

Optimizacija tehnologije zavarivanja za spoj čelika AISI 321 i AISI 316

Vidranski, Denis

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:235:650973>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-05**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Denis Vidranski

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Denis Vidranski

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu dr. sc. Matiji Bušiću za pomoć i savjete tijekom izrade ovog rada te realizaciju eksperimentalnog dijela rada. Svojim vodstvom i komentarima uvelike su unaprijedili kvalitetu ovog rada.

Zahvaljujem se poduzeću Monter SM, a posebno direktoru EWE/CIWE, IWIP-C Tomislavu Kelavi, dipl. ing. stroj. na korisnim savjetima, ustupljenim materijalima te realizaciji teoretskog i eksperimentalnog dijela rada, svojim vodstvom i komentarima uvelike je unaprijedio kvalitetu ovog rada..

Zahvaljujem se voljenoj djevojci Maji i cijeloj svojoj obitelji za bezuvjetnu potporu, strpljenje, povjerenje i razumijevanje tokom cijelog studija, a najveća hvala baki Janici i djedu Milanu koji su mi velikim odricanjima omogućili studiranje. Od srca Vam hvala!

Denis Vidranski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite 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:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Denis Vidranski** Mat. br.:0035191759

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija tehnologije zavarivanja za spoj čelika AISI 321 i AISI 316**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of Welding Technology for Joining of Steels AISI 321 and AISI 316**

Opis zadatka:

Na temelju literaturnih podataka proučiti osnovne probleme zavarljivosti austenitnih čelika s posebnim naglaskom na AISI 321 i AISI 316. Opisati specifičnosti zavarivanja ovih čelika TIG i MAG postupkom. Posebno obraditi odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina. Ustanoviti kritična područja unosa topline i analizirati moguće posljedice primjene neodgovarajućih parametara sa stanovišta korozijske postojanosti, eksploatacijskih uvjeta i mehaničkih značajki spoja.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućim uzorcima odrediti parametre zavarivanja i vrstu dodatnih materijala za spoj čelika AISI 321 i AISI 316. Po mogućnosti primijeniti postupak MAG i TIG uz primjenu više kombinacija zaštitnog plina i dodatnog materijala. Odrediti okvir upotrebljivih vrijednosti unosa topline te na zavarenim uzorcima provesti prikladna ispitivanja. U konačnici definirati optimalnu tehnologiju za zavarivanje čelika AISI 321 i AISI 316 te donijeti zaključke o mogućnosti primjene u realnim uvjetima.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predvideni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI	3
2.1. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika	5
2.2. Najčešće korišteni austenitni čelici	10
2.2.1. X5 CrNi 18-10 (W.Nr. 1.4301, X 5 CrNi 18 9, AISI 304, Č.4580, Prokron 11 ekstra).....	12
2.2.2. X2 CrNi 19-11 (W.Nr. 1.4306, X 2 CrNi 18 9, AISI 304L).....	12
2.2.3. X5 CrNiMo 17-12-2 (W.Nr. 1.4401, X 5 CrNiMo 18 10, AISI 316, Č.4573, Prokron 12)	13
2.2.4. X2CrNiMo17-12-2 (W.Nr. 1.4404, X2 CrNiMo 18 10, AISI 316L*, Č. 45703, ACRONI12NC)	13
2.2.5. X2CrNiMo18-14-3 (W.Nr. 1.4435, X 2 CrNiMo 18 12, AISI 316L, Č.45704) 15	
2.2.6. X6CrNiMo17-12-2 (W.Nr. 1.4571, X 10 CrNiMoTi 18 10, AISI 316Ti, Č.4573, Prokron 12 specijal)	16
2.2.7. X2NiCrMoCu 25 20 5 (W.Nr. 1.4539, AISI 904L).....	17
2.2.8. W.Nr. 1.4541 (AISI 321, Č.4572)	17
2.3. Zavarljivost austenitnih čelika	19
2.3.1. Opće smjernice za zavarivanje austenitnih čelika.....	20
2.4. Korozijska postojanost austenitnih nehrđajućih čelika.....	20
2.4.1. Korozija austenitnih čelika.....	21
2.4.2. Vrste lokalne korozije	22
2.4.3. Tipične greške u zavarenim spojevima austenitnih nehrđajućih čelika.....	23
3. POSTUPCI ZAVARIVANJA AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA.....	25
3.1. TIG zavarivanje.....	25
3.1.1. Zaštitni plin za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika.....	28
3.2. MAG zavarivanje austenitnih čelika.....	31
3.2.1. Prijenos metala električnim lukom pri MIG/MAG zavarivanju	33
3.2.2. Dodatni materijal za MAG zavarivanje austenitnih čelika	35
3.2.3. Zaštitni plinovi za MAG/MIG zavarivanje	36
4. PRIPREMA SPOJA ZA ZAVARIVANJE	39
5. EKSPERIMENTALNI DIO	41
5.1. Uvod.....	41
5.2. Priprema ispitnih ploča	42
5.3. Zavarivanje ispitnih uzoraka	43

5.3.1.	Zavarivanje ispitnog uzorka 1	48
5.3.2.	Zavarivanje ispitnog uzorka 2	51
5.3.3.	Zavarivanje ispitnog uzorka 3	53
5.3.4.	Zavarivanje ispitnog uzorka 4	54
5.3.5.	Zavarivanje ispitnog uzorka 5	55
5.4.	Čišćenje zavarenih spojeva nakon zavarivanja	58
5.5.	Snimanje računalnom radiografijom i analiza rezultata	61
5.6.	Rezanje ispitnih uzoraka	65
5.7.	Ispitivanje savijanjem	67
5.8.	Statičko - vlačno ispitivanje	70
5.9.	Mikrostrukture zavarenih ispitnih uzoraka	77
5.10.	Analiza geometrijskih značajki zavarenog spoja	82
6.	ZAKLJUČAK	86
	LITERATURA	87

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) potpuni austenit; b) austenit i delta ferit [3].....	6
Slika 2.	Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70% Fe [3].....	7
Slika 3.	Fazni dijagrami dobiveni pomoću ThermoCalc sustava [3]	8
Slika 4.	Precipitacija karbida tipa $M_{23}C_6$ u austenitnom nehrđajućem čeliku X5CrNi18-10 (304) [3].....	9
Slika 5.	Utjecaj sigma faze na udarni rad loma Fe-Cr-Ni legura pri sobnoj temperaturi [3]9	
Slika 6.	Model nastanka i rasta sigma faze [3]	10
Slika 7.	Karakteristične tople pukotine kod zavarivanja austenitnog čelika [16] a) lice zavarenog spoja b) makrostruktura	24
Slika 8.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [1]	26
Slika 9.	Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnih plinova [7].....	26
Slika 10.	Razlika penetracije kod korištenja zaštitnih plinova argona (Ar) i helija (He) [8]30	
Slika 11.	Utjecaj zaštitnog plina na zagrijavanje osnovnog materijala i penetraciju [7].....	31
Slika 12.	Shematski prikaz procesa MIG/MAG zavarivanja (a) i uređaja (b) [7].....	32
Slika 13.	Presjeci praškom punjenih žica [7]	36
Slika 14.	Oblik penetracije zavarenog spoja ovisno o primijenjenom zaštitnom plinu [7]..	37
Slika 15.	Kemijske reakcije pri MAG (CO_2)zavarivanju čelika [7].....	38
Slika 16.	Sučeljeni "V" spoj limova [15].....	39
Slika 17.	Obostrani sučeljeni "V" spoj limova [15]	39
Slika 18.	Sučeljeni jednostrani "U" spoj limova [15].....	40
Slika 19.	Obostrani sučeljeni "U" spoj za ploču [15]	40
Slika 20.	Rezanje uzoraka na stroju ZINSER 2326 plazmom.....	42
Slika 21.	Aparati za zavarivanje a) KEMPPI MASTERTIG MLS 4000 b) KEMPPI PROMIG 530	43
Slika 22.	Zavarivanje prve popune uzorka 1	48
Slika 23.	Izgled zavara ispitnog uzorka 1	49
Slika 24.	Pobrušeno stanje zavarenog spoja sa strane korijena	49
Slika 25.	Zavareni spoj sa strane korijena nakon protaljivanja	50
Slika 26.	Zavareni spoj popune broj 1 ispitnog uzorka 2	51
Slika 27.	Izrezan (pobrušen) zavareni spoj sa strane korijena.....	52
Slika 28.	Korijen zavarenog spoja ispitnog uzorka 2	52
Slika 29.	Zavareni spoj ispitnog uzorka 2	53
Slika 30.	TIG zavarivanje ispitnog uzorka 5	56
Slika 31.	Popuna zavarena praškom punjenom žicom	56
Slika 32.	Završni sloj ispitnog uzorka 5	57
Slika 33.	Nanošenje BEIZPASTE kistom	58
Slika 34.	Izgled ispitnih površina lica zavara nakon čišćenja Beizpastom	59
Slika 35.	Izgled ispitne površine korijena zavara nakon čišćenja Beizpastom	60
Slika 36.	Radiogram ispitnog uzorka 1	62
Slika 37.	Radiogram ispitnog uzorka 2	62
Slika 38.	Radiogram ispitnog uzorka 3	63
Slika 39.	Radiogram ispitnog uzorka 4	63
Slika 40.	Radiogram ispitnog uzorka 5	64

Slika 41.	Plan rezanja ispitnog uzorka 1	65
Slika 42.	Piljenje uzoraka na tračnoj pili	66
Slika 43.	Postupak savijanja	67
Slika 44.	Savijanje ispitnih uzoraka na FSB-u	68
Slika 45.	Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 1	68
Slika 46.	Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 2	69
Slika 47.	Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 3	69
Slika 48.	Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 4	69
Slika 49.	Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 5	70
Slika 50.	Statičko - vlačno ispitivanje ispitnog uzorka 2 na kidalici EU 40 MOD	71
Slika 51.	Izgled epruveta nakon statičko - vlačnog ispitivanja	72
Slika 52.	Lom u zavarenom spoju ispitnog uzorka 4	73
Slika 53.	Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 1	74
Slika 54.	Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 2	75
Slika 55.	Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 3	75
Slika 56.	Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 4	76
Slika 57.	Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 5	76
Slika 58.	Mikroskop OLYMPUS GX51	77
Slika 59.	Makrouzorak ispitne ploče 1	83
Slika 60.	Makrouzorak ispitne ploče 2	83
Slika 61.	Makrouzorak ispitne ploče 3	84
Slika 62.	Makrouzorak ispitne ploče 4	84
Slika 63.	Makrouzorak ispitne ploče 5	85

POPIS TABLICA

Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i ostalih legirnih elemenata u austenitnim čelicima [3].....	4
Tablica 2. Precipitati koji mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima [3].....	8
Tablica 3. Kemijski sastav čelika AISI 304 [1].....	12
Tablica 4. Kemijski sastav čelika AISI 304L [1].....	13
Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 316 [1].....	13
Tablica 6. Kemijski sastav čelika AISI 316L* [1].....	14
Tablica 7. Mehanička svojstva čelika AISI 316L* [4].....	14
Tablica 8. Kemijski sastav čelika AISI 316L [1].....	15
Tablica 9. Kemijski sastav čelika AISI 316Ti [1].....	16
Tablica 10. Kemijski sastav čelika AISI 904L [1].....	17
Tablica 11. Kemijski sastav čelika AISI 321 [4].....	18
Tablica 12. Mehanička svojstva čelika AISI 321 [4].....	18
Tablica 13. Vrste struja kod TIG zavarivanja [7].....	27
Tablica 14. Osnovni i dodatni materijali ispitnih uzoraka.....	42
Tablica 15. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler SAS 2-IG [12].....	44
Tablica 16. Mehanička svojstva zavara dodatnog materijala Böhler SAS 2 IG [12].....	44
Tablica 17. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M-IG [12].....	45
Tablica 18. Mehanička svojstva zavara dodatnog materijala Böhler EAS 4-MIG [12].....	45
Tablica 19. Mehanička svojstva zavarenog spoja izvedenog praškom punjenom žicom Böhler SAS 2 PW FD [12].....	47
Tablica 20. Unosi topline ispitnog uzorka 1.....	50
Tablica 21. Unosi topline ispitnog uzorka 2.....	53
Tablica 22. Unosi topline ispitnog uzorka 3.....	54
Tablica 23. Unosi topline ispitnog uzorka 4.....	55
Tablica 24. Unosi topline ispitnog uzorka 5.....	57
Tablica 25. Parametri radiografskog snimanja.....	61
Tablica 26. Dimenzije uzoraka ispitivanih statičkim - vlačnim ispitivanjem.....	72
Tablica 27. Mehanička svojstva dobivena statičkim - vlačnim ispitivanjem.....	73
Tablica 28. Mikrostrukture osnovnih materijala ispitnih uzoraka.....	78
Tablica 29. Mikrostrukture metala zavara i linije staljivanja ispitnih uzoraka.....	79
Tablica 30. Mikrostrukture korijena i lica zavarenih spojeva ispitnih uzoraka.....	80

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q_z	kJ/cm	Unos topline zavarivanja
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Granica razvlačenja
A	%	Istezljivost
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	lit/min	Protok plina
L	H	Induktivitet
d_z	mm	Promjer žice
η_{el}		Koeficijent korisnog djelovanja električnog luka

POPIS KRATICA

AISI	American Iron and Steel Institute
MAG/MIG	Metal Active/Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
EPP	Zavarivanje pod zaštitom praška
ZUT	Zona utjecaja topline
FCC	Kubična plošno centrirana rešetka
BCC	Kubična prostorno centrirana rešetka
EN	Europski standard
NDT	engl. non – destructive testing
SHIP	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje

SAŽETAK

U ovom je radu ispitan utjecaj dodatnih materijala, zaštitnih plinova i postupka zavarivanja na karakteristike zavarenog spoja čelika AISI 316L i AISI 321. U teorijskom dijelu su dani osnovni podaci o austenitnim nehrđajućim čelicima, dodatnim materijalima za zavarivanje te o postupcima zavarivanja s naglaskom na MAG (Metal Active Gas) i TIG (Tungsten Inert Gas) postupak zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je zavarivanje pet uzoraka kombinacijom zavarivanja TIG i MAG praškom punjenom žicom, sa dva različita zaštitna plina i tri različita dodatna materijala. Osnovni materijali su austenitni nehrđajući čelici oznake AISI 316L i AISI 321, a dodatni materijali su žice proizvođača Böhler oznake SAS 2-IG, EAS 4 M-IG i SAS 2 PW-FD. Nakon zavarivanja pripremljeni su uzorci na kojima je provedeno ispitivanje na temelju kojeg su doneseni zaključci o utjecaju dodatnog materijala, postupka zavarivanja i zaštitnog plina na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelici, zavarivanje, mehanička svojstva

SUMMARY

This thesis describes the influence of filler materials, shielding gases and types of welding procedures intended for welding austenitic steels. The theoretical part presents basic information about austenitic stainless steels, filler materials and welding processes with special emphasis on FCAW and TIG welding processes.

The experimental part is carried out on five different samples with TIG and FCAW welding processes with two different shielding gases and three different filler materials. Base materials are austenitic stainless steels grade AISI 316L and AISI 321, welded with Böhler filler materials SAS 2-IG, EAS 4 M-IG and SAS 2 PW-FD. After welding, samples were investigated in order to determine influence of the filler materials, shielding gas and type of welding process on mechanical properties of weld.

Key words: austenitic stainless steels, welding, mechanical properties

1. UVOD

Korozijski postojani konstrukcijski materijali postaju sve zastupljeniji u većini grana industrije. Takvi materijali sve se više koriste u građevinarstvu, brodogradnji te općenito u svim granama strojarstva. Jedna od najvažnijih skupina konstrukcijskih korozijski postojanih materijala su nehrđajući čelici. U primjeni su manje od 100 godina, još se i danas razvijaju i čine jednu od najvažnijih skupina korozijski postojanih konstrukcijskih materijala. Ovu vrstu legure čelika nije bilo jednostavno otkriti, te su se morali stvoriti bitni preduvjeti za pronalazak nehrđajućih čelika.

Švedski je čelik stoljećima bio pojam kvalitete svih vrsta ugljičnih čelika. Jedan od razloga je u načinu zagrijavanja peći za taljenje rudače, u njima se koristio gorivi element s niskim postotkom sumpora. Kroz povijest se nije znao objasniti razlog zašto se mačevi izrađeni u različitim mjestima svijeta razlikuju u kvaliteti. Švedski se čelik često pokazivao kao najbolji. Sumpor (S) u čeliku djeluje izrazito nepovoljno te ga zbog toga treba biti što manje. Sumpor bitno smanjuje mehanička svojstva (žilavost ili udarni rad loma i čvrstoću), a pospešuje i ubrzava djelovanje korozije [1].

Tek kada su otkriveni krom i nikal stvoreni su preduvjeti da se legiranjem čelika sa tim metalima dođe do prvog nehrđajućeg čelika. Izumitelj prvog nehrđajućeg čelika bio je H. Brearley iz Sheffielda, a taj je čelik bio martenzitne strukture. Godine 1918. u Sheffieldu započela je proizvodnja prvog pribora za jelo izrađenog od nehrđajućeg čelika. Od te godine započinje intenzivan razvoj nehrđajućih čelika. 17 godina kasnije Mauer i Strauss razvili su nehrđajući čelik oznake V₂A (20 % Cr, 7 % Ni, 0,25 % C), a taj se austenitni materijal uz nešto modificiran kemijski sastav koristi i danas. Danas se u razvoju nehrđajućih čelika sve više nastoji proizvesti materijal za točno određene namjene i sa što nižom cijenom. Sve se više pokušavaju poboljšati relativno slabija mehanička svojstva austenitnih čelika te ih približiti ugljičnim čelicima. Nehrđajući čelik austenitne strukture vrlo je lako prepoznati ukoliko mu se približi magnet, jer je austenitni nehrđajući čelik nemagnetičan. Težnja u razvoju tih materijala je bazirana na strukturnoj stabilnosti i dobrim mehaničkim svojstvima, a nastoji se postići dobra zavarljivost te korozijska postojanost. Naziv „nehrđajući“ najčešće zbunjuje s obzirom na to da nehrđajući čelici u posebnim radnim okolinama ipak korodiraju. Pogrešnim izborom osnovnog materijala te nepoštivanjem tehnoloških, mehaničkih i korozijskih zakonitosti može se pridonijeti slabljenju korozijske postojanosti i mehaničkih

svojstava tih materijala. Isto tako, važno je napomenuti da se prilikom zavarivanja ove vrste čelika treba posvetiti pozornost dodatnom materijalu, parametrima i uvjetima zavarivanja, koji su direktno odgovorni za promjene mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti zavarene konstrukcije [1].

2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelik je naziv koji pokriva niz željeznih slitina, a koje sadržavaju minimalno 11,7 % kroma (Cr) [1]. Krom je najvažniji legirajući element, njegov udio može se kretati i do 30 %, te mora biti u potpunosti otopljen u metalnoj osnovi ili kristalu mješancu, a nikako ne smije sačinjavati sastavni dio karbida ni bilo kakvih drugih strukturnih tvorevina [1]. Krom s kisikom iz zraka na površini čelika formira stabilni oksidni sloj koji sprečava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima. Otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama primarno ovisi o masenom udjelu kroma te se neke legure s visokim udjelom kroma (25 - 30 %) mogu primijeniti na temperaturi višoj od 1000 °C. Najbitnija svojstva koja odlikuju nehrđajuće čelike su izrazito dobra kemijska i toplinska otpornost i dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama. Razvijeno je mnogo različitih vrsta nehrđajućih čelika za različite namjene, postoje mnogo različitih podjela, a najpovoljnija je ona prema mikrostrukturi nehrđajućih čelika [2]:

1. Feritni nehrđajući čelici
2. Martenzitni nehrđajući čelici
3. Austenitni nehrđajući čelici
4. Austenitno-feritni nehrđajući čelici.

Iz prikazane podjele u ovom radu detaljno je proučena austenitna grupa nehrđajućih čelika. Za čelike ove strukture valja napomenuti da posjeduju i dobra i loša svojstva. Dobra su: otpornost prema koroziji, plastična obradivost i otpornost na niske temperature, čak ispod - 200 °C. Pri većim plastičnim deformacijama u hladnom stanju otvrdnu i postaju otporniji na trošenje. Pod slabija svojstva ubrajaju se niža čvrstoća i tvrdoća, velika istezljivost, mala toplinska vodljivost koja predstavlja probleme kod zavarivanja i nemogućnost kaljenja [1].

Minimalna granica razvlačenja na sobnoj temperaturi iznosi oko 210 N/mm². Maksimalna temperatura primjene je oko 760 °C, do koje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Primjenjuju se u uvjetima kad se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Legiraju se elementima koji osiguravaju formiranje austenitne mikrostrukture: niklom, dušikom i bakrom. Ukupni maseni udio gamagenih legiranih elemenata uglavnom prelazi 8 %. Ugljik, iako nije legirni element također promiče austenitnu mikrostrukturu, a dodaje se i zato što povisuje otpornost na

puzanje. Dušik, osim što promiče austenitnu strukturu, povisuje čvrstoću na sobnoj i niskim temperaturama [3].

Maseni udjeli najvažnijih legirnih elemenata i ugljika u austenitnim čelicima prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Maseni udjeli ugljika i ostalih legirnih elemenata u austenitnim čelicima [3]

kemijski element	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	N	Ti i Nb	C
maseni udio (%)	16 - 26	8 - 35	1 - 2 (4 - 15,5)	0,5 - 3	do 2	do 0,15	do 0,2	0,02 do 0,08 (0,1)

Kao što se u tablici 1. može vidjeti austenitni čelici imaju visoki udio legirnih elemenata zbog čega su skuplji od martenzitnih nehrđajućih čelika i feritnih nehrđajućih čelika s nižim i srednjim sadržajem kroma. No, kao što je ranije spomenuto, njihova dobra svojstva (dobra zavarljivost i oblikovljivost) opravdavaju izbor ove vrste čelika i kompenziraju razliku u cijeni [3].

Svi austenitni čelici imaju dobru duktilnost i žilavost i postižu značajnu istezljivost tijekom vlačnog opterećenja, zbog čega se i koriste u vrlo različitim područjima, od nosivih konstrukcija i primjene u građevini, preko kuhinjskih uređaja do medicinske opreme. Široko područje primjene imaju ne samo zbog dobre korozijske postojanosti već i zbog dobre oblikovljivosti, zavarljivosti, izdržljivosti i dr. Neki austenitni čelici s visokim udjelom legirnih elemenata, kao što je ranije spomenuto, mogu izdržati vrlo visoke temperature i primjenjuju se do 1000 °C (nosači i košare u pećima za toplinsku obradu). Ovi čelici, osim visokog udjela kroma, imaju visoki udio silicija, a često i aluminijske i ugljika, čime se uvelike povisuje otpornost na oksidaciju i pougljičavanje te čvrstoća na povišenim temperaturama. Austenitni nehrđajući čelici su osjetljivi na napetosnu koroziju pa se ne preporuča njihova primjena u okruženju s morskom vodom ili mediju koji sadrži kloride te u jako korozivnim medijima. Opasnost od ovog tipa korozije povećana je ako je konstrukcija izvedena zavarivanjem [3].

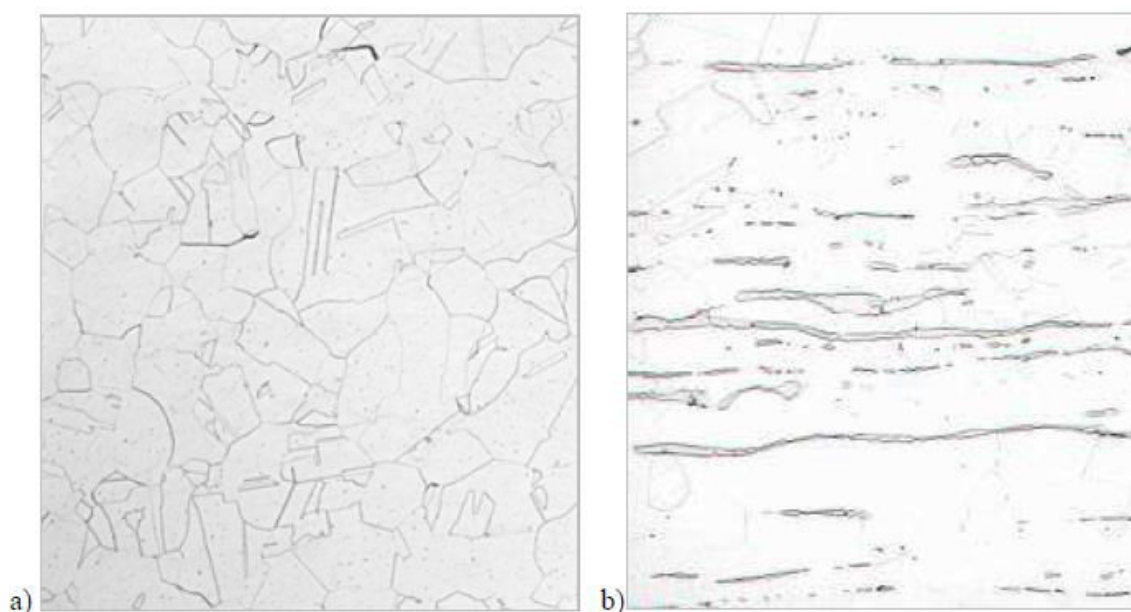
Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika:

- nemaju mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetičnost,
- prilikom zavarivanja dolazi do većih napetosti i deformacija nego kod feritnih čelika,

- legiranjem s molbdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturi iznad 600°C (normalan rad do 760 °C),
- odlična plastičnost i visoka žilavost,
- oksidacija (otpornost na koroziju),
- vrlo visok omjer čvrstoće i mase,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama (određene vrste ovih čelika čak ispod – 270 °C),
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu sklони povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- dodavanjem Cr više od 18 % općenito se povećava otpornost prema koroziji,
- kod austenitnih čelika koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50% veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja,
- koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja,
- specifični električni otpor je povećan te utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice itd.

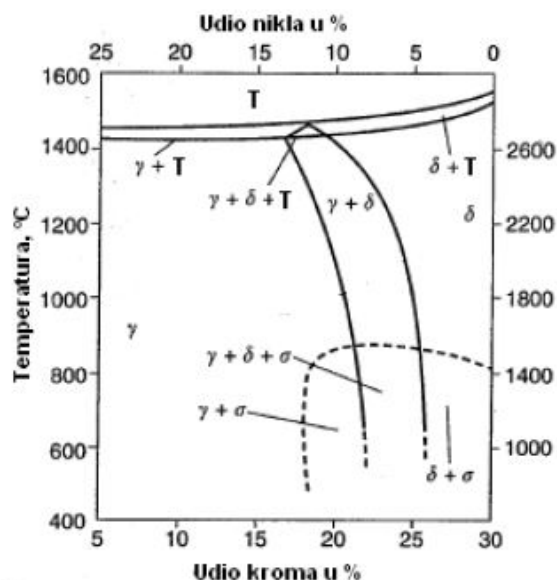
2.1. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

Kemijski sastav i termomehanička obrada nehrđajućih austenitnih čelika prilagođavaju se tako da mikrostruktura na sobnoj temperaturi bude potpuno austenitna ili austenitna s malim udjelom feritne faze. Hoće li mikrostruktura biti potpuno austenitna ili austenitno-feritna, ovisi o balansu alfagenih i gamagenih legirnih elemenata. Na slici 1. a) prikazana je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika sa 100 %-tnim udjelom austenita, a na slici 1. b) mikrostruktura čelika koji osim mikrostrukture austenita sadrži i određeni udio visokotemperaturnog „delta“ ferita. Trakaste nakupine delta ferita usmjerene su paralelno sa smjerom valjanja. Do feritne faze dolazi zbog segregacije alfagenih legirnih elemenata (posebice kroma) tijekom kristalizacije te naknadne termomehaničke obrade. Volumni udio delta ferita ne prelazi 2 do 3 %. Njegova prisutnost u mikrostrukтури je poželjna u malim količinama, iako u određenim uvjetima smanjuje duktilnost i žilavost austenitnih nehrđajućih čelika. Uz trakaste nakupine delta ferita mogu se izlučiti neželjene mikrostrukturne faze (karbidi tipa $M_{23}C_6$ te sigma faza)[3].



