

# Optimizacija tehnologije zavarivanja čelika S355J2+N i X5CrNi18-10 MAG postupkom

---

**Premužić, Krsto**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:235:642530>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Krsto Premužić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Krsto Premužić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći oko diplomskog rada te svim asistentima koji su mi velikodušno pomagali svojim savjetima.

Ujedno se zahvaljujem i svojim roditeljima i curi te cijeloj obitelji koji su mi sve ove godine bili oslonac.

Krsto Premužić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment, mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Krsto Premužić** JMBAG: 0069085704

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija tehnologije zavarivanja čelika S355J2+N i X5CrNi18-10 by MAG postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of welding technology for steels S355J2+N and X5CrNi18-10 by MAG process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu obraditi specifičnosti zavarljivosti čelika različitih mikrostrukture sa stanovišta odabira dodatnog materijala i stupnja miješanja. Za kombinaciju konstrukcijskog čelika S355J2+N i visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 definirati odgovarajuće opcije kombinacije žice i zaštitnog plina, te ograničenja kemijskog sastava osnovnog materijala. Navesti i opisati utjecaj parametara zavarivanja MAG postupka, te specificirati probleme koji se mogu javiti pri niskom i visokom unosu topline.

U eksperimentalnom dijelu za čelike S355J2+N i X5Cr18-10 debljine 30mm definirati odgovarajuću tehnologiju zavarivanja u obostranoj konfiguraciji sučeljenog spoja. Odrediti jakost struje, napon i brzinu zavarivanja za sve prolaze. Posebno uzeti u obzir i odrediti temperaturu predgrijavanja i međuprolaza. Za zavareni uzorak načiniti ispitivanja sukladno normi HRN EN ISO 15614-1, te odrediti prikladnost tehnologije za primjenu u industriji. Zaključno, dati preporuke za daljnju optimizaciju i povećanje produktivnosti uzimajući u obzir mogućnosti MAG postupka.

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

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. NELEGIRANI ČELICI .....	2
2.1. Mjere potrebne za zavarivanje nelegiranih čelika.....	4
2.2. Zavarljivost nelegiranih čelika.....	5
2.2.1. Sprječavanje krhkog loma.....	5
2.3. Konstrukcijski čelik S355J2+N .....	6
3. VISOKOLEGIRANI ČELICI .....	8
3.1. Austenitni visokolegirani čelici .....	8
3.2. Zavarljivost austenitnih visokolegiranih čelika .....	10
3.2.1. Izlučivanje Cr karbida.....	11
3.2.2. Izlučivanje krhke faze .....	11
3.2.3. Noževa korozija .....	12
3.2.4. Tople pukotine .....	12
3.3. Visokolegirani čelik X5CrNi18-10.....	13
4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA .....	15
4.1. Klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika .....	16
4.2. Stupanj miješanja i ograničenja kemijskog sastava osnovnog materijala kod raznorodnih čelika.....	18
4.3. Izbor dodatnog materijala .....	20
4.4. Odabir zaštitnih plinova za zavarivanje .....	21
4.5. Metalurški zahtjevi kod zavarivanja raznorodnih čelika .....	22
4.5.1. Difuzijski procesi .....	22
4.5.2. Strukturna heterogenost i Schaefflerov dijagram.....	23
5. MAG ZAVARIVANJE .....	27
5.1. Dodatni materijal za zavarivanje.....	28
5.2. Prijenos metala unutar električnog luka .....	29
5.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima .....	29
5.2.2. Prijenos metala pomoću štrcajućeg luka .....	30
5.2.3. Prijenos metala pomoću prijelaznog luka .....	31
5.2.4. Impulsni prijenos metala .....	31
5.3. Parametri kod zavarivanja.....	33
5.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja .....	34
5.5. Unos topline .....	34

---

5.5.1. Utjecaj unosa topline na svojstva zavara .....	36
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	38
6.1. Izvor struje .....	38
6.2. Osnovni i dodatni materijal te zaštitni plin .....	39
6.3. Parametri zavarivanja.....	41
6.4. Priprema uzorka za analiziranje mikrostrukture .....	44
6.4.1. Izrezivanje uzorka .....	44
6.4.2. Brušenje .....	44
6.4.3. Poliranje .....	45
6.4.4. Nagrizanje .....	46
6.5. Analiza makrostrukture i mikrostrukture .....	46
6.5.1. Analiza makrostrukture.....	46
6.5.2. Analiza mikrostrukture .....	47
6.6. Mjerenje tvrdoće .....	53
7. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	58
PRILOZI.....	60

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prikaz čeličnih šipki od čelika X5CrNi18-10 [11].....	13
Slika 2.	Osnovni načini klasifikacije zavarenih konstrukcija izrađenih iz različitih vrsta čelika [13].....	17
Slika 3.	Talina zavara [14].....	19
Slika 4.	Prikaz Schaefflerovoga dijagrama dopunjenog DeLongom i Bystramom [13] ....	25
Slika 5.	WRC dijagram [13] .....	26
Slika 6.	Shematski prikaz opreme za MIG/MAG postupak zavarivanja [21] .....	27
Slika 7.	Prikaz različitih presjeka praškom punjene žice [22].....	29
Slika 8.	Prijenos metala pomoću kratkih spojeva [21] .....	30
Slika 9.	Prikaz prijenosa metala pomoću štrcajućeg luka [22].....	30
Slika 10.	Prijenos metala pomoću prijelaznog luka [25].....	31
Slika 11.	Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju [22].....	32
Slika 12.	Izvor struje za zavarivanje Castolin Xuper ARC 4000DS [30] .....	38
Slika 13.	Priprema žlijeba.....	41
Slika 14.	Redoslijed zavarivanja ispitnog uzorka.....	41
Slika 15.	Uređaj za brušenje Mecatech 250 SPI.....	45
Slika 16.	Uređaj za elektrokemijsko nagrizanje .....	46
Slika 17.	Makrostruktura zavarenog spoja od čelika X5CrNi18-10 i S355J2+N .....	47
Slika 18.	Uređaj Reichert za mjerenje mikrotvrdoće .....	53
Slika 19.	Linije ispitivanja tvrdoće.....	53
Slika 20.	Dijagram tvrdoće za uzorak S355J2+N.....	55
Slika 21.	Histogram raspodjele tvrdoće materijala S355J2+N.....	55



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Temperatura predgrijavanja pri zavarivanju nelegiranih čelika ovisno o udjelu ugljika [1] .....	4
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7] ...	7
Tablica 3. Prikaz volumnog udjela legiranih elemenata čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7] .....	7
Tablica 4. Mehanička svojstva čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9] .....	14
Tablica 5. Volumni udio legiranih elemenata čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9] .....	14
Tablica 6. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje Castolin Xuper ARC 4000DS [30] .....	39
Tablica 7. Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7] .....	39
Tablica 8. Volumni udio legiranih elemenata čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7] .....	39
Tablica 9. Mehanička svojstva visokolegiranih čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9] .....	40
Tablica 10. Volumni udio legiranih elemenata čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9] .....	40
Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala G 18 8 Mn [31] .....	40
Tablica 12. Volumni udio legiranih elemenata dodatnog materijala G 18 8 Mn [31] .....	40
Tablica 13. Parametri zavarivanja ispitnog uzorka .....	42
Tablica 14. Pojedini postupci zavarivanja .....	43
Tablica 15. Parametri brušenja .....	44
Tablica 16. Parametri poliranja .....	45
Tablica 17. Osnovni materijal X5CrNi18-10 uvećan 50x, 100x i 200x .....	48
Tablica 18. Zona utjecaja topline uvećana 50x, 100x i 200x .....	49
Tablica 19. Lice zavara uvećano 50x, 100x i 200x .....	50
Tablica 20. Linija staljivanja uvećana 50x, 100x i 200x .....	51
Tablica 21. Korijen zavara uvećan 50x, 100x i 200x .....	52
Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu S355J2+N .....	54
Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u zoni utjecaja topline .....	54

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$l_{skž}$	mm	Slobodan kraj žice
$M_s$	-	Linija pravca
$I_0$	A	Osnovna razina jakosti struje
$I_p$	A	Vršna struja
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
$T_0$	°C	Temperatura predgrijavanja
$t_1$	s	Vrijeme trajanja impulsa
$t_2$	s	Vrijeme trajanja osnovne struje
$t_3$	s	Vrijeme jednog ciklusa
$v_z$	mm/min	Brzina zavarivanja
$A$	%	Elongacija
FN	-	Feritni broj
$I$	A	Jakost struje
$k$	-	Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka
$L$	H	Induktivitet
$m$	%	Količina nataljenog materijala unutar zavara
$n$	%	Količina protaljenog osnovnog materijala unutar zavara
$Q$	l/min	Protok plina
$Q$	kJ/cm	Unesena toplina
$U$	V	Napon
$\gamma$	%	Stupanj miješanja

---

**POPIS KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
MAG	<i>Metal Active Gas</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina
WRC	<i>Welding Research Council</i> – Istraživačko vijeće za zavarivanje
ZUT	Zona utjecaja topline

---

**SAŽETAK**

Tema diplomskog rada je optimizacija tehnologije zavarivanja čelika S355J2+N i X5CrNi18-10 MAG postupkom zavarivanja.

U teorijskom dijelu obrađena je zavarljivost nelegiranih te visokolegiranih čelika, zavarivanje raznorodnih čelika, unos topline potreban za zavarivanje te MAG postupak zavarivanja.

Eksperimentalni dio rada obuhvaća provedbu zavarivanja nelegiranog S355J2+N i visokolegiriranog X5CrNi18-10 čelika MAG postupkom. Na zavarenim uzorcima su provedena ispitivanja mikrostrukture i tvrdoće te doneseni određeni zaključci.

Ključne riječi: MAG, optimizacija, raznorodni čelici, zavarivanje

---

**SUMMARY**

The topic of the thesis was the optimization of welding technology for S355J2+N and X5CrNi18-10 steels using the MAG welding process.

The theoretical part covered the weldability of non-alloyed and high-alloyed steels, welding of dissimilar steels, heat input required for welding and the MAG welding process.

The experimental part included conducting MAG welding of non-alloyed S355J2+N and high-alloyed X5CrNi18-10 steels. A series of tests were conducted on the butt-welded joints to evaluate their microstructure and hardness.

Key words: MAG, optimization, dissimilar steels, welding

## 1. UVOD

Optimizacija procesa zavarivanja različitih vrsta čelika, poput X5CrNi18-10 i S355J2+N, izuzetno je važna u industrijskim primjenama gdje su kvaliteta, čvrstoća i korozijska postojanost ključne karakteristike zavarenih spojeva. Zavarivanje ovih vrsta čelika zahtijeva posebnu pažnju zbog njihovih specifičnih kemijskih sastava i mehaničkih svojstava, jer svaki od njih ima različite zahtjeve u pogledu temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature, brzine zavarivanja i odabira zaštitnog plina.

X5CrNi18-10 je visokolegirani Cr-Ni čelik s 18 % kroma i 10 % nikla, što mu daje jako dobru korozijsku postojanost te je poželjan za primjene u kemijskoj i prehrambenoj industriji. S druge strane, S355J2+N je niskouglični čelik te sadrži manji udio legiranih elemenata kao što su silicij i mangan, koji mu omogućuju izvanrednu čvrstoću i duktilnost u odnosu na druge niskouglične čelike iz iste skupine, čineći ga pogodnim za primjenu u građevinskoj industriji.

Pravilna prilagodba parametara zavarivanja ključna je za izbjegavanje nastanka hladnih i toplih pukotina, nepotpunog protaljivanja ili oksidacije površine. Parametri kao što su jakost struje, napon, brzina zavarivanja, i vrste zaštitnog plina direktno utječu na kvalitetu zavarenog spoja. Korištenje zaštitnih plinova poput argona, ugljičnog dioksida ili njihovih mješavina, omogućuje stabilizaciju luka i minimiziranje reakcije s plinovima iz okolne atmosfere, što je osobito važno pri zavarivanju visokolegiranog čelika kao X5CrNi18-10.

Zavarivanje raznorodnih čelika predstavlja složen proces koji uključuje spajanje materijala različitih kemijskih i mehaničkih svojstava. Ovaj postupak često izaziva poteškoće zbog razlika u toplinskim svojstvima, kemijskom sastavu i mikrostrukturi, što može rezultirati kemijskom neravnotežom u zoni zavara. Glavni izazovi uključuju pojavu pukotina, povećanje sklonosti plastičnim deformacijama i smanjenje korozijske postojanosti spoja. Pravilnim odabirom dodatnog materijala i kontrolom procesa moguće je osigurati kvalitetan i trajan spoj.

## 2. NELEGIRANI ČELICI

Nelegirani čelici sadrže vrlo nizak ili minimalan sadržaj legiranih elemenata. Tako povećanje sadržaja ugljika u nelegiranim čelicima izravno utječe na njihova mehanička svojstva. Općenito, viši udio ugljika povećava čvrstoću i tvrdoću čelika, čineći ga otpornijim na deformacije. Međutim, s povećanjem sadržaja ugljika dolazi i do smanjenja duktilnosti, što uzrokuje manju savitljivost i povećava sklonost krhkom lomu. Ekvivalent ugljika koristi se za procjenu zavarljivosti čelika. Cilj je procijeniti koliki udio ugljika i drugih elemenata u čeliku utječe na njegovu sklonost otvrdnjavanju nakon zavarivanja, što može dovesti do pucanja zavarenih spojeva. [1], [2]

Problematika pri zavarivanju nelegiranih čelika s visokim ekvivalentom ugljika odnosi se na [3]:

- sklonost pucanju – visoki sadržaj ugljika ili visoki ekvivalent ugljika uzrokuje hladne pukotine ili pukotine zbog vodikovog utjecaja u zavarenom spoju. To se događa zato što martenzitna struktura nema dovoljni udarni rad loma i dolazi do pucanja pri naprezanju
- loša zavarljivost – čelici s visokim ekvivalentom ugljika zahtijevaju dodatne tehnološke mjere prilikom zavarivanja, kao što su predgrijavanje i sporije hlađenje. Time se smanjuje brzina hlađenja, čime se izbjegava stvaranje martenzitne strukture te se poboljšava konačna kvaliteta zavarenog spoja
- kontrola procesa zavarivanja – kod čelika s višim ekvivalentom ugljika, potrebno je pažljivo kontrolirati parametre zavarivanja (kao što su temperatura predgrijavanja i vrijeme hlađenja) kako bi se smanjila mogućnost stvaranja naprezanja te u konačnici pucanja.

Čelici s ekvivalentom ugljika manjim od 0,4 % smatraju se dobro zavarljivim. Ako je ekvivalent ugljika između 0,4 % i 0,6 % potrebne su posebne mjere poput predgrijavanja i kontroliranog hlađenja nakon zavarivanja. Čelici s ekvivalentom ugljika iznad 0,6 % imaju veliki rizik od pucanja te je potrebna pažljiva priprema radnih komada za zavarivanje. [3]

Ostali legirni elementi imaju ulogu [1], [2]:

- mangan – poboljšava čvrstoću, udarni rad loma i otpornost na udarce te uklanja kisik iz rastaljenog čelika. Također neutralizira štetno djelovanje sumpora
- silicij – uklanja kisik iz rastaljenog metala te poboljšava čvrstoću i povećava otpornost na oksidaciju kod visokih temperatura
- fosfor – u malim količinama povećava čvrstoću i poboljšava obradivost čelika, no velike količine fosfora čine čelik krhkim
- sumpor – poboljšava obradivost čelika jer olakšava strojnu obradu, ali smanjuje udarni rad loma i povećava rizik od pojave krhkosti
- bakar – povećava otpornost na atmosfersku koroziju
- aluminij – uklanja kisik iz rastaljenog čelika te smanjuje veličinu zrna, čime se povećava udarni rad loma i mehanička svojstva čelika
- titan – vezuje ugljik u obliku titan-karbida, čime se smanjuje rizik od stvaranja krom-karbida koji uzrokuju interkristalnu koroziju

Najvažniji element nelegiranih čelika je ugljik s udjelom između 0,1 i 0,6 %, a ostali elementi se mogu kretati unutar sljedećih granica [2]:

- Si – 0,05 % - 0,3 %
- Mn – 0,3 % - 1,5 %
- S – maksimalno 0,05 %
- P – maksimalno 0,04 %
- Al – 0,01 % - 0,05 %
- Ti – 0,01 % - 0,1 %
- Cu – maksimalno 0,3 %.

Kod zavarivanja prolaza popune (slojevi koji nisu vidljivi na površini, već se nalaze dublje unutar zavarenog spoja) mogu se javiti poteškoće zbog visokog udjela P (od 0,03 %) i S (od 0,03 %) poput pukotina, poroznosti, starenja te krhkosti materijala. Dobro zavarljivim čelicima smatraju se oni kojima je udio ugljika manji od 0,25 %. Ako je udio ugljika veći od 0,25 % tada se provode određeni postupci poput predgrijavanja materijala i kontroliranog hlađenja nakon zavarivanja kako bi se smanjila mogućnost stvaranja pukotina. [2]



## 2.1. Mjere potrebne za zavarivanje nelegiranih čelika

Kako bi se nelegirani čelici mogli kvalitetno zavariti potrebno je [2]:

- predgrijavanje prema tablici 1. Na temperaturu predgrijavanja osim % C utječe i sadržaj ostalih elemenata
- zavarivati uz veći unos topline (manja brzina zavarivanja, jača struja, veći promjer elektrode) kako bi se smanjila tvrdoća u zoni utjecaja topline te kako bi se smanjila mogućnost pojave hladnih pukotina. Ukoliko je unos topline veći, postići će se jednako djelovanje na brzinu hlađenja kao i korištenjem predgrijavanja
- oblikovati konstrukciju tako da se teži smanjenju napetosti, debljine i koncentracije naprezanja
- popustiti zaostala naprezanja kod debljih zavarenih proizvoda (Preko 20 mm) koje se provodi toplinskom obradom na 550-560 °C. Popuštanje se može provesti i mehaničkom obradom poput vibracija i eksplozije.

**Tablica 1. Temperatura predgrijavanja pri zavarivanju nelegiranih čelika ovisno o udjelu ugljika [1]**

Udio ugljika, C %	Temperatura predgrijavanja $T_0$ , °C
0,20-0,30	100-150
0,30-0,45	150-275
0,45-0,8	275-425

Tijekom zavarivanja nelegiranih čelika važno je također obratiti pažnju na odabir odgovarajućeg dodatnog materijala za zavarivanje koji je kompatibilan s osnovnim materijalom, kako bi se osigurala jednaka mikrostruktura i mehanička svojstva zavarenog spoja. Redovno čišćenje površine prije zavarivanja, kako bi se uklonile nečistoće, ulja ili oksidi, također može doprinijeti boljoj kvaliteti zavara i smanjenju poroznosti. Pravilnim pristupom i primjenom ovih mjera može se značajno povećati trajnost, sigurnost i pouzdanost zavarenih spojeva od nelegiranih čelika. [2]

## 2.2. Zavarljivost nelegiranih čelika

Nelegirani čelici odlikuju se dobrom zavarljivošću zahvaljujući niskom sadržaju ugljika i jednostavnom kemijskom sastavu, što omogućuje jednostavan postupak zavarivanja uz minimalan rizik od pojave pukotina ili drugih grešaka poput poroznosti, nedovoljne penetracije, uključaka troske ili pukotina uz pravilnu tehnologiju zavarivanja. Njihova visoka duktilnost i homogena mikrostruktura olakšavaju zavarivanje. Međutim, kod nelegiranih čelika s višim udjelom ugljika povećava se mogućnost stvaranja tvrde i lomljive martenzitne strukture u zoni utjecaja topline, što može dovesti do smanjene otpornosti na pukotine. Kako bi se osigurala kvaliteta zavara, kod ovih čelika često se primjenjuju mjere poput predgrijavanja, kontrole unosa topline tijekom zavarivanja te postupnog hlađenja zavara. Dodatno, pažljiv odabir dodatnog materijala prilagođenog kemijskom sastavu osnovnog čelika ključan je za postizanje dobrih mehaničkih svojstava zavarenog spoja. [4]

### 2.2.1. Sprječavanje krhkog loma

Krhki lom predstavlja iznenadni lom materijala koji se događa bez značajne prethodne deformacije, često dovodeći do neočekivanih i ozbiljnih posljedica.

