

Zavarivanje raznorodnih čelika

Zidarić, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:558300>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karlo Zidarić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Karlo Zidarić

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se svojim mentorima doc. dr. sc Ivici Garašiću, te dr.sc. Tanji Tomić na stručnom vođenju tijekom izrade završnoga rada. Veliko hvala i svima s Katedre za zavarene konstrukcije na pomoći u izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Srdačno zahvaljujem svojim roditeljima na podršci i pomoći tijekom studija.

Karlo Zidarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **KARLO ZIDARIĆ** Mat. br.: **0035176012**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDING OF DISSIMILAR STEELS**

Opis zadatka:

Analizirati problematiku zavarivanja raznorodnih čelika tj. visokolegiranih nehrđajućih i nelegiranih/niskolegiranih čelika. Posebno proučiti metalurške aspekte ovakvih zavarenih spojeva te način određivanja dodatnog materijala ovisno o kombinaciji čelika i vrsti postupka zavarivanja. Opisati primjere raznorodnih zavarenih spojeva na konstrukcijama u praksi kao i tipične probleme i greške koji se pri tom javljaju.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za odgovarajuću kombinaciju čelika odabrati postupak i definirati tehnologiju zavarivanja. Na zavarenim uzorcima provesti ispitivanja mehaničkih svojstava kao i mikrostrukturnu analizu prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1. Donijeti zaključke o prikladnosti definirane tehnologije zavarivanja kao i upute za primjenu iste u realnoj proizvodnji.

Zadatak zadan:
11. studenog 2013.

Rok predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2014.
2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.
2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS OZNAKA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD	1
2. ZAVARIVANJE NELEGIRANIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA.....	2
2.1 Nelegirani čelici	2
2.2 Visokolegirani čelici.....	4
2.2.1 Martenzitni Cr – čelici.....	6
2.2.2 Feritni čelici.....	7
2.2.3 Austenitni čelici.....	8
3. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA	10
3.1. Podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika	12
3.2. Teorijske osnove zavarivanja raznorodnih čelika	14
3.2.1. Stupanj protaljivanja (miješanja) i kemijska raznorodnost	14
3.2.2. Strukturna raznorodnost materijala zavarenih spojeva raznorodnih čelika	17
3.2.3. Schaefflerov diagram.....	17
3.2.4. Izbor postupka zavarivanja.....	22
3.2.5. Dodatni materijal	23
3.3. Problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika	24
3.3.1. Difuzijski procesi.....	24
3.3.2. Zaostala naprezanja i deformacije zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika	27
3.4. Zavarivanje platiranih materijala.....	29
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada	30
4.1.1. Izvor struje.....	30
4.1.2. Specifikacija osnovnog materijala – nelegirani čelik	31
4.1.3. Specifikacija osnovnog materijala – visokolegirani čelik	32

4.1.4. Dodatni materijal.....	33
4.1.5. Zaštitni plin.....	34
4.2. Dimenzije i izrada ispitnih uzoraka.....	35
4.3. Mjerenje feritnog broja.....	41
4.4. Geometrija zavara.....	43
5. ZAKLJUČAK	46
LITERATURA.....	48
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnih čelika [7].....	7
Slika 2. Osnovni način podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih spojeva [9]	12
Slika 3. Prikaz zone kupke zavara [13]	14
Slika 4. Shematski prikaz kemijskog sastava u zonama miješanja zavara i osnovnog materijala [13].....	15
Slika 5. Schaefflerov dijagram [8]	18
Slika 6. Primjena Schaefflerovog strukturnog dijagrama pri određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavara [8]	20
Slika 7. Faktor f ovisan o postotku Fe u metalu zavara [14].....	22
Slika 8. Difuzija ugljika prilikom zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom [15]... ..	25
Slika 9. Proces difuzije kod spajanja ugljičnog osnovnog čelika s austenitni dodatnim materijalom [12]	25
Slika 10. Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja [12]	26
Slika 11. Izvor struje za zavarivanje ESS SynMag 4000	30
Slika 12. Provjera protoka plina	34
Slika 13. Prikaz dimenzija uzorka.....	35
Slika 14. Zavarivanje ispitnog uzorka s jednim prolazom	36
Slika 15. Zavarivanje ispitnog uzorka s tri prolaza	37
Slika 16. Zavareni ispitni uzorak s jednim prolazom.....	37
Slika 17. Zavareni ispitni uzorak s tri prolaza.....	38
Slika 18. Stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka – lijevo, brusni papir hrapavosti #4000 – desno	38
Slika 19. Makro izbrusak presjeka zavara – uzorak A	39
Slika 20. Makro izbrusak presjeka zavara – uzorak B	40
Slika 21. Uređaj za mjerenje feritnog broja	41
Slika 22. Prikaz zavara i osnovnih materijala na makro izbruscima za mjerenje feritnog broja	41
Slika 23. Prikaz udjela ferita u pojedinom zavaru i osnovnom materijalu.....	42
Slika 24. Sadržaj ferita pojedinog unosa topline	42
Slika 25. Prikaz mjerenja visine zavara. Uzorak A – lijevo, uzorak B - desno.....	43
Slika 26. Prikaz mjerenja površine presjeka zavara. Uzorak A – lijevo, uzorak B – desno	43