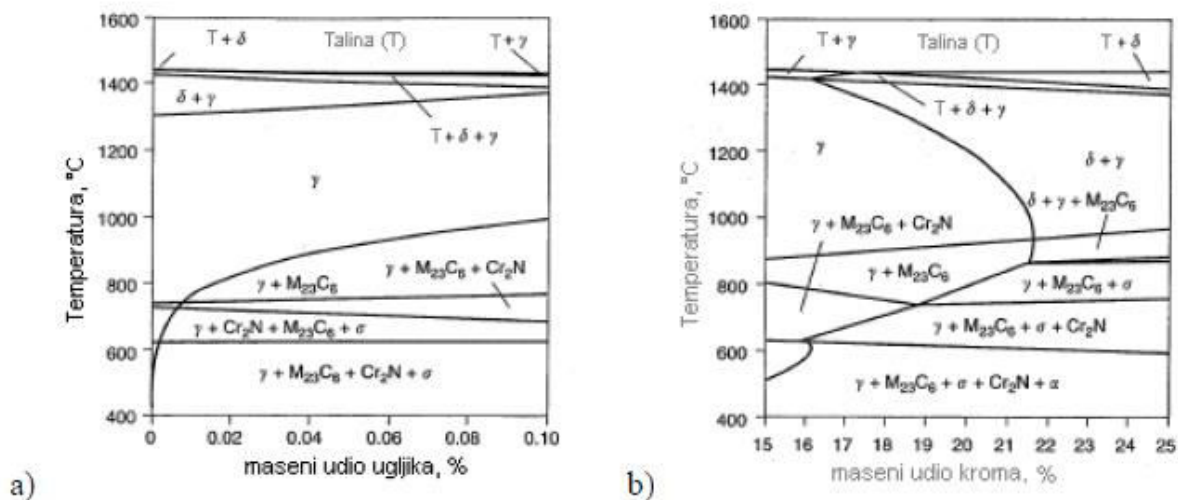
Slika 1. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) potpuni austenit; b) austenit i delta ferit [3]

Formiranje mikrostrukture kod austenitnih nehrđajućih čelika može se vidjeti u ravnotežnom pseudobinarnom Fe-Cr-Ni dijagramu sa 70 % Fe, prikazanom na slici 2. Ovisno o udjelima kroma i nikla u primarnoj kristalizaciji formira se austenitna ili feritna mikrostruktura. Legure koje u sastavu imaju manje od 12 % Ni i više od 18 % Cr primarno kristaliziraju kao 100 %-tni delta ferit. Legure koje imaju veći udio nikla i manji udio kroma od navedenih vrijednosti, nakon primarne kristalizacije njihova mikrostruktura je potpuno austenitna. U trokutastom području na oko 12% Ni, između likvidus i solidus linije, prisutni su austenit, ferit i talina, a neposredno nakon skrućivanja mikrostruktura je bifazna i sastoji se od ferita i austenita.



Slika 2. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70% Fe [3]

Hlađenje legura koje primarno kristaliziraju u austenit, do sobne temperature, mikrostruktura se ne mijenja i ostaje potpuno austenitna. Legurama koje nakon primarne kristalizacije imaju feritnu mikrostrukturu, ravnotežnim hlađenjem do sobne temperature, mikrostruktura prijelazi u potpuno austenitnu ili u austenitnu s određenom količinom ferita. Volumni udio delta ferita, kao što je ranije rečeno, ovisi o sadržaju gamagenih i alfagenih legirnih elemenata, ali isto tako i o brzini hlađenja. Dijagrami na slici 3. jasno prikazuju kako se legiranjem ugljikom i nekim drugim legirnim elementima utječe na faznu ravnotežu austenitnih čelika. Također su vidljiva područja u kojima se formiraju karbidni i nitridni precipitati. Uz karbide i nitride u austenitnim nehrđajućim čelicima mogu nastati i mnogi drugi štetni mikrostrukturni precipitati. U tablici 2. prikazan je popis najčešćih precipitata, kristalna struktura te njihove kemijske formule. Karbidi mogu nastati u skoro svim austenitnim čelicima zbog kroma koji je izrazito snažan karbidotvorac, a neizostavan je legirni element u svim nehrđajućim čelicima. I drugi karbidotvorni legirni elementi, kao što su molibden, niobij i titan, promiču nastanak karbida. Od ove tri navedene vrste karbida najveći značaj imaju karbidi tipa $M_{23}C_6$ zbog utjecaja na korozijsku postojanost. Sitni karbidni precipitati formiraju se po granicama austenitnih zrna u temperaturnom području od 425 do 870 °C, kako pokazuje dijagram na slici 4. Za vrlo kratko vrijeme mogu izazvati interkristalnu koroziju ako se čelik nađe u određenoj okolini. Ova pojava je jače izražena kod austenitnih čelika koji su očvrsnuti deformacijom u hladnom stanju [3].



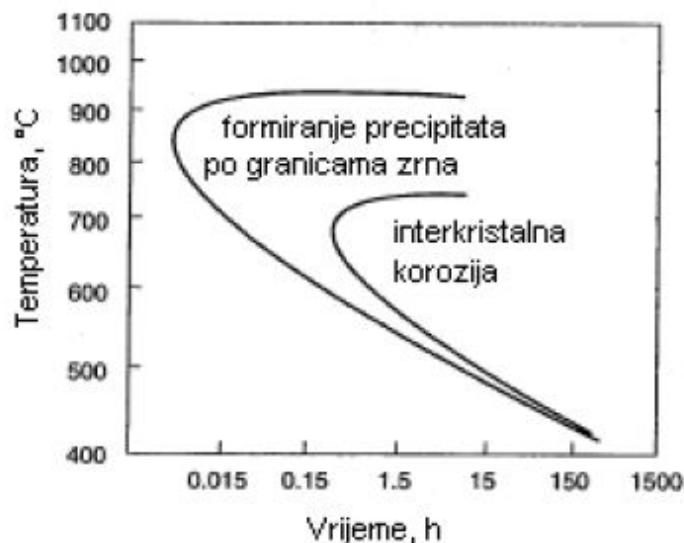
Slika 3. Fazni dijagrami dobiveni pomoću ThermoCalc sustava [3]

a) Fe-18Cr-10Ni-1,5Mn-0,5Si-0,04N, uz varijabilni C

b) Fe-10Ni-1,5Mn-0,5Si-0,04C-0,04N, uz varijabilni Cr

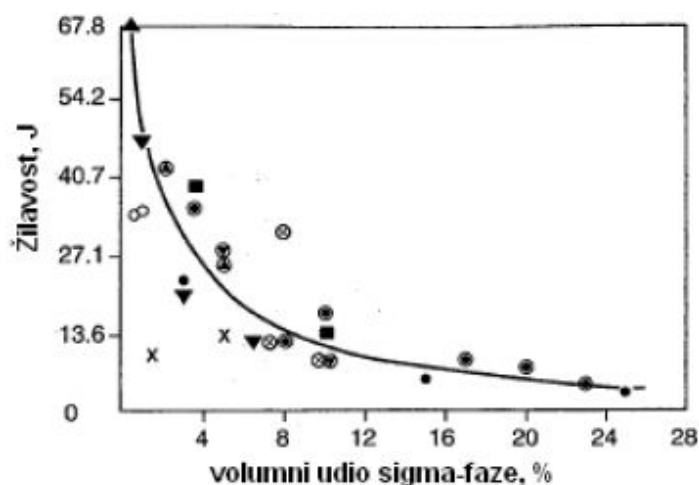
Tablica 2. Precipitati koji mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima [3]

Precipitat	Kristalna građa	Stehiometrijska formula
MC	FCC	TiC, NbC
M ₆ C	Kubična (engl. diamond cubic)	(FeCr) ₃ Mo ₃ C, Fe ₃ Nb ₃ C Mo ₅ SiC
M ₂₃ C ₆	FCC	(Cr,Fe) ₂₃ C ₆ , (Cr,Fe,Mo) ₂₃ C ₆
NbN	FCC	NbN
Z-faza	Tetragonalna	CrNbN
Sigma-faza	Tetragonalna	Fe-Ni-Cr-Mo
Lavsova faza	Heksagonalna	Fe ₂ Mo, Fe ₂ Nb
Chi-faza	BCC	Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀
G-faza	FCC	Ni ₁₆ Nb ₆ Si ₃ , Ni ₁₆ Ti ₆ Si ₇
R	Heksagonalna Romboedarska	Mo-Co-Cr Mo-Co-Cr
ε-nitridi (Cr ₂ N)	Heksagonalna	Cr ₂ N
Ni ₃ Ti	Heksagonalna	Ni ₃ Ti
Ni ₃ (Al, Ti)	FCC	Ni ₃ Al



Slika 4. Precipitacija karbida tipa $M_{23}C_6$ u austenitnom nehrđajućem čeliku X5CrNi18-10 (304) [3]

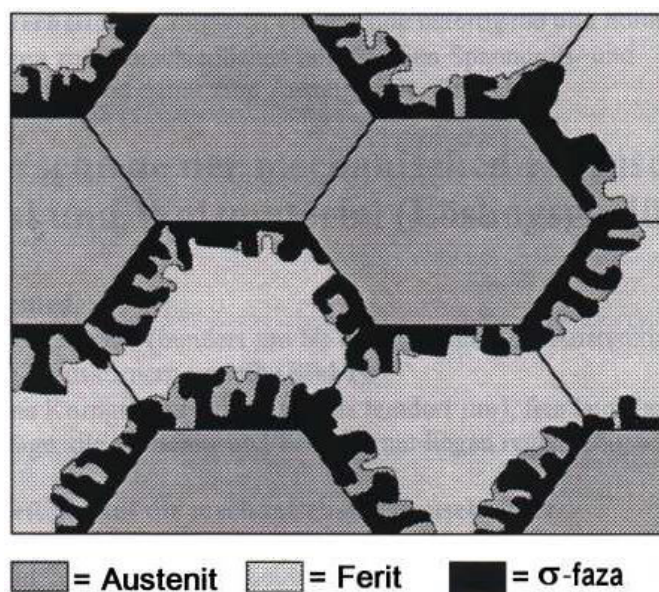
σ (sigma), χ (chi), ε (eta), Gi i Lavsova faza su intermetalne faze koje u određenim uvjetima mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima. Lakše i brže nastaju u čelicima koji su legirani molibdenom, niobijem i titanom. Sve navedene faze snižavaju žilavost čelika. Na slici 5. prikazan je utjecaj sigma-faze na udarni rad loma Fe-Cr-Ni legura. U dijagramu se vidi da volumni udio sigma faze od samo 5 % snižava udarni rad loma za više od 50 % [3].



Slika 5. Utjecaj sigma faze na udarni rad loma Fe-Cr-Ni legura pri sobnoj temperaturi [3]

U austenitnim čelicima s potpuno austenitnom mikrostrukturom sigma fazi je onemogućen nastanak, čak ako se čelik jako dugo zadržava na temperaturi između 600 i 900 °C. U austenitnim čelicima koji u mikrostrukтури imaju delta ferita, sigma faza nastaje u vrlo

kratkom vremenu. Osim kroma, formiranju sigma faze olakšavaju molibden, niobij, silicij, vanadij, volfram, titan i cirkonij. Ugljik i dušik imaju suprotan učinak i usporavaju rast precipitata sigma faze. Što je veći udio delta ferita, sigma faza nastaje brže i u većoj količini. Formiranjem sigma faze i njezinim rastom volumni udio delta ferita se smanjuje, ali promjene volumnih udjela nisu ekvivalentne. Ako je volumni udio delta ferita u čeliku oko 8 %, iz njega će nastati oko 4 % sigma faze. Slika 6. prikazuje model nastanka i rasta sigma faze. Sigma faza nastaje na granici ferita i austenita te se dalje širi u ferit. Udio ferita se pritom smanjuje, a raste udio sigma faze i udio austenita [3].



Slika 6. Model nastanka i rasta sigma faze [3]

2.2. Najčešće korišteni austenitni čelici

Svi se austenitni čelici prema vrsti gamagenih legirnih elemenata mogu podijeliti u dvije podskupine [3]:

1. austenitni nehrđajući čelici s niklom
2. Ni-Mn-N – austenitni nehrđajući čelici.

Prema američkom sustavu označavanja (engl. AISI – American Iron and Steel Institute) prva podskupina pripada seriji 300, a čelici iz druge podskupine spadaju u seriju 200. Iako je razvijeno mnogo različitih vrsta austenitnih čelika, vrste s oznakom 300 (po AISI sustavu) su najstarije, imaju najširu primjenu te se najčešće primjenjuju. Većina austenitnih čelika razvijena je iz čelika 18-8 (18 % Cr i 8 - 10 % Ni), dodavanjem legirnih elemenata i modificiranjem sastava, čime su se postigla bolja mehanička i korozivna svojstva. Najčešće primjenjivane vrste austenitnih nehrđajućih čelika su čelici tipa 304, 316, 321 i 347 te njihove

varijacije. Čelik s oznakom 304 je temeljni čelik skupine i skupa s čelikom 304L je najčešće u upotrebi. Čelik s oznakom 316 ima oko 2% Mo više od čelika oznake 304 (i oko 2% manje Cr) što mu znatno poboljšava otpornost na rupičastu koroziju. Čelici sa slovom L u oznaci imaju snižen sadržaj ugljika na vrijednost do 0,03 % (304L i 316L). Neosjetljivi su na interkristalnu koroziju – ako nema dovoljno ugljika za nastanak kritične količine karbida, nema ni interkristalne korozije. Austenitni nehrđajući čelici s oznakom H imaju povišen maseni udio ugljika na oko 0,1 %. Zbog višeg sadržaja ugljika ove vrste imaju više vrijednosti čvrstoće što osobito dolazi do izražaja pri povišenim temperaturama. Vrstama koje u oznaci imaju slovo N, povećan je sadržaj dušika do vrijednosti 0,20 %. Maseni udio dušika može biti i viši od navedene vrijednosti ako čelik sadrži dovoljno mangana, zato što mangan povisuje topivost dušika u austenitu. Dušik kod austenitnih čelika povoljno utječe na čvrstoću, otpornost na adheziju i otpornost na rupičastu koroziju [3].

Vrste koje sadrže titan i niobij (tip 321 i 347) su stabilizirane vrste austenitnih nehrđajućih čelika, a niobij i titan se nazivaju stabilizirajućim legirnim elementima. Imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma pa se njihovim dodavanjem sprečava nastanak kromovih karbida tipa $M_{23}C_6$ po granicama kristalnih zrna. Umjesto njih na povišenoj temperaturi formiraju se titanovi i/ili niobijevi karbidi tipa MC. Dodatkom titana i niobija u iznosu od 1 %, znatno se reducira sadržaj otopljenog ugljika u austenitu, a time i mogućnost nastanka kromovih karbida. Formiranje kromovih karbida može dovesti do senzibilizacije što je preduvjet za nastanak interkristalne korozije [3].

Čelici iz serije 200 sadrže više ugljika, mangana i dušika te manje nikla od čelika iz serije 300. Zahvaljujući takvom sastavu posjeduju i višu otpornost na adhezijski mehanizam trošenja. Među elemente koji stabiliziraju austenitnu fazu i koji mogu zamijeniti skupi nikal ubrajaju se ugljik, dušik, mangan, bakar i kobalt. Zanimljivo je da nijedan od ovih elemenata, pojedinačno dodan, nema dovoljno jako djelovanje u smislu promicanja austenitne mikrostrukture, pa se više njih mora dodati ako se želi postići potpuno austenitna mikrostruktura [3]:

- ugljik je jaki gamageni element ali se ne smije dodati u većoj količini zbog izrazito nepovoljnog djelovanja na korozijsku postojanost i duktilnost čelika,
- udio mangana od čak 25% ne može osigurati potpuno austenitnu mikrostrukturu čeliku koji sadrži oko 15% kroma,
- dušik se ne može dodati u dovoljnoj količini za potpuno austenitnu mikrostrukturu,
- bakar u većoj količini loše utječe na duktilnost, a kobalt ima visoku cijenu.

Korozijska postojanost nehrđajućih čelika iz serije 200 nije tako dobra kao kod čelika iz serije 300. Čelici koji sadrže više ugljika osjetljivi su na napetosnu koroziju nakon zavarivanja, a osjetljivost na napetosnu koroziju raste s povećanjem debljine materijala. Kod nekih austenitnih nehrđajućih čelika nikal je u potpunosti zamijenjen manganom, dušikom i bakrom. Od takvih čelika rade se implantati za pacijente koje su alergični na nikal [3].

U sljedećim poglavljima biti će detaljnije objašnjeni najčešće korišteni austenitni čelici s oznakama, kemijskim sastavom i glavnim karakteristikama. Prva oznaka je prema Europskom standardu EN, a oznake u zagradi su prema DIN-u, AISI-ju i Željezari Jesenice [1].

2.2.1. X5 CrNi 18-10 (W.Nr. 1.4301, X 5 CrNi 18 9, AISI 304, Č.4580, Prokron 11 ekstra)

AISI 304 je austenitni čelik (18/10 Cr-Ni čelik) otporan na kiseline, koji se koristi do najviše 300 °C. Dobro je zavarljiv svim električnim postupcima, ima vrlo dobru sposobnost poliranja i dobru sposobnost plastične obrade. Tijekom rezanja potrebno primjenjivati oštro brušene alate od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Ovaj čelik je otporan na vodu, vodenu paru, vlažan zrak, konzumne kiseline te na slabe organske i anorganske kiseline. Primjenjuje se u prehrambenoj industriji za opremu, u proizvodnji pića, u mljekarstvu, pivovarama, podrumarstvu, u kozmetičkoj industriji, u izradi kemijskih uređaja, za kuhinjsko posuđe, itd. [1].

Kemijski sastav ovog čelika može se vidjeti u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav čelika AISI 304 [1]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
maseni udio (%)	< 0,07	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	17 - 20	8,5 - 10

2.2.2. X2 CrNi 19-11 (W.Nr. 1.4306, X 2 CrNi 18 9, AISI 304L)

AISI 304L je austenitni čelik (18/10 Cr-Ni) otporan na kiseline. Zbog vrlo niskog udjela ugljika (maksimalno 0,03 %) ima veću otpornost na interkristalnu koroziju. Dobro je zavarljiv svim električnim postupcima, vrlo dobro se polira te se koristi na temperaturama do 350 °C. Tvrdća, čvrstoća i granica razvlačenja ovog čelika su osobito niske, niže nego kod svih ostalih austenitnih Cr-Ni čelika. Time se postiže jako dobra sposobnost hladnog oblikovanja te se najčešće koristi za izradu posuđa u kućanstvima postupkom dubokog

vučenja. Zbog tendencije prema hladnom očvršćivanju tijekom rezanja potrebno je rabiti oštro brušene alate od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Kemijska postojanost je nešto bolja od čelika kvalitete AISI 304, pa zbog toga postoje i slične mogućnosti primjene (često se koristi u kemijskoj, prehrambenoj i nuklearnoj industriji). Za farmaceutsku industriju koristi se kao i čelik AISI 304. Kemijski sastav čelika AISI 304L prikazan je u tablici 4. [1].

Tablica 4. Kemijski sastav čelika AISI 304L [1]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
maseni udio (%)	< 0,03	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 16,5 do 18,5	od 10,5 do 13,5	od 0,12 do 0,2

2.2.3. X5CrNiMo 17-12-2 (W.Nr. 1.4401, X 5 CrNiMo 18 10, AISI 316, Č.4573, Prokron 12)

AISI 316 je austenitni krom-nikal (Cr-Ni) čelik legiran s molibdenom (Mo) te je visoko otporan na koroziju (otporan na interkristalnu koroziju za debljine limova do 6 mm). Koristi se na temperaturama do 300 °C, te je pogodan za poliranje na visoki sjaj. Primjenjuje se za izradu različitih uređaja, cjevovoda i armatura u kemijskoj industriji te za kirurške i medicinske instrumente. U prehrambenoj industriji koristi se za opremu u proizvodnji voćnih sokova i likera, za proizvodnju alkohola i pića kod kojih se ne smije utjecati na okus. Kemijski sastav čelika AISI 316 prikazan je u tablici 5. [1].

Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 316 [1]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
maseni udio (%)	< 0,07	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 16,5 do 18,5	od 10,5 do 13,5	od 2 do 2,5

2.2.4. X2CrNiMo17-12-2 (W.Nr. 1.4404, X2 CrNiMo 18 10, AISI 316L*, Č. 45703, ACRONII2NC)

Čelik AISI 316L* je austenitni krom-nikal (Cr-Ni) čelik, legiran s molibdenom (Mo) koji mu povećava otpornost na koroziju. Nizak sadržaj ugljika ovog čelika osigurava mu otpornost prema interkristalnoj koroziji, jer se bez ugljika (maksimalno 0,03 % C) ne mogu stvarati kromovi karbidi. Koristi se na temperaturama do najviše 400 °C. Primjenjuje se u

kemijskoj, prehrambenoj (mljekarstvu), i farmaceutskoj industriji. Od ovog se materijala često rade cjevovodi, spremnici, crpke, kućišta filtara, kućišta membrana na jedinicama reverzne osmoze i ultrafiltracije, izmjenjivači topline, itd.

DIN standard pod usporednom oznakom AISI 316L (AISI 316L*) ima dva nehrđajuća čelika i to W.Nr. 1.4404 i W.Nr. 1.4435 koji se razlikuju prema masenom udjelu Mo i sadržaju delta ferita.

U tablici broj 6. prikazan je kemijski sastav čelika AISI 316L*, a u tablici 7. njegova mehanička svojstva [1].

Tablica 6. Kemijski sastav čelika AISI 316L* [1]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
maseni udio (%)	< 0,03	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 16,5 do 18,5	od 11 do 14	od 2 do 2,5

Tablica 7. Mehanička svojstva čelika AISI 316L* [4]

	Vlačna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Istezljivost, %	Tvrdoća, HB
AISI 316L (1.4404)	od 490 do 690	190	od 30 do 40	od 55 do 85

Napomena uz tablicu 7.: Navedena svojstva čelika AISI 316L (W.Nr. 1.4571), su prosječne vrijednosti pri 20°C, budući da one ovise o vrsti i dimenzijama (polu) proizvoda i načinu mjerenja (uzdužno, poprečno, tangencijalno). Za konkretnu vrijednost vidjeti odgovarajuće certifikate osnovnog materijala (normu).

2.2.5. X2CrNiMo18-14-3 (W.Nr. 1.4435, X 2 CrNiMo 18 12, AISI 316L, Č.45704)

AISI 316L je austenitni (18/12/2,7 Cr-Ni-Mo) čelik posebice otporan prema kiselinama. Povećan sadržaj molibdena (Mo) ovom austenitnom čeliku dodatno povećava otpornost na koroziju. Posebno je smanjena osjetljivost na rupičastu (pitting) koroziju. Zbog niskog sadržaja ugljika (maksimalno 0,03 % C), čelik je nakon zavarivanja kod debljine lima do 6 mm i bez naknadne toplinske obrade, otporan na interkristalnu koroziju. Koristi se do 300 °C. Zavaruje se dobro svim električnim postupcima. Čelik ima vrlo dobru podobnost poliranja i osobito se dobro oblikuje dubokim izvlačenjem, obrezivanjem oštrih rubova, valjanjem itd. Kod rezanja se zbog tendencije prema hladnom očvršćivanju, uvijek mora raditi s oštro brušenim alatima od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Najšire područje primjene ovaj čelik pronalazi u farmaceutskoj industriji. Od toga materijala izrađuju se cjevovodi za pročišćenu vodu, visoko pročišćenu vodu, vodu za injekcije, za distribuciju dušika i stlačenog zraka tj. Medija koji je u direktnom kontaktu s farmaceutskim proizvodima [1].

U tablici broj 8. prikazan je kemijski sastav čelika AISI 316L.

Tablica 8. Kemijski sastav čelika AISI 316L [1]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
maseni udio (%)	< 0,03	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 16,5 do 18,5	od 12,5 do 15	od 2,5 do 3

2.2.6. X6CrNiMo17-12-2 (W.Nr. 1.4571, X 10 CrNiMoTi 18 10, AISI 316Ti, Č.4573, Prokron 12 specijal)

AISI 316Ti je austenitni čelik (18/12/2 Cr-Ni-Mo) otporan na kiseline i stabiliziran titanom (Ti), sa radnom temperaturom do najviše 400 °C. Zbog stabiliziranja titanom nije potrebna naknadna toplinska obrada nakon zavarivanja većih debljina. Dobro je zavarljiv svim električnim postupcima. Zbog dodatka titana (Ti) kod ovog čelika nije moguće postići visoki sjaj poliranjem. Oblikovanje dubokim vučenjem i valjanjem je vrlo dobro. Kod rezanja je zbog tendencije ka hladnom očvršćivanju potrebno primjenjivati oštro brušene alate od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Viša granica razvlačenja prednost je kod konstrukcija i konstrukcijskih elemenata s većim mehaničkim zahtjevima. Područja primjene ovaj čelik pronalazi u farmaceutskoj, kemijskoj te tekstilnoj industriji [1].

U tablici broj 9. prikazan je kemijski sastav čelika AISI 316Ti.

Tablica 9. Kemijski sastav čelika AISI 316Ti [1]

Element	Maseni udio, %
C	manje od 0,10 %
Si	manje od 1 %
Mn	manje od 2 %
P	manje od 0,045 %
S	manje od 0,03 %
Cr	od 16,5 do 18,5 %
Ni	od 10,5 do 13,5 %
Mo	od 2 do 2,5 %
Ti	više od 5 x % C

2.2.7. X2NiCrMoCu 25 20 5 (W.Nr. 1.4539, AISI 904L)

AISI 904L je austenitni visoko kemijski postojani (20/25/5 Cr-Ni-Mo) čelik. Upotrebljava se tamo gdje ostali austenitni Cr-Ni čelici ne mogu zadovoljiti zahtjevima. Znatno je skuplji od ostalih austenitnih čelika, posebice zbog velikog udjela nikla. Koristi se u farmaceutskoj i kemijskoj industriji (rafinerijska postrojenja) [1].

U tablici broj 10. prikazan je kemijski sastav čelika AISI 904L.