Pojava krhkog loma povezana je sa [2]:

- svojstvom materijala (prijelazne temperature, proces starenja) – prijelazna temperatura je temperatura ispod koje materijal prelazi iz duktilnog stanja u krhko. Pri temperaturama ispod prijelazne, materijal gubi udarni rad loma i postaje sklon krhkom lomu
- stanjem radnog naprezanja jer naprezanja i načini na koji su ona raspoređena unutar materijala značajno utječu na njegovu sklonost prema nastanku loma bez prethodne plastične deformacije. Radno naprezanje odnosi se na unutarnje sile ili naprezanja koja djeluju unutar materijala kada je izložen vanjskom opterećenju
- zaostalim naprezanjima jer ova naprezanja, koja ostaju u materijalu nakon proizvodnih procesa poput zavarivanja, oblikovanja, hlađenja ili obrade, mogu smanjiti otpornost materijala na lom. Zaostalo naprezanje je naprezanje koje ostaje unutar materijala ili konstrukcije čak i nakon što vanjsko opterećenje ili utjecaj koji ga je uzrokovao više ne djeluje
- koncentracijom naprezanja koja uzrokuje stvaranje lokalnih područja unutar materijala s izrazito visokim razinama naprezanja, čak i ako je vanjsko opterećenje relativno nisko.

Ova lokalizirana naprezanja mogu dovesti do širenja pukotina te krhkog loma. Koncentracija naprezanja odnosi se na lokalno povećanje naprezanja u materijalu koje nastaje zbog promjena u geometriji

- površinskim i potpovršinskim nepravilnostima jer one djeluju kao oslabljena područja u materijalu gdje dolazi do koncentracije naprezanja, što povećava rizik od nastajanja i širenja pukotina
- niskim temperaturama jer materijali pri nižim temperaturama gube sposobnost plastične deformacije i postaju krhkiji.

Karakteristike materijala poput kemijskog sastava, starenja materijala i mikrostrukture značajno utječu na njegovu sklonost krhkom lomu. Prijelaz iz žilavog u krhko stanje je kritičan faktor. Proces starenja također mogu s vremenom promijeniti svojstva materijala, potencijalno povećavajući krhkost. Visoka vlačna naprezanja, posebno ona koja prelaze granicu tečenja materijala, mogu inicirati pukotine koje se mogu brzo širiti, dovodeći do krhkog loma. [4]

Proizvodni procesi poput zavarivanja, lijevanja ili obrade mogu stvoriti zaostala naprezanja u materijalu. Ova naprezanja, ako su vlačne prirode, mogu se kombinirati s radnim naprezanjima i doseći kritične razine, potičući širenje pukotina. Greške u zavarenim spojevima, poput poroznosti, uključaka troske, nepotpunog staljivanja ili pukotina, služe kao inicijalne točke nastanka krhkog loma. Prisutnost takvih nepravilnosti smanjuje efektivnu površinu poprečnog presjeka i dovodi do nastanka koncentracije naprezanja. Materijali općenito pokazuju povećanu krhkost pri nižim temperaturama. Radna okruženja s temperaturama ispod nule mogu smanjiti udarni rad loma materijala, čineći ga podložnijim krhkom lomu. [4]

### **2.3. Konstrukcijski čelik S355J2+N**

Čelik S355J2+N pripada među najčešće primjenjive konstrukcijske čelike. Ovaj niskouglični čelik često se koristi u građevinarstvu i strojarstvu pri izradi mostova, industrijskih strojeva te konstrukcija koje se grade u morskome okruženju poput naftnih platformi i vjetroelektrana. Čelik S355J2+N odlikuje jako dobra zavarljivost, udarni rad loma te odlična sposobnost za oblikovanje. Oznake prema normi HRN EN 10025-2:2019 [5]:

- S – konstrukcijski čelik
- 355 – 355MPa je minimalna vrijednost granice tečenja za ravni i dugi čelik debljine  $\leq 16$  mm
- J2 – udarni rad loma minimalno 27 J na  $-20$  °C
- N – normalizirani valjani čelik.

Ključni pojmovi mehaničkih svojstava i njihova značenja za određeni čelik [6]:

- granica razvlačenja ( $R_{p0,2}$ , MPa) – predstavlja granicu naprezanja između elastične i plastične zone deformacije. Pri tom naprezanju materijal se produljuje uz konstantno ili čak smanjeno naprezanje
- vlačna čvrstoća ( $R_m$ , MPa) – odnosi se na naprezanje kod kojeg se koristi maksimalna sila. Vlačna čvrstoća je veća nego granica razvlačenja i rezultira plastičnom deformacijom materijala
- elongacija ( $A$ , %) – opisuje se kao elastična konstanta materijala čija je čvrstoća veze određena strukturnim jedinicama u kristalnim ili amorfnim strukturama
- udarni rad loma ( $J$ ) – opisuje se kao količina energije koju materijal može apsorbirati prije nego što dođe do loma uslijed udarnog opterećenja.

Granica razvlačenja za čelik S355J2+N iznosi između 315 i 355 MPa što ga čini pogodnim za nosive konstrukcije u građevinarstvu i strojarstvu. Ona omogućuje čeliku da podnese visoka opterećenja bez trajne deformacije. Vlačna čvrstoća čelika iznosi između 490 i 630 MPa, što ga čini vrlo pogodnim za konstrukcije koje su izložene visokim naprezanjima. Elongacija navedenog čelika ima minimalno istezanje od 22 %. Ovime se čeliku omogućava fleksibilnost i otpornost na pojavu loma uslijed opterećenja. Tablica 2. prikazuje mehanička svojstva prema normi HRN EN 10025-2:2019 za čelik S355J2+N. [6], [7]

**Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7]**

	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A$ , %	Udarni rad loma, J
Vrijednost	315-355	490-630	22	27 (20 °C)

Volumni udio legirnih elemenata čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 prikazan je u tablici 3. [7]

**Tablica 3. Prikaz volumnog udjela legirnih elemenata čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7]**

	Volumni udio legirnih elemenata čelika S355J2+N				
	C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, %
Vrijednost	0,20	0,55	1,60	0,025	0,025

### 3. VISOKOLEGIRANI ČELICI

Visokolegirani čelici počinju se razvijati početkom 20. stoljeća te se njihov rast i razvoj bilježi još i danas. Unapređenje tehnologije doprinijelo je njihovom naglom rastu u posljednjih 40 godina. Visokolegiranim čelicima nazivaju se čelici kojima je minimalni udio legiranih elemenata iznad 5 %. Neki od legiranih elemenata su: krom, nikal, molibden, titan i dušik. Oni potpomažu u boljoj korozivnoj postojanosti, boljoj obradivosti te većoj čvrstoći i udarnom radu loma pri nižim temperaturama. [2], [8]

Visokolegirani čelici mogu se podijeliti u skupine prema strukturi materijala koja se dobiva pri hlađenju na zraku nakon procesa visokotemperaturnog zagrijavanja. To su [2], [8]:

- martenzitna skupina
- martenzitno–feritna skupina
- austenitno–martenzitna skupina
- austenitno–feritna skupina
- feritna skupina
- austenitna skupina.

Svaka skupina nosi svoje probleme prilikom zavarivanja i eksploatacije. Prilikom zavarljivosti bitna su fizička svojstva čelika jer ona utječu na ponašanje tijekom zavarivanja. [2], [8]

#### 3.1. Austenitni visokolegirani čelici

Austenitnim visokolegiranim čelicima nazivaju se čelici kojima je udio ugljika između 0,03 i 0,15 %, udio kroma između 13 i 20 %, a udio nikla između 8 i 20 %. Kod austenitnih visokolegiranih čelika mogu se dodati i legirni elementi kao što su molibden, niobij, tantal i titan u manjim količinama. Navedeni legirni elementi smanjuju sklonost nastanku interkristalne korozije. Dodatak dušika stabilizira austenitnu strukturu te povisuje čvrstoću i otpornost prema napetosnoj i rupičastoj koroziji, a krom osigurava pasivnost površinskog sloja i korozivnu postojanost. Nikal ima ulogu stabilizacije austenitne mikrostrukture i dodatno poboljšava korozivnu postojanost. [8]

Najpoznatijim predstavnikom austenitnih visokolegiranih čelika smatra se čelik X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015. Ukoliko mu se dodaje određeni udio dušika i nikla tada se proširuje područje austenita te se snižava temperatura na kojoj počinje stvaranje martenzita. Kao glavna prednost smatra se njegova otpornost prema interkristalnoj koroziji, a njegov glavni nedostatak je smanjena granica razvlačenja zato što on ima manji udio ugljika. [2]

Austenitni čelici mogu se podijeliti u dvije skupine [3]:

- čelici serije 200 kod kojih su mangan, ugljik i dušik zastupljeniji nego kod serije 300, ali je nikal u manjem udjelu nego kod serije 300
- čelici serije 300 s oznakama 304, 316, 321 i 347 i njihove kombinacije. Čelici osim brojeva mogu imati i slova u oznaci pa tako čelici sa slovom L označavaju udio ugljika do maksimalno 0,03 %. Čelici sa slovom H označuju udio ugljika do maksimalno 0,1 %. Slovo N znači da čelici sadrže do 0,2 % dušika. Dušik ujedno povećava čvrstoću te otpornost prema adheziji i rupičastoj koroziji.

Utjecaj legirnih elemenata na austenitne nehrđajuće čelike dan je u nastavku [2]:

- Cr – povećava korozijsku postojanost i oksidaciju
- Ni – povećava čvrstoću na povišenim temperaturama te povećava korozijsku postojanost
- Nb – dodaje se čeliku kako bi se vezao za ugljik i zaustavio stvaranje interkristalne korozije
- Mn – sprječava nastajanje toplih pukotina uz stvaranje manganovog sulfida
- Mo – povisuje čvrstoću kod povišenih temperatura te smanjuje korozijska svojstva
- P, S, Se – olakšavaju obradu odvajanjem čestica
- Si – bolja vatrootpornost
- Ti – dodaje se čeliku kako bi se vezao za ugljik i zaustavio stvaranje interkristalne korozije.

Austenitni čelici poznati su po svojim dobrim mehaničkim svojstvima i visokoj korozijskoj postojanosti. Visoka duktilnost daje im sposobnost istezanja prije pucanja, što im omogućuje dobro oblikovanje i istezanje bez pucanja ili loma. Sljedeće mehaničko svojstvo po kojem se ovi čelici ističu je otpornost na udarce. Odlikuje ih i dobra čvrstoća i tvrdoća, posebno prilikom dodavanja legirnog elemenata poput dušika. Tu je i otpornost na zamor što znači da dobro podnose ponavljajuće opterećenje i vibracije. Odlikuje ih i otpornost na visoke temperature te se zbog toga često koriste u okruženjima gdje su materijali izloženi visokim temperaturama, poput industrijskih peći i dijelova motora. [2]

### 3.2. Zavarljivost austenitnih visokolegiranih čelika

Austenitni visokolegirani čelici imaju dobru zavarljivost, pod uvjetom da se poštuju specifični tehnološki zahtjevi tijekom samog procesa zavarivanja. Moguće ih je zavarivati različitim elektrolučnim postupcima, kao što su TIG, MIG, REL i EPP, bez potrebe da se vrši toplinska obrada prije i poslije zavarivanja, budući da ne mijenjaju tvrdoću pri hlađenju te zadržavaju dobar udarni rad loma. [3]

Iako su dobro zavarljivi, kod austenitnih čelika, koji ne sadrže ferit (poput X5CrMnNi18-9-5, X8NiCrAlTi32-21, X2CrNiMo17-12-2 ili austenitnih čelika legiranih manganom), može doći do pukotina u zavarenom spoju i u zoni utjecaja topline. Ferit smanjuje mogućnost stvaranja pukotina, jer otapa nečistoće koje uzrokuju segregaciju i nastanak pukotina tijekom skrućivanja. S obzirom na specifična fizikalna svojstva austenitnih visokolegiranih čelika u usporedbi s ugljičnim čelicima poput 40 % većeg koeficijenta toplinskog širenja, trostruko niže toplinske vodljivosti i četiri puta većeg električnog otpora važno je kontrolirati unos topline kako bi se smanjile deformacije i rizik od toplih pukotina. [3]

U zoni utjecaja topline javljaju se sljedeće promjene [3]:

- povećanje zrna – veliki broj austenitnih visokolegiranih čelika zavaruje se u stanjima koja su žarena ili vruće valjana pa rast zrna stoga nije uobičajen, osim pri prevelikom unosu topline. Ako se osnovni materijal očvrstnuo s pomoću hladne deformacije tada se zna javiti smanjenje čvrstoće u zoni utjecaja topline koja je uzrokovana povećanjem zrna
- stvaranje ferita – stvaranjem ferita unutar zone utjecaja topline dolazi do ograničenja rasta zrna i smanjenja sklonosti nastanku toplih pukotina
- precipitacija – javlja se rizik da se ne izluče  $M_{23}C_6$  karbidi i  $Cr_2N$  nitridi te je iz tog razloga važno izbjegavati zadržavanje u temperaturnim područjima gdje se oni izlučuju (u temperaturnom području od 450-850 °C, uz granice zrna)
- vruće pukotine na granici zrna – javljaju se zbog nastanka segregacijskih nečistoća.

### 3.2.1. Izlučivanje Cr karbida

Do izlučivanja Cr karbida dolazi u području temperatura između 450-850 °C. Izlučivanje je najizraženije na 650 °C na granicama zrna. Karbidi koji su izlučeni sprječavaju dislokaciju atoma u pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane rešetke te to umanjuje istežljivost i udarni rad loma austenitne strukture. Izlučivanje Cr karbida sprječava se [2]:

- 1) legirnim elementima koji se nazivaju karbidotvorci, poput niobija, titana i tantala, koji stvaraju stabilne karbide. Oni imaju veću sklonost prema ugljiku nego krom te se stoga prvi vezuju za ugljik, a krom ostaje jednoliko raspoređen
- 2) smanjenjem udjela ugljika ispod 0,03 % jer se karbidi tada nalaze u maloj količini te je stoga nepovoljan utjecaj smanjen
- 3) gašenjem pri toplinskoj obradi na temperaturi između 1000 i 1100 °C jer tada dolazi do rastvaranja karbida te se nakon toga izvodi brzo hlađenje između 850 do 450 °C i tako se zadržava austenitna struktura bez izlučivanja kroma na granice zrna
- 4) uz mali unos topline, zavarivanjem u što hladnijem stanju kako bi se izbjeglo pregrijavanje, da temperatura između prolaza bude čim manja, do 100 °C maksimalno, te da unos topline bude čim niži.

### 3.2.2. Izlučivanje krhke faze

Uz karbide i nitride moguće je i izlučivanje intermetalne faze koja smanjuje istežljivost i korozivsku postojanost. Sigma fazama nazivaju se spojevi metala koji imaju tetragonalnu strukturu unutar koje se atomi pravilno raspoređuju. Sigma faza nije feromagnetična, a najpoznatijom sigma fazom smatra se željezo-krom faza koja sadrži oko 48 % kroma. Ukoliko je sadržaj kroma veći od 20 %, veća je i mogućnost nastanka sigma faze. [2]

Svojstva zavarenih spojeva ovise o kinetici izlučivanja sigma faze. Do pojave sigma faze dolazi i kod hlađenja spoja. Ona ne može nastati iz čistog austenita, ali njezino stvaranje je vjerojatnije u feritnoj fazi. Prilikom hlađenja sigma faza se izlučuje na temperaturi manjoj od 830 °C te na njeno stvaranje jako utječe difuzija kroma iz razloga što je potrebno povećanje sa 20 % na 48 % kroma. [2]

Sigma faza smanjuje udarni rad loma i istežljivost te korozivsku postojanost. Prilikom toplinske obrade na 1200 °C ona prelazi u austenit ili ferit, ali se kod visokih temperatura javlja pogrubljenje zrna. Krhkost sigma faze smanjuje se i prilikom kratkog zagrijavanja od 10 minuta na 1000 °C. [2]



Pri većem udjelu kroma javlja se veća mogućnost stvaranja krhke faze. Neki elementi imaju veći utjecaj na izlučivanje krhke faze od kroma, a jedino Ni i Co usporavaju izlučivanje krhke faze. [2]

### 3.2.3. Noževa korozija

Pri zavarivanju stabiliziranih čelika s dodatkom Ti i Nb, u zoni utjecaja topline dolazi do ponovnog otapanja ugljika unutar krutine, koji je bio povezan s Ti i Nb u karbide. Korozija se javlja samo prilikom ponovnog zagrijavanja na temperaturama između 500 i 700 °C. Pojava korozije javlja se u području ZUT-a koje je bilo zagrijano na temperaturi većoj od 1300 °C. U toj zoni dolazi do rastvaranja Nb i Ti karbida. Prilikom brzog hlađenja stvara se samo mali dio karbida NbC ili TiC, a ostatak ostaje u krutini. Prilikom ponovnog zagrijavanja na temperature između 500 i 700 °C zone koja je bila zagrijana na 1300 °C doći će do izlučivanja  $M_{23}C_6$  kromom bogatog karbida, koji stvara interkristalnu koroziju. Ona ima oblik oštre linije koja izgleda kao rez noža te se zbog toga naziva noževa korozija. Noževa korozija javlja se samo kod Nb ili Ti stabiliziranih čelika. Izbjegava se smanjenjem ugljika ispod 0,04 % uz dodatno stabiliziranje. [2]

### 3.2.4. Tople pukotine

S obzirom na kemijski sastav, u talini austenitnog Cr-Ni dodatnog materijala može se postići austenitna ili austenitno-feritna struktura. Za odabir austenitnog dodatnog materijala koristi se onaj čija talina sadrži između 3 i 12 % delta ferita, čime se postiže veća otpornost prema toplim pukotinama. Ukoliko se koristi potpuna austenitna struktura tada je više izgledno da će doći do stvaranja toplih pukotina. Tople pukotine možemo podijeliti na [2]:

- kristalizacijske u zoni taljenja koje se javljaju skrućivanjem zone taljenja dok se između kristala nalazi rastaljena faza
- tople pukotine u zoni utjecaja topline – dijele se na one u osnovnom materijalu i one u zoni taljenja pri zavarivanju više prolaza. U zoni utjecaja topline uz zonu taljenja tale se i niskotaljive faze koje su izlučene na granicama kristala. Kristalizacijske tople pukotine javljaju se jer je prisutan film niskotaljive faze kod granice kristala. Tijekom stezanja prilikom hlađenja dolazi do stvaranja mikropukotina na granici kristala, koje se tijekom daljnjeg hlađenja šire te se razvijaju u makropukotine

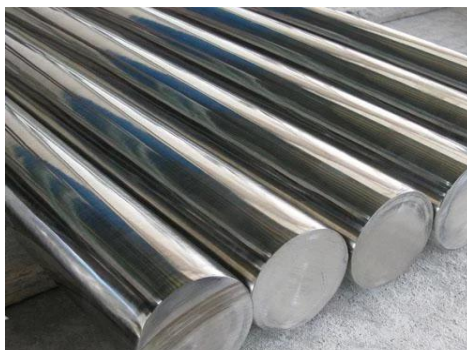
- podsolidusne pukotine koje nastaju u čvrstom stanju, nakon što je metal već skrućen, ali se još uvijek nalazi na visokim temperaturama. One se javljaju u zoni utjecaja topline, osobito na granicama kristala, gdje su prisutne niskotaljive faze. Ove pukotine nastaju zbog zaostalih naprezanja tijekom hlađenja, kada dolazi do stezanja materijala. Ako su granice kristala oslabljene prisutnošću niskotaljivih faza, naprezanja mogu uzrokovati mikropukotine. Tijekom daljnjeg hlađenja i dodatnih prolaza zavarivanja, te se mikropukotine šire, što može rezultirati razvojem makropukotina i smanjenjem kvalitete zavara.

