

Analiza tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2

Gorupić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:376821>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dario Gorupić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Dario Gorupić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. i asistentici dr.sc. Maji Jurici (Remenar), mag.ing. na pruženom znanju, pomoći, savjetima, pristupačnosti i susretljivosti tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i doc.dr.sc. Vinku Šimunoviću, dipl.ing te tehničkim suradnicima Dubravki Ulagi i Ivanu Vovku na pomoći oko eksperimentalnog dijela rada.

Također, želim zahvaliti svim svojim kolegama, prijateljima i obitelji koji su bili uz mene tijekom studija i svojom pomoći, strpljivošću, razumijevanjem i povjerenjem pomogli da prebrodim sve probleme te uspješno položim fakultetske obveze.

Dario Gorupić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 21 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DARIO GORUPIĆ** Mat. br.: 0035206883

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of welding technology for austenitic steel X2CrNiMo17-12-2**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu analizirati osnovne značajke zavarljivosti visokolegiranih austenitnih čelika obzirom na promjene u mikrostrukturi i utjecaj parametara zavarivanja. Navesti i opisati tehnologije primjenjive za zavarivanje visokolegiranih čelika s osvrtom na pojedine prednosti i nedostatke te posebno proučiti opcije za konstrukcije debljih stjenki s naglaskom na ograničenja temperature predgrijavanja i međuprolaza. Objasniti način odabira dodatnih materijala i zaštitnih plinova kod pojedinih tehnologija zavarivanja te načine sprječavanja deformacija i pojave kritičnih mikrostrukturnih faza.

U eksperimentalnom dijelu rada za čelik X2CrNiMo17-12-2 debljine 60 mm te provedenu tehnologiju zavarivanja detaljno objasniti utjecaj parametara zavarivanja, posebno unosa topline na mikrostrukturu zavarenog spoja kroz cijelu debljinu materijala. Analizirati dobivena mehanička svojstva i dati kritički osvrt na primijenjenu tehnologiju i postignute rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

 prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

 prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. VRSTE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	3
3. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI	6
3.1 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika	9
4. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	12
4.1 Mikrostrukturne promjene u zoni taljenja austenitnih nehrđajućih čelika.....	12
4.2 Pojave u zoni utjecaja topline	14
4.3 Problemi zavarljivosti austenitnih nehrđajućih čelika	14
4.3.1 Izlučivanje kromovih karbida	14
4.3.2 Izlučivanje krhkih σ – faza (FeCr) i χ - faza $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{12}$	17
4.3.3 Tople pukotine	18
4.3.4 Noževa korozija	23
4.3.5 Osjetljivost na prisutnost nečistoća.....	23
4.3.6 Pukotine zbog smanjenja žilavosti.....	23
4.3.7 Uključci volframa kod TIG zavarivanja	24
5. TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	25
5.1 Izbor dodatnog materijala	25
5.2 Zaštitni plinovi	27
5.3 Predgrijavanje, držanje međuprolazne temperature i naknadna toplinska obrada austenitnih nehrđajućih čelika.....	28
5.4 Priprema spoja za zavarivanje.....	29
5.5 Postupci zavarivanja	29
5.6 Ostali postupci zavarivanja	40
5.7 Usporedbe elektrolučnih postupaka zavarivanja, zavarivanja visokim unosom energije i hibridnih postupaka zavarivanja	45
6. EKSPERIMENTALNI DIO	48
6.1 Osnovni materijal.....	48
6.2 Tehnologija zavarivanja	49
6.2.1 Oblikovanje zavarenog spoja.....	49
6.2.2 Zavarivanje ispitnih uzoraka	49
6.3 Statičko – vlačno ispitivanje	54
6.4 Ispitivanje udarnog rada loma.....	55
6.5 Ispitivanje savijanjem	56
6.6 Makroanaliza.....	57

6.7	Mjerenje udjela ferita	58
6.8	Ispitivanje mikrostrukture	62
7.	ZAKLJUČAK.....	68

POPIS SLIKA

Slika 1.	Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [4]	2
Slika 2.	Schaeffler – ov dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti [8]	5
Slika 3.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) 100% austenit; b) austenit i delta – ferit [12]	10
Slika 4.	Ravnotežni pseudobinarni dijagram sustava Fe – Cr – Ni za 70 % Fe [12].....	10
Slika 5.	Utjecaj σ – faze na udarni rad loma Fe – Cr – Ni legura pri sobnoj temperaturi [11]	11
Slika 6.	Povezanost načina kristaliziranja i pseudobinarnog faznog dijagrama [11]	13
Slika 7.	TTS dijagram austenitnog nehrđajućeg čelika 304 s različitim udjelima ugljika [13]	15
Slika 8.	Shematski prikaz toplinske obrade nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) austenitnog nehrđajućeg čelika [9].....	16
Slika 9.	TTT dijagram austenitnog nehrđajućeg čelika 316 [13]	18
Slika 10.	Osjetljivost na tople pukotine kao funkcija omjera Cr_{ekv}/Ni_{ekv} [11].....	19
Slika 11.	Suutala dijagram za predviđanje nastanka toplih pukotina [11]	21
Slika 12.	Modificirani Suutala dijagram [11]	22
Slika 13.	Modificirani Suutala dijagram [11]	22
Slika 14.	Promjena žilavosti ovisno o temperaturi [11]	24
Slika 15.	Utjecaj δ -ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara pri $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17].....	26
Slika 16.	Shematski prikaz REL zavarivanja [21].....	30
Slika 17.	Prikaz MIG postupka zavarivanja [6]	32
Slika 18.	Dinamička karakteristika – strujni signal impulsnog prijenosa metala [6].....	34
Slika 19.	Utjecaj zaštitnog plina na profil zavarenog spoja [22].....	35
Slika 20.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [24]	36
Slika 21.	Shematski prikaz procesa taljenja kod EPP zavarivanja [26]	39
Slika 22.	Uređaj za zavarivanje elektronskim snopom i poprečni presjek zavara [29].....	41
Slika 23.	Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala – CO ₂ laser [30]	42
Slika 24.	Vođenje laserskog snopa optičkim vlaknom – Nd:YAG laser [30].....	42
Slika 25.	Prikaz rada disk lasera [32]	43
Slika 26.	Prikaz zavarivanja taljenjem i ključanicom [34].....	44
Slika 27.	Primjeri priprema spojeva i izgledi zavara dobiveni različitim postupcima zavarivanja [28]	46
Slika 28.	Oblikovanje spoja za zavarivanje	49
Slika 29.	Redoslijed zavarivanja	52
Slika 30.	Postignute vrijednosti udarnog rada loma	56
Slika 31.	Ispitivanje savijanjem.....	57
Slika 32.	Uređaj za elektrokemijsko nagrizanje „DELAVNIŠKI USMERNIK UZR“, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB Zagreb.....	58
Slika 33.	Izgled pripremljenog makroizbruska za mjerenje udjela ferita i ispitivanje mikrostrukture	58
Slika 34.	Feritoskop „Ferritgehaltmesser 1.054	59
Slika 35.	Schaefflerov dijagram s izračunatim vrijednostima Cr_{ekv} i Ni_{ekv} za osnovni i dodatne materijale	60

Slika 36.	Makroizbrusak sa označenim mjestima mjerenja udjela ferita	60
Slika 37.	Utjecaj unosa topline na sadržaj delta ferita u metalu zavara	62
Slika 38.	Oznaka mjesta za snimanje mikrostruktura.....	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [7]	4
Tablica 2. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na austenitni nehrđajući čelik [10]	7
Tablica 3. Mehanička svojstva niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika [9].....	8
Tablica 4. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom [9]	9
Tablica 5. Minimalni potreban FN metala zavara kako bi se izbjegle likvacijske pukotine u metalu zavara [11]	20
Tablica 6. Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika [16]	27
Tablica 7. Parametri TIG zavarivanja nehrđajućih čelika [13]	38
Tablica 8. Usporedbe zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 316L različitim postupcima [28]	47
Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala X2CrNiMo17-12-2 [36]	48
Tablica 10. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [36].....	49
Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [37].....	50
Tablica 12. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [37].....	50
Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [38]	51
Tablica 14. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [38].....	51
Tablica 15. Parametri zavarivanja i unosi topline kod TIG zavarivanja	53
Tablica 16. Parametri zavarivanja i unosi topline kod REL zavarivanja	53
Tablica 17. Dimenzije ispitnih uzoraka te iznosi maksimalnih sila i vlačnih čvrstoća dobivenih statičko - vlačnim ispitivanjem.....	54
Tablica 18. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma.....	55
Tablica 19. Očitane vrijednosti sadržaja ferita u mikrostrukturi osnovnog materijala i metala zavara.....	61
Tablica 20. Snimljene mikrostrukture u osnovnom materijalu prema oznakama na slici 38 ..	63
Tablica 21. Snimljene mikrostrukture po sredini zavara prema oznakama na slici 38.....	64
Tablica 22. Snimljene mikrostrukture po ZUT-u lijeve strane zavara prema oznakama na slici 39	65
Tablica 23. Snimljene mikrostrukture po ZUT-u desne strane zavara prema oznakama na slici 39	66

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
d_F	mm	Promjer žarišne točke
d_z	mm	Promjer žice
f	mm	Žarišna duljina leće
f_l	mm	Žarišna duljina kolimatora
F_m	N	Maksimalna sila
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja električnog luka
KV	J	Udarni rad loma po Charpy-u
L	H	Induktivitet
P	W	Snaga lasera
Q	l/min	Protok zaštitnog plina
Q_z	kJ/cm	Unos topline u zavar
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R_p	N/mm ²	Granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
S	mm ²	Površina poprečnog presjeka epruvete za statičko-vlačno ispitivanje
S_0	mm ²	Površina poprečnog presjeka epruvete za ispitivanje udarnog rada loma
U	V	Napon zavarivanja
v_{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
z	mm	Položaj žarišne točke
Z	%	Suženje poprečnog presjeka

POPIS KRATICA

A	Austenitna struktura
AC	eng. Alternating current
AF	Austenitno-feritna mikrostruktura
AISI	eng. American Iron and Steel Institute
ASTM	eng. American Society for testing and Materials
BI	eng. Basicity indeks
BW	eng. Butt weld
DC	eng. Direct current
DIN	njem. Deutsches Institut für Normung
ELA	eng. Extra Low Additions
ELC	eng. Extra Low Carbon
EN	njem. Europäische Norm
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
F	Feritna struktura
FA	Feritno-austenitna mikrostruktura
FCC	eng. Face-centered-cubic
FN	eng. Ferrite number
HRN	Hrvatske norme
OM	Osnovni materijal
IKK	Interkristalna korozija
ISO	eng. International Organization for Standardization
ISO/TR	eng. International Organization for Standardization/Technical Reports
LC	eng. Low Carbon
MIG	eng. Metal Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	eng. Tungsten Inert Gas
TTS	eng. Time-Temperature-Sensitization
TTT	eng. Time-Temperature-Transformation
VF	Visokofrekventni generator
WPQR	eng. Welding Procedure Qualification Record
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Tema ovog rada je analiza tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2. Rad je podijeljen na dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

U prvom dijelu rada, teorijskom dijelu, prikazane su osnovne značajke visokolegiranih austenitnih nehrđajućih čelika. Opisane su promjene u mikrostrukturi tijekom zavarivanja i utjecaj pojedinih parametara zavarivanja. Nadalje, opisane su pojedine tehnologije zavarivanja koje se primjenjuju kod austenitnih čelika s naglaskom na konstrukcije debljih stijenki. Navedeni su prikladni dodatni materijali i zaštitni plinovi za određene tehnologije zavarivanja. Opisani su utjecaji temperature predgrijavanja, međuprolazne temperature i naknadne toplinske obrade kako bi se spriječile deformacije i pojave kritičnih mikrostrukturnih faza. Uspoređeni su i visokoučinski postupci zavarivanja sa konvencionalnim postupcima koji se uvode prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika s debelom stijenkom.

U eksperimentalnom dijelu rada je na temelju provedene tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2, debljine 60 mm detaljno analizira utjecaj parametara zavarivanja na mikrostrukturu zavarenog spoja kroz cijelu debljinu materijala s posebnim naglaskom na unos topline i sadržaj ferita. Također, analizirana su mehanička svojstva i dan je kritički osvrt na tehnologiju zavarivanja i postignute rezultate.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelici, udio ferita, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

The topic of this thesis is the analysis of welding technology of the austenitic steel X2CrNiMo17-12-2. The paper is divided into two parts, theoretical and experimental.

In the first part of the thesis, the theoretical part, the basic characteristics of high-alloy austenitic stainless steels are presented. Changes in the microstructure during welding and the influence of individual welding parameters are described. Furthermore, individual welding technologies applied to austenitic steels with emphasis on thicker wall constructions are described. Suitable filler materials and shielding gases for certain welding technologies are listed. The effects of preheating temperature, interpass temperature, and subsequent heat treatment to prevent deformations and the occurrence of critical microstructural phases are described. High - efficiency welding processes are also compared with conventional processes when welding thick - walled austenitic stainless steels.

In the experimental part of the paper, based on the implemented welding technology of austenitic steel X2CrNiMo17-12-2, thickness 60 mm, the influence of welding parameters on the microstructure of the welded joint through the entire thickness of the material is analyzed in detail. Also, the mechanical properties were analyzed and a critical review of the welding technology and the results achieved was given.

Keywords: austenitic stainless steels, ferrite content, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

1.1. Povijesni razvoj nehrđajućih čelika

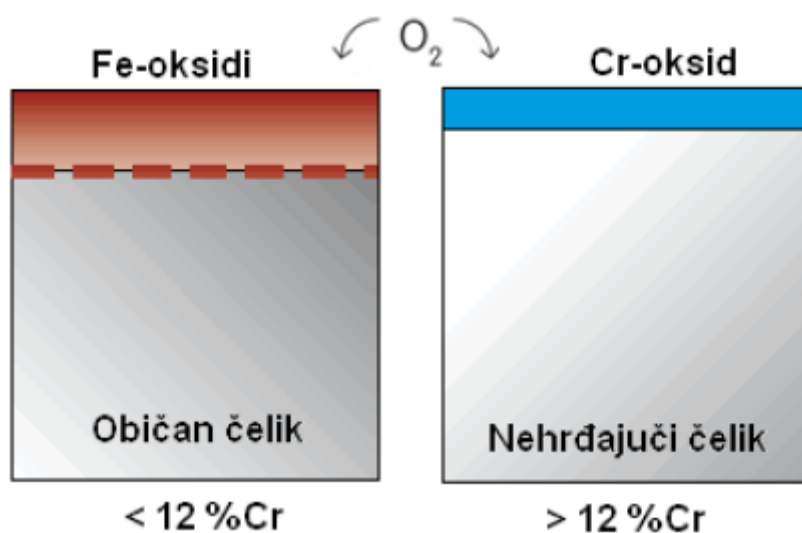
Nehrđajući čelici obuhvaćaju veliku skupinu materijala kojima je osnovni element željezo, uz dodatak minimalno 10 – 12 % kroma i maksimalno 1,2 % ugljika.. Sukladno Europskoj normi EN 10020, donja granica je 10,5 % kroma, dok stariji izvori iznose granicu od 12 %. Ostali legirajući elementi dodaju se sa svrhom poboljšavanja mehaničkih i strukturnih svojstava. Nehrđajući čelici su samo uvjetno „nehrđajući“, tj. pri određenim uvjetima materijal ipak korodira. Da bi se u potpunosti iskoristila pozitivna svojstva nehrđajućih čelika, mora se odabrati prikladan čelik za određene uvjete u eksploataciji, odabrati odgovarajuća metoda spajanja i pravilna primjena mehaničkih i kemijskih završnih obrada spojeva. [1]

Sam početak razvoja nehrđajućih čelika odvijao se istovremeno na više mjesta, stoga se ne može ukazati na samo jednog izumitelja. U razdoblju od 1904. – 1911. nekolicina istraživača, a posebno se ističe Francuz Leon Guillet, uspjeli su razviti čelične legure s određenim sadržajem kroma koje bi se danas kvantificiralo kao nehrđajuće čelike. 1911. godine, važnost minimalnog masenog udjela kroma u leguri otkrio je Nijemac Philip Monnartz, a otkrio je povezanost između kroma i otpornosti prema koroziji. Ipak, Englez Harry Brearley smatra se izumiteljem nehrđajućih čelika. On je 1911. godine, dodatkom 12 % kroma ugljičnom čeliku nastojao razviti cijev vatrenog oružja otpornu na eroziju i obraštanje. Brearley–ev čelik nije pokazao željeno ponašanje na određenu otpornost, već se dokazalo da posjeduje veliku korozijsku otpornost. [1]

Nijemci Benno Strauss i Eduard Maurer u Krupp-ovom istraživačkom centru provodili su istraživanja svojstava legura čelika s kromom i niklom. Godine 1912. patentirali su nehrđajući čelik s 18 % kroma i 8 % nikla, takozvani austenitni nehrđajući čelik. [2]

Daljnji razvoj nehrđajućih čelika odgođen je zbog nemogućnosti upotrebe u sumpornoj kiselini s visokim udjelom klorida te 1940. -tih ograničenja na nehrđajuće čelike uzorkovana napetosnom korozijom. Smanjenjem udjela nikla, austenitna struktura postaje mješavina austenita i ferita čime su dobiveni dupleks čelici koji su značajnije otporniji na napetosnu koroziju. Kako je okoliš u morskom okruženju, tj. okoliš sa slanom morskom vodom bogatom kloridima najagresivniji korozivni okoliš za nehrđajuće čelike, 1970. -tih potaknut je razvoj visokolegiranih super dupleks legura. [1]

U osnovi se nehrđajući čelici temelje na Fe-Cr, Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sustavima, ali mogu sadržavati i dodatne legirne elemente koji poboljšavaju njihova svojstva i mijenjaju mikrostrukturu. Korozijska otpornost nehrđajućih čelika prvenstveno proizlazi iz legiranja kromom u minimalnom iznosu od 12 %. Ovaj udio kroma jamči stvaranje zaštitnog oksidnog sloja na površini čelika koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima (slika 1). [3]



Slika 1. Formiranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [4]

U zadnjih 100 godina, otkriveno je, te su u komercijalnoj upotrebi preko 100 vrsta nehrđajućih čelika. S povećanjem osviještenosti ljudi prema smanjenju emisije ugljika, mnogo država promovira nehrđajuće čelike koji su otporni na koroziju, imaju produljeni vijek trajanja, nema potrebe za učestalim mijenjanjem i popravcima. Također, nehrđajući čelici se u potpunosti mogu reciklirati i ne razgrađuju se prilikom ponovne obrade, što omogućava višekratnu upotrebu. [5]

2. VRSTE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Nehrđajući čelici definirani su nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a u našem okruženju ustalila se upotreba oznaka prema američkom standardu AISI. [6]

S obzirom na sastav i mikrostrukturu, današnji korozijski postojani čelici svrstani su u sljedeće skupine [3]:

1. Cr – čelici (s dodacima Mo, Al i Ti) koji prema mikrostrukтури mogu biti:

- feritni ($<0,1$ % C, 15 – 18 % Cr),
- martenzitni i martenzitno-karbidni (0,15 – 1,0 % C, 13 – 18 % Cr),
- feritno–martenzitni (0,1 – 0,15 % C, 13 – 18 % Cr).

2. Cr – Ni, Cr – Ni – Mo i Cr – Mn čelici prema strukturi mogu biti:

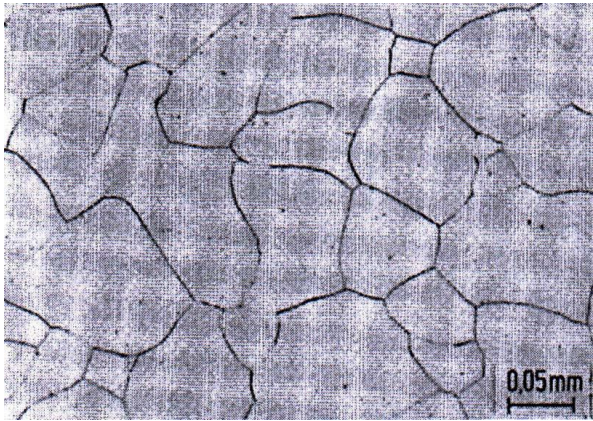
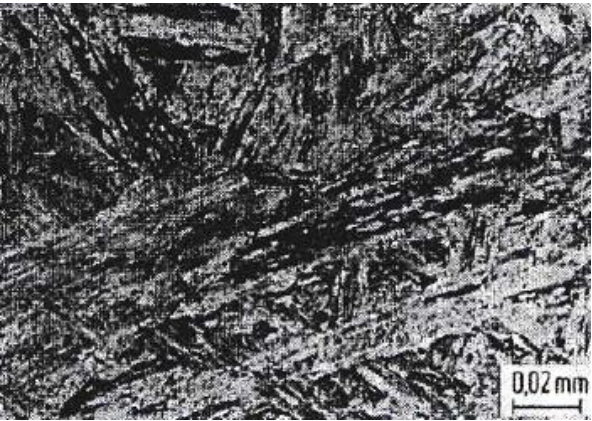
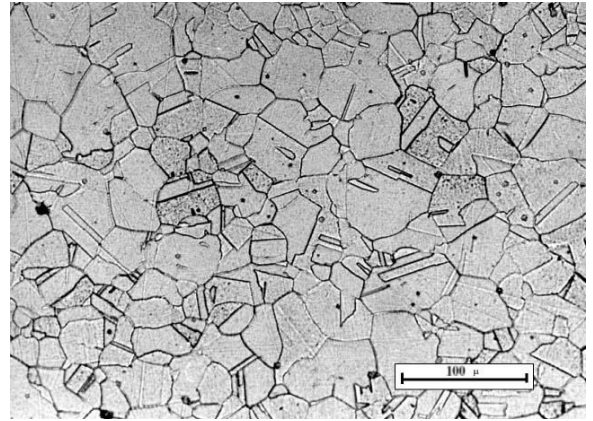
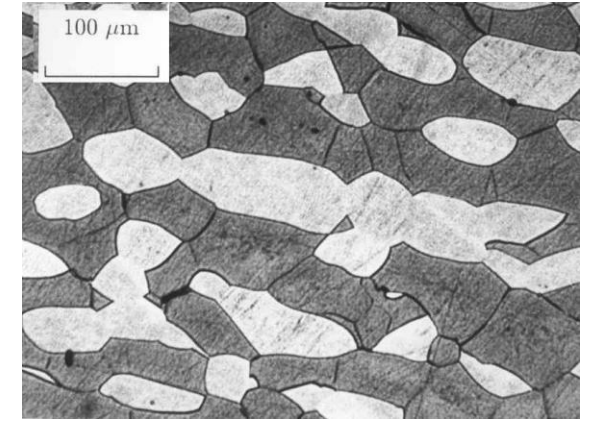
- austenitni,
- feritni,
- martenzitni,
- austenitno – feritni ($s \leq 10$ % δ -ferita),
- martenzitno – feritni,
- austenitno – martenzitno – feritni.

Novije podskupine čelika dobivene su modificiranjem sastava i mikrostrukture prethodno navedenih vrsta i to su [3]:

- superferitni čelici s vrlo niskim % ugljika i niskim masenim udjelima nečistoća (ELA – eng. Extra Low Additions),
- austenitni s vrlo niskim % ugljika (ELC – eng. Extra Low Carbon),
- austenitni legirani dušikom,
- duplex čelici (austenitno-feritna $s > 40$ % ferita),
- niskougljični martenzit (mekomartenzitni).

U tablici 1 prikazane su karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika.

Tablica 1. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [7]

	
Feritni	Martenzitni
	
Austenitni	Dupleks

Za opisivanje utjecaja sastava čelika na njihovu mikrostrukturu uvedeni su nikal (Ni_{ekv}) i krom (Cr_{ekv}) ekvivalenti. Ovim ekvivalentima obuhvaća se utjecaj i ostalih legiranih elemenata u određenom čeliku. Izračunavanje Cr_{ekv} i Ni_{ekv} izraženi su formulama (1) i (2) [8].

Cr_{ekv} – izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (α – geni elementi).

$$Cr_{ekv} = \% Cr + 1,5 \% Si + \% Mo + 0,5 \% (Ta + Nb) + 2 \% Ti + \% W + \% V + \% Al \quad (1)$$

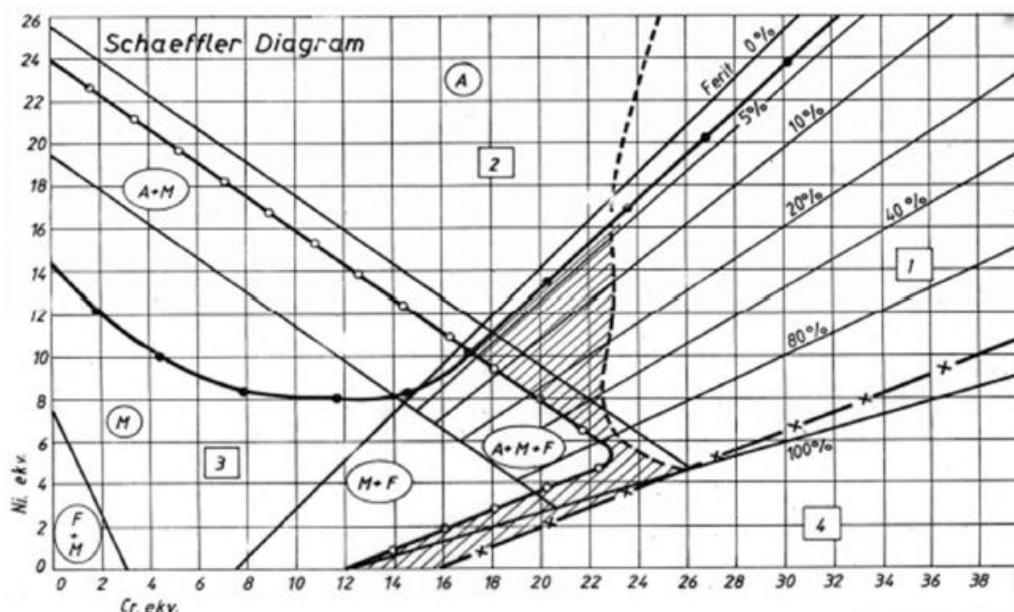
Ni_{ekv} – izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita (γ – geni elementi).

$$Ni_{ekv} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn + 0,5 \% Co \quad (2)$$

Schaeffler je 1949. izradio dijagram koji prikazuje kako struktura nehrđajućih čelika ovisi o omjerima krom – ovih i nikel – ovih ekvivalentnih legiranih elemenata. [8]

Na slici 2 prikazan je Schaeffler – ov dijagram dopunjen s DeLongom i M.C.T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti.