Tablica 10. Kemijski sastav čelika AISI 904L [1]

Element	Maseni udio, %
C	manje od 0,02 %
Si	manje od 1 %
Mn	manje od 2 %
P	manje od 0,045 %
S	manje od 0,035 %
Cr	od 19 do 23 %
Ni	od 23 do 28 %
Mo	od 4 do 5 %
Cu	od 1 do 2 %

2.2.8. W.Nr. 1.4541 (AISI 321, Č.4572)

AISI 321 je austenitni otporan na kiseline 18/10 Cr-Ni čelik, koji je stabiliziran dodatkom titana. Zbog toga je nakon zavarivanja i kod većih debljina interkristalno postojan bez naknadne toplinske obrade. Za tlačne posude čelik je dozvoljen za radne temperature do 400°C. Zavarljivost ovog čelika je dobro za sve električne postupake, a strogo se ne smije primjenjivati plinsko zavarivanje. Zbog dodataka titana čelik se ne može polirati do visokog sjaja. Dobra svojstva oblikovanja dubokim vučenjem, obrezivanjem oštih rubova, valjanjem itd. Kemijska otpornost je ista kao i kod W.Nr. 1.4301 (AISI 304), pa je i primjena slična (vidi 2.1.1), osim ako se ne traži površina visokog sjaja. W.Nr. 1.4541 je posebno prikladan

za konstrukcije s debljinom lima iznad 6 mm, koji se nakon zavarivanja ne mogu toplinski obrađivati [4].

U tablici broj 11. prikazan je kemijski sastav čelika AISI 321, dok su u tablici 12. prikazana mehanička svojstva AISI 321.

Tablica 11. Kemijski sastav čelika AISI 321 [4]

kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
maseni udio (%)	< 0,08	< 1	< 2	< 0,045	< 0,03	od 17 do 19	od 9 do 12	od 5 X %C do 0,8

Tablica 12. Mehanička svojstva čelika AISI 321 [4]

	Vlačna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Istezljivost, %	Tvrdoća HB
AISI 321 (1.4541)	od 500 do 700	200	od 30 do 40	od 55 do 85

Napomena uz tablicu 12.:Navedena svojstva čelika AISI 321 (W.Nr. 1.4541), su prosječne vrijednosti pri 20 °C, budući da one ovise o vrsti i dimenzijama (polu) proizvoda i načinu mjerenja (uzdužno, poprečno, tangencijalno). Za konkretnu vrijednost vidjeti odgovarajuće certifikate osnovnog materijala (normu).

Iz odlomka 2.2.4., uspoređujući tablicu mehaničkih svojstava čelika AISI 316L (tablica 7) i mehanička svojstva navedena u tablici 12. može se vidjeti da ovi čelici imaju približno istu istezljivost i tvrdoću, dok su vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja čelika AISI 316L nešto niže od vrijednosti za čelik AISI 321. Značajniju razliku između ovih dvaju materijala čini titan, kojeg u čeliku AISI 321 ima manje od 0,8 %.

Titan kao legirni element posjeduje vrlo jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Titan je najjači karbidotvorac, njegovi karbidi teško se raspadaju pri povišenim temperaturama, pa se on može koristiti i na nešto višim temperaturama od čelika kvalitete AISI 316. Djeluje na sužavanje austenitnog područja. Dodaje se nehrđajućim čelicima kao stabilizator uz tantal (Ta) i niobij (Nb). Oni vežu na sebe ugljik stvarajući manje opasne karbide. Oba ova legirajuća elementa (stabilizatora) dolaze najčešće zajedno, jer im je

djelovanje na čelik vrlo slično. Vrlo su jaki karbidotvorci i primjenjuju se za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina [1].

2.3. Zavarljivost austenitnih čelika

Austenitni nehrđajući čelici imaju vrlo dobru zavarljivost. Veliki utjecaj na zavarljivost ima kemijski sastav, a osobito sadržaj sumpora i fosfora. Zbog velikog unosa topline tijekom zavarivanja, u zoni utjecaja topline mijenja se mikrostruktura osnovnog materijala. Po granicama austenitnih zrna mogu se izlučiti karbidi i druge štetne faze što je preduvjet za nastanak interkristalne korozije. U zavaru i oko zavara mogu zaostati napetosti što može dovesti do napetosne korozije [3].

Specifičnosti zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika [5]:

- austenitni nehrđajući čelici su dobro zavarljivi (iznimka su čelici koji sadrže legirni element sumpor),
- pojava toplih pukotina,
- ovi čelici ne smiju se predgrijavati.

Dakle, ovi se čelici moraju zavarivati u hladnom stanju, dakle bez predgrijavanja, snižavanjem temperature međuprolaza (ispod 100 °C), te je potrebno postići što manji unos topline.

Najveći problem kod zavarivanja ovih čelika predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida na granicama zrna u temperaturnom rasponu od 425 – 850°C (kritična temperatura oko 650°C) što dovodi do smanjenja žilavosti i istezljivosti, te ukoliko je prisutan agresivni medij može doći i do pojave interkristalne korozije [6].

Stoga se nakon zavarivanja ovi čelici „gase“ toplinskom obradom na 1050 – 1100°C kada se karbidi rastvore, a zatim brzim hlađenjem prolazi kroz područje temperatura od 850 pa do 450 °C, pa se na taj način zadržava struktura austenita bez izlučenog kroma na granicama zrna vezanog u krom karbid. Za poboljšanje hlađenja ponekad se preporuča i dodatno hlađenje u nekom mediju (često vodom). Zbog visokog koeficijenta toplinske istezljivosti, te sniženog koeficijenta toplinske vodljivosti, povećana je sklonost deformacijama kao posljedica zavarivanja. Austenitni nehrđajući čelici skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara, što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim napreznjima.

2.3.1. Opće smjernice za zavarivanje austenitnih čelika

Pri zavarivanju austenitnih čelika potrebno je poštovati sljedeće upute [1]:

- mjesto na kojem se obavljaju zavarivački radovi mora biti zaštićeno od atmosferskih utjecaja (vjetra, oborina, vlage i slično), jer mjesto zavarivanog spoja mora biti suho, čisto i glatko obrađeno (bez masnoća, premaza i drugih nečistoća),
- najniža dopuštena temperatura okoline pri zavarivanju je 5 °C, a ukoliko je temperatura okoline niža potrebno je prije zavarivanja konzultirati tehnologa zavarivanja kako bi se poduzele odgovarajuće mjere,
- alati koji se koriste za pripremu i čišćenje moraju biti isključivo za austenitne nehrđajuće čelike,
- sučeljeni spojevi moraju biti izvedeni s potpunim provarom korijena,
- prilikom zavarivanja potrebno je odgovarajućim plinom zaštititi korijensku stranu zavara,
- nakon zavarivanja treba obavezno očistiti zavare i zonu utjecaja topline (mehanički, kemijski ili elektrokemijski) te nakon ispiranja lokalno pasivirati i ponovno isprati,
- alati i brusne ploče ne smiju sadržavati karbide već se koriste aluminijski oksidi,
- sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor,
- odabir dodatnog materijala je vrlo važan za ovaj rad, gdje će se ispitivati mehanička svojstva zavarenog spoja izvedenog raznim dodatnim materijalima.

2.4. Korozijska postojanost austenitnih nehrđajućih čelika

Korozija je postupno razaranje metala i legura zbog međusobnog kemijskog ili elektrokemijskog djelovanja metala (legura) i vanjskih medija. Sposobnost materijala da se suprotstavi korozijskoj agresiji medija većim ili manjim usporavanjem njegova djelovanja naziva se korozijska otpornost (postojanost). Osim prikladne kombinacije legirajućih elemenata čelika, kojom se nastoji što više usporiti reakcija koja mu razara površinske slojeve, treba uzeti u obzir da na brzinu i mehanizam korozijskih procesa djeluju vanjski čimbenici kao što su temperatura, tlak medija, naprezanje, promjena pH, promjena sastava medija i slično. Na brzinu i mehanizam korozijskih oštećenja mogu djelovati i unutarnji čimbenici kao što su prisutnost uključaka, anizotropija, nekompaktnost i različiti sastav površinskih slojeva čelika, nejednoličnost deformacije i rasporeda naprezanja itd. Korozijska postojanost znatno ovisi o vrsti i udjelu legirajućih elemenata, tj. o strukturi čelika [1].

2.4.1. Korozija austenitnih čelika

Nehrđajući čelici su za razliku od ugljičnih čelika otporniji na koroziju u mnogim medijima kao što su voda, vodene otopine, sokovi biološkog podrijetla, na vlažnom zraku, itd. Efekt pasivacije čini temelj za usporavanje korozijskog djelovanja na površini čelika, a općenito je čelik otporniji na korozijsko djelovanje ukoliko mu je širi i interval potencijala pasivacije. Nehrđajući čelici nastoje se uvijek držati u pasivnom stanju. U takvim okolnostima površina materijala je zaštićena od korozije nevidljivim slojem metalnog oksida (Cr_2O_3). Tanki sloj metalnog oksida u određenim okolnostima može postati nestabilan (zavarivanjem, rezanjem, brušenjem, poliranjem, itd.) te dolazi do opće ili lokalne depasivacije. Za ove čelike najopasnija je lokalna depasivacija. Tada je čelik u aktivno-pasivnom stanju, korozija je na aktivnom dijelu površine vrlo brza, čak i nekoliko puta brža od korozije ugljičnog čelika. Kod nehrđajućih čelika mogu početi i neki posebni korozijski procesi. Oni su opasni, jer ih je teško uočiti, a pojavljuju se najčešće u sustavima za vodu i uređajima u kemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Lokalna korozija pojavljuje se mjestimice na površini te prodire prema unutrašnjosti presjeka. Kod austenitnih nehrđajućih čelika potpuna depasivacija može nastati jedino tretiranjem površine otopinom solne kiseline (HCl) ili fluorida. Fluoridi su najefikasniji dodaci tijekom zavarivanja (REL) u oblozi elektrode za uklanjanje krom oksida. Ostatke troske s fluoridima treba pažljivo ukloniti, jer mogu korozijski djelovati na nehrđajući čelik. Na povišenim temperaturama taj je proces znatno brži. Ako se površina tretira otopinom fluorida ili HCl-a, otvoren je put za opću koroziju po cijeloj površini, a austenitni čelik se tada ponaša kao običan ugljični čelik. Sa povećanjem masenih udjela kroma, nikla, molibdena i dušika pospešuje se korozijska postojanost nehrđajućih čelika.

Treba obratiti posebnu pozornost pri označavanju cjevovoda kako se ne bi koristili premazi (boje) ili flomasteri (markeri) koji sadržavaju halogene elemente (Cl, F), kao ni sumpor (S), jer na nehrđajućim čelicima korozijski proces najčešće počinje ispod premaza [1].

2.4.2. Vrste lokalne korozije

Najčešći oblici korozijskog razaranja austenitnih nehrđajućih čelika su [1]:

- rupičasta (engl. pitting) korozija,
- kontaktna korozija,
- korozija u procjepu,
- mikrobiološki poticana korozija,
- napetosna korozija,
- interkristalna korozija,
- ružing.

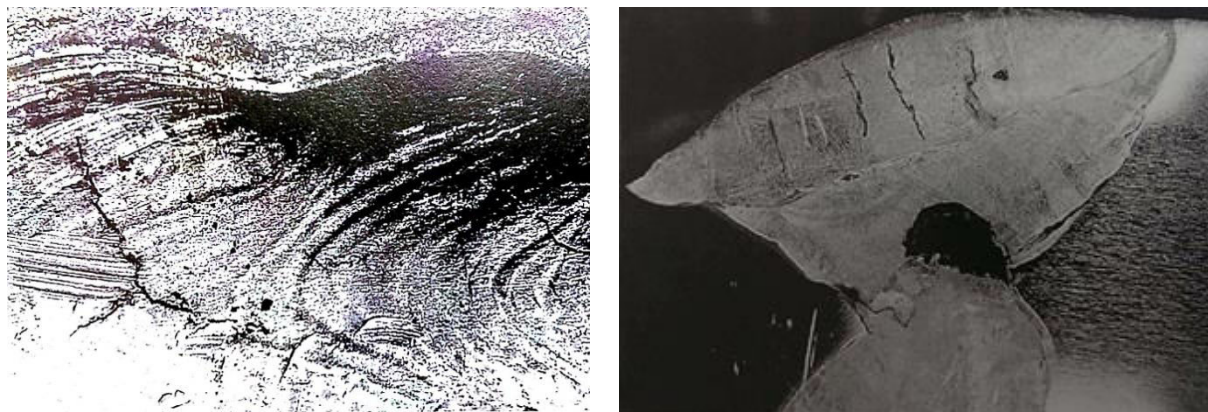
Pri zavarivanju često dolazi do raznih promjena u nehrđajućem čeliku i na njegovoj površini. Promjene na površini nisu samo na području lica zavarenog spoja, nego i u zoni utjecaja topline (ZUT-u) vidljive sve do posljednje dugine boje – žute. Procesom zavarivanja mijenja se elementaran i fazni sastav nehrđajućeg čelika. Javljaju se unutarnja naprezanja kao posljedica napetosti, a povećava se hrapavost površine koja se onečišćuje debelim oksidnim slojem. Da bi se uklonile tople pukotine na zavaru dodaje se delta ferit u količini od 2 do 12% preko elektrode, tako da zavar postaje blago magnetičan. Neke vrste nehrđajućih čelika kale se na zraku, a te pojave olakšavaju lokalnu depasivaciju, a s time se povećava sklonost čelika prema koroziji.

Interkristalnu koroziju izazivaju karbidi kroma izlučeni u kritičnom temperaturnom području u zonama uz zavar (zoni utjecaja topline – ZUT). Ta se zona, osjetljiva na izlučivanje karbida pruža na izvjesnoj udaljenosti usporedno zavaru s obje strane. Čelik u području neposredno uz zrna karbida, nema dovoljnu količinu karbida za potrebnu otpornost, pa stoga na tim mjestima čelik najčešće počinje korodirati. Dakle, u grupu čelika koji nisu sklonih interkristalnoj koroziji pripadaju austenitni čelici sa niskim sadržajem ugljika, austenitno – feritni čelici i austenitni čelici stabilizirani sa Ti ili Nb kod kojih opasnost od interkristalne korozije ne postoji. Ako se moraju zavarivati austenitni nehrđajući čelici koji su skloni interkristalnoj koroziji, potrebno je nakon zavarivanja provesti toplinsku obradu da bi zavareni spoj mogao biti otporan na koroziju u određenim korozijski agresivnim sredinama. Toplinska obrada nakon zavarivanja u načelu se sastoji od žarenja na temperaturi oko 1150 °C i hlađenja u vodi. Ukoliko to nije moguće provesti radi dimenzija zavarenog predmeta ili zbog mogućnosti pojave deformacija do kojih može doći u toku toplinske obrade, morat će se zadovoljit samo popuštanjem na 850 °C u trajanju od 4 sata i hlađenjem na zraku. Proces taljenja i skrućivanja

metala samog zavara odvija se obično tako brzo da karbidi Cr nemaju vremena za stvaranje, pa zbog toga zavar nije osjetljiv na interkristalnu koroziju. Međutim, naknadna zagrijavanja u blizini zavara (npr. križanje dvaju zavara, završetak kružnog zavara na istom mjestu gdje je on i započet) mogu zagrijati zavar do kritične temperature, pa se zbog toga i u samom zavaru javljaju karbidi kroma ukoliko zavar po svom sastavu to omogućava. Također je važno da dodatni materijal bude neosjetljiv na interkristalnu koroziju. To je najčešće austenit sa vrlo niskim udjelom ugljika ili pak mora biti stabiliziran sa legirnim elementom niobijom. Titan je kao stabilizator često nepoželjan, jer u procesu zavarivanja izgara pa njegova količina može postati upitna s obzirom na sigurnost stabilizacije. Najbolje bi bilo uzeti dodatni materijal takav koji će u zavaru dati austenit, čime suzbijamo pojavu toplih pukotina na račun antikorozivnosti koja je pri tome smanjena.

2.4.3. Tipične greške u zavarenim spojevima austenitnih nehrđajućih čelika

Pojava stvaranja segregacija u ZUT-u na temperaturama većim od 1000 °C naziva se toplim pukotinama, a one nastaju uslijed intenzivnog taloženja legirnih elemenata u procesu skrućivanja zavara. Dakle, tople pukotine kod zavarivanja nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja koja su nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Mjesta gdje nastaju tople pukotine su obično nisko taljivi eutektikumi, koji u čitavoj masi materijala zadnji prelaze u kruto stanje. To znači, da ta mjesta, u momentu kada je već ostala masa materijala kruta i kad već djeluju unutarnja naprezanja, nemaju dovoljne čvrstoće da bi se mogla oduprijeti tim naprezanjima pa s toga puknu neposredno nakon što su prešla u kruto stanje. Pojava toplih pukotina posebno je povezana s nečistoćama u osnovnom materijalu, ali i legiranjem, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žlijeba te naročito nepravilnim izborom dodatnog materijala. Karakteristične tople pukotine koje se javljaju kod zavarivanja austenitnih čelika prikazane su na slici 7. [16].



a)

b)

Slika 7. Karakteristične tople pukotine kod zavarivanja austenitnog čelika [16]

a) lice zavarenog spoja

b) makrostruktura

Osim toplih pukotina, prilikom zavarivanja može doći i do mnogo drugih grešaka koje su direktno ili indirektno vezane za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. To su naprimjer poroznost pri REL zavarivanju Cr-Ni čelika, naljepljivanje na stranicu žlijeba i među slojevima kod MAG zavarivanja ovih čelika impulsnim lukom, progaranje pri TIG zavarivanju visokolegiranog Cr-Ni čelika, poroznost korijena zbog nepostojanja sekundarne zaštite pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na sučeljenom spoju, prskanje kod MAG zavarivanja Cr-Ni čelika, nepravilan izgled zavara itd. [16].

3. POSTUPCI ZAVARIVANJA AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Odabir postupka zavarivanja ovisi o više čimbenika, a osnovni čimbenici u izboru postupka zavarivanja su debljina materijala, oblik konstrukcije, vrsta nehrđajućeg čelika koji se zavaruje, zahtijevana kvaliteta, dužina spojeva, raspoloživi zavarivači, veličina serije i postojeća oprema. S obzirom na navedene probleme, kod zavarivanja austenitnih čelika izbor postupaka zavarivanja bazirat će se na količini unesene energije, koju svaki postupak za sebe unosi prilikom zavarivanja u osnovni materijal. Količinu unesene energije kod automatiziranih postupaka zavarivanja moguće je točno odrediti prema prikazanom izrazu. Međutim, kod ručno izvedenih postupaka izračunavanje unesene količine topline nije precizno, zbog nepoznavanja točne vrijednosti brzine. Postupci zavarivanja koji se najčešće koriste za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika su:

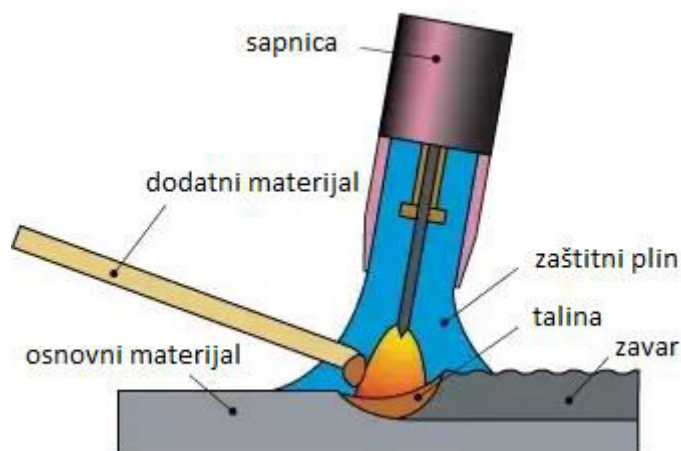
- TIG/WIG (engl. Tungsten Inert Gas, njem. Wolfram Inert Gas),
- MIG/MAG (engl. Metal Inert Gas ili Metal Active Gas),
- REL (ručno elektrolučno zavarivanje),
- PLAZMA,
- EPP (elektrolučno pod praškom).

Pošto će se u ovom radu koristiti samo TIG i MAG postupak, u sljedećim poglavljima biti će detaljnije razrađeni ovi postupci zavarivanja.

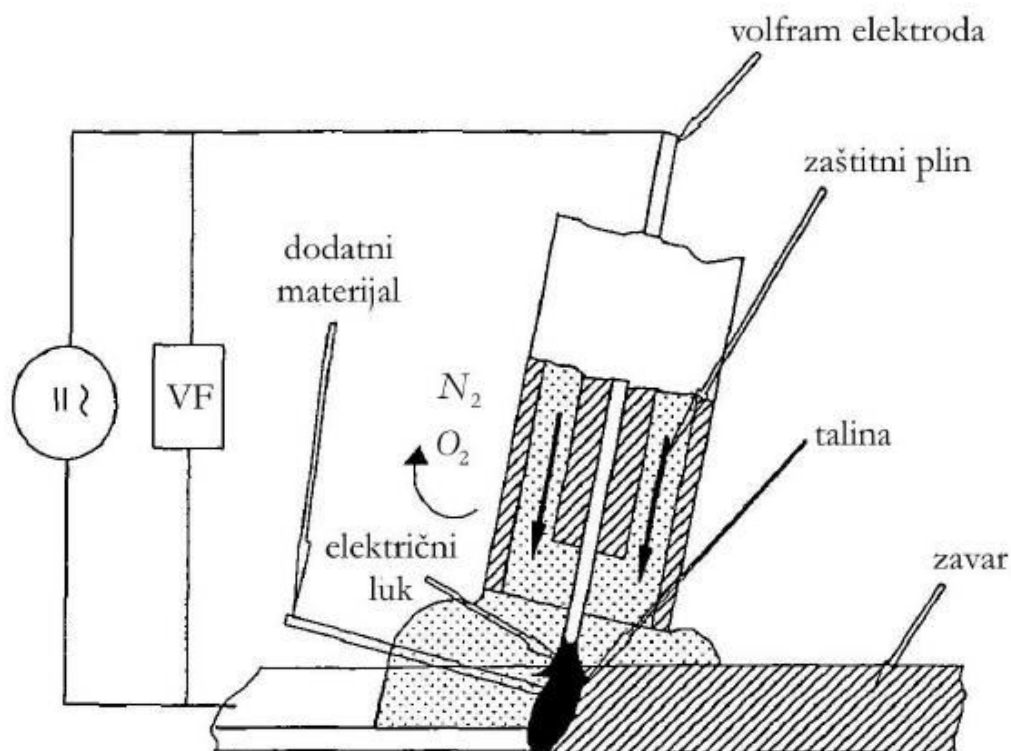
3.1. TIG zavarivanje

TIG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova, gdje se toplinom oslobođenom u električnom luku koji se uspostavlja između elektrode načinjene od volframa i radnog komada tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal. Energija potrebna za zavarivanje dobiva se od električnog luka koji se održava između radnog komada i netaljive elektrode. Zavarivati se može s dodatnim materijalom i bez njega. Mjesto zavarivanja (rastaljeni osnovni materijal, dodatni materijal, zagrijani vrh elektrode) štiti se od štetnog utjecaja okolne atmosfere inertnim plinovima. Za tanje materijale debljine od 2 do 3 mm nije potrebno koristiti dodatni materijal. Da bi se naličje zavara zaštitilo od utjecaja plinova iz zraka te da bi se korijen pravilno formirao potrebna je dodatna zaštita korijenskog prolaza sa druge strane i za nju se uobičajeno koristi 100% Ar. Ukoliko se zavaruju cijevi, često je potrebno ispuniti je inertnim plinom radi

sprječavanja nastanka sloja željeznog oksida. Shematski postupak TIG zavarivanja prikazan je slikama 8. i 9.



Slika 8. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [1]



Slika 9. Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnih plinova [7]

Volframova elektroda kod ovog postupka zavarivanja služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode su napravljene od čistog volframa ili volframa legiranog sa najčešće malim dodacima torijevog ili cirkonijevog oksida. Ti dodaci omogućuju lakše uspostavljanje luka, stabiliziraju luk posebno pri manjim strujama, smanjuju

trošenje vrha elektrode i povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. Elektrode se proizvode u promjerima od 0,8 do 9,5 mm i duljine 200 mm. Vrh elektrode prije zavarivanja treba biti izbrušen na pravilan oblik koji ovisi o vrsti i jačini struje koja će se primjenjivati, te zahtjevima zavara, kao što je prikazano u tablici 13. [7].

TIG postupak zavarivanja je spor (količina rastaljenog dodatnog materijala od 0,3 do 0,8kg/h) i najčešće se koristi za provar korijena zavara. Za ovaj postupak zavarivanja je specifično da nema rasprskavanja kapljica metala, nije potrebno čišćenje troske, ni štetnih dimnih plinova. Pravilno izvedeni zavareni spojevi ovim postupkom se ubrajaju u najkvalitetnije zavarene spojeve. Zavareni spoj je lijepe teksture, gladak i čist, ali zahtijeva izuzetne vještine zavarivača. Zavarivati je moguće u svim položajima. Napon zavarivanja od 10 do 20V i ovisi o jakosti struje i upotrijebljenom zaštitnom plinu. Utrošak zaštitnog plina kreće se od 3 do 15 l/min. U tablici 13. prikazane su vrste struja koje se primjenjuju u ovisnosti o vrstama osnovnog materijala.

Tablica 13. Vrste struja kod TIG zavarivanja [7]

VRSTA STRUJE	MATERIJALI KOJI SE ZAVARUJU	NAPOMENA
Istosmjerna elektroda (-) pol	Svi materijali osim Al i Mg i njihovih legura	Mogućnost najvećeg opterećenja elektrode
Istosmjerna elektroda (+) pol	Posebni slučajevi	Dozvoljeno vrlo malo opterećenje elektrode
Izmjenična	Al i Mg i njihove legure	Omogućava se uklanjanje oksida s površine osnovnog materijala

Prednosti:

- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje raznorodnih metala,
- nema troske (čišćenja),
- nema neželjenog prskanja kapljica metala zavara prilikom zavarivanja,
- estetski lijep zavar, gladak, nije potrebna naknadna obrada,
- najkvalitetniji zavareni spojevi.

Nedostaci:

- neekonomičan kod zavarivanja debljih materijala,
- otežan rad na terenu kod jačeg vjetra (problem sa zaštitnim plinom),
- visoki zahtjevi za točnost,
- zahtijeva jako dobru pripremu spoja,
- kvaliteta zavara ovisi o iskustvu zavarivača.

3.1.1. Zaštitni plin za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika

Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu, koja se daje što lakše ionizirati, te štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. U tu se svrhu koriste inertni plinovi, najčešće 100% argon (Ar), a zatim helij (He), te kombinacija (mješavina) ovih dvaju plinova. Argon je najgušći od inertnih plinova te je 10 puta gušći od helija. Ukoliko se koristi mješavina argona i helija, postiže se veći unos topline u odnosu na primjenu čistog argona, te je penetracija široka i vrlo duboka. Kod slučajeva gdje je vrh elektrode plav ili plavo crvenkast, to je indikacija da elektroda nema dobru zaštitu plinom. Nakon prekida luka zaštitni plin mora još neko vrijeme izlaziti i to ne samo radi zaštite taline nego i zbog zaštite vrha elektrode od naglog hlađenja i oksidacije. Stoga zaštitni plin treba nakon gašenja električnog luka naknadno istjecati 1 sekundu za svakih 10 A jakosti struje kojom je provedeno zavarivanje. Kod TIG postupka, struja zavarivanja prenosi se praktično samo ionima i elektronima zaštitnog plina. Ionizacijski potencijal je energija koja se izražava u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina i pretvaranja tog atoma u ion. Vrijednost potencijala ionizacije smanjuje se kako se molekularna masa plina povećava. Ionizacijski potencijal ima također veliki utjecaj na uspostavu na stabilnost električnog luka [7].