### 3.3. Visokolegirani čelik X5CrNi18-10

X5CrNi18-10 pripada skupini visokolegiranog Cr-Ni čelika poznatoga pod trgovačkim nazivom "18/8". Ovaj je čelik pogodan za primjenu u prehrambenoj i energetskej industriji, građevinarstvu i transportu. Granica razvlačenja visokolegiranog austenitnog čelika X5CrNi18-10 obično iznosi oko 190 MPa. Vlačna čvrstoća mu iznosi između 500 i 700 MPa, što je dovoljno za primjene u kojima nisu prisutna velika naprezanja, ali je potrebna dobra korozijska postojanost. Elongacija navedenog čelika iznosi do čak 40 %, što omogućava čeliku da se značajno deformira prije loma. To mu omogućava bolju otpornost na udarce. [6], [9]

Tanke presjeke do 6 mm nije potrebno žariti nakon zavarivanja jer ono ne uzrokuje značajne promjene strukture koja bi mogla izazvati pojavu krhkosti. Za presjeke većih debljina žarenje nakon zavarivanja može biti potrebno kako bi se smanjila zaostala naprezanja, ali ono može dovesti do razvoja martenzitnih struktura koja utječe na udarni rad loma materijala. [10]

Slika 1. prikazuje čelične šipke od čelika X5CrNi18-10, a tablica 4. mehanička svojstva čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015. [6], [9]



**Slika 1. Prikaz čeličnih šipki od čelika X5CrNi18-10 [11]**

**Tablica 4. Mehanička svojstva čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9]**

	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	Udarni rad loma, J
Vrijednost	190	500-700	45	60 (20 °C)

Tablica 5. prikazuje volumni udio kemijskih elemenata čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015. [9]

**Tablica 5. Volumni udio legirnih elemenata čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9]**

	Volumni udio legirnih elemenata čelika X5CrNi18-10							
	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	P, max %	S, %	Cr, %	N, %
Vrijednost	≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	8-10,5	0,045	≤ 0,03	17,5 – 19,5	≤ 0,11

Samim time, može se zaključiti kako čelik X5CrNi18-10 ima manju minimalnu granicu razvlačenja od čelika S355J2+N što znači da će se prije trajno deformirati. Nadalje, čelik X5CrNi18-10 ima veću maksimalnu vlačnu čvrstoću pri čemu može izdržati veća naprezanja nego konstrukcijski čelik S355J2+N. Također, elongacija čelika X5CrNi18-10 puno je veća nego čelika S355J2+N što znači da se on može puno jače deformirati prije loma te da ima bolju otpornost na udarce.

#### 4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Zavarivanje raznorodnih materijala uveliko je složenije nego li zavarivanje istorodnih. Raznorodni spojevi mogu se javiti u tri slučaja [12]:

- kada se zavaruju različite vrste čelika gdje je zona taljenja različita kod barem jednog materijala, ako ne i kod oba
- kada se navaruje nelegirani ili niskolegirani čelik s pomoću zaštitnog sloja visokolegiranog čelika
- kod zavarivanja istorodnih osnovnih materijala te primjene dodatnog materijala koji ima drugi sastav.

Kada se zavaruju raznorodni materijali mora se paziti [12]:

- uvijek se dodatni materijal izabire prema svojstvima osnovnog materijala što znači da će se kod nelegiranih, niskolegiranih i srednje legiranih čelika birati onaj koji je bolje zavarljiv, a kod spoja visokolegiranog sa slabije legiranim čelikom koristi se visokolegirani dodatni materijal zato što će se nakon miješanja pojaviti krhka martenzitna zona taljenja
- međuslojne temperature i predgrijavanje moraju biti u skladu sa zahtjevima zone utjecaja oba materijala te njihove zone taljenja
- prilikom režima zavarivanja i unosa topline paziti na kompromis
- toplinsku obradu birati kompromisno.

Kvaliteta zavarenog spoja između austenitnih i drugih vrsta čelika ovisi o uvjetima eksploatacije, izboru dodatnog materijala, parametrima zavarivanja te miješanju osnovnog i dodatnog materijala. Jedan od mogućih izazova je prelazak ugljika iz austenitnog čelika u feritni čelik ili leguru s niskim sadržajem ugljika, koji se događa pri izloženosti spoja visokim temperaturama, kao pri toplinskoj obradi ili pri njegovoj eksploataciji. Ugljik može mijenjati mjesto kada postoje razlike u udjelima elemenata poput kroma, molibdena i niobija, koji stvaraju karbide. Na primjer, dugotrajna izloženost visokoj temperaturi može uzrokovati prelazak ugljika iz dijela s manjim udjelom kroma u dio s većim udjelom, što može oslabiti čvrstoću osiromašenog dijela, dok povećana količina ugljika u drugom dijelu može povećati tvrdoću i smanjiti istežljivost. [2]

Dodatni problem predstavlja toplinsko naprezanje koje nastaje zbog razlika u koeficijentima linearnog širenja između feritnog i austenitnog dijela spoja. Ova naprezanja mogu izazvati

pukotine, osobito u dijelu spoja s nelegiranim i niskolegiranim čelikom, posebno ako dolazi do čestih temperaturnih promjena. Kako bi se smanjila mogućnost toplinskog naprezanja, ključno je koristiti elektrode i dodatne materijale čiji su koeficijenti toplinskog istežanja slični onima osnovnog materijala. [2]

#### 4.1. Klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika

Slika 2. prikazuje klasifikaciju zavarenih konstrukcija izrađenih iz raznorodnih čelika, s naglaskom na strukturalne klase čelika i specifične uvjete u kojima se konstrukcije koriste. Takve konstrukcije uključuju razne kombinacije čelika koje mogu imati različita mehanička i fizička svojstva, što zahtijeva pažljivo planiranje pri odabiru materijala za zavarivanje. [13]

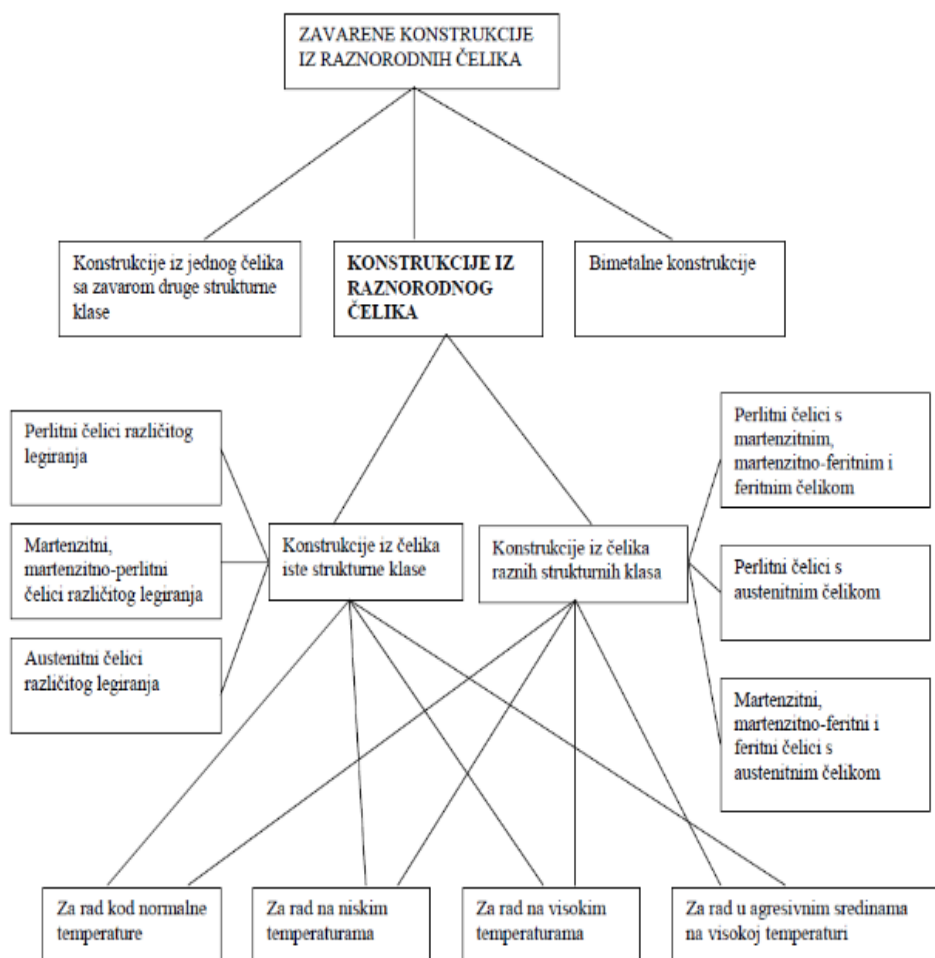
U prvom dijelu dijagrama, prikazane su osnovne vrste zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika. Ove konstrukcije uključuju tri glavne skupine: konstrukcije izrađene iz jednog čelika sa zavarom druge strukturalne klase, konstrukcije koje sadrže različite vrste čelika (konstrukcije iz raznorodnog čelika) i bimetalne konstrukcije. Bimetalne konstrukcije kombiniraju različite čelike kako bi se iskoristila specifična svojstva svakog materijala za određenu funkciju u konstrukciji. [13]

Unutar konstrukcija izrađenih od različitih vrsta čelika postoje dvije glavne kategorije: konstrukcije izrađene od čelika iste strukturalne klase i konstrukcije izrađene od čelika različitih strukturalnih klasa. Konstrukcije iste strukturalne klase uključuju čelike koji su međusobno slični po strukturi, ali mogu imati različite legure. U ovu kategoriju spadaju perlitni čelici različitog legiranja, martenzitni i martenzitno-perlitni čelici različitog legiranja, kao i austenitni čelici s različitim legirnim sastavima. Ovakve konstrukcije pogodne su za primjene u kojima nije potrebno kombinirati različite strukturalne klase, već prilagoditi specifična svojstva unutar iste klase. [13]

S druge strane, konstrukcije izrađene od čelika različitih strukturalnih klasa kombiniraju različite tipove čelika kako bi se postigla specifična svojstva. Na primjer, perlitni čelici mogu se kombinirati s martenzitnim, martenzitno-feritnim ili feritnim čelicima, ovisno o željenim karakteristikama spoja. Također, perlitni čelici mogu biti zavareni s austenitnim čelicima, dok se martenzitni, martenzitno-feritni i feritni čelici mogu kombinirati s austenitnim čelicima kako bi se postigla odgovarajuća ravnoteža između tvrdoće, otpornosti na trošenje i otpornosti na koroziju. [13]

Na donjem dijelu dijagrama prikazani su radni uvjeti za ove zavarene konstrukcije, ovisno o temperaturi i korozivnoj agresivnosti okruženja. Konstrukcije namijenjene radu pri

normalnim temperaturama predviđene su za standardne uvjete u kojima nisu prisutni ekstremni toplinski ili korozivni utjecaji. Za rad pri niskim temperaturama koriste se konstrukcije koje su otporne na krhkost i lom, što je važno za primjene u hladnim klimatskim uvjetima. Konstrukcije za visoke temperature dizajnirane su za primjene u kojima dolazi do visokih toplinskih opterećenja, pa zahtijevaju otpornost na deformacije i puzanje uzrokovano toplinom. Konačno, konstrukcije namijenjene za rad u agresivnim sredinama na visokim temperaturama moraju biti posebno otporne na koroziju i osiguravati dugotrajnu stabilnost, što ih čini pogodnima za primjene u kemijskim postrojenjima ili drugim agresivnim okruženjima. [13]



**Slika 2. Osnovni načini klasifikacije zavarenih konstrukcija izrađenih iz različitih vrsta čelika [13]**

#### **4.2. Stupanj miješanja i ograničenja kemijskog sastava osnovnog materijala kod raznorodnih čelika**

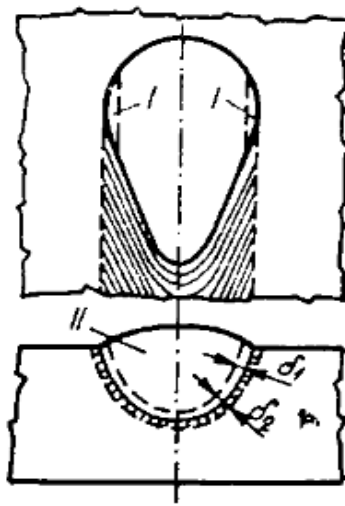
Zavarivanje raznorodnih čelika puno je kompliciranije i zahtjevnije od zavarivanja istorodnih. Razlike u zahtjevnosti samog procesa zavarivanja javljaju se jer čelici imaju različita strukturna, mehanička i fizikalno-kemijska svojstva. Samim time, ove razlike direktno utječu na to koji će se postupak i tehnika zavarivanja koristiti. Isto tako, veoma je bitno odabrati dodatni materijal koji utječe na prije opisana svojstva. Tehnologija zavarivanja koja se odabere mora doprinijeti smanjenju difuzije ugljika unutar zone staljivanja prilikom zavarivanja, minimizaciji toplinskih naprezanja, očuvanju mehaničkih svojstava te smanjenju rizika od pojave pukotina. Posebna pažnja treba se posvetiti predgrijavanju osnovnog materijala prije zavarivanja te toplinskoj obradi nakon zavarivanja. [13]

Glavni faktor koji utječe na izbor dodatnog materijala kod zavarivanja je stupanj miješanja.

Povećanjem stupnja miješanja dolazi do veće kemijske neujednačenosti u području zavara, budući da se u sastavu zavara nalazi veća količina osnovnog materijala. Zbog razlika u kemijskom sastavu, osnovni i dodatni materijal ne uspijevaju se potpuno izmiješati u prijelaznom području između njih, što je jasno prikazano u gornjem dijelu slike 3. Ovo nedovoljno povezivanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala dovodi do stvaranja zona s različitim kemijskim i mehaničkim svojstvima unutar zavarenog spoja. [14]

U području miješanja osnovnog i dodatnog materijala, kao i u zoni utjecaja topline (ZUT), može doći do segregacije elemenata, što utječe na homogenost zavara i može dovesti do pojava poput lokalnog smanjenja čvrstoće ili pojave krhkih faza. Širina  $\delta_1$  obično iznosi između 0,2 i 0,5 mm. Širina  $\delta_2$  varira između 0,1 te 0,2 mm. Tijekom zavarivanja, rastaljeni materijal djelomično prodire u okolnu zonu, čime uzrokuje promjenu njezina sastava. Donji dio slike 3. prikazuje talinu zavara kod zavarivanja raznorodnih čelika, gdje osnovni i dodatni materijal prolaze kroz proces miješanja zbog visoke temperature i prisutnosti rastaljenog materijala. U tom prijelaznom području dolazi do difuzije elemenata između materijala, što može utjecati na kemijski sastav i mehanička svojstva zavarenog spoja. [14]

Zbog različitih toplinskih koeficijenata širenja i kemijskih karakteristika čelika, formiraju se zone različite tvrdoće i udarnog rada loma unutar zavara, što može stvoriti potencijalno osjetljive točke u strukturi. Proces miješanja materijala u talini zavara mora se pažljivo kontrolirati kako bi se izbjegla neželjena segregacija i stvaranje krhkih međufaza, čime se osigurava optimalna čvrstoća i trajnost zavarenog spoja. [14]



Slika 3. Talina zavara [14]

Stupanj miješanja definira se kao količina osnovnog materijala unutar zavara, a može se odrediti s pomoću formule:

$$\gamma = \frac{n}{n+m} \quad (1)$$

pri čemu su oznake [15]:

$n$  – količina protaljenog osnovnog materijala unutar zavara, %

$m$  – količina nataljenog materijala unutar zavara, %.

Razlike u kemijskom sastavu između osnovnog i dodatnog materijala imaju značajan utjecaj na stupanj međusobnog miješanja tijekom procesa zavarivanja. Kada se taj stupanj povećava, dolazi do veće kemijske neravnoteže u zoni zavara, što može rezultirati nižom kvalitetom spoja zbog razlika u svojstvima oba materijala. U slučaju zavarivanja raznorodnih čelika, glavni izazov je upravo ta kemijska raznolikost u zoni zavara, koja može utjecati na mehaničku otpornost i sklonost zavara prema nastanku pukotina. Kod istorodnih čelika, veća podudarnost u sastavu osnovnog i dodatnog materijala smanjuje te rizike, dok je kod raznorodnih čelika potrebno pažljivo kontrolirati dubinu penetracije osnovnog materijala. [14], [16]

Ograničavanje penetracije osnovnog materijala ima ključnu ulogu za smanjenje kemijske neravnoteže u zavaru. To se postiže preciznim prilagođavanjem parametara poput struje i brzine zavarivanja, čime se smanjuje količina osnovnog materijala koji se tali i ulazi u zavar. Pažljivim podešavanjem tih parametara smanjuje se miješanje osnovnog i dodatnog materijala, osigurava



kemijska stabilnost u zoni zavara te se smanjuje rizik od nastanka pukotina ili drugih nepravilnosti u zavaru. [14], [16]

### 4.3. Izbor dodatnog materijala

Pravilnim odabirom dodatnog materijala postiže se visoka kvaliteta i dugotrajna stabilnost zavarenog spoja, što je ključno kod zavarivanja raznorodnih čelika. Razlike u kemijskom sastavu osnovnih materijala u takvim zavarenim spojevima predstavljaju izazov pri odabiru dodatnog materijala, koji može biti sličnog kemijskog sastava kao niže ili više legirani osnovni materijal, ili se može potpuno razlikovati od oba. Ključni cilj je osigurati čvrstoću zavara koja će biti najmanje jednaka čvrstoći manje legiranog čelika, uz smanjenje rizika od pojave krhkih slojeva i pukotina. [13]

Kod zavarivanja spojeva feritno-perlitnih čelika s austenitnim čelikom otpornim na koroziju, preporučuje se upotreba austenitnog dodatnog materijala. Takav odabir dodatnog materijala omogućuje postizanje zadovoljavajuće čvrstoće i strukture zavara uz smanjenje miješanja elemenata, čime se izbjegava stvaranje martenzitnih i drugih krhkih struktura koje bi mogle izazvati pukotine. Ako bi se koristio feritno-perlitni dodatni materijal na austenitnom čeliku, moglo bi doći do povećane penetracije zbog nižeg tališta i toplinske vodljivosti austenitnog čelika, što bi rezultiralo krhkim martenzitnim strukturama sklonim pucanju. [13]

Prijelazno područje između niskolegiranog i austenitnog dijela zavara može sadržavati kemijski sastav koji pogoduje stvaranju martenzita, no primjena dodatnog materijala s visokim udjelom nikla može pomoći u smanjenju širine martenzitne zone. To je vrlo važno za konstrukcije koje moraju izdržati visoke temperature. [16], [17]