Slika 27. Prikaz mjerenja srednje vrijednosti dubine ZUT – a na strani 1.4828 X15CrNiSi20-12 osnovnog materijala. Uzorak A – lijevo, uzorak B – desno	44
Slika 28. Makro izbrusak uzorka A.....	44
Slika 29. Makro izbrusak uzorka B.....	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperature predgrijavanja (T_o) ovisna o sadržaju ugljika [2]	3
Tablica 2. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [6]	5
Tablica 3. Stupanj protaljivanja s obzirom prema vrsti spoja i tehnologije zavarivanja [9]	16
Tablica 4. Približne vrijednosti feritnog broja (FN) za pojedine metale zavara [14].....	20
Tablica 5. Stupnjevi protaljivanja za pojedine postupke zavarivanja taljenjem [8].....	23
Tablica 6. Svojstva različitih vrsta čelika [8]	27
Tablica 7. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje ESS SynMag 4000.....	31
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S235JRG2	31
Tablica 9. Kemijski sastav čelika S235JRG2.....	31
Tablica 10. Mehanička svojstva osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12.....	32
Tablica 11. Kemijski sastav čelika 1.4828 X15CrNiSi20-12	32
Tablica 12. Mehanička svojstva dodatnog materijala prema EN 10204–3.1.....	33
Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala.....	33
Tablica 14. Tehnološki parametri zavarivanja	36
Tablica 15. Izmjerene veličine zavara uzorka A	44
Tablica 16. Izmjerene veličine zavara uzorka B	45

POPIS OZNAKA

Kratica	Opis
A	austenit
Al	Aluminij
C	Ugljik
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakar
F	Ferit
Fe	Željezo
FN	Feritni broj
M	Martenzit
MAG	eng. Metal active gas
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
Ta	Tantal
Ti	Titan
TIG	eng. Tungsten Inert Gas
V	Vanadij
W	Volfram
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm	Visina zavora
c	J KG ⁻¹ k ⁻¹	Specifični toplinski kapacitet
E	GPa	Vlačni modul elastičnosti
I	A	Jakost struje
m	%	Udio nataljenog materijala u zavaru
n	%	Udio protaljenog osnovnog materijala u ukupnoj masi zavora
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R _{p0,2}	N/mm ²	Granica razvlačenja
T _o	°C	Temperatura predgrijavanja
U	V	Napon
V _z	cm/min.	Brzina zavarivanja
x	%	Maseni udio
X ₁	mm	Širina razugljivenog sloja
x _{om1}	%	Maseni udio kemijskog elementa „1“ u osnovnom materijalu
x _{om2}	%	Maseni udio kemijskog elementa „2“ u osnovnom materijalu
x _{z1}	%	Maseni udio kemijskog elementa „1“ u dodatnom materijalu
x _{z2}	%	Maseni udio kemijskog elementa „2“ u dodatnom materijalu
Q	kJ/cm	Unos topline
α	10 ⁻⁶ K ⁻¹	Koeficijent linearnog istezanja
γ		Stupanj protaljivanja
δ	mm	Udaljenost od granice staljivanja
δ ₁	mm	Širina zone kupke zavora
δ ₂	mm	Širina zone kupke zavora
η		Stupanj iskorištenja pojedinog postupka zavarivanja
λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	Koeficijent toplinske vodljivosti
ρ	Kg m ⁻³	Gustoća
Ω	10 ⁻⁶ Ωm	Specifični električni otpor

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je zavarivanje raznorodnih čelika te se dijeli na teoretski i eksperimentalni dio.

U drugom poglavlju ukratko je opisano zavarivanje nelegiranih i visokolegiranih čelika. U trećem poglavlju razmatrano je samo zavarivanje raznorodnih spojeva, teoretske osnove raznorodnih čelika te njihova podjela. U teoretskim osnovama je opisan stupanj protaljivanja, strukturna raznorodnost, Schaefflerov dijagram te na kraju problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika.

U eksperimentalnom dijelu MAG postupkom su zavareni ispitni uzorci ugljičnog čelika s visokolegiranim čelikom iz kojih su izrezani makro izbrusci za daljnja ispitivanja. Na makro izbruscima presjeka zavara promatran je dobiveni zavar, mjereno je feritno brojevo te je proučena geometrija zavara.

Ključne riječi: Zavarivanje; raznorodni čelici; raznorodni spoj; feritno brojevo

1. UVOD

Zbog potražnje industrija kao što su kemijska, industrija za preradu nafte, kemijska i nuklearna, danas se sve veći broj istraživača bavi zavarivanjem raznorodnih čelika. Neke od tih industrija, primarno industrija za preradu nafte i nuklearna bez primjene različitih kombinacija čelika i ostalih materijala ne bi mogle funkcionirati. Budući da je zavarivanje osnovni način spajanja javlja se problem zavarivanja raznorodnih čelika. Već dugi niz godina tim se problemom bave mnoge tvornice.

Problemi koji se javljaju kod ovakvog zavarivanja su difuzija ugljika, nastanak zaostalih naprezanja zbog samog zavarivanja koje smanjuju mehanička svojstva i sugurnost spojeva što u nekim slučajevima može doći do pukotina. Kako bi smo to spriječili važno je prilikom svakog zavarivanja dobro proučiti svojstva izabranog osnovnog i dodatnog materijala, tehnike rada i sam postupak zavarivanja. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na stupanj protaljivanja ili penetracija koje mora biti minimalno te nam je vrlo bitno dobiti dobro miješanje osnovnih materijala s dodatnim. Ukoliko se osnovni materijal dobro pomiješa s dodatnim, dolazi do miješanja svojstava dvaju materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada navedeni čimbenici analizirani na praktičnom primjeru. Za uzorak su korišteni makro izbrusci izrezani iz zavarenih uzoraka. Kao osnovni materijali korišteni 1.4828 X15CrNiSi20-12 prema EN 10095, S235JRG2 prema EN 10025-2, a kao dodatni materijal Boehler FFB – IG prema EN ISO 14343-A.

2. ZAVARIVANJE NELEGIRANIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

2.1 Nelegirani čelici

Najvažniji prateći kemijski element kod nelegiranih čelika je ugljik. Njegov sadržaj je od 0,1 % C do 0,6 % C. Ostali prateći elementi su uglavnom: 0,5 % Si, 0,8 % Mn, 0,05 % S, 0,05 % P, 0,1 % Al, 0,1 % Ti i 0,25 % Cu. Niskolegirani čelici sadrže od 5 % legiranih elemenata (Ni, Cr, Mo, V i ostali). Postupci dobivanja nelegiranih čelika: Thomas, Siemens – Martin, elektro postupak te postupak propuhivanjem kisika [1].