[8]



Slika 2. Schaeffler – ov dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti [8]

Do velikog je značaja dovela dopuna Schaeffler – ovog strukturnog dijagrama s M.C.T. Bystram -ovim linijama koja određuje četiri polja.

Osnovna strukturna područja u Schaeffler – ovom strukturnom dijagramu su razgraničena pravicima i označena početnim slovima strukture koja nastaje [8]:

1. Osnovni i dodatni materijal na temperaturama 500 – 900 °C sklon je pojavi krhke σ – faze,
2. Osnovni i dodatni materijal koji je u ovom polju iznad 1250 °C sklon je stvaranju toplih pukotina (materijal s austenitnom strukturom),
3. Krhka martenzitno – austenitna i martenzitno – feritna struktura, izrazita sklonost pojavi hladnih pukotina (ispod 400 °C) pa je neophodno **predgrijavanje** i naknadna toplinska obrada **žarenjem**,
4. Korozijski postojani čelici s vrlo malim sadržajem ugljika koji pri temperaturi iznad 1100 °C imaju izrazit rast zrna što rezultira sklonošću pojavi pukotina u zavaru i zoni utjecaja topline (ZUT-u).

Šrafirano područje u dijagramu predstavlja područje optimalnog sastava zavarenog spoja te dobre zavarljivosti. [8]

3. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže između 0,02 – 0,15 % C, 15 – 20 % Cr, 7 – 20 % Ni te moguće je dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija i tantalata kojima se pospješuje stvaranje ferita u mikrostrukturi i djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji. Dušik se dodaje radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i rupičastu koroziju. Zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti te mehaničkih svojstava najčešća su korištena vrsta nehrđajućih čelika. [9]

Najpoznatiji predstavnik austenitnih nehrđajućih čelika je Cr-Ni (18/8), a određenim legiranjem razvijene su dodatne legure. Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Glavna prednost ove vrste čelika je otpornost na interkristalnu koroziju, a nedostatak predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika. Visoki udjeli legiranih elemenata, austenitne čelike čine skupljima od martenzitnih i feritnih čelika s nižim i srednjim sadržajem kroma. [10]

Austenitni čelici se prema američkom sustavu označavanja (AISI – eng. *American Iron and Steel Institute*) dijele u dvije skupine: čelici serije 200 i čelici serije 300. [11]

Austenitni čelici serije 200 sadrže veći udio ugljika, mangana i dušika, a manji udio nikla spram serije 300 pa se danas i najčešće koriste čelici serije 300. [11]

Najčešće vrste austenitnih nehrđajućih čelika čine čelici oznake 304, 316, 321 i 347 te njihove varijante. Osim brojevnice oznake, čelik može sadržavati i slovnu oznaku na kraju. Tako čelicima sa slovnim oznakom L označuje se maksimalni sadržaj ugljika od 0,03 %, čime se postiže bolja otpornost prema interkristalnoj koroziji. Vrste s oznakom H sadrže povišeni udio ugljika do 0,1 %. Time se austenitnim čelicima omogućava rad pri povišenim temperaturama jer se s porastom sadržaja ugljika povećava vrijednost čvrstoće. Oznakom N označuje se povećani sadržaj dušika do vrijednosti 0,2 %. Dodavanjem dušika povoljno se djeluje na čvrstoću, otpornost na adheziju i otpornost na rupičastu koroziju. [11]

Karakteristična područja primjene austenitnih čelika su [9]:

- Cr-Ni-N čelik: uređaji u mljekarama i pivovarama,
- Cr-Ni-Mo-N čelici: uređaji u industriji celuloze, boja, tekstila, tlačne posude povišene postojanosti na koroziju, povišeno postojani uređaji na više koncentracije klora i do 400 °C,
- Cr-Ni-Mo-N čelici s 25 % Cr i 25 % Ni: sumporno kiseli mediji i reducirajući uvjeti primjene
- Cr-Ni-Mn-Mo-N čelici: uređaji u kontaktu s morskom vodom.

U tablici 2 prikazano je utjecanje pojedinih legirnih elemenata na austenitni nehrđajući čelik. [10]

Tablica 2. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na austenitni nehrđajući čelik [10]

Element	Struktura	Karakteristike
C	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati interkristalnu koroziju.
Cr	F	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji.
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost.
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću.
Nb	-	Dodaje se čeliku u vrijednosti $min Nb \geq 8 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Stvara sitno zrno.
Mn	A	Sprječava tople pukotine stvaranjem manganovog sulfida (MnS).
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivna svojstva pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranju ferita.
P, S, Se	-	Olakšavaju obradu odvajanjem čestica. Lošija zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji). Uvijek se dodaje radi dezoksidacije. Pomaže stvaranju ferita.
Ti	-	Dodaje se čeliku u vrijednosti $Ti \geq 5 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Stvara sitnije zrno. Pomaže stvaranju ferita.

Glavna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su [9]:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozijska otpornost,

- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature,
- plošno centrirana (FCC) kubična rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja.

Austenitni čelici nemaju mogućnost zakaljivanja ili poboljšavanja transformacijom jer nema faznih transformacija. [9]

U tablici 3 prikazana su mehanička svojstva niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika pri sobnoj temperaturi, a u tablici 4 prikazani su neki primjeri austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom. Navedene vrijednosti odnose se na žareno stanje. [9]

Tablica 3. Mehanička svojstva niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika [9]

OZNAKA ČELIKA		„Ostali“ sastav %	MEHANIČKA SVOJSTVA				
Oznaka čelika prema ISO/TR 15608:2005	Oznaka prema AISI		R_m , N/mm ²	R_p , N/mm ²	A_5 , %	Z, %	KV, J
X2CrNi 18-9	304 L	-	450-700	175	50	60	85
X2CrNiMo 18-10	316 L	2,2 Mo	450-700	195	45	60	85
X2CrNiMo 18-12	316LC	2,8 Mo	450-700	195	45	60	85
X2NiCr 18-16	-	-	440-690	175	50	60	85
X2CrNiMo 18-16	-	3,5 Mo	500-700	195	45	-	85

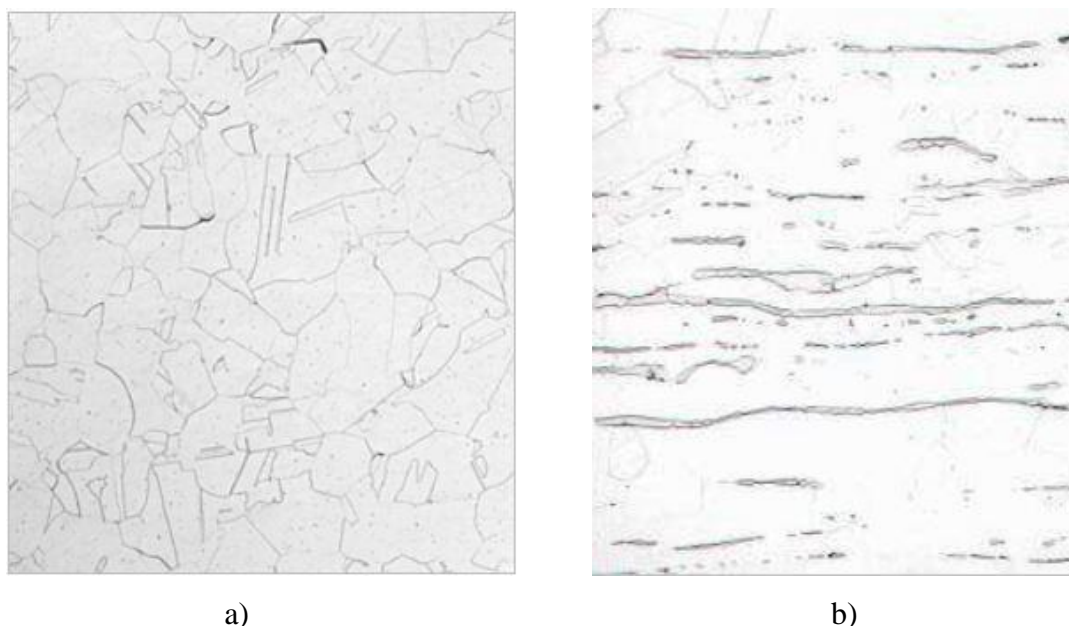
Tablica 4. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom [9]

Oznaka čelika prema ISO/TR 15608:2005	„Ostali“ sastav %	MEHANIČKA SVOJSTVA			
		R_m , N/mm ²	R_p , N/mm ²	A_5 , %	KV , J
X2CrNiN 18-10	0,12-0,22 N	550-700	270	40	85
X2CrNiMoN 17-12-2	0,12-0,22 N	580-800	280	40	85
X2CrNiMoN 17-13-5	0,12-0,22 N	580-800	285	35	85
X2CrNiMoN 25-25-2	0,08-0,16 N	540-740	255	40	70
X3CrNiMnMoN 19-17	0,25 N 0,16 Nb 5,5 Mn 3,0 Mo	800	380	40	100
X3CrNiMnMoN 23-17	0,45 N 6,0 Mn 4,0 Mo	850–1050	540	30	70

3.1 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

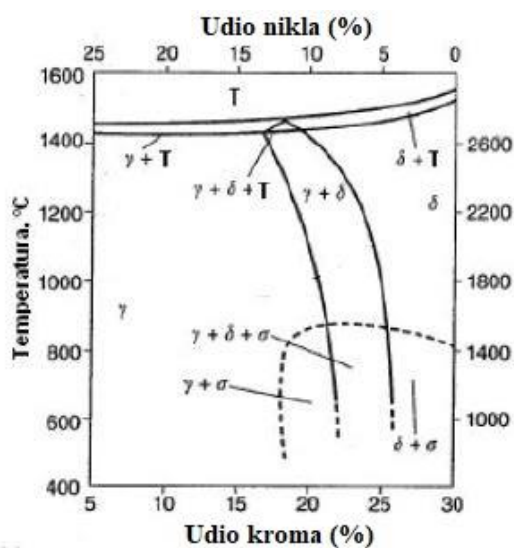
Kemijski sastav i termomehanička obrada nehrđajućih čelika namješta se tako da mikrostruktura na sobnoj temperaturi bude potpuno austenitna ili austenitna s malim udjelom feritne faze. Ovisno o udjelima alfa genih i gama genih legiranih elemenata mikrostruktura je ili potpuno austenitna ili austenitno - feritna. [10]

Na slici 3 a) prikazana je mikrostruktura austenitnog čelika sa 100 % austenita, a na slici 3 b) prikazana je mikrostruktura austenitnog čelika koji osim austenita sadrži i određeni udio visokotemperaturnog (delta) ferita. Trakaste nakupine delta - ferita usmjerene su paralelno sa smjerom valjanja. Feritna faza nastaje uslijed segregacije alfa genih legiranih elemenata tijekom kristalizacije i naknadne termomehaničke obrade. Volumni udio delta - ferita ne prelazi 2 do 3 %. Poželjna je mala količina delta - ferita, ali u određenim uvjetima može smanjiti duktilnost i žilavost austenitnih čelika. Uz trakaste nakupine delta – ferita moguća je i prisutnost nepoželjnih mikrostrukturnih faza poput karbida tipa $M_{23}C_6$, σ – faza, χ – faza, ε – faza, G_i i Lavsova faza. [10]



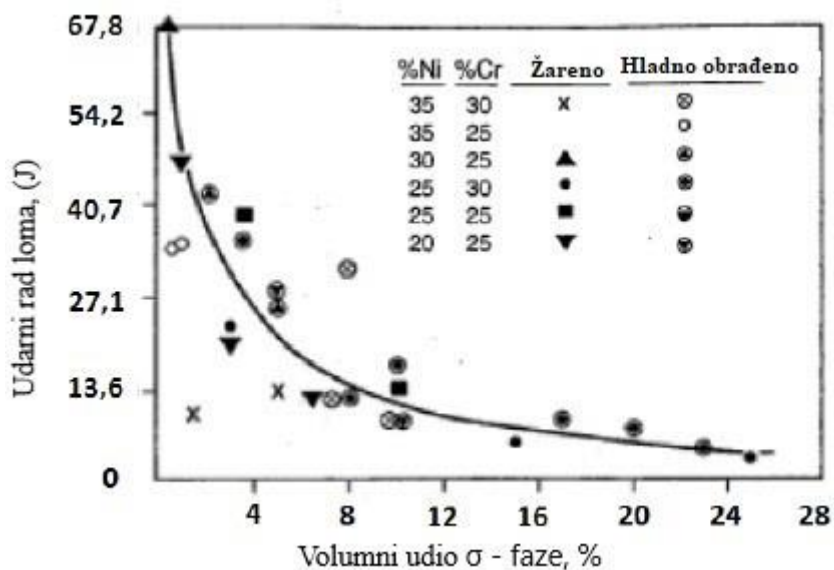
Slika 3. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) 100% austenit; b) austenit i delta – ferit [12]

Na slici 4 prikazano je formiranje mikrostrukture austenitnih nehrđajućih čelika primjenom ravnotežnog pseudobinarnog Fe – Cr – Ni dijagrama sa 70 % Fe. U primarnoj se kristalizaciji austenitna ili feritna mikrostruktura formira ovisno o udjelima kroma i nikla. Legure koje u sastavu imaju manje od 12 % Ni i više od 18 % Cr primarno kristaliziraju kao 100 % - tni delta ferit. Legure s većim udjelom nikla, a manjim udjelom kroma od navedenih vrijednosti, nakon primarne kristalizacije formiraju potpunu austenitnu mikrostrukturu. Trokutasto područje na približno 12 % Ni, između likvidus i solidus linije, sastoji se od austenita, ferita i taline, a nakon skrućivanja mikrostruktura sadrži austenit i ferit. [12]



Slika 4. Ravnotežni pseudobinarni dijagram sustava Fe – Cr – Ni za 70 % Fe [12]

Ukoliko austenitni nehrđajući čelici sadrže delta ferit u mikrostrukturi, skloni su stvaranju σ – faze. Formiranje σ – faze potiču sljedeći kemijski elementi: krom, molibden, niobij, silicij, volfram, vanadij, cirkonij i titan. Usporavanje rasta precipitata σ – faze omogućuje se dodatkom ugljika i dušika. σ - faza nastaje na granici ferit/austenit te se dalje širi u ferit. σ – faze nastaje brže i u većoj količini ukoliko je veći udio delta ferita u mikrostrukturi. Na slici 5 prikazan je utjecaj σ – faze na udarni rad loma Fe – Cr – Ni legura. Iz slike se može primijetiti kako volumni udio σ – faze od 5 % može smanjiti udarni rad loma za više od 50 %. [11]



Slika 5. Utjecaj σ – faze na udarni rad loma Fe – Cr – Ni legura pri sobnoj temperaturi [11]

U austenitnim nehrđajućim čelicima, σ – faza nastaje samo ako se u mikrostrukturi nalazi ferit te ako se čelik dugotrajno zadržava na temperaturi između 600 i 900 °C.

4. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Austenitni nehrđajući čelici zavaruju se bez značajnih poteškoća ukoliko se tijekom zavarivanja poštuju određeni tehnološki zahtjevi. Austenitni nehrđajući čelici mogu se zavarivati bilo kojim elektrolučnim postupkom (TIG, MIG, REL, EPP). Nema potrebe za toplinskom obradom prije i nakon zavarivanja zbog toga što hlađenjem ne otvrdnjavaju te imaju dobru žilavost. [11]

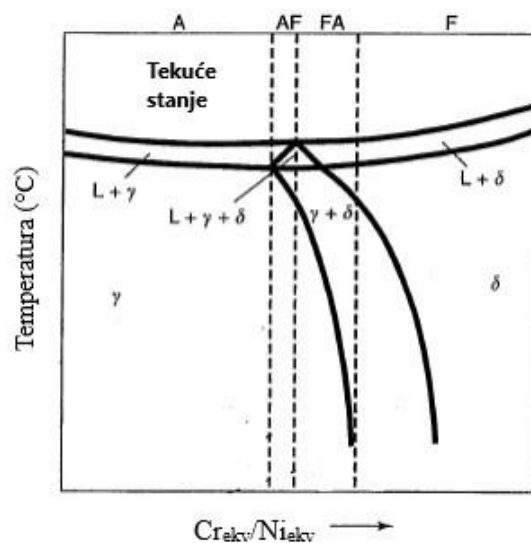
Iako se austenitni nehrđajući čelici lako zavaruju, može doći do pucanja metala zavara i ZUT – a. Do pucanja dolazi kod zavarivanja potpunih austenitnih čelika tj. kod onih koji ne sadrže nikakvu količinu ferita. Blagotvorni učinak ferita donosi otapanje nečistoća koje stvaraju segregacije i solidifikacijske pukotine. [11]

Zbog specifičnih fizikalnih svojstava austenitnih nehrđajućih čelika naspram ugljičnih čelika poput: 40 % većeg koeficijenta toplinskog širenja, 3x manje toplinske vodljivosti, 4x većeg električnog otpora; od velikog je značenja kontrolirati unos topline kako bi smanjili deformacije te smanjili vjerojatnost toplih pukotina. [11]

4.1 Mikrostrukturne promjene u zoni taljenja austenitnih nehrđajućih čelika

Ovisno o uvjetima primarne i sekundarne kristalizacije te omjeru Cr_{ekv} i Ni_{ekv} , postoje četiri različite mikrostrukture metala zavara austenitnih nehrđajućih čelika. [11]

Na slici 6 prikazana je povezanost načina kristaliziranja i pseudobinarnog faznog dijagrama sustava Fe – Cr - Ni. Iz dijagrama se mogu očitati mikrostrukturne faze nastale u primarnoj kristalizaciji ovisno o omjeru Cr_{ekv} i Ni_{ekv} te što se s njima događa hlađenjem od solidus linije do sobne temperature. [11]



Slika 6. Povezanost načina kristaliziranja i pseudobinarnog faznog dijagrama [11]

Na lijevoj strani dijagrama (područje A) nalaze se legure koje primarno kristaliziraju kao 100 % - tni austenit te zadržavaju austenitnu mikrostrukturu hlađenjem do sobne temperature. Ako se nakon primarne austenitne kristalizacije u mikrostrukturi pojavi određena količina ferita, takva solidifikacija predstavlja područje AF prema slici. Do pojave ferita u mikrostrukturi dolazi uslijed povećanog udjela kroma i molibdena, tj. α – genih elemenata koji potiču stvaranje ferita. [11]

U AF području, između likvidus i solidus linije, prisutne su tri faze (talina, ferit i austenit). Formiranje ferita proteže se uzduž granica zrna i zadržava se do sobne temperature. Na desnoj strani od trofaznog područja nalaze se legure koje primarno kristaliziraju kao feritne. [11]

Legure koje na kraju primarne kristalizacije sadrže udio austenita, takve legure pripadaju području FA. Legure koje primarno kristaliziraju kao ferit, a nalaze se blizu trofaznog područja, hlađenjem do sobne temperature jedan dio ferita prekrystalizira u austenit, a drugi dio ostaje stabilan ferit sve do sobne temperature. Koliki je udio ferita koji će prijeći u austenit ovisi o udjelu legirnih elemenata i uvjetima skrućivanja, tj. brzini hlađenja. [13]

Legure koje se nalaze uz desni rub dijagrama ostaju 100 % feritne sve do sobne temperature. U praksi, kristaliziranje u 100 % F kod austenitnih nehrđajućih čelika je rijetkost. Većina dodatnih materijala je tako legirana da kristalizira u FA području, a metal zavara sadrži 5 – 20 FN (eng. Ferrite Number). [11]

4.2 Pojave u zoni utjecaja topline

Kod austenitnih nehrđajućih čelika u zoni utjecaja topline mogu se pojaviti sljedeće pojave [11]:

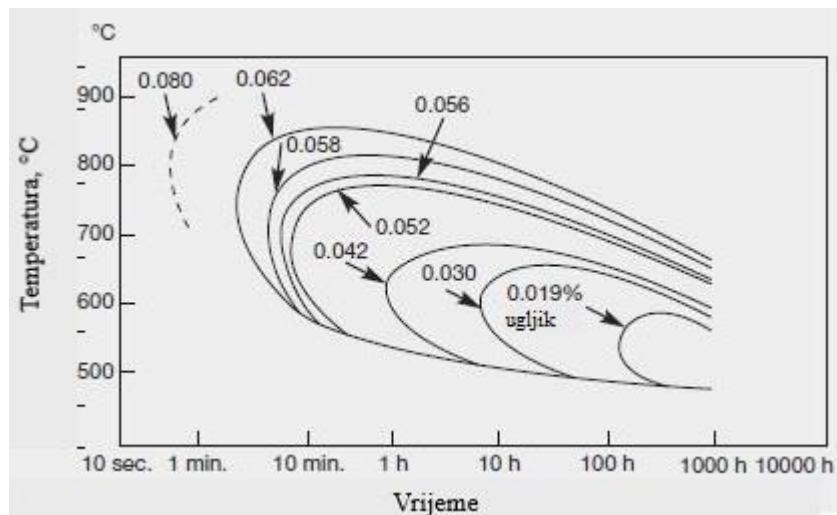
1. RAST ZRNA. Većina austenitnih nehrđajućih čelika se zavaruje u žarenom ili vruće – valjanom stanju pa porast zrna nije uobičajena pojava, osim ukoliko je preveliki unos topline. Ukoliko je osnovni materijal očvrstnut hladnom deformacijom, može doći do smanjenja čvrstoće u ZUT-u uzrokovane rekristalizacijom i porastom zrna.
2. FORMIRANJE FERITA. Formiranjem ferita u ZUT – u, ograničava se rast zrna i smanjuje vjerojatnost nastanka likvacijskih pukotina. Povećavanjem omjera Cr_{ekv}/Ni_{ekv} legure i brzine hlađenja, veća je vjerojatnost nastanka ferita.
3. PRECIPITACIJA. Kod austenitnih nehrđajućih čelika postoji opasnost izlučivanja $M_{23}C_6$ karbida i Cr_2N nitrida na granicama zrna pa je stoga potrebno izbjegavanje zadržavanja u temperaturnom području izlučivanja navedenih karbida i nitrida.
4. LIKVACIJSKE PUKOTINE NA GRANICAMA ZRNA. Do likvacijskih pukotina na granicama zrna dolazi zbog segregacija nečistoća na granicama zrna.

4.3 Problemi zavarljivosti austenitnih nehrđajućih čelika

4.3.1 Izlučivanje kromovih karbida

Glavni problem austenitnih nehrđajućih čelika u pogledu korozijske otpornosti predstavlja $Cr_{23}C_6$. Nastanak karbida tipa $Cr_{23}C_6$ može se izbjeći [11], [13]:

1. Legiranjem jakim karbidotvorcima tipa MC (npr. TiC, TaC, NbC) koji onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te tako sprječavaju osiromašenje perifernih zona austenitnih zrna. Na temelju tih spoznaja može se definirati postupak i cilj toplinske obrade austenitnih nehrđajućih čelika (slika 8). Stabilizatori se dodaju u osnovni materijal ili dodatni materijal. Za dodatni materijal se češće koristi Ti umjesto Nb zbog toga što Nb izgara jače u električnom luku.
2. Smanjenje sadržaja ugljika $C < 0,03 \%$. Takvim čelicima se u AISI načinu označavanja dodaje slovna oznaka L, LC ili ELC (eng. Low Carbon ili Extra Low Carbon). Stvoreni karbidi su u malim količinama, u diskontinuiranim izlučinama pa je njihovo nepovoljno djelovanje jako smanjeno. Nije moguća korozija po čitavom presjeku. Na slici 7 prikazan je TTS (eng. Time-Temperature-Sensitization) dijagram, dijagram početka nastanka karbida ovisno o brzini hlađenja i postotku ugljika u mikrostrukturi austenitnog čelika 304.



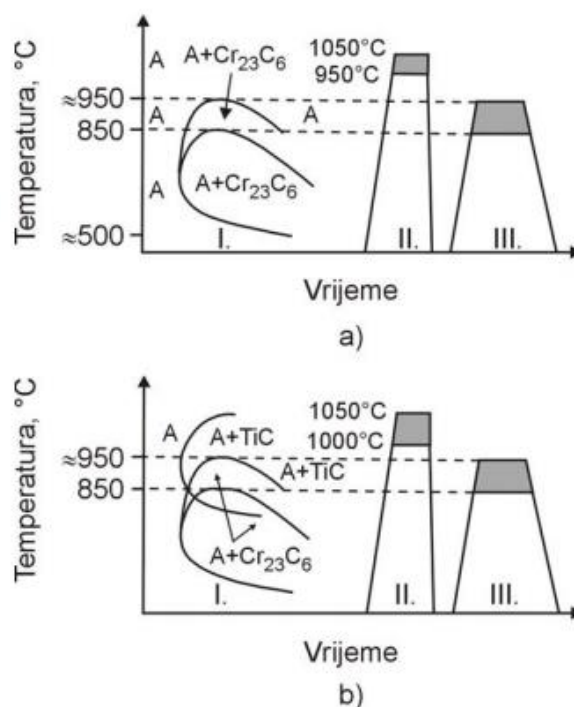
Slika 7. TTS dijagram austenitnog nehrđajućeg čelika 304 s različitim udjelima ugljika [13]

Iz slike 7 vidljivo je da austenitni nehrđajući čelici ostaju potpuno austenitni iznad 900 °C. U temperaturnom području od 540 – 900 °C dolazi do izlučivanja ovisno o udjelu ugljika i temperaturi hlađenja. Nastanak karbida je znatno manji pri manjem udjelu ugljika. Kod postupaka žarenja i zavarivanja potrebno je hladiti tolikom brzinom da se ne dotakne vrh krivulja kako bi se izbjegao nastanak karbida po granicama zrna (senzibilizacija). Smanjivanjem udjela ugljika omogućuje se duže vrijeme hlađenja kako bi se spriječila senzibilizacija. [13]

3. Niskim unošenjem topline. Zavarivanje je potrebno provoditi u što hladnijem stanju (ne ispod 5 °C), a može se postići na sljedeće načine:

- ne predgrijavati,
- temperatura između prolaza treba biti što niža, npr. maksimalno 150 °C,
- unošenje topline što manje uz veliku dužinu izvlačenja elektrode l_i i širinu gusjenice $b \leq 2,5$ x promjer elektrode.