Kod zavarivanja čelika s različitim točkama tališta, kao što su feritno-perlitni i austenitni čelici, bitno je da se metal zavara skrućuje na temperaturi bližoj talištu čelika s nižom točkom tališta, kako bi se izbjegle tople pukotine u zavaru. Osim toga, pažljivo odabran dodatni materijal smanjuje razlike u koeficijentima toplinskog širenja, čime se smanjuju naprezanja u spoju i povećava otpornost zavarenog spoja na deformacije. [16], [17]

Legirni elementi u dodatnom materijalu, poput nikla i kroma, doprinose poboljšanju otpornosti na koroziju i toplinskoj stabilnosti spoja. Nikal osigurava duktilnost i korozijsku postojanost, dok krom poboljšava pasivni sloj na površini zavara, smanjujući rizik od oksidacije. Upotreba legiranih dodatnih materijala također smanjuje rizik od pojave neželjenih mikrostruktura kao što su krhki intermetalni spojevi, čime se osigurava homogena struktura i otpornost spoja na dinamička opterećenja. [16]

Osim otpornosti na koroziju i toplinska naprezanja, dodatni materijal doprinosi stabilnosti mikrostrukture zavarenog spoja, posebno u prijelaznoj zoni između osnovnog i dodatnog materijala. To je važno kod spojeva koji će biti izloženi promjenama temperature i visokom radnom naprezanju, jer pravilno odabran dodatni materijal omogućuje otpornost prijelazne zone na strukturne slabosti i učinkovito sprječava nastanak pukotina. Na taj način, dodatni materijal za zavarivanje ne samo da poboljšava mehanička svojstva zavara, već povećava sigurnost, dugovječnost i ekonomičnost zavarenih konstrukcija, posebno u zahtjevnim industrijskim primjenama. [16], [17]

#### 4.4. Odabir zaštitnih plinova za zavarivanje

Za zavarivanje različitih vrsta čelika, osobito pri spajanju raznorodnih materijala, odabir odgovarajućeg zaštitnog plina ključan je za postizanje kvalitetnih zavara. Zaštitni plinovi štite rastaljeni materijal zavara od okolne atmosfere, stabiliziraju električni luk i utječu na mehanička svojstva zavara. Kod raznorodnih čelika, uobičajeni zavareni spojevi su između ugljičnih i visokolegiranih čelika ili niskolegiranih čelika, a svaka kombinacija zahtijeva specifične plinske mješavine koje odgovaraju specifičnim svojstvima materijala. [18]

Argon se često koristi kao osnovni zaštitni plin zbog svoje visoke gustoće, što omogućuje učinkovitu zaštitu zavara. Čisti argon primjenjuje se pri zavarivanju visokolegiranih čelika jer omogućava stabilan električni luk, smanjuje rasprskavanje i osigurava dobru penetraciju. Za raznorodne čelike, poput spojeva ugljičnih čelika i visokolegiranih čelika, korisno je dodati male količine drugih plinova poput CO<sub>2</sub> ili O<sub>2</sub> zbog stabilizacije električnog luka koji doprinosi ravnomjernijem taljenju dodatnog materijala i boljoj kontroli procesa. Mješavine argona i CO<sub>2</sub> (npr. 75 % Ar i 25 % CO<sub>2</sub>) omogućuju stabilan luk i smanjuju oksidaciju i pojavu poroznosti kod ugljičnih čelika. [18]

CO<sub>2</sub> se često dodaje zaštitnim plinovima pri zavarivanju ugljičnih čelika jer povećava energiju električnog luka, što rezultira većom penetracijom i povećava produktivnost. Kod zavarivanja raznorodnih materijala, posebice ako je jedan od materijala ugljični čelik, mala količina CO<sub>2</sub> može biti korisna. Međutim, preveliki udio CO<sub>2</sub> kod zavarivanja raznorodnih materijala, poput kombinacije s visokolegiranim čelikom, može uzrokovati povećanu oksidaciju i smanjiti kvalitetu zavara. [18]

Helij se koristi kod zavarivanja materijala visoke toplinske vodljivosti. Zbog visoke ionizacijske energije, helij zahtijeva veći napon za održavanje luka, ali stvara topliji luk u odnosu na argon, što je korisno pri zavarivanju materijala veće debljine. Za raznorodne čelike

često se koristi mješavina argona i helija (npr. 90 % He i 10 % Ar), koja povećava unos topline i poboljšava fuziju između različitih materijala. Mješavine bogate helijem također poboljšavaju fluidnost taline zavara, što je korisno kod zavarivanja materijala s različitim točkama taljenja [18]

Kisik se u malim količinama (1-5 %) dodaje u plinsku mješavinu s argonom kod zavarivanja čelika kako bi se poboljšala stabilnost luka i smanjilo rasprskavanje. Kod spojeva ugljičnog i visokolegiranog čelika, mješavina s 1–2 % kisika omogućuje bolju geometriju zavarenog spoja, s ravnomjernijim oblikom i glađim prijelazima, te smanjuje površinsku oksidaciju. Međutim, veći udio kisika može izazvati oksidaciju kod visokolegiranog čelika i negativno utjecati na korozivnu postojanost zavara. [18]

Vodik se ponekad koristi u malim količinama u plinskoj mješavini s argonom za zavarivanje austenitnih visokolegiranih čelika, posebno kada je cilj postići visokokvalitetnu završnu obradu zavarenog spoja. Dodavanje vodika može povećati penetraciju i poboljšati zaglađenost lica zavara, što je korisno kod debljih dijelova. Međutim, vodik može izazvati pojavu hladnih pukotina kod ugljičnih čelika, pa je njegova primjena ograničena kada je u pitanju zavarivanje raznorodnih materijala koji uključuju ugljične čelike. [18]

#### **4.5. Metalurški zahtjevi kod zavarivanja raznorodnih čelika**

Schaefflerov dijagram važan je alat u zavarivanju raznorodnih čelika, jer pomaže u predviđanju mikrostrukture zavarenog spoja na temelju kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala. Dijagram omogućava procjenu udjela ferita, austenita i martenzita u zavaru, što je od presudne važnosti za sprječavanje nastanka krhkih mikrostrukture i osiguranje mehaničke otpornosti spoja. Istovremeno, difuzijski procesi tijekom procesa zavarivanja, poput prijenosa ugljika ili drugih legiranih elemenata između raznorodnih čelika, mogu značajno utjecati na mikrostrukturu i svojstva zavarenog spoja. Pravilno razumijevanje Schaefflerovog dijagrama i kontrola difuzijskih procesa ključni su za postizanje homogenog zavarenog spoja bez neželjenih krhkih faza i zaostalih napreznja. [13]

##### **4.5.1. Difuzijski procesi**

Difuzijski procesi stvaraju jedan od glavnih izazova tijekom procesa zavarivanja. Difuzija se odnosi na prijelaz atoma kroz materijal, što značajno utječe na kvalitetu zavarenog spoja i

njegovu dugotrajnost. Procesi difuzije mogu se javiti kada se vrši zavarivanje, kada se vrši toplinska obrada i kod rada na visokim temperaturama. [13]

Prolazak kroz materijal može se odvijati putem različitih mehanizama difuzije [13]:

- površinske difuzije gdje se vrši kretanje atoma po površini
- gibanjem atoma kroz kristalnu rešetku
- kretanja atoma kroz granice kristala
- kretanje atoma kroz dislokacije i druge površinske i linijske nepravilnosti.

Ugljik pripada elementima koji su najskloniji difuziji zbog svoje male veličine atoma. Ostali elementi koji su skloni difuziji su karbidotvorci poput kroma, molibdena i vanadija. Difuzija uzrokuje zonu bogatu karbidima s reduciranom plastičnošću unutar višelegiranog materijala zato što se elementi kreću iz područja koje ima manji stupanj legiranja u područje s većim stupnjem. [13]

Ipak, kod manje legiranih materijala javlja se zona koja ima malu čvrstoću i mali udio ugljika. Proces je uspješniji ako se zavareni spoj izlaže većim temperaturama na duži vremenski period. Neovisno o prisutnosti ugljika, dušik i kisik također se kreću prema višelegiranom materijalu, čime se javlja zona bez atoma koja ima ekstremnu čistoću, što rezultira poboljšanim svojstvima materijala, uključujući povećanu korozijsku postojanost i smanjenu sklonost stvaranju neželjenih mikrostruktura. Zbog toga dolazi do smanjenja temperature rekristalizacije, koja za feritni čelik iznosi približno 500 °C. [13]

Ako se želi smanjiti prolazak ugljika potrebno je [13]:

- legirati ugljični čelik pomoću elemenata koji su zaslužni za stvaranje karbida, poput titana i niobija, koji su bolji karbidotvorci od kroma – ovi su elementi zaduženi za povezivanje ugljika u stabilni karbid te se tako može spriječiti njegov prolazak prema austenitnom dijelu
- oblagati ugljični čelik austenitnim materijalom ili pomoću materijala na bazi nikla.

#### **4.5.2. Strukturna heterogenost i Schaefflerov dijagram**

Drugi bitni faktor koji je nužno poznavati kada se zavaruju raznorodni čelici odnosi se na strukturnu raznorodnost materijala. Mehanička svojstva i pouzdanost spojeva ovise o strukturnoj raznorodnosti te se ona osigurava jedino ako u zoni zavara ne postoje oslabljena mjesta. Kako bi se to postiglo, važno je pažljivo odabrati dodatni materijal s kojim će se

zavarivati konstrukcija te se treba odrediti intenzitet kojim će se protaljivati osnovni materijal i točno procijeniti strukturu koja će nastati unutar zone zavarenog spoja. Kada se zavaruju niskolegirani zakaljivi čelici s austenitnima javljaju se dva uvjeta koja se moraju poštivati [19]:

- potrebno je pažljivo odabrati dodatni materijal kako ne bi došlo do nastanka toplih pukotina unutar austenitnog dijela zavara
- kontrola procesa difuzije elemenata, prvenstveno ugljika, iz niskolegiranog čelika prema zoni staljivanja ključna je za sprječavanje formiranja krhkih međufaza.

Tako će prvi uvjet određivati kakve će kvalitete biti dodatni materijal, a drugi u kojem će se području primjenjivati zavareni spoj. Stanje mikrostrukture koja će nastati nakon zavarivanja najlakše se ocjenjuje uz pomoć Schaefflerovog dijagrama. [19]

Schaefflerov dijagram služi kako bi se mogla odrediti mikrostruktura visokolegiranih čelika kod kojih dolazi do brzog hlađenja nakon procesa zavarivanja. On nam prikazuje kakva je mikrostruktura metala zavara, odnosno zone taljenja pri zavarivanju ili navarivanju dva raznorodna čelika. Do hlađenja depozita dolazi jako brzo pa se iz tog razloga ne koristi u osnovnom materijalu. Mikrostrukturu depozita moguće je odrediti iz kemijskog sastava koji je izražen ekvivalentom nikla i kroma. Određuje se unutar područja: austenit (A), ferit (F), martenzit (M) te kombinacijama (A+F, A+M, A+M+F i F+M). [13]

Ekvivalent nikla i kroma izračunava se prema:

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

$$Cr_{ekv} = \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo + 0,5 \times (Ta + Nb) + 2 \times \%Ti + \%W + \%V + \%Al \quad (3)$$

Dopunu Schaefflerovog dijagrama izradili su DeLong i Bystram. DeLong je poboljšao ekvivalent nikla na način da je u njegovu formulu stavio utjecaj dušika te sadržaj delta ferita pomoću feritnog broja FN. Bystram je uveo četiri linije te svaka od njih obuhvaća jedno područje (slika 4). [13]

Prvo područje javlja se kod temperatura između 500 i 900 °C te se u tom području javlja krhka sigma faza unutar osnovnog i dodatnog materijala čime se javlja povećana krhkost. Unutar austenitno-feritnog polja, čelici s udjelom sigma ferita većim od 10 % posebno su osjetljivi na promjene u tom području. [13]

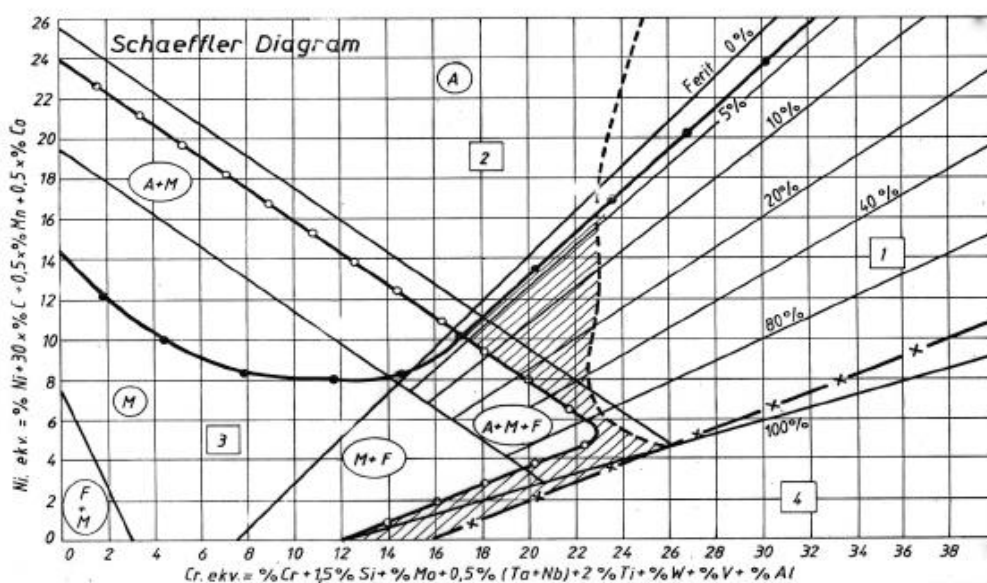
Drugo područje sadrži materijale kojima je mikrostruktura austenitna. Kod tih materijala postoji velika mogućnost stvaranja toplih pukotina pri temperaturama višima od 1250 °C ukoliko dođe do korištenja austenitnog dodatnog materijala tijekom zavarivanja. Kako bi se smanjio

intenzitet nastanka toplih pukotina važno je upotrebljavati dodatni materijal kojemu se udio ferita kreće od 3 do 10 %. [13]

Treće područje obuhvaća zavarene spojeve kojima je struktura martenzitno-austenitna ili martenzitno-feritna. Ti spojevi imaju veliku sklonost nastanku hladnih pukotina kod temperatura manjih od 400 °C. Kako bi se eliminirao problem hladnih pukotina potrebno je predgrijavati i naknadno žariti. [13]

Četvrto područje sastoji se od jako malog udjela ugljika. Kod temperatura viših od 1100 °C javlja se izniman rast kristalnih zrna, a kao rezultat dolazi do pojave pukotina unutar zavara i u ZUT-u. [13]

Slika 4. prikazuje linije koje označavaju udio feritne i austenitne faze te sva opisana prijelazna područja između različitih mikrostruktura. Dijagram na slici ilustrira međusobni odnos ekvivalentnog sadržaja kroma i nikla, na temelju čega se može predvidjeti fazni sastav i struktura zavarenog spoja. [13]



**Slika 4. Prikaz Schaefflerovoga dijagrama dopunjenog DeLongom i Bystramom [13]**

Metal zavara bi se trebao nalaziti unutar šrafiranog područja zato što se to područje smatra područjem optimalnog sastava spoja.

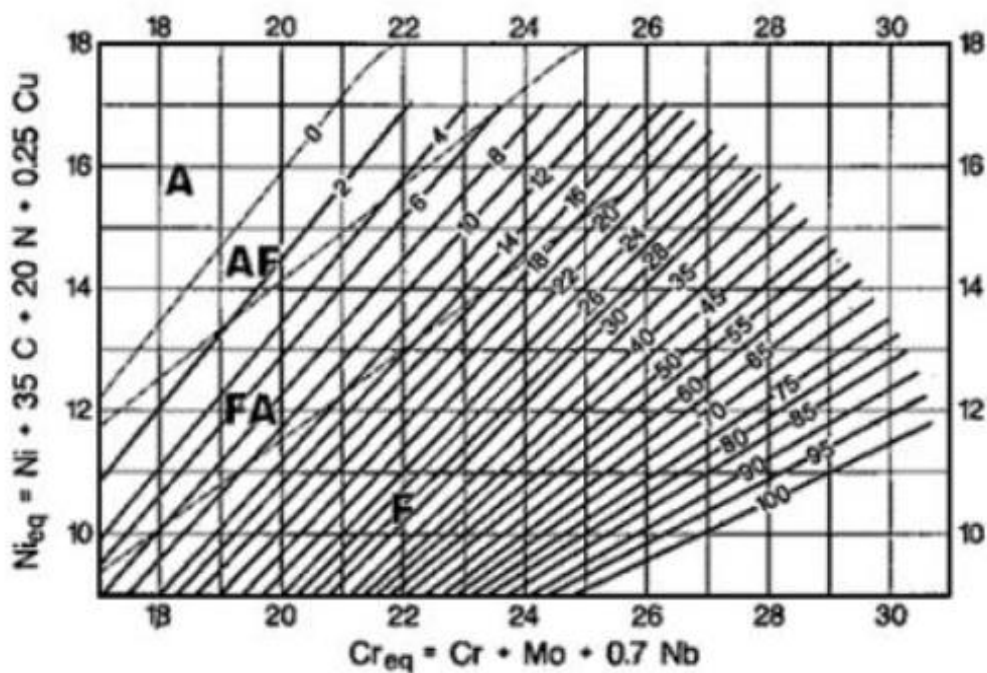
Veliki broj istraživača pokušao je utvrditi kako utječu alfa-geni i gama-geni elementi na povećanje točnosti Schaefflerovog dijagrama. Tako se 1988. godine objavljuje WRC dijagram koji je unaprijeđena verzija Schaefflerovoga zato što on preciznije prikazuje sadržaj alfa-faze (FN). Kasnije se javlja dopuna WRC dijagrama tako što se dodao i utjecaj bakra ekvivalentu nikla pomnožen s 0,25. WRC ima više glavnih značajki, od kojih su najbitnije [13]:

- ima drugačije udjele nekih elemenata kada se izračunava ekvivalent nikla i kroma
- preciznije određuje ferit (od 0 do 100 FN)
- koristi se za čelike kojima je udio mangana maksimalno 10 %, molibdena 3 %, dušika 0,2 % te silicija 1 %
- koristi se za područja kod kojih je udio ekvivalenta kroma između 17 i 31 %, a nikla između 9 i 18 %.

WRC dijagram namijenjen je za korištenje u područjima koja imaju povećani ekvivalent kroma i nikla te se stoga mora ugraditi u Schaefflerov dijagram kako bi se mogla provesti analiza.

Dijagram sa svim opisanim svojstvima prikazan je na slici 5. Na njemu se vidi bakar pomnožen s 0,25 kao što je prije opisano te drugačije udjele elemenata nego kod Schaefferovog dijagram.

