
	 Slika 62 Korijenska strana navarene cijevi uzorka D				
E	70	Inoxline H5	6	13	<100
	 Slika 63 Korijenska strana navarene cijevi uzorka E				
F	75	Inoxline H5	4,5	13	<100
	 Slika 64 Korijenska strana navarene cijevi uzorka F				
G	75	Inoxline H5	4,5	13	<100
	 Slika 65 Korijenska strana navarene cijevi uzorka G				

H	70	Inoxline H5	4,5	9	<100
	 Slika 66 Korijenska strana navarene cijevi uzorka H				
I	70	Argon 5.0	6	17	<100
	 Slika 67 Korijenska strana navarene cijevi uzorka I				
J	70	Argon 5.0	6	9	<100
	 Slika 68 Korijenska strana navarene cijevi uzorka J				

Nakon provedenog uzdužnog rezanja, mogla se provesti vizualna analiza korijenske strane navarene cijevi svakog od uzoraka. U sklopu jednostavnijeg tumačenja rezultata i olakšanog uspoređivanja između uzoraka, uzorci A i E predstavljaju bazne uzorke za uspoređivanje. Razlog tome leži u činjenici da su oba uzorka navarivana s istom strujom navarivanja, brzinom navarivanja, protokom zaštitnog plina te je koncentracija kisika u korijenu tijekom navarivanja bila ispod 100 ppm. Ostalih osam uzoraka je imalo različite varijacije u parametrima navarivanja kako je već prethodno objašnjeno. Međutim, za prvobitnu analizu može se izvršiti usporedba uzoraka A i E pošto je jedina razlika u parametrima između njih plin za korijensku zaštitu.

Naime, tijekom navarivanja uzorka A (Slika 59) korišten je argon 5.0 kao plin za korijensku zaštitu, dok je kod navarivanja uzorka E (Slika 63) korišten inoxline H5 kao plin za korijensku zaštitu. Vizualnim pregledom uzoraka A i E može se jasno uočiti da nema skoro nikakvog nastanka pobojenja u korijenu navarenog sloja uzorka A (Slika 59), dok uzorak E ima blaži intenzitet nastalog pobojenja u korijenu (Slika 63). Razlog tome svakako može biti razlika u korištenom zaštitnom plinu za korijensku zaštitu. Naime, zaštitni plin inoxline H5 sadrži u svojoj smjesi 5 % vodika koji je aktivan plin dok je argon 5.0 u potpunosti inertan plin visoke čistoće. Također, vodik ima veću toplinsku vodljivost u odnosu na argon te time stvara veći unos topline u materijal za istu vrijednost parametara navarivanja kao što su struja i brzina navarivanja.

Vizualnom analizom uzoraka B (Slika 60) i D (Slika 62) može se uočiti sličan trend nastanka pobojenja u korijenu navarenog sloja kao kod uzoraka A i E. Iako je kod uzoraka B i D razina kisika u korijenu iznosila 500 ppm i dalje nastaje razlika u intenzitetu nastalog pobojenja korijena navarenog sloja. Vrijedi napomenuti da je kod oba uzoraka izraženiji nastanak pobojenja na početku navarenog sloja, dok prema završetku navarenog sloja ono bude slabijeg intenziteta što je jasno vidljivo na Slika 69. Samim time, može se zaključiti da je unos topline (Tablica 12) u materijal opet značajan faktor kada je u pitanju nastanak pobojenja u korijenu navarenog sloja.



Slika 69 Uzorci nakon uzdužnog rezanja

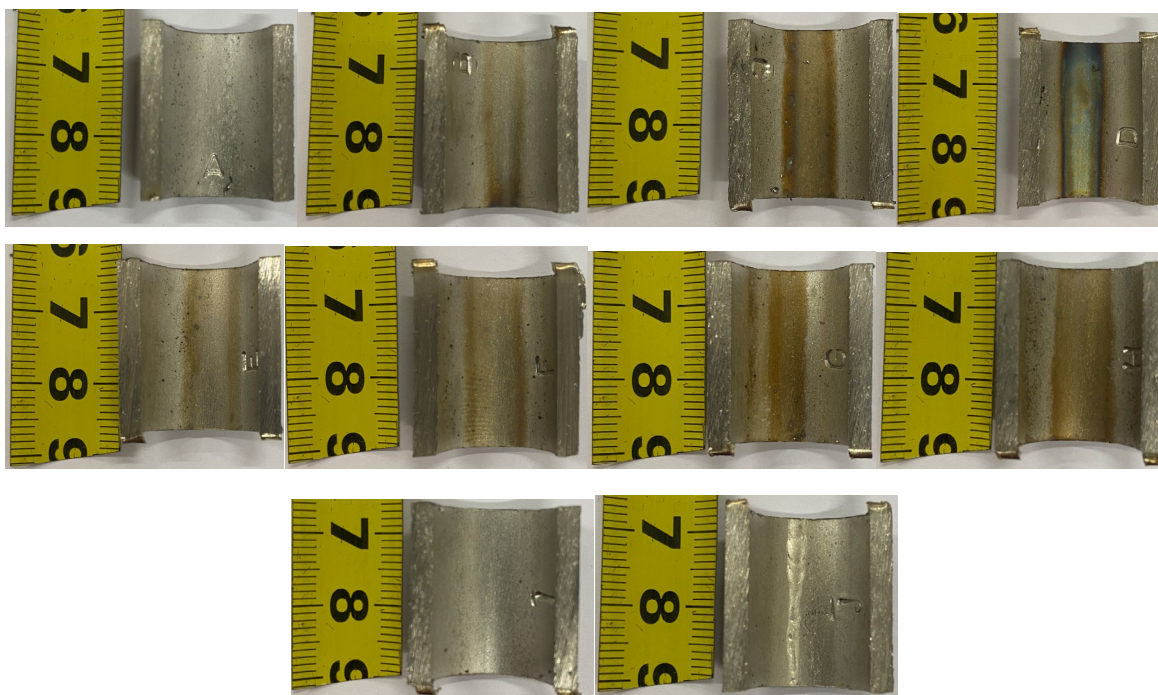
Uzorak C (Slika 61) nam daje vrlo dobar uvid u intenzitet nastanka pobojenja kod povećanog unosa topline u materijal. Naime, uzorak C je navarivan sa 75 A što predstavlja povećani unos topline (Tablica 12) u odnosu na uzorak A koji je navarivan sa 70 A, a ostali parametri su jednaki. Samim time, nastalo pobojenje je puno izraženije kod uzorka C gdje se jasno mogu vidjeti žarko žute boje pobojenja površine.

Međutim, uzorak F (Slika 64) je također navarivan sa 75 A ali je intenzitet nastalog pobojenja gotovo jednak onome uzorka E koji je navarivan sa 70 A. To dovodi do zaključka da kod čistog argona unos topline (Tablica 12) kroz struju navarivanja radi puno veći utjecaj na nastanak pobojenja površine nego kod smjese argona i vodika.