Na slikama 8 a i 8 b shematski su prikazane moguće promjene u mikrostrukturi i pojave kromovih karbida kod stabiliziranih i nestabiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika, te mogućnosti toplinske obrade za uklanjanje nastalih kromovih karbida. [9]



Slika 8. Shematski prikaz toplinske obrade nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) austenitnog nehrđajućeg čelika [9]

I – shematski prikaz TTT dijagrama (samo za hlađenje); II – gašenje (kaljenje bez polimorfne pretvorbe); III – žarenje (stabilizacija destabiliziranog austenita)

Na slici 8 a) shematski su prikazane moguće promjene u mikrostrukturi tijekom hlađenja nestabiliziranih austenitnih čelika iz čega se može zaključiti [9]:

- pri hlađenju (npr. sa ≈ 1200 °C) nastaje monofazna austenitna mikrostruktura do temperature ≈ 950 °C,
- između 950 i 850 °C dolazi do izlučivanja karbida Cr_{23}C_6 , ali nakon određenog vremena oni se ponovno raspadaju i difundiraju u austenit,
- pri sporom hlađenju između 850 i 550 °C iz austenita se izlučuju karbidi Cr_{23}C_6 .

Navedeni karbidi nastaju od atoma ugljika i kroma iz perifernih područja zrna koji uzrokuju senzibilizaciju čelika, u nekim uvjetima i interkristalnu koroziju. Dugotrajno zadržavanje čelika u ovom temperaturnom području neće izazvati raspad karbida i difuziju kroma i ugljika u austenit. [9]

Ovako nastali karbidi Cr_{23}C_6 mogu se ukloniti iz nestabiliziranog austenitnog nehrđajućeg čelika pomoću [9]:

- zagrijavanja u monofazno austenitno područje (karbidi će se raspasti pa će atomi ugljika i kroma biti „uvučeni“ u austenit) i gašenja (radi izbjegavanja ponovnog izlučivanja karbida),
- žarenja pri 850 – 950 °C kako bi se nastale karbide „natjeralo“ na disocijaciju i ponovnu difuziju atoma kroma i ugljika u austenit. Hlađenje nakon žarenja smije biti i sporije, jer su se atomi kroma i ugljika čvršće „primili“ u austenitu nego u slučaju zagrijavanja u području gdje nastaje monofazni austenit.

Za nestabilizirane austenitne nehrđajuće čelike je učinkovitiji postupak gašenja iz područja monofaznog austenita. [9]

U slučaju stabiliziranih austenitnih čelika (slika 8 b), uočava se slijedeće [9]:

- hlađenjem austenita do ≈ 950 °C dolazi do izlučivanja karbida (TiC) iz austenita pri čemu dolazi do vezivanja najvećeg dijela ugljika. Na taj način je smanjeno ili potpuno spriječeno stvaranje kromovog karbida $Cr_{23}C_6$,
- ukoliko se pojavi izlučivanje $Cr_{23}C_6$ (npr. u ZUT-u tijekom zavarivanja) već bi se samim žarenjem između 850 i 950 °C izazvao prijelaz $Cr_{23}C_6$ u TiC i difuzija atoma kroma u austenit.

4.3.2 Izlučivanje krhkih σ – faza (FeCr) i χ - faza $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{12}$

U austenitnim nehrđajućim čelicima pored karbida i nitrida mogu se izlučivati i intermetalne faze koje imaju drugačiju strukturu sa smanjenom istezljivosti i otpornosti na koroziju.

σ – faze su intermetalni spojevi metala, tetragonalne strukture u kojoj su atomi pravilno raspoređeni. σ – faza nije feromagnetična. Postoji oko 50 raznih vrsta σ – faza od kojih je najpoznatija Fe – Cr s oko 48 % Cr. Veoma je tvrda i krhka (1000HV). Većim postotkom Cr (> 20 %), veća je vjerojatnost pojave σ – faze. Također i pri hlađenju zavara može doći do pojave σ – faze. [10]

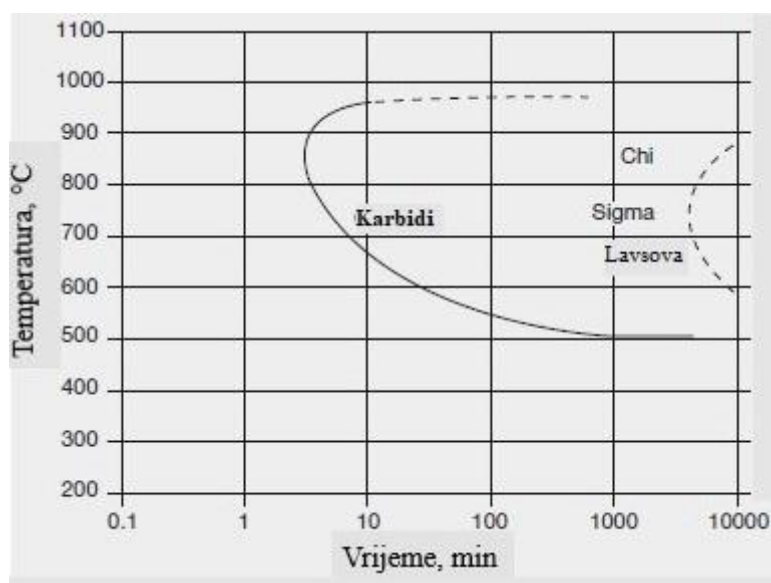
Pri hlađenju se σ – faze izlučuju ispod 830 °C. Kod nehrđajućih čelika izlučuju se σ – faze u pravilu kada je sadržaj Cr veći od 16 %. Toplinskom obradom σ – faza na 1200 °C prelazi u austenit ili ferit, no na visokoj temperaturi može se očekivati pogrubljenje zrna i smanjenje krhkosti. [10]

Uz σ – fazu javlja se intermetalni spoj χ – faza ($Fe_{36}Cr_{12}Mo_{12}$). Prema Falkhard-u, dan je utjecaj ostalih elemenata na izlučivanje σ i χ – faza koje povećavaju krhkost preko krom ekvivalenta (Cr_e) (3) [10]:

$$Cr_e = Cr + 0,31 Mn + 1,76 Mo + 1,7 Nb + 1,58 Si + 2,44 Ti + 1,22 Ta + 2,02 W + 0,97 W - 2,66 Ni - 0,177 Co \quad (3)$$

Veći sadržaj kroma daje veću sklonost stvaranju krhkih faza. Nikal i kobalt djeluju usporavajuće na izlučivanje krhkih faza. Kod stabiliziranih čelika je usporavajući utjecaj ugljika na stvaranje intermetalnih spojeva smanjen te su iz tog razloga stabilizirani čelici skloniji povećanju krhkosti. Slično je i s čelicima koji sadrže mali udio ugljika ($C < 0,03 \%$). [10]

Na slici 9 prikazan je TTT (eng. Time-Temperature-Transformation) dijagram austenitnog nehrđajućeg čelika 316. [13]



Slika 9. TTT dijagram austenitnog nehrđajućeg čelika 316 [13]

Iz slike 9 može se primijetiti kako kromovi karbidi mogu nastati već nakon 5 minuta, dok sigma, chi i Lavsova faza nastaju tek nakon 80 sati. Kod Cr – Ni legura koje sadrže 5 % Mo chi faza nastaje puno prije i može se pojaviti prije nastanka kromovih karbida. Na povećanje vremena stvaranja kromovih karbida i intermetalnih faza najveći učinak ima dušik koji produžuje vrijeme stvaranja navedenih faza s početkom stvaranja karbida na približno 10 minuta. [13]

4.3.3 Tople pukotine

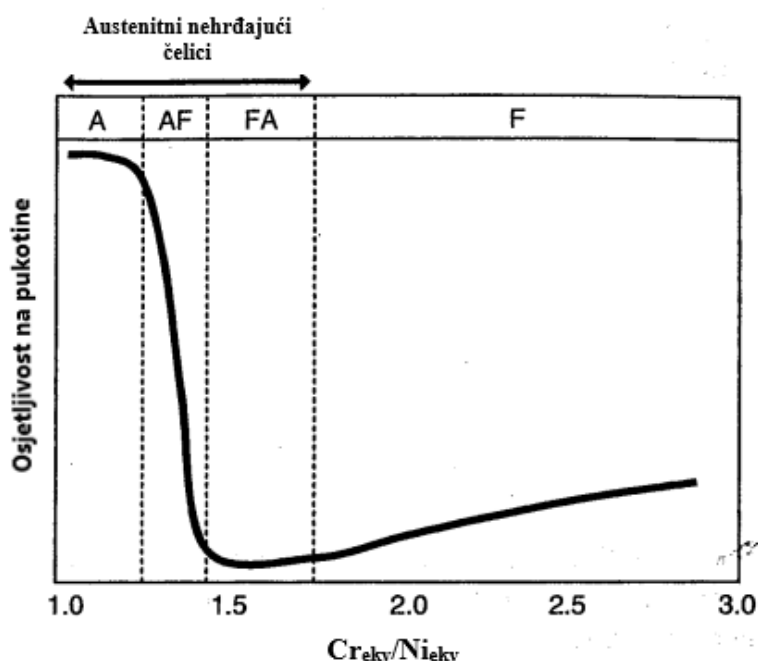
Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama, odnosno pri temperaturama skrućivanja eventualno prisutnih nečistoća u zavarenom spoju, a koje su u uvjetima naprežanja, zbog hlađenja zavarenog spoja osnovni uzročnik nastajanja toplih pukotina. Ove pukotine mogu nastati u ZUT-u, ali isto tako i u zoni taljenja zavarenog spoja. Za razliku od hladnih pukotina gdje je prijelomna površina svjetlija,

kod toplih pukotina prijelomna površina je tamna (zbog oksidacije površine pukotine na visokim temperaturama). [14]

Ovisno o mjestu nastajanja toplih pukotina razlikuju se dvije osnovne vrste [11]:

1. KRISTALIZACIJSKE PUKOTINE: Osjetljivost materijala prema nastanku kristalizacijskih pukotina prvenstveno ovisi o sastavu metala zavara. Najosjetljiviji je metal zavara koji primarno kristalizira kao austenit (A i AF područje), dok najveću osjetljivost prema ovoj vrsti pukotina pokazuje metal zavara koji kristalizira u FA području. Također, čelici koji sadrže povećani udio nečistoća (sumpor i fosfor) imaju veću osjetljivost prema nastanku kristalizacijskih pukotina. Osim toga, preveliki unos topline, veliko skrućivanje zavara i konkavni oblik zavara potiču stvaranje ovakvih pukotina.

Na slici 10 prikazana je ovisnost nastanka toplih pukotina s obzirom na iznos omjera Cr_{ekv}/Ni_{ekv} kod austenitnih nehrđajućih čelika. Iz slike je uočljivo da najveću osjetljivost prema toplim pukotinama pokazuju čelici potpune austenitne strukture, dok najmanju osjetljivost pokazuju čelici koji primarno kristaliziraju u ferit. [11]



Slika 10. Osjetljivost na tople pukotine kao funkcija omjera Cr_{ekv}/Ni_{ekv} [11]

2. LIKVACIJSKE PUKOTINE: Nastaju najčešće u ZUT-u, a mogu biti uzdužne i poprečne na smjer metala zavara. Također, mogu se pojaviti i u zoni taljenja kod zavarivanja u više prolaza kada zona taljenja postaje ZUT prilikom zavarivanja sljedećeg prolaza. Uzrok nastajanja likvacijskih pukotina je prisutnost nečistoća na granicama zrna pri visokim temperaturama (~ 1200 °C) kada je metal zavara već

primarno kristalizirao. Granice zrna ne mogu izdržati naprezanja nastala hlađenjem zavara te dolazi do pukotina likvacijskog tipa. Legure koje sadrže Ti i Nb tvore MC karbide koji mogu uzorkovati likvacijske pukotine u ZUT-u. [11], [15]

Sadržaj δ -ferita u metalu zavara na sobnoj temperaturi izražava se preko FN i koristi se kao indikator otpornosti metala zavara prema toplim pukotinama. Vrijednost FN-a za austenitno područje (A područje) iznosi 0, za AF područje iznosi FN = 0-3, a za FA područje iznosi FN 3-20. Feritni broj FN nije jednak volumnom udjelu ferita (%). [11]

Za sprječavanje nastanka likvacijskih pukotina u ZUT-u potrebno je odabrati takav osnovni materijal koji će u strukturi imati određeni udio ferita. Također, formiranje ferita na granici zrna ograničava rast zrna što također pozitivno djeluje na smanjivanje opasnosti od likvacijskih pukotina. [11]

Kod potpuno austenitnih čelika mogućnost nastanka likvacijskih pukotina moguće je minimizirati smanjenjem nečistoća, kontroliranim unosom topline (preporučena gornja granica iznosi 1,5 kJ/mm) i smanjenjem veličine zrna. [11]

U tablici 5 prikazan je minimalni potrebni FN metala zavara kako bi se izbjegle likvacijske pukotine u metalu zavara. [11]

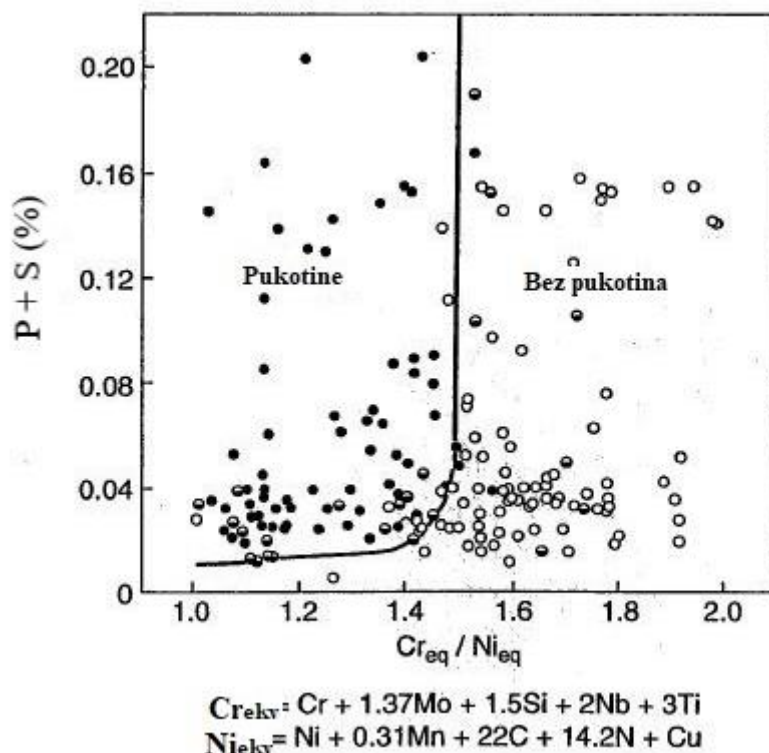
Tablica 5. Minimalni potreban FN metala zavara kako bi se izbjegle likvacijske pukotine u metalu zavara [11]

Oznaka materijala AISI	316	308	316L	308L	309	347
Minimalni FN	1,5	2	2,5	3,0	4,0	6,0

Mjerenje količine ferita u mikrostrukturi može se provoditi na više načina: magnetske tehnike (uređaji koji se koriste, zovu se: eng. MagneGage i eng. Severn Gage), tehnike vrtložnih struja (eng. Eddy Current Probe, a uređaj za mjerenje se naziva feritoskop). Vrijednosti FN-a koji su < 8, smatraju se približno jednakima volumnom udjelu ferita. [11]

4.3.3.1 Dijagrami za predviđanje pojave toplih pukotina

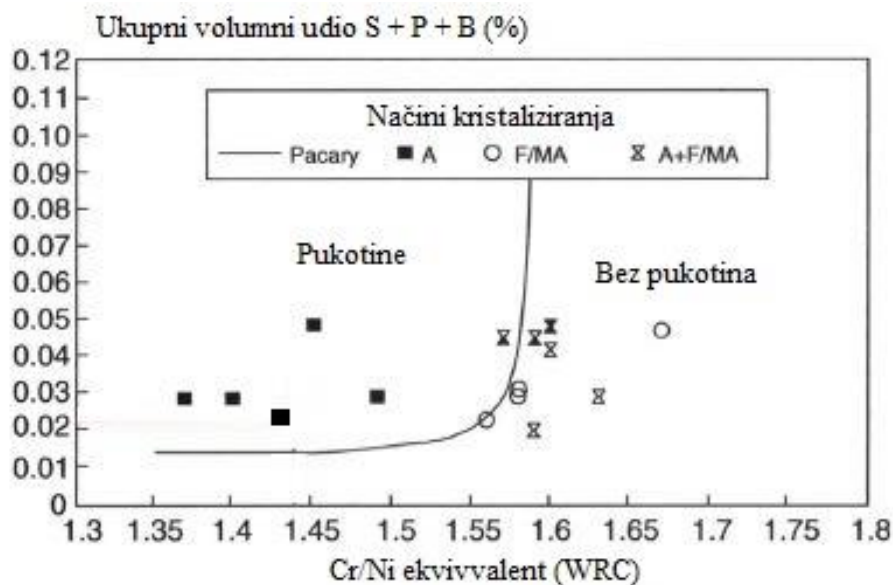
Na temelju različitih istraživanja, dobiveni su različiti dijagrami za predviđanje pojave toplih pukotina u austenitnim nehrđajućim čelicima ovisno o kemijskom sastavu, tj. omjeru Cr_{ekv}/Ni_{ekv} . Najčešće korišteni su Suutala dijagrami (slika 11) i modificirani Suutala dijagrami (slika 12 i 13). [11]



Slika 11. Suutala dijagram za predviđanje nastanka toplih pukotina [11]

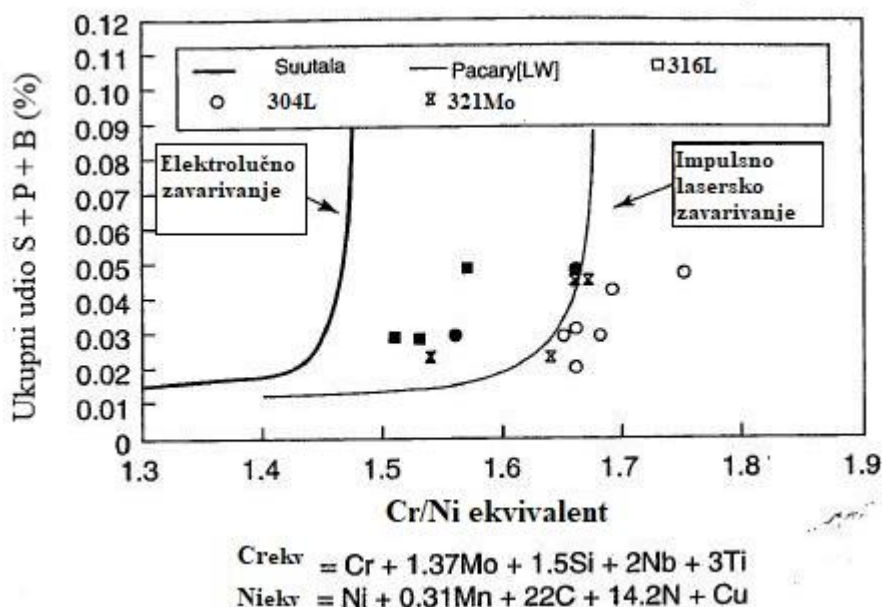
Ovaj Suutala dijagram koristi se kod elektrolučnih postupaka zavarivanja. Kako Cr_{ekv}/Ni_{ekv} raste iznad kritične vrijednosti ($\sim 1,55$), otpornost na pukotine, neovisno o sadržaju nečistoća drastično raste. Do ovog drastičnog skoka dolazi zbog kristalizacije iz primarnog austenita u primarni ferit. Na temelju ovog dijagrama može se vidjeti kako primjenom čelika s jako niskim sadržajem nečistoća i niskim omjerom Cr_{ekv}/Ni_{ekv} , može doći do toplih pukotina. Na temelju toga može se zaključiti kako samo nastajanje toplih pukotina se najbolje kontrolira ovisno o uvjetima kristaliziranja.

Na slici 12 prikazan je modificirani Suutala dijagram koji prikazuje kristalizaciju iz primarnog austenita u primarni ferit uslijed brzog skrućivanja koje se javlja kod postupaka zavarivanja s visokim unosom energije (npr. lasersko zavarivanje, zavarivanje snopom elektrona). Prema modificiranom Suutala dijagramu, ukoliko su iznosi Cr/Ni ekvivalenta u rasponu od 1,35 do 1,55, kristalizacija se provodi u primarni austenit te su ti čelici skloni toplim pukotinama. Ukoliko je iznos Cr/Ni ekvivalenta veći od 1,55, kristalizacija se provodi u ferit, ali taj ferit se može pretvoriti u austenit prilikom hlađenja u čvrsto stanje korištenjem masovne transformacije (F/MA). [11]



Slika 12. Modificirani Suutala dijagram [11]

Iz slike 13 može se vidjeti razlika između pojava toplih pukotina u iznosu kritičnih vrijednosti Cr/Ni ekvivalenta dobivenih elektrolyčnim postupcima i postupcima s visokim unosom energije. Iznosi kritičnih vrijednosti kod postupaka s visokim unosom energije pomaknuti su prema višim vrijednostima od 1,48 do 1,68, dok kod klasičnih elektrolyčnih postupaka iznos kritičnih vrijednosti je u intervalu od 1,35 do 1,55, ovisno o leguri. [11]



Slika 13. Modificirani Suutala dijagram [11]

Zacrtnjeni simboli predstavljaju pukotine, a bijeli simboli predstavljaju legure bez toplih pukotina.

4.3.4 Noževa korozija

Noževa korozija (eng. Knife-Line Attack) stabiliziranih čelika nakon zagrijavanja u područje od 500-700 °C. [10]

Prilikom zavarivanja stabiliziranih čelika s Ti i Nb u ZUT-u, na primjer kod zavarivanja u više prolaza, dolazi do ponovnog otapanja ugljika u krutini, koji je bio vezan s Ti i Nb u karbide. Do korozije će doći samo ponovnim zagrijavanjem na 500 – 700 °C. Korozijsko djelovanje se odvija u uskom području ZUT-a, koje je bilo zagrijano iznad 1300 °C. U toj uskoj zoni se raspada Nb ili Ti karbid. Pri brzom hlađenju (brzim prelaskom kroz područje 450-850 °C ili uže 500-700 °C ili još uže 550-650 °C) samo se mali dio karbida NbC ili TiC ponovno uspostavlja, a ostatak Nb, Ti i C ostaje u krutini. [10]

Ponovnim zagrijavanjem na 500-700 °C zona koja je prethodno bila zagrijana na 1300 °C izlučivat će se $M_{23}C_6$ kromom bogati karbid, koji će uzrokovati interkristalnu koroziju u obliku linije-uske zone, pa se zato naziva „noževa korozija“, koja ima oblik oštre linije nastale zarezom noža. Uska zona (> 1300 °C) se javlja neposredno uz granicu taljenja u ZUT-u ili u ZT kod više prolaza kada ZUT postaje prethodni sloj, a na njega dolazi sljedeći sloj. [10]

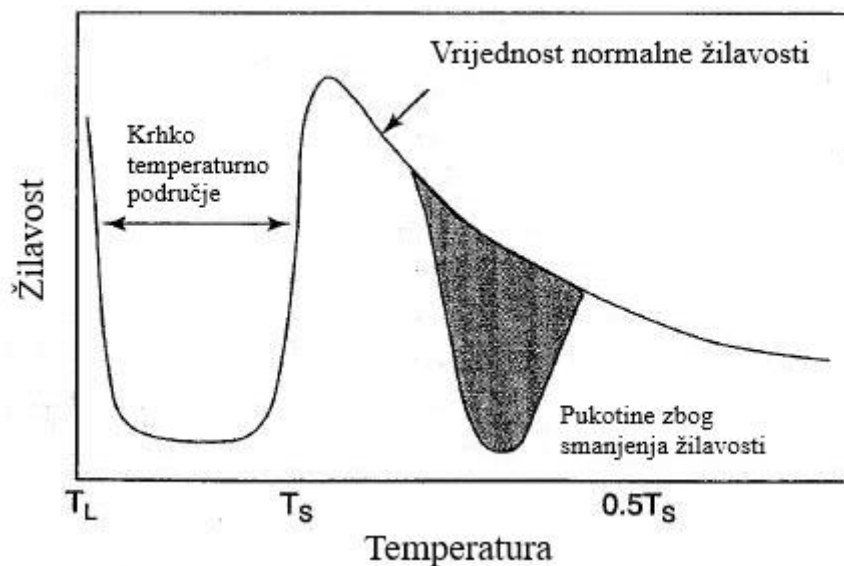
Pojava interkristalne noževe korozije može se spriječiti smanjivanjem ugljika ($C < 0,04\%$) uz istovremeno stabiliziranje više nego je stehiometrijski potrebno ($Ti = 8 * C$, $Nb = 15 * C$). Ako je dodatni materijal otporan na noževu koroziju, a osnovni materijal nije, može doći do noževe korozije u ZUT-u na osnovnom materijalu. [10]

4.3.5 Osjetljivost na prisutnost nečistoća

Sumporni spojevi ili sumporna atmosfera (u peći) pri visokim temperaturama u ZUT-u može uzorkovati stvaranje nikal sulfida Ni_3S_2 , eutektika koji uzrokuje tople pukotine. Ukoliko austenitni čelici primarno kristaliziraju u A ili AF području, čak i mala količina nečistoća može izazvati tople pukotine. Ukoliko se primarna kristalizacija odvija u FA području, otpornost na tople pukotine je velika, nezavisno o nečistoćama. [11], [13]

4.3.6 Pukotine zbog smanjenja žilavosti

Pukotine zbog smanjenja žilavosti (eng. Ductility-Dip Cracking) se pojavljuju u različitim legurama koje imaju austenitnu (FCC) mikrostrukturu, uključujući austenitne nehrđajuće čelike, legure bakra i nikla. U materijalima koji su skloni nastanku ovakvih pukotina, dolazi do naglog pada žilavosti pri temperaturnom intervalu između temperature solidusa (T_s) i 0,5 (T_s). Na slici 14 prikazana je promjena žilavosti ovisno o temperaturi. [11]



Slika 14. Promjena žilavosti ovisno o temperaturi [11]

Pukotine zbog smanjivanja žilavosti mogu se okarakterizirati kao gubitak žilavosti u temperaturnom intervalu ispod temperature solidusa koji je dovoljan za nastanak pukotina pod djelovanjem naprezanja nastalih tijekom zavarivanja. Ove vrste pukotina su ozbiljan problem kod višeprolaznog zavarivanja debljih radnih komada gdje su prisutna veća toplinska naprezanja zbog zavarivanja. [11]

Sprječavanje nastanka pukotina zbog smanjenja žilavosti kod austenitnih nehrđajućih čelika je omogućeno održavanjem određenog udjela ferita u mikrostrukturi. [11]

4.3.7 Uključci volframa kod TIG zavarivanja

Uključci volframa se mogu pojaviti u talini zavara ukoliko zavarivač ili operater koristi lošu tehniku rada. Većinom dolazi do otkidanja volframa pri prevelikom strujnom opterećenju elektrode. [10]

5. TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

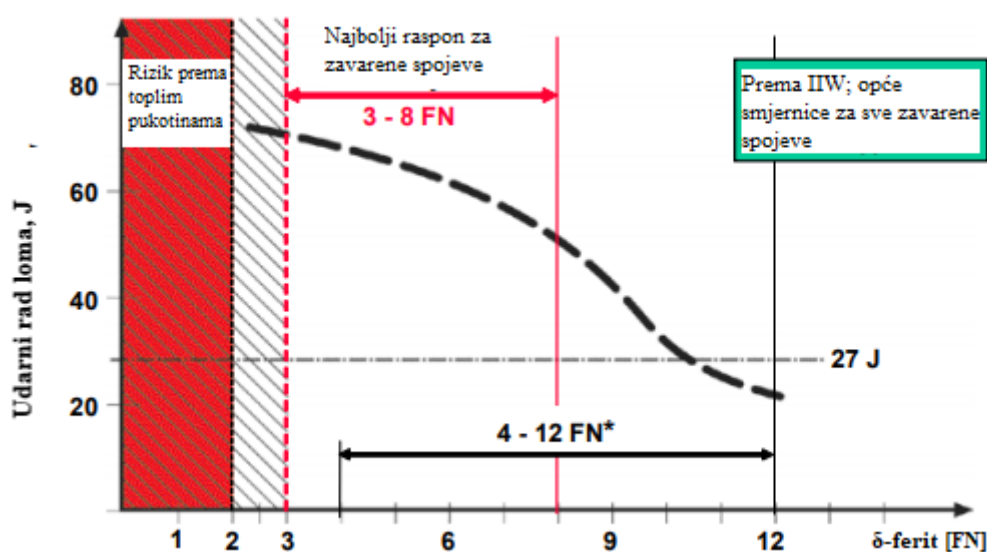
Osim omjera Cr_{ekv}/Ni_{ekv} , na formiranje mikrostrukture metala zavara veliki utjecaj ima i unos topline. Kako bi se izbjegla primarna kristalizacija u ferit i tako negativno utjecalo na iznos udarnog rada loma, austenitne nehrđajuće čelike potrebno je zavarivati sa što manjim unosom topline. Zavarivanje je moguće uz korištenje svih klasičnih postupaka. Austenitne nehrđajuće čelika najbolje je zavarivati MIG postupkom zavarivanja uz impulsni način prijenosa metala. Također, preporučuje se zavarivanje povlačenjem jer se njihanjem unosi veća količina topline u zavar.