Kao najvažnije funkcije koje zaštitni plin ima prilikom postupka zavarivanja može se navesti sljedeće [8]:

- Zaštita rastaljenog metala od plinova iz atmosfere (kisika, dušika),
- Povećanje stabilnosti električnog luka,
- Podržavanje plazme električnog luka,
- Utjecaj na oblik i dubinu penetracije zavara,
- Utjecaj na estetski izgled samog zavara,
- Utjecaj na razinu para prilikom zavarivanja.

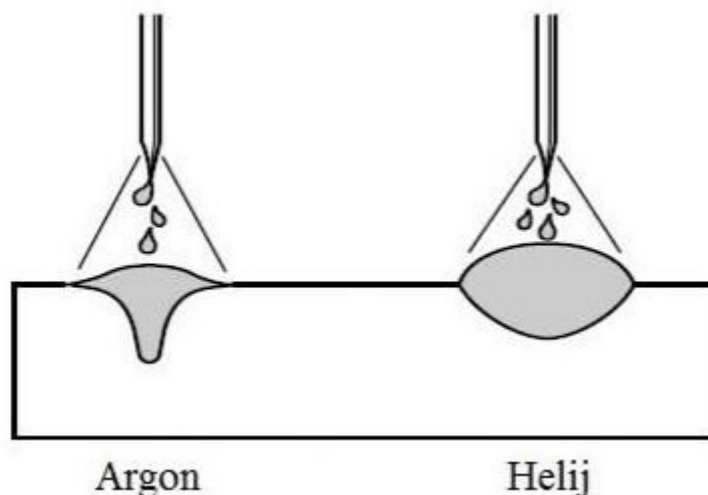
Upotrebom optimalnog zaštitnog plina u ovisnosti o parametrima može se poboljšati kvaliteta zavara i smanjiti troškove zavarivanja. Neki metali (npr. „obični“ ugljični čelik) imaju visoke tolerancije na čistoću plina, dok npr. austenitni nehrđajući čelici traže zaštitne plinove vrlo visoke čistoće, budući da oni imaju vrlo niske tolerancije na čistoću zaštitnog plina.

Kod zavarivanja argonom energija je usmjerena na usko područje. Time se dobiva mala dubina penetracije i manje protaljivanje, što je korisno kod zavarivanja tankih materijala, te zavarivanja u prisilnim položajima, zbog manjeg tečenja taline. Argon ima mali ionizacijski potencijal (15,7 eV), što znači da može lako pretvoriti atome u ione čime se postiže kvalitetna uspostava električnog luka i visoka stabilnost električnog luka prilikom zavarivanja istosmjernom strujom elektrodom na negativnom polu, te jako dobro čišćenje oksidnog sloja prilikom upotrebe izmjenične struje. Prilikom zavarivanja važna je čistoća argona, ona treba iznositi minimalno 99,95 %, iz čega proizlazi da se u boci plina argona može nalaziti maksimalno 0,05 % nečistoća. Ta vrijednost je prihvatljiva za većinu „običnih“ metala koji se zavaruju TIG zavarivanjem, međutim prilikom zavarivanja vatrootpornih, reaktivnih (titan, molibden, tantal) metala, pa i austenitnih nehrđajućih čelika minimalna čistoća argona iznosi 99,997 % [8, 9].

Helij je inertni plin vrlo male mase, a dobiva se odvajanjem od zemnog plina. Čistoća samog helija prilikom zavarivanja iznosi najmanje 99,99 %. Veće je toplinske vodljivosti od argona, pa ima i širi električni luk. Toplina iz središta električnog luka se može brže prenijeti do površine radnog komada, odnosno zavara, što rezultira većom dubinom penetracije i većom količinom topline unesene u zavar. Većeg je ionizacijskog potencijala (24,5 eV) od argona, što rezultira težom uspostavom električnog luka, naročito kod manjih jakosti električne struje. Budući da helij ima malu masu, potrebne su veće brzine protoka plina (otprilike tri puta veće nego kod argona). Time se dolazi do veće potrošnje samog plina, te je potrebno dobro ocijeniti da li se isplati upotreba helija.

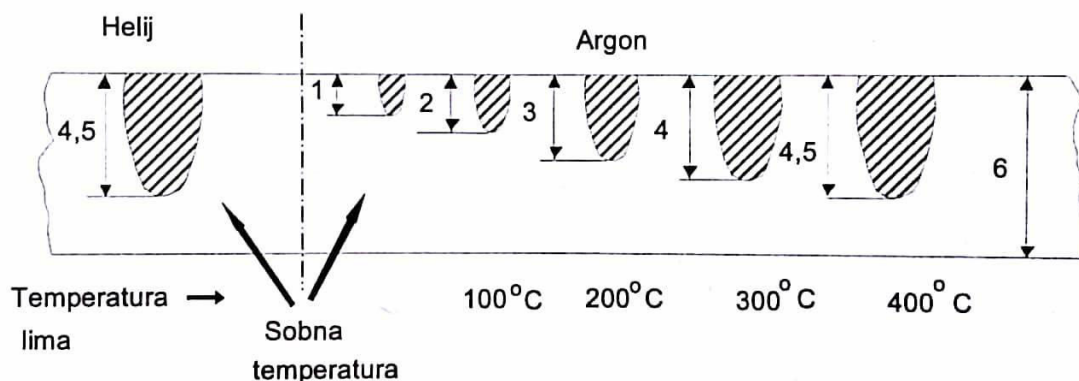
Česta je i kombinacija argona i helija, s ciljem povećanja brzine zavarivanja i penetracije u odnosu na TIG zavarivanje u zaštiti argona. Helij utječe na povećanje energije električnog luka što mu omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Veliki nedostatak ove mješavine je visoka cijena i poteškoće tijekom uspostavljanja električnog luka. Koristi se pretežno za zavarivanje aluminija, magnezija i bakra, jer povećani unos topline umanjuje efekt toplinske vodljivosti tih materijala [9].

Izbor količine zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti metala kojeg se zavaruje, vrsti zaštitnog plina, položaju zavarivanja i obliku spoja. Prevelika količina zaštitnog plina osim neekonomičnosti djeluje i štetno jer stvara prejak protok i uzrokuje vrtloženje plina, što smanjuje zaštitu taline te dolazi do ulaza zraka u takav nekontrolirani proces. Premala pak količina zaštitnog plina ne može istjerati sav zrak s mjesta zavarivanja. Na slici broj 10. može se vidjeti razlika efekata (penetracije) zaštitnih plinova argona i helija [8].



Slika 10. Razlika penetracije kod korištenja zaštitnih plinova argona (Ar) i helija (He) [8]

Vrsta zaštitnog plina može značajno utjecati na postignutu penetraciju. Na slici 10. može se vidjeti primjer pri TIG zavarivanju.

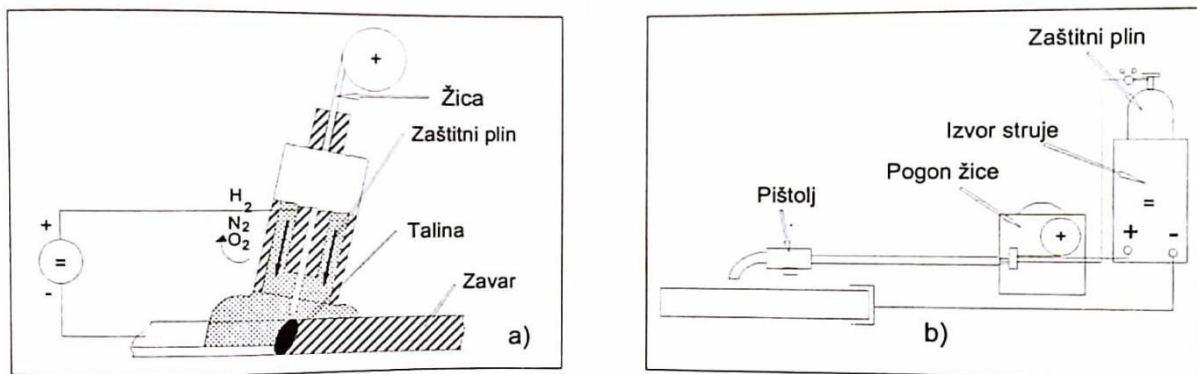


Slika 11. Utjecaj zaštitnog plina na zagrijavanje osnovnog materijala i penetraciju [7]

Na slici 11. može se vidjeti da se u zaštitnom plinu argonu postiže penetracija od 4,5 mm tek uz predgrijavanje od 400 °C, dok se primjenom helija ista penetracija može postići na sobnoj temperaturi. Iz tehnoloških i metalurških razloga, kod austenitnih se čelika nikako ne preporuča predgrijavanje, kao što je ranije napomenuto. Za kvalitetno je zavarivanje vrlo bitno osigurati protok (količinu) odgovarajućeg zaštitnog plina. Na količinu plina direktno utječe i sustav zaštitne atmosfere, odnosno sustav mješavine. Većim udjelom gušćeg plina mješavini osigurava veću krutost, a samim time i otpornost na poprečna strujanja zraka. Sapnice za zaštitni plin mogu biti različitih oblika i veličina, što ovisi o jakosti struje i poziciji zavarivanja.

3.2. MAG zavarivanje austenitnih čelika

MAG/MIG (engl. Metal Active/Inert Gas) je postupak zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO₂ (MAGC postupak) ili mješavini s pretežnim udjelom CO₂ (MAGM postupak), dok je MIG postupak u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (argona). Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz okolne atmosfere (zraka). Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice (u pravilu spojene na + pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala. Metalna elektroda (žica) i osnovni materijal se tale pod utjecajem električnog luka i sjedinjuju u zavareni spoj. Kod ovog postupka metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale se toplinom električnog luka. Žica je istodobno i dodatni materijal, tj. njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak MIG/MAG zavarivanja prikazan je na slici 12. [1, 7].



Slika 12. Shematski prikaz procesa MIG/MAG zavarivanja (a) i uređaja (b) [7]

Pod utjecajem električnog luka žica i osnovni materijal se tale, spajaju u jednu talinu i skrućuju u zavareni spoj (slika 10. (b)). Shematski prikaz izvora struje za MIG/MAG zavarivanje prikazan je na slici 12. b) [13].

Parametri kod MIG/MAG zavarivanja [14]:

- jakost struje I (A) - razmjerna s brzinom dobave žice v_z [m/min]
- napon električnog luka U (V) - razmjernan s visinom električnog luka
- brzina zavarivanja v_z [cm/min]
- slobodni kraj žice
- protok plina Q [lit/min] i vrsta plina
- induktivitet L [H]
- promjer žice d_z [mm]
- nagib pištolja α [°]

Prednosti MIG/MAG zavarivanja [14]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- široki raspon debljina osnovnog materijala
- visoka učinkovitost i proizvodnost
- pogodan za automatizaciju
- mogućnost primjene praškom punjene žice

Nedostaci MIG/MAG zavarivanja:

- kod rada na terenu moguće greške (vjetar otpuhuje zaštitni plin)
- problemi kod dovođenja žice
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima

3.2.1. *Prijenos metala električnim lukom pri MIG/MAG zavarivanju*

Pri zavarivanju MIG/MAG postupkom oblik prijenosa metala električnim lukom ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu žice, te karakteristikama izvora struje zavarivanja. Način prijenosa metala ima utjecaja na oblik zavara i na kvalitetu površine, veličinu štrcanja, a posebno time i na

gubitke dodatnog materijala, potrebu za operacijom čišćenja nakon zavarivanja, a i samu operaciju zavarivanja. Ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala može se odvijati na četiri načina:

- Kratki luk ($I = 50...170 \text{ A}$, $U = 13...21 \text{ V}$)
- Prijelazni (mješoviti) luk ($I = 170...235 \text{ A}$, $U = 22...25 \text{ V}$)
- Štrcajući luk ($I = 200...600 \text{ A}$, $U = 25...40 \text{ V}$)
- Impulsni luk

Prijenos metala kratkim lukom upotrebljava se pri zavarivanju žicama promjera 0,8 ; 1,0 i 1,2 mm, a zavarivanje se izvodi kratkim spojevima. Metalna se kap na vrhu elektrode povećava. Zbog male duljine luka metalna kap u određenom trenutku dodirne rastaljeni metal. Tada nastaje kratki spoj, električni se luk kratkotrajno prekida, a napon pada na nulu. Struja zavarivanja koja u istom trenutku naglo poraste pomaže otkidanju kapi s vrha elektrode. Nakon otkidanja kapi ponovno se uspostavlja električni luk i ciklus se ponavlja. U jednoj sekundi odvija se 150-250 ciklusa. Zbog male količine rastaljenog metala ovakav način zavarivanja pogodan je za zavarivanje tankih limova, korijenskog zavora, kao i za zavarivanje u prisilnim položajima.

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira visoki napon i jake struje zavarivanja. Poznato je da kod vrlo velikih struja i povišenih napona dolazi do snažnog "pinch-efekta" koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje idu u kupku. Zbog brzog prijelaza kapi vrijeme zagrijavanja kapi na vrhu elektrode je kratko, što skraćuje vrijeme trajanja metalurških reakcija. Posljedica toga je mali odgor legirajućih i pratećih elemenata. Štrcajući luk karakterizira prijenos sitnih metalnih kapljica u mlazu slobodnim letom bez kratkih spojeva, uz stalno održavanje električnog luka. Budući da je gustoća struje veća od 300 A/mm^2 , postiže se visok učinak taljenja i ekonomičnost. Štrcajući se luk primjenjuje kod zavarivanja žicama najvećeg promjera, popunjavanja žlijebova na debelim limovima i navarivanja detalja. Visoka gustoća struje utječe na prijenos metala bez kratkih spojeva. Zbog velikog unosa topline penetracija u metal je duboka, te je zavarivanje štrcajućim lukom pogodno za zavarivanje debelih komada ali samo u vodoravnom položaju (jer bi inače talina iscurila).

Prijenos metala prijelaznim ili mješovitim lukom postiže se pri naponima 22-25 V i pri struji zavarivanja 170 - 235 A. Metal se prenosi djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk (kao pri zavarivanju štrcajućim lukom). Pri tome je omogućeno

otkidanje manjih kapi koje ipak prilično prskaju naokolo. Prskanje kapljica manje je u mješavinama plina Ar + CO₂ nego u čistom CO₂.

Prijenos metala u kratkom, mješovitom i štrcajućem luku spada u tzv. prirodni prijenos metala. Danas se sve više koristi prijenos metala upravljani djelovanjem impulsnih električnih struja (pulzirajući ili impulsni električni luk). Impulsni luk se postiže samo u zaštiti argona (MIG) ili u mješavinama bogatim argonom. Ovaj oblik prijenosa kapljica metala u luku pruža mogućnost dobrog zavarivanja aluminijskog, bakra i Cr - Ni (austenitnih) čelika.

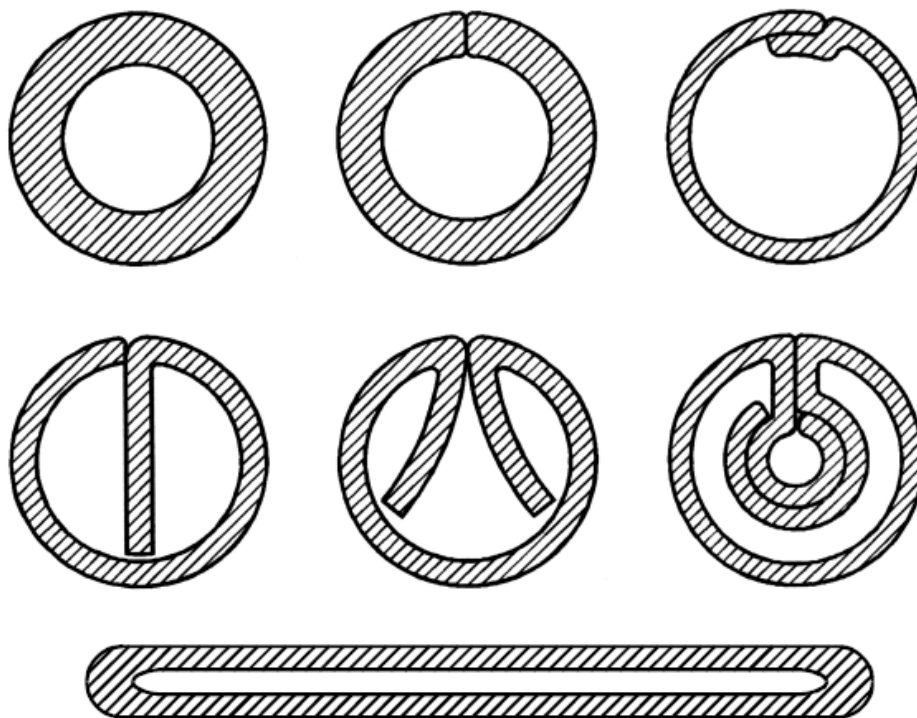
Za impulsne uređaje za zavarivanje karakteristični su strujni impulsi određene frekvencije i trajanja. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, a kap se otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom. Na taj se način lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, te izvodi zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvencija impulsa, a time i broj kapi, može se namještati (optimalna frekvencija je 50 Hz). Pri prijenosu kapi ne dolazi do kratkih spojeva. Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature metalne kapi, pa se može upravljati smjerom prijenosa metala. Glavne prednosti impulsnog prijenosa metala su: jednoličan zavar, smanjeno prskanje, stabilan luk, mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijale, primjenjivost u svim položajima zavarivanja [14].

3.2.2. *Dodatni materijal za MAG zavarivanje austenitnih čelika*

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm, a osim punih žica koriste se i praškom punjene žice. Žice koje se koriste kod zavarivanja čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzija vrlo točna (malih odstupanja) i treba biti uredno namotana na kolutove. Kvaliteta namotaja žice na kolut mora biti takva da se žica pri zavarivanju pravilno i jednako odmatava s koluta. Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja MAG postupkom, žica mora zadovoljiti određene uvjete u pogledu kemijskog sastava, kvalitete površine, odmatanja s koluta tijekom zavarivanja i dr. Kemijski sastav žice treba biti sličan osnovnom materijalu koji se zavaruje.

Praškom punjene žice mogu imati raznovrsne presjeke, ovisno o načinu proizvodnje. Mogu se koristiti uz plinsku zaštitu, a postoje i žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre, pa nije potrebna dodatna zaštita plinom. U skladu sa ranije opisanim načinima prijenosa metala MAG zavarivanjem (3.2.1.), prijenos metala se može realizirati tako da se kapljice s vrha elektrode prenose kroz električni luk slobodnim letom, ili da metalne kapljice s vrha elektrode ostaju uronjene u talinu prilikom kratkog spoja elektrode i

radnog komada, ili kombinacijom ova dva načina. Na slici 13. mogu se vidjeti karakteristični presjeci praškom punjenih žica [7].



Slika 13. Presjeci praškom punjenih žica [7]

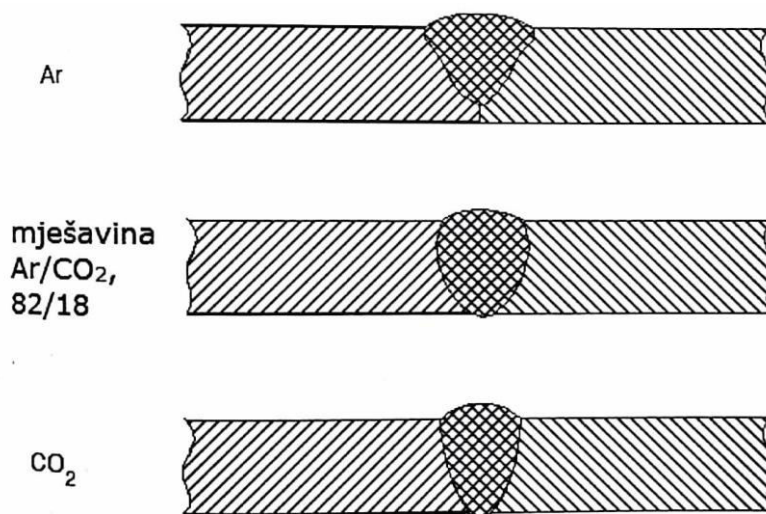
Praškom punjene žice mogu se koristiti za zavarivanje Cr-Ni čelika većih debljina. Zavarivanje austenitnih čelika (AISI 321, 304, 347, 302) može biti izvedeno i kombinacijom TIG i MAG postupkom. U tom slučaju, ukoliko se radi o većim debljinama, korijen se zavaruje TIG postupkom, dok je popunu moguće izvesti praškom punjenom žicom (136).

3.2.3. Zaštitni plinovi za MAG/MIG zavarivanje

Zaštitni plinovi koji se koriste kod MAG/MIG postupaka štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju za zavarivanje, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice. Ionizacijom plina dobiva se vodljivi prostor za održavanje električnog luka. U slučaju primjene inertnog zaštitnog plina (argona, helija ili njihove mješavine) ne dolazi do reakcija rastaljenog metala s plinom pa se takvi plinovi koriste kod zavarivanja osjetljivijih materijala na utjecaj plinova iz okolne atmosfere (aluminij, bakar i njihove legure, austenitni čelici i slično).

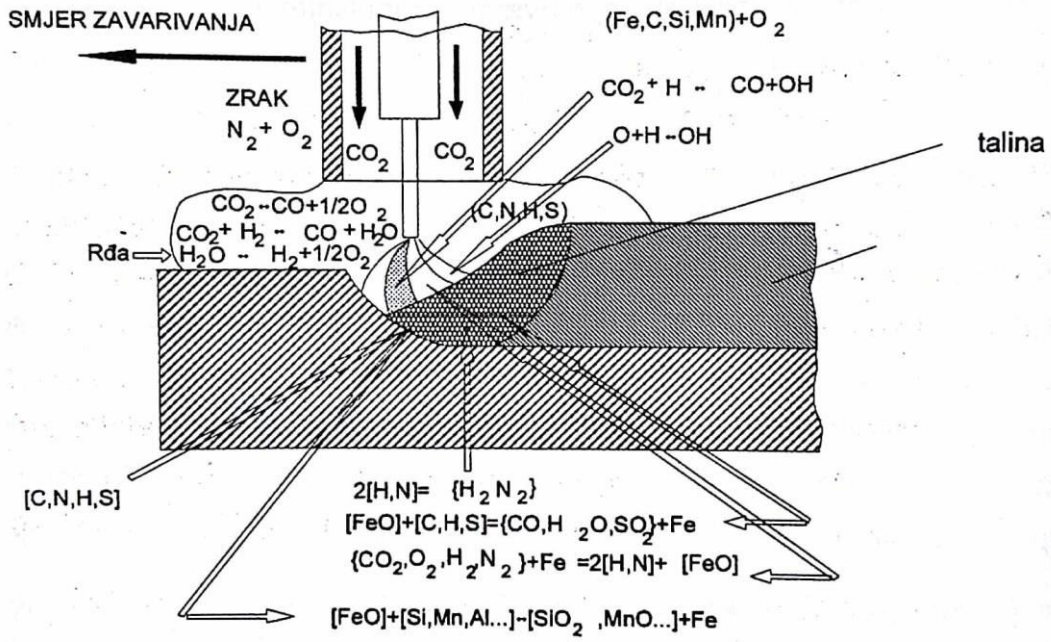
Moguća je primjena i aktivnih plinova (npr. kod praškom punjene žice), čistog ugljikovog dioksida ili mješavina argona, ugljikovog dioksida i kisika. Mješavina plinova u pogodnom omjeru ima kompromisna svojstva u pogledu penetracije, što je prikazano na slici

14. No, kod izbora mješavine treba uzeti u obzir ne samo kriterij penetracije u osnovni materijal, već se u obzir moraju uzeti i utjecaji poput izgleda zavora, sklonost pojavi pojedinom tipu grešaka, mehaničkih i korozivskih svojstava itd.



Slika 14. Oblik penetracije zavarenog spoja ovisno o primijenjenom zaštitnom plinu [7]

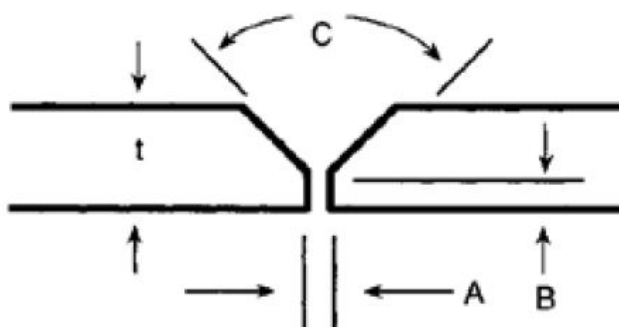
Kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova javlja se reakcija između ugljikovog dioksida i rastaljenog metala. Ugljikov dioksid je inertan pri nižim temperaturama, ali iznad 1600 °C dolazi do disociranja u ugljični monoksid i slobodni kisik, koji tada reagira s rastaljenim metalom. Ukoliko dođe do ponovnog vezanja u molekulu CO₂, oslobađa se toplina i kao posljedica se dobiva veće provarivanje. Štetno stvaranje oksida pri zavarivanju čelika može se spriječiti legiranjem dodatnog materijala (žice) dezoksidantima. Zbog odgorijevanja silicija i mangana usred zavarivanja, u žici će se nalaziti više ovih elemenata od količine koja je potrebna za dezoksidaciju. Uobičajeno je da se silicij i mangan dodaju u omjerima 1:2. Na slici 15. prikazane su kemijske reakcije pri MAG (CO₂) zavarivanju čelika.



Slika 15. Kemijske reakcije pri MAG (CO₂)zavarivanju čelika [7]

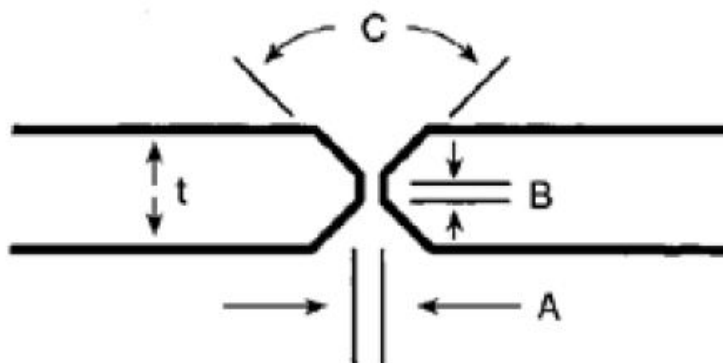
4. PRIPREMA SPOJA ZA ZAVARIVANJE

Za rezanje visokolegiranih austenitnih čelika najčešće se koriste piljenje, rezanje mlazom abraziva, rezanje plazmom, rezanje laserom, strojna obrada (glodanje) itd. Na sljedećim slikama prikazane su neke od vrsta pripreme spojeva.



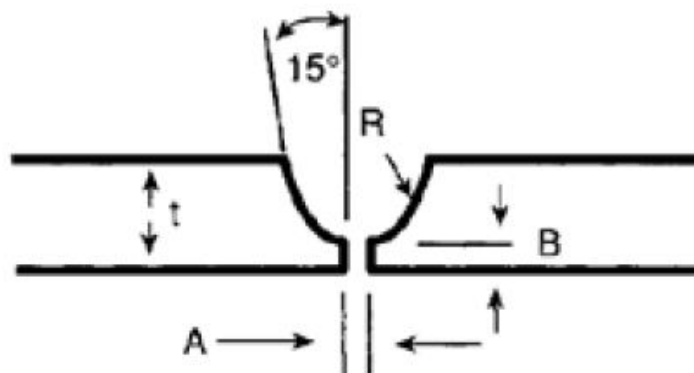
Slika 16. Sučeljeni "V" spoj limova [15]

Slika 16. prikazuje sučeljeni spoj limova za debljine t do najviše 12,7 mm, udaljenost A između limova mora biti najmanje 0,8 mm do najviše 2,3 mm, dimenzija B mora biti između 1,6 i 2,4 mm, dok je kut C preporuka da bude od 60 do 80 °.