U čeličani se mogu proizvesti [1]:

- Neumireni čelik, bez dezoksidacije s nepoželjnim segregacijama, ali mekanom površinom što je pogodno za duboko vučenje,
- Poluumireni čelik s djelomičnom dezoksidacijom, ima manje izražene segregacije,
- Umireni čelik, umiruju se većim količinama dezoksidansa. Neko od dezoksidansa su: Si, Mn, Al,
- Posebno umireni, takvi čelici sadrže i Al kao dezoksidans te sadržaj mora biti veći od 0,02 %.. Al_2O_3 služi kao tvorac klica kristalizacije pa se dobiva sitnozrnata mikrostruktura koja rezultira visokoj udarnoj žilavosti te otpornošću na starenje.

Problemi koji se javljaju kod zavarivanja nelegiranih čelika su: pukotine, poroznost, starenje i krhkost materijala zbog visokog sadržaja sumpora te fosfora u samoj leguri nehrđajućih čelika. Za sadržaj sumpora i fosfora je vrlo bitan način proizvodnje samog čelika. Zbog toga umireniji čelici imaju bolju zavarljivost, ali su i skuplji. Mjere pomoću kojih se postižu kvalitetniji zavareni spojevi su predgrijavanje osnovnog materijala, zavarivanje s većim unosom topline, primjena bazičnih elektroda, optimalno oblikovanje konstrukcije te popuštanje zaostalih naprezanja.

Kod predgrijavanja čelika vrlo je bitan sadržaj ugljika u leguri i ostalih elemenata, debljina stjenke, napetosti i sadržaj difuzijskog vodika. Predgrijavanjem se postiže smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja temperature i zone taljenja, izlazak difuzijskog vodika te se smanjuju zaostala naprezanja. Predgrijavanje čelika se odnosi na zagrijavanje mjesta zavarivanja iznad temperature okoliša te održavanjem temperature prilikom zavarivanja. U Tablici 1. su prikazane određene temperature predgrijavanja ovisne o sadržaju ugljika. [1, 2].

Tablica 1. Temperature predgrijavanja (T_0) ovisna o sadržaju ugljika [2]

Sadržaj ugljika, mas. %	Temperatura predgrijavanja (T_0), °C
0,2 – 0,3	100 – 150
0,3 – 0,45	150 – 275
0,45 – 0,80	275 - 425

Primjenom elektroda s bazičnom oblogom smanjene su mogućnosti pojave pukotina [2].

Kod zavarivanja debljih se primjenjuje žarenje nakon zavarivanja na temperaturama od 550°C do 650°C u vremenu od 2 minute po jednom milimetru debljine osnovnog materijala. Time se smanjuju troosne napetosti i sklonost krhkom lomu koji su prisutni u materijalu nakon zavarivanja [2].

2.2 Visokolegirani čelici

Prvi počeci visokolegiranih čelika bili su početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je poznati proizvođač čelika Krupp 1912. godine. Ti materijali su u konstantom razvoju sve do danas te su danas već jako usavršeni. Najveći porast visokolegiranih čelika je u zadnjih 40 godina zbog uvođenja toplog i hladnog valjanja, široke upotrebe kontinuiranog lijevanja te uvođenje sekundarne metalurgije. Proizvodnja visokolegiranih čelika u zadnjih 25 godina se udvostručila, jedino još aluminij pokazuje sličan rast [3,4].

Čelici koji posjeduju sadržaj legirajućih elemenata veći od 5 % spadaju u skupinu visokolegiranih čelika. Visokolegirane čelike može se podijeliti prema strukturi materijala dobivenoj hlađenjem na zraku nakon visokotemperaturnog zagrijavanja [5]:

- martenzitni čelici (meko martenzitni),
- martenzitno - feritni čelici,
- austenitno - martenzitni čelici,
- austenitno - feritni čelici (duplex),
- feritni čelici (super – feritni),
- austenitni čelici (super – austenitni).

Novije skupine čelika su super i meko martenzitni čelici jer su im posebnim legiranjem znatno poboljšana svojstva. S obzirom prema primjeni visokolegirani čelici se dijele na korozijski postojane, vatrootporne itd. Prema sustavima legiranja dijele se na krom čelike, krom-nikal čelike, krom-mangan čelike itd. Svaka od navedenih skupa ima svoje probleme kod zavarivanja i eksploataciji zavarenih spojeva. Kod same zavarljivosti visokolegiranih čelika važna su i njihova fizikalna svojstva koja utječu na njihovo ponašanje prilikom zavarivanja, a to su toplinska vodljivost, električni otpor, temperaturno rastezanje i modul elastičnosti. U tablici 2. su prikazana fizikalna svojstva pojedinih grupa visokolegiranih čelika [5,6].

Tablica 2. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [6]

VRSTA ČELIKA		Fizikalna svojstva				
		α $10^{-6} \times K^{-1}$ (100 °C – 500 °C)	λ W/(m x K) (20 °C)	Ω $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C)	E kN/mm ² (20 °C)	Magne- tičnost
VISOKOLEGIRANI ČELICI	Feritni	10,5 – 12,0	29	0,60	210	+
	martenzitni	10,5 – 12,0	30	0,60	210	+
	austenitni	16 – 18	15	0,73	200	-
	Austenitno- -feritni (duplex)	12,5 – 13 (do 300 °C)	14	0,79	206	+
Nelegirani čelici		13	47	0,15	205	+

2.2.1 Martenzitni Cr – čelici

Martenzitni Cr - čelici su legirani s 13 % do 18 % kroma, imaju povišeni udio ugljika (0,2 % - 1,0 %) te mogu sadržavati 2,5 % nikla i 1,3 % molibdena. Zbog najvećeg udjela kroma se i nazivaju martenzitni kromni čelici. Dije se u dvije skupine, a to su konstrukcijski čelici i alatni čelici. Konstrukcijski čelici sadrže do 0,25 % C te se poboljšavaju, kod njih se posebna pažnja usmjerava na otpornost prema koroziji koju dobivaju nakon poboljšavanja u meko žarenom stanju imaju puno manju. Alatni čelici sadrže više od 0,3 % C i potrebno ih je popuštati nakon kaljenja. Kod alatnih čelika postoji dodatni zahtjev prema abrazivskom trošenju. Njihova korozivna postojanost je nešto niža zbog dvofazne mikrostrukture koju posjeduju (martenzit + karbidi) [3,7].