Uz struju navarivanja, drugi parametar koji može utjecati na unos topline (Tablica 12) u materijal je brzina navarivanja. Samim time, uzorci G, H, I i J nam daju jasan uvid kakav utjecaj ima brzina navarivanja na nastanak pobojenja u korijenu navarenog sloja. Temeljem toga, uzorci G i I su navareni s 30 % većom brzinom, pa je ona tako iznosila 17 cm/min, a uzorci H i J su navareni s 30 % manjom brzinom navarivanja u odnosu na bazne uzorke (A i E), pa je ona tako iznosila 9 cm/min. Uspoređujući uzorke G (Slika 65) i I (Slika 67) može se ponovno vidjeti trend izraženijeg nastanka pobojenja na uzorku G koji je kao zaštitni plin u korijenu imao smjesu argona i vodika. Uzorak I (Slika 67) koji je kao zaštitni plin u korijenu imao čisti argon nema skoro nikakvih vidljivih tragova pobojenja na površini korijena navarenog sloja. Međutim, vrijedi uočiti slabiji intenzitet nastanka pobojenja uz povećanu brzinu navarivanja kod uzorka G (Slika 65) u odnosu na uzorak E (Slika 63) koji je imao brzinu navarivanja od 13 cm/min. Uzorci A i I imaju približno jednako stanje površine oko korijena navarenog sloja. Kod uzoraka koji su imali smanjenu brzinu navarivanja može se uočiti jedna vrlo zanimljiva razlika. Naime, kod uzorka H (Slika 66) koji je kao zaštitni plin imao smjesu argona i vodika mogu se jasno vidjeti žarko žute boje nastalog pobojenja površine. Uzorak H je time imao izraženiji nastanak pobojenja površine uslijed smanjene brzine navarivanja u odnosu na povećanu struju navarivanja kao što je bio slučaj kod uzorka F (Slika 64). Kod uzorka J (Slika 68) je nastanak pobojenja izrazito slabog intenziteta unatoč smanjenoj brzini navarivanja. Međutim, smanjenje brzine navarivanja je prouzročilo protaljivanje korijena navarenog sloja uslijed povećanog unosa topline. Vrijedi istaknuti razliku koja je nastala između povećane struje navarivanja (Uzorak C) i smanjene brzine navarivanja (Uzorak J). Naime, kod povećane struje navarivanja uz jednaku koncentraciju kisika u zaštitnom plinu, jednakog protoka plina dolazi do izraženijeg nastanka pobojenja u odnosu na slučaj smanjene brzine gdje je pobojenje zanemarivo. Vizualnim pregledom i analizom se može zaključiti da kod čistog argona kao zaštitnog plina, struja navarivanja ima puno veći utjecaj na nastanak pobojenja površine, a sama brzina navarivanja ima puno manji utjecaj. Međutim, kod smjese argona i vodika, struja navarivanja radi puno manju razliku u nastanku pobojenja površine, a sama brzina navarivanja radi puno veći utjecaj.

9.9. Priprema za ispitivanje uzoraka na rupičastu koroziju

Nakon provedene vizualne analize, uzorci su podvrgnuti ponovnom rezanju na mehaničkoj pili „BS 350 GH“ u cilju dobivanja uzoraka manjih, prikladnijih dimenzija za ispitivanje na koroziju. Ispitivanje na rupičastu koroziju je provedeno prema normi ASTM G48-99a [37] pri čemu je ispitivanje izvršeno metodom A. Samim time, norma propisuje da ispitni uzorak bude dimenzija 25x50 mm ali su također moguće varijacije uslijed različitih oblika i dimenzija elementa koji se ispituju ovom metodom. Pošto dimenzije vanjskog promjera cijevi ne dozvoljavaju ispunjenje tog kriterija u potpunosti, uzorci namijenjeni ispitivanju su rezani na duljinu od 25 mm, a širina je iznosila 21 mm. Tijekom rezanja uzoraka na zahtijevane dimenzije, kontinuirano je mjerena temperatura rezne površine kako bi se izbjeglo pretjerano zagrijavanje koje bi eventualno moglo naštetiti dobivenim rezultatima. Samim time, tijekom procesa rezanja, temperatura rezne površine nije prelazila 120 °C. Nakon provedenog rezanja uzoraka izvršeno je signiranje novih ispitnih uzoraka prema oznakama matičnog uzorka (A-I) te je izvršena kontrola dimenzija uzoraka kao što je prikazano na Slika 70.



Slika 70 Uzorci nakon rezanja na zahtijevane dimenzije prema normi ASTM G48-99a

Provedenim signiranjem i kontrolom dimenzija, uzorci su ponovno čišćenje u 70 % etanolu kako bi se uklonili eventualni tragovi masnoće i onečišćenja s površine uzorka. Nakon provedenog čišćenja, uzorci su ostavljeni na zraku da se osuše kao što je prikazano na Slika 71. Iznimno je važno da se koriste čiste zaštitne rukavice nakon čišćenja uzoraka kako bi se izbjeglo ponovno onečišćenje površine koje bi moglo naštetiti ispitivanju te da se uzorci osuše u potpunosti.



Slika 71 Čišćenje i sušenje uzoraka

9.10. Ispitivanje na rupičastu koroziju prema normi ASTM G48-99a

Ispitivanje na rupičastu koroziju prema normi ASTM G48-99a [37] ima za cilj utvrditi gubitak mase uzoraka uslijed djelovanja kiseline. Samim time, potrebno je provesti mjerenje mase uzoraka prije djelovanja kiseline kako bi se mogao točno utvrditi njen gubitak uslijed djelovanja korozije. U sklopu što točnijeg utvrđivanja gubitka mase, potrebno je provesti mjerenje mase na vagi koja podržava razlučivost mjerenja od 0,0001 g. Mjerenje mase uzoraka je provedeno na vagi „KERN ABS 80-4N“ koja podržava zahtjeve za razlučivosti mjerenja koje zahtjeva norma ASTM G48-99a.

Vrlo je važno da se prilikom mjerenja mase uzoraka, njima postupa vrlo oprezno kako bi se izbjeglo eventualno onečišćenje ili oštećenje koje bi moglo naštetiti rezultatima ispitivanja. Sam postupak vaganja uzoraka prije ispitivanja na koroziju, prikazan je na Slika 72.



Slika 72 Mjerenje mase uzoraka prije ispitivanja na koroziju

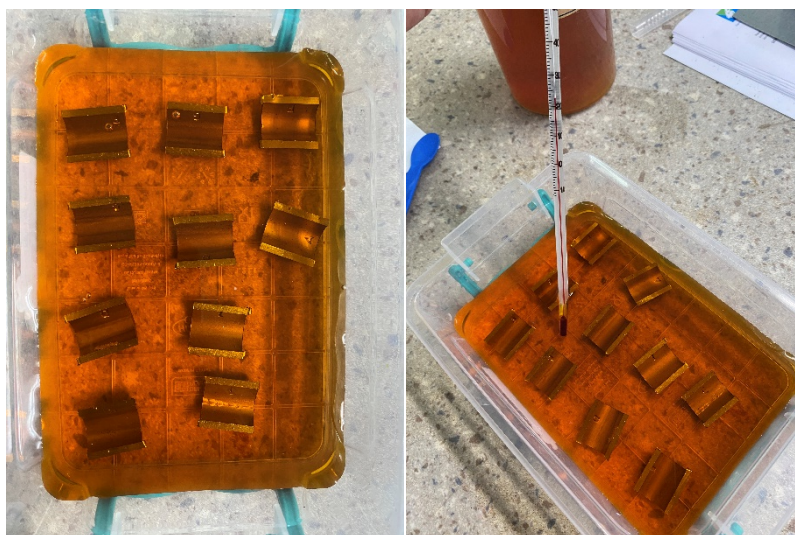
U Tablica 14 su navedeni rezultati mjerenja mase uzoraka prije ispitivanja na koroziju. Vrijedi napomenuti da su razlike u masi pojedinog uzorka posljedica relativno grube tehnologije rezanja u sklopu pripreme za ispitivanja. Međutim, razlika također nastaje kao posljedica količine nastalog oksida na površini zbog visoke razlučivosti mjerenog instrumenta.