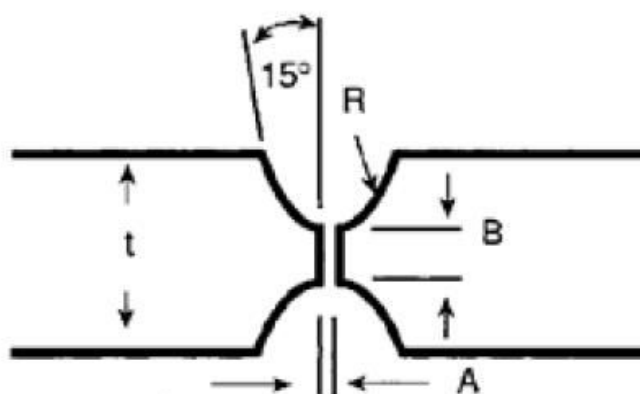
Slika 17. Obostrani sučeljeni "V" spoj limova [15]

Na slici 17. prikazan je obostrani sučeljeni "V" spoj limova za debljine t do najviše 12,7 mm, udaljenost A između limova mora biti najmanje 0,8 mm do najviše 2,3 mm, dimenzija B mora biti između 1,6 i 2,4 mm, dok je za kut C preporuka da bude od 60 do 80 °.



Slika 18. Sučeljeni jednostrani "U" spoj limova [15]

Na slici 18. prikazan je sučeljeni jednostrani "U" spoj limova. Ovakva priprema spoja se koristi kada su debljine limova veće od 19 mm. Razmak između ploča A mora biti od 1,6 mm do 3,2 mm, vrijednost visine B mora biti između 1,6 i 2,4 mm, a radijus R mora biti minimalno 6,4 mm.



Slika 19. Obostrani sučeljeni "U" spoj za ploču [15]

Slika 19. prikazuje obostrani sučeljeni "U" spoj za ploču. Ovakvom pripremom spoja izvode se ploče debljina t minimalno 19 mm, udaljenost između ploča A mora biti od 1,6 mm do 3,2 mm, vrijednost visine B mora biti između 1,6 i 2,4 mm, a radijus R mora biti minimalno 6,4 mm.

Ovisno o debljini materijala koji se zavaruje potrebno je odabrati adekvatnu pripremu spoja. Priprema spoja mora biti točna kako bi se dobio zavareni spoj bez grešaka. Upravo je loša priprema razlog zbog kojeg nastaje mnogo grešaka u zavarenim spojevima.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Uvod

Postoji dugi popis parametara koji direktno i indirektno utječu na kvalitetu zavarenog spoja, a jedan od najvećih utjecaja ima odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina. Od velikog značaja je određivanje kritičnog područja unosa topline te uspješna analiza posljedica primjene neodgovarajućih parametara s obzirom na korozijsku postojanost i mehanička svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada zavareni su uzorci od materijala AISI 321 i AISI 316 uz različite parametre, postupke zavarivanja i promjene dodatnih materijala. Primjenjivani su postupci TIG i MAG (praškom punjena žica), uz zaštitni plin argona za TIG zavarivanje, i mješavinu plina Ferroline C18 (argon i CO₂) za zaštitu zavarivanja praškom punjenom žicom. Uzorci su zavareni dodatnim materijalima Böhler EAS 4 M-IG, Böhler SAS 2-IG i praškom punjena žica SAS 2 PW-FD. Čelik AISI 316L zavaren je dodatnim materijalom EAS 4 M-IG, AISI 321 se obično zavaruje dodatnim materijalom SAS 2-IG za TIG zavarivanje i praškom punjenom žicom SAS 2 PW-FD, no u ovom eksperimentalnom dijelu istražiti će se utjecaj korištenja neodgovarajućeg dodatnog materijala. Za zavarivanje čelika AISI 321 dodatnim materijalom Böhler EAS 4 M - IG, bitno je analizirati utjecaj neodgovarajućeg dodatnog materijala (koji je predviđen za zavarivanje AISI 316) na mehaničke značajke zavarenog spoja.

Prvi dio eksperimentalnog rada (rezanje, zavarivanje i čišćenje) provedeno je u poduzeću Monter – Strojarske montaže d.d., dok se drugi dio eksperimentalnog dijela provodio na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u laboratoriju za zavarene konstrukcije.

Na odrežanim uzorcima potrebno je kombinacijom postupaka TIG (141) i MAG praškom punjenom žicom (136) zavariti 5 uzoraka, u kombinaciji materijala AISI 316L i AISI 321 sa određenim dodatnim materijalima, što je prikazano u tablici 14. Nakon zavarivanja izrezuju se uzorci na kojima se radi makroizbrusak te slijedi ocjenjivanje kvalitete i mehaničkih svojstava zavarenog spoja (statički vlačni pokus i ispitivanje savijanjem u 3 točke) s obzirom na raznovrsni dodatni materijal, postupak zavarivanja i zaštitni plin.

Tablica 14. Osnovni i dodatni materijali ispitnih uzoraka

Broj ispitnog uzorka	Osnovni materijal uzorka 1	Osnovni materijal uzorka 2	Dodatni materijal
1.	AISI 316L	AISI 316L	Böhler EAS 4 M-IG
2.	AISI 321	AISI 321	Böhler SAS 2-IG
3.	AISI 321	AISI 316L	Böhler EAS 4 M-IG
4.	AISI 321	AISI 321	Böhler EAS 4 M-IG
5.	AISI 321	AISI 321	Böhler SAS 2-IG + Böhler SAS 2 PW-FD (136)

5.2. Priprema ispitnih ploča

Za eksperimentalni dio ovog rada korišteni su materijali AISI 316L, debljina lima 10 mm, broj šarže 561308-002 te materijal AISI 321, debljina lima 12 mm i broj šarže 601056. Iz limova ispitne ploče su izrezane na stroju za rezanje ZINSER 2326 aparatom za plazma rezanje Hypertherm powermax 105, kao što je prikazano na slici 20.



Slika 20. Rezanje uzorka na stroju ZINSER 2326 plazmom

Ovaj stroj uz to što ima mogućnost plinskog i plazma rezanja, a omogućuje rezanje pod kutom, pa su tako ispitne ploče izrezane pod kutom od 30°, kako bi uzorci bili pripremljeni za sučeljeno zavarivanje pod 60°.

Nakon izrezivanja potrebno je pobrusiti uzorke brusnim pločama za nehrđajuće čelike, te prije zavarivanja odmastiti acetonom.

5.3. Zavarivanje ispitnih uzoraka

Nakon izrezivanja, brušenja i odmašćivanja uzoraka potrebno je zavariti uzorke. U sklopu ovog eksperimentalnog dijela rada zavarivati će se 4 uzorka TIG postupkom, a jedan uzorak kombinacijom TIG zavarivanja i MAG zavarivanja praškom punjenom žicom. Slika 21. prikazuje aparate koji su korišteni za eksperimentalni dio ovog rada.



a)



b)

Slika 21. Aparati za zavarivanje
a) KEMPPi MASTERTIG MLS 4000
b) KEMPPi PROMIG 530

Za TIG zavarivanje korišten je aparat KEMPPI MASTERTIG MLS 4000 sa hlađenjem MASTER COOL 10 (slika 21 a)), dok je za MAG zavarivanje praškom punjenom žicom korišten aparat KEMPPI PROMIG 530, sa hlađenjem PRO COOL 30 (prikazan na slici 21. b)).

Dodatni materijali koji se koristi za zavarivanje čelika kvalitete AISI 321 je Böhler SAS 2-IG, prema normi EN ISO 14343-A: W 19 9 Nb. Ovo je kemijski otporna visokolegirana žica za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (engl. high-alloyed GTAW rod chemical resistant) tipa W 19 9 Nb / ER 347 namjenjena za zavarivanje visoke kvalitete, koja je otporna na koroziju i tople pukotine. Osigurava zajamčena svojstva žilavosti i na -196 °C, te je otporna na interkristalnu koroziju do + 400 °C.

Za zavarivanje žicom SAS 2-IG predviđeno je korištenje zaštitnog plina 100 % argon, te postoje žice promjera 1,6, 2,0, 2,4, i 3,0 mm. Ovim je dodatnim materijalom predviđeno zavarivanje više vrsta čelika, kao npr.: AISI 347, AISI 321, AISI 302, AISI 304, AISI 304L, AISI 304LN itd. U tablici 15. i 16. biti će prikazani kemijski sastav žice i očekivana mehanička svojstva zavara [12].

Tablica 15. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler SAS 2-IG [12]

Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
Udio legirnog elementa (%)	0,05	0,5	1,8	19,6	9,5	+

Tablica 16. Mehanička svojstva zavara dodatnog materijala Böhler SAS 2 IG [12]

	Vlačna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Granica razvlačenja, R_e [N/mm ²]	Istezljivost, %	Udarni rad loma KV [J]
AISI 321	660	490	35	140 (pri +20°C)

Dodatni materijali koji se koristi za zavarivanje čelika kvalitete AISI 316 je Böhler EAS 4 M-IG, prema normi EN ISO 14343-A: W 19 12 3 L. Ovo je žica za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika tipa W 19 12 3 L / ER 316L projektirana za stvaranje zavara

visoke čistoće (kvalitete), koja je otporna na koroziju i tople pukotine. Daje zajamčena svojstva žilavosti i na $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, te je otporna na interkristalnu koroziju do čak $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Za zavarivanje žicom EAS 4 M-IG predviđeno je korištenje zaštitnog plina 100 % argona. Oznaka s gornje strane dodatnog materijala je W 19 12 3 L, a sa zadnje strane ER 316 L. Ovim je dodatnim materijalom predviđeno zavarivanje više vrsta čelika, kao npr.: AISI 316, AISI 316L, AISI 316Ti, AISI 316Cb itd. U tablici 17. i 18. biti će prikazani kemijski sastav žice i očekivana mehanička svojstva zavara [12].

Tablica 17. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M-IG [12]

Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mb
Udio legirnog elementa (%)	do 0,02	0,5	1,8	18,5	12,3	2,8

Tablica 18. Mehanička svojstva zavara dodatnog materijala Böhler EAS 4-MIG [12]

	Vlačna čvrstoća, $R_m[\text{N/mm}^2]$	Granica razvlačenja, $R_{p0,2}[\text{N/mm}^2]$	Istezljivost, %	Udarni rad loma KV [J]
AISI 316	610	470	38	140 (pri $+20^{\circ}\text{C}$)

Dakle uspoređujući dodatne materijale Böhler EAS 4 M-IG i SAS 2-IG, može se zaključiti da dodatni materijal SAS 2-IG ima višu vlačnu čvrstoću, višu granicu razvlačenja, ali nešto manju istezljivost od dodatnog materijala EAS 4 M-IG. Usporedbom tablica 15 i 17, iz aspekta kemijskog sastava, može se reći da se dodatnim materijalom Böhler SAS 2-IG dobivaju veći udjeli ugljika, kroma te legirni element niobij, dok se dodatnim materijalom Böhler EAS 4 M-IG dobiva veći udio nikla i molibdena. Većim udjelima kroma kao legirnog elementa dobiva se veća korozijska postojanost, no ovaj legirni element u nehrđajućem čeliku smanjuje toplinski vodljivost i toplinsku rastezljivost. Dodavanjem nikla povećava se žilavost i pri niskim temperaturama, a isto kao i krom smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost. Molibden se dodaje nehrđajućim čelicima da bi povisio otpornost na koroziju,

osobito u kontaktu s kiselinama, sa njim se smanjuje opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja te povisuje čvrstoću pri povišenim temperaturama.

Böhler SAS 2 PW-FD je praškom punjena žica za zavarivanje visokolegiranih austenitnih čelika, koja je visoko korozivski postojana. Ova žica punjena rutilnim praškom sa brzim stvrdnjavanjem troske održava odlične operacijske karakteristike i velike brzine zavarivanja. Ovaj dodatni materijal osigurava dobro i lako zavarivanje bez prskanja, zavarivanje u području štrcajućeg luka daje jaku penetraciju u osnovni materijal, te se troska nakon zavarivanja lako skida.

Prednosti korištenja praškom punjene žice Böhler SAS 2 PW-FD:

- omogućeno korištenje jeftinijih zaštitnih plinova,
- smanjenje prskanja prilikom zavarivanja (manje brušenja)
- smanjenje temperaturnih obojenja i oksidacije,
- lako rukovanje i osiguranje visoke penetracije (smanjuje rizik od grešaka u zavarenim spojevima i sa time povezanim troškovima popravaka),
- gladak i čist završni sloj (smanjena naknadna obrada nakon zavarivanja).

Zbog svojih karakteristika koristi se uglavnom za zavarivanje spojeva koji su namijenjeni za rad u području temperatura od -120°C do $+400^{\circ}\text{C}$ te za silazno (engl. downhand) zavarivanje i horizontalno zavarivanje (1G, 1F, 2F). U kemijskom sastavu zavara mogu se očekivati kemijski elementi poput ugljika (C), silicija (Si), mangana (Mn), kroma (Cr), nikla (Ni) i niobija (Nb), što se i podudara sa kemijskim sastavom žice za TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika AISI 321. Ova je žica promjera $\varnothing 1,2$ mm spojena na + pol, u području rada 100 – 220 A i 20 – 31 V. Za ovu žicu, osim ranije spomenute mješavine Ar + 18 % CO_2 , moguće je korištenje i 100 % CO_2 , te mješavine argona i ugljikovog dioksida u postocima od 15 – 25 %. U tablici 19. prikazana su očekivana mehanička svojstva zavarenog spoja izvedenog praškom punjenom žicom Böhler SAS 2 PW-FD u zaštitnom plinu Ar + 18 % CO_2 .

Tablica 19. Mehanička svojstva zavarenog spoja izvedenog praškom punjenom žicom Böhler SAS 2 PW FD [12]

	Vlačna čvrstoća, R_m [N/mm ²]	Granica razvlačenja, R_e [N/mm ²]	Istezljivost, %	Udarni rad loma KV [J]
Böhler SAS 2 PW-FD	600	420	35	75 (pri +20°C)

Ukoliko se usporede mehanička svojstva zavara zavarenog praškom punjenom žicom Böhler SAS 2 PW FD (tablica 19.) i mehanička svojstva dobivena dodatnim materijalom za TIG zavarivanje Böhler SAS 2-IG (tablica 16.) jasno je vidljivo da se mehanička svojstva znatno razlikuju. Kod praškom punjene žice vlačna čvrstoća i granica razvlačenja imaju znatno niže vrijednosti (za čak 10% manje). Dok se kod dodatnih materijala za TIG zavarivanje AISI 316L i AISI 321 ne razlikuju toliko mehanička svojstva kao kod zavarivanja različitim postupcima.

5.3.1. Zavarivanje ispitnog uzorka 1

Ispitni uzorak 1 zavaren je od dvije ploče AISI 316L dimenzija 150 x 300 x 10 mm. Limovi su pozicionirani sa međusobnim razmakom između ploča od 1 mm. Uzorak 1 zavaren je TIG postupkom u plinskoj zaštiti 100 % argona tvrtke Messer, trgovačkog naziva Argon specijal 4.8, protoka 16 litara u minuti.

Dodatni materijal je ranije opisani Böhler EAS 4 M-IG, za popune i završni sloj je promjera \varnothing 2,4 mm, a za korijen promjera \varnothing 2 mm. Za TIG zavarivanje korištena je volframova elektroda proizvođača RHINO WT 20, dimenzija \varnothing 3,2 X 175 mm. Na slici 22. prikazano je zavarivanje prve popune ispitnog uzorka 1.



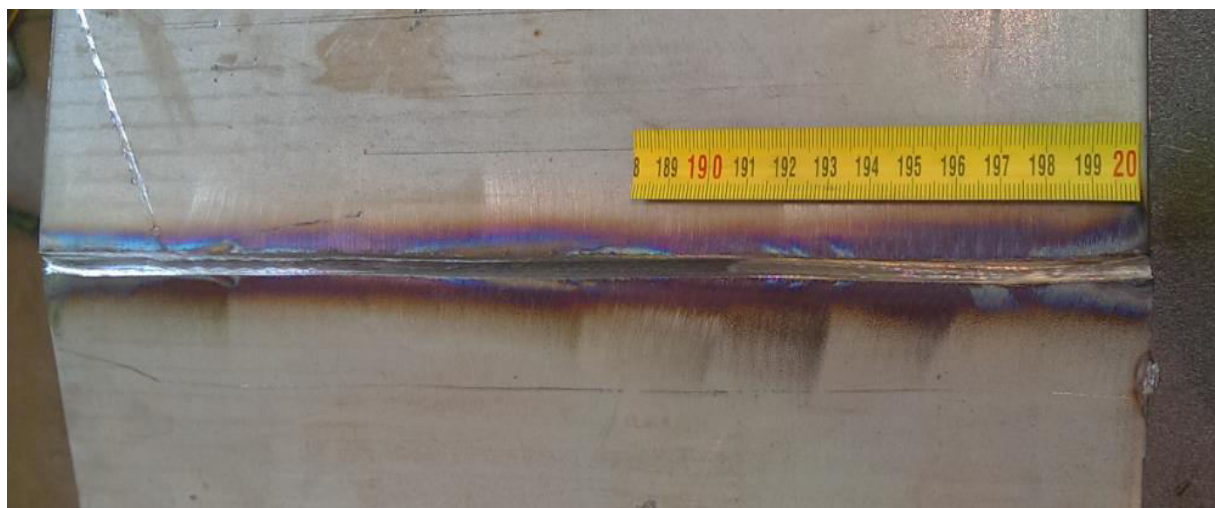
Slika 22. Zavarivanje prve popune uzorka 1

Slika 23. prikazuje izgled zavara nakon 3 popune i završnog sloja.



Slika 23. Izgled zavara ispitnog uzorka 1

Kao što je ranije opisano, zbog nemogućnosti formiranja (plinske zaštite) lima, nakon što su zavarena 3 sloja popune i završni sloj, ispitna ploča se okreće te se sa strane korijena brusi i čisti, jednim prolazom TIG-om protaljuje, te se na kraju zavaruje korijen. Na slici 24. vidi se uzorak koji je pobrušen sa strane korijena, a slika 25. prikazuje zavareni spoj ispitnog uzorka br. 1 nakon protaljivanja.



Slika 24. Pobrušeno stanje zavarenog spoja sa strane korijena



Slika 25. Zavareni spoj sa strane korijena nakon protaljivanja

Dubljim brušenjem zavora sa strane korijena odstranjenje su greške nastale zbog nekorištenja zaštitnog plina („formira“), te kako bi se dodatno osigurao zavareni spoj, protaljeno je cijelo područje, jer bi se one greške koje nisu vidljive nakon brušenja, eventualno ispravile protaljivanjem (isplivale bi iz zavarenog spoja).

Tablica 20. Unosi topline ispitnog uzorka 1

Broj prolaza	Jakost struje I_z [A]	Napon U_z [V]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]	Unos topline Q_z [kJ/cm]
1. Popuna br. 1	150	11,8	20,0	3,2
2. Popuna br. 2	180	12,8	15,0	5,5
3. Popuna br. 3	181	12,6	18,75	4,4
4. Završni sloj	190	13,6	10,9	8,5
5. Protaljivanje	140	10,4	16,22	3,2
6. Korijen	140	12,5	12,0	5,3

S obzirom na sve navedene podatke mogu se izračunati svi unosi topline pojedinih prolaza sučeljenog V spoja, prema formuli 1.

$$Q_z = (60/1000) \times (U_z \times I_z \times \eta_z) / v_z \quad [\text{kJ/cm}] \quad (1)$$

Gdje je:

- napon zavarivanja, U_z [V]
- struja zavarivanja, I_z [A]
- brzina zavarivanja, v_z [cm/min]
- koeficijent korisnog djelovanja električnog luka, η_{el}

Koeficijent korisnog djelovanja električnog luka za TIG zavarivanje iznosi 0,6, a u tablici 20. mogu se očitati pojedini unosi topline za ispitni uzorak broj 1 izračunati prema formuli 1.

5.3.2. Zavarivanje ispitnog uzorka 2

Ispitni uzorak 2 zavaren je od dvije ploče AISI 321 dimenzija 150 x 300 x 10 mm. Sučeljeni „V“ spoj limova pripremljen je plazma rezanjem pod 60° kao što je opisano u poglavlju 4. Limovi su pozicionirani sa međusobnim razmakom između ploča od 1 mm. Uzorak 2 zavaren je TIG postupkom u plinskoj zaštiti 100 % argona tvrtke Messer, trgovačkog naziva Argon specijal 4.8, protoka 16 litara u minuti.

Dodatni materijal je ranije opisani Böhler SAS 2 - IG , a popune i završni sloj je promjera \varnothing 2,4 mm, a za korijen promjera \varnothing 2 mm. Za TIG zavarivanje korištena je volframova elektroda WT 20, dimenzija \varnothing 3,2 X 175 mm. Na slici 26. prikazan je zavar popune broj 1.



Slika 26. Zavareni spoj popune broj 1 ispitnog uzorka 2

Kao što je opisano u poglavlju 5.3.1., zbog nemogućnosti formiranja (plinske zaštite) lima, nakon što su zavarena 3 sloja popune i završni sloj, ispitna ploča se okreće te se sa strane korijena brusi i čisti, jednim prolazom TIG-om protaljuje, te se na kraju zavaruje korijen. Na slici 27. vidi se ispitni uzorak koji je pobrušen sa strane korijena, a slika 28. prikazuje zavareni spoj ispitnog uzorka broj 2 nakon zavarivanja korijena. U tablici 21. prikazani su parametri zavarivanja sa izračunatim unosima toplina.



Slika 27. Izrezan (pobrušen) zavareni spoj sa strane korijena



Slika 28. Korijen zavarenog spoja ispitnog uzorka 2

Na slici 29. prikazan je završni sloj zavarenog spoja koji je u potpunosti zavaren sa obje strane.



Slika 29. Zavareni spoj ispitnog uzorka 2

Tablica 21. Unosi topline ispitnog uzorka 2

Broj prolaza	Jakost struje I_z [A]	Napon U_z [V]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]	Unos topline Q_z [kJ/cm]
1. Popuna br. 1	171	12,1	18,75	4,0
2. Popuna br. 2	220	12,4	19,35	5,0
3. Popuna br. 3	220	13,2	20,0	5,2
4. Završni sloj	175	12,5	12,0	6,6
5. Protaljivanje	171	11,9	16,22	4,5
6. Korijen	150	12,1	10,7	6,1

5.3.3. Zavarivanje ispitnog uzorka 3

Ispitni uzorak 3 zavaren je od dvije ploče, AISI 321 i AISI 316L dimenzija 150 x 300 x 10 mm. Sučeljeni „V“ spoj limova pripremljen je plazma rezanjem pod 60° kao što je opisano u poglavlju 4. Limovi su pozicionirani sa međusobnim razmakom između ploča od 1 mm. Ispitni uzorak 3 zavaren je TIG postupkom u plinskoj zaštiti 100 % argona tvrtke Messer, trgovačkog naziva Argon specijal 4.8, protoka 16 litara u minuti. Dodatni materijal je ranije opisani Böhler EAS 4 M-IG, za popune i završni sloj je promjera \varnothing 2,4 mm, a za korijen promjera \varnothing 2 mm. Za TIG zavarivanje korištena je volframova elektroda WT 20, dimenzija \varnothing 3,2 X 175 mm. Kao što je opisano u poglavlju 5.3.1., zbog nemogućnosti formiranja (plinske zaštite) lima, nakon što su zavarena 3 sloja popune i završni sloj, ispitna ploča se okreće te se sa strane korijena brusi i čisti, jednim prolazom TIG-om protaljuje, te se

na kraju zavaruje korijen (postupak je isti kao i kod zavarivanja prvog i drugog ispitnog uzorka, samo sa drugim osnovnim materijalom, dodatnim materijalom i parametrima zavarivanja).

U tablici 22. prikazani su pojedini unosi topline za zavarivanje svakog prolaza ispitnog uzorka 3, koji su izračunati po formuli 1 (5.3.1.).

Tablica 22. Unosi topline ispitnog uzorka 3

Broj prolaza	Jakost struje I_z [A]	Napon U_z [V]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]	Unos topline Q_z [kJ/cm]
1. Popuna br. 1	180	12,3	20,0	4,0
2. Popuna br. 2	226	12,6	20,7	5,0
3. Popuna br. 3	226	12,9	24,0	4,4
4. Završni sloj	161	12,3	13,64	5,2
5. Protaljivanje	181	11,9	24,0	3,2
6. Korijen	180	11,8	11,54	6,63

5.3.4. Zavarivanje ispitnog uzorka 4

Ispitni uzorak 4 zavaren je od dvije ploče materijala AISI 321 dimenzija 150 x 300 x 10 mm. Sučeljeni „V“ spoj limova pripremljen je plazma rezanjem pod 60° kao što je opisano u poglavlju 4. Limovi su pozicionirani sa međusobnim razmakom između ploča od 1 mm. Ispitni uzorak 4 zavaren je TIG postupkom u plinskoj zaštiti 100 % argona tvrtke Messer, trgovačkog naziva Argon specijal 4.8, protoka 16 litara u minuti. Dodatni materijal je ranije opisani Böhler EAS 4 M-IG, za popune i završni sloj je promjera \varnothing 2,4 mm, a za korijen promjera \varnothing 2 mm. Za TIG zavarivanje korištena je volframova elektroda RHINO WT 20, dimenzija \varnothing 3,2 X 175 mm. Kao što je opisano u poglavlju 5.3.1., zbog nemogućnosti formiranja (plinske zaštite) lima, nakon što su zavarena 3 sloja popune i završni sloj, ispitna ploča se okreće te se sa strane korijena brusi i čisti, jednim prolazom TIG-om protaljuje, te se na kraju zavaruje korijen (postupak je isti kao i kod zavarivanja ostalih ispitnih uzoraka, samo sa drugim osnovnim materijalom, dodatnim materijalom i parametrima zavarivanja). Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 23., zajedno sa izračunatim unosom topline prema formuli 1.