5.1 Izbor dodatnog materijala

Kako bi se osigurala optimalna korozijska postojanost, mehanička svojstva i kemijski sastav zavarenog spoja, potrebno je odabrati takav dodatni materijal koji je približno jednak osnovnom materijalu. Tijekom samog postupka zavarivanja dolazi do određenog izgaranja i odvajanja legirnih elemenata tijekom hlađenja pa se u cilju sprječavanja gubitka legirnih elemenata odabire takav dodatni materijal koji sadrži nešto veći sadržaj legirnih elemenata u odnosu na osnovni materijal. Postoje i primjene kod kojih se koristi takav dodatni materijal koji ima manji udio određenih legirnih elemenata nego osnovni materijal (niži postotak molibdena za primjenu kod okolina koja sadrži dušičnu ili limunsku kiselinu). [16]

Kako bi se izbjegao pad žilavosti i duktilnosti kod austenitnih nehrđajućih čelika, potrebno je odabrati takav dodatni materijal koji će osigurati metal zavara s određenim udjelom delta-ferita. Najčešće se odabire dodatni materijal koji osigurava FN između 3 i 8. [17]

Na slici 15 prikazan je utjecaj delta-ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara. [17]



Slika 15. Utjecaj δ -ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara pri $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]

Iz slike 15 je uočljivo da sadržaj δ -ferita značajno utječe na udarni rad loma, osobito pri niskim temperaturama. Što je niži sadržaj δ -ferita, to je veća vrijednost udarnog rada loma. Međutim, iz slike je također uočljivo da postoji ograničenje s obzirom na minimalni iznos δ -ferita. Naime, kako bi se spriječio nastanak likvacijskih pukotina u metalu zavara, potrebno je postići metal zavara s minimalnim iznosom $\text{FN} \geq 2$. Prema tome, potrebno je pronaći optimalni iznos FN-a s obzirom na željenu vrijednost udarnog rada loma i pojavu toplih pukotina. [17]

Također, dodatni materijal će sadržavati veći udio kroma u odnosu na dodatni materijal kako bi se kompenzirao gubitak legirnih elemenata tijekom zavarivanja i tako poboljšala korozivna otpornost zavarenog spoja. [17]

U tablici 6 prikazani su preporučeni dodatni materijali proizvođača Avesta, pri kojima je izbor dodatnog materijala ovisan o austenitnom nehrđajućem čeliku koji se zavaruje i postupku koji se koristi. U tablici su navedeni trgovački nazivi dodatnih materijala proizvođača Avesta. [16]

Tablica 6. Preporučeni dodatni materijali za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika [16]

Oznaka nehrđajućeg čelika			Preporučeni dodatni materijali proizvođača Avesta			
EN (Br.)	EN (Ime)	ASTM	REL	MIG	TIG	EPP
1,4310	X10CrNi18.8	301	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4318	X2CrNi18-7	301LN	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4372	X12CrMnNiN17-7-5	201	307	307-Si	307-Si	-
1,4307	X2CrNi18-9	304L	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4301	X5CrNi18-10	304	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4311	X2CrNi18-10	304LN	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4541	X6CrNiTi18-10	321	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4305	X8CrNiS18-9	303	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4306	X2CrNi19-11	304L	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4303	X4CrNi18-12	305	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4567	X3CrNiCu18-9-4	S30430	308L/MVR	308L-Si/MVR-Si	308L-Si/MVR-Si	308L/MVR
1,4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4401	X5CrNiMo17-12-2	316	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4406	X2CrNiMoN17-12-2	316LN	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4432	X2CrNiMo17-12-3	316L	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4436	X3CrNiMo17-13-3	316	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4435	X2CrNiMo18-14-3	316L	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4429	X2CrNiMoN17-13-3	S31653	316L/SKR	316L-Si/SKR-Si	316L-Si/SKR-Si	316L/SKR
1,4438	X2CrNiMo18-15-4	317L	317L/SNR	317L/SNR	317L/SNR	317L/SNR
1,4439	X2CrNiMoN17-13-5	317LMN	SLR-NF	317L/SNR	317L/SNR	317L/SNR
1,4539	X1NiCrMoCu25-20-5	904L	904L	904L	904L	904L
1,4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	S31254	P12-R	P12	P12	P12
1,4565	-	S34565	P16	P16	P16	P16
1,4652	X1CrNiMoCuMnN24-22-7	S32654	P16	P16	P16	P16

5.2 Zaštitni plinovi

Kod nehrđajućih čelika zaštitni plin tijekom zavarivanja sprječava oksidaciju zavara i ZUT-a. Oksidacija može dovesti do smanjenja korozijske postojanost i mehaničkih svojstava. Uz oksidaciju, zaštitni plin sprječava i prodor ostalih elemenata (vodika i dušika) iz okolnog zraka koji mogu imati negativne učinke na sam zavareni spoj poput poroznosti, smanjenja žilavosti zavara i pukotina u metalu zavara. Zaštitni plin također služi za stabiliziranje električnog luka, može utjecati na dubinu penetracije, oblik zavarenog spoja, brzinu zavarivanja, količinu izgaranja legiranih elemenata. [16]

Jedan od načina zaštite prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika je korištenje inertnih zaštitnih plinova kao i njihovih mješavina. Inertni plinovi koji se koriste su najčešće argon i helij. Nehrđajući čelici zahtijevaju visoku čistoću plinova. [13]

Kod zavarivanja s primjenom argona kao zaštitnog plina, energija električnog luka se usmjerava na usko područje. Time se dobiva mala dubina penetracije i manje protaljšivanje, što je korisno kod zavarivanja tanjih materijala i kod zavarivanja u prisilnim položajima. Argon sadrži 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. Kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika potrebna je čistoća argona u iznosu od 99,997 %. [18]

Helij je također inertni plin i usporedno s argonom ima veći ionizacijski potencijal (24,5 eV) i toplinsku provodnost pa stoga i širi električni luk. Teže se uspostavlja električni luk nego kod korištenja argona, ali je stabilnost luka bolja. Helij utječe na povećanje energije električnog luka što mu omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju, ali nedostatak toga je povećani unos topline koji se mora uzeti u obzir kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika. [16], [18]

Izbor količine zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti metala koji se zavaruje, vrsti zaštitnog plina, obliku spoja i položaju zavarivanja. Prevelika količina zaštitnog plina uz neekonomičnost, djeluje štetno stvaranjem vrtložnog plina što uzrokuje smanjenu zaštitu taline te eventualni ulazak okolnog zraka u električni luk. Premalom količinom zaštitnog plina omogućuje se ulazak okolnog zraka u električni luk. [13]

Kod nehrđajućih čelika je potrebno štititi i drugu stranu zavara kod korijenskog prolaza kako bi se dobila maksimalna korozivna postojanost. Većinom se koristi isti plin kao i za zaštitu lica zavara, ali se može koristiti i smjesa mješavine plinova. [13]

Kod impulsnog MIG zavarivanja, sa stajališta prijenosa metala kroz električni luk, najbolje je koristiti čisti argon kao zaštitni plin. Međutim, radi postizanja pravilnijeg izgleda zavara, veće penetracije, manje visine zavara i postizanja veće brzine zavarivanja koriste se mješavine plinova. [15]

5.3 Predgrijavanje, držanje međuprolazne temperature i naknadna toplinska obrada austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitne nehrđajuće čelike nije potrebno predgrijavati niti držati međuprolaznu temperaturu. Naime, predgrijavanjem se smanjuje brzina ohlađivanja, ali to ima neznatan utjecaj na feritno–austenitnu transformaciju jer se ona odvija pri vrlo visokim temperaturama. Kod zavarivanja debljih komada preporučeno je, ali ne i prijeko potrebno primijeniti predgrijavanje u iznosu od 100 – 150 °C, a međuprolaznu temperaturu potrebno je držati do najviše 150 °C. Kako kod austenitnih čelika postoji opasnost od izlučivanja karbida po granicama zrna, međuprolazna temperatura treba biti kontrolirana te držana ispod temperature početka izlučivanja kromovih karbida. [11]

Naknadna toplinska obrada se provodi kod konstrukcija debljih stjenki kako bi se smanjila zaostala naprezanja i postigla dimenzijska postojanost, a provodi se u temperaturnom rasponu

od 550 – 650 °C. Također, naknadna toplinska obrada za smanjenje zaostalih naprezanja potrebna je ukoliko će biti potencijala za stvaranje napetosne korozije u eksploataciji. Ako se toplinska obrada provodi u temperaturnom intervalu od 650 – 900 °C, potrebno ju je provesti s posebnom pažnjom jer postoji opasnost od izlučivanja kromovih karbida i sigma faza. [11]

Toplinska obrada u temperaturnom intervalu od 950 – 1100 °C će u potpunosti ukloniti zaostala naprezanja bez formiranja karbida ili sigma-faza. Zagrijavanje iznad 950 °C uz brzo hlađenje će ukloniti sve karbide iz mikrostrukture zavara. Zagrijavanje do 1100 °C će otopiti ferit koji se nalazi u mikrostrukтури OM i metalu zavara ovisno o držanju na toj temperaturi. Ukoliko se koristi toliko jako zagrijavanje na tu temperaturu, potrebno je brzo hlađenje kako bi se onemogućilo stvaranje karbida. [11]

5.4 Priprema spoja za zavarivanje

Talina nehrđajućih čelika je manje fluidna od običnih ugljičnih čelika zbog čega je i slabija penetracija u osnovni materijal za iste parametre zavarivanja. Kako bi se to kompenziralo, spojevi nehrđajućih čelika izvode se tako da imaju veći kut otvora spoja, uže lice zavara i širi razmak u grlu nego kod ugljičnih čelika. Takvom pripremom izbjegava se propaljivanje i potpuno protaljivanje spoja. [13]

Odabir adekvatne pripreme spoja temelji se na debljini materijala koji se zavaruje. Sam žlijeb mora biti ravan, čist i odmašćen kako bi se poravnao spoj, pravilno održavao električni luk i lakše održavao konstantni iznos penetracije. Vrlo je bitno otkloniti nastale okside prilikom laserskog i plazma rezanja pomoću brušenja i poliranja primjenjujući prikladne alate za obradu nehrđajućih čelika. [13]

5.5 Postupci zavarivanja

Tehnologija zavarivanja Cr-Ni nehrđajućih čelika obuhvaća niz različitih postupaka zavarivanja. Najčešći postupci zavarivanja koji se koriste su [13]:

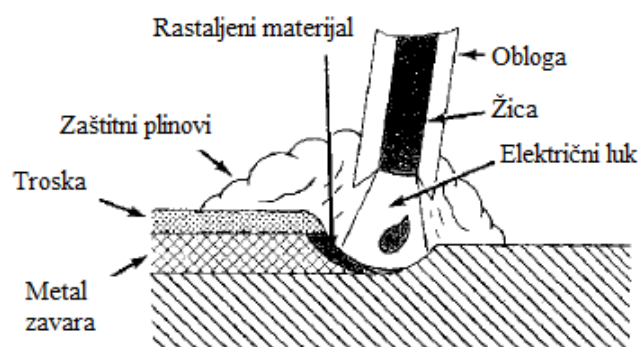
- Ručno elektrolučno zavarivanje (REL),
- Zavarivanje pod zaštitom inertnog plina (MIG),
- Zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (TIG),
- Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP).

Uz navedene postupke, moguće je zavarivati i ostalim postupcima zavarivanja kao što su: zavarivanje praškom punjenom žicom, plazma zavarivanje, zavarivanje elektronskim snopom i zavarivanje laserom. [19]

RUČNO ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

Ručno elektrolučno zavarivanje (REL) je najstariji elektrolučni postupak zavarivanja. Kod REL zavarivanja električni luk se uspostavlja kratkim spojem između obložene elektrode (dodatni materijal) i radnog komada. Taljenjem jezgre i obloge elektrode stvara se odgovarajuća količina rastaljenog materijala, troske i plinova. Tekuća troska prekriva metalnu kap za vrijeme prolaza kapi kroz električni luk, a dodatnu zaštitu metalne kapi tvore plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge. Obloga se tali od unutarnje strane prema vanjskoj, tako da se na vrhu elektrode stvara krater koji usmjerava struju plinova i kapi rastaljenog metala i troske prema rastaljenom osnovnom materijalu. Hlađenjem se tekući materijal skrućuje, a sloj troske koji ga prekriva regulira njegovu brzinu hlađenja te samim time utječe na tijek i uvjete kristalizacije. Poprečnim gibanjem elektrode (okomito na smjer gibanja) utječe se na oblik zavarenog spoja i na količinu unesene topline u osnovni materijal. Nakon svakog prolaza potrebno je ukloniti nastali sloj troske. [20]

Na slici 16 prikazan je shematski prikaz REL zavarivanja. [21]



Slika 16. Shematski prikaz REL zavarivanja [21]

Osnovni parametri kod REL zavarivanja su [20]:

- **JAKOST STRUJE ZAVARIVANJA (I)**, ovisi o promjeru i tipu elektrode, vrsti spoja, debljini osnovnog materijala te o položaju zavarivanja. Orijehtacijska vrijednost struje zavarivanja iznosi od 30 do 40 [A] \times d [mm] (promjer elektrode), odnosno 10 – 20 % manje vrijednosti struje kod prisilnih položaja.
- **NAPON ZAVARIVANJA (U)**, tijekom zavarivanja iznosi oko 18 – 26 V, a napon praznog hoda je najčešće 60 V.
- **POLARITET I VRSTA STRUJE**. Za bazične elektrode se preporučuje istosmjerni izvor struje s elektrodom na + polu, dok ostale elektrode mogu koristiti i izmjenične izvore struje za zavarivanje.

- BRZINA ZAVARIVANJA (v_{zav}), odabire se prema dopuštenoj količini topline koja se unosi u osnovni materijal te ovisi o tehnici rada, vrsti i dimenzijama spoja, vrsti osnovnog i dodatnog materijala i jakosti struje zavarivanja.
- NAGIB ELEKTRODE I DUŽINA ELEKTRIČNOG LUKA utječu na penetraciju u osnovni materijal. Većim nagibom elektrode postiže se duži električni luk (mala penetracija, veliko štrcanje), dok kraći električni luk ima veću snagu, a time i veću penetraciju. Propisana dužina električnog luka kod kiselih i rutilnih elektroda je najčešće jednaka promjeru elektrode, a kod bazičnih iznosi polovica promjera elektrode.
- POPREČNA GIBANJA ELEKTRODE, gibanja okomita na smjer zavarivanja, utječu na oblik zavarenog spoja i unos topline u osnovni materijal. Odabir načina kretanja elektrode ovisi o radnim uvjetima i zahtjevima zavarenog spoja.

Kod zavarivanja Cr-Ni nehrđajućih čelika REL postupkom, bitan je odgovarajući izbor obložene elektrode. Odabir elektrode provodi se na temelju osnovnog materijala i zahtjevima na zavareni spoj. Sama obloga može sadržavati određene legirne elemente koji mogu utjecati na svojstva samog zavara. Skladištenje obloženih elektroda je veoma bitno jer može doći do upijanja vlage, koja u zoni staljivanja može uzrokovati poroznost, čime se zavar oslabljuje pa na tim mjestima može doći do korozije. Iz tog razloga, obložene elektrode moraju se skladištiti na suhim i toplim mjestima ili ih sušiti u pećima (250 – 280 °C) za uklanjanje upijene vlage. [11], [20]

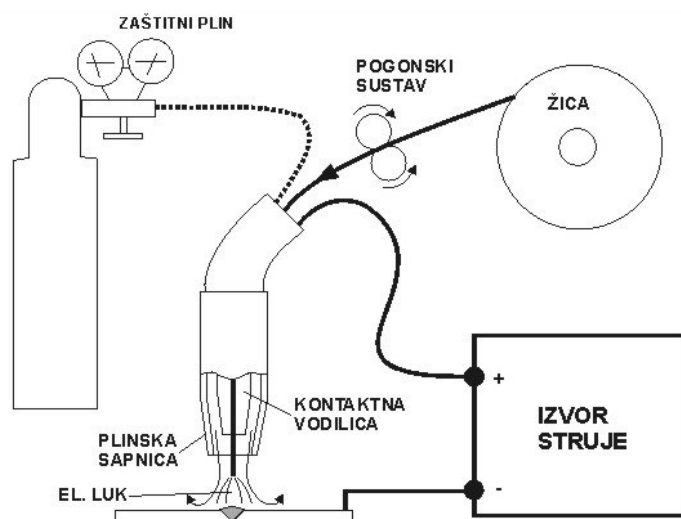
Najčešće korištene obloge elektroda za zavarivanje Cr-Ni nehrđajućih čelika su [21]:

- Rutilna (titania) elektroda. Koristi se uz istosmjernu (DC) ili izmjeničnu (AC) struju, ali preporuka je da se koristi istosmjerna struja kad je to moguće. Najčešće se koristi za zavarivanje u horizontalnom položaju, ali je moguće koristiti ju za vertikalnu prema gore i nadglavnu poziciju kada nije moguće upotrijebiti bazičnu elektrodu.
- Bazična (vapno) elektroda. Koristi se uz istosmjernu (DC) struju. Preporuča se za zavarivanje kod vertikalnih i nadglavnih pozicija, cijevi, korijenskih prolaza kod debljih stijenki te za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika tipa 330 i 320.

ZAVARIVANJE POD ZAŠTITOM INERTNOG PLINA (MIG)

MIG je postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja i održava između kontinuirane, taljive elektrode u obliku žice i radnog komada. Elektroda se u pravilu spaja na pozitivan pol istosmjernog izvora struje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova (Ar ili He) i njihovim mješavinama. [22]

Na slici 17 prikazan je osnovni MIG sustav. [6]



Slika 17. Prikaz MIG postupka zavarivanja [6]

Bitni parametri kod MIG zavarivanja su [23]:

- JAKOST STRUJE I (A) – razmjerna s brzinom dobave žice v_z (m/min),
- NAPON ELEKTRIČNOG LUKA U (V) – razmjeran s visinom električnog luka,
- SLOBODNI KRAJ ŽICE,
- BRZINA ZAVARIVANJA v_{zav} (cm/min),
- VRSTA ZAŠTITNOG PLINA I PROTOK PLINA Q (l/min),
- PROMJER ŽICE d_z (mm),
- NAGIB PIŠTOLJA α (°),
- INDUKTIVITET L (H).

Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju. S obzirom na prijenos materijala kroz električni luk, preporučeno je korištenje argona kao zaštitnog plina. Međutim, radi osiguranja pravilnijeg izgleda zavara, manje visine zavara, bolje penetracije, kao i postizanje veće brzine zavarivanja, koriste se mješavine. Uobičajeno se koriste

mješavine Ar + (1-3) % O₂, Ar + (2-5) % CO₂, dok za zaštitu korijena od oksidacije se uobičajeno koristi čisti Ar. [6], [22]

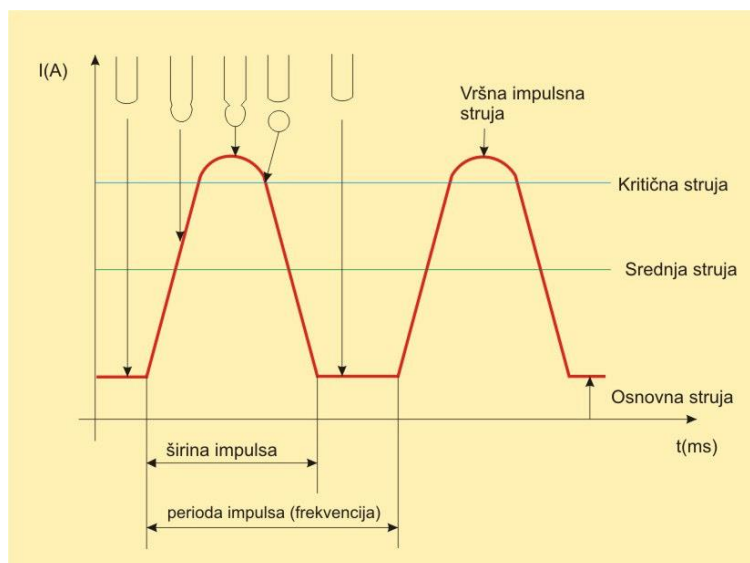
Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno elektroda i dodatni materijal te se njezinim taljenjem popunjava priprema. [22]

Jedna od važnih specifičnosti MIG postupka zavarivanja je mogućnost odabira načina prijenosa metala kroz električni luk. Za zavarivanje nehrđajućih čelika MIG postupkom koriste se sljedeći načini prijenosa metala: štrcajući luk, kratki spojevi i impulsni prijenos metala. Veliko unošenje toplinske energije kod nehrđajućih čelika stvara probleme, te se iz tog razloga uzima, kao optimalni postupak MIG zavarivanje kratkim spojevima, kod kojeg se zavaruje malim strujama (50 A – 170 A) i naponima (13 V – 17 V). Ipak, baš zbog kratkih spojeva dolazi do neminovnog rasprskavanja dodatnog materijala po osnovnom materijalu i lošije korozijske postojanosti te povećane naknadne troškove obrade. [6]

Mirniji prijenos materijala osigurava korištenje štrcajućeg luka, kod kojeg praktični nema rasprskavanja. Kod štrcajućeg luka koriste se visoki iznosi struje (200 A – 600 A) i napona (24 V – 40 V) što ujedno znači i visok unos topline koji nije pogodan za nehrđajuće čelike, ali je primjenjiv eventualno kod zavarivanja debljih materijala. [6]

Kao najpogodniji prijenos metala proizlazi korištenje impulsnog luka. Kod zavarivanja impulsnim lukom, izvor struje za zavarivanje generira promjenjiv oblik struje koji omogućava otkidanje jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom). 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 kapljica ne dolazi do kratkih spojeva. Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature metalne kapi, pa se može upravljati smjerom prijenosa metala. [6], [23]

Na slici 18 prikazana je dinamička karakteristika – strujni signal impulsnog prijenosa metala. [6]



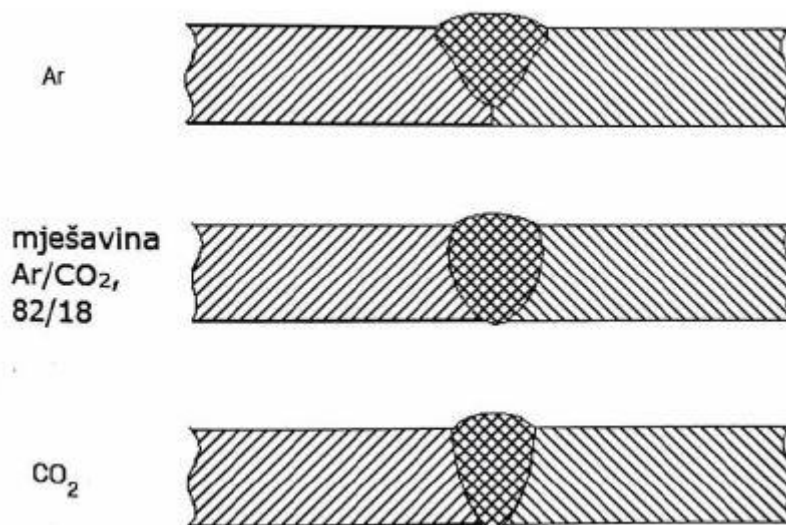
Slika 18. Dinamička karakteristika – strujni signal impulsnog prijenosa metala [6]

Glavne prednosti kod MIG impulsnog zavarivanja nehrđajućih čelika su: jednoličan zavar, precizno odvajanje kapljice, smanjeno prskanje, stabilan luk, mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijala, bolja penetracija u materijal (u području štrcajućeg luka), primjenjivost u svim položajima zavarivanja. [23]

Kod MIG postupka zavarivanja najčešće se koristi argon kao zaštitni plin. Za stabiliziranje električnog luka koriste se mali dodaci 1 – 2 % kisika ili 2 – 3 % ugljičnog dioksida. Veća količina ovih dodataka izazvala bi oksidaciju zavarenog spoja. [16]

Zaštitni plinovi koji se koriste kod MIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika su [16]:

- Ar + (1–2) % O₂ ili Ar + 2 – 3 % CO₂,
- Ar + 30 % He + (1-3) % CO₂,
- Ar + 30 % He ili Ar + 30 % He + (1-3) % CO₂,
- Ar + 30 % He + (1-2) % N₂
- Ar ili Ar + (1-2) % H₂ za zaštitu korijena.