[13]

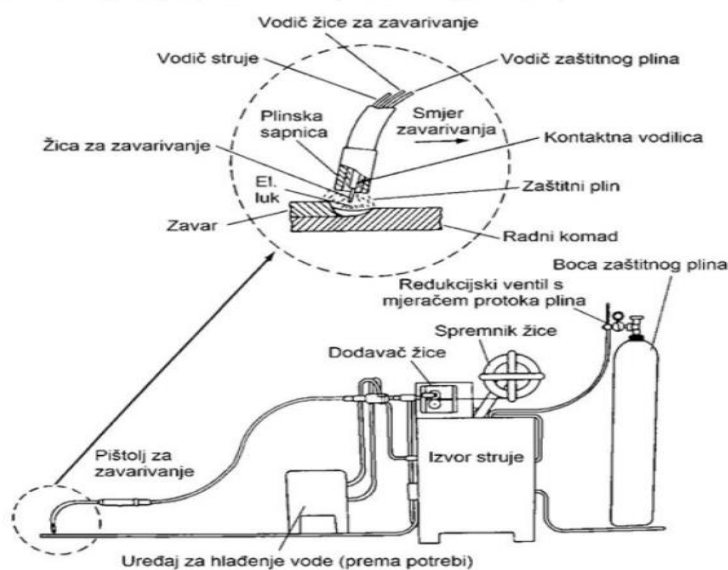


Slika 5. WRC dijagram [13]

## 5. MAG ZAVARIVANJE

Prilikom MAG (engl. *Metal Active Gas*) zavarivanja, električni luk se uspostavlja između taljive žice, koja istovremeno služi kao elektroda i dodatni materijal, te radnog komada. Dodatni materijal u obliku žice kontinuirano se dovodi kroz sustav za dovod žice i najčešće je spojen s pozitivnim polom izvora struje. Proces zavarivanja izvodi se unutar zaštitne atmosfere plinova koji sprječavaju interakciju rastaljenog metala zavara s lokalnom atmosferom. Ako se koriste inertni plinovi, poput argona ili helija, postupak se naziva MIG (engl. *Metal Inert Gas*) zavarivanje, dok je za upotrebu aktivnih plinova, kao što je ugljični dioksid ili njegove mješavine, postupak poznat kao MAG. U oba slučaja koristi se ista oprema; glavna razlika leži u izboru plina za zaštitu zavara, koji utječe na konačna svojstva i kvalitetu spoja. Žica se dodaje unutar električnog luka s pomoću sustava za dovod žice kroz fleksibilno crijevo i pištolj. [20]

Slika 6. prikazuje shematski prikaz opreme za MIG/MAG postupak zavarivanja.



Slika 6. Shematski prikaz opreme za MIG/MAG postupak zavarivanja [21]

MAG postupak zavarivanja ima brojne prednosti koje ga čine izuzetno upotrebljavanom postupkom. Prvo, može se koristiti za zavarivanje svih vrsta materijala, što mu daje široku primjenu u industriji. Također, pruža širok raspon načina prijenosa materijala, prilagođenih posebnim zahtjevima zavara. [21]

Uz to, kod ovog postupka zavarivanja postoji veliki broj različitih parametara koje je moguće prilagođavati, čime se osigurava optimalna kvaliteta za različite uvjete. MAG zavarivanje



moгуće je izvoditi u svim položajima, što ga čini svestranim i pogodnim za različite uvjete rada. Pogodno je za rad u radionici i na terenu, pružajući fleksibilnost u različitim radnim okruženjima. [21]

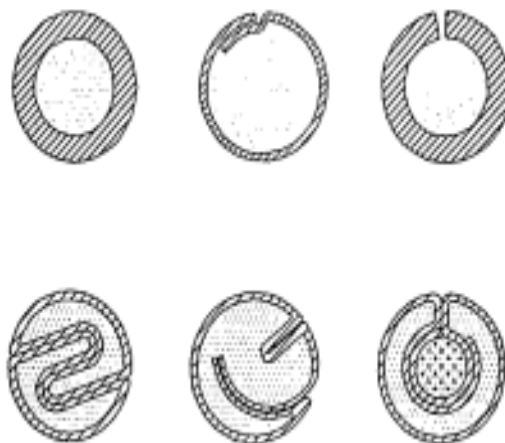
Moguća je upotreba različitih plinskih mješavina koje poboljšavaju kvalitetu zavora, a moguća je i upotreba praškom punjene žice za specifične primjene poput zavarivanja na otvorenom te zavarivanja debljih materijala. Postupak nudi i veliki izbor debljina dodatnog materijala, omogućujući prilagodbu različitim debljinama radnog komada. MAG zavarivanje ima i visoku mogućnost automatizacije i robotizacije, što ga čini idealnim za modernu industrijsku proizvodnju i povećanje produktivnosti. [21]

MAG zavarivanje ima i određene nedostatke. Jedan od problema je osjetljivost na vremenske uvjete, jer vjeter može dovesti do pogrešaka u zavaru ometanjem protoka zaštitnog plina. Ako parametri i tehnika rada nisu pravilno određeni, postoji veća vjerojatnost za pojavu grešaka. [21]

U MAG zavarivanju mogu se pojaviti i neke specifične pogreške u metalu zavora. Poroziteti primjerice, nastaju zbog nepravilne tehnike rada, prisutnosti nečistoća, neodgovarajućeg protoka plina ili niske kvalitete osnovnog ili dodatnog materijala, što utječe na konačnu kvalitetu zavora. Naljepljivanje, koje nastaje zbog loše tehnike ili “bježanja” taline, također je česta greška u metalu zavora. Štrcanje, uzrokovano neodgovarajućim parametrima, zahtijeva dodatno čišćenje, što može produžiti vrijeme i povećati troškove obrade zavarenog spoja nakon zavarivanja. [21]

### **5.1. Dodatni materijal za zavarivanje**

Tijekom MIG/MAG zavarivanja najčešća je upotreba punih žica promjera između 0,6 i 2,4 mm. Žice izrađene od čeličnog materijala su pobakrene kako bi se stvorila zaštita od korozije. Osim navedenih žica česta je uporaba i žica punjenih praškom. Slika 7. prikazuje presjeke različitih vrsta žica punjenih praškom. One se mogu koristiti uz primjenu zaštitnog plina, ali postoje i one koje same imaju mogućnost stvaranja zaštitne atmosfere tijekom propadanja jezgre te njima nije potrebna zaštita plina. [22]



Slika 7. Prikaz različitih presjeka praškom punjene žice [22]

## 5.2. Prijenos metala unutar električnog luka

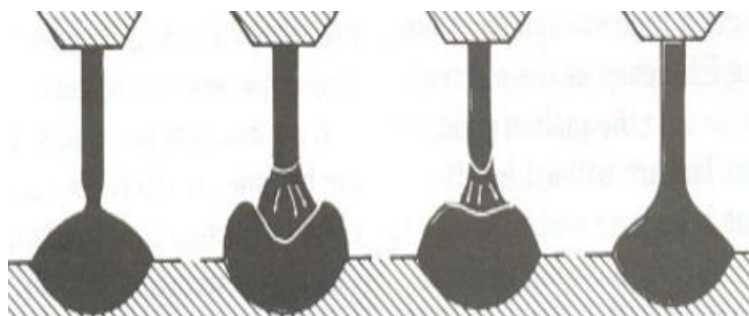
Proces prijenosa kapljica metala s vrha elektrode kroz električni luk do zavara ključan je za kvalitetu spoja. Parametri zavarivanja, poput vrste zaštitnog plina, jakosti struje i polariteta, omogućuju prilagodbu prijenosa kapljica dodatnog materijala prema specifičnim zahtjevima, što pomaže pri postizanju željene kvalitete zavara. [21], [23]

Vrsta prijenosa metala ovisi o parametrima poput jakosti struje, mješavine zaštitnog plina, polariteta i napona luka. Metal se može prenositi s pomoću slobodnog leta kapljice ili s pomoću premošćivanja. Prijenos premošćivanjem uključuje prijenos s pomoću kratkih spojeva i s pomoću mješovitog luka, dok prijenos slobodnim letom uključuje prijenose štrcajućeg i impulsnog luka. Mješoviti i štrcajući luk te prijenos kratkim spojem svrstavaju se u prirodni prijenos metala, dok impulсни prijenos spada u kategoriju kontroliranog prijenosa metala. [21], [23]

### 5.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Tijekom prijenosa metala kratkim spojevima dolazi do kratkih spojeva između elektrode i osnovnog metala što uzrokuje taljenje žice. Ovaj način prijenosa metala nastaje pri niskim strujama između 50 i 170 A i naponima između 13 i 21 V za žicu promjera 1,2 mm. Zavarivanje se odvija pod zaštitom CO<sub>2</sub> ili mješavine CO<sub>2</sub>, argona i kisika. Ovaj prijenos metala rezultira malim unosom topline te se dodatni materijal prenosi s pomoću fizičkog kontakta elektrode i taline. Slika 8. prikazuje prijenos metala s pomoću kratkih spojeva koji se odvija ciklički. Prvo dolazi do približavanja žice talini zavara. Tada dolazi do kontakta vrha žice i taline zavara te

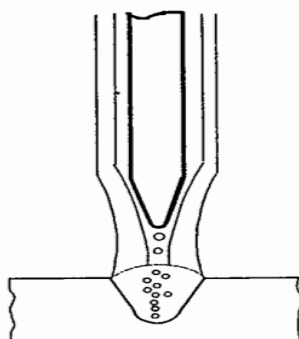
uslijed velikog otpora dolazi do otkidanja vrha žice te se uspostavlja električni luk i ona se opet pomiče prema talini zavara. [22]



Slika 8. Prijenos metala pomoću kratkih spojeva [21]

### 5.2.2. Prijenos metala pomoću štrcajućeg luka

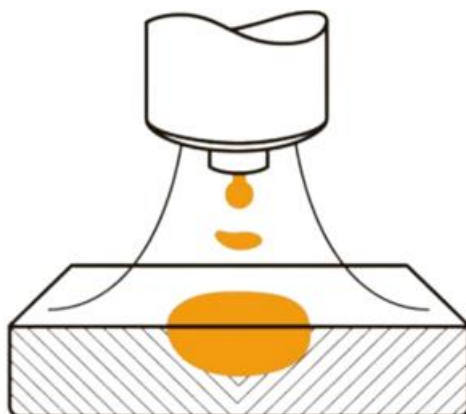
Ovaj prijenos metala karakterizira slobodan let sitnih kapljica iz vrha elektrode kroz električni luk prema radnom komadu, bez dodira između vrha elektrode i osnovnog metala tijekom procesa zavarivanja. To znači da se kapljice metala odvajaju i usmjeravaju prema radnom komadu pod utjecajem gravitacijske sile unutar električnog luka, prije nego vrh elektrode dođe u kontakt s radnim komadom. Za ovakav prijenos metala potrebna je visoka energija, kako bi se postigle dovoljne elektromagnetske sile koje otkidaju kapljice i smanjuju površinsku napetost metala, čime se omogućuje stvaranje i prijenos malih kapljica metala. Naponi koji se koriste kreću se između 24 i 40 V, a struja od 200 do 600 A. Slika 9. prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom koji zahtijeva visoku vrijednost struje i napona kako bi se stvorio stabilan luk. Rastaljeni metal odvaja se u malim, visokofrekventnim kapljicama koje „štrcaju“ kroz luk. Te male kapljice kontinuirano se odvođe iz vrha žice u talinu zavara, bez dodira s osnovnim metalom što omogućava stabilan prijenos metala, s manje rasprskavanja. [21], [23]



Slika 9. Prikaz prijenosa metala pomoću štrcajućeg luka [22]

### 5.2.3. Prijenos metala pomoću prijelaznog luka

Ovaj način prijenosa metala kombinira slobodni let kapljica uz povremeni kratki spoj. Proces započinje formiranjem velike kapljice na vrhu žice, te se ona pod utjecajem sila unutar luka odvoji i pada u rastaljeni metal bez direktnog dodira s osnovnim materijalom. Međutim, u nekim uvjetima kapljica se može povećati toliko da dodirne talinu, što dovodi do kratkog spoja. Za prijenos s velikim kapljicama potrebno je primijeniti veću struju (170-235 A) te napon (oko 22-25 V), prilagođeno promjeru žice od 1,2 mm. Takve postavke dovode do stvaranja većih kapljica te se one otkidaju na nepravilne načine, što često rezultira rasprskavanjem i nepredvidivim kratkim spojevima. Zbog ove nestabilnosti, prijenos metala u prijelaznom luku zahtijeva dodatnu kontrolu i najprikladniji je za horizontalne položaje zavarivanja. Također, nepravilnosti u kvašenju taline mogu uzrokovati nepotpun provar, stvaranje pukotina te neravan, izbrazdan izgled zavara. Slika 10. prikazuje prijenos metala s pomoću mješovitog luka opisan na početku. [21], [24]



Slika 10. Prijenos metala pomoću prijelaznog luka [25]

### 5.2.4. Impulsni prijenos metala

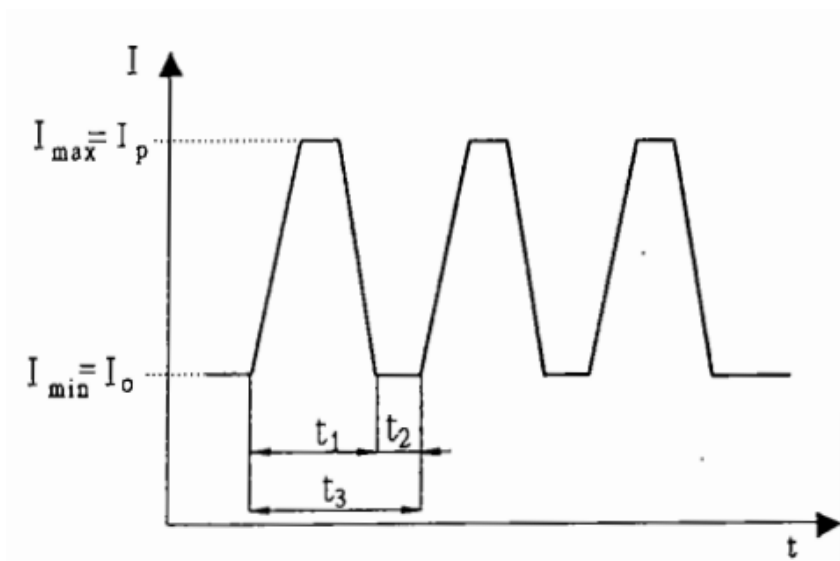
Kod ove vrste prijenosa metala, prosječna struja za zavarivanje ostaje ispod kritične vrijednosti koja bi uzrokovala nestabilan prijenos metala s velikim kapljicama. Prijenos je reguliran moduliranjem struje koja varira između osnovne, slabije struje i vršne struje koja dovodi do odvajanja kapljice. Osnovna struja osigurava stabilnost luka, a visina te trajanje impulsa omogućuju da se premaši kritična struja, čime se osigurava da se odvoji po jedna kapljica tijekom svakog impulsa. [22]

Oblik impulsa može biti sinusoidalni, trokutasti ili četvrtasti, pri čemu četvrtasti oblik omogućava bolju kontrolu procesa. Na ovaj način postiže se prijenos pomoću štrcajućeg luka

s niskom prosječnom vrijednošću struje, što smanjuje ukupan unos topline tijekom zavarivanja.

[22]

Za postizanje ovog tipa prijenosa potrebno je precizno uskladiti više parametara, što je danas pojednostavljeno korištenjem elektronički programiranih uređaja koji automatski prilagođavaju parametre uvjetima tijekom procesa zavarivanja. Pri navedenom prijenosu metala, struje se kreću između 250 i 650 A kod vršne struje, a između 20 i 50 A kod osnovne razine. Na slici 11. prikazana je promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju. [21]



Slika 11. Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju [22]

Pri čemu su oznake [12]:

- $I_0$  – osnovna razina jakosti struje, A
- $I_p$  – vršna struja, A
- $t_1$  – vrijeme trajanja impulsa, s
- $t_2$  – vrijeme trajanja osnovne struje, s
- $t_3$  – vrijeme jednog ciklusa, s.

### 5.3. Parametri kod zavarivanja

MAG zavarivanje koristi parametre koji su važni za kvalitetu zavarenih spojeva. Parametri su dani i opisani u nastavku. [26]

- jakost struje obično iznosi između 120 i 300 A te je povezana s brzinom kojom se dovodi žica. Određena je vrstom i debljinom osnovnog materijala koji se treba zavariti, oblikom spoja te položajem i promjerom žice koja se koristi za zavarivanje. Kako jakost struje raste, tako se povećava i penetracija u osnovni metal [26]
- napon električnog luka ovisi o visini električnog luka te utječe na njegovu širinu. Povećanjem napona produžuje se električni luk, što rezultira širim zavarem, ali s manjom dubinom penetracije [26]
- slobodan kraj žice odnosi se na segment žice koji se proteže od izlaza iz kontaktne vodilice pa sve do mjesta gdje započinje električni luk. Povećanjem slobodnog kraja, električni otpor raste, što uzrokuje pojačano zagrijavanje žice. Ako je sapnica previše blizu, može se onečistiti i poremetiti strujanje zaštitnog plina, čime se povećava mogućnost ulaska zraka u zonu zavarivanja [26]
- kako se povećava induktivitet, tako je učestalost formiranja kapljica sve manja kada je u pitanju prijenos metala uz pomoć kratkih spojeva. Induktivitet određuje koliko brzo raste jakost struje odmah nakon što dođe do kratkog spoja. On se koristi samo pri prijenosu metala kratkim spojevima [26]
- zaštitni plin ima ključnu ulogu u stabilnosti električnog luka, obliku zavara te brzini zavarivanja. Njegova primarna funkcija je zaštita zone zavara od štetnih utjecaja atmosferskih plinova. Protok zaštitnog plina se prilagođava promjeru žice, a često se izračunava množenjem promjera žice s vrijednošću između 10 i 15. S porastom jakosti struje zavarivanja, potrebno je povećati i protok zaštitnog plina [26]
- brzina zavarivanja ima značajan utjecaj na kvalitetu i geometriju zavara. Povećanje brzine može smanjiti unos topline, što dovodi do tanjeg zavarenog sloja i manjeg rastaljenja osnovnog materijala. Međutim, prekomjerna brzina može uzrokovati nedovoljno taljenje i smanjiti kvalitetu spoja. [26]

#### 5.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Kod MAG postupka zavarivanja, zaštitni plin ima ulogu stvaranja zaštitne atmosfere oko zavarenog spoja, čime se sprječava ulazak kisika i drugih neželjenih plinova iz zraka koji bi mogli kontaminirati rastaljeni metal zavara. Na visokim temperaturama, metali brzo reagiraju s kisikom stvarajući okside i u manjoj mjeri nitrata, što može dovesti do poroznosti, pukotina i smanjene otpornosti zavara. [27]

Argon je kemijski inertan plin koji ne reagira s rastaljenim metalom zavara. To ga čini pogodnim za stvaranje stabilne zaštitne atmosfere koja minimizira oksidaciju i omogućava stabilan prijenos metala. Argon se često koristi za zavarivanje metala visoke površinske napetosti, što pomaže u održavanju stabilnosti luka i smanjenju gubitka legiranih elemenata tijekom zavarivanja. [24]

Ugljični dioksid ( $\text{CO}_2$ ), iako uglavnom inertan pri sobnoj temperaturi, pokazuje aktivna svojstva na visokim temperaturama tijekom zavarivanja. Unutar električnog luka može doći do razdvajanja na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik, koji zatim stupa u reakciju s rastaljenim metalom i doprinosi većoj penetraciji.  $\text{CO}_2$  omogućuje lakši prijenos metala kratkim spojevima, ali može uzrokovati povećano rasprskavanje i oksidaciju zavara. Kako bi se smanjilo rasprskavanje i olakšala kontrola zavarenog spoja,  $\text{CO}_2$  se često miješa s argonom. Mješavine  $\text{CO}_2$  i argona stvaraju dobar kompromis između penetracije i kontrole taline, omogućavajući pravilnije hlađenje i smanjenje grešaka u zavaru poput poroznosti i nečistoća.  $\text{CO}_2$  zahtijeva čistoću od minimalno 99,5 % do 99,7 % i skladišti se pod visokim tlakom (70-100 bar), a koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika, gdje je ekonomičan i osigurava željenu kvalitetu zavara. [24]

#### 5.5. Unos topline

Unos topline prilikom zavarivanja je bitan faktor koji utječe na mehanička svojstva, izgled, geometriju i postojanost zavarenog spoja na koroziju. Nizak unos topline može povećati rizik od pojave hladnih pukotina, dok previsoki unos topline može dovesti do grubog zrna, smanjenog udarnog rada loma i u nekim slučajevima do pojave toplih pukotina. [17]

Unos topline prilikom zavarivanja predstavlja količinu energije koja se prenosi na materijal tijekom procesa zavarivanja i ključan je za postizanje kvalitetnog zavarenog spoja, očuvanje mehaničkih svojstava materijala i regulaciju strukture u zoni utjecaja topline. Ovisi o parametrima kao što su struja zavarivanja, napon luka, brzina zavarivanja te efikasnost prijenosa topline, koja se razlikuje ovisno o odabranom postupku zavarivanja. [28]

Zona utjecaja topline je područje osnovnog materijala koje se zagrijava tijekom zavarivanja, ali se ne tali. Ovdje dolazi do promjene mikrostrukture materijala, a ovisno o unosu topline, te promjene mogu biti povoljne ili nepovoljne. Prevelik unos topline povećava veličinu zrna, što može smanjiti čvrstoću i otpornost materijala, dok kontrolirani unos omogućava održavanje željenih svojstava. Kod materijala poput visokolegiranih čelika ili aluminija, prekomjeren unos topline može izazvati ozbiljne probleme, uključujući pukotine ili deformacije. [28]

Pravilno odabrani unos topline osigurava ravnotežu između dovoljne energije za kvalitetan spoj i očuvanja strukture i svojstava osnovnog materijala. Unos topline nije samo tehnički parametar već ima ključan utjecaj na ekonomičnost procesa zavarivanja. Prevelik unos povećava troškove zbog deformacija i dodatnih popravaka, dok nedovoljan unos topline zahtijeva višestruke prolaze ili ponovno zavarivanje. [28]

Formula za izračun unosa topline prema normi HRN EN 1011-1:2009:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot \frac{60}{1000} \quad (4)$$

Gdje je [29]:

$Q$  – unesena toplina, J/mm

$k$  – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka

$U$  – napon zavarivanja, V

$I$  – struja zavarivanja, A

$v$  – brzina zavarivanja, mm/s.