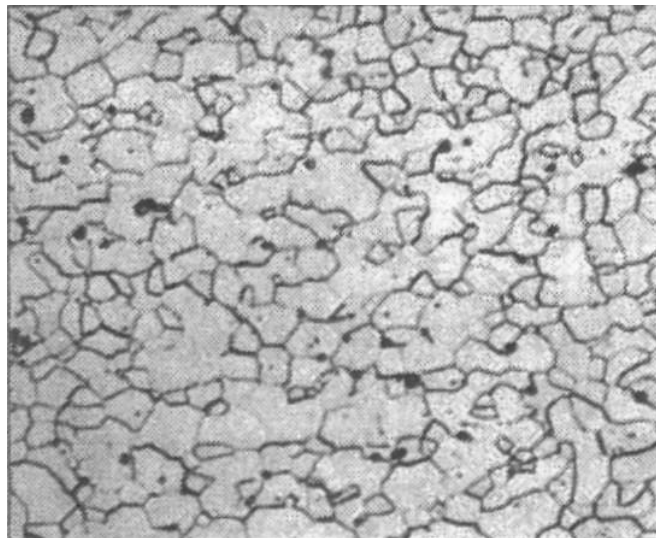
Kod zavarivanja martenzitnih Cr – čelika u praksi se koriste materijali s postotkom ugljika manjim od 0,15 %. Kod većih udjela ugljika može doći do hladnih pukotina i zakaljivanja u zoni utjecaja topline (ZUT) što rezultira povećanjem tvrdoće, čvrstoće, pada duktilnosti i gubitka korozivne postojanosti [3,5].

Pri zavarivanju martenzitnih Cr – čelika s približno 0,15 % C preporučuje se [3]:

1. Koristiti sušene elektrode, odnosno prašak za zavarivanje,
2. Temperaturu predgrijavanja i međuslojnu temperaturu održavati od 200°C do 300°C,
3. Vrste dodatnog materijala
 - Austenitni dodatni materijal, ali prilikom naknadne toplinske obrade može doći do pojave krhkosti zavarenog spoja,
 - za postizanja određene čvrstoće, dinamičke izdržljivosti te, ako se boja zavara ne smije razlikovati od osnovnog materijala, koriste se istovrsni ili slični dodatni materijali. Prilikom korištenja takvih dodatnih materijala potrebno je provoditi toplinsku obradu popuštanjem na 700 – 750°C zbog loše duktilnosti jer se nakon zavarivanja metal zavara sastoji od martenzita, delta ferita i djelomično zaostalog austenita.

2.2.2 Feritni čelici

Feritni čelici imaju feritnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna. Sadrže od 13 % Cr pa čak i do 30 % Cr i manje od 0.1 % C. Za povećanje njihove otpornosti na koroziju se dodaje Mo, a za bolju zavarljivost legiraju se još i sa Ti i Nb. S obzirom na austenitne čelike imaju veću otpornost na napetosnu koroziju u kloridnim medijima, a jeftiniji su od njih. Na slici 1. je prikazana mikrostruktura feritnih čelika [6, 7].



Slika 1. Mikrostruktura feritnih čelika [7]

Grijanjem feritnih čelika iznad 850°C dolazi do pogrubljenja zrna. To je najviše izraženo na područjima ZUT-a, gdje se javljaju visoke temperature prilikom zavarivanja. Već iznad 600°C počinje znatno rasti veličina zrna što rezultira s padom mehaničkih vrijednosti. Na većim temperaturama može doći do izlučivanja Cr po granicama zrna u ZUT-u što dovodi do pojave interkristalne korozije. Pri držanju u temperaturnom rasponu od 520°C do 850°C dolazi do stvaranja σ – faze. Na temperaturnom rasponu od 350°C do 520°C dolazi do krhkosti "475" time i do smanjenja duktilnosti te povećanja čvrstoće i tvrdoće [5, 6].

Za zavarivanje feritnih čelika potrebno je koristiti sušene bazično obložene elektrode i prašak, predgrijati na temperaturni raspon od 200°C do 300°C, osigurati minimalni unos topline do 1,5 kJ/mm zbog sprječavanja većih pogrubljenja te koristiti odgovarajuće austenitne dodatne materijale zbog pada žilavosti u području zavarenog spoja [5,6].

2.2.3 Austenitni čelici

Ti čelici su danas najraširenija grupa s gledišta primjene i proizvodnje, a karakterizira ih visoka duktilnost i niska čvrstoća. Austenitne čelike karakterizira visoka otpornost na rupičastu koroziju, napetosnu i interkristalnu, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura. Posjeduju visoku duktilnost pri niskim temperaturama. Uglavnom sadrže 0,002 – 0,15 %C, 15 – 20 % te 20 % Ni. Dodaju im se još i određene količine Mo, Ti, Nb, Ta i N. Nikal i dušik djeluju na proširenje austenitnog područja. Nedostatak tih čelika je nisko naprezanje tečenja ($185 - 225 \text{ N/mm}^2$). Dodavanjem Cr više od 18 % općenito se povećava otpornost prema koroziji. Titan i nobij u austenitnim čelicima služe za vezivanje s ugljikom prilikom sporog grijanja ili hlađenja te se time dobiva niski sadržaj ugljika (do 0,03 %) što sprječava interkristalnu koroziju. Za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji [5, 6, 7].