Tablica 23. Unosi topline ispitnog uzorka 4

Broj prolaza	Jakost struje I_z [A]	Napon U_z [V]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]	Unos topline Q_z [kJ/cm]
1. Popuna br. 1	190	11,9	18,75	4,4
2. Popuna br. 2	221	12,1	21,43	4,5
3. Popuna br. 3	222	12,8	18,75	5,5
4. Završni sloj	161	12,3	12,25	5,8
5. Protaljivanje	191	12,5	19,40	4,4
6. Korijen	191	12,4	13,30	6,4

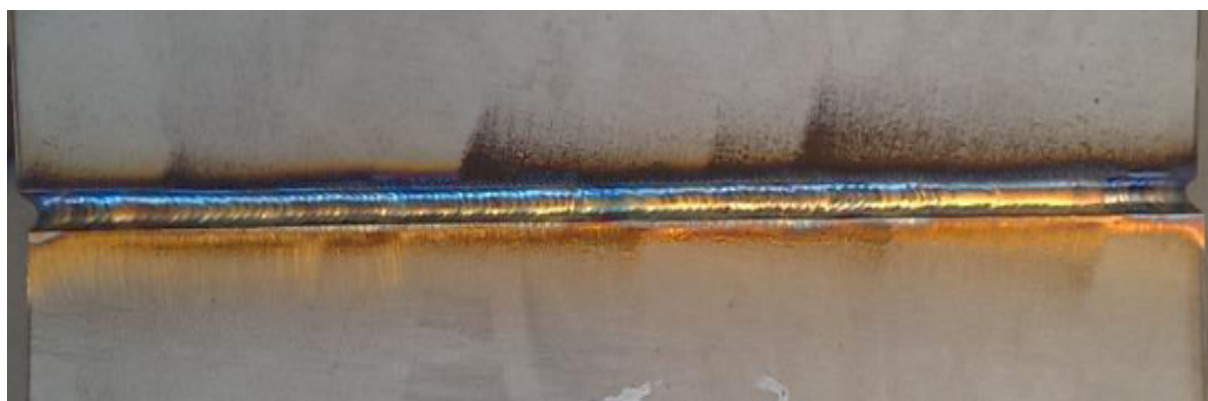
5.3.5. Zavarivanje ispitnog uzorka 5

Ispitni uzorak 5 zavaren je od dvije ploče materijala AISI 321 dimenzija 150 x 300 x 10 mm. Sučeljeni „V“ spoj limova pripremljen je plazma rezanjem pod 60° kao što je opisano u poglavlju 4. Limovi su pozicionirani sa međusobnim razmakom između ploča od 1 mm. Dvije popune i korijen ispitnog uzorka 5 zavarene su TIG postupkom u plinskoj zaštiti 100 % argona tvrtke Messer, trgovačkog naziva Argon specijal 4.8, protoka 16 litara u minuti, dok je treća popuna i završni sloj zavaren MAG postupkom (136) praškom punjenom žicom Böhler SAS 2 PW-FD, u plinskoj zaštiti mješavine Ferroline C18 tvrtke Messer, protoka 14 lit/min. Dodatni materijal za TIG postupak je ranije opisani Böhler SAS 2 - IG, promjera \varnothing 2 mm. Za TIG zavarivanje korištena je volframova elektroda WT 20, dimenzija \varnothing 3,2 X 175 mm. Kao što je opisano u poglavlju 5.3.1., zbog nemogućnosti formiranja (plinske zaštite) lima, nakon što su zavarena dvije popune, ispitna ploča se okreće te se sa strane korijena brusi i čisti, jednim prolazom TIG-om protaljuje, te se na kraju zavaruje korijen. Slika 30. prikazuje djelomično zavaren ispitni uzorak 5, gdje su zavareni korijen i popune TIG postupkom, te je nakon toga zavarivan MAG postupkom praškom punjenom žicom.



Slika 30. TIG zavarivanje ispitnog uzorka 5

Na slici 31. prikazana je popuna izvedena MAG postupkom praškom punjenom žicom.



Slika 31. Popuna zavarena praškom punjenom žicom

Nakon što je zavarena popuna MAG postupkom praškom punjenom žicom, očišćena je troska i zavaren je istim postupkom završni spoj koji je prikazan na slici 32.



Slika 32. Završni sloj ispitnog uzorka 5

U tablici 24. prikazani su pojedini unosi topline za zavarivanje svakog prolaza ispitnog uzorka 4, koji su izračunati po formuli 1 (5.3.1.). Vrlo je važno kod izračuna unosa topline uzeti u obzir da je stupanj iskoristivosti MAG postupka praškom punjenom žicom 0,8, a ne 0,6 kao što je to slučaj kod TIG zavarivanja.

Tablica 24. Unosi topline ispitnog uzorka 5

Broj prolaza	Jakost struje I_z [A]	Napon U_z [V]	Brzina zavarivanja v_z [cm/min]	Unos topline Q_z [kJ/cm]
1. Popuna br. 1	190	11,8	18,5	4,4
2. Popuna br. 2	220	12,2	21,5	4,5
3. Popuna br. 3	187	28,0	32,5	7,7
4. Završni sloj	211	29,2	36,0	8,2
5. Protaljivanje	170	12,0	17,2	4,3
6. Korijen	170	11,9	14,1	5,2

5.4. Čišćenje zavarenih spojeva nakon zavarivanja

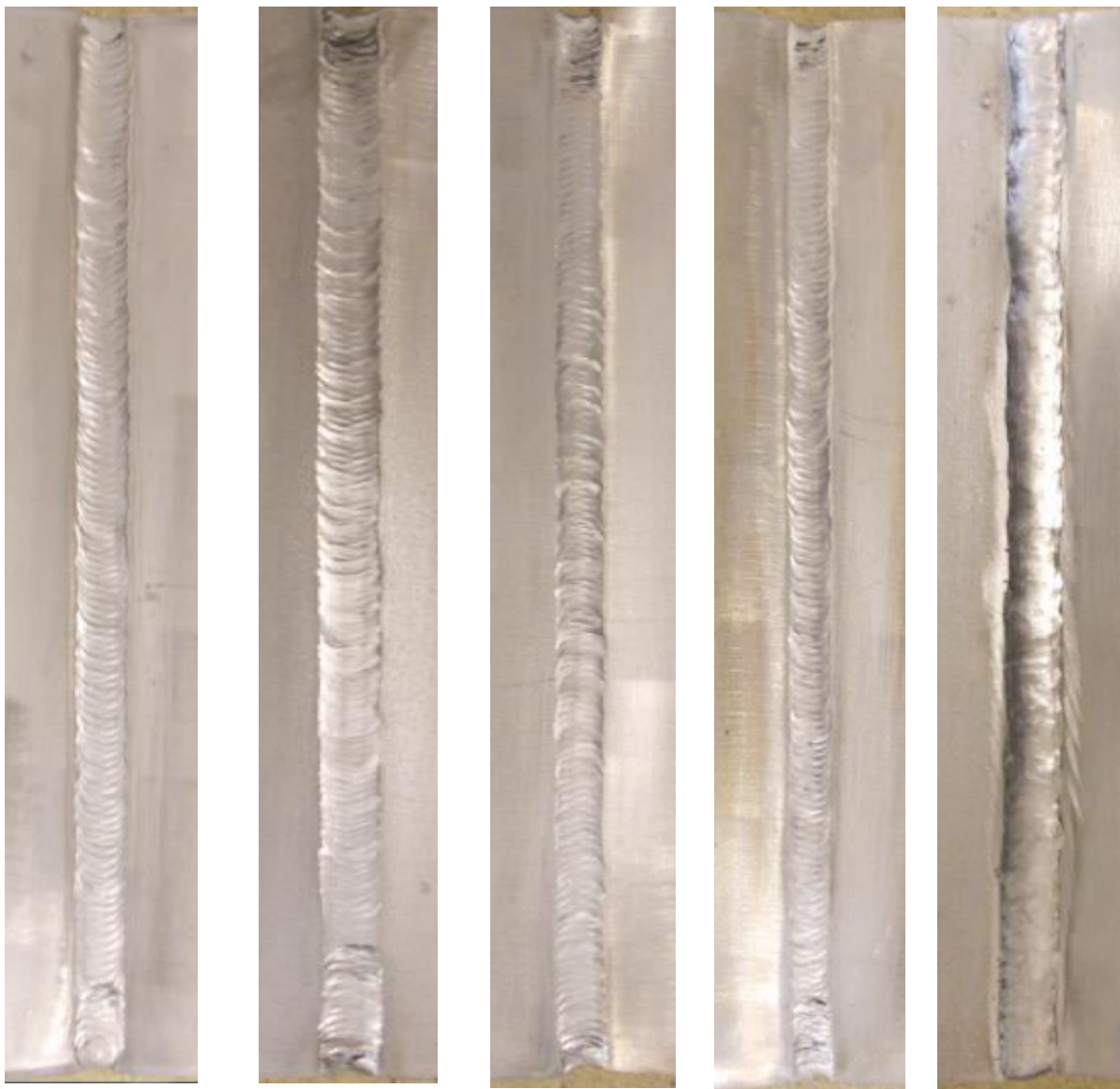
Nakon postupka zavarivanja austenitnih čelika, vrlo je bitno čišćenje i odmašćivanje površina u blizini zone utjecaja topline. Nakon procesa zavarivanja, zavareni spoj ima brojne obojenja i „zacrnljenje“, pa je iz tog razloga potrebno očistiti spoj i „pasivirati“ ga. Za odmašćivanje koristi se aceton, a EDELSTAHL – BEIZPASTE za čišćenje zavora.

Beizpasta se nanosi kistom uz obaveznu zaštitu očiju, te se ostavlja minimalno 30 minuta kako bi očistila područje zavora. Nakon 30 minuta kada pasta pozeleni, potrebno ju je oprati vodom, odmastiti acetonom i ukoliko je potrebno polirati. Na slici 33. prikazano je nanošenje paste kistom.



Slika 33. Nanošenje BEIZPASTE kistom

Na slikama 34. i 35. prikazani su svi očišćeni zavari ispitnih uzoraka koji su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje ispitivani nerazornom metodom (radiografijom), a za utvrđivanje mehaničkih svojstava napravljeni su uzorci te makroizbrusci za utvrđivanje geometrije zavarenog spoja.



Ispitni uzorak 1 Ispitni uzorak 2 Ispitni uzorak 3 Ispitni uzorak 4 Ispitni uzorak 5

Slika 34. Izgled ispitnih površina lica zavara nakon čišćenja Beizpastom



Ispitni uzorak 1

Ispitni uzorak 2

Ispitni uzorak 3

Ispitni uzorak 4

Ispitni uzorak 5

Slika 35. Izgled ispitne površine korijena zavara nakon čišćenja Beizpastom

5.5. Snimanje računalnom radiografijom i analiza rezultata

Radiografska metoda je volumna metoda nerazornog ispitivanja i kao takva koristi se za otkrivanje nepravilnosti koje se nalaze u materijalu i nisu otvorene prema površini, te se ova metoda koristi svojstvima elektromagnetskog zračenja X (rengenskim) i gama (radioizotopnim) zrakama. Radiografska kontrola obuhvaća ispitivanja čiji je cilj otkrivanje grešaka u zavarenom spoju:

- pukotina,
- uključaka troske,
- poroznost,
- i neprovarenog korijena.

NDT (engl. „non-destructive testing“) ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u prostoriji za radiografsko snimanje laboratorija za nerazorna ispitivanja. Mjerenja su obavljena rendgenografijom. Korišten je rendgenski uređaj BALTEAU GM 300D.

Nakon snimanja na rendgenskom uređaju BALTEAU GM 300D, slikovne ploče Industrex XL blue 14" x 17" i 10" x 12" skenirane su na skeneru VMI 3600SF, te su radiogrami pregledani programom iSee! v1.11.1. Parametri snimanja prikazani su u tablici 25.

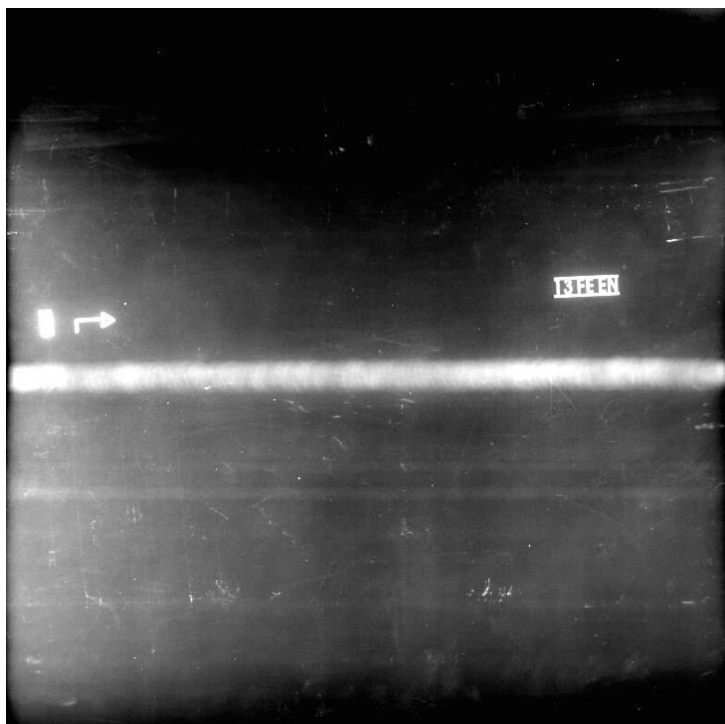
Tablica 25. Parametri radiografskog snimanja

	Ispitni uzorak 1	Ispitni uzorak 2	Ispitni uzorak 3	Ispitni uzorak 4	Ispitni uzorak 5
Debljina [mm]	10	12	10/12	12	12
Napon [kV]	150	175	150	175	175
Struja [mA]	4	4	4	4	4
Vrijeme ekspozicije [s]	105	135	135	135	135
Film – fokus udaljenost [mm]	700	700	700	700	700

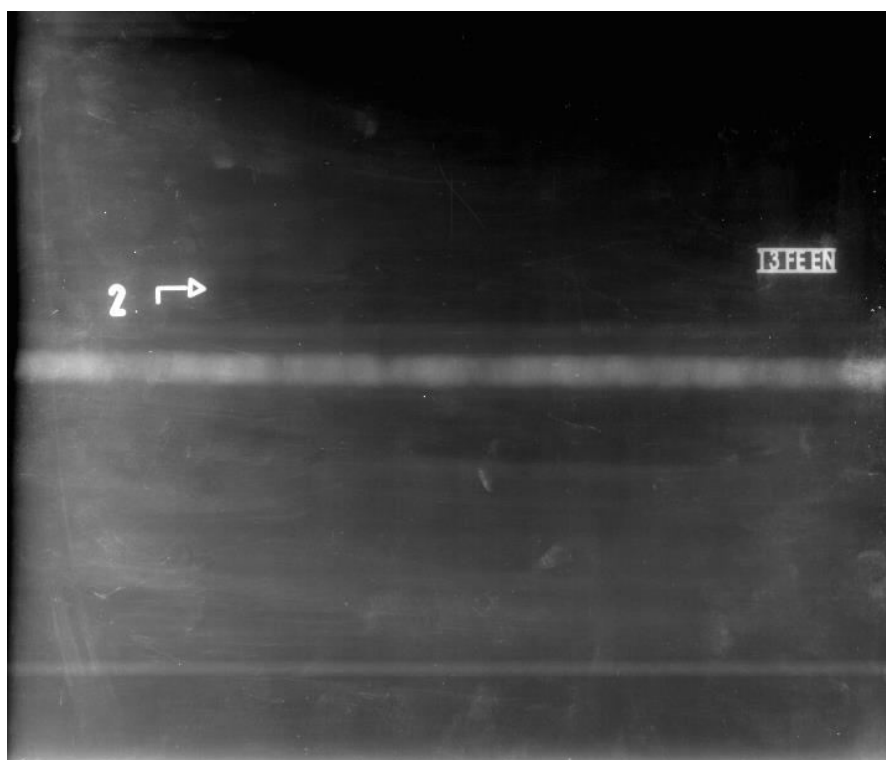
Parametri skeniranja:

- Napon lasera - 15 V
- Napon fotomultiplikatora - 5.25 V
- Rezolucija skeniranja - 50 μ m

Dobiveni radiogrami ispitnih uzoraka mogu se vidjeti na slikama 36., 37., 38., 39., 40.



Slika 36. Radiogram ispitnog uzorka 1



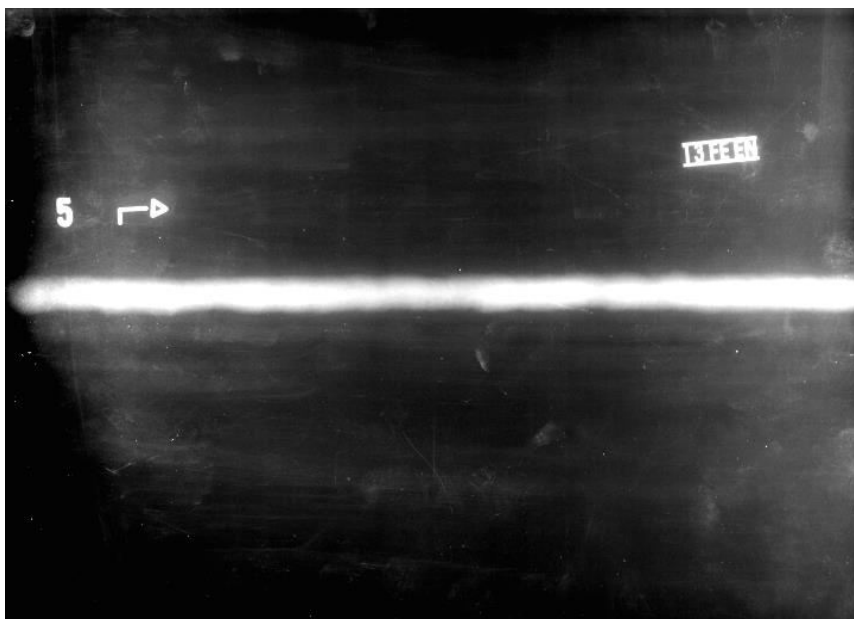
Slika 37. Radiogram ispitnog uzorka 2



Slika 38. Radiogram ispitnog uzorka 3



Slika 39. Radiogram ispitnog uzorka 4

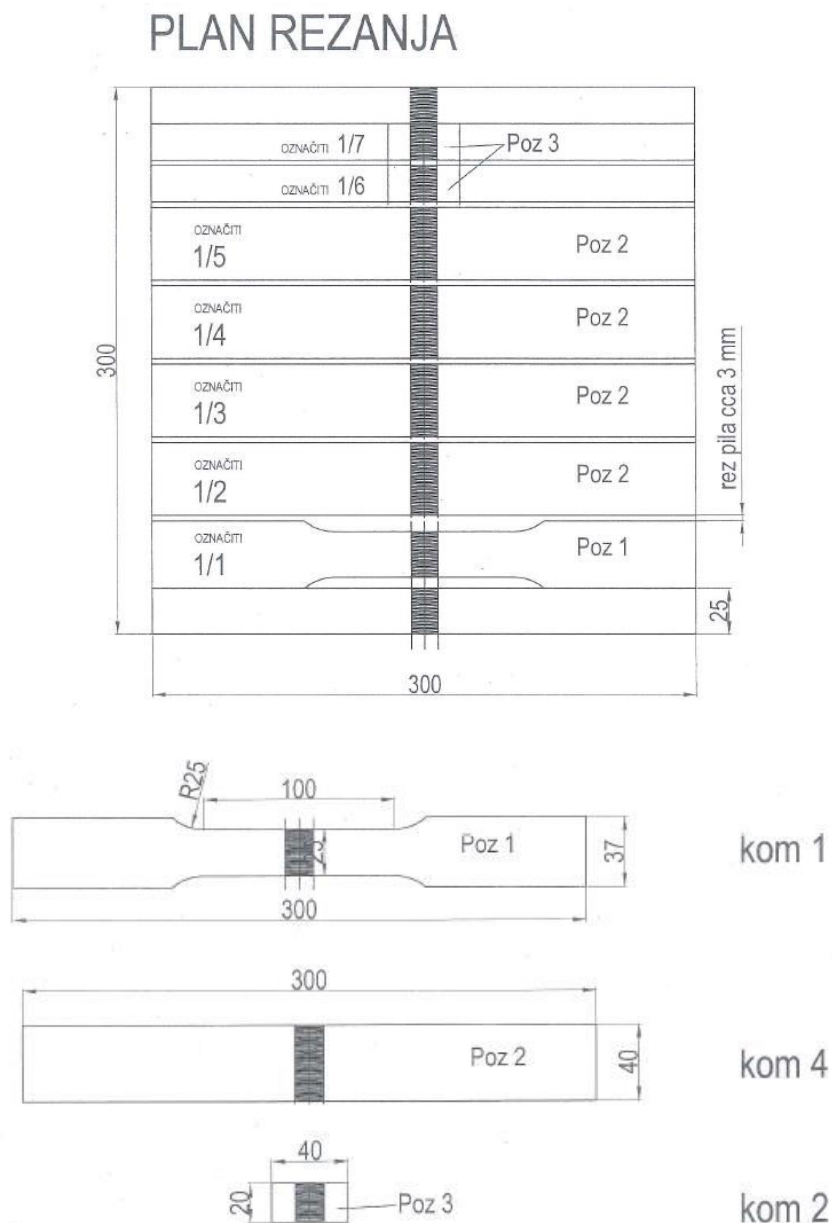


Slika 40. Radiogram ispitnog uzorka 5

Na svih 5 ispitnih uzoraka radiografijom je dokazana kvaliteta zavora, tek se u tragovima vide nekoliko sitnih pora.

5.6. Rezanje ispitnih uzoraka

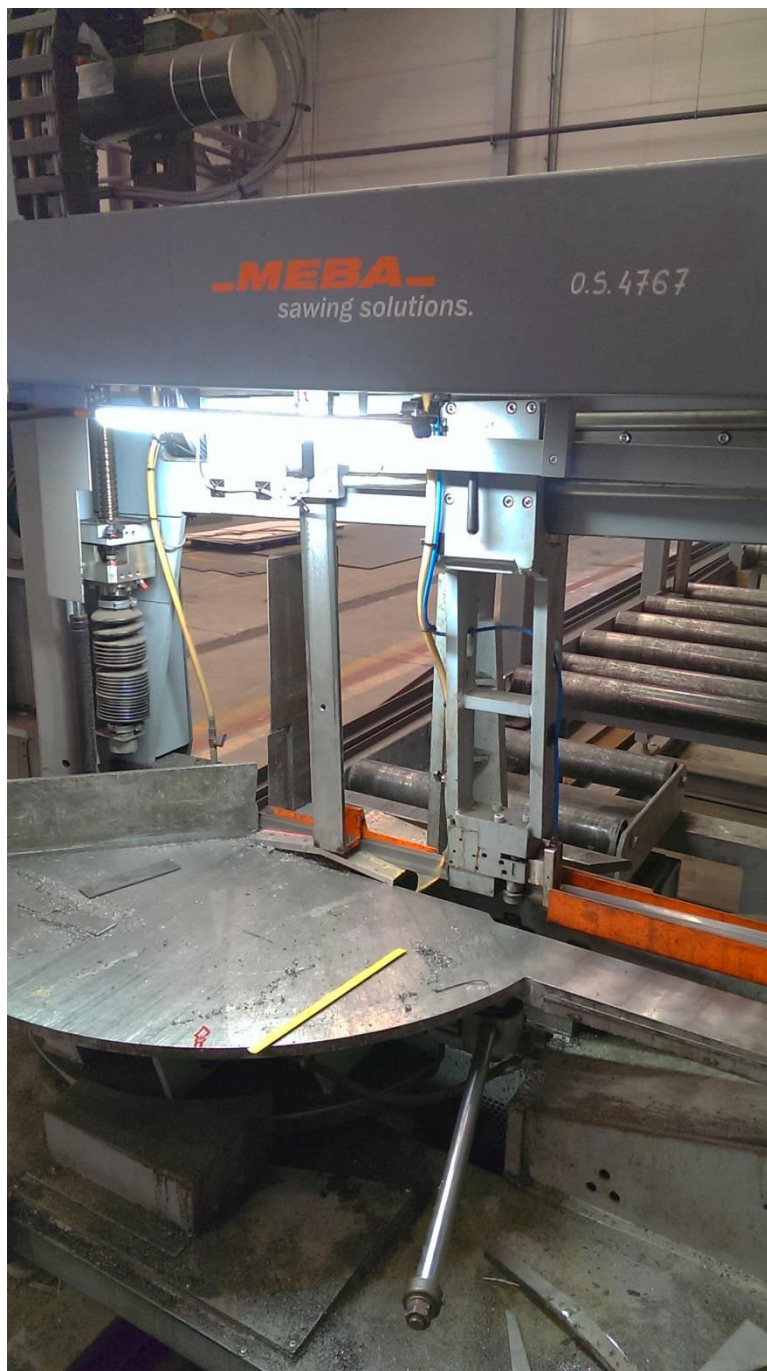
Nakon ispitivanja nerazornom metodom (radiografijom), potrebno je iz ispitnih uzoraka izrezati epruvete na kojima će se provoditi razorna ispitivanja. Epruvete su napravljene prema normi HRN EN ISO 15614-1, a primjer plana rezanja ispitnog uzorka 1 prikazan je na slici 41.



Slika 41. Plan rezanja ispitnog uzorka 1

Iz svakog ispitnog uzorka izrezano je sedam epruveta, po jedna epruveta (Poz. 1) za statički vlačni pokus, četiri epruvete za pokus savijanjem (bend test) i dvije epruvete za makroizbrusak, od kojih su sve epruvete propisno označene kako bi se osigurala sljedivost

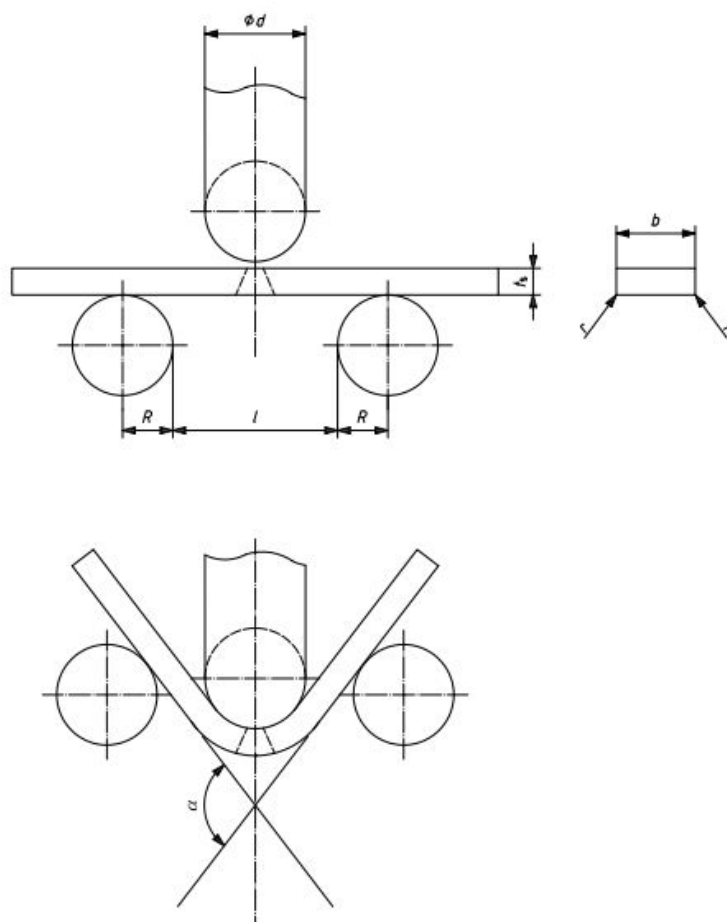
(prvi broj u oznaci označava broj uzorka, a drugi broj poziciju epruvete s obzirom na ispitni uzorak). Za rezanje je korištena tračna pila proizvođača MEBA sawing solutions, model MEBAeco 510 DG, sa sredstvom za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) proizvođača FUCHS, vrste ECOCOOL 68 CF 3. Na slici 42. prikazano je piljenje uzoraka na tračnoj pili.