Slika 19. Utjecaj zaštitnog plina na profil zavarenog spoja [22]

Praktične smjernice kod korištenja zaštitnog plina kod MIG zavarivanja [16]:

- Protok zaštitnog plina kod ručnog MIG zavarivanja iznosi 12-16 l/min,
- Protok zaštitnog plina kod automatiziranog MIG zavarivanja iznosi i do 20 l/min,
- Korištenjem većih promjera sapnica, protok zaštitnog plina treba biti viši,
- Moguća pojava poroznosti prilikom prevelikog ili premalog protoka zaštitnog plina.

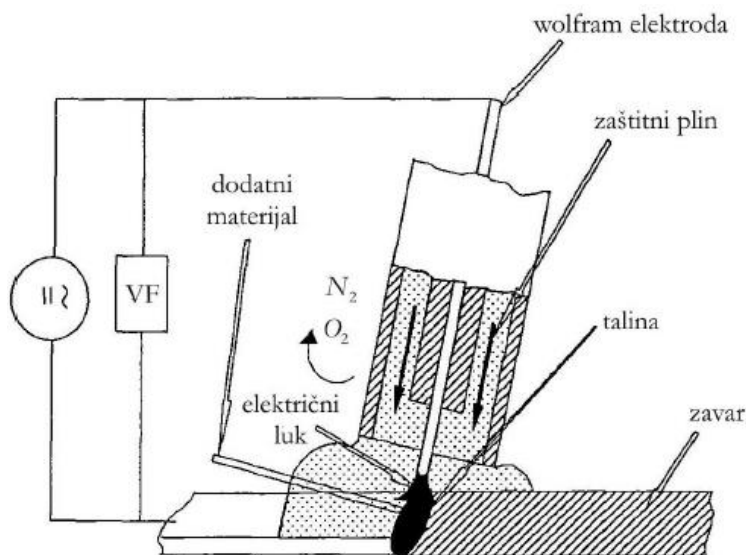
Kod MIG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm, a mogu se koristiti i praškom punjene žice. Praškom punjene žice dolaze s različitim presjecima, ovisno o načinu proizvodnje. Mogu se koristiti uz plinsku zaštitu ali postoje i žice koje same stvaraju zaštitnu plinsku atmosferu raspadanjem jezgre pa nije potrebna dodatna zaštita plinom. Praškom punjene žice većinom se koriste za zavarivanje debljih stijenki od Cr-Ni čelika. [22]

ZAVARIVANJE NETALJIVOM ELEKTRODOM POD ZAŠTITOM INERTNOG PLINA (TIG)

TIG zavarivanje je elektrolučni postupak kod kojeg se električni luk uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora (VF generatora) koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje. Nakon uspostavljanja električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje, VF generator se isključuje, a proces zavarivanja se odvija sa ili bez dodavanja dodatnog materijala (žice) u električni luk. Nakon toga slijedi taljenje rubova žlijeba za zavarivanje (kod materijala tanjih debljina – I spoj), odnosno ravnomjerno ručno dodavanje žice za

zavarivanje u električni luk te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja (kod većih debljina materijala ili kod provarivanja korijena debljih materijala). Zavarivanje nehrđajućih čelika provodi se istosmjernom strujom (DC) s elektrodom na minus (-) polu. [24]

Na slici 20 prikazan je TIG postupak zavarivanja. [24]



Slika 20. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [24]

Mjesto zavarivanja (rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal, zagrijani vrh elektrode) štiti se od štetnog djelovanja okolne atmosfere inertnim plinovima. Volframova elektroda kod ovog postupka služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode se izrađuju od čistog volframa ili volframa legiranog s malim dodacima (1-2 %) torijevog ili cirkonijevog oksida ili nekih drugih elemenata. Tim dodacima olakšava se uspostava luka, stabiliziranje luka, osobito pri malim strujama, smanjuje se erozija vrha elektrode te povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. Vrh elektrode se oblikuje u stožac s vrhom širine 20° za zavarivanje tanjih materijala, a 65° ili blago zaobljen vrh za zavarivanje debljih materijala. [16], [24]

PARAMETRI KOD TIG ZAVARIVANJA SU [25]:

- JAKOST STRUJE,
- NAPON ZAVARIVANJA,
- POLARITET ELEKTRODE,
- PROMJER ELEKTRODE,
- PROTOK I VRSTA ZAŠTITNOG PLINA,
- BRZINA ZAVARIVANJA,

- POLOŽAJ PIŠTOLJA I DODATNOG MATERIJALA.

Kao zaštitni plin koriste se argon te ponekad mješavine argona i helija. Dovod zaštitnog plina do mjesta zavarivanja provodi se preko keramičke sapnice koja omogućuje pravilnu zaštitu zavara, sprječava turbulencije zaštitnog plina i onemogućava okolnom zraku doticaj s mjestom zavarivanja. Prilikom TIG postupka zavarivanja elektroda mora biti spojena na minus pol istosmjernog izvora. Zaštitni plin treba nakon gašenja električnog luka naknadno istjecati 1 sekundu za svakih 10 A jakosti struje kojom je provedeno zavarivanje. [16]

Zaštitni plin kod TIG zavarivanja je najčešće čisti argon (minimalno 99,99 %). Mogući su dodaci helija do 30 % ili dušika do 2 % kako bi se povećala energija električnog luka, penetracija te brzina zavarivanja. Dodatak dušika omogućuje bolju korozivsku otpornost ali i veće trošenje elektrode. [16]

Zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika su [16]:

- Ar ili Ar + 30 % He ili Ar + 2 % H₂,
- Ar + 2 % N₂ ili Ar + 30 % He + 2 % N₂,
- Ar ili Ar + 2 % H₂ za zaštitu korijena.

Praktične smjernice kod korištenja zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [16]:

- Protok zaštitnog plina kod ručnog TIG zavarivanja iznosi 4-8 l/min,
- Protok zaštitnog plina kod automatiziranog TIG zavarivanja iznosi i do 15 l/min,
- Korištenjem većih promjera sapnica, protok zaštitnog plina treba biti viši,
- Moguća pojava poroznosti prilikom prevelikog ili premalog protoka zaštitnog plina.

Najvažnije funkcije zaštitnog plina tijekom zavarivanja su [18]:

- Povećanje stabilnosti električnog luka,
- Zaštita rastaljenog metala od okolnih plinova (kisika, dušika),
- Podržavanje plazme električnog luka,
- Utjecaj na geometrijski oblik i dubinu penetracije zavara,
- Estetski izgled samog zavara,
- Kontroliranje razine para koje nastaju tijekom zavarivanja.

TIG postupak zavarivanja je spor (rastaljena količina dodatnog materijala je od 0,3 – 0,8 kg/h) i najčešće se koristi za provar korijena zavara. Za ovaj postupak zavarivanja je specifično da nema rasprskivanja kapljica metala i nije potrebno čišćenje troske. Pravilnim izvođenjem

zavarenih spojeva, TIG postupkom se dobivaju najkvalitetniji zavareni spojevi. Zahtijeva izuzetne vještine zavarivača. Moguće je zavarivanje u svim položajima. [16]

U tablici 7 prikazani su TIG parametri ovisno o promjeru netaljive elektrode. [13]

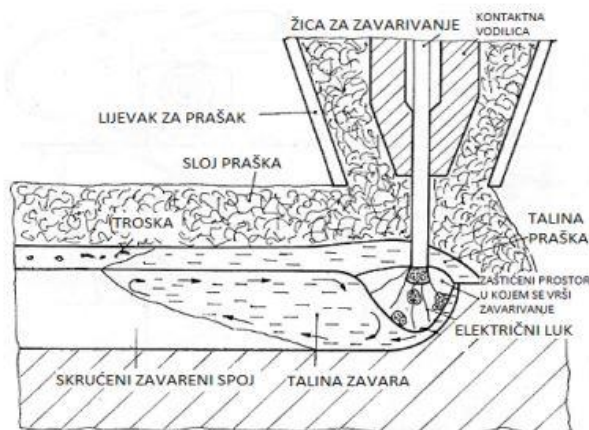
Tablica 7. Parametri TIG zavarivanja nehrđajućih čelika [13]

Promjer volframove elektrode [mm]	Iznos struje [A]	Napon [V]	Debljina stijenke koja se zavaruje [mm]
1,6	50 – 120	10 – 12	< 1
2,4	100 – 230	16 – 18	1,0 – 3,0
3,2	100 – 200	15 - 18	> 2

ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM (EPP)

Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (EPP) je postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja i održava između taljive elektrode koja je u obliku žice (puna ili praškom punjena) ili trake i radnog komada, ispod sloja zaštitnog praška. U električnom luku dolazi do pretvorbe električne energije u toplinsku koja tali osnovni materijal, dodatni materijal i prašak. Sam postupak je mehaniziran, tj. mehanizirano je dodavanje dodatnog materijala i kretanje električnog luka uz korištenje određene brzine po spoju kojeg se zavaruje ili po površini radnog komada na koju se navaruje. Talina osnovnog, dodatnog materijala i zaštitnog praška spaja se u jednu cjelinu koja se skrućuje i čini zavareni spoj. Sam proces taljenja odvija se pod zaštitnim prostorom (troskom) koji je nastao taljenjem zaštitnog praška, štiteći tako zonu taljenja od štetnih plinova iz okolne atmosfere. Zavarivanje se izvodi u horizontalnom položaju. [24]

Na slici 21 shematski je prikazan proces taljenja kod EPP zavarivanja. [26]



Slika 21. Shematski prikaz procesa taljenja kod EPP zavarivanja [26]

Glavni parametri kod EPP postupka zavarivanja su [24]:

- **NAPON ZAVARIVANJA U (V)**, koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće oko 26 – 40 V,
- **JAKOST STRUJE ZAVARIVANJA I (A)**, koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru elektrode (od 100 A do 1000 A). Zbog manje duljine slobodnog kraja žice moguće je iste promjere žice za zavarivanje opteretiti puno većim strujama nego kod REL postupka,
- **BRZINA ZAVARIVANJA (v_{zav})**, značajno je veća u odnosu na REL postupak (orijentacijske vrijednosti iznose od 20 do 60 cm/min)

Napon praznog hoda je 100 V (veći nego kod REL postupka iz razloga što se kod EPP postupka teže uspostavlja električni luk). [24]

Najveća prednost EPP postupka zavarivanja je veliki depozit dodatnog materijala, što je omogućeno velikim unosom topline i kod zavarivanja nehrđajućih čelika može dovesti do problema. Priprema spoja za zavarivanje EPP postupkom trebala bi sadržavati omjer širine i dužine u vrijednostima 1,5 do 2. Bilo kakav rizik od pojave toplih pukotina može se izbjeći tako da se korijenski prolazi izvedu nekim drugim postupcima kao npr. TIG. [16]

Tijekom samog postupka zavarivanja dolazi do izgaranja određenog udjela kroma pa se u zaštitni prašak dodaje određena količina kroma. Zaštitni prašci koji se koriste kod EPP postupka dijele se prema indeksu bazičnosti (eng. basicity index, B.I.) na kiseli (B.I. < 0,9), neutralni (B.I. 0,9 – 1,2) i bazični (B.I. > 1,2 – 3,0) prašci. Što je veći B.I. to su bolja mehanička svojstva, ponajviše žilavost, manji je sadržaj oksida i ostalih uključaka u metalu zavara. [16]

5.6 Ostali postupci zavarivanja

U usporedbi s elektrolučnim postupcima zavarivanja, glavne značajke postupaka s visokom gustoćom energije su [15]:

- u većini slučajeva nije potreban dodatni materijal,
- veće brzine zavarivanja uz brže skrućivanje i hlađenje,
- uska zona taljenja i zona utjecaja topline,
- smanjeno deformiranje osnovnog materijala.

Postupci koji spadaju u ovu grupu su kontinuirano i impulsno YAG lasersko zavarivanje, CO₂ lasersko zavarivanje, kontinuirano zavarivanje elektronskim snopom i lasersko zavarivanje fiber laserom i disk laserom. Impulsnim načinom zavarivanja dobivaju se manji toplinski ciklusi nego kod kontinuiranog načina. [15]

Za visokoučinsko zavarivanje debelostijenih Cr-Ni čelika koristi se još i TIG zavarivanje u uskom žlijebu, TIG zavarivanje vrućom žicom, TIG zavarivanje dodavanjem dvije žice, hibridno zavarivanje (MIG ili TIG uz lasersko zavarivanje). [27]

Zavarivanje debelostijenih (> 30mm) Cr-Ni čelika TIG postupkom izvodi se u više prolaza (60 mm \approx 30 prolaza) čiji je rezultat visok unos topline te izobličenje i deformiranje radnih komada. Također, zavarivanje debljih radnih komada TIG postupkom rezultira niskom proizvodnošću, tj. potrebno je dugo vrijeme zavarivanja zbog niskog depozita dodatnog materijala (\approx 10 g/min). [27], [28]

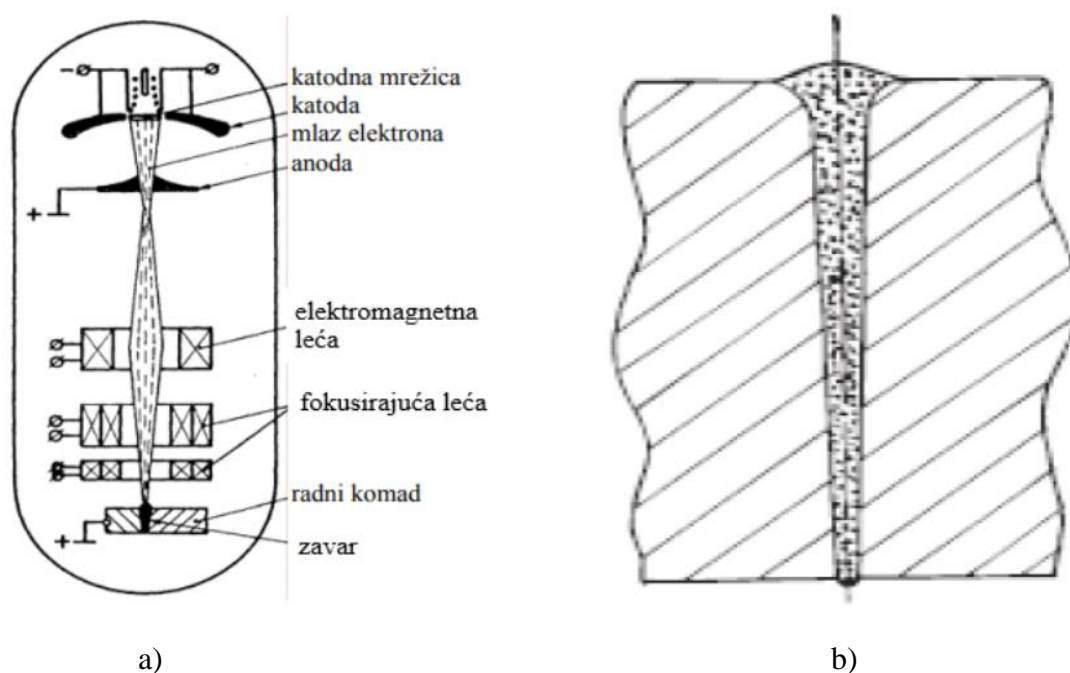
ZAVARIVANJE SNOPIKOM ELEKTRONA

Elektronski snop se dobiva pomoću elektronskog izvora, koji se sastoji od volframove katode, rešetke i anode. Elektroni se emitiraju s katode, ubrzavaju i formiraju snop pomoću električnog polja, najčešće u vakuumskom okruženju. Snop se sužava i usmjerava na osnovni metal, prolazeći kroz polja koja usmjeravaju elektromagnetne zavojnice. Snop elektrona velikom brzinom nastrojava na osnovni materijal, pri čemu se kinetička energija elektrona pretvara u toplinsku energiju i nastaje zavareni spoj. Zavarivanje elektronskim snopom postižu se veće dubine provarivanja, zavar s uskim ZUT-om, visoka produktivnost, visoka kvaliteta zavara s minimalnim deformacijama. [29]

Zavarivanje se provodi u vakuumu da bi se zaštitile komponente za stvaranje elektronskog snopa od oksidacije i kratkog spoja uslijed isparavanja. Također, zavarivanjem u vakuumu eliminiraju se ostali plinovi koji se nalaze u atmosferi, a imaju loš utjecaj na sam postupak zavarivanja. Omjer visine zavara naprema širini zavara može iznositi i do 20/1. Dubina penetriranja se smanjuje s promjenom položaja zavarivanja od vertikalnog prema naglavnom

položaju zbog utjecaja gravitacije. Da bi se povećala dubina penetriranja i spriječilo propadanje metala zavara koristi se uska priprema žlijeba. Osciliranjem snopa elektrona (amplitude ≤ 1 mm na 100 – 1000 Hz) dobiva se širi zavar i kapljičasti oblik zavara na vrhu sa svrhom sprječavanja pucanja na tom mjestu i zareznog djelovanja. Nedostatak zavarivanja elektronskim snopom je visoka cijena opreme, potrebna precizna priprema spojeva i pribora te prostorno ograničenje radnog komada u vakuumsnoj komori. [19], [29]

Na slici 22 a) prikazana je shema uređaja za zavarivanje snopom elektrona, a na slici 22 b) prikazan je izgled poprečnog zavara dobivenog zavarivanjem snopom elektrona. [29]



Slika 22. Uređaj za zavarivanje elektronskim snopom i poprečni presjek zavara [29]

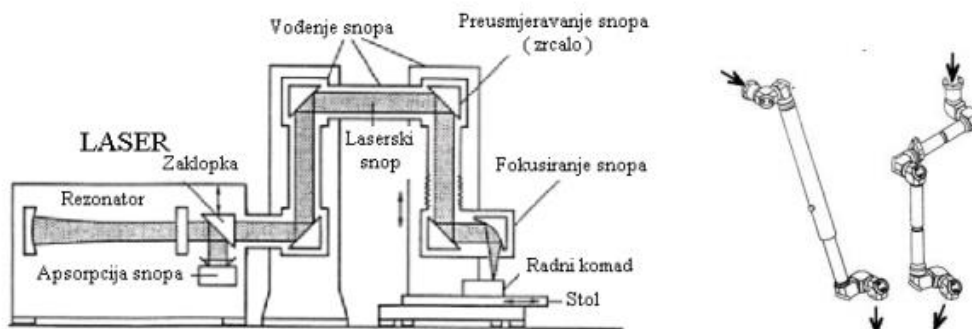
ZAVARIVANJE LASEROM

Lasersko zavarivanje je postupak zavarivanja s visokom gustoćom energije ($10^5 - 10^8$ W/cm²) u odnosu na druge konvencionalne postupke. LASER je akronim od eng. riječi Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, što u prijevodu znači princip pojačanja svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Glavne prednosti laserskog zavarivanja su mali unos topline, uska zona utjecaja topline, male deformacije, velika brzina zavarivanja, visoka kvaliteta spoja, visoka fleksibilnost. [30]

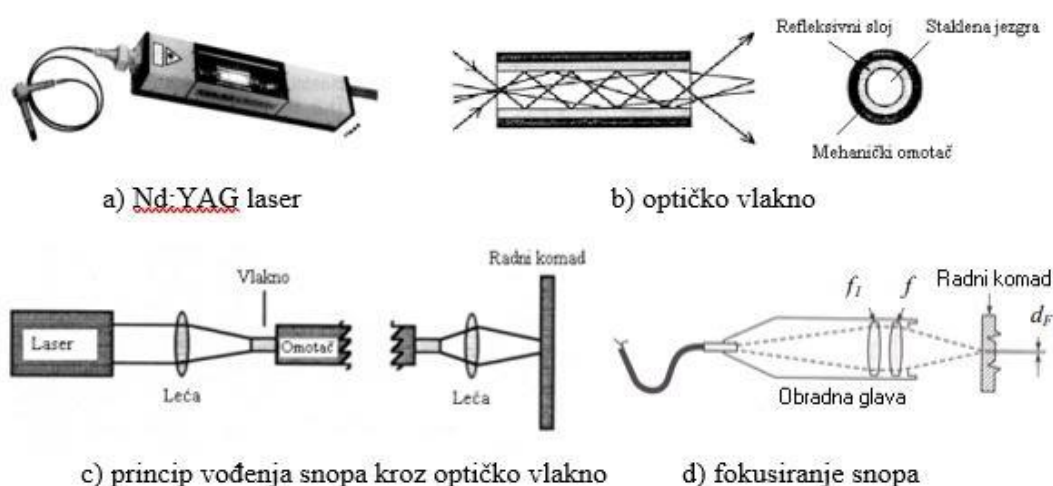
Laseri za zavarivanje razlikuju se po vrsti aktivnog medija te time i po samoj valnoj duljini što ovisi o njihovoj primjeni u industriji. Za zavarivanje se upotrebljava CO₂ i Nd:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog materijala. Značajka svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti (λ), koja je funkcija razlike energetske stanja atoma/molekula aktivnog

medija. CO₂ – plinski laser je mješavina plinova N₂, He, CO₂ koji emitira infracrvenu svjetlost valne duljine $\lambda = 10600$ nm i snage do 45 kW. Nd-YAG laser ima kruti aktivni medij koji je prema sastavu kristal granat u ovom slučaju „Itrij-Aluminij-Granat“ kod kojeg je približno 1 % atoma itrija zamijenjeno atomima neodimija Nd. Nd-YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine $\lambda = 1064$ nm i snage do 10 kW. [30]

Laserski snop koji je nastao u laseru (rezonatoru) može se voditi do radnog komada na dva načina: sustavom zrcala i leća (CO₂) ili optičkim vlaknima (Nd:YAG). Laserski snop kod CO₂ lasera mora se voditi sustavom zrcala jer je staklena jezgra optičkog kabela nepropusna za svjetlost njegove valne duljine (slika 23). Laserski snop iz Nd:YAG lasera provodi se kroz fleksibilni optički kabel sa staklenom jezgrom promjera 0,4 do 1 mm. Na kraju optičkog kabela dužine i do 200 m nalazi se obradna glava u kojem je smještena optika za fokusiranje snopa na površinu radnog komada (slika 24). [30]



Slika 23. Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala – CO₂ laser [30]

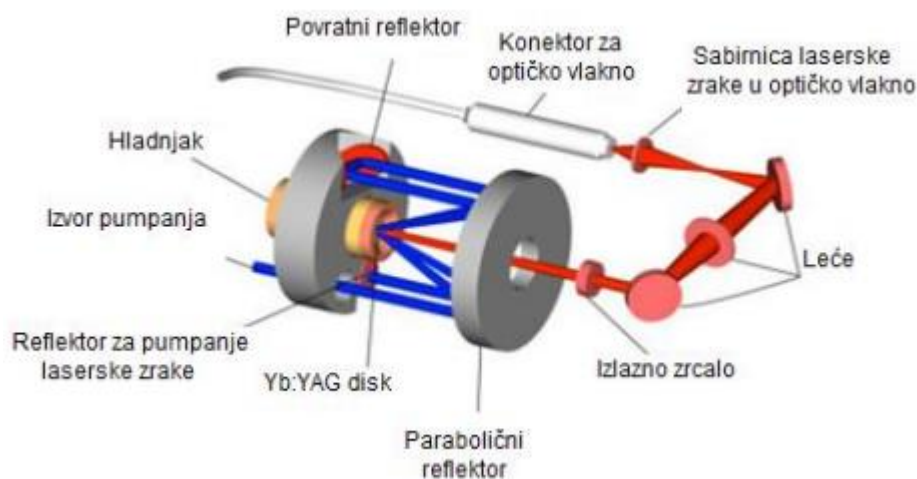


Slika 24. Vođenje laserskog snopa optičkim vlaknom – Nd:YAG laser [30]

f – žarišna duljina leće, f_1 – žarišna duljina kolimatora, d_F – promjer žarišne točke

Uz CO₂ i Nd:YAG lasere postoje još fiber laseri, diodni laseri i disk laseri (Yb:YAG). Kod zavarivanja debelostijenih Cr-Ni čelika provedena su istraživanja zavarivanja primjenom disk lasera i fiber lasera. [28], [31]

Disk laseri su kruti laseri valne duljine 1,03 μm, a aktivni medij sastoji se od tankog Yb:YAG diska (slika 25). Dopirani su atomima aktivnog medija iterbija. Yb:YAG laseri sadrže i do 30 % aktivnog medija. Disk laseri razvili su se zbog toga što su Nd:YAG laseri imali nizak stupanj efikasnosti, dolazilo je do zagrijavanja medija koje je bilo potrebno hladiti. Hlađenje se odvija s vanjske strane medija i dolazi do nastajanja parabolne temperaturne krivulje, paralelne s laserskom zrakom, što dovodi do odstupanja laserske zrake i smanjenje njene kvalitete. Umjesto štapnog medija čija je površina mala u odnosu na volumen, tanki kristalni disk koristi se kao aktivni medij. Promjer diska je nekoliko milimetara ovisno o izlaznoj energiji i debljine od 100 do 200 μm. Disk je prevučen reflektirajućom površinom i povezan sa sustavom za hlađenje te se ponaša kao rezonator u krutim laserima. Vrlo mala debljina diska (velika površina u odnosu na mali volumen) u dodiru je s hladnjakom i s obzirom na to da je promjer izvora laserske zrake korišten za pumpanje kristala puno veći nego debljina diska, postiže se aksijalno hlađenje. Aksijalnim hlađenjem smanjuje se raspršivanje i stvara se kvalitetna laserska zraka. [32]