Tablica 14 Masa uzoraka prije nagrizanja

Uzorak	Masa uzoraka prije nagrizanja, g
A	12,7782
B	12,7231
C	12,3422
D	12,5812
E	12,5930
F	12,4886
G	11,5527
H	14,3240
I	13,4809
J	11,7016

Norma ASTM G48-99a [37] definira četiri različite metode ispitivanja koje se mogu provesti na uzorcima od visokolegiranog Cr-Ni čelika, a one su nazvane metoda A, B, C i D. U sklopu ovog eksperimenta, provođeno je ispitivanje metodom A. Ova metoda ima za cilj utvrditi relativnu otpornost prema rupičastoj koroziji svih legura iz skupine visokolegiranih Cr-Ni čelika.

Norma ASTM G48-99a [37] pripisuje da se ispitivanje provodi u 600 ml željezovog klorida ($\text{FeCl}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$) u posudi od 1000 ml. U slučaju da su uzorci većih dimenzija, tada koristi omjer količine željezovog klorida u odnosu na površinu ispitnog uzorka koji se mora kretati oko vrijednosti 5 ml/cm^2 . Slika 73 prikazuje ispitne uzorke u željezovom kloridu na početku ispitivanja na rupičastu koroziju.



Slika 73 Ispitni uzorci u željezovom kloridu

Također, norma definira dvije moguće temperature provođenja ispitivanja, a to su 22°C i 50°C uz toleranciju odstupanja u temperaturi od $\pm 2^\circ\text{C}$. U sklopu ovog eksperimenta odabrano je ispitivanje na $22 \pm 2^\circ\text{C}$ kao što je prikazano na Slika 73. Ispitivanje se provodi u trajanju od 72 h pri čemu je preporučljivo da uzorci i željezov klorid tijekom cijelog trajanja ispitivanja miruju te da se temperatura nalazi unutar propisanih granica.

Ispitivanje uzoraka na rupičastu koroziju u željezovom kloridu ($\text{FeCl}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$) provedeno je u periodu:

- Početak: 12:00 h, 14. 11. 2022.
- Kraj: 12:00 h, 17. 11. 2022.

9.11. Analiza rezultata ispitivanja na rupičastu koroziju prema normi ASTM G46-94

Nakon proteka vremena od 72 h u kojem su uzorci bili izloženi agresivnom djelovanju željezova klorida ($\text{FeCl}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$), moglo se pristupiti analizi dobivenih rezultata. Pregled i evaluaciju uzoraka nakon ispitivanja propisuje norma ASTM G46-94 [38]. Samim time, u normi je propisano pravilno postupanje s uzorcima tijekom cijelog trajanja pregleda i evaluacije.

Međutim, prije samog početka pregleda i evaluacije, uzorke je potrebno pripremiti na odgovarajući način. Sam postupak obrade uzoraka nakon provedenog ispitivanja propisan je u normi ASTM G48-99a. Norma propisuje da se uzorci koji su bili podvrgnuti ispitivanju metodom A, nakon ispitivanja (Slika 74) izvade iz željezovog klorida te se prvo isperu vodom i očiste najlonskom četkom kako bi se uklonili tragovi eventualne opće korozije. Slika 75 prikazuje uzorke nakon ispiranja vodom i čišćenja četkom.



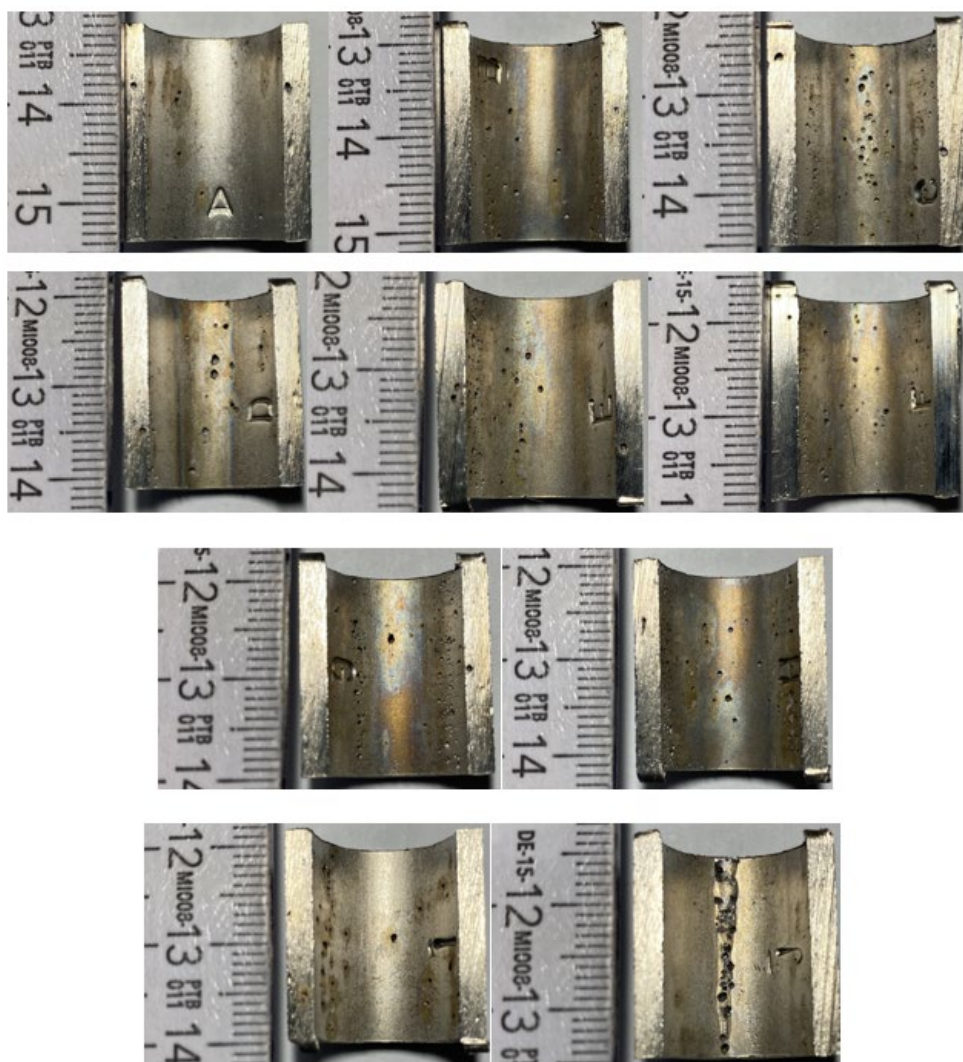
Slika 74 Uzorci nakon 72 h ispitivanja u željezovom kloridu



Slika 75 Uzorci nakon ispiranja i čišćenja četkom

9.11.1. Vizualni pregled uzoraka prema ASTM G46-94

Provedenim ispiranjem i čišćenjem četkom, moglo se pristupiti daljnjoj pripremi uzoraka. Prema preporukama norme ASTM G46-94 [38] nakon čišćenja opće korozije s površine, pristupilo se probijanju rupica nastalih kao posljedice rupičaste korozije s pincetom. Razlog tome je utvrđivanje stvarne veličine rupica nastali od rupičaste korozije, pošto njihova stvarna veličina može biti značajno veća od prvobitnog površinskog otvora. Naravno, time se i značajno olakšava vizualni pregled i evaluacija rezultata. Vrlo je važno da se uzorci nakon provedenog probijanja rupica temeljito očiste u 70 % etanolu i temeljito osuše. U Slika 76 se prikazani svi uzorci nakon provedenog nagrizanja, ispiranja, čišćenja i probijanja rupa te su kao takvi spremni za vizualni pregled.