Napon i struja glavni su izvori energije u procesu zavarivanju. Viši napon povećava snagu luka, dok veća struja generira više topline. Kombinacija ta dva parametra omogućava kontrolu temperature u zoni zavora, a time i distribuciju topline. Napon i struja ovise o debljini materijala, položaju zavarivanja i korištenoj metodi, i nužno ih je uskladiti s ostalim parametrima kako bi se postigao željeni unos topline. [29]

Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka predstavlja omjer topline koja se učinkovito prenosi u materijal u odnosu na ukupno generiranu toplinu. Učinkovitost ovisi o načinu zavarivanja: kod MIG/MAG zavarivanja ona iznosi 0,8, dok je kod TIG zavarivanja obično 0,6. [29]

Brzina zavarivanja označava brzinu kojom se elektroda pomiče tijekom zavarivanja. Izražava se u milimetrima po sekundi (mm/s). Veća brzina zavarivanja smanjuje unos topline, dok sporija brzina povećava količinu energije koja se prenosi u materijal. [29]



### 5.5.1. Utjecaj unosa topline na svojstva zavara

Visoki unos topline stvara probleme kao što su [29]:

- oksidacija površine nehrđajućeg čelika - visoki unos topline može dovesti do oksidacije površine, smanjujući korozijsku postojanost. Kod prevelikog unosa topline može doći do gubitka kroma na površini, što narušava korozijsku postojanost
- grubozrnata mikrostruktura u ZUT-u - visoki unos topline uzrokuje sporije hlađenje i rast zrna u ZUT-u na strani ugljičnog čelika, smanjujući udarni rad loma i otpornost na lom zavarenog spoja
- omekšanje ZUT-a - visoki unos topline može uzrokovati omekšavanje ZUT-a, čime se smanjuje čvrstoća zavarenog spoja i povećava njegova osjetljivost na deformacije
- pojava toplih pukotina - veliki unos topline povećava mogućnost stvaranja toplih pukotina zbog prisutnih naprezanja tijekom hlađenja zavara, osobito u području spoja dvaju različitih materijala.

Niski unos topline stvara probleme kao što su [29]:

- nedovoljna fuzija – materijali se na spoju ne rastale u potpunosti, što dovodi do slabog i nepouzdanog zavarenog spoja
- krhka martenzitna struktura – brzo hlađenje s niskim unosom topline stvara tvrdi i krhku martenzitnu strukturu u ZUT-u, čineći zavareni spoj osjetljiv na pukotine
- pojava hladnih pukotina – kod premalog unosa topline može doći do stvaranja hladnih pukotina u ZUT-u na strani ugljičnog čelika zbog prisutnih zaostalih naprezanja i mogućnosti prisutnosti vodika
- visoka tvrdoća u ZUT-u – nizak unos topline dovodi do brzog hlađenja, što može uzrokovati visoku tvrdoću u ZUT-u na strani ugljičnog čelika. To povećava rizik od krhkosti i može dovesti do pucanja zavara pod opterećenjem
- poroznost - nizak unos topline može spriječiti oslobađanje plinova iz zavara, uzrokujući poroznost koja smanjuje čvrstoću spoja i otpornost na opterećenje.

Visok i nizak unos topline prilikom zavarivanja uzrokuju različite probleme koji mogu ozbiljno utjecati na kvalitetu zavarenog spoja i mehanička svojstva materijala. Visoki unos topline često rezultira toplinskim deformacijama zbog neravnomjernog širenja i skupljanja tijekom procesa hlađenja. Ove deformacije mogu zahtijevati dodatne korake nakon zavarivanja, čime se povećavaju vrijeme i troškovi proizvodnje. Osim toga, zavari izvedeni s visokim unosom topline često imaju smanjenu otpornost na zamor zbog zaostalih naprezanja, što ih čini

podložnijima pucanju kod cikličkih opterećenja. Kod legiranih čelika, visoki unos topline može dovesti do gubitka legirnih elemenata, narušavajući kemijski sastav i korozivnu postojanost. Također, sporije hlađenje uzrokuje neravnomjernu raspodjelu legirnih elemenata na granicama zrna, što dodatno slabi mikrostrukturu i povećava rizik od pukotina. [29]

S druge strane, nizak unos topline također ima brojne nedostatke. Nedovoljna količina topline često dovodi do loše penetracije zavara, zbog čega spoj ostaje slab i nepouzdan. Također, postoji povećani rizik od nepovezanosti između zavarenih slojeva (naljepljivanja) ili između zavara i osnovnog materijala. Brzo hlađenje koje prati nizak unos topline može uzrokovati pojavu mikropukotina zbog brzog skupljanja materijala. Takve pukotine, iako male, značajno smanjuju ukupnu čvrstoću spoja. Osim toga, brzo hlađenje negativno utječe na plastičnost materijala, čineći ga krhkim i osjetljivijim na mehanička opterećenja. Kod niskog unosa topline može biti teško pravilno oblikovati zavaren spoj, što dovodi do nepravilnosti poput neravnina koje dodatno smanjuju mehanička svojstva i otpornost zavarenog spoja. [29]

I visoki i niski unos topline nose rizike koji zahtijevaju pažljivu kontrolu procesa zavarivanja. Pravilna regulacija parametara ključna je za izbjegavanje ovih problema, omogućujući postizanje optimalne kvalitete zavarenih spojeva uz očuvanje mehaničkih svojstava materijala. [29]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom djelu rada provedeno je sučeljno zavarivanje ploče od visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 s pločom od konstrukcijskog čelika S355J2+N. Ploče su zavarene MAG postupkom zavarivanja. Na ispitnom uzorku provedena su ispitivanja makroanalize, mikroanalize te mjerenje tvrdoće. Cilj ovog rada bio je ispitati prikladnost i kvalitetu zavarivanja raznorodnih čelika. Također je bilo potrebno analizirati zavaren spoj ispitnog uzorka koristeći navedena ispitivanja kako bi se utvrdila njegova struktura, svojstva te eventualne nepravilnosti, s ciljem utvrđivanja njegove prikladnosti za praktičnu primjenu.

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 6.1. Izvor struje

Izvor struje koji se koristio kod zavarivanja bio je Castolin Xuper ARC 4000DS. Izvor struje za zavarivanje je prikazan na slici 12.



Slika 12. Izvor struje za zavarivanje Castolin Xuper ARC 4000DS [30]

U tablici 6. prikazane su tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje Castolin Xuper ARC 4000DS poput struje, napona zavarivanja, intermitencije, napona praznog hoda, klase izolacije, zaštite, dimenzija te mase.

**Tablica 6. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje Castolin Xuper ARC 4000DS [30]**

Struja za zavarivanje, A	3 x 400
Napon za zavarivanje, V	3–400
Intermitencija, A	40 % d.c. 400
	60 % d.c. 360
	100 % d.c. 320
Napon praznog hoda, V	71
Klasa izolacije	CE S
Zaštita	IP 23
Dimenzije v/d/š, mm	510 x 300 x 706
Masa, kg	36,45

## 6.2. Osnovni i dodatni materijal te zaštitni plin

U tablici 7. su prikazana mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355J2+N koji je ujedno i osnovi materijal prema normi HRN EN 10025-2:2019, a u tablici 8. je prikazan kemijski sastav čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019.

**Tablica 7. Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7]**

	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	Udarni rad loma, J
Vrijednost	315-355	490-630	22	27 (-20 °C)

**Tablica 8. Volumni udio legirnih elemenata čelika S355J2+N prema normi HRN EN 10025-2:2019 [7]**

	Volumni udio legirnih elemenata čelika S355J2+N				
	C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, %
Vrijednost	0,20	0,55	1,60	0,025	0,025

Nadalje, u tablici 9. navedena su mehanička svojstva visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 koji je isto tako osnovni materijal, a u tablici 10. prikazan je kemijski sastav visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015.

**Tablica 9. Mehanička svojstva visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088-2:2015 [9]**

	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	Udarni rad loma, J
Vrijednost	190	500-700	45	60 (20 °C)

**Tablica 10. Volumni udio legirnih elemenata čelika X5CrNi18-10 prema normi HRN EN 10088- 2:2015 [9]**

	Volumni udio legirnih elemenata čelika X5CrNi18-10							
	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	P max, %	S, %	Cr, %	N, %
Vrijednost	≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	8-10,5	0,045	≤ 0,03	17,5 – 19,5	≤ 0,11

Tablica 11. i 12. daju prikaz mehaničkih i kemijskih svojstava dodatnog materijala G 18 8 Mn (HRN EN ISO 14343:2017) trgovačkog naziva OK Autrod 16.95, promjera 1,2 mm koji je korišten za MAG zavarivanje raznorodnih čelika.

**Tablica 11. Mehanička svojstva dodatnog materijala G 18 8 Mn [31]**

	Mehanička svojstva		
	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %
Vrijednost	350	500	25

**Tablica 12. Volumni udio legirnih elemenata dodatnog materijala G 18 8 Mn [31]**

	Volumni udio legirnih elemenata dodatnog materijala								
	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Cu, %
Vrijednost	0,20	1,2	5-8	0,03	0,03	17-20	7-10	0,5	0,5

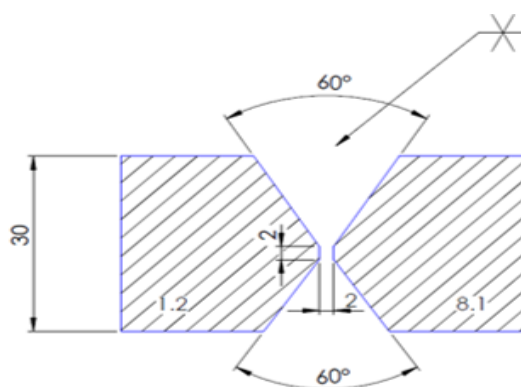
G 18 8 M (HRN EN ISO 14343:2017) je dodatni materijal namijenjen za zavarivanje visokolegiranih čelika. Ovaj dodatni materijal ima izvrsnu korozivnu postojanost, što ga čini idealnim za upotrebu u zahtjevnim i agresivnim uvjetima okoline.

Tijekom zavarivanja raznorodnih materijala koristio se zaštitni plin M12 (HRN EN ISO 14175:2008) koji sadrži 97,5 % Ar te 2,5 % CO<sub>2</sub>. Protok plina iznosio je 16 l/min.

### 6.3. Parametri zavarivanja

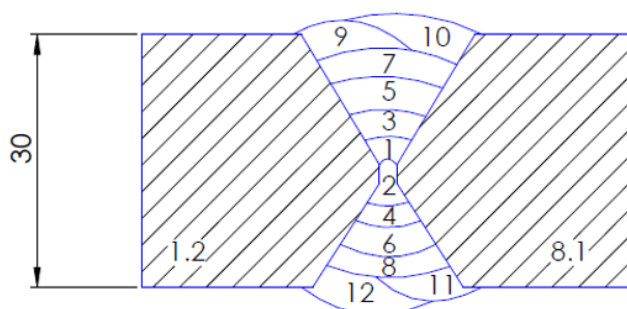
Provedeno je sučeljno obostrano automatizirano zavarivanje u PA položaju (HRN EN ISO 6947:2019) uz X pripremu žlijeba. Za osnovni materijal korišteni su konstrukcijski čelik S355J2+N i visokolegirani čelik X5CrNi18-10, dok je kao dodatni materijal korištena žica OK Autrod 16.95 (G 18 8 M).

Priprema žlijeba za zavarivanje ploče visokolegiranog čelika X5CrNi18-10 i ploče konstrukcijskog čelika S355J2+N prikazana je na slici 13.



Slika 13. Priprema žlijeba

Slika 14. prikazuje redoslijed zavarivanja ispitnog uzorka. Nakon korijenskog prolaza (1) prelazi se na ispunu žlijeba prateći simetričan uzorak kako bi se osiguralo ravnomjerno raspoređivanje topline i smanjile deformacije.



Slika 14. Redoslijed zavarivanja ispitnog uzorka

Tablica 13. prikazuje parametre zavarivanja ispitnog uzorka. Prikazana je debljina osnovnog materijala (30 mm), promjer dodatnog materijala (1,2 mm), nagib pištolja, zaštitni plin korišten pri zavarivanju, tehnika zavarivanja (desna tehnika) te način zavarivanja (poluautomatski).

**Tablica 13. Parametri zavarivanja ispitnog uzorka**

Osnovni materijal	S355J2+N i X5CrNi18-10
Debljina osnovnog materijala, mm	30
Vrsta i promjer dodatnog materijala, mm	OK Autrod 16.95, 1,2 mm
Položaj pištolja	Desna tehnika (70 – 80 °)
Zaštitni plin	M 12 (97,5 % Ar i 2,5 % CO <sub>2</sub> )
Protok zaštitnog plina (l/min)	16
Tehnika zavarivanja	Desna
Način zavarivanja	Poluautomatski
Položaj zavarivanja	PA (sučeljni spoj)
Udaljenost kontaktne sapnice, mm	15-20
Način pripreme rubova i čišćenja	Rezanje i brušenje
Vrsta spoja	X-spoj

Parametri zavarivanja po prolazima, prikazani su u tablici 14.

**Tablica 14. Pojediniosti postupaka zavarivanja**

Prolaz	Postupak	Promjer dodatnog materijala, mm	Struja, A	Napon, V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
1	135-D	1,2	155	16,9	DC, +	4,8	26,0	4,84
2	135-G	1,2	212	23,9	DC, +	8,7	28,0	8,69
3	135-G	1,2	215	24,3	DC, +	8,8	36,0	6,97
4	135-G	1,2	224	26,2	DC, +	9,0	29,0	9,71
5	135-G	1,2	224	26,2	DC, +	9,0	31,0	9,08
6	135-G	1,2	214	25,7	DC, +	8,7	44,6	5,92
7	135-G	1,2	210	26,6	DC, +	8,7	39,0	6,88
8	135-G	1,2	223	26,0	DC, +	9,0	30,0	9,28
9	135-G	1,2	214	26,7	DC, +	8,7	37,0	7,41
10	135-G	1,2	214	26,7	DC, +	8,7	37,0	7,41
11	135-G	1,2	218	26,7	DC, +	8,7	36,0	7,76
12	135-G	1,2	218	26,7	DC, +	8,7	38,0	7,35

Predgrijavanje nije bilo potrebno iz razloga što X5CrNi18-10 ima vrlo nisku toplinsku vodljivost u usporedbi s konstrukcijskim čelikom S355J2+N, što znači da se toplina nakuplja u području zavara i učinkovito se održava potrebna temperatura. Predgrijavanje bi dodatno povećalo temperaturne razlike između čelika, što bi uzrokovalo zaostala naprezanja i deformacije.

Međuslojna temperatura iznosila je 180°. Za S355J2+N ova temperatura sprječava stvaranje hladnih pukotina održavanjem minimalne plastičnosti materijala, dok za X5CrNi18-10 pomaže u kontroliranju toplinskih naprezanja i minimiziranju rizika od pregrijavanja, što bi moglo narušiti korozivnu postojanost.



## 6.4. Priprema uzorka za analiziranje mikrostrukture

Kako bi se uzorak pripremio za analizu mikrostrukture zavarenog spoja potrebno je bilo:

1. Izrezivanje uzorka
2. Brušenje
3. Poliranje
4. Nagrizanje

### 6.4.1. Izrezivanje uzorka

Rezanje ispitnog uzorka iz radnog komada odvijalo se u Laboratoriju za zavarivanje na Zavodu za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kako bi se spriječile promjene mikrostrukture uzorka uslijed toplinskog djelovanja tijekom rezanja, korišteno je sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Ovo je omogućilo očuvanje stvarnog stanja materijala i zavara za daljnju analizu.

### 6.4.2. Brušenje

Za brušenje uzorka korišten je uređaj Mecatech 250 SPI, uz primjenu pet različitih brusnih papira granulacija P320, P600, P1000, P2400 i P4000, postupno prelazeći od grubljih prema sitnijim. Brusni papiri imali su abrazivna zrna od silicijevog karbida. Ploča za brušenje okretala se brzinom od 300 okretaja u minuti, a tijekom cijelog postupka površina uzorka bila je hlađena i podmazivana vodom.

Tablica 15. prikazuje parametre korištene za brušenje ispitnog uzorka, a uređaj kojim se brusilo prikazan je na slici 15.

**Tablica 15. Parametri brušenja**

Korak brušenja	1.	2.	3.	4.	5.
Granulacija brusnog papira	P320	P600	P1000	P2400	P4000
Brzina vrtnje, okr/min	300	300	300	300	300
Sredstvo za hlađenje	Voda	Voda	Voda	Voda	Voda



Slika 15. Uređaj za brušenje Mecatech 250 SPI

#### 6.4.3. Poliranje

Poliranje je proces strojne obrade koji služi za uklanjanje tragova brušenja i postizanje glatke, reflektirajuće površine prikladne za analizu mikrostrukture. Za razliku od brušenja, koristi se fina tkanina postavljena na rotirajući dio uređaja. Proces je izveden u dva koraka: u prvom koraku primijenjena je dijamantna pasta s abrazivnim česticama veličine 3  $\mu\text{m}$ , uz lubrikant za podmazivanje i hlađenje. U drugom koraku korišten je koloidni silicijev dioksid, koji osigurava dodatno poliranje, hlađenje i podmazivanje, s abrazivnim česticama veličine 0,03  $\mu\text{m}$ . Brzina vrtnje u oba koraka iznosila je 150 okr/min. Tablica 16. prikazuje parametre poliranja. Poliranje se izvodilo na istom uređaju Mecatech 250SPI.