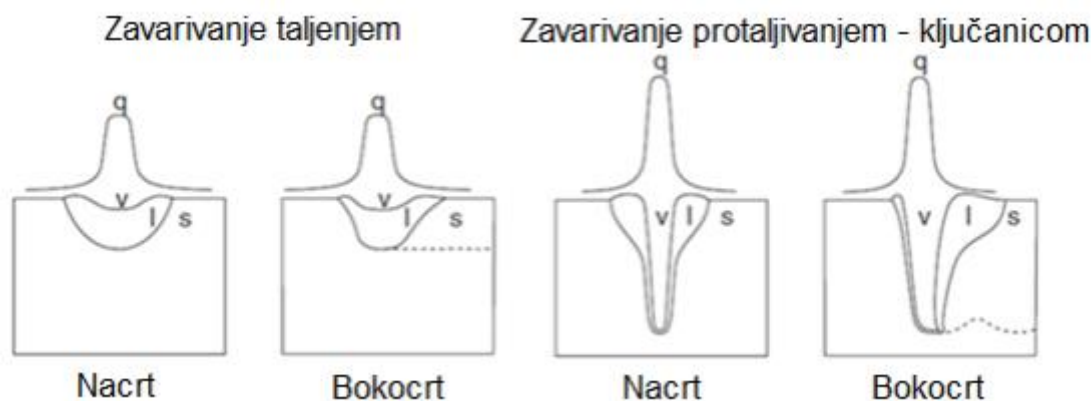


Slika 25. Prikaz rada disk lasera [32]

PRINCIP POSTUPKA ZAVARIVANJA LASEROM

Laseri se mogu koristiti za zavarivanje taljenjem slično kao i kod klasičnih postupaka zavarivanja ili se može koristiti postupak protaljivanja (eng. „keyhole“ tehnika). Energija snopa koja se prenosi do radnog komada dijelom se reflektira, a dijelom apsorbira. U procesu zavarivanja laserom, gubitci energije refleksijom mogu biti veliki, mnogi materijali

reflektiraju i do 90 % upadne energije laserskog snopa (reflektivnost austenitnog nehrđajućeg čelika za infracrveno zračenje ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) iznosi 92 %). Reflektivnost se smanjuje kako temperatura površine materijala raste, zagrijavanjem površine apsorbira se sve više energije. Apsorbirana energija se kondukcijom provodi od površine u unutrašnjost materijala. Visoka temperatura taline povećava apsorpciju, a time i unos energije laserskog snopa. Zavarivanje taljenjem koristi se za mikro zavarivanja malom snagom lasera (do 0,5 kW). Ako se u talini oblikuje uski krater po cijeloj dubini osnovnog materijala (isparavanjem dijela metala), gubici refleksijom su znatno smanjeni, energija snopa se efikasnije apsorbira. Kod ovog načina rada laserska zraka protaljuje čitavu debljinu osnovnog materijala oblikujući otvor u materijalu oblika ključanice (eng. „keyhole“). Zavareni spoj nastaje uslijed sila površinske napetosti koje osiguravaju tečenje taline oko otvora, zatvarajući ga iza zrake kako ona napreduje u smjeru zavarivanja. [33]



Slika 26. Prikaz zavarivanja taljenjem i ključanicom [34]

q – unesena toplina, v – metalne pare, l – rastaljeni metal, s – kruti metal

Parametri kojima se upravlja lasersko zavarivanje su [30]:

- SNAGA LASERA, P (W),
- BRZINA ZAVARIVANJA, v (cm/min),
- ZAŠTITNI PLIN (vrsta plina, protok, dovod – koaksijalno ili sa strane)
- ŽARIŠNA DULJINA LEĆE, f (mm),
- PROMJER ŽARIŠNE TOČKE, d_f (mm),
- POLOŽAJ ŽARIŠNE TOČKE U ODNOSU NA POVRŠINU MATERIJALA, z (mm).

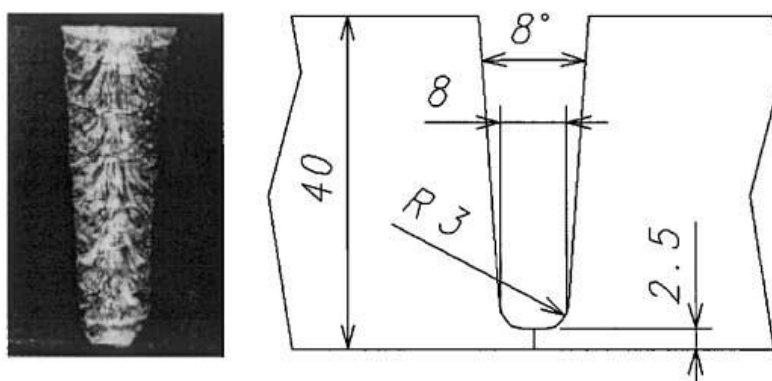
Kod laserskog zavarivanja zaštitni plin koristi se za stabiliziranje procesa zavarivanja i za postizanje visoko kvalitetnih zavara. Kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika koristi se

najčešće mješavina argona i vodika te dušik i mješavine dušika. Primjenom mješavine argona i vodika postiže se veća brzina zavarivanja i sjajnija površina u odnosu na helij i mješavine argona i helija. Dušik i mješavine dušika kod laserskog zavarivanja se koriste u svrhu nadoknađivanja gubitka dušika iz austenitnih čelika legiranih dušikom. [35]

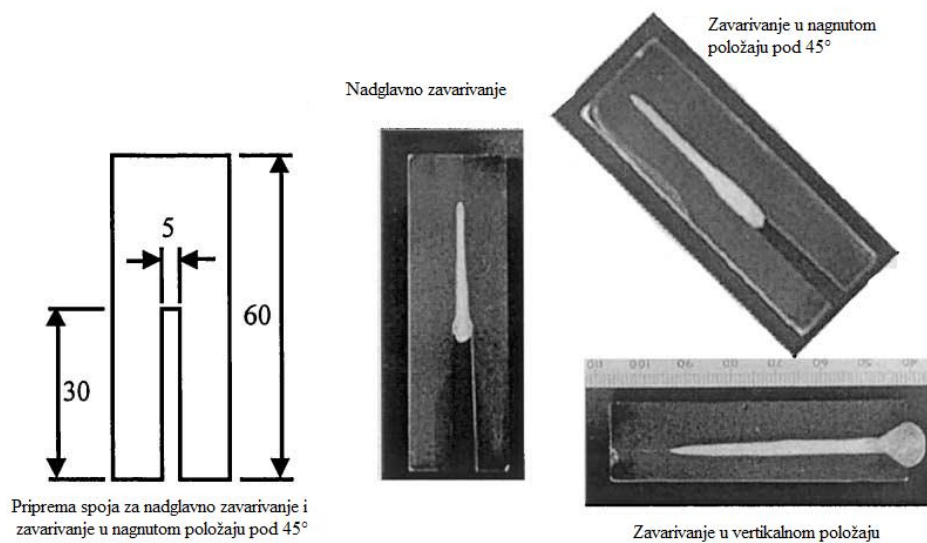
5.7 Usporedbe elektrolučnih postupaka zavarivanja, zavarivanja visokim unosom energije i hibridnih postupaka zavarivanja

Kod zavarivanja TIG postupcima potrebno je višeprolazno zavarivanje zbog kojeg dolazi do većih deformacija radnih komada i šireg ZUT-a koji kasnije mogu uzrokovati pukotine. Zavarivanje snopom elektrona omogućuje manje deformacije i uski ZUT radnih komada ali uz slabija mehanička svojstva i lošiju otpornost na tople pukotine. Laserskim zavarivanjem također su manje deformacije i ZUT radnih komada pritom koristeći veće brzine zavarivanja i odgovarajućih zaštitnih plinova. Dubina penetriranja laserskim zavarivanjem je manja nego kod zavarivanja snopom elektrona, zbog toga je potrebno koristiti više prolaza. Lasersko zavarivanje je fleksibilnije za upotrebu jer je moguće koristiti ga uz primjenu dodatnih materijala poput hladne žice, vruće žice ili u kombinaciji s električnim lukom čime se omogućava veća tolerancija pripreme žlijeba i moguće je kontrolirati sastav metala zavara. [28]

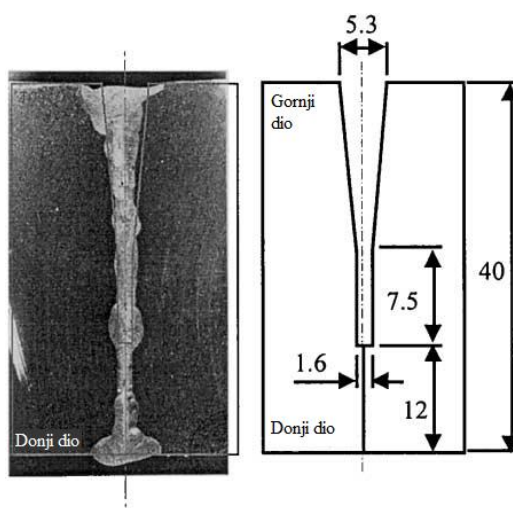
Na slici 27 mogu se vidjeti različiti primjeri priprema spojeva i izgledi zavara dobiveni različitim postupcima zavarivanja. [28]



a) TIG zavarivanje čelika 316L u horizontalnom položaju



b) Zavarivanje čelika 316L snopom elektrona u nadglavnom, vertikalnom i nagnutom položaju pod 45°



c) Višeprolazno lasersko zavarivanje čelika 316L u horizontalnom položaju

Slika 27. Primjeri priprema spojeva i izgledi zavara dobiveni različitim postupcima zavarivanja [28]

U tablici 8 prikazane su razlike između zavarivanja navedenih slikom 27. [28]

Tablica 8. Usporedbe zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 316L različitim postupcima [28]

Komponente	TIG zavarivanje u uskom žljebu	Zavarivanje snopom elektrona	Nd-YAG lasersko zavarivanje
Debljine zavarenih uzoraka (mm)			
Horizontalni položaj	40 (više prolaza)	60 (u jednom prolazu)	40 (više prolaza)
Nadglavni položaj	40 (više prolaza)	25 (u jednom prolazu)	-
Potreban broj prolaza			
Horizontalni položaj	~ 12	1	5
Nadglavni položaj	~ 12	1	-
Brzina zavarivanja jednog prolaza (m/min)			
Horizontalni položaj	0,12	0,2	0,5 (bez dodatnog materijala); 0,8 (uz dodatni materijal)
Nadglavni položaj	0,12	0,2	-
Deformiranje zavarenih uzoraka (mm)			
Skupljanje zavara u horizontalnom položaju	~ 5	~ 0,6	2 - 3
Procjena postupka			
Sposobnost zavarivanja ploča debljine 60 mm	Izvedivo	Potrebno daljnje razvijanje	Potrebno daljnje razvijanje
Standardna brzina zavarivanja za ploču debljine 60 mm (m/min)			
Horizontalni položaj	~ 0,007	0,2	~ 0,1
Nadglavni položaj	~ 0,007	-	-
Deformiranje uslijed zavarivanja	Relativno veliko	Nisko	Srednje

Iz tablice 8 proizlaze sljedeće prednosti i nedostaci zavarivanja TIG postupkom naspram zavarivanja snopom elektrona i Nd:YAG laserskog zavarivanja. Prednosti zavarivanja snopom elektrona i Nd:YAG laserskog zavarivanja su mogućnosti zavarivanja debljih materijala uz manji broj prolaza, veće brzine zavarivanja, manje deformacije materijala, a nedostaci tih postupaka su slabija mehanička svojstva, mogućnost pojava toplih pukotina, nemogućnost zavarivanja u svim položajima, osiguravanje dovoljne dubine penetriranja (kod zavarivanja snopom elektrona u nadglavnom položaju), nepotpuno miješanje osnovnog i dodatnog materijala, potrebna kvalitetna priprema spoja, skupa oprema, potrebna su daljnja razvijanja samih postupaka. [28]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je tehnološka analiza zavarenog uzorka od čelika X2CrNiMo17-12-2, debljine 60 mm. Prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika potrebno je posebno obratiti pozornost na unos topline i bitan je prikladan odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina što izravno utječe na kvalitetu korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Analiza je provedena prema pripadajućem certifikatu o kvalifikaciji postupka zavarivanja, (WPQR, eng. Welding Procedure Qualification Record). Iz zavarenog uzorka pripremljene su epruvete koje se koriste za ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Također, iz zavarenog uzorka izrezan je uzorak koji je naknadnom obradom brušenja i poliranja postao makroizbrusak te je na njemu provedeno ispitivanje udjela ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja i snimanje mikrostrukture zavara.

Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

6.1 Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnom dijelu rada korišten je austenitni nehrđajući čelik X2CrNiMo17-12-2 prema EN 10028-7, a prema HRI CEN ISO/TR 15608 spada u grupu 8.1. Debljina materijala iznosi 60 mm. Ova vrsta nehrđajućeg čelika sadržava niski udio ugljika čime se sprječava precipitacija ugljika tijekom zavarivanja, zbog sadržaja molibdena ima poboljšano djelovanje protiv korozije te se može koristiti u jako korozivnim sredinama. U tablici 9 nalazi se kemijski sastav navedenog čelika prema EN 10088-1, a u tablici 10 prikazana su mehanička svojstva. [36]

Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala X2CrNiMo17-12-2 [36]

Legirni element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	ostatak
Maksimalni maseni udio, %	0,03	1	2	0,045	0,015	16,5 – 18,5	2 – 2,5	10 -13	N < 0,10

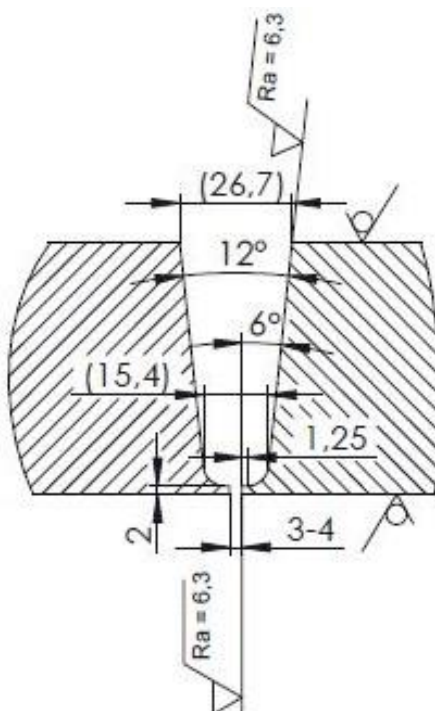
Tablica 10. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [36]

Debljina stjenke, mm	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost A_5 , %	Udarni rad loma KV (+20 °C), J
$> 40 \leq 63$	200	500 – 830	30	100

6.2 Tehnologija zavarivanja

6.2.1 Oblikovanje zavarenog spoja

Zbog velike debljine (60 mm) nehrđajućeg čelika izabrana je U priprema, sučeoni spoj BW (eng. Butt weld) kako je i preporučeno normom EN ISO 9692-1:2013: Ref. br. 1.8. Priprema spoja sa pripadajućim dimenzijama prikazana je na slici 28. Priprema spoja izvedena je strojnom obradom, te su nakon strojne obrade površine spoja očišćene i odmašćene.



Slika 28. Oblikovanje spoja za zavarivanje

6.2.2 Zavarivanje ispitnih uzoraka

Zavarivanje austenitnih čelika može se provesti različitim postupcima zavarivanja navedenih u poglavlju 5.6, dok su za ovaj slučaj zavarivanja odabrani postupci 141 (TIG) i 111 (REL) prema HRN EN ISO 4063. TIG postupkom zavareni su korijenski prolazi, a ostali prolazi

zavareni su REL postupkom. TIG postupak zavarivanja je izabran za korijenski prolaz kako bi se dobila zadovoljavajuća mehanička svojstva korijena, dok se REL postupak odabrao za popunu zavara zbog većeg depozita materijala te ujedno bržeg zavarivanja. Za izvor struje za zavarivanje je korišten EWM Tetrix puls AC/DC serije broj: 623767. Položaj zavarivanja je PA prema normi HRN EN ISO 6947.

Za TIG zavarivanje korišten je dodatni materijal proizvođača Böhler EAS 4 M – IG, prema normama EN ISO 14343-A: W 19-12-3 L / AWS A5.9: ER316 L. Ovo je visokolegirani dodatni materijal za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika u obliku šipke, promjera Ø2,4 mm. Korištenjem ove vrste dodatnog materijala dobivaju se zavari visoke čistoće, otporni na tople pukotine i koroziju. Zajamčena su svojstva žilavosti sve do – 196 °C i otpornosti na interkristalnu koroziju do 400 °C. Ovim dodatnim materijalom omogućeno je zavarivanje u svim položajima. Dodatni materijal spaja se na negativan pol uz korištenje 100 % argona kao zaštitnog plina. [37]

U tablici 11 i 12 prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG. [37]

Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [37]

Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Maksimalni maseni udio, %	0,02	0,5	1,8	18,5	2,8	12,3

Tablica 12. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [37]

	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost A_5 , %	Udarni rad loma KV, J (+20 °C)
Toplinski neobrađeni zavar štićen argonom	470	610	38	140

Za REL zavarivanje korišten je dodatni materijal proizvođača Elektroda Zagreb EZ-Krom 30R, prema normi EN ISO 3581-A: E 19-12-3 LR 12 / ASME SFA-5,4 E316L-16. Promjer

odabrane elektrode iznosi $\varnothing 3,2$ mm. Ovo je rutilno obložena elektroda za zavarivanje stabiliziranih i nestabiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika. Zavarivanje ovom elektrodom dobivaju se zavari postojani na interkristalnu koroziju do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ te omogućuju sadržaj delta ferita u strukturi zavara. Omogućeno je zavarivanje u svim smjerovima uz korištenje istosmjerne struje s elektrodom na pozitivnom polu. Prema potrebi potrebno je sušiti elektrode 2 sata na $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. [38]

U tablici 13 i 14 prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva zavara dobivenog dodatnim materijalom EZ – KROM 30 R. [38]

Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [38]

Legirni element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Maksimalni maseni udio, %	0,03	0,8	0,9	18,5	2,7	12

Tablica 14. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [38]

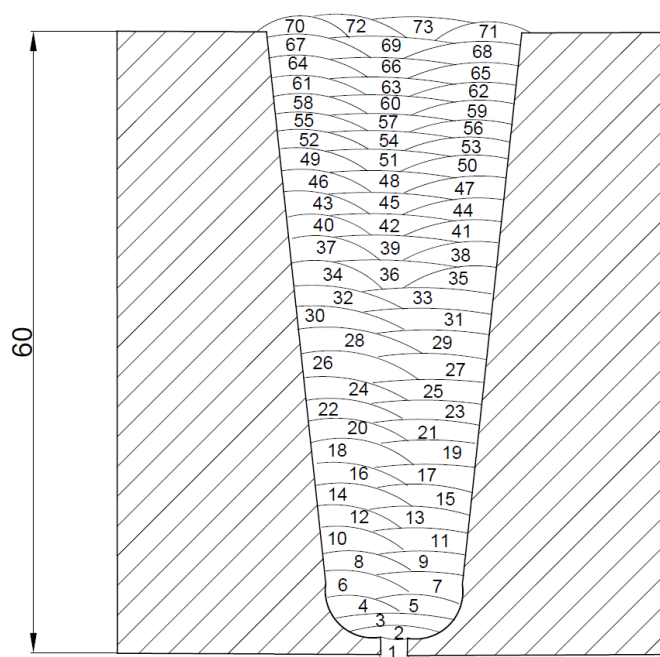
Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost, A%	Udarni rad loma KV, J (-20 °C)
320	510	25	47

Uspoređujući dodatne materijale može se zaključiti kako zavari dobiveni dodatnim materijalom Böhler EAS 4 M – IG imaju više vrijednosti iznosa mehaničkih svojstava. S obzirom na kemijski sastav, dodatni materijal Böhler EAS 4 M – IG ima dvostruko veći udio mangana, dok su ostali legirni elementi približno jednakih udjela.

Zbog velike debljine stijenke osnovnog materijala od 60 mm, zahtijevanja niskog unosa topline i smanjenja deformacije osnovnog materijala, provedeno je zavarivanje u 73 prolaza od kojih prva 3 prolaza čine korijenske prolaze te su oni zavareni TIG postupkom, a ostali prolazi, popune odrađeni su REL postupkom.

Prema normi ISO/TR 17671-1, zahtijevani unos topline ograničen je intervalom od 6,7 – 8,6 kJ/cm, dok područje kvalifikacije prema navedenoj normi vrijedi za unos topline veće i do 25 % u intervalu od 8,4 – 10,8 kJ/cm.

Oba postupka zavarivanja provedena su ručno. Sva zavarivanja provedena su u položenom horizontalnom položaju PA. Na slici 29 prikazan je redoslijed zavarivanja.



Slika 29. Redoslijed zavarivanja

Kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika nije potrebno predgrijavanje pa se i u ovom slučaju nije koristilo predgrijavanje, ali minimalna temperatura materijala mora iznositi 20 °C. Međuslojna temperatura, prema normi HRN EN ISO 13916 mora biti u intervalu od 20 °C – 120 °C kako bi se izbjegle moguće pukotine u zavaru i izbjegle različite varijacije brzine hlađenja tijekom svakog prolaza. Mjerenje međuslojne temperature provedeno je pomoću beskontaktnog termometra IC Termometer Fluke 568 (serijski broj 3250043).

6.2.2.1 TIG zavarivanje

Zaštitni plin koji se koristio kod TIG zavarivanja je 100 % argon, prema normi HRN EN ISO 14175: II. Protok zaštitnog plina iznosi 12 l/min. Za korijensku zaštitu korišten je isti plin s protokom od 4 – 5 l/min. Korištena je wolfram elektroda oznake WF20 i promjera Ø2,4. Debljina korijenskog prolaza iznosi 6 mm. Kut postavljanja pištolja iznosi 80° - 85° u odnosu na osnovni materijal.

PARAMETRI ZAVARIVANJA

Kako je ograničeni unos topline u intervalu od 6,7 – 8, 6 kJ/cm, izabrani su sljedeći parametri zavarivanja navedeni u tablici 15. Također, u tablici 15 izračunat je unos topline prema sljedećoj formuli (4):

$$Q_z = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad [\text{kJ/cm}] \quad (4)$$

Gdje je:

Q_z – unos topline u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja djelovanja električnog luka (za TIG postupak iznosi 0,6)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Tablica 15. Parametri zavarivanja i unosi topline kod TIG zavarivanja

Broj prolaza	Jakost struje I , A	Napon U , V	Brzina zavarivanja v_z , cm/min	Unos topline Q_z , kJ/cm
1	91	13,0 – 14,0	5,6	7,6 – 8,2
2	91	13,0 – 14,0	6,1	7,0 – 7,5
3	95	13,2 – 14,1	5,1	8,9 – 9,5

6.2.2.2 REL zavarivanje

Kod REL zavarivanja kut postavljanja elektrode iznosi 85° - 90°. Tehnika rada koja je korištena kod REL zavarivanja je zavarivanje povlačenjem elektrode čime se smanjuje unos topline i povećava brzina zavarivanja. U tablici 15 prikazani su parametri REL zavarivanja i unosi topline dobiveni formulom (4). Stupanj iskorištenja djelovanja električnog luka kod REL zavarivanja iznosi 0,8.

Tablica 16. Parametri zavarivanja i unosi topline kod REL zavarivanja

Broj prolaza	Jakost struje I , A	Napon U , V	Brzina zavarivanja v_z , cm/min	Unos topline Q_z , kJ/cm
4 - 7	120	24,8 – 25,0	19,8 – 21,0	6,9 – 7,2
8 - 46	126	25,1 – 26,0	20,0 – 22,3	7,0 – 7,6
47 - 73	128	25,7 – 26,1	19,5 – 21,0	7,6 – 8,1

6.3 Statičko – vlačno ispitivanje

Statičko – vlačnim ispitivanjem ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičko – vlačnog opterećenja. Ovim se ispitivanjem određuju osnovna mehanička svojstva kao što su granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, osnovnog materijala i metala zavara. Samo ispitivanje se provodi na uređajima koji se zovu kidalice, na kojima se epruvete kontinuirano opterećuju sve dok ne dođe do loma. Samo ispitivanje provodi se u skladu sa normama HRN EN ISO 4136:2013 i HRN EN ISO 6892-1:2016. U ovom ispitivanju se određuje vlačna čvrstoća materijala čiji iznos mora biti u intervalu od 520 N/mm² do 670 N/mm².

Ispitivanje je provedeno na 4 epruvete pri sobnoj temperaturi od približno 20 °C. Dimenzije pojedinih epruveta te dobiveni iznosi maksimalnih sila i vlačnih čvrstoća vlačnim ispitivanjem navedeni su u tablici 17. Oznake A i B odnose se na gornju i donju polovicu presjeka ispitne epruvete.

Tablica 17. Dimenzije ispitnih uzoraka te iznosi maksimalnih sila i vlačnih čvrstoća dobivenih statičko - vlačnim ispitivanjem

Broj ispitnog uzorka	a, mm	b, mm	S, mm ²	F _m , N	R _m , N/mm ²	Mjesto loma
1A	24,61	25,08	617,22	341,645	553,52	Osnovni materijal
1B	24,55	25,12	616,70	347,003	562,68	Osnovni materijal
2A	25,81	25,01	645,51	362,372	561,38	Osnovni materijal
2B	23,08	24,99	576,77	322,497	559,14	Osnovni materijal

Iz tablice se može vidjeti kako svi ispitni uzorci imaju vlačnu čvrstoću unutar zahtijevanog intervala od 520 N/mm² – 670 N/mm² što ujedno znači da zavareni spoj sadrži veću vlačnu čvrstoću nego osnovni materijali, tj. došlo je do loma osnovnog materijala. Također, može se zaključiti da su dodatni materijal, parametri zavarivanja, korišteni zaštitni plin i tehnika rada pravilno odabrani te da zavareni spoj zadovoljava zajamčena svojstva vlačne čvrstoće.