Slika 76 Uzorci nakon pripreme prema normama ASTM G48-99a i ASTM G46-94

Vizualni pregled uzoraka, proveden je pod običnim osvjetljenjem bez upotrebe dodatnih pomagala u okviru povećala ili mikroskopa prema uputama iz norme ASTM G46-94 [38].

Vizualnim preglednom uzorka A (Slika 76) uočena je pojava rupičaste korozije na površini korijena cijevi oko zone utjecaja topline nastale tijekom navarivanja. Međutim, sama pojava rupica je izrazito male gustoće po površini, a njihova veličina je manjeg karaktera. Raspodjela rupičaste korozije po površini je lokalnog karaktera te tako nije zahvaćena cijela površina navarenog sloja

Vizualnim pregledom uzorka B (Slika 76) uočena je značajnija pojava rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja u odnosu na uzorak A (Slika 76). Gustoća rupičaste korozije je blago intenzivnija, a njihova veličina je ista ili vrlo slična kao kod uzorka A. Također, vrijedi napomenuti da je većina rupičaste korozije smještena u području tamnijih boja nastalih tijekom pobojenja površine te je također lokalnog karaktera.

Vizualnim pregledom uzorka C (Slika 76) uočena je značajnija pojava rupičaste korozije u odnosu na prethodna dva uzorka. Za razliku od uzoraka A i B gdje je pojava rupičaste korozije bila lokalnog karaktera, kod uzorka C ona je rasprostranjena po cijeloj površini korijena navarenog sloja. Samim time, rupičasta korozija je vrlo visoke gustoće dok sama veličina rupica varira u svojoj veličini.

Vizualnim pregledom uzorka D (Slika 76) uočena je puno slabiji intenzitet pojave rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja kada je u pitanju sama gustoća rupica. Međutim, veličina rupica je značajno veća u odnosu na prethodne uzorke. Sama raspodjela rupičaste korozije je po cijeloj površini navarenog sloja pri čemu je veća koncentracija u području tamnijih boja nastalog pobojenja.

Vizualnim pregledom uzorka E (Slika 76) uočena je lokalna pojava rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja. Sama raspodjela rupica je koncentrirana u području tamnijih boja nastalog pobojenja površine pri čemu veličina rupica varira od manjih prema većima. Pri čemu je zastupljenost manjih rupica u području svjetlijih boja nastalog pobojenja.

Vizualnim pregledom uzorka F (Slika 76) uočena je pojava rupičaste korozije po cijeloj površini korijena navarenog sloja. Sama gustoća rupica je veća u području tamnijih boja nastalog pobojenja ali postoji njihova prisutnost i na svjetlijim bojama pobojenja površine. Veličina rupica je približno istog ili vrlo slična po čitavoj površini.

Vizualnim pregledom uzorka G (Slika 76) uočena je značajna pojava rupičaste korozije van zone vidljivog pobojenja površine korijena navarenog sloja, dok je u području pobojenja rupičasta korozija slabo prisutna. Vrijedi napomenuti značajnu razliku u veličini rupica, one smještene van zone vidljivog pobojenja su izrazito male veličine ali velike gustoće, a rupice u području pobojenja su značajno veće ali izrazito male gustoće.

Vizualnim pregledom uzorka H (Slika 76) uočena je pojava rupičaste korozije u području korijena navarenog sloja. Sama raspodjela rupičaste korozije je izražena van područja vidljivog pobojenja površine ali i unutar područja gdje je prisutno pobojenje površine. Rupičasta korozija van zone vidljivog pobojenja je puno veće gustoće ali manjih veličina otvora rupica, a rupičasta korozija unutar zone vidljivog pobojenja je značajno manje gustoća ali veće veličine rupica. Također, vrijedi napomenuti da je pojava većih rupica izražena u području tamnijih boja nastalog pobojenja površine.

Vizualnim pregledom uzorka I (Slika 76) uočena je pojava rupičaste korozije u području korijena navarenog sloja. Prisutnost rupičaste korozije izražena je po samoj granici zone utjecaja topline navarenog sloja, a u zoni korijena je vrlo slabo prisutna. Pojava rupičaste korozije u zoni korijena navarenog sloja je lokalnog karaktera, izrazito male gustoće, a veličina rupica dosta varira.

Vizualnim pregledom uzorka J (Slika 76) uočena je pojava rupičaste korozije u području korijena navarenog sloja. Vrijedi napomenuti da je rupičasta korozije koncentrirana u dijelu gdje došlo do protaljivanja korijena tijekom navarivanja. Rupičasta korozija je izrazito visoke gustoće po površini protaljenog sloja, a veličina rupica varira u svojoj veličini.

Međutim, uz vizualni pregled uzoraka, također se može izvršiti njihovo međusobno uspoređivanje da se utvrdi utjecaj parametara navarivanja na korozijska svojstva korijena navarenog sloja. Pošto uzorci A (Slika 76) i E (Slika 76) predstavljaju bazne uzorke kada su u pitanju parametri navarivanja, njihovim međusobnim uspoređivanjem može se uočiti značajnija pojava rupičaste korozije na uzorku E. Sama raspodjela rupica je veće gustoće na uzorku E te je veličina otvora rupica također veća na uzorku E. To dovodi do zaključka da mješavina argona i vodika ima lošiji utjecaj na korozijska svojstva korijen navarenog sloja u odnosu na čisti argon, ako su ostali parametri navarivanja jednaki (Slika 76). Povećana koncentracija kisika u plinu za korijensku zaštitu također ima negativan utjecaj na korozijska svojstva što je vidljivo na temelju usporedbe uzorka A (Slika 76) i B (Slika 76).

Uzorak B ima veću gustoću rupičaste korozije u korijenu navarenog sloja u odnosu na uzorak A. Međutim, sama veličina otvora rupica je približno jednaka uz tak male varijacije u njihovoj veličini. Također, kod oba uzorka, pojava rupičaste korozije je lokalnog karaktera. Za razliku od povećane koncentracije kisika u plinu za korijensku zaštitu, povećanje unosa topline kao posljedice povećanja struje navarivanja na 75 A ima negativniji utjecaj korozijsku postojanost. To se jasno može vidjeti iz usporedbe uzoraka B i C gdje uzorak C (Slika 76) ima izraženu pojavu rupičaste korozije po čitavoj površini korijena navarenog sloja, a kod uzorka B (Slika 76) je ona manje gustoće i lokalnog karaktera. Također, kod uzorka C su otvori rupica veći u odnosu na one kod uzorka B. Ako se pak uspoređuje brzina navarivanja, kao što je to primjer kod uzoraka I i J, dok su ostali parametri jednaki (Slika 76), jasno se može vidjeti razlika koja nastaje uslijed manje brzine navarivanja u odnosu na veću. Uzorak I (Slika 76) je navarivan s brzinom od 17 cm/min što je za posljedicu imalo manji unos topline (Tablica 12), a uzorak J (Slika 76) je navarivan s brzinom od 9 cm/min što je za posljedicu imalo veći unos topline (Tablica 12). Uzorak J ima značajno veću gustoću rupičaste korozije po cijeloj svojoj površini protaljenog korijena, dok uzorak I ima značajno manju koncentraciju rupičaste koroziju u korijenu navarenog sloja, ali je rupičasta korozija prisutna u većoj gustoći po rubu zone utjecaja topline s većim otvorom rupica. To dovodi do zaključka da unos topline, bilo preko struje navarivanja ili brzine navarivanja ima veliki utjecaj na intenzitet pojave rupičaste korozije ako se kao zaštitni plin za korijensku zaštitu koristi čisti argon.