Danas se austenitni čelici smatraju relativno zavarljivim materijalima. Bez obzira na njihovu veliku otpornost prema koroziji, prilikom zavarivanja može se povećati osjetljivost prema koroziji u procjepu, može doći do pojave toplih pukotina i ostalo. Za sprječavanje tih negativnih pojava vrši se pravilnim odabirom dodatnog materijala, osnovnog materijala te odgovarajućom tehnologijom zavarivanja [5, 6]

- Kod austenitnih čelika koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50% veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja [6].
- Koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja. Može se spriječiti eventualno bakrenim podlogama koje omogućuju brže odvođenje topline iz područja zavarivanja [6].
- Specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo [6].

Nepoštivanjem određenih zahtjeva tehnologije zavarivanja, dolazi do sljedećih problema koji se mogu svrstati u tri velike grupe [6]

1. Korozijske pojave,
2. Tople pukotine,
3. Izlučivanje σ – faze.

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su [6]:

- Izborom dodatnog materijala koji osigurava sadržaj δ – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- bitna vrsta i čistoća zaštitnih plinova te njihova mješavina,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavati, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100°C do 150°C,
- međuslojna temperatura do najviše 150°C,
- odabrati takve uvjete zavarivanja koji osiguravaju miješanje s osnovnim materijalom manjim od 35 %,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- koristiti način pripajanja, naprave za stezanja, redoslijed zavarivanja zbog jakih deformacija,
- ne smije se ravnati s plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić, četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika.

3. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Zbog sve većih zahtjeva u postrojenjima, kod kojih su opreme izložene raznim mehaničkim, toplinskim naprezanjima te agresivnijim korozivnim okruženjima primjenjuju se u sve većim količinama spojevi različitih materijala. U takvim postrojenjima zavarivanje je osnovni način spajanja te se zahvaljujući tome razvio problem zavarivanja raznorodnih čelika [8,9].

Osim zavarivanja izvodi se i navarivanje, oblaganje – platiranje što je zaslužno za osiguranje mehaničke otpornosti pomoću jeftinijeg niskougljičnog / nelegiranog čelika, a njegovu površinu nerazdvojivo obložiti metalnim antikorozivnim materijalom. Takva izvedba raznorodnih metala se može koristiti u agresivnoj okolini pri većim mehaničkim opterećenjima. Danas se raznovrsni i platirani materijali koriste za izradu izmjenivača topline, nuklearnih reaktora, generatora pare, tlačnih spremnika za skladištenje agresivnih medija i ostalo [8].

Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja raznorodnih materijala vrlo je važan izbor sastava dodatnog materijala, parametri zavarivanja i miješanja osnovnog materijala s dodatnim materijalom. Neki od problema koji se mogu pojaviti je migracija ugljika, toplinska naprezanja, krhkost navarenog sloja austenitnog čelika i ostalo. Zavarivanje raznorodnih čelika s različitim mikrostrukturnim osnovama se izvodi bez problema, npr. martenzitni čelik s niskolegiranim feritnim pri čemu se koristi standardni dodatni materijal. Prilikom zavarivanja martenzitnog čelika s austenitnim čelikom, potrebno je koristiti dodatni materijal na bazi nikla. [10, 11]

Gledajući iz metalurškog stajališta zavarivanje raznorodnih čelika je kompleksnije od zavarivanja istorodnih čelika. Imamo najčešće 3 vrste raznorodnih spojeva [10]:

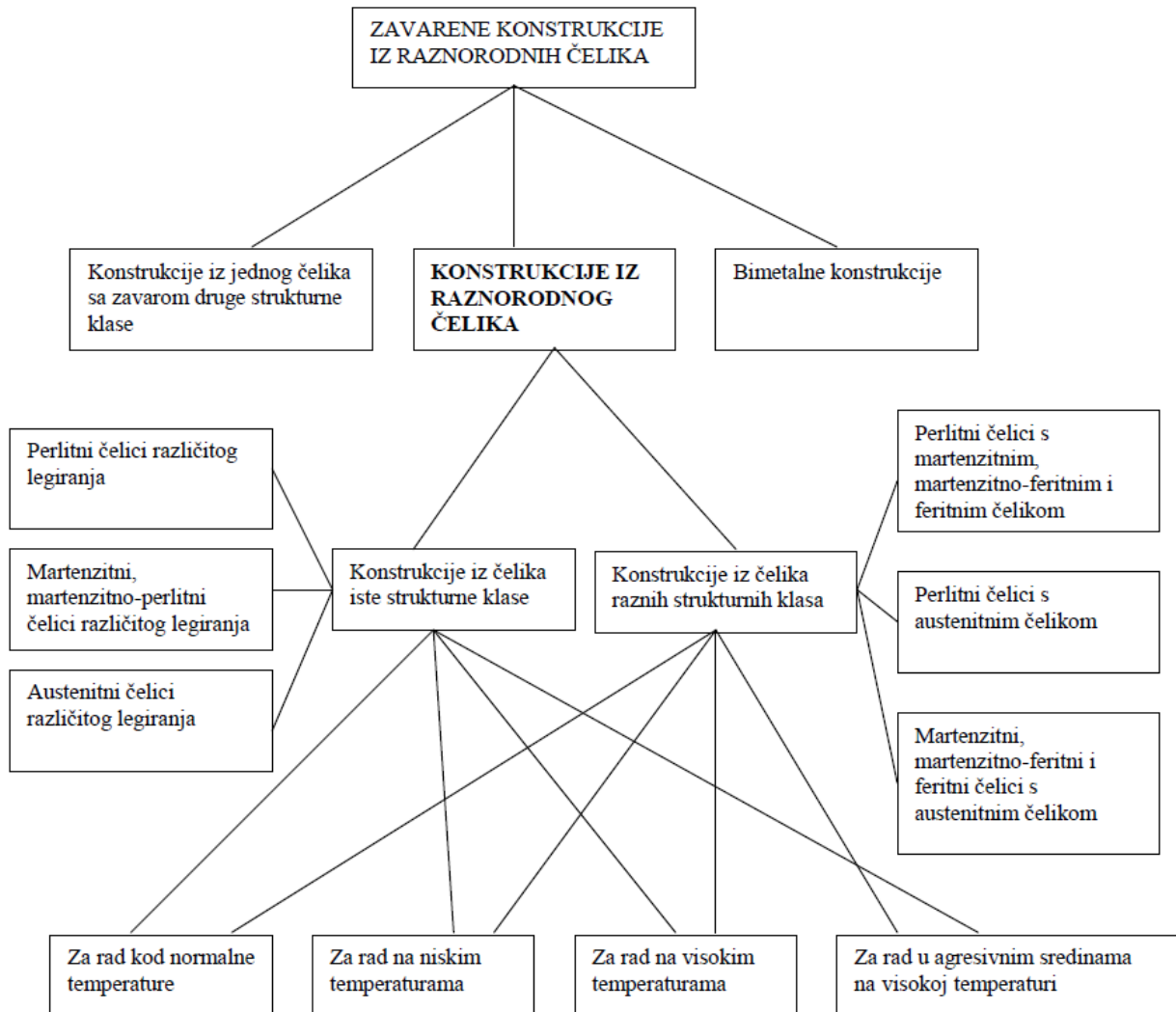
1. Zavarivanje različitih vrsta čelika,
2. Navarivanje nelegiranog ili niskolegiranog čelika slojem nehrđajućeg čelika za povećanje otpornosti na koroziju
3. Zavarivanje istorodnih osnovnih materijala pomoću različitog dodatnog materijala