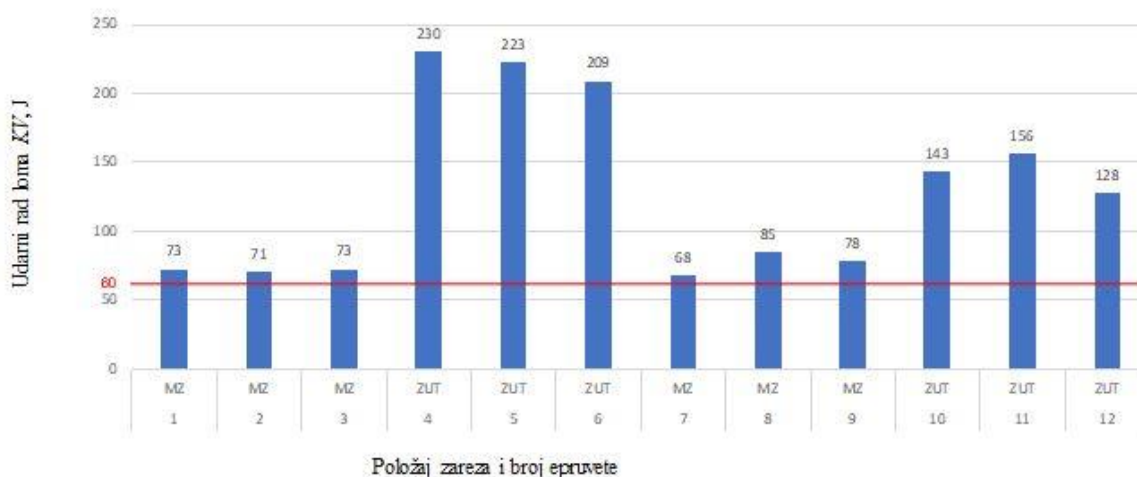
6.4 Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provodi se na Charpyjevom batu. Ispitivanje se provodi prema normama HRN EN ISO 9016:2013 i HRN EN ISO 148-1:2012. Ispitivanje je provedeno pri sobnoj temperaturi od 20 °C. Dimenzije epruvete iznose 10x10x55 mm te imaju utor oblika V. Minimalni potreban iznos žilavosti iznosi 60 J.

U tablici 18 uneseni su podaci o položaju zarez, površini presjeka, iznosu udarnog rad loma i prosjeku udarnog rada loma. Skraćenice u tablici predstavljaju sljedeće: MZ – metal zavara, ZUT – zona utjecaja topline.

Tablica 18. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Broj epruvete	Položaj zarez	Površina presjeka S_0 , cm ²	Udarni rad loma KV, J	Prosjek udarnog rada loma, J
1	MZ	0,8	73,0	72,3
2	MZ	0,8	71,0	
3	MZ	0,8	73,0	
4	ZUT	0,8	230,0	220,7
5	ZUT	0,8	223,0	
6	ZUT	0,8	209,0	
7	MZ	0,8	68,0	77,0
8	MZ	0,8	85,0	
9	MZ	0,8	78,0	
10	ZUT	0,8	143,0	142,3
11	ZUT	0,8	156,0	
12	ZUT	0,8	128,0	

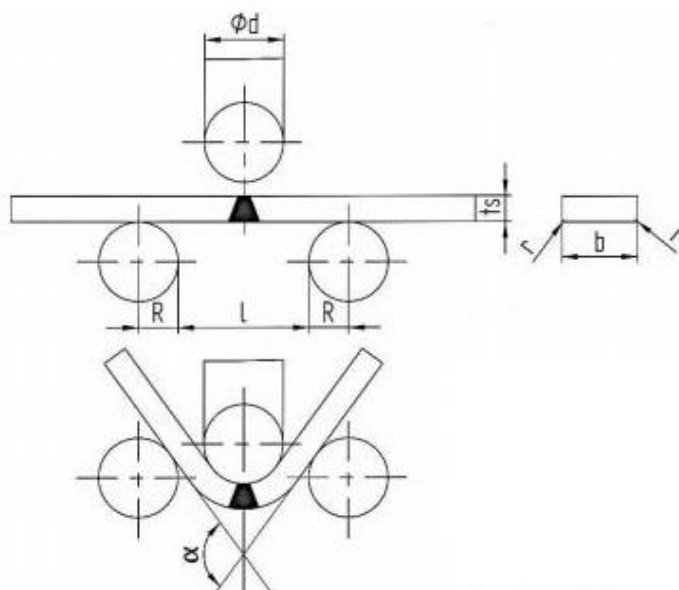


Slika 30. Postignute vrijednosti udarnog rada loma

Prema tablici 18 i slici 30 može se zaključiti kako sve vrijednosti udarnog rada loma zadovoljavaju, tj. veće su od minimalne zahtijevane vrijednosti koja iznosi 60 J. Također, se može vidjeti kako je kod zone utjecaja topline došlo do povećanja vrijednosti udarnog rada loma, tj. došlo je do povećanja žilavosti zone utjecaja topline koji je dio osnovnog materijala.

6.5 Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje na savijanje provedeno je prema normi HRN EN ISO 5173:2010/A.1:2012. Samo ispitivanje sastoji se od bočnog savijanja u svrhu ispitivanja rastezljivosti zavarenog spoja u poprečnom presjeku. Ispitivanje se provodi na 4 epruvete. Epruvete se savijaju do kuta od 180° i pritom se prati da li dolazi do nastajanja pukotina. Promjer samog trna iznosi $d = 40$ mm i 4 puta je veći od same debljine epruvete t_s . Razmak između oslonaca iznosi $l = 120$ mm, dok polumjer oslonaca iznosi $R = 27,5$ mm. Na slici 31 prikazan je postupak savijanja prema navedenoj normi.



Slika 31. Ispitivanje savijanjem

Na temelju provedenog ispitivanja, na svim uzorcima nisu uočene pukotine, čime je dokazana kvaliteta zavarenog spoja.

6.6 Makroanaliza

Ispitivanje geometrijskih značajki zavara provodi se na pripremljenim makroizbruscima. Makroizbrusci se izrađuju sljedećim tehnološkim nizom operacija koje se sastoje od izrezivanja uzoraka na određenu dimenziju prema normi HRN EN ISO 17639:2013. Nakon izrezivanja slijedi operacija brušenja uzoraka. Brusi se samo jedna strana koja se odabire za ispitivanje. Površina makroizbrusaka se brusi rotirajućim diskovima različitih veličina zrnatosti: P320, P500, P1000, P2000, P4000. Brzina brušenja je 350 okr/min. Prilikom mijenjanja diska, uzorak se rotira za 90°. Za brušenje je korišteno vodeno hlađenje. Finijim papirom se površina brusi sve dok se tragovi prethodnog brušenja ne izbruse.

Nakon brušenja, uzorci slijede na elektrokemijsko nagrivanje u 10 % oksalnu kiselinu – $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ u trajanju od 40 s, pri naponu od 10 V i struji 3 A. Uređaj za elektrokemijsko nagrivanje „DELAVNIŠKI USMERNIK UZR“ prikazan je na slici 32.



Slika 32. Uređaj za elektrokemijsko nagrizanje „DELAVNIŠKI USMERNIK UZR“, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB Zagreb

Na slici 33 prikazan je izgled pripremljenog makroizbruska.

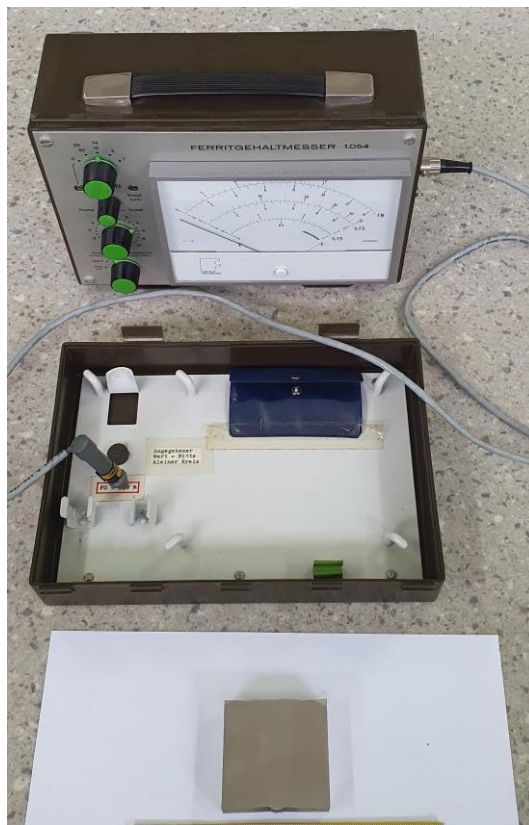


Slika 33. Izgled pripremljenog makroizbruska za mjerenje udjela ferita i ispitivanje mikrostrukture

Prema prikazanom makroizbrusku u samom poprečnom presjeku zavora nisu vidljive nikakve nehomogenosti, tj. greške u metalu zavora.

6.7 Mjerenje udjela ferita

Mjerenje udjela ferita u metalu zavora i osnovnom materijalu provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Mjerenje je provedeno na feritoskopu „Ferritgehaltmesser 1.054“ (slika 34). Prije početka mjerenja, uređaj je kalibriran pomoću etalona koji sadrži točno 9,8 % ferita. Mjerenje udjela ferita provodi se oslanjanjem ticala na željenu poziciju za koju se očitava postotak ferita.

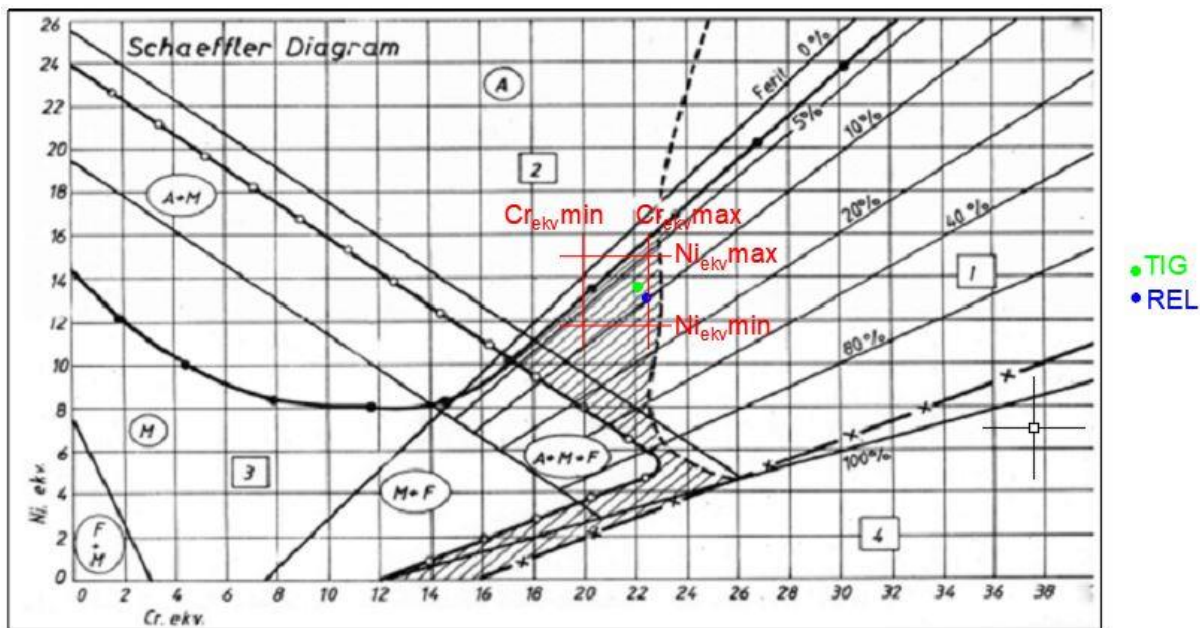


Slika 34. Feritoskop „Ferritgehaltmesser 1.054

Na temelju Schaefflerovog dijagrama dopunjenog DeLongom i M. C. T. Bystramom, može se predvidjeti udio ferita u osnovnom materijalu i metalu zavara na temelju izračunavanja Cr_{ekv} i Ni_{ekv} (jednadžbe (1) i (2)) za osnovni materijal i dodatni materijal. Prema podacima iz tablica za kemijski sastav osnovnog materijala (tablica 9), dodatnog materijala za TIG zavarivanje Böhler EAS 4 M – IG (tablica 11) i dodatnog materijala za REL zavarivanje EZ KROM 30R (tablica 13) proizlaze slijedeće vrijednosti:

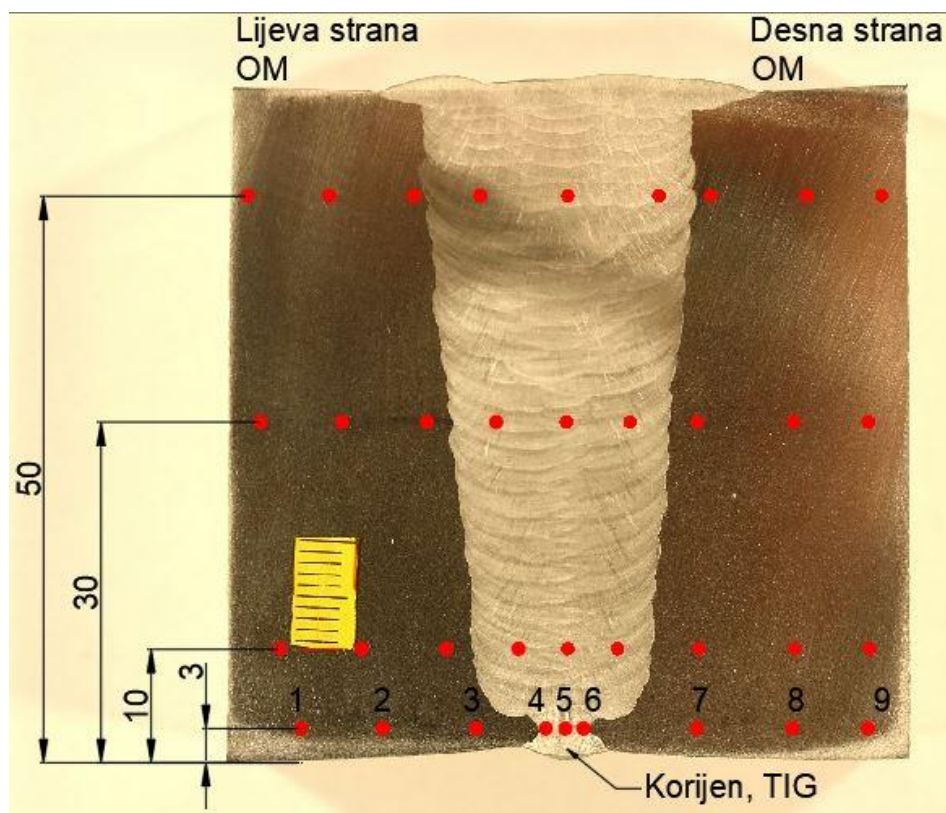
- Osnovni materijal: $Cr_{ekv} = 20 - 22,5$; $Ni_{ekv} = 11,9 - 14,9$
- TIG dodatni materijal: $Cr_{ekv} = 22,05$, $Ni_{ekv} = 13,8$
- REL dodatni materijal: $Cr_{ekv} = 22,4$, $Ni_{ekv} = 13,35$

Izračunate vrijednosti prikazane su u Schaefflerovom dijagramu na slici 35. Na temelju dijagrama može se vidjeti kako se sadržaji ferita kod osnovnog materijala mogu očekivati u intervalu od 0 – 14,2 %. TIG dodatni materijal sadrži 8 % ferita, a REL dodatni materijal sadrži 9,8 % ferita. Također, može se vidjeti kako sve vrijednosti uz određeno miješanje osnovnog i dodatnog materijala prilikom zavarivanja se nalaze unutar preporučenog područja zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika.



Slika 35. Schaefflerov dijagram s izračunatim vrijednostima Cr_{ekv} i Ni_{ekv} za osnovni i dodatne materijale

Na slici 36 prikazana su mjesta mjerenja ferita na makroizbrusku, a u tablici 19 upisane su očitane vrijednosti.



Slika 36. Makroizbrusak sa označenim mjestima mjerenja udjela ferita

Tablica 19. Očitane vrijednosti sadržaja ferita u mikrostrukturi osnovnog materijala i metala zavara

Udaljenost od donje strane zavara	Lijeva strana OM			Metal zavara			Desna strana OM		
	Oznaka mjesta mjerenja	Očitana vrijednost sadržaja ferita, %	Prosjeak sadržaja ferita u OM, lijeva strana, %	Oznaka mjesta mjerenja	Očitana vrijednost sadržaja ferita, %	Prosjeak sadržaja ferita u metalu zavara, %	Oznaka mjesta mjerenja	Očitana vrijednost sadržaja ferita, %	Prosjeak sadržaja ferita u OM, desna strana%
3 mm	1	1,0	1,13	4	7,0	6,83	7	0,0	0,23
	2	1,2		5	7,5		8	0,4	
	3	1,2		6	6,0		9	0,3	
10 mm	1	2,8	3,67	4	9,5	9,10	7	3,8	3,27
	2	4,1		5	10,1		8	3,5	
	3	4,1		6	7,6		9	2,5	
30 mm	1	2,2	1,90	4	6,6	6,67	7	1,5	1,00
	2	2,5		5	6,2		8	0,5	
	3	1,0		6	7,2		9	1,0	
50 mm	1	2,4	2,67	4	6,8	6,53	7	4,1	3,77
	2	2,6		5	6,8		8	4,0	
	3	3,0		6	6,0		9	3,2	

Preporučeni volumni sadržaj ferita iznosi od 2 – 10 % ili 2 – 8 FN. Na temelju provedenog mjerenja udjela ferita i iz tablice 18 može se vidjeti da su prosjeci sadržaja ferita u osnovnom materijalu niži ili na granici s preporučenim vrijednostima.

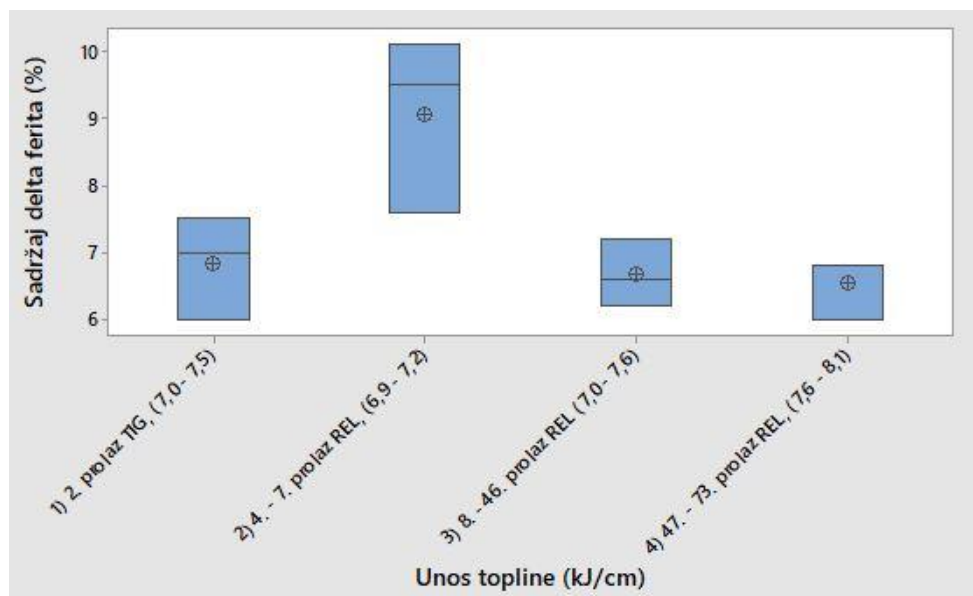
Na udaljenosti od 3 mm od vrha korijena zavara, unos topline iznosio je 7,0 – 7,5 kJ/cm (TIG zavarivanje) i dobiveni prosječni sadržaj ferita iznosi 6,83 %.

Na udaljenosti od 10 mm od vrha korijena zavara, unos topline iznosio je 7,0 – 7,6 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni sadržaj ferita iznosi 9,10 %

Na udaljenosti od 30 mm od vrha korijena zavara, unos topline iznosio je 7,0 – 7,6 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni sadržaj ferita iznosi 6,67 %.

Na udaljenosti od 50 mm od vrha korijena zavara, unos topline iznosi 7,6 – 8,1 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni sadržaj ferita iznosi 6,53 %.

Na slici 37 grafički je prikazan sadržaj delta ferita u metalu zavara ovisno o unosu topline.



Slika 37. Utjecaj unosa topline na sadržaj delta ferita u metalu zavara

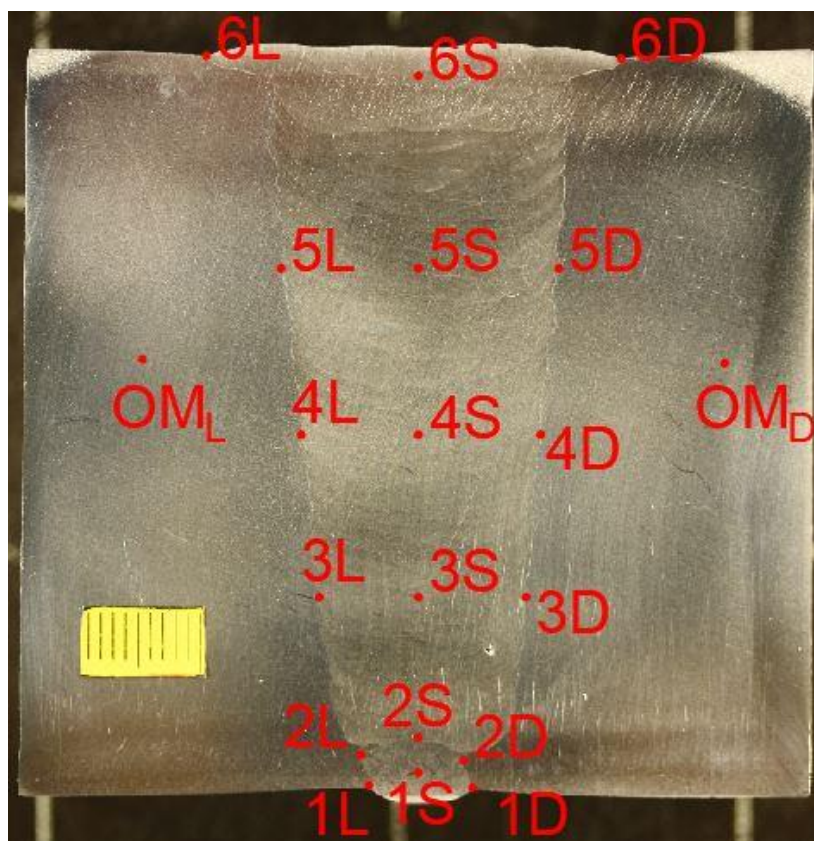
Iz grafičkog prikaza može se vidjeti kako se povećanjem unosa topline udio ferita u mikrostrukturi smanjuje. Povećanjem unosa topline, smanjuje se brzina hlađenja čime se veća količina primarnog ferita transformira u austenit te tako rezultira smanjenjem sadržaja ferita u mikrostrukturi. Prilikom višeprolaznog zavarivanja dolazi do ponavljajućih toplinskih ciklusa kod kojih također dolazi do otapanja ferita u mikrostrukturi.. Najviši sadržaj delta ferita u mikrostrukturi zavara ostvaren je kod unosa topline od 6,9 kJ/cm – 7,2 kJ/cm, a također je i prema tablici 18 vidljivo da je na toj istoj udaljenosti od korijena zavara u osnovnom materijalu izmjereni povećani sadržaj delta ferita te je zbog miješanja osnovnog i dodatnog materijala došlo do povećanja sadržaja ferita.

Na temelju dobivenih prosječnih vrijednosti može se vidjeti da je odabrani dodatni materijal za TIG zavarivanje (Böhler EAS 4 M – IG) i za REL zavarivanje (EZ – KROM 30 R) uz odabrani unos topline osigurao dovoljan udio ferita u metalu zavara čime se sprječava nastajanje toplih pukotina i osigurava dovoljna vrijednost udarnog rada loma kao što je dokazano u poglavlju 6.4.

6.8 Ispitivanje mikrostrukture

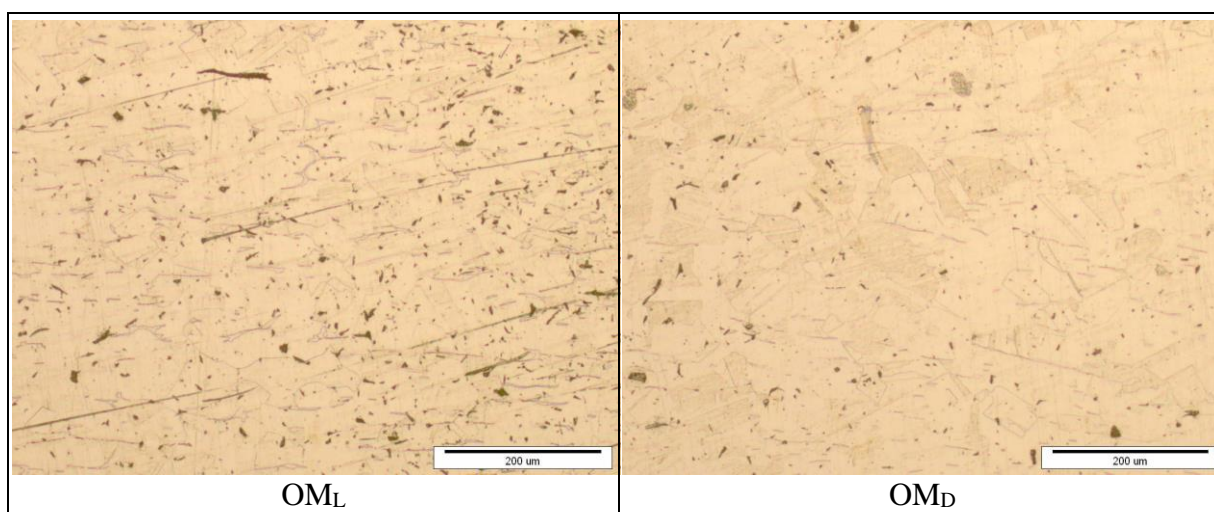
Ispitivanje mikrostrukture provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na optičkom mikroskopu Olympus GX51. U tablici 19 prikazane su mikrostrukture osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara zavarenog čelika X2CrNiMo17-12-2. Uz oznaku mjesta snimanja mikrostrukture, navedene su i vrijednosti unosa topline. Sve prikazane

mikrostrukture snimljene su pod povećanjem od 100 puta. Na slici 38 prikazan je makroizbrusak s označenim mjestima na kojima su snimljene mikrostrukture, a u tablicama 21 – 23 prikazane su snimljene mikrostrukture.