Kod uzoraka koji su navarivani s mješavinom argona i vodika kao plinom za korijensku zaštitu postoji puno manja razlika u samom nastanku rupičaste korozije na površini korijena navara kod različitih parametara navarivanja kao što je vidljivo na Slika 76. Pošto uzorak E (Slika 76) predstavlja bazni uzorak sa svojim parametrima navarivanja, može se provesti njegovo uspoređivanje s uzorkom D (Slika 76) koji je imao povećanu koncentraciju kisika u plinu za korijensku zaštitu (Inoxline H5). Uspoređujući ta dva uzoraka, jasno je vidljivo da iako uzorci imaju približno jednaku gustoću rupičaste korozije po površini, kod uzorka D je izraženija veličina otvora rupica u odnosu na uzorak E te je time rupičasta korozija intenzivnija. Kod uzorka F (Slika 76) koji je imao veći unos topline (Tablica 12) kroz veću struju navarivanja, ne postoji značajnija razlika u pojavi rupičaste korozije u odnosu na uzorak E (Slika 76) pošto je gustoća i veličina rupica približno jednakog karaktera.

Uzorak G (Slika 76) je kroz veću brzinu navarivanja od 17 cm/min imao i manji unos topline (Tablica 12) tijekom navarivanja, što za posljedicu ima jako slabi intenzitet rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja.

Međutim, uzorak H (Slika 76) je kroz manju brzinu navarivanja od 9 cm/min imao i veći unos topline (Tablica 12) te je time uočljiva izražena pojava rupičaste korozije po rubu zone utjecaja topline. To dovodi do zaključka da sam unos topline ima veliki utjecaj na intenzitet pojave rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja i u području zone utjecaja topline kod uzoraka koji su imali inoxline H5 kao plina za korijensku zaštitu. Međutim, koncentracija kisika u zaštitnom plinu, također radi veliki utjecaj na pojavu rupičaste korozije na površini korijena navarenog sloja.

9.11.2. Mjerenje gubitka mase

Mjerenje gubitka mase uzoraka preporučuje se prema normi ASTM G46-94 u slučaju da površina samog uzorka nije zahvaćena velikoj mjeri s općom korozijom, pošto u tom slučaju dobiveni rezultati nisu vjerodostojni. Samim time, ovaj oblik mjerenja se preporučuje u slučaju da je velika zastupljenost rupičaste korozije na površini ispitnih uzoraka. Iz vizualnog pregleda uzoraka može se uočiti značajna prisutnost rupičaste korozije, a opća korozija se pojavila u zanemarivoj količini. Temeljem toga, uzorci su validni da se na njima provede ispitivanje gubitka mase. Samo mjerenje uzoraka nakon nagrivanja provedeno je na vagi „KERN ABS 80-4N“ (Slika 77).



Slika 77 Mjerenje mase uzoraka nakon nagrivanja

Tablica 15 prikazuje vrijednosti mase uzoraka prije i nakon njihovog izlaganja djelovanju željezovog klorida ($\text{FeCl}_6 \times 6\text{H}_2\text{O}$) u trajanju od 72 h. Samim time, razlika ta dva podatka predstavlja gubitak mase uzoraka koji je prikazan u Tablica 15. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da uzorak A ima najmanji gubitak mase s gubitkom od 0,2596 g te se time potvrđuju prethodne dvije analize bazirane na nastalom pobojenju površine i nastaloj rupičastoj koroziji. Parametri navarivanja (Tablica 11) uzorka A imaju najmanji utjecaj na korozijska svojstva osnovnog materijala. Tome u prilog ide najmanja pojava pobojenja površine (Slika 59), nastanak rupičaste korozije (Slika 76) te najmanji gubitak mase uslijed djelovanja agresivnog sredstva (Tablica 15). Od ostalih uzoraka također vrijedi istaknuti uzorak G čiji gubitak mase iznosi 0,2778 g, što je također potvrđuje prethodne analize slabijeg pobojenja površine (Slika 65) i slabijeg nastanka rupičaste korozije na površini (Slika 76). Uzorak s najvećim gubitkom mase je svakako uzorak H, čiji gubitak mase iznosi 0,4306 g. Iako nakon navarivanja možda nije imao neintenzivnije pobojenje površine (Slika 66), uzorak H je imao pojavu rupičaste korozije visoke gustoće po rubovima zone utjecaja topline te pojavu rupica većih otvora na površini korijena navarenog sloja (Slika 76). Uzorak E se nalazi na drugom mjestu s najvećim gubitkom mase koji iznosi 0,3732 g te također kao uzorak nije imao intenzivniju pojavu pobojenja na površini (Slika 63), ali je vrlo slično kao i uzorak H imao pojavu rupičaste korozije visoke gustoće po rubu zone utjecaja topline i rupice većih otvora (Slika 76) što je svakako doprinijelo njegovom gubitku mase. Od ostalih uzoraka vrijedi istaknuti uzorke I i J koji se ističu sa svojim gubitkom mase u odnosu na nastalo pobojenje površine (Slika 67 i Slika 68). Samim time, uzorak I je imao gubitak mase od 0,3544 g kojem je svakako doprinijela značajnija rupičasta korozija po rubu zone utjecaja topline (Slika 76). Uzorak J je imao gubitak mase od 0,3546 g što je svakako posljedica značajne rupičaste korozije u protaljenom korijenu (Slika 76). Uzorci B i D čija je koncentracija kisika u zaštitnom plinu tijekom navarivanja iznosila 500 ppm su također imali i najintenzivniji nastanak pobojenja na površini (Slika 60 i Slika 62). Samim time, gubitak mase uzorka B iznosi 0,2931 g, a uzorka D iznosi 0,3079 g što je i odraz samog intenziteta nastalog pobojenja na površini pri čemu je kod uzorak D ono bilo intenzivnije (Slika 62). Uzorci C i F se ističu po tome što su oba imali povećani unos topline tijekom navarivanja kao posljedica veće struje navarivanja od 75 A pa tako gubitak mase uzorka C iznosi 0,3172 g, a gubitak mase uzorka F iznosi 0,2974 g. To je također direktna veza na nastanak pobojenja površine, pošto je kod uzorka C ono bilo intenzivnije (Slika 76) u odnosu na uzorak F (Slika 64).