Slika 42. Piljenje uzoraka na tračnoj pili

5.7. Ispitivanje savijanjem

Nakon rezanja epruveta na tračnoj pili slijedila je priprema za savijanje pomoću brusnih ploča za nehrđajuće čelike kojima su se skidala nadvišenja korijena i lica zavara na epruvetama, kako bi se u područje koje obuhvaća ZUT mogla lako detektirati pukotina ukoliko do nje dođe, te da bi se područje zavara izravnalo sa osnovnim materijalom. Ispitivanje je provedeno na ispitnim epruvetama dimenzija 300 x 40 mm. Pripremljeno je 20 uzoraka, po četiri epruvete za svaku ispitnu ploču. Iz svake od 5 ispitnih ploča izrezane su 4 epruvete, od kojih su dvije za savijanje sa strane korijena, a dvije za savijanje sa strane lica zavara. Epruvete su savijane na kut od 180°, a pritom se dodirom pratilo dolazi li do pojave pukotina. Promjer trna je 4 puta veći od debljine osnovnog materijala, što u ovom slučaju iznosi $d = 40$ mm. Razmak između osi oslonca (valjaka) iznosi $l = 120$ mm, dok je polumjer oslonaca $R = 27,5$ mm, pa je razmak između valjaka 65 mm. Na slici 43. prikazana je shema postupka ispitivanja savijanjem prema normi EN ISO 5173, a na slici 44. prikazano je savijanje ispitnih uzoraka sa ispitnim uzorkom u radu.



Slika 43. Postupak savijanja



Slika 44. Savijanje ispitnih uzoraka na FSB-u

Na slikama 45., 46., 47., 48. i 49. sa lijeve strane su dva savijena uzorka lica, a sa desne strane su dva savijena uzorka korijena svakog od 5 ispitnih ploča.



Slika 45. Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 1



Slika 46. Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 2



Slika 47. Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 3



Slika 48. Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 4



Slika 49. Rezultati savijanja epruveta ispitnog uzorka 5

Nakon provedenog ispitivanja, na svih 20 uzoraka nisu uočene pukotine sa strane lica zavora, niti sa strane korijena zavora, čime je dokazana tražena kvaliteta zavarenih spojeva.

5.8. Statičko - vlačno ispitivanje

Statičko-vlačni pokus proveden je na zavarenim uzorcima. Statičko-vlačni test je postupak ispitivanja mehaničkih svojstava materijala na kidalici, kojim se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, ali i njihovu deformabilnost. Jedno od najvažnijih i najčešće ispitivanih svojstava je čvrstoća, koje je zajedničko svojstvo svih konstrukcijskih materijala. Statičko-vlačni pokus izveden je na kidalici EU 40 MOD, u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagreb. Prije samog ispitivanja potrebno je unijeti parametre ispitivanja poput brzine ispitivanja, poprečnog presjeka epruvete, temperature, itd. Parametri se unose u računalni program koji upravlja univerzalnom kidalicom. Navedena kidalica u radu sa ispitnim uzorkom 2 prikazana je na slici 50.



Slika 50. Statičko - vlačno ispitivanje ispitnog uzorka 2 na kidalici EU 40 MOD

Navedena univerzalna kidalica ima mogućnost opterećenja epruvete do maksimalno 400 kN. Uzorci su izrezani iz zavarenih ispitnih uzoraka 1, 2, 3, 4 i 5 prema normi HRN EN ISO 15614-1 (ISO 4136). Nakon što su uzorci izrezani tračnom pilom iz zavarenih ploča, dani su na strojnu obradu glodanjem. Iz izrezanih uzoraka se na strojnoj obradi obrađuju 5 ispitnih epruvete dimenzija određenih prema normi EN ISO 4136 kao što je prikazano na slici 41. pozicija 1 (Poz 1). Na nacrtu sa slike je kotirana i dimenzija L_0 koja iznosi 100 mm i označava referentnu dužinu ispitivanja uzorka. Dimenzije uzorka koji su se ispitivali su prikazani u tablici 26. Dimenzija a označava debljinu presjeka uzorka dok dimenzija b označava širinu poprečnog presjeka uzorka.

Tablica 26. Dimenzije uzoraka ispitivanih statičkim - vlačnim ispitivanjem

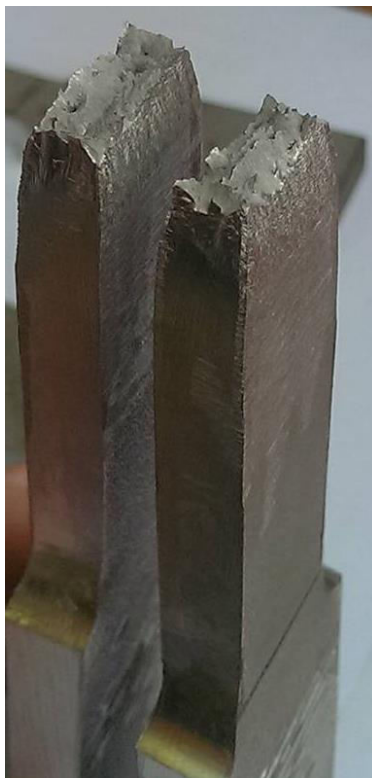
Ispitni broj	uzorak	a, [mm]	b, [mm]	Površina poprečnog presjeka S_0 , [mm ²]	L_0 , [mm]
1		25,12	10,2	256,22	100
2		25,30	12,1	306,13	100
3		25,20	11,0	277,20	100
4		25,20	12,2	307,44	100
5		25,35	12,1	306,74	100

Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi iznosa približno 20 °C. Izgled epruveta nakon provedenog ispitivanja je prikazan na slici 51.

**Slika 51. Izgled epruveta nakon statičko - vlačnog ispitivanja**

Na slici 51. vidi se da je da loma na epruvetama 1, 2, 3 i 5 došlo u osnovnom materijalu, dok se kod epruvete 4 lom dogodio točno po sredini zavarenog spoja. Ispitni uzorak 4 zavaren je

TIG postupkom dvije ploče materijala AISI 321 debljine 12 mm sa dodatnim materijalom EAS 4 M-IG koji je predviđen za zavarivanje AISI 316. Slika 52. prikazuje lom epruvete 4.



Slika 52. Lom u zavarenom spoju ispitnog uzorka 4

Iako je zavareni spoj zadovoljio propisanu zajamčenu vlačnu čvrstoću, ipak ostaje pitanje zbog čega je došlo do loma u zavarenom spoju, a ne u osnovnom materijalu, te bi za daljnja istraživanja bilo preporučljivo istražiti utjecaj povišenih temperatura i agresivnih medija kakav je predviđen za rad materijala AISI 321.

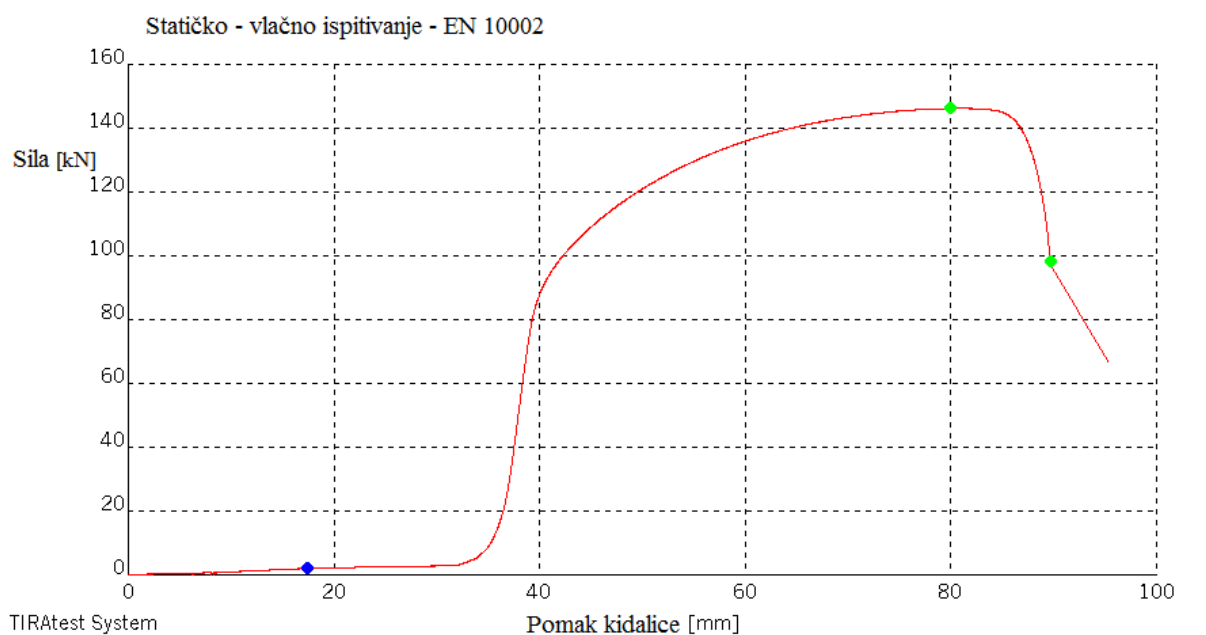
U tablici 27. prikazana su mehanička svojstva svih uzoraka utvrđena statičko-vlačnim ispitivanjem.

Tablica 27. Mehanička svojstva dobivena statičkim - vlačnim ispitivanjem

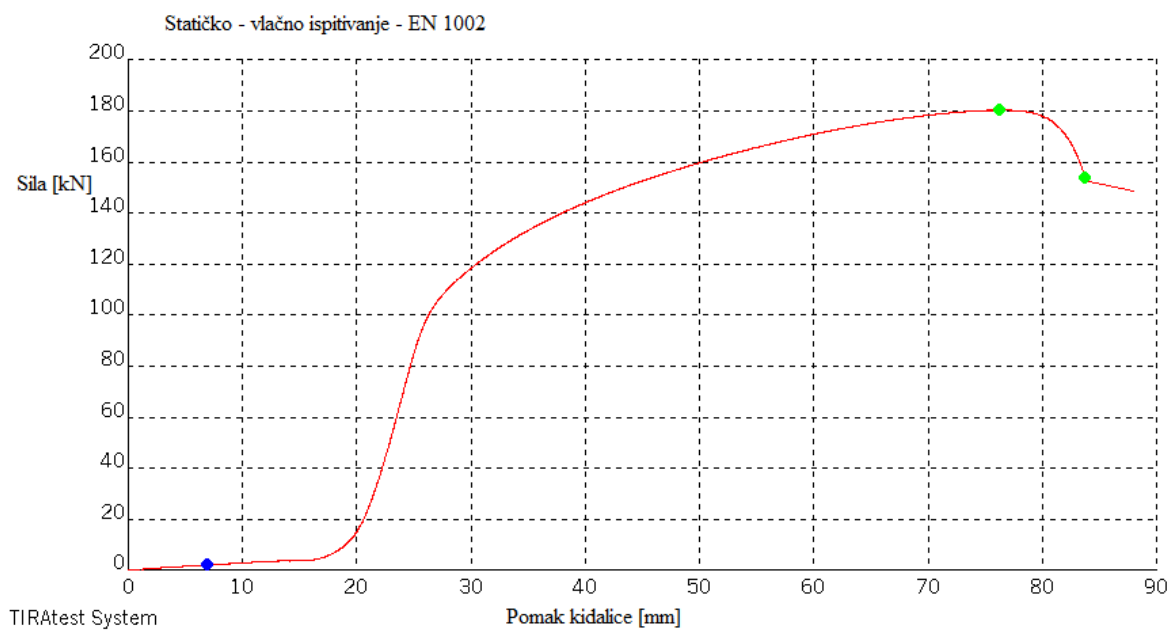
Ispitni uzorak broj	R_m , [N/mm ²]	F_m , [kN]	F_b , [kN]	S_0 , [mm ²]	L_0 , [mm]
1	570,85	146,266	98,25	256,22	100
2	588,48	180,150	153,61	306,13	100
3	535,63	148,476	98,11	277,20	100
4	575,10	176,809	146,74	307,44	100
5	585,67	179,646	152,03	306,74	100

Što se tiče zavarenih spojeva, lom zavara se pojavio jedino kod uzorka 4, ali je zavareni spoj izveden EAS 4 M-IG dodatnim materijalom zadovoljio zahtjevima, pošto je zajamčena vlačna čvrstoća dodatnog materijala $>510 \text{ N/mm}^2$, a minimalna zajamčena vlačna čvrstoća čelika AISI 321, 520 N/mm^2 . Ovakvi rezultati dovode do zaključka da zavareni spoj uzorka 4 ima nižu čvrstoću od čvrstoće osnovnog materijala, pa se samim time dovodi u pitanje ispravnost odabira dodatnog materijala za ovaj zavareni spoj.

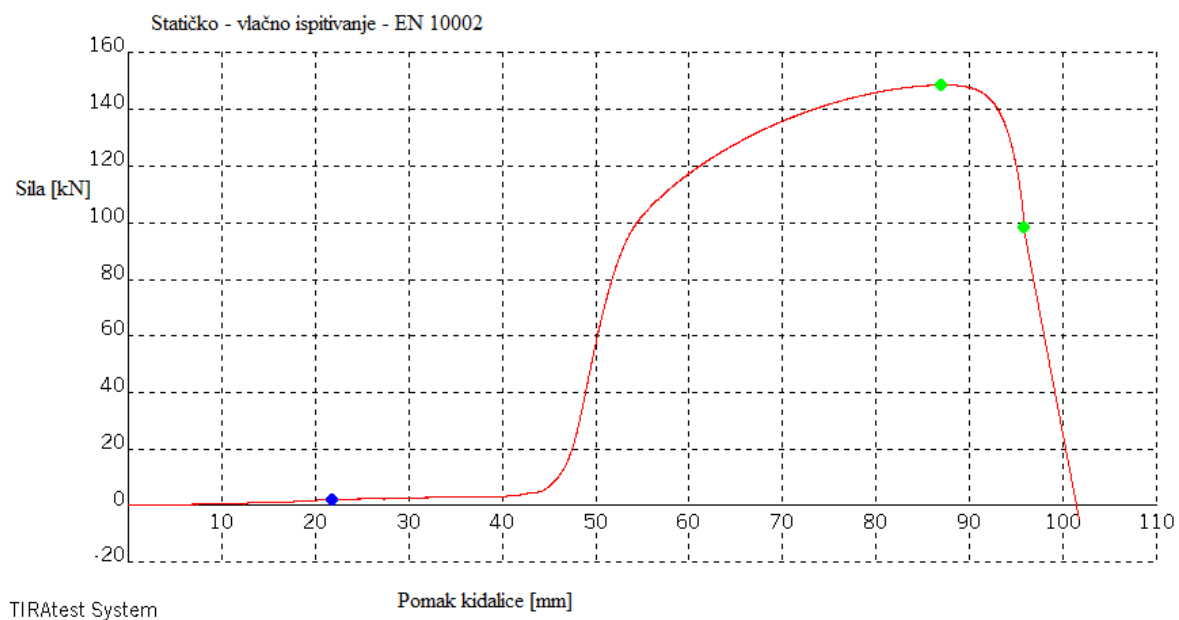
Slike 53., 54., 55., 56. i 57. prikazuju dijagrame sila – produljenje epruveta svih ispitnih uzoraka. Prvi dio dijagrama gdje sila nije počela rasti se odbacuje jer je došlo do klizanja epruvete u čeljustima kidalice. Sa slika se može vidjeti da svi dijagrami imaju približno jednaki oblik, dok se F_b (ili F_k), F_m i R_m mogu iščitati iz tablice 27. Iz dobivenih rezultata statičko-vlačnog ispitivanja proizlazi da svih pet zavarenih spojeva zadovoljavaju zajamčena mehanička svojstva.



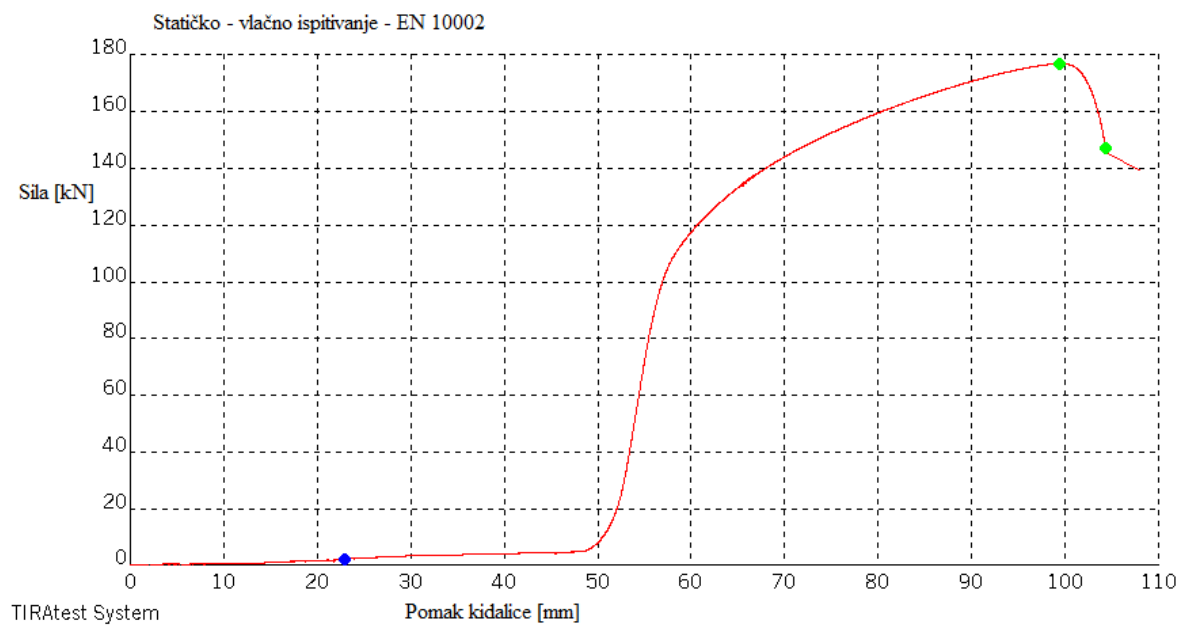
Slika 53. Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 1



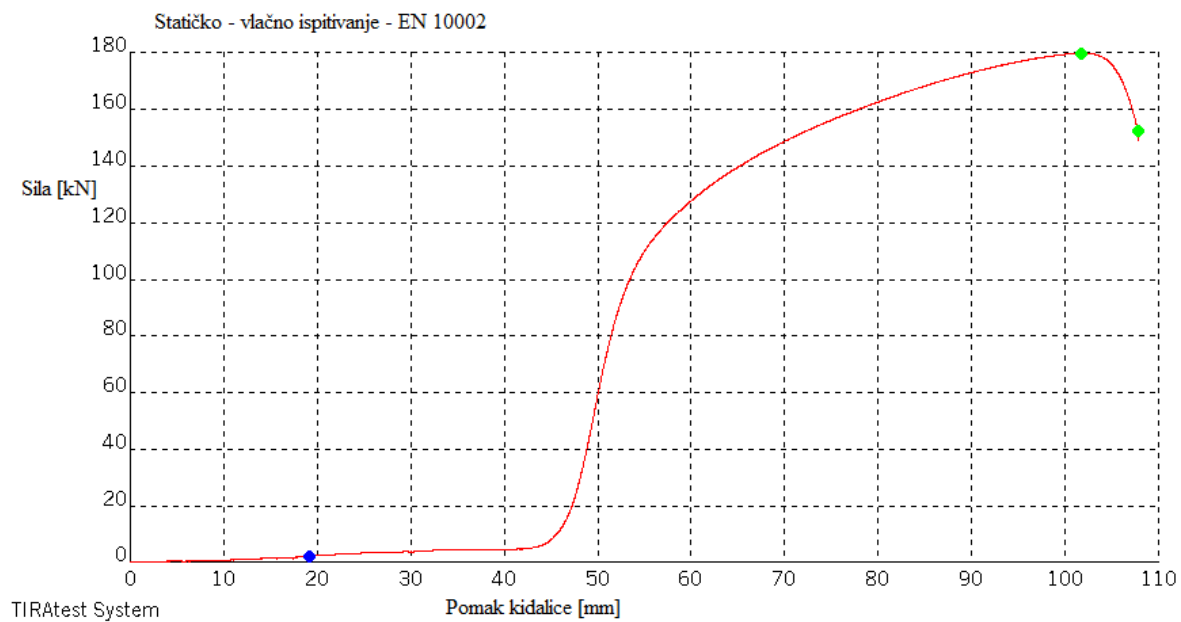
Slika 54. Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 2



Slika 55. Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 3



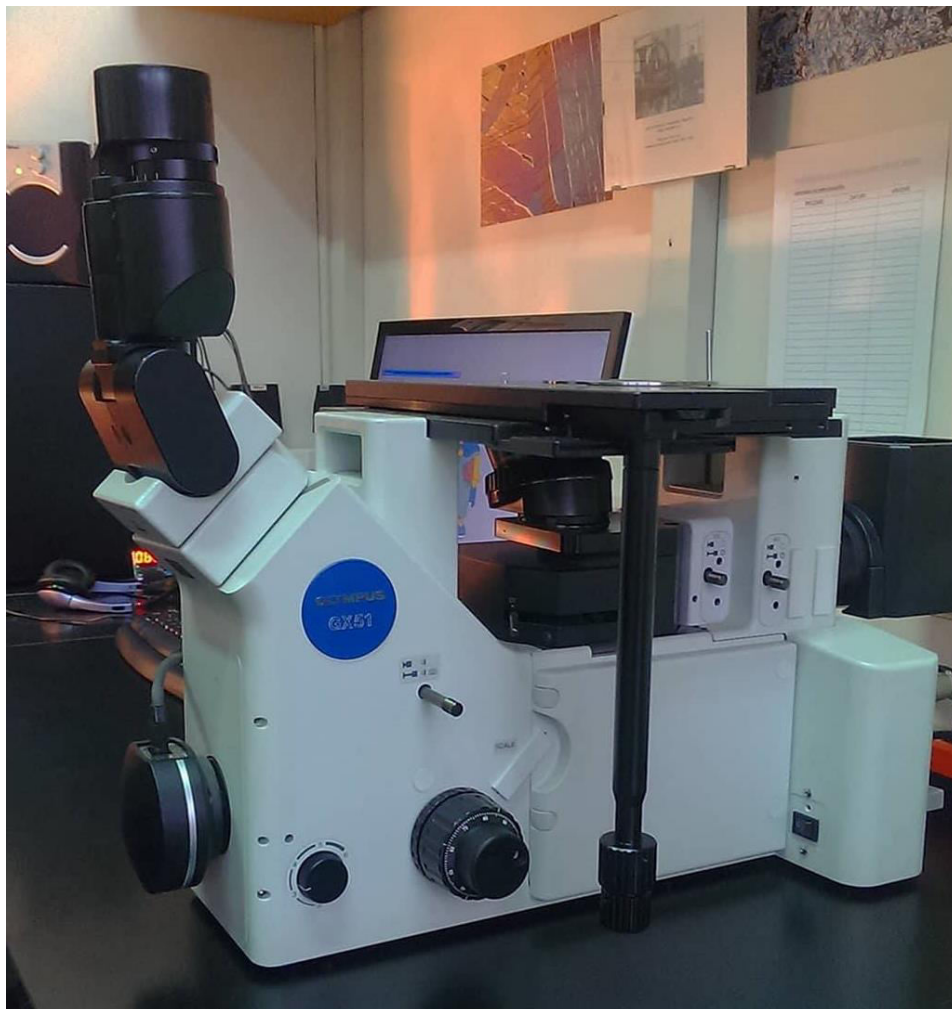
Slika 56. Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 4



Slika 57. Dijagram sila – pomak kidalice ispitnog uzorka 5

5.9. Mikrostrukture zavarenih ispitnih uzoraka

Analiza mikrostrukture svih uzoraka koji su uključeni u istraživanje obavljena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Analiza je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 s digitalnom kamerom CCD koja ima mogućnost povećanja 50, 100, 200, 500 i 1000 puta, koji je prikazan na slici 58.

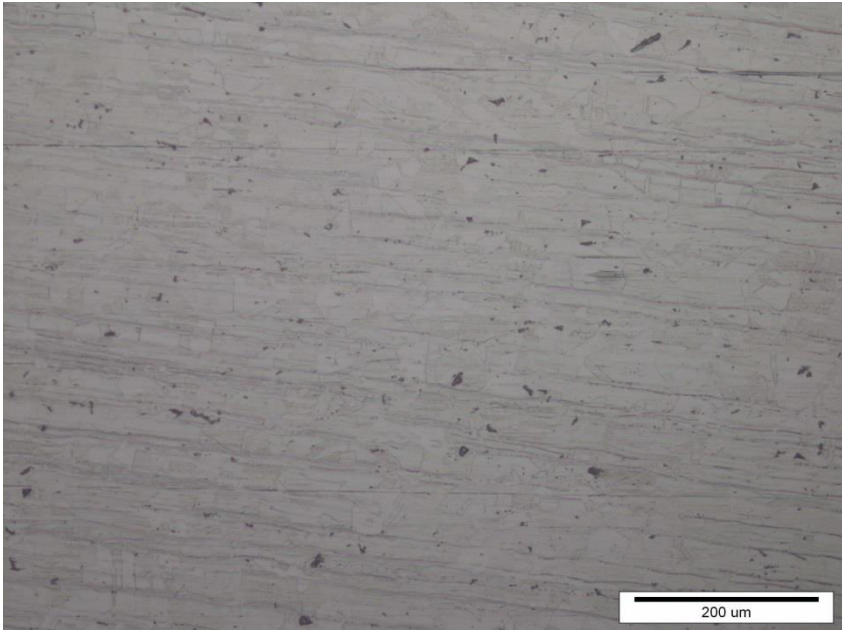
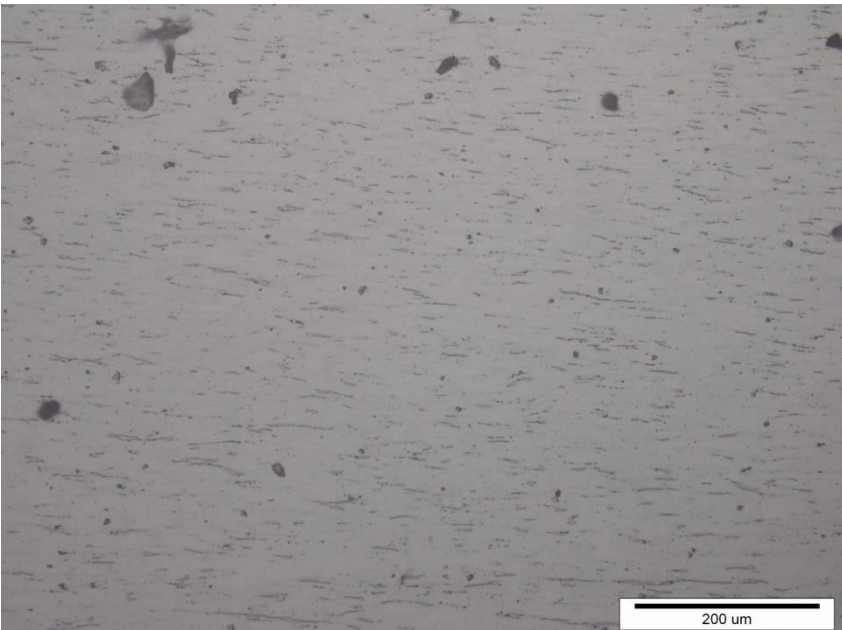


Slika 58. Mikroskop OLYMPUS GX51

Kod zavarenih uzoraka (Poz. 3) koji su ranije bili izrezani na tračnoj pili dimenzija 20x40 mm, pripremljeni brušenjem sa brusnim papirima P180 i P240, poliranjem na papirima zrnatosti P500, P1000, P2000, P4000, dijamantnom pastom 3 μm i 1 μm , nakon čega je izvršena analiza mikrostrukture metala zavara u usporedbi s mikrostrukturom osnovnog materijala. Kod zavarenih uzoraka izvršena je analiza mikrostrukture osnovnog materijala,

zone staljivanja, metala zavara, te lica i korijena zavara. Tablica 28 prikazuje mikrostrukturu osnovnih materijala svih zavarenih ispitnih uzoraka.