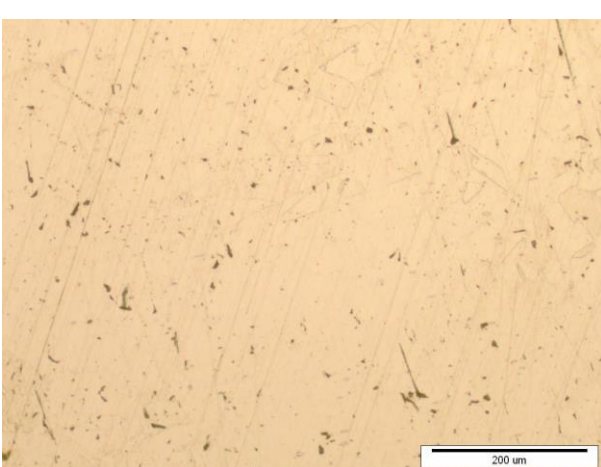
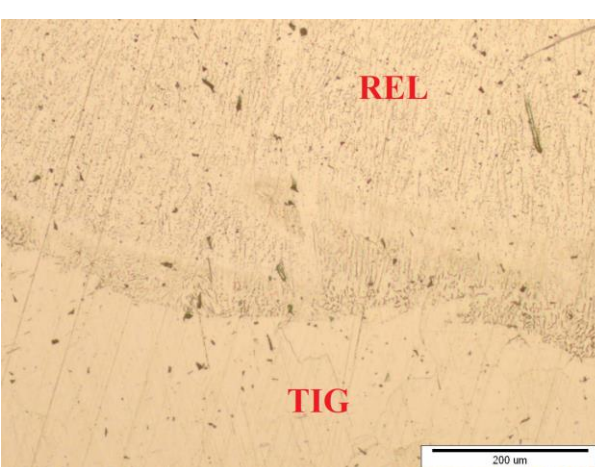
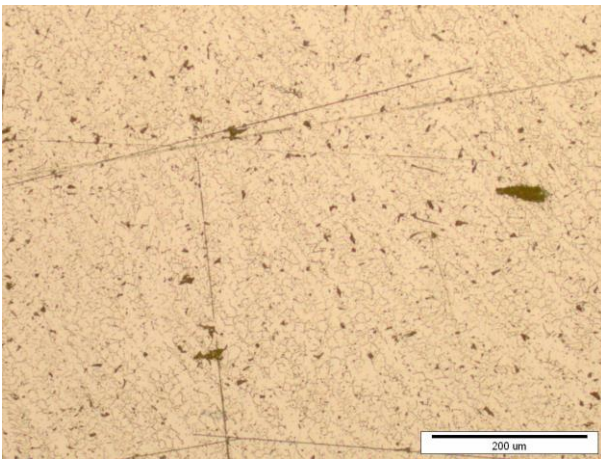
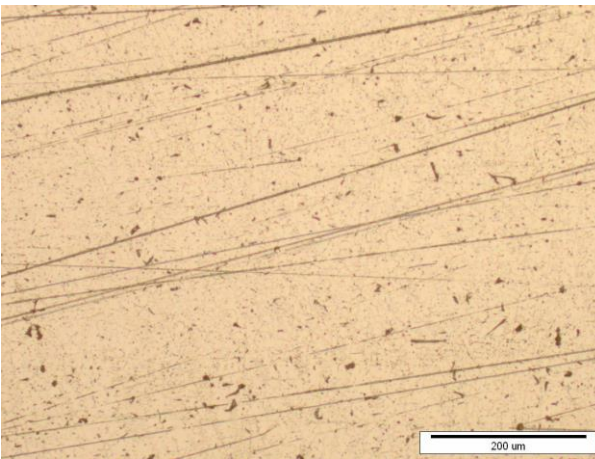
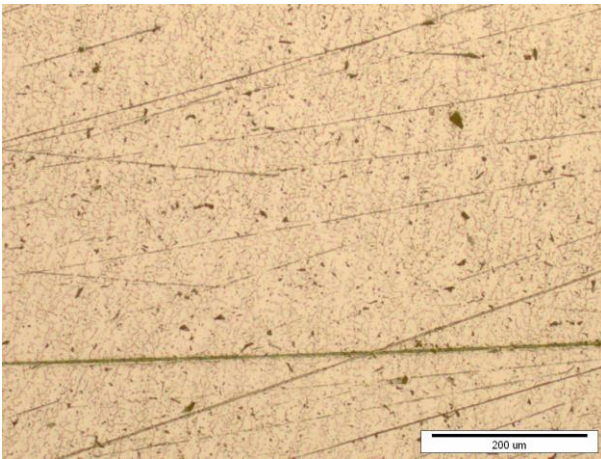
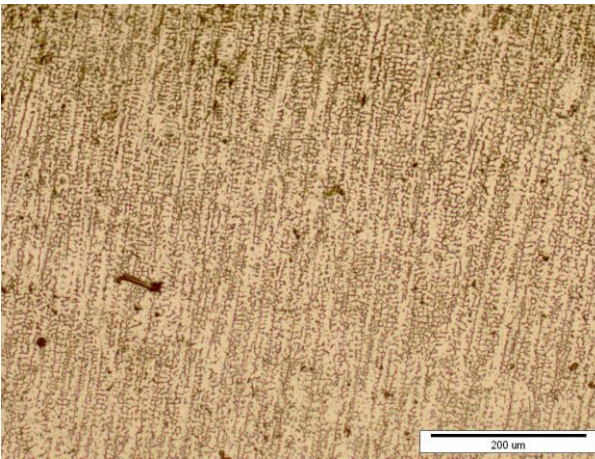


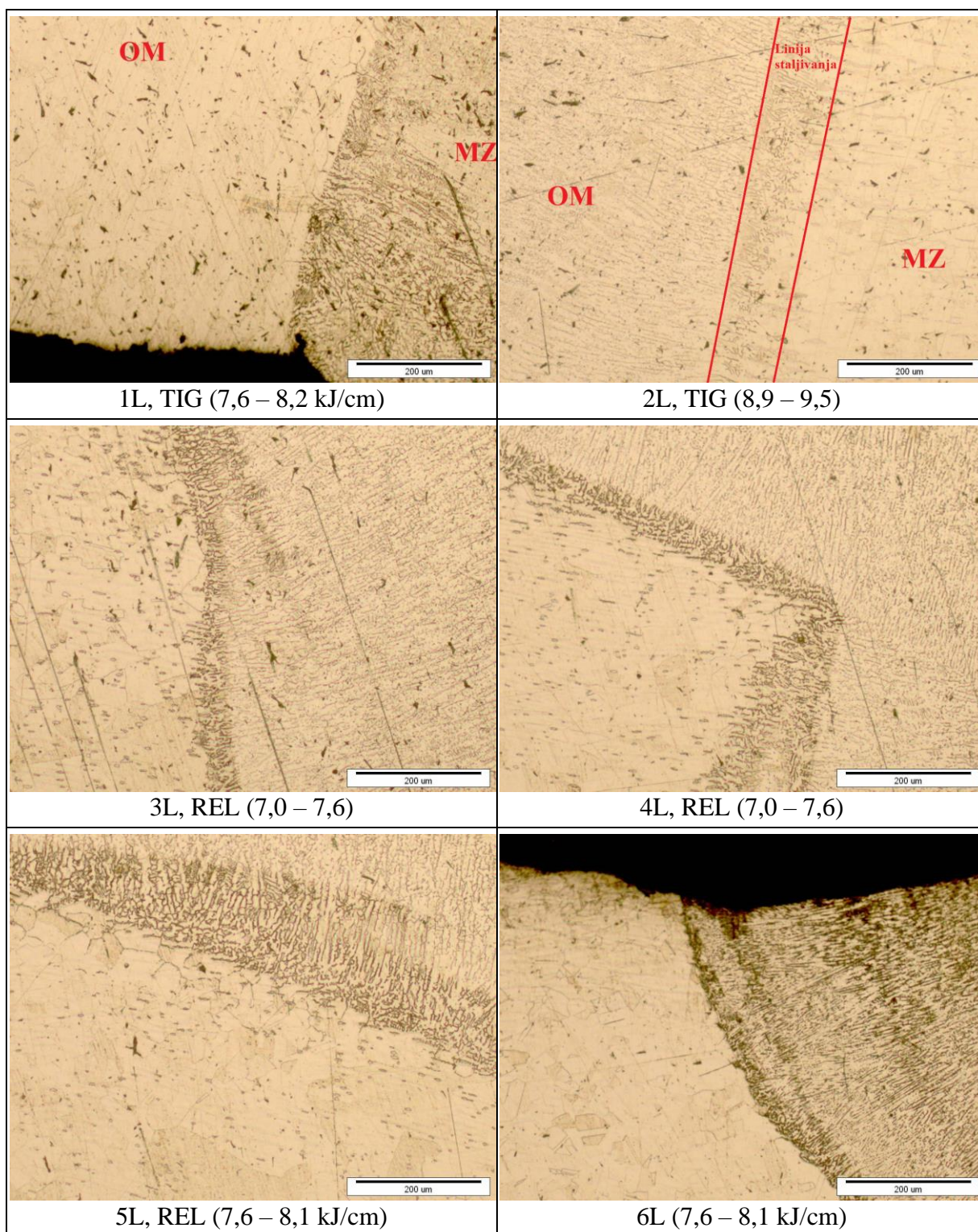
Slika 38. Oznaka mjesta za snimanje mikrostruktura

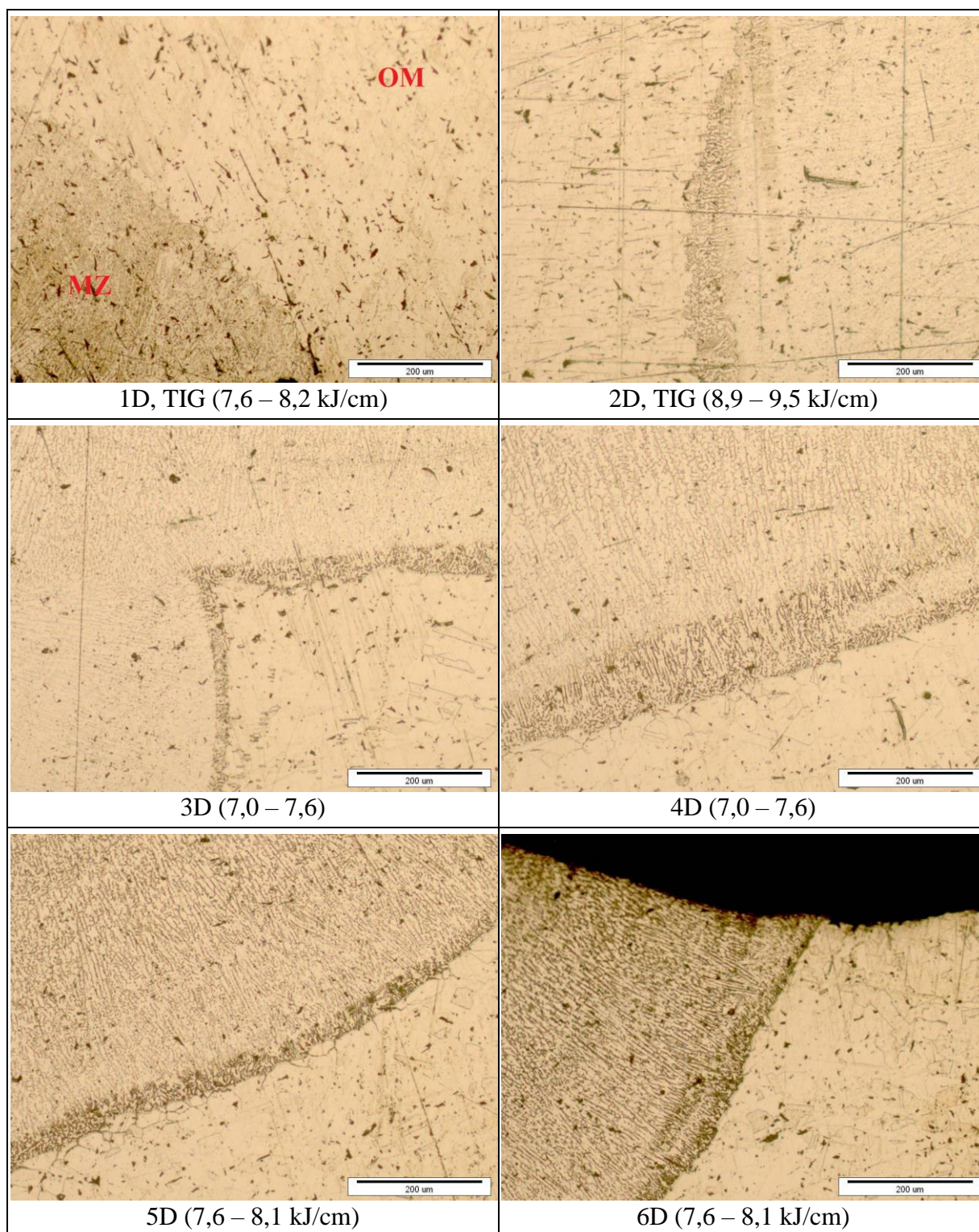
Tablica 20. Snimljene mikrostrukture u osnovnom materijalu prema oznakama na slici 38



Tablica 21. Snimljene mikrostrukture po sredini zavara prema oznakama na slici 38

 <p>1S, TIG (7,0 – 7,5 kJ/cm)</p>	 <p>REL</p> <p>TIG</p> <p>2S, TIG (8,9 – 9,5 kJ/cm) i REL (6,9 – 7,2 kJ/cm)</p>
 <p>3S, REL (7,0 – 7,6 kJ/cm)</p>	 <p>4S, REL (7,0 – 7,6 kJ/cm)</p>
 <p>5S, REL (7,0 – 7,6 kJ/cm)</p>	 <p>6S (7,6 – 8,1 kJ/cm)</p>

Tablica 22. Snimljene mikrostrukture po ZUT-u lijeve strane zavara prema oznakama na slici 39

Tablica 23. Snimljene mikrostrukture po ZUT-u desne strane zavara prema oznakama na slici 39

U tablicama 21 – 23 prikazane su mikrostrukture na označenim mjestima u metalu zavara i osnovnom materijalu. Iz prikazanih snimljenih mikrostrukture može se uočiti kako je linija staljivanja kod korijena, dobiven TIG postupkom jedva primjetan dok je kod popuna

dobivenih REL postupkom šira. Kod svih snimljenih mikrostruktura jasno je izražena linija staljivanja. Može se vidjeti kako metal zavara i zona utjecaja topline sadrže sitnozrnatu strukturu. Na snimljenim mikrostrukturama po sredini zavara, može se vidjeti kako povećanjem udaljenosti od korijena prema licu zavara dolazi do izraženosti tipično ljevačke mikrostrukture s usmjerenim dendritima. Promatrane mikrostrukture u svakom prolazu pokazuju različite orijentacije zrna u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Na svim snimljenim mikrostrukturama nema izraženih nepravilnosti. Također, mogu se vidjeti različiti udjeli delta ferita u mikrostrukturama, te razlika u povećanom sadržaju ferita u metalu zavara i zoni utjecaja topline u odnosu na osnovni materijal, što je i potvrđeno mjerenjem sadržaja ferita.

7. ZAKLJUČAK

Austenitnim nehrđajućim čelicima, antikorozivna svojstva pripisuju se ponajviše prema visokom sadržaju kroma u kemijskom sastavu. Obilježava ih minimalni udio kroma u iznosu od 10,5 %, uz dodatak ostalih legiranih elemenata poput nikla, silicija, titana, molibdena, dušika, mangana sa svrhom poboljšavanja mehaničkih i antikorozivnih svojstava. Zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika provodi se bez značajnih poteškoća ukoliko se provodi uz poštivanje određenih tehnoloških zahtjeva kao što su: ograničeni unos topline, pravilan odabir zavarenog spoja, izbor postupka zavarivanja, parametara zavarivanja, dodatnog materijala, zaštitnog plina, pravilne pripreme zavarenog spoja, održavanje međuslojne temperature i naknadne toplinske obrade. Prilikom zavarivanja austenitnih čelika, može doći do različitih nepravilnosti pucanja metala zavara i ZUT-a, rasta zrna, smanjenje antikorozivnih svojstava, deformacija i izobličenja radnih komada, smanjenja istežljivosti zbog nastajanja karbida i nitrida, tople pukotine, oksidacija zavarenog spoja. Tim nepravilnostima, može se priskočiti korištenjem određenog udjela ferita u dodatnom i osnovnom materijalu, ograničenim unosom topline od 1,5 kJ/mm, korištenjem inertnog zaštitnog plina (argona, helija i njihovih mješavina) sa strane lica i korijena zavara.

Različite tehnologije zavarivanja primjenjuju se za zavarivanje austenitnih čelika debljih stijenki. Uz klasične elektrolučne postupke, s ciljem povećanja brzine zavarivanja, dobivanja uske zone taljenja i zone utjecaja topline, smanjenja deformiranja osnovnog materijala i povećanja produktivnosti, uvode se visokoučinski postupci zavarivanja poput zavarivanja snopom elektrona, laserskog zavarivanja, hibridna zavarivanja, različite verzije TIG zavarivanja. Nedostaci visokoučinskih postupaka zavarivanja austenitnih čelika su smanjenje mehaničkih svojstava i lošija otpornost na tople pukotine, nemogućnost zavarivanja u različitim položajima, skupa oprema za zavarivanje te su potrebna daljnja istraživanja.

Cilj ovog rada je analiza zavarenog uzorka austenitnog čelika X2CrNiMo 17-12-2 debljine 60 s gledišta mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava. Analizom dobivenih podataka i rezultata ispitivanja utvrđen je utjecaj dodatnog materijala, razine unosa topline i udjela ferita u mikrostrukturi na svojstva zavarenog spoja te primjenjivost za zavarivanje austenitnih čelika u industrijskoj primjeni. Zavarivanje je provedeno u 73 prolaza. Na temelju dobivenih rezultata mehaničkih ispitivanja utvrđeno je kako je zavareni spoj pravilno i kvalitetno izveden, tehnologija zavarivanja pravilno odabrana te je na temelju toga dobiven zavareni

spoju bez pogrešaka. Iz zavarenog uzorka izrezane su i pripremljene epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava, pripremljen je makroizbrusak za mjerenje udjela ferita u mikrostrukturi i provedeno je snimanje mikrostrukture. Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

- Statičko – vlačnim ispitivanjem pokazalo se kako zavareni spoj (metal zavara i ZUT) zadovoljava svoje propisane vrijednosti, tj. imaju višu vlačnu čvrstoću od osnovnog materijala.
- Prilikom ispitivanja na bočno savijanje nisu se pojavila nikakva oštećenja i pukotine na samom zavarenom spoju.
- Udarnim radom loma dokazano je da su sve vrijednosti ispitivanja zadovoljavajuće. Također, dokazano je da je došlo do povišenja žilavosti u zoni utjecaja topline.
- Mjerenjem količine ferita uočeno je kako metal zavara sadrži više ferita u odnosu na osnovni materijal. Iz provedenog mjerenja količine ferita, uočljive su različite količine ferita po presjeku metala zavara. Do različitih količina ferita, tj. smanjenja količina ferita u mikrostrukturi metala zavara dolazi zbog povećanja unosa topline i višeprolaznog zavarivanja. Povećanjem unosa topline smanjuje se brzina hlađenja čime se omogućava da veća količina primarnog ferita transformira u austenit pa stoga se manja količina ferita nalazi u mikrostrukturi na sobnoj temperaturi. Prilikom višeprolaznog zavarivanja, zbog ponavljajućih toplinskih ciklusa, također dolazi do otapanja ferita u mikrostrukturi. Prosječne izmjerene vrijednosti količine ferita odgovaraju preporučenom sadržaju u iznosu od 2 – 10 % čime je izbjegnuto smanjenje duktilnosti i žilavosti zavarenog spoja te opasnosti od pojave toplih pukotina.
- Na temelju snimljenih mikrostrukture može se vidjeti kako nema prevelikih odstupanja količine ferita u mikrostrukturi metala zavara. Na snimljenim mikrostrukturama nema izraženih nepravilnosti te se stoga može zaključiti kako su poštovani propisani unosi topline i temperature međuprolaza.

U svrhu povećanja produktivnosti i smanjenja vremena zavarivanja preporučuje se istraživanje automatskog TIG zavarivanja u zaštitom plinu dušika i mješavinama dušika. Korištenjem dušika znatno se smanjuje potrebna struja za zavarivanje u usporedbi s korištenjem argona. Zbog niske cijene dušika, odlična je zamjena za skuplji nikal. Također, djeluje na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće od kriogene temperature pa do povišenih temperatura. Prilikom korištenja dušika kao zaštitnog plina javlja se problem

poroznosti, a izbjegavanje poroznosti omogućuje se odgovarajućim parametrima zavarivanja, posebno dovoljno velikom brzinom zavarivanja i kontroliranim niskim unosom topline.

LITERATURA

- [1] Jessen C. Q., *Stainless Steel and Corrosion*. Damstahl, 2011.
- [2] Dillon C. P., *Corrosion resistance of stainless steels*. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [3] Filetin T., Kovačiček F., i Indof J., *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2001.
- [4] Reda V., *Nehrđajući čelici*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [5] „The History of Stainless Steel – Celebrating 100 Years“, *AZoM.com*, ožu. 11, 2013. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8307> (pristupljeno stud. 14., 2020).
- [6] Rudan M., „Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom“, Pula, 2007, sv. 4.
- [7] Juraga I., Šimunović V., i Stojanović I., „Zavarivanje Cr – Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje“, Pula, 2007, sv. 4.
- [8] Mateša B. i Samardžić I., „Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama“, predstavljeno na Međunarodno znanstveno - stručno savjetovanje, Slavonski brod, 2011.
- [9] Kožuh S., *Skripta - Specijalni čelici*. Sisak: Metalurški fakultet, 2010.
- [10] Lukačević Z., *Zavarivanje*. Slavonski Brod: Strojarski fakultet - Slavonski Brod, 1998.
- [11] Lippold J. C. i Kotecki D. J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. SAD: Wiley, 2005.
- [12] „Austenitni nehrđajući čelici“. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf (pristupljeno stu. 22., 2020.).
- [13] *Practical Guidelines for the Fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steels*, First edition 2010. IMO.
- [14] Juraga I., Ljubić K., Živić M., i Garašić I., *Pogreške u zavarenim spojevima*. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2015.
- [15] Blondeau R., *Metallurgy and Mechanics of Welding*. SAD: Wiley, 2001.
- [16] Laren M., *The Avesta Welding Manual*. Švedska: Avesta Welding AB, 2004.
- [17] Friedrich N., „Welding of austenitic stainless steels for cryogenic LNG applications“, predstavljeno na Stainless Steel World America 2008 Conference & Expo, Houston, SAD, 2008.

- [18] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook - Welding, Brazing and Soldering*. The Nickel Development Institute and American Iron and Steel Institute, 1988.
- [19] Cunat J. P., *The Welding of Stainless Steels*, Drugo izdanje., sv. 3. Luksemburg: Euro Inox, 2007.
- [20] Horvat M., Bilić M., i Kondić V., „Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija“, *Teh. Glas.* 7, velj. 2013.
- [21] Welding of stainless steels and other joining methods, *Welding of stainless steels and other joining methods*. .
- [22] Kralj S., Kožuh Z., i Andrić Š., *Zavarivački i srodni postupci*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [23] Gojić M., *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*. Sisak: Metalurški fakultet, 2003.
- [24] „Postupci zavarivanja“. <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> (pristupljeno stu. 26., 2020.).
- [25] Juraga I., Živčić M., i Gracin M., *Reparaturno zavarivanje*. Zagreb: Vlastita naklada, 1994.
- [26] Živčić M., „Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška - EPP“, *Zavarivanje*, sv. 26, 1983.
- [27] Buddu R. K., Chauhan L. N., i Raole P.M., „Investigations of Microstructure and Mechanical Properties of 60-mm-Thick Type 316L Stainless Steel Welded Plates by Multipass Tungsten Inert Gas Welding and Electron Beam Welding for Fusion Reactor Applications“, *Fusion Sci. Technol.*, 2014.
- [28] Onozuka M., „Manufacturing and maintenance technologies developed for a thick-wall structure of the ITER vacuum vessel“, *Fusion Eng. Des.* 55, 2001.
- [29] Sedmak A., Šijački-Žeravčić V., Milosavljević A., Đorđević V., i Vukićević M., *Mašinski materijali II deo*. Beograd: Mašinski fakultet, 2000.
- [30] Bauer B., „Optimiranje parametra zavarivanja čelika za poboljšavanje“, Doctoral thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [31] Zhang, X., et.al., „Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers“, *J. Laser Appl.*, sv. 23, 2011.
- [32] Wirth P., *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*. Hamburg: Rofin, 2004.
- [33] Kožuh Z., „Nastavni materijali iz Osnova tehnologije II - Lasersko zavarivanje“. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.

- [34] Olsen F. O., *Hybrid laser-arc welding*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [35] Majumdar J. D. i Manna I., *Laser Assisted Fabrication of Materials*. Springer, 2013.
- [36] „Svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2“. https://www.rodacciai.fr/UPLOAD/datasheets/316L-316PLUS_X2CrNiMo17-12-2-Nr.1.4404-ENG.pdf (pristupljeno pro. 12., 2020.).
- [37] „Dodatni materijal za TIG“. https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/01112015000000B_Boehler%20EAS%204%20M-IG_tig%20rod.pdf (pristupljeno pro. 12., 2020.).
- [38] „Dodatni materijal za REL“. <https://www.ezg.hr/proizvodi/electrode/EZKROM30R.html> (pristupljeno pro. 5., 2020.).

PRILOZI

I. CD-R disc