Tablica 15 Gubitak mase uzoraka

Uzorak	Masa uzoraka prije nagrizanja, g	Masa uzoraka nakon nagrizanja, g	Gubitak mase, g	Postotak gubitka mase, %
A	12,7782	12,5186	0,2596	2,031585
B	12,7231	12,4300	0,2931	2,303684
C	12,3422	12,0250	0,3172	2,570044
D	12,5812	12,2733	0,3079	2,447302
E	12,5930	12,2198	0,3732	2,963551
F	12,4886	12,1912	0,2974	2,381372
G	11,5527	11,2749	0,2778	2,404633
H	14,3240	13,8934	0,4306	3,006144
I	13,4809	13,1265	0,3544	2,628905
J	11,7016	11,3470	0,3546	3,030355

Međutim, početne mase svih uzoraka nisu jednake te da bi se dobio stvaran utjecaj gubitaka mase na pojedini uzorak, potrebno je izračunati postotak gubitka mase svakog uzorka. Rezultati gubitka mase u postocima za svaki uzorak su prikazani u Tablica 15. Na temelju tih rezultata ističu se dva uzorka, a to su H i J čiji postotak gubitka mase prelazi 3 %. Time se zaključuje da sama brzina navarivanja ima veliki utjecaj na intenzitet pojave rupičaste korozije te time i na sam gubitak mase pošto su oba uzorka navarivana s brzinom od 9 cm/min što je time stvorilo i veći unos topline (Tablica 12) u osnovni materijal. Također, uspoređujući sve uzorke koji su imali povećani unos topline (C, F, H, J), bilo preko smanjene brzine navarivanja ili povećane struje navarivanja, jasno je vidljivo na temelju rezultata, da su uzorci (C i J) s čistim argonom kao zaštitnim plinom, osjetljiviji na povećani unos topline nego oni s mješavinom argona i vodika (F, H). Do tog zaključka se dolazi na temelju toga što uzorci iz iste grupe parametara imaju veći postotak gubitka mase ako su imali čisti argon kao plin za korijensku zaštitu. Uzorci C i F su navarivani sa strujom jačine 75 A pri čemu postotak gubitka mase uzorka C (Argon 5.0) iznosi 2,570044 %, a uzorka F (Inoxline H5) iznosi 2,381372 %.

Također, uzorci H i J su imali smanjenu brzinu navarivanja od 9 cm/min te time veći unos topline (Tablica 12), pri čemu postotak gubitka mase uzorka J (Argon 5.0) iznosi 3,030355 %, a uzorka H (Inoxline H5) iznosi 3,006144 %. Isti trend se može uočiti i kod uzoraka koji su imali povećanu brzinu navarivanja od 17 cm/min. Uzorak I (Argon 5.0) je imao postotak gubitka mase od 2,628905 %, a uzorak G (Inoxline H5) od 2,404633 %.

Međutim, kod uzoraka (B i D) koji su navarivani s povećanim sadržajem kisika (500 ppm) u plinu za korijensku zaštitu, situacija je obrnuta. Uzorak B koji je imao argon 5.0 kao plin za korijensku zaštitu ima postotak gubitka mase od 2,303684 %, a uzorka D koji je imao inoxline H5 kao plin za korijensku zaštitu ima postotak gubitka mase od 2,447302 %.

Temeljem tih podataka, zaključuje se da su uzorci koji imaju argon (Argon 5.0) kao plin za korijensku zaštitu osjetljiviji na unos topline u odnosu na one koji koriste mješavinu argona i vodika (Inoxline H5). Samim time, korozijska postojanost sa stajališta gubitka mase je slabija kod uzoraka s argonom kao plinom za korijensku zaštitu. Međutim, kada je u pitanju koncentracija kisika u plinu za korijensku zaštitu, u tom slučaju uzorci s mješavinom argona i vodika pokazuju slabiju korozijsku postojanost sa stajališta gubitka mase.

9.12. Izrada makroizbruska

Nakon provedenog ispitivanja na rupičastu koroziju, ostatak baznih uzorka je ponovno rezan na mehaničkoj pili „BS 350 GH“ u sklopu dobivanja manjih ispitnih uzoraka za izradu makroizbruska. Samim time, izrada makroizbruska obuhvaća operacije rezanja, brušenja, poliranja i kemijskog nagrivanja. Za izradu makroizbrusaka izrezani su dijelovi u području završetka navarenog sloja (Slika 78) kako bi se utvrdila dubina penetracije ovisno o parametrima navarivanja. Uzorci su rezani na način da se obuhvati 7 do 10 mm završetka navarenog sloja. Razlog tome je relativno gruba tehnologija rezanja koja nije omogućavala preciznije rezanje ispitnih uzoraka te sama razlika u duljini ispitnih uzoraka koja se razlikuje za 4 mm.



Slika 78 Uzorci za izradu makroizbruska

Brušenje ispitnih uzoraka nakon rezanja je provedeno brusnim papirom različitih granulacija. Na početku brušenja je korišten brusni papir grublje granulacije koja iznosila P80, nakon kojeg je slijedio brusni papir granulacije P100, a završetak brušenja je proveden brusnim papirom granulacije P200. Ostali parametri tijekom brušenja su bili:

- Vrsta abraziva: silicijev karbid (SiC).
- Brzina vrtnje: 300 okretaja u minuti.
- Hlađenje dodirne površine: vodom.
- Primijenjena sila: ručna sila.
- Trajanje jednog koraka brušenja: 10 s.

Tijekom samog procesa, bilo je potrebno postići ravnomjerno brušenje površine ispitnog uzorka kako bi se postigla što ravnomjernije obrađena površina osnovnog materijala za kasniju makroskopsku analizu. Posebno je važno obratiti na pozornost u slučaju ručnog brušenja da se uzorci drže okomito na brusni papir kako bi se spriječilo nakošenje obradne površine.

Nakon brušenja, uzorci su podvrgnuti poliranju. Poliranje ispitnih uzoraka vršeno je u dva koraka. U prvom koraku je korištena dijamantna pasta promjera abrazivnih čestica 3 μm na tkanini za poliranje, a u drugom koraku je korištena dijamantna pasta promjera 1 μm abrazivnih čestica na tkanini za poliranje. Upotrebom lubrikanta, uzorak se štiti od povišene temperature tijekom samog procesa poliranja. Trajanje postupka poliranja je oko 2-3 minute nakon čega se uzorak ispiru u vodi. Ispiranjem se skida višak sredstva za poliranje i abrazivne čestice materijala uzorka i mase u koju je uzorak zaliven. Provedenim poliranjem, izvršena je vizualni pregled sjajne metalne površine te nisu uočene nikakve indikacije u okviru pora, uključaka ili pukotina. To nam ukazuje da je postupak navarivanja proveden pravilno te da su parametri navarivanja bili unutar dozvoljenih granica koje ne rade štetan utjecaj na strukturu osnovnog materijala.

Nagrizanje poliranih uzoraka je izvršeno kako bi se mogla lakše analizirati makrostruktura poprečnog presjeka. Sam cilj nagrivanja je postići selektivnu koroziju polirane površine tako da se jasno može raspoznati razlika između osnovnog materijala i onog koji je bio taljen tijekom navarivanja. Postupak nagrivanja je proveden Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Pošto se u ovom slučaju radi o visokolegiranom Cr-Ni čeliku, provedeno je elektrolitičko nagrivanje, pri čemu je uzorak bio anoda, a elektrolit je bio katoda.