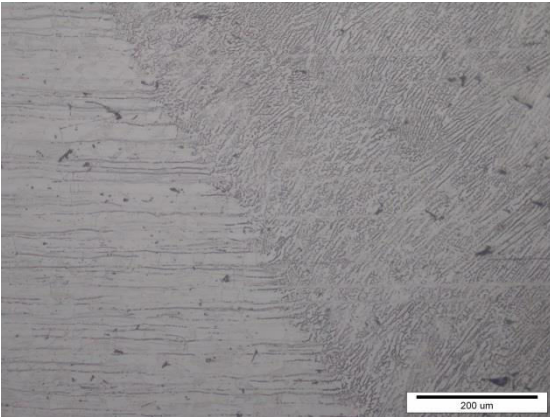


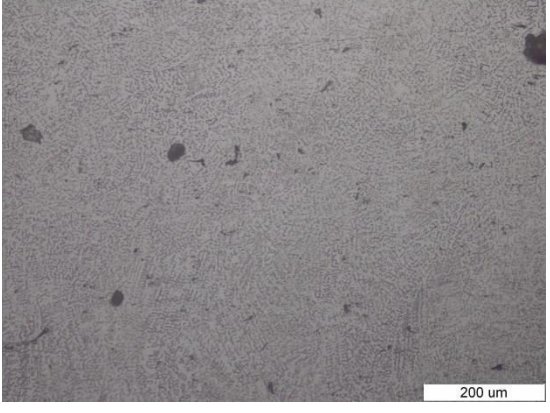

Tablica 28. Mikrostrukture osnovnih materijala ispitnih uzoraka


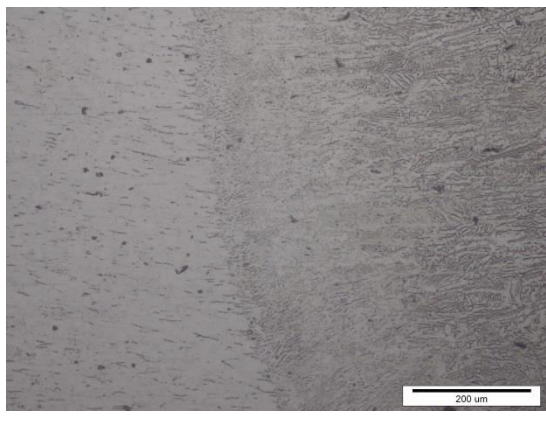
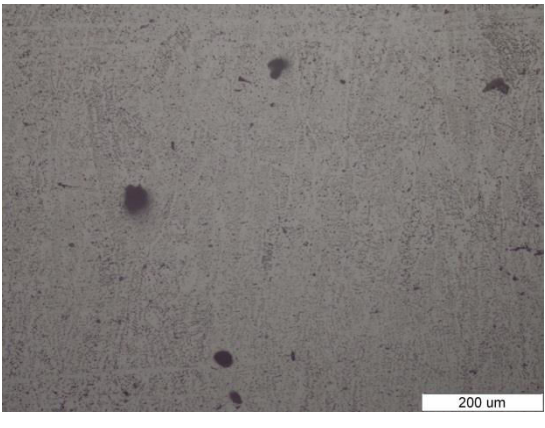
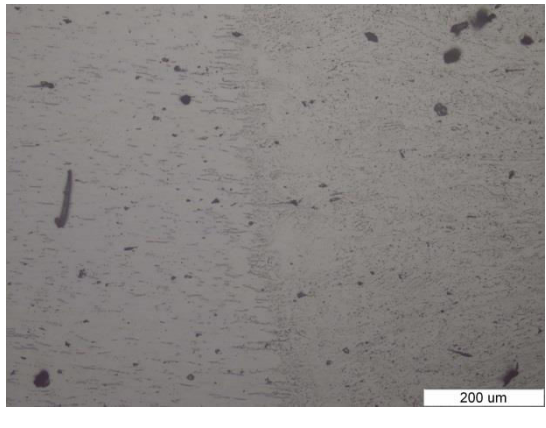
	Povećanje 200X
AISI 316L	
AISI 321	

Slike u tablici 28. prikazuje mikrostrukturu osnovnih materijala AISI 316L i AISI 321 koji su korišteni u eksperimentu. Mikrostruktura osnovnih materijala se sastoje od austenita i uključaka koje se jasno razaznaju na slici. Ujedno se mogu vidjeti trakaste nakupine delta ferita paralelno usmjerene sa smjerom valjanja. U tablici 29. i 30. prikazane su mikrostrukture

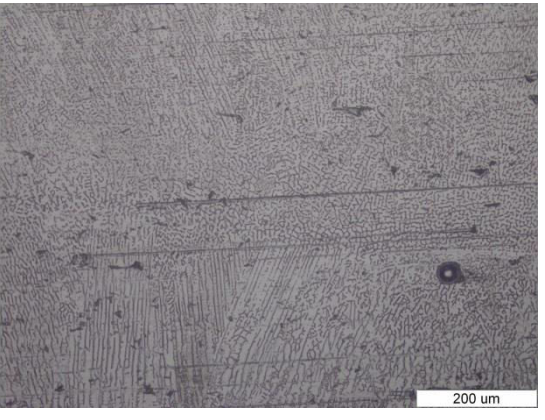

zavarenog spoja, korijena i lica zavarenog spoja te linija staljivanja svih 5 ispitnih uzoraka sa povećanjem 200X.

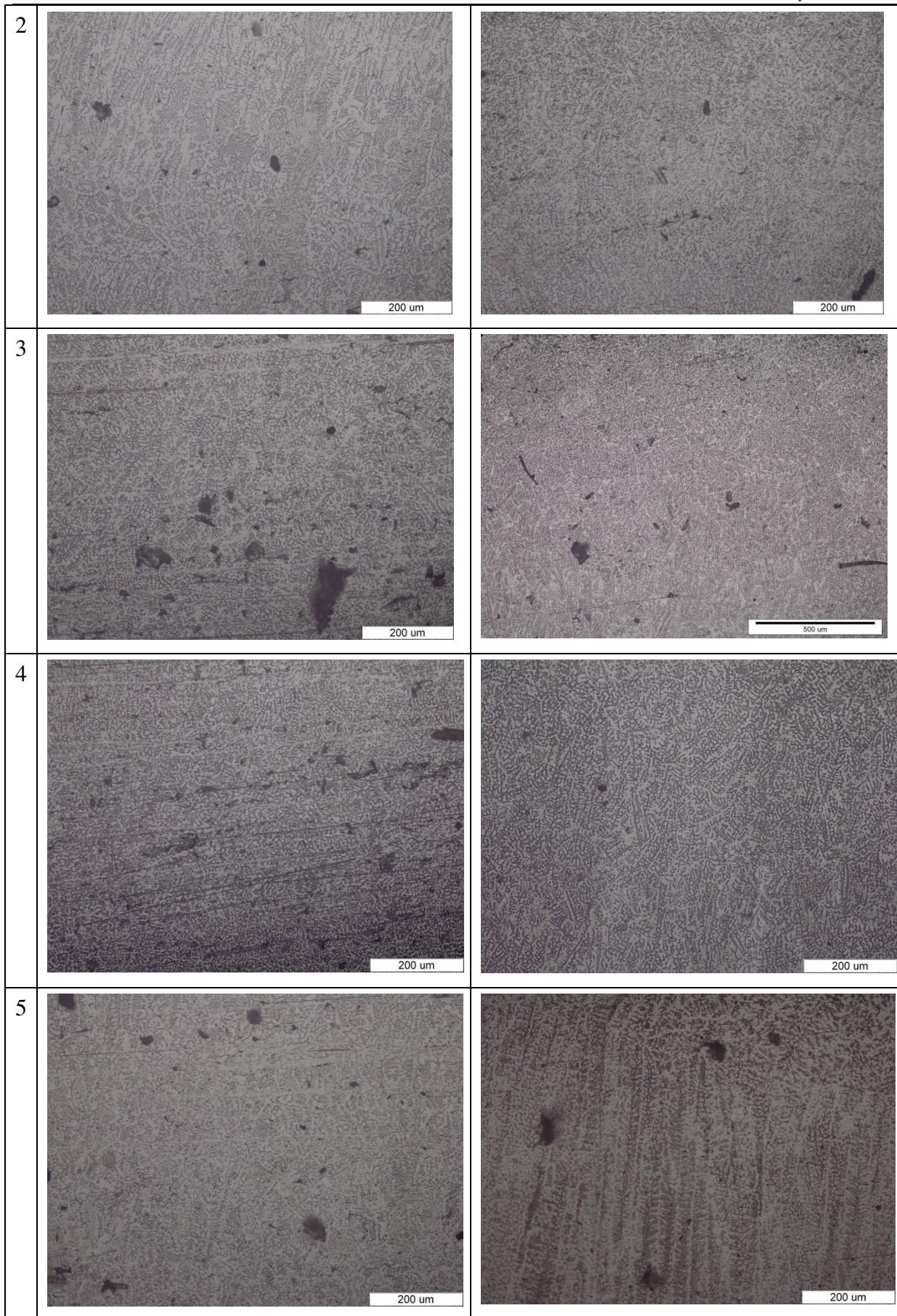
Tablica 29. Mikrostrukture metala zavara i linije staljivanja ispitnih uzoraka

	Metal zavara	Linija staljivanja
1		
2		
3		

4		
5		

Tablica 30. Mikrostrukture korijena i lica zavarenih spojeva ispitnih uzoraka

	Korijen zavarenog spoja	Lice zavarenog spoja
1		



Iz slika u tablicama 29. i 30. mogu se jasno vidjeti razlike u mikrostrukturi osnovnog i dodatnog materijala. Slika linije staljivanja u tablici 29. prikazuje jasnu granicu osnovnog i dodatnog materijala, te je uočena velika razlika između usmjerenosti mikrostrukture. U zavarenom spoju nisu izražene trakaste nakupine delta-ferita, koje su u osnovnom materijalu usmjerene paralelno sa smjerom valjanja.

5.10. Analiza geometrijskih značajki zavarenog spoja

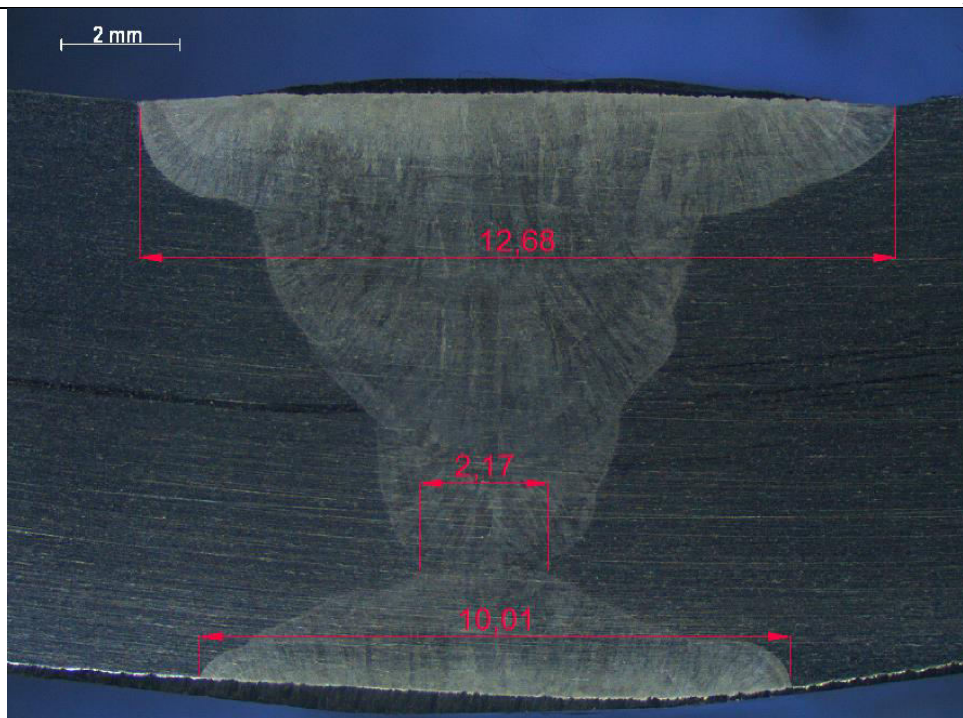
Za ispitivanje geometrijskih značajki navara izrađeni su makroizbrusci poprečnog presjeka slijedom tehnoloških operacija:

1. Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili na dimenzije 20x40x10 i 20x40x12.
2. Površina makrouzoraka očišćena je od srhova i izbrušena brusnim papirima nizom brusnih papira P180, P240, P500, P1000, P2000, P4000. Poliranje se vršilo s dijamantnom pastom sa zrcima veličine 3 μm te 1 μm .
3. Uzorak je nagrizan u oksalnoj kiselini u trajanju 1 minute uz napon 8V.

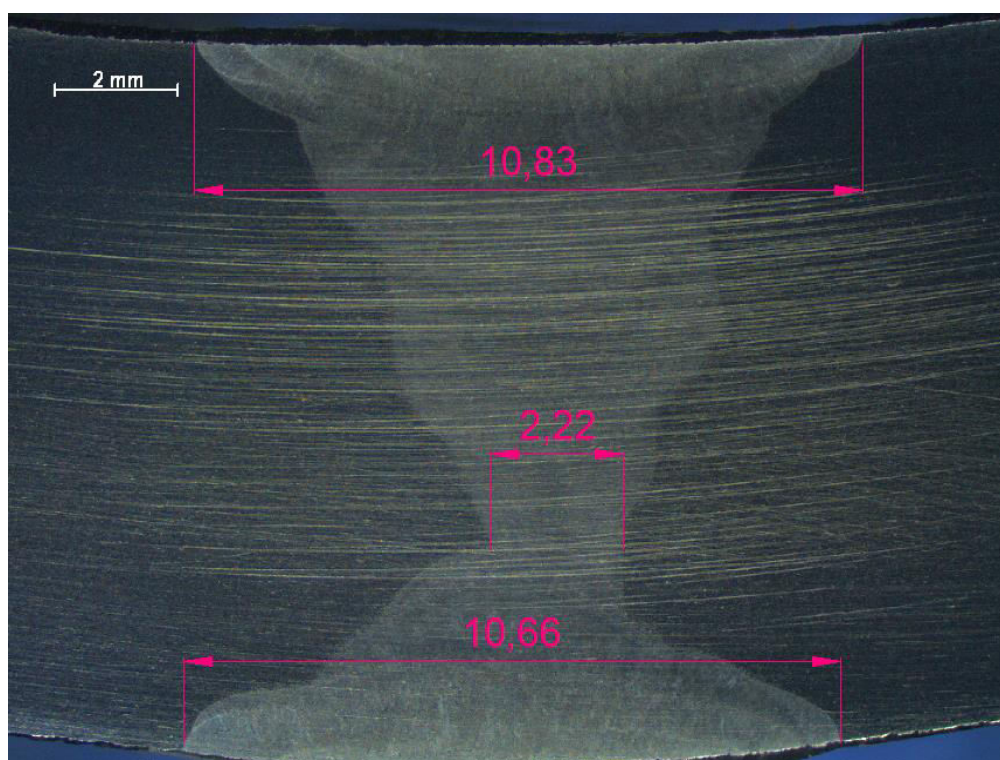
Nakon nagrizanja makrouzoraka do izražaja su došla područja zahvaćena utjecajem električnog luka tj. područje navara, zona staljivanja i zona utjecaja topline. Uloga makroizbrusaka je da ukaže i jasno predoči promjene u širini i penetraciji zavara kod različitih parametara zavarivanja, dodatnih i osnovnih materijala, postupaka zavarivanja, itd.

Izradom makroizbrusaka dobiva se uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu taljenja materijala te intenzitet taljenja osnovnog materijala. Ispitivanje se sastoji od vizualnog ispitivanja pregleda poprečnih presjeka uzoraka sa ili bez mikroskopa s manjim povećanjem.

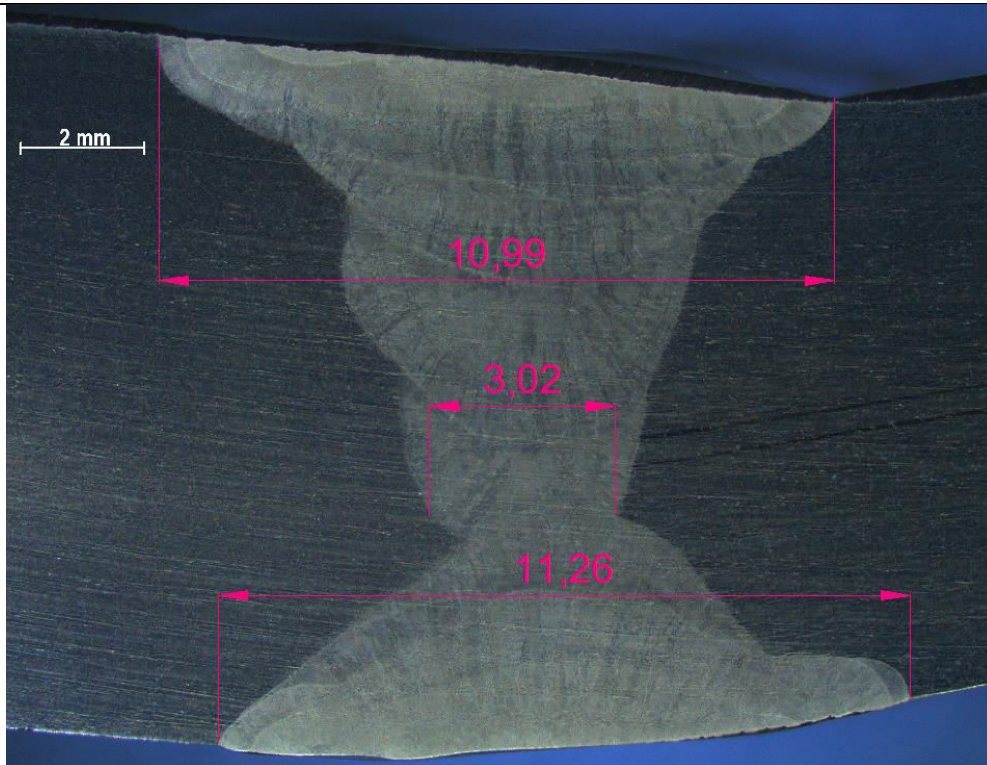
Na slikama 59., 60., 61., 62. i 63. mogu se vidjeti izmjereni makroizbrusci zavarenih ispitnih ploča.



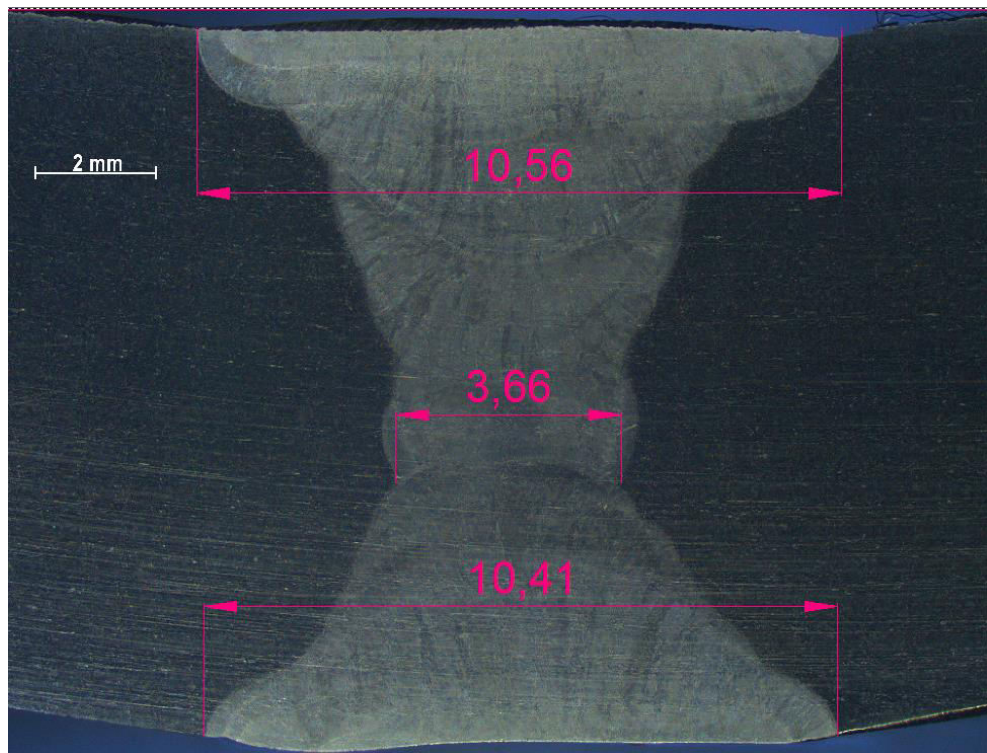
Slika 59. Makrouzorak ispitne ploče 1



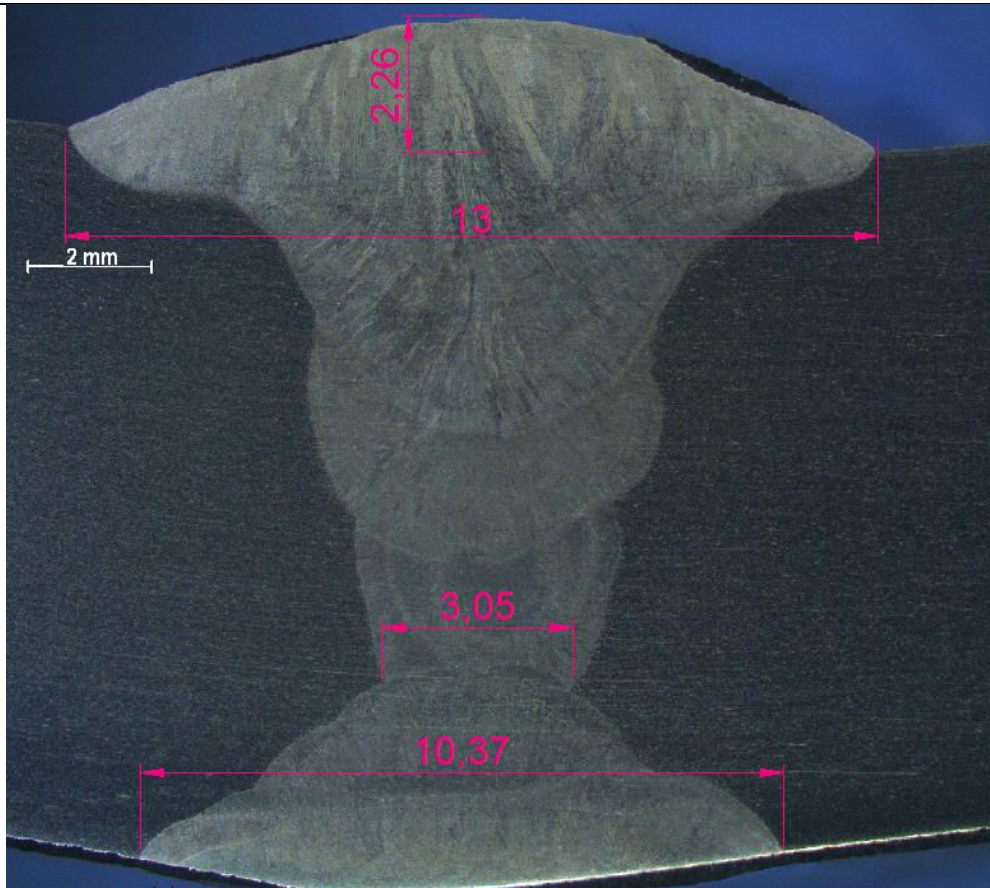
Slika 60. Makrouzorak ispitne ploče 2



Slika 61. Makrouzorak ispitne ploče 3



Slika 62. Makrouzorak ispitne ploče 4



Slika 63. Makrouzorak ispitne ploče 5

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je utvrđivanje kompatibilnosti osnovnih materijala (austenitnih nehrđajućih čelika) sa dodatnim materijalima sa gledišta mehaničkih svojstava. Analizom dobivenih podataka, parametara i rezultata utvrdio se utjecaj dodatnog materijala, zaštitnog plina, razine unosa topline i postupka zavarivanja na svojstva zavarenog spoja te tehnološku primjenjivost za zavarivanje austenitnih čelika u industrijskoj proizvodnji. Za potrebe istraživanja koristili su se osnovni materijali AISI 316L i AISI 321, zaštitni plinovi 99,99 % argon i mješavina Ferroline C18, dodatni materijali Böhler EAS 4 M - IG, SAS 2 - IG i SAS 2 PW – FD u postupcima TIG i MAG (praškom punjena žica) zavarivanja.

Na temelju provedenih ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Radiografskom kontrolom nisu uočene nepravilnosti koje bi značajno utjecale na svojstva zavarenog spoja.
- Ispitivanje savijanjem (Bend test) bilo je provedeno na 20 ispitnih uzoraka, od kojih niti jedan uzorak nije pokazivao sklonost pucanju zavarenog spoja.
- Statičko – vlačno ispitivanje pokazalo je da su vlačne čvrstoće dodatnih materijala zadovoljavale svoje propisane vrijednosti, te su bile više od minimalnih očekivanih vrijednosti osnovnog materijala.
- Ispitivanjem geometrijskih značajki spoja (makroizbrusci) i mikrostrukture zavara dobivena je geometrija zavarenih spojeva i uvid u mikrostrukturu osnovnog materijala, dodatnog materijala i linije staljivanja.

Na kraju se može donijeti zaključak da je dodatni materijal za zavarivanje čelika AISI 316L primjenjiv i za zavarivanje AISI 321, odnosno da nema velikih promjena u mehaničkim svojstvima. Isto tako moguće je koristiti i praškom punjenu žicu za povećanje brzine zavarivanja (a i smanjenja troškova). Za daljnje istraživanje mogla bi se ispitati korozivna svojstva ovih zavarenih spojeva, simulirajući eksploatacijske uvjete i vršne uvjete predviđene za rad materijala AISI 321 (povišene temperature), te provesti istraživanje kako bi se mijenjala mehanička svojstva u ovakvim uvjetima.

LITERATURA

- [1] Brkić S., Priručnik: Nehrdajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2007.
- [2] Filetin T., Kovačićek F., Indof J. Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2007.
- [3] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf; dostupno dana 10.10.2017.
- [4] www.strojopromet.com/inox/ ; dostupno dana 11.10.2017.
- [5] Lukačević Z., Zavarivanje; Slavonski Brod, 1998.
- [6] Juraga I., Šimunović V., Utjecaj obrade površine zavarenih spojeva od nehrđajućih čelika na povećanje korozivne postojanosti, Slavonski Brod, 2001.
- [7] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š., Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015.
- [8] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials Park, 1993.
- [9] American Welding Society: Welding handbook – volume 2, American Welding Society, 1991.
- [10] Cary H.B., Helzer S.C.; Modern welding technology, Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [11] <http://www.eastwood.com/tig-gas-lens-components-and-kits.html> ; dostupno dana 12.10.2017.
- [12] www.voestalpine.com/welding; voestalpine Böhler Welding , dostupno dana 13.10.2017.
- [13] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak 2003.
- [14] Vidranski D., Završni rad, Zagreb, 2016.
- [15] Avery R.E., Tuthill A.H., Guidelines for the welded fabrication of nickel alloys for corrosion – resistance service, Nickel Development Institute, 1994.
- [16] Juraga I., Ljubić K., Živčić M., Garašić I., Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb, 2015.