Kod zavarivanja raznorodnih čelika potrebno je obratiti pozornost na sljedeće faktore

1. Dodatni materijal se odabire prema svojstvima osnovnog materijala. Kod zavarivanja nelegiranih, niskolegiranih i srednje legiranih čelika se odabire bolje zavarljiv, dakle manje legirani. Kod zavarivanja visokolegiranog čelika s niskolegiranim ili ne legiranim odabire se visokolegirani dodatni materijal, jer će miješanjem doći do krhke martenzitne zone taljenja.
2. Predgrijavanje i temperatura između prolaza moraju odgovarati zahtjevima ZUT – u materijala 1, ZUT - u materijala 2 te zoni transformacije. Ovisno vrsti osnovnih materijala možda će biti potrebne različite temperature materijala 1 i materijala 2.
3. Potreban je dobar odabir režim zavarivanja i unos topline.
4. Dobar odabir toplinske obrade.

3.1. Podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika

Na slici 2. je prikazana jedna vrsta podjela zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika. Takva podjela se najčešće nalazi u literaturama.



Slika 2. Osnovni način podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih spojeva [9]

Iz slike 2. je vidljiva osnovna podjela na:

- konstrukcije iz jednog čelika sa zavarom druge strukturne klase,
- konstrukcije iz raznorodnog čelika,
- bimetalne konstrukcije.

Konstrukcije iz raznorodnih čelika pak se dalje dijele na:

- konstrukcije iz čelika iste strukturne klase,
- konstrukcije iz čelika raznih strukturnih klasa.

Konstrukcije iz čelika iste strukturne klase detaljnije se još dijele na konstrukcije gdje su spojeni materijali [12]:

- perlitni čelici različitog legirnog sastava,
- martenzitni, martenzitno - feritni i feritni čelici različitog legirnog sastava,
- Austenitni čelici različitog legirnog sastava.

Konstrukcije iz čelika raznih strukturnih klasa se mogu još podijeliti na konstrukcije gdje su spojeni razni komadi [12]:

- Perlitni čelici s martenitnim, martenzitni – feritnim i feritnim čelicima,
- perlitni čelici s austenitnim čelicima,
- martenzitni, martenzitno – feritni i feritni čelici sa austenitnim čelicima.

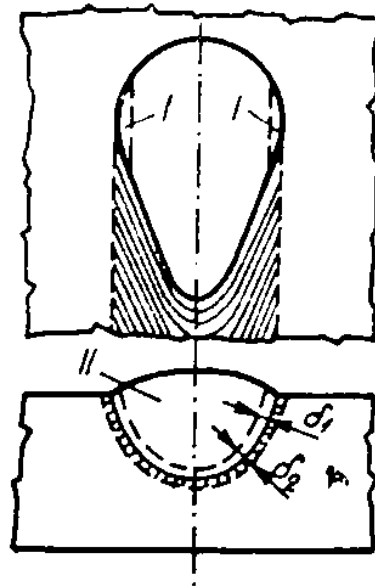
Postoji još i podjela prema uvjetima klasifikacije i vrsti primjene pa se zavarene konstrukcije mogu podijeliti na slijedeće grupe [12]:

- Konstrukcije za rad pri sobnoj temperaturi,
- konstrukcije za rad na niskim temperaturama,
- konstrukcije za rad na visokim temperaturama,
- konstrukcije izložene agresivnom mediju pri visokoj temperaturi.