Parametri elektrolitičkog nagrizanja su sljedeći:

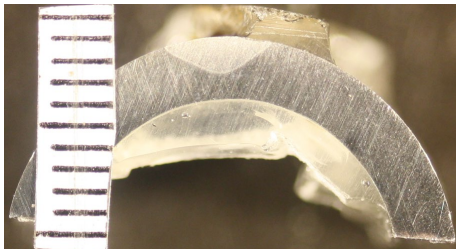
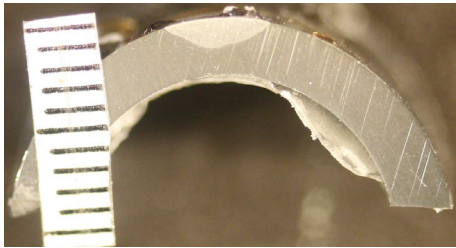
- Kiselina: oksalna kiselina (10 %).
- Napon: 6 V.
- Struja: 2 A.
- Vrijeme trajanja nagrizanja: 15 s

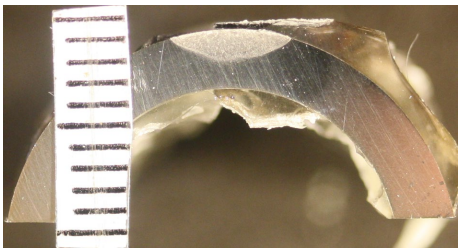
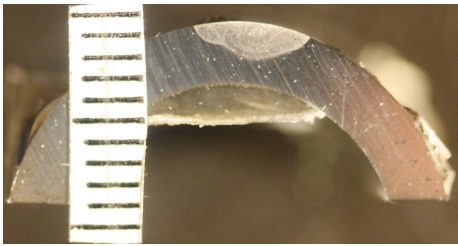
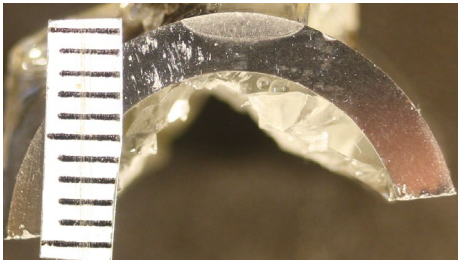
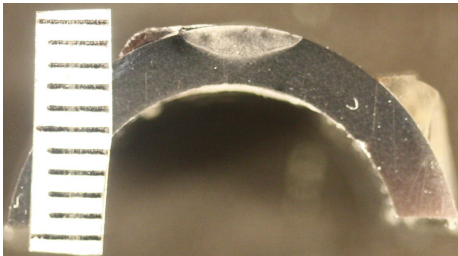
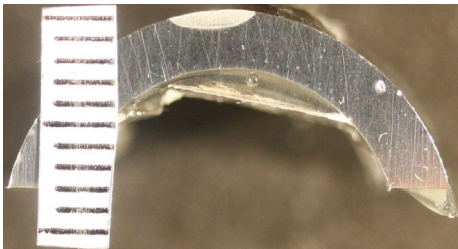
Vrlo je važno da se uzorci nakon provedenog nagrizanja ispiru u toploj vodi kako bi se zaustavila kemijska reakcija te time spriječilo prekomjerno nagrizanje.

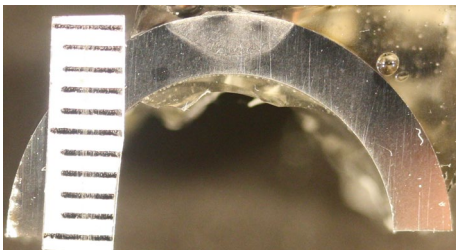
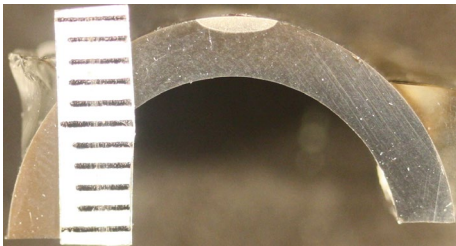
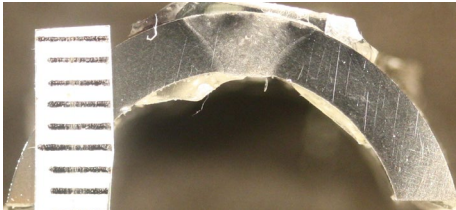
9.13. Makroanaliza ispitnih uzoraka

Provedenim nagrizanjem linije između osnovnog materijala i navarenog sloja su bile jasno vidljive te se moglo pristupiti izradi makrosnimka ispitnih uzorka u sklopu makroanalize poprečnog presjeka. U Tablica 16 su prikazane makrosnimke ispitnih uzoraka s parametrima navarivanja.

Tablica 16 Makrosnimke ispitnih uzoraka nakon nagrizanja

Uzorak	Makrosnimak	Jakost struje, A	Brzina navarivanja cm/min	Unos topline, kJ/cm
A	 Slika 79 Makrosnimak uzorka A	70	13	2,48
B	 Slika 80 Makrosnimak uzorka B	70	13	2,48

C	 Slika 81 Makrosnimak uzorka C	75	13	2,70
D	 Slika 82 Makrosnimak uzorka D	70	13	2,48
E	 Slika 83 Makrosnimak uzorka E	70	13	2,48
F	 Slika 84 Makrosnimak uzorka F	75	13	2,70
G	 Slika 85 Makrosnimak uzorka G	70	17	1,89

H	 Slika 86 Makroslimak uzorka H	70	9	3,58
I	 Slika 87 Makroslimak uzorka I	70	17	1,89
J	 Slika 88 Makroslimak uzorka J	70	9	3,58

Kvalitativnom vizualnom analizom uzoraka prikazanih u Tablica 16 vidljivo je da različiti parametri navarivanja utječu različito na oblik i penetraciju navarenog sloja. Pri čemu je glavni faktor unos topline u osnovni materijal pri čemu on ovisi najviše o struji navarivanja i brzini navarivanja. Vrijedi napomenuti da kod uzoraka (A, B, C, D, E, F) koji su navarivani sa strujama od 70 A i 75 A te brzinom od 13 cm/min ne postoji značajna razlika u površini navarenog sloja iako se ona zanemarivo razlikuje u svom obliku. Međutim, kod uzoraka koji su imali različite brzine navarivanja (G, H, I, J) od 17 cm/min i 9 cm/min, a istu struju od 70 A ta razlika je puno veća. Kod uzoraka s manjom brzinom navarivanja (H, J) došlo je do pune penetracije kroz poprečni presjek, pri čemu je kod uzorka J došlo i do protaljivanja korijena navarenog sloja uslijed velikog unosa topline u osnovni materijal. Uzorci s većom brzinom navarivanja (G, I) samim time, imaju i puno manju površinu navarenog sloja uslijed manjeg unosa topline u osnovni materijal.

10. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu je opisan TIG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na tehnologiju zavarivanja austenitnih visokolegiranih Cr-Ni čelika. Provedeno je automatizirano TIG navarivanje u svrhu simulacije utjecaja različitih parametara navarivanja na korozijska svojstva osnovnog materijala. Mijenjanjem parametara navarivanja kao što su jačina struje, brzina navarivanja te plina za korijensku zaštitu i koncentracije kisika u plinu za korijensku zaštitu simulirani su različiti utjecajni parametara na svojstva korijena navarenog sloja.

Samim time, uzorci koji koriste argon kao plin za korijensku zaštitu su puno osjetljiviji na povećani unos topline u odnosu na uzorke koji koriste mješavinu argona i vodika. Razlog tome je u samom svojstvu plina za korijenku zaštitu. Argon kao plin ima slabiju toplinsku vodljivost u odnosu na vodik, čija je toplinska vodljivost veća. Samim time, tijekom navarivanja, vodik kao primjesa argonu je doprinio boljem odvođenju topline iz korijena navarenog sloja pošto se toplinska vodljivost zaštitnog plina povećala u odnosu na čisti argon. Takvo odvođenje topline je sasvim sigurno doprinijelo manjem zagrijavanju površine korijena navara što je kao rezultat imalo i bolju korozijsku postojanost.