Tablica 16. Parametri poliranja

Korak poliranja	1.	2.
Materijal abrazivnog zrna	Dijamant	Silicijev dioksid
Veličina abrazivnog zrna	3 $\mu\text{m}$	0,033 $\mu\text{m}$
Brzina vrtnje	150	150

#### 6.4.4. Nagrizanje

Po završetku poliranja provedeno je kemijsko i elektrokemijsko nagrizanje kako bi se oba čelika adekvatno obradila. Osušeni uzorak zatim je nagrizan u 10 %-tnoj otopini oksalne kiseline radi postizanja boljeg kontrasta između zona. Nagrizanje je provedeno elektrokemijskim postupkom. Jakost struje iznosila je 5 A, napon 20 V, a trajanje je iznosilo 20 sekundi. Slika 16. prikazuje uređaj za elektrokemijsko nagrizanje.



Slika 16. Uređaj za elektrokemijsko nagrizanje

Nakon toga uzorak se umočio u nital, koji je spoj 99 % etilnog alkohola i 1 % dušične kiseline, kako bi se nagrizla granica zrna željeza. Nakon nagrizanja u nitalu uzorak se morao dobro isprati u toploj vodi kako bi se reakcija koju je nital izazvao prekinula. Nagrizanje se provodilo u Laboratoriju za zaštitu materijala na Zavodu za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

### 6.5. Analiza makrostrukture i mikrostrukture

Makrostruktura i mikrostruktura analizirane su u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno na ispitnom uzorku nakon poliranja i nagrizanja.

#### 6.5.1. Analiza makrostrukture

Na ispitnom uzorku nakon poliranja nisu zabilježene nikakve nepravilnosti. Makrostruktura zavarenog spoja u nagriženom stanju prikazana je na slici 17. Slika jasno prikazuje zonu

utjecaja topline te pojedine prolaze kao i prijelaz između osnovnog materijala i zavarenog dijela. Jasno je vidljiv i X-spoj.

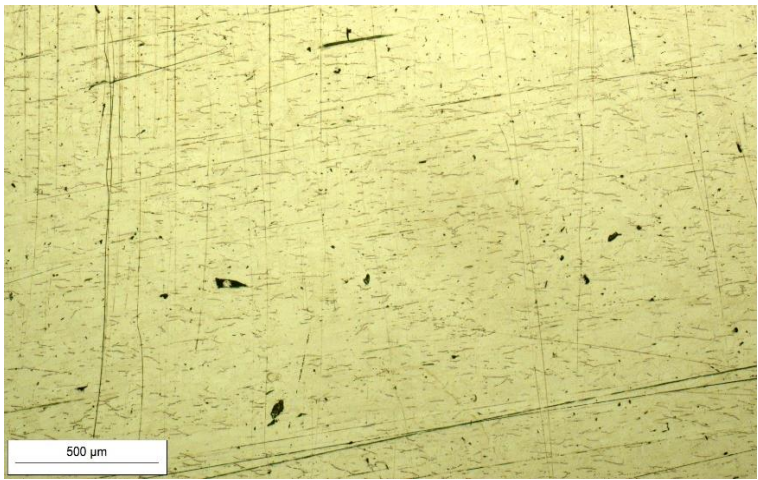
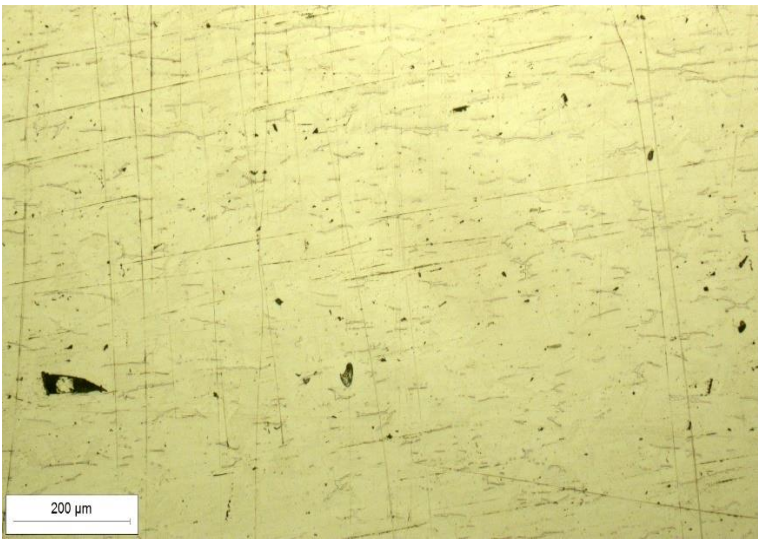
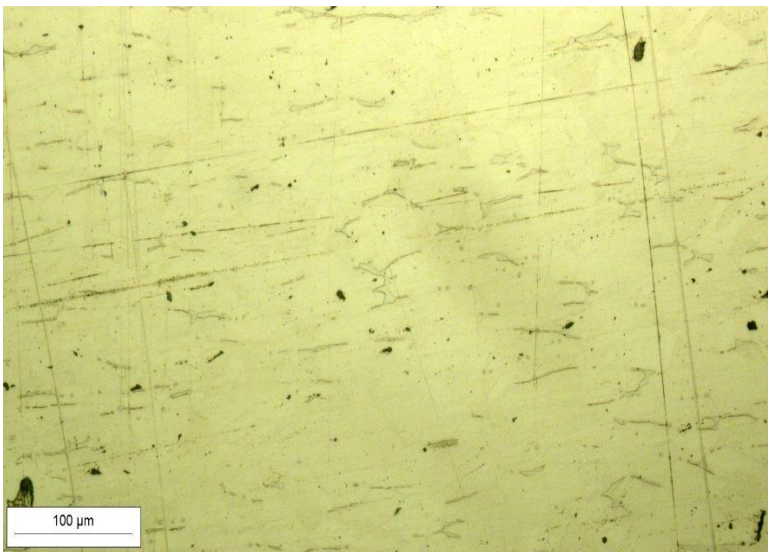


Slika 17. Makrostruktura zavarenog spoja od čelika X5CrNi18-10 i S355J2+N

#### 6.5.2. Analiza mikrostrukture

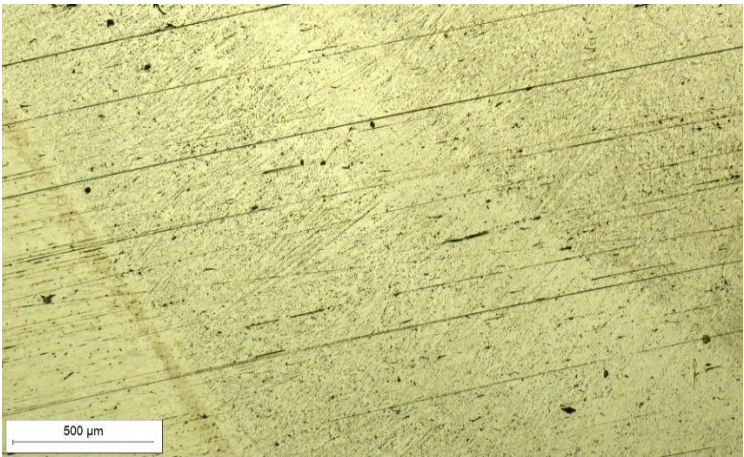
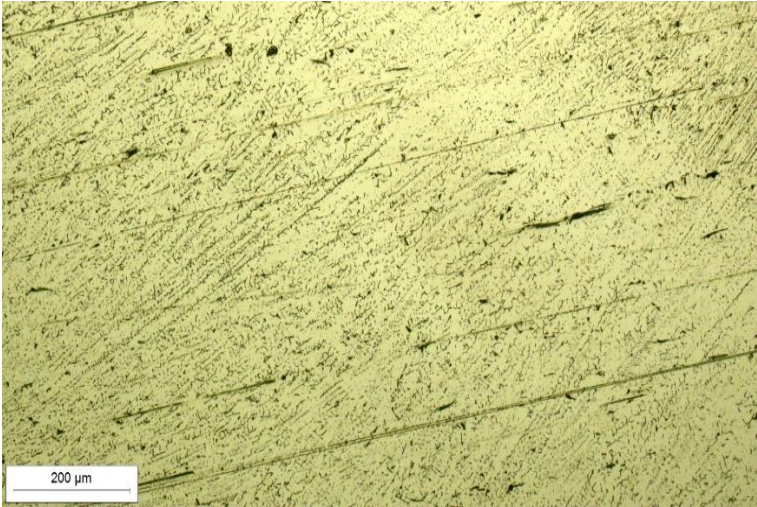
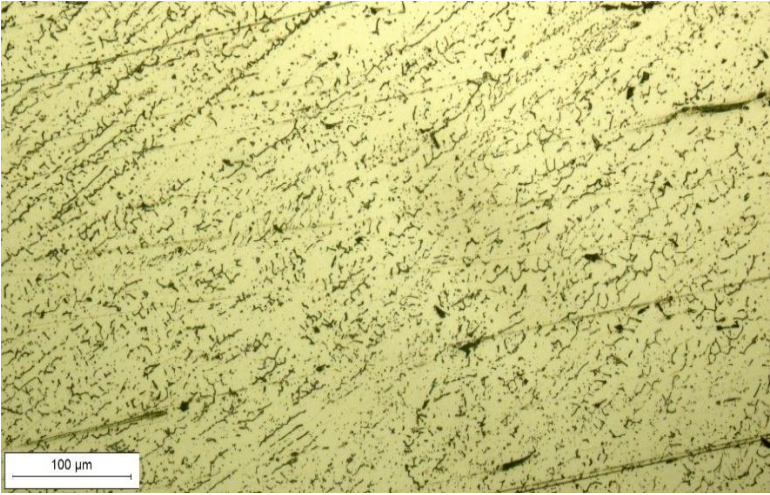
Prilikom analize mikrostrukture zavarenog spoja posebna pažnja posvećuje se zoni utjecaja topline, metalu zavara i osnovnom materijalu u korijenu, licu i sredini metala zavara. Promatrala se i zona taljenja, lice zavara te linija staljivanja. Analiza se provodila s pomoću optičkog mikroskopa. Povećanja koja su se koristila bila su 50x, 100x i 200x. Na uzorku se nisu vidjele nikakve greške. Tablica 17. prikazuje mikrostrukturu osnovnog materijala X5CrNi18-10 uvećanu 50x, 100x i 200x. Na slikama u tablici može se vidjeti da je mikrostruktura ujednačena što upućuje na austenitnu strukturu.

Tablica 17. Osnovni materijal X5CrNi18-10 uvećan 50x, 100x i 200x

Uvećanje	
50x	
100x	
200x	

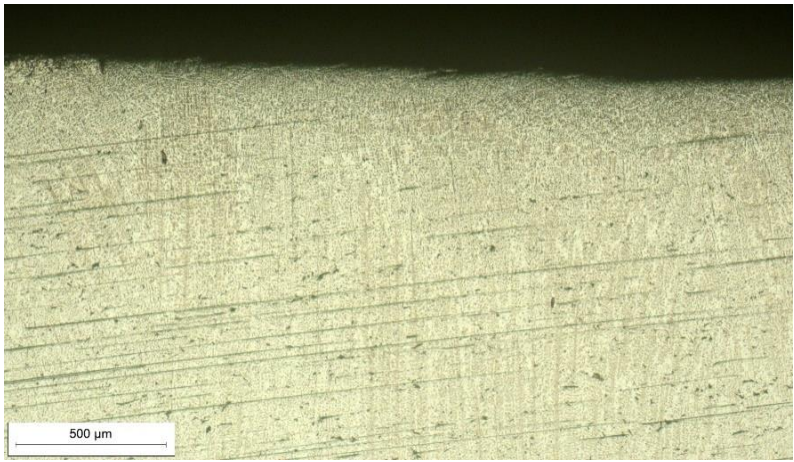
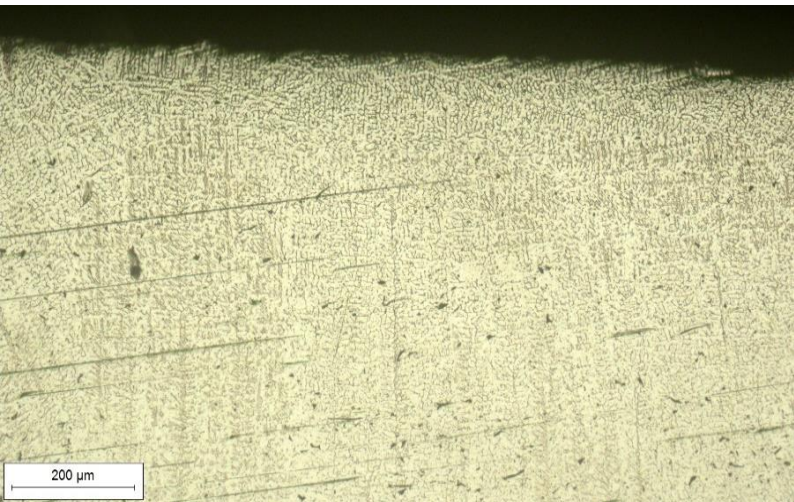
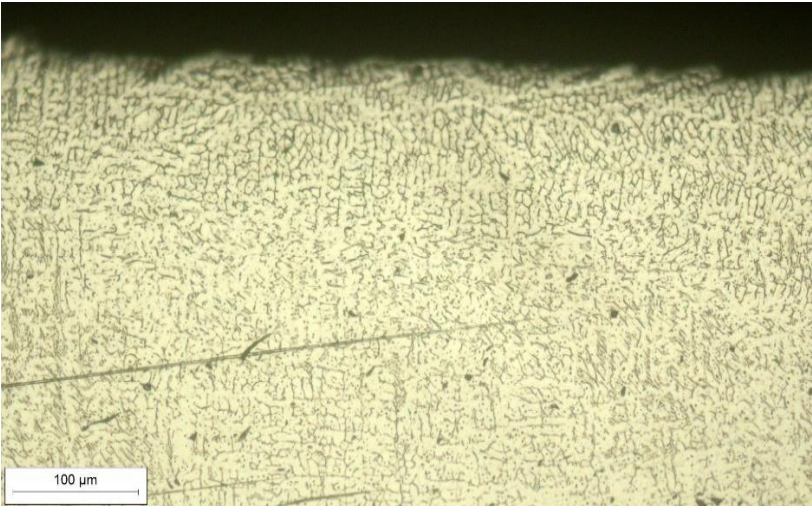
Tablica 18. prikazuje mikrostrukturu zone utjecaja topline uvećane 50x, 100x i 200x. Slike prikazuju homogenu mikrostrukturu. Vidljive su i promjene veličine zrna i deformacije zrna.

**Tablica 18. Zona utjecaja topline uvećana 50x, 100x i 200x**

Uvećanje	
50x	
100x	
200x	

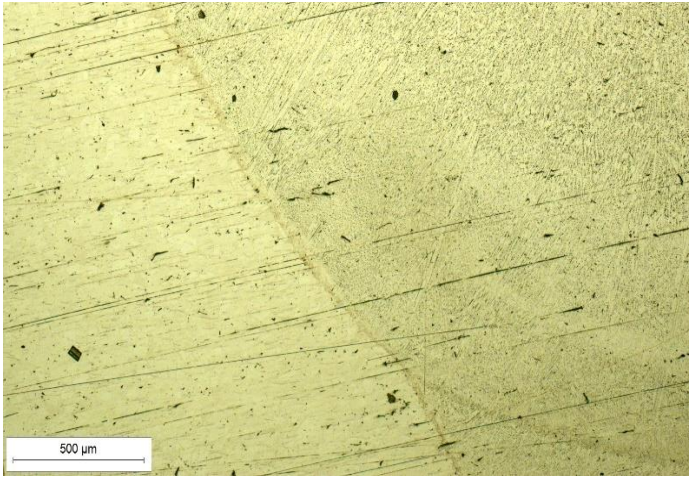
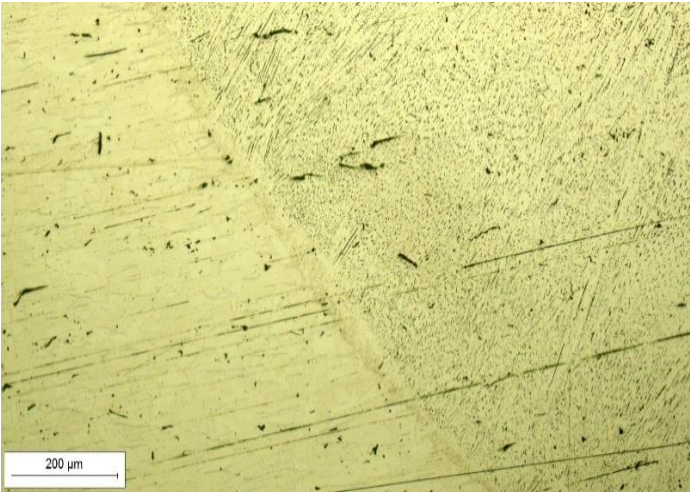
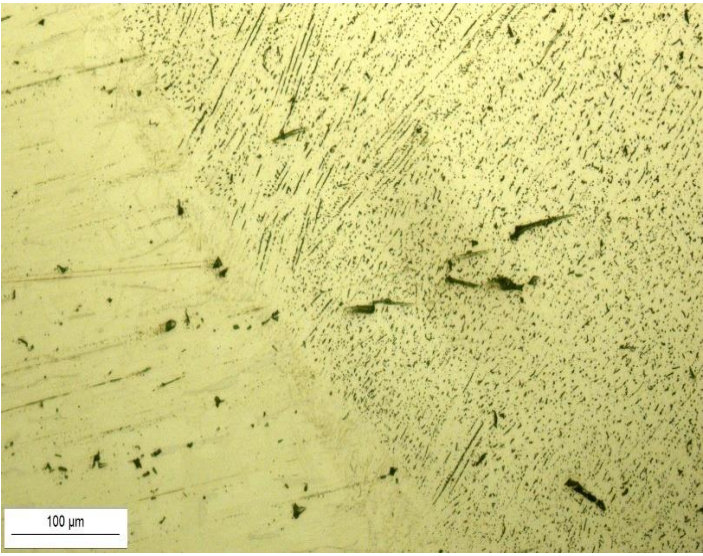
Tablica 19. prikazuje mikrostrukturu lica zavara uvećane 50x, 100x i 200x. Na slikama je vidljiv rast zrna i homogenost zrna.

**Tablica 19. Lice zavara uvećano 50x, 100x i 200x**

Uvećanje	
50x	
100x	
200x	

Tablica 20. prikazuje liniju staljivanja uvećanu 50x, 100x i 200x. Iz mikrostrukture je vidljiv prijelaz između metala zavara i osnovnog materijala. Vidljivi su i tragovi segregacije na samoj liniji staljivanja.