3.2. Teorijske osnove zavarivanja raznorodnih čelika

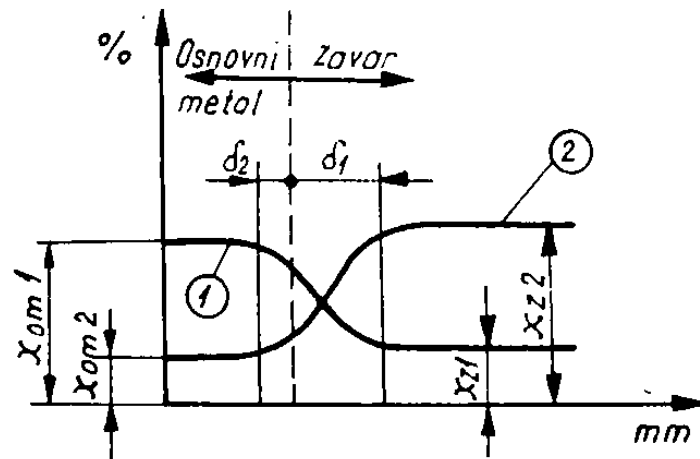
3.2.1. Stupanj protaljivanja (miješanja) i kemijska raznorodnost

Osnovni faktor, jedan od glavnih čimbenika koje treba ocijeniti kod izbora dodatnih materijala za zavarivanje raznorodnih čelika je protaljivanje ili penetracija osnovnog materijala kod zavarivanja. Oblik i dimenziju zone protaljivanja se može približno izračunati, a stupanj protaljivanja ovisi o više faktora. Jedni od glavnih faktora su snaga izvora topline i karakter njegovog ponašanja, toplinska i fizikalna svojstva materijala i vrsta zavarenog spoja. Stupanj protaljivanja je direktno vezan s kemijskom raznorodnošću. Što je veći stupanj protaljivanja veća je nejednakost kemijskog sastava u zoni zavara jer je veći udio osnovnog materijala u sastavu zavara. Zbog različitog sastava osnovnog materijala i dodatnog materijala nije dovoljno pomiješan rastaljeni metal kupke zavara kod granice spajanja osnovnog materijala i zavara kao što je prikazano na (slici 3, - I). Ta zona ima prijelazni međusastav u odnosu na zonu prikazanu na (slici 3, - II). Širina zone δ_1 iznosi od 0,2 do 0,5 mm.[9, 13].



Slika 3. Prikaz zone kupke zavara [13]

δ_2 iznosi od 0,1 do 0,2 mm kod elektrolučnog zavarivanja niskougličnih i Cr-Ni austenitnih čelika zbog postojanja dvofaznog stanja. Rastaljeni metal iz kupke zavara djelomično prodire u zoni i time mijenja njen sastav. Na slici 4. je prikazana promjena kemijskog sastava u zoni miješanja zavara i zoni miješanja osnovnog materijala [13].



Slika 4. Shematski prikaz kemijskog sastava u zonama miješanja zavara i osnovnog materijala [13]

x – maseni udio, [%]

δ – udaljenost od granice staljivanja, [mm]

x_{om1} – maseni udio kemijskog elementa „1“ u osnovnom materijalu [%]

x_{om2} – maseni udio kemijskog elementa „2“ u osnovnom materijalu [%]

x_{z1} – maseni udio kemijskog elementa „1“ u dodatnom materijalu [%]

x_{z2} – maseni udio kemijskog elementa „2“ u dodatnom materijalu [%]

Krivulja 1 prikazuje slučaj kada je sadržaj nekog elementa u osnovnom materijalu (x_{om1}) veći od sastava tog elementa u metalu zavara (x_{z1}), a krivulja 2 prikazuje kada je sadržaj nekog elementa u osnovnom materijalu manji od sastava tog elementa u metalu zavara [12,13].

Kemijska raznorodnost metala zavara se javlja kod čelika različitih kemijskih sastava, a utječe na eksploatacijske karakteristike metala zavara te na otpornost metala nastanku pukotina. Kod zavarivanja istorodnih čelika to ne stvara problem zahvaljujući relativno sličnom kemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala. Kod raznorodnih materijala je potrebno osigurati minimalno protaljivanje osnovnog materijala, tj. svesti ga na minimum. Za dobivanje minimalnog protaljivanja osnovnog metala potrebno je odabrati odgovarajući režim zavarivanja ili primjenom postupka zavarivanja koja će omogućiti minimum rastaljenog osnovnog materijala. Kemijska ravnomjernost je vezana s penetracijom koji zavisi o nekoliko faktora kao što su jačina struje zavarivanja koja najviše utječe, mehanička i termodinamička svojstva materijala i o vrsti zavarenog spoja. [9, 12, 13].

Stupanja protaljivanja izračunavamo prema slijedećoj formuli [9]:

$$\gamma = \frac{n}{n+m}$$

n – udio protaljenog osnovnog materijala u ukupnoj masi zavara [%]

m – udio nataljenog materijala u zavaru [%]

Stupanj protaljenosti osnovnog materijala ovisi o vrsti i obliku zavarenog spoja, najmanji stupanj protaljivanja je kod navarivanja trakastom elektrodom što je vidljivo u tablici 3. koja prikazuje stupanj protaljivanja za razne vrste zavarivanja [9, 12].

Tablica 3. Stupanj protaljivanja s obzirom prema vrsti spoja i tehnologije zavarivanja [9]

Vrsta spoja	Strukturna klasa zavarenog čelika	Stupanj protaljivanja (u %) za vrstu zavarivanja			
		Ručno elektrolučno	EPP	Navarivanje trakastom elektrodom	Zavarivanje pod troskom
Navarivanje cilindra	Perlitni	15 – 40	25 – 50	8 – 20	-
	Austenitni	25 – 50	35 – 60	15 – 25	-
Jednoslojni sučeoni spojevi	Perlitni	20 – 40	25 – 50	-	20 – 40
	Austenitni	30 – 50	40 – 60	-	30 – 50
Korijenski zavari višeslojnih sučeonih i kutnih spojeva	Perlitni	25 – 50	35 – 60	-	-
	Austenitni	35 - 50	40 - 70	-	-

3.2.2. Strukturna raznorodnost materijala zavarenih spojeva raznorodnih čelika

Strukturna raznorodnost je drugi bitan faktor koji je potrebno poznavati kod zavarivanja raznorodnih čelika. Mehanička svojstva, pouzdanost spojeva i proizvoda su povezane sa strukturnom raznorodnošću te se mogu osigurati samo ako u području zavara nema oslabljenih mjesta i krtih zakaljenih među slojeva. Da bi se to osiguralo potrebno je paziti kod samog odabira materijala za zavarivanje konstrukcija iz raznorodnih čelika, odrediti stupanj protaljivanja osnovnog materijala te ispravno ocijeniti strukturu koja će se javiti u zoni zavarenog spoja [9, 13].