Međutim, kada je u pitanju koncentracija kisika u plinu za korijensku zaštitu, čisti argon u tom slučaju pokazuje bolji utjecaj na korozijska svojstva korijena u odnosu na mješavinu argona i vodika. Razlog tome je sama čistoća plina, pošto je argon 5.0 plin visoke čistoće te kao takav može podnijeti veću koncentraciju kisika kao nečistoće. Za razliku od mješavine argona i vodika gdje se vodik može smatrati dobrom nečistoćom unutar te plinske mješavine. Samim time, povišena koncentracija kisika unutar takve plinske mješavine radi štetan utjecaj na korozijsku postojanost korijena navarenog sloja.

Temeljem tih zaključaka, preporučuje se uporaba argona kao plina za korijensku zaštitu u situacijama gdje se očekuje povećana koncentracija kisika u korijenu navarenog sloja zbog više čistoća zaštitnog plina. Međutim, u situacijama gdje se očekuje povećani unos topline u materijal bilo kroz struju navarivanja ili brzinu navarivanja, preporučuje se uporaba mješavine argona i vodika kao plina za korijensku zaštitu zbog bolje toplinske vodljivosti zaštitnog plina. Također, vrijedi napomenuti da se ne preporučuje veća koncentracija kisika u plinu za korijensku zaštitu od 500 ppm, pri čemu je poželjna i preporučena koncentracija ispod 100 ppm čime se u velikoj mjeri osigurava korozijska postojanost osnovnog metala i metala navara uz vođenja računa o ostalim parametrima navarivanja.

11. LITERATURA

- [1] Available from: <https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/gtawbook.pdf> (dostupno 12. 09. 2022).
- [2] Samardžić I.: Postupci zavarivanja - Nastavni materijali. Slavonski Brod, 2019.
- [3] Available from: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (dostupno 12. 09. 2022).
- [4] Kumar V, Lucas W, Howse D, Melton G, Raghunathan S, Vilarinho L. Investigation of the A-TIG mechanism and the productivity benefits in TIG welding. 15th International Conference on the Joining of Materials, 2009.
- [5] Rodrigues A, Loureiro A, Batista A. Effect of activating fluxes on bead geometry and on microstructure of a-TIG welds. Welding Research Abroad, vol. 52, no. 1, 2006.
- [6] Kralj S, Kožuh Z, Garašić I, Panjković V. Automatizirano TIP-TIG zavarivanje. Slavonski Brod, 2009.
- [7] Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/TIP_TIG#/media/File:TIP_TIG_Schwei%C3%9Fbrenner.jpg (dostupno 22. 09. 2022).
- [8] Available from: <https://www.k-tig.com/k-tig-information-videos> (dostupno 22. 09. 2022).
- [9] Cordaš D. Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom. Pula, 2009.
- [10] Available from: <https://welmax.no/wp-content/uploads/2017/10/Orbital-DP-TIG.pdf> (dostupno 28. 09. 2022).
- [11] Available from: <https://www.global-welding-technologies.com/en/polysoude> (dostupno 28. 09. 2022).
- [12] Kou S. Welding Metallurgy, 2nd Edition. New Jersey: Wiley; 2003.
- [13] Marušić V.: Kotlovski i nehrđajući čelici - Nastavni materijali. Slavonski Brod, 2019.
- [14] Jovanović M, Adamović A, Lazić V, Ratković N, TIG zavarivanje. Kragujevac: Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2006.

-
- [15] "HRN EN ISO 14343:2017 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Žičane elektrode, trakaste elektrode, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i vatrootpornih čelika -- Razredba."
- [16] Lippold JC. *Welding Metallurgy and Weldability*. New Jersey: Wiley; 2015.
- [17] Kujanpää VP, David SA, White CL. Formation of hot cracks in austenitic stainless steel welds-solidification cracking. *Weld J*, vol. 65, no. 8, 1986.
- [18] Available from: https://www.researchgate.net/publication/293175450_Reduction_of_intergranular_corrosion_of_304_austenitic_Stainless_Steels_during_maintenance (dostupno 28. 09. 2022).
- [19] Phillips DH, *Welding Engineering: An Introduction*. New Jersey: Wiley; 2016.
- [20] Kah P, Martikainen J. "Influence of shielding gases in the welding of metals." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 9–12, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4111-6.
- [21] Kralj S, Kožuh Z, Andrić Š, *Zavarivački i srodni postupci*. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u Zagrebu; 2015.
- [22] Available from: <https://www.yumpu.com/en/document/read/53006342/shielding-gases-selection-manual> (dostupno 20. 10. 2022).
- [23] Available from: <https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje> (dostupno 22. 10. 2022).
- [24] Available from: https://www.boc-gas.com.au/en/images/BOC%20Purging%20while%20welding%20brochure_tcm351-68116.pdf (dostupno 22. 10. 2022).
- [25] Available from: <https://paktechpoint.com/gas-shielding-weld-purging-and-backup-techniques/> (dostupno 22. 10. 2022).
- [26] Available from: <https://www.ien.eu/article/measuring-the-oxygen-level-during-welding-stainless-steel/> (dostupno 22. 10. 2022).
- [27] Available from: https://nissho-astec.com/business_top/manufacturing-process/tig/ (dostupno 22. 10. 2022).
- [28] Available from: <https://www.forensicsdetectors.com/blogs/articles/how-are-oxygen-analyzers-used-in-welding> (dostupno 22. 10. 2022).
-

-
- [29] Handbook of Stainless Steel. Helsinki: Outokumpu Oyj; 2017.
- [30] Jegdić BV, Bobić BM. Preventing and removing of heat tint. Zavarivanje i zavarene konstrukcije, vol. 59, no. 1, 2015, doi: 10.5937/zzk1401011j.
- [31] Available from: <https://www.nitty-gritty.it/fr/electrochemical-pickling/> (dostupno 25. 10. 2022).
- [32] Bäßler R. Corrosion Books: Outokumpu Corrosion Handbook. *Materials and Corrosion*, vol. 56, no. 9, 2005, doi: 10.1002/maco.200590092.
- [33] Available from: <https://www.jazsurface.com/wp-content/uploads/2019/05/jaz-aplicaciones-limpieza-soldadura-4.jpg> (dostupno 26. 10. 2022).
- [34] Available from: https://www.voestalpine.com/welding/var/em_plain_site/storage/images/media/images/content-structure/brands/boehler-welding/finishing-chemicals/brush-pickling/185843-2-eng-US/Brush-pickling_350px.jpg (dostupno 26. 10. 2022).
- [35] Available from: <https://en.euroweldgroup.lt/post/ka-verta-zinoti-apie-elektrochemini-siuliu-valyma> (dostupno 26. 10. 2022).
- [36] “HRN EN 10088-3:2015 Nehrđajući čelici -- 3. dio: Tehnički uvjeti isporuke za poluproizvode, šipke, valjanu žicu, vučenu žicu, profile i svijetlo vučene proizvode od korozijski postojanih čelika za opće namjene (EN 10088-3:2014)”.
- [37] ASTM International, “ASTM G48-99A (2010) - Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution,” 2010.
- [38] ASTM International, “ASTM G46-94 (2018) - Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion.” 2018.

PRILOZI

I. CD-R disk