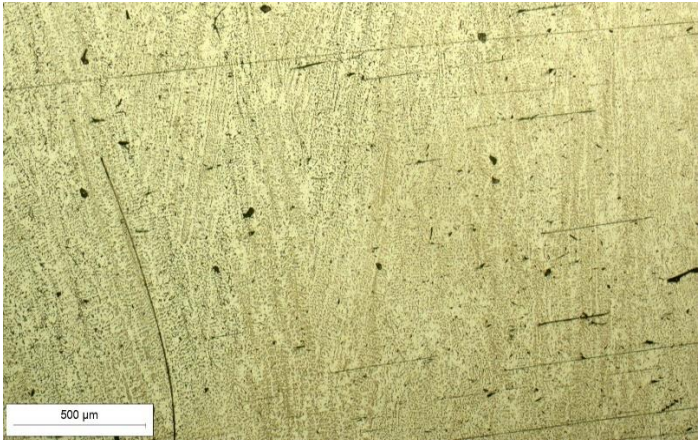
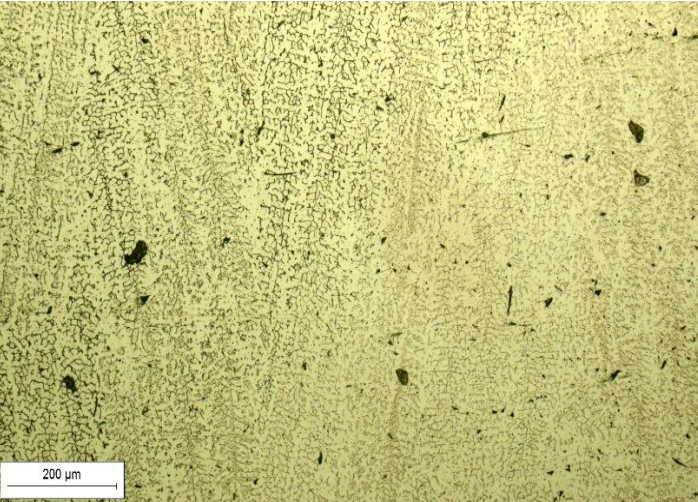
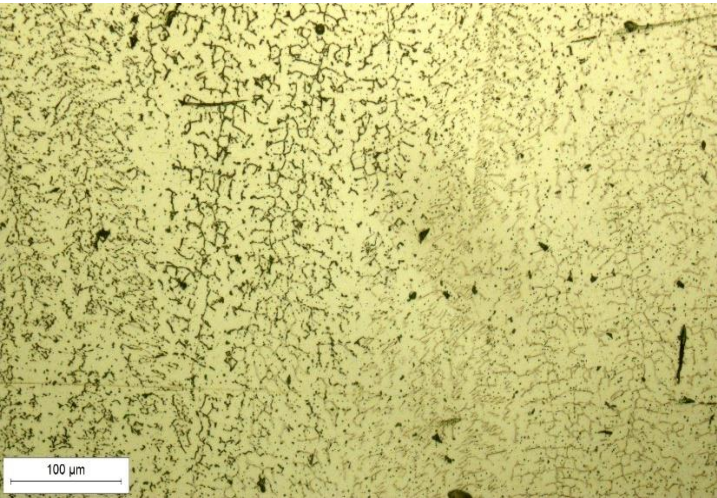
**Tablica 20. Linija staljivanja uvećana 50x, 100x i 200x**

Uvećanje	
50x	
100x	
200x	



Tablica 21. prikazuje mikrostrukturu korijena zavara uvećane 50x, 100x i 200x. Na slikama su jasno vidljive granice zrna. Tamne granice zrna ukazuju na učinke toplinske obrade tijekom zavarivanja.

**Tablica 21. Korijen zavara uvećan 50x, 100x i 200x**

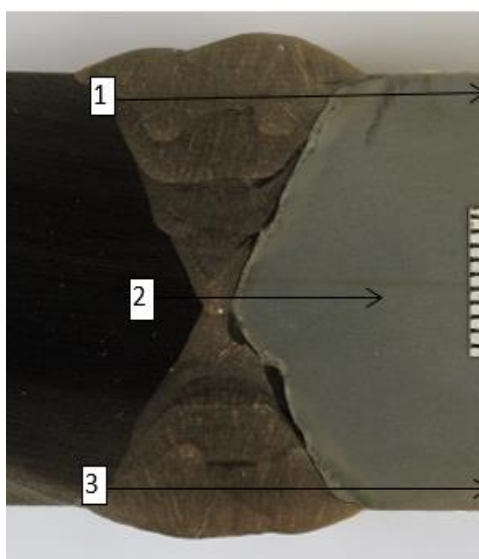
Uvećanje	
50x	
100x	
200x	

## 6.6. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju Reichert prikazanom na slici 18. Mjerenje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom, pri kojoj se koristi dijamantni utiskivač u obliku četverostrane piramide s kutom od  $136^\circ$  između nasuprotnih stranica. Mjerile su se vrijednosti tvrdoće HV10. Dobivena vrijednost tvrdoće određuje se na temelju veličine otiska. Na mjestu 1, 2 i 3 prikazanima na slici 19. ispitalo se po šest točaka u nizu. Tri točke bile su ispitane na osnovnom materijalu S355J2+N, a tri u zoni utjecaja topline. Sveukupno je provedeno 18 mjerenja.



Slika 18. Uređaj Reichert za mjerenje mikrotvrdoće



Slika 19. Linije ispitivanja tvrdoće

Rezultati mjerenja tvrdoće u osnovnom materijali S355J2+N prikazani su u tablici 22, a rezultati mjerenja tvrdoće u ZUT-u u tablici 23.

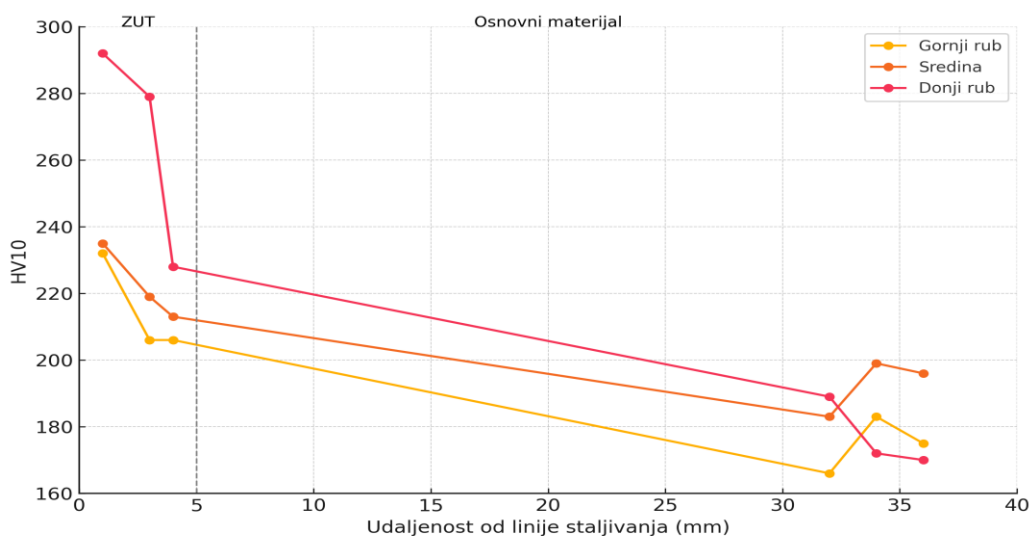
**Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu S355J2+N**

	Gornji rub	Sredina	Donji rub
1.	175	196	170
2.	183	199	172
3.	166	183	180

**Tablica 23. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u zoni utjecaja topline**

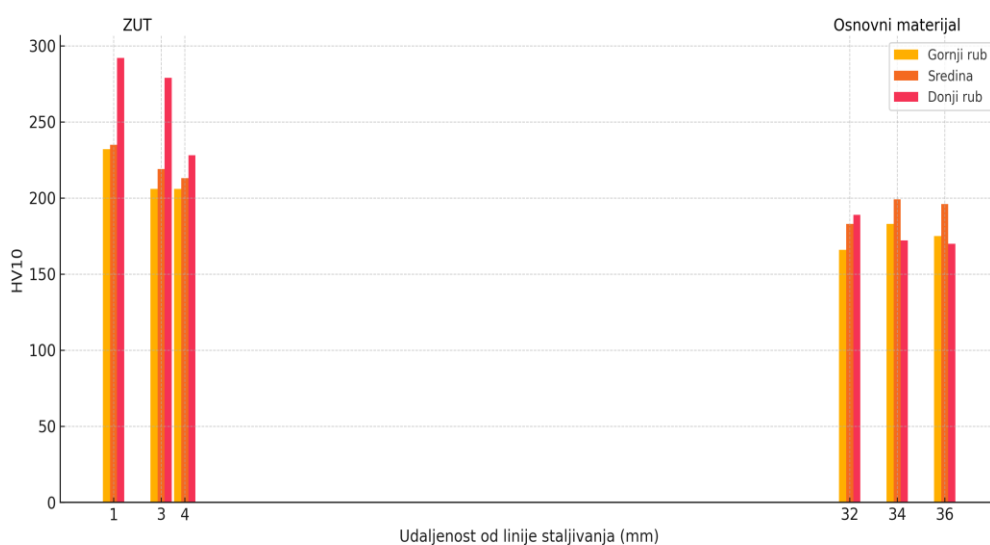
	Gornji rub	Sredina	Donji rub
1.	206	213	228
2.	206	219	279
3.	232	235	292

Slika 20. prikazuje dijagram tvrdoće za uzorak S355J2+N. Tvrdoća uzorka ispitana je u zoni utjecaja topline te na dijelu osnovnog materijala. Na x-osi prikazana je udaljenost od linije staljivanja (0 mm označava kraj zavara i početak zone utjecaja topline). Mjerenja su obavljena na različitim točkama duž ispitnog uzorka. Y-os prikazuje vrijednost tvrdoće izražene u HV10. Žuta linija grafa predstavlja tvrdoću u gornjem dijelu zavara (licu zavara). Narančasta linija predstavlja tvrdoću u srednjem dijelu, a crvena linija u donjem dijelu zavara (licu zavara). U području zone utjecaja topline toplinski procesi promijenili su mikrostrukturu i mehanička svojstva materijala. Tvrdoća opada kako se udaljavamo od zavara prema osnovnom materijalu što je očekivano jer osnovni materijal zadržava svoja svojstva. Razlike tvrdoće između gornjeg, srednjeg i donjeg ruba mogu ukazivati na asimetričnu distribuciju topline tijekom zavarivanja.



Slika 20. Dijagram tvrdoće za uzorak S355J2+N

Slika 21. prikazuje histogram raspodjele tvrdoće materijala S355J2+N duž zavarenog spoja, s fokusom na gornji rub (Lice zavara), sredinu i donji rub (Lice zavara). X-os prikazuje udaljenost od linije staljivanja u milimetrima. Materijal je ispitan u zoni utjecaja topline (blizu 1-4 mm) i dalje prema osnovnom materijalu na udaljenosti od 32-36 mm. Y-os prikazuje tvrdoću. Tvrdoća u osnovnom materijalu koji nije bio izložen zoni utjecaj topline stabilizira se i približava se početnim vrijednostima osnovnog materijala S355J2+N. Histogram jasno pokazuje raspodjelu tvrdoće duž zavarenog spoja, naglašavajući efekt zavarivanja na različite dijelove materijala.



Slika 21. Histogram raspodjele tvrdoće materijala S355J2+N

## 7. ZAKLJUČAK

Raznorodni spojevi materijala svake godine postaju sve značajniji pri izradi složenih konstrukcija. Kontrola unosa topline, odabir odgovarajućeg dodatnog materijala i pravilno hlađenje ključni su za smanjenje naprezanja i sprječavanje pojave pukotina.

Dubina penetracije predstavlja ključni faktor pri zavarivanju raznorodnih čelika zato što omogućuje predviđanje stupnja miješanja kada se radi o osnovnom i dodatnom materijalu. Veća penetracija rezultira većim razlikama u kemijskom sastavu unutar zavarenog spoja

U eksperimentalnom dijelu zaključeno je da izmjerena tvrdoća odgovara propisanim granicama prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017/A1:2019 budući da maksimalna dopuštena tvrdoća iznosi 380 HV10 u čeliku gradacije S355J2+N.

Za povećanje produktivnosti MAG postupka zavarivanja raznorodnih čelika S355J2+N i X5CrNi18-10 preporučuje se optimizacija parametara zavarivanja. Precizna prilagodba jakosti struje, napona i brzine žice može pomoći u smanjenju rasprskavanja i poboljšanju stabilnosti luka. Tako se postiže kvalitetniji zavar s manjom potrebom za naknadnim čišćenjem i obradom, čime se smanjuju ukupni troškovi.

Dodatni materijali s kemijskim sastavom prilagođenim za zavarivanje čelika s različitim svojstvima smanjuju pojavu krhkih faza i povećavaju eksploatacijska svojstva zavara. Tako se postiže kombinacija svojstava oba materijala u zavarenom spoju. Pravilno odabrani dodatni materijal omogućuje optimizaciju prijelaza između raznorodnih kemijskih sastava osnovnih materijala, čime se smanjuje mogućnost pojave nepovoljnih mikrostruktura, poput krhkih faza, koje mogu dovesti do lomova ili smanjenja čvrstoće spoja.

Mikrostrukturna analiza pokazuje homogenu i ujednačenu mikrostrukturu, što ukazuje na austenitnu strukturu materijala. Vidljive su promjene veličine zrna, uključujući rast i deformacije, koje su rezultat toplinskog utjecaja tijekom zavarivanja. Granice zrna su jasno definirane, a tamne granice ukazuju na učinke toplinske obrade.

Na prijelazu između metala zavara i osnovnog materijala vidljiv je prijelaz mikrostrukture, dok se na liniji taljenja mogu uočiti tragovi segregacije. Opisana mikrostruktura potvrđuje prisutnost ravnoteže između osnovnog materijala i zavarenog spoja, uz jasne pokazatelje toplinskih i mehaničkih promjena koje su nastale tijekom zavarivanja.

Ispitivanje tvrdoće na uzorku S355J2+N pokazalo je da tvrdoća opada od zone zavara prema osnovnom materijalu, što je posljedica toplinskih promjena u zoni utjecaja topline. Analiza je

pokazala da se najveće promjene u tvrdoći događaju unutar ZUT-a, gdje je prijelaz između zavarenog dijela i osnovnog materijala najizraženiji.

U ZUT-u je zabilježeno da se tvrdoća postupno smanjuje, a na prijelazu prema osnovnom materijalu dolazi do stabilizacije tvrdoće na početne vrijednosti osnovnog materijala. Na dijelu zavora, razlike u tvrdoći između gornjeg, srednjeg i donjeg dijela ukazuju na asimetričan utjecaj toplinskog procesa.

Kombinacija osnovnih materijala i dodatnog materijala s optimalnim prijelaznim svojstvima omogućuje postizanje ravnoteže između čvrstoće, otpornosti na koroziju i duktilnosti zavora. Time se osigurava dugotrajnost i pouzdanost spoja čak i u zahtjevnim radnim uvjetima

**LITERATURA**

- [1] Callister, W. D., Rethwisch, D. G.: *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, Hoboken (NJ), 2014.
- [2] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Veleučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [3] Lippold, J. C., Kotecki, D. J.: *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels* [Internet], John Wiley & Sons, Hoboken (NJ), 2005.
- [4] Benac, D. J., Cherolis, N., Wood, D.: *Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in Pressure Vessels*, Journal of Failure Analysis and Prevention 16(2016)1, 55–66.
- [5] S355J2+N Steel Plate, [https://www.htsteelmill.com/s355-j2n-steel-plate.html?gad\\_sour\[ce=1&gclid=Cj0KCQjwvpy5BhDTARIsAHSilykHsGpwcqWOy04WH2eatvK7NuRnmmxY3oUoAa5JWQhyU0D6qFvLm](https://www.htsteelmill.com/s355-j2n-steel-plate.html?gad_sour[ce=1&gclid=Cj0KCQjwvpy5BhDTARIsAHSilykHsGpwcqWOy04WH2eatvK7NuRnmmxY3oUoAa5JWQhyU0D6qFvLm), 23.10.2024.
- [6] Franz, M.: *Mehanička svojstva materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [7] HRN EN 10025-2:2019. Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika – 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike.
- [8] Kožuh, S.: *Specijalni čelici – skripta*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010.
- [9] HRN EN 10088-2:2015. Nehrđajući čelici -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za limove/ploče i trake od korozijski postojanih čelika za opće namjene
- [10] *Nehrđajući čelik AISI 304 (nehrđajući čelik 18-8): činjenice koje treba znati*, <https://proinstal.hr/nehrdajuci-celik-aisi-304-nehrdajuci-celik-18-8-cinjenice-koje-trebate-znati/>, 24.10.2024.
- [11] X5CrNi18-10 Stainless Steel Bar, <https://www.wixsteel.com/products/nickel-based-supper-alloy/din-alloy/x5crni18-10>, 24.10.2024.
- [12] Pavić, J., Dunder, M., Klarić, Š., Majić, J.: *Zavarivanje raznorodnih materijala u izradi kompenzatora*, 6. međunarodno znanstveno – stručno savjetovanje SBZ 2011 - Suvremene tehnologije i postupci pri izradi tlačne opreme, zavarenih metalnih konstrukcija i proizvoda, Slavonski Brod, 2011.
- [13] Mateša, B., Samardžić, I., Dunder, M.: *Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama*, 6. međunarodno znanstveno – stručno savjetovanje SBZ 2011 - Suvremene tehnologije i postupci pri izradi tlačne opreme, zavarenih metalnih konstrukcija i proizvoda, Slavonski Brod, 2011.
- [14] Čimić, T.: *Zavarivanje raznorodnih čelika*, Zavarivanje 24(1981)7, 257-266.
- [15] S355J2 Steel, <https://www.tsmsteel.com/s355j2.htm>, 25.10.2024.
- [16] Giudice, F., Missori, S., Scolaro, C., Sili, A.: *A review on fusion welding of dissimilar ferritic/austenitic steels: processing and weld zone metallurgy*, Journal of Manufacturing and Materials Processing 8(2024)3, 96-119
- [17] Avery, R. E.: *Guidelines For Welding Dissimilar Metals*, Chem Eng Prog, 1991.
- [18] Kou, S.: *Welding Metallurgy, 2nd ed.*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2002.
- [19] Jakšić, S.: *O zavarivanju raznorodnih čelika s osvrtom na primjenu u kotlogradnji*, Znanstveno-stručni časopis Zavarivanje 1(1969), 2–11.
- [20] *What is MIG/MAG Welding? The Basics and Advantages*, <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/what-is-mig-mag-welding/>, 27.10.2024.
- [21] Garašić, I.: *Predavanje iz kolegija Zavarivanje i montaža*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [22] Kralj, S., Andrić, Š.: *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

- [23] Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W.: *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding*, J Mater Process Technol 212(2012)6, 1406–1413.
- [24] Jurica, M.: *Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80* [disertacija], Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [25] *Welding Transfer Modes: Spray, Global & Short Circuiting*, <https://weldguru.com/welding-transfer-modes/>, 29.10.2024.
- [26] Gojić, M.: *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Zagreb, 2003.
- [27] Šisl, V., Kovačević, B.: *Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio)*, Zavarivanje 44(2001)1/2, 7–15.
- [28] Anderson, L.: *Heat Input & Interpass Temperature During Welding*, TE Anderson Consulting, Swedia, 2018.
- [29] *Metallurgy and Mechanics of Welding: Processes and Industrial Applications*, <https://www.wiley.com/en-us/Metallurgy+and+Mechanics+of+Welding%3A+Processes+and+Industrial+Applications-p-9781118623749>, 14.11.2024.
- [30] *Xuper Arc 4000 DS*, <https://www.castolin.com/xuper-arc-4000-ds>, 15.11.2024.
- [31] EN ISO 14343-A: G 18 8 Mn. Standard za žice za zavarivanje i taloženje metala - Kemijski sastav i mehanička svojstva.



---

**PRILOZI**

I. CD-R disc