Za zavarivanje niskolegiranih zakaljivih čelika s austenitnima imamo dva osnovna uvjeta [9]:

- Pažljiv odabir elektroda da bi se spriječila mogućnost nastanka toplih pukotina u austenitnom području,
- mogućnost upravljanja procesima difuzije elemenata iz niskolegiranog čelika, najčešće ugljika, iz osnovnog metala, u zonu spajanja, što dovodi do krtih međustruktura.

Prvi uvjet određuje kvalitetu elektrode, a drugi određuje područje primjene zavarenog spoja. Vrlo je važno u praksi ocijeniti strukturu koja će se pojaviti u zavarenom spoju nakon zavarivanja raznorodnih čelika. Trenutno je najjednostavnije i dovoljno točno ocijeniti pomoću Sefflerovog dijagrama [9].

3.2.3. Schaefflerov dijagram

Kao što je već ranije spomenuto, Schaefflerov dijagram se koristi za određivanje strukture visokolegiranih čelika koji se brzo hlade nakon zavarivanja, prikazan je na slici 5. Schaefflerov dijagram nam daje strukturu depozita, odnosno zone taljenja kod zavarivanja ili navarivanja raznorodnih čelika, npr. nelegiranog ili niskolegiranog s visokolegiranom feritnim ili austenitnim čelikom. Depozit se hladi vrlo brzo pa ga ne koristimo za osnovni materijal ili kod zavarivanja s vrlo sporim hlađenjem. Dijagram na apscisi sadrži ekvivalente kroma, a na koordinati ekvivalente nikla. Struktura depozita se određuje na temelju kemijskog sastava koji se izražava ekvivalentima nikla i kroma te sastav strukture depozita se određuje u područjima [1,9]:

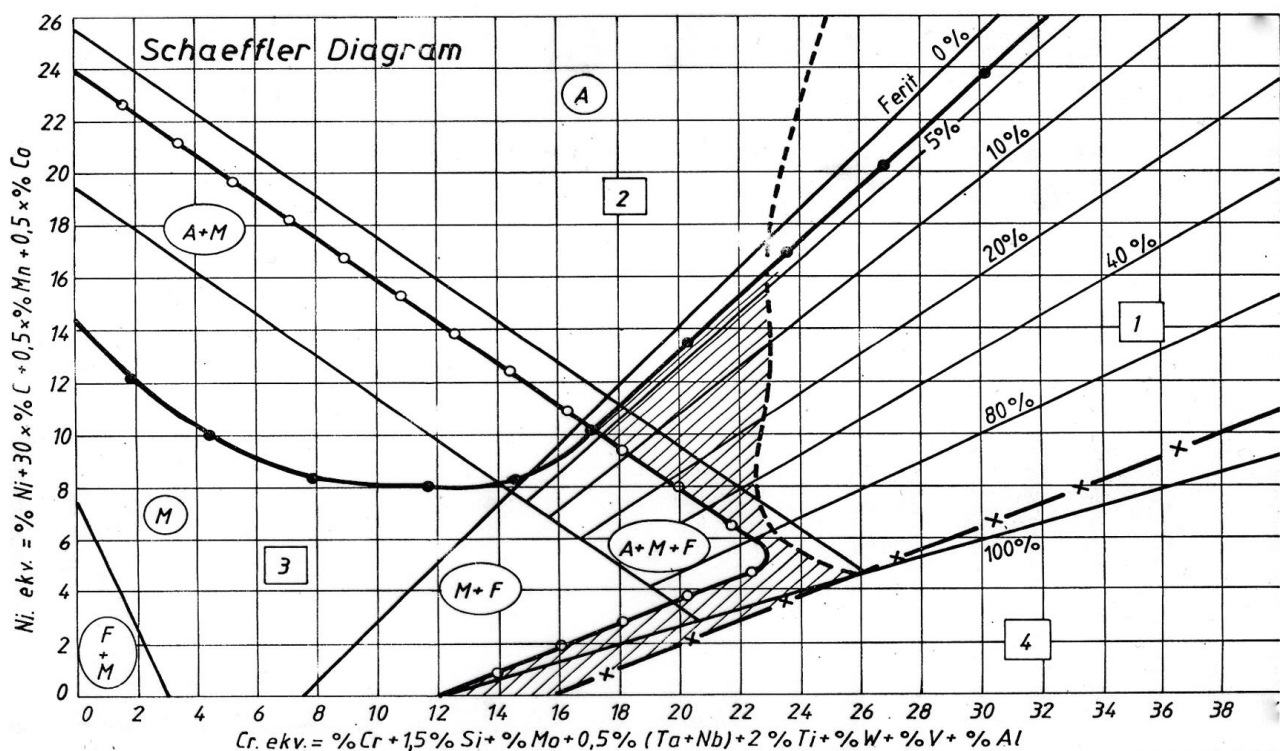
- austenita (A),
- martenzita (M),
- ferita (F),
- kombinacije (A + F; A + M; A + M + F; F + M).

Ekvivalenti za nikel i krom se izračunava prema formulama [13]:

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

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

Dijagram je razvio Schaeffler 1949. godine, a kasnije ga je dopunio DeLong i M.C.T. Bystram. DeLong je modificirao ekvivalent Ni time što je u formulo unio utjecaj dušika i mjereći sadržaj delta ferita feritnim brojem FN [1, 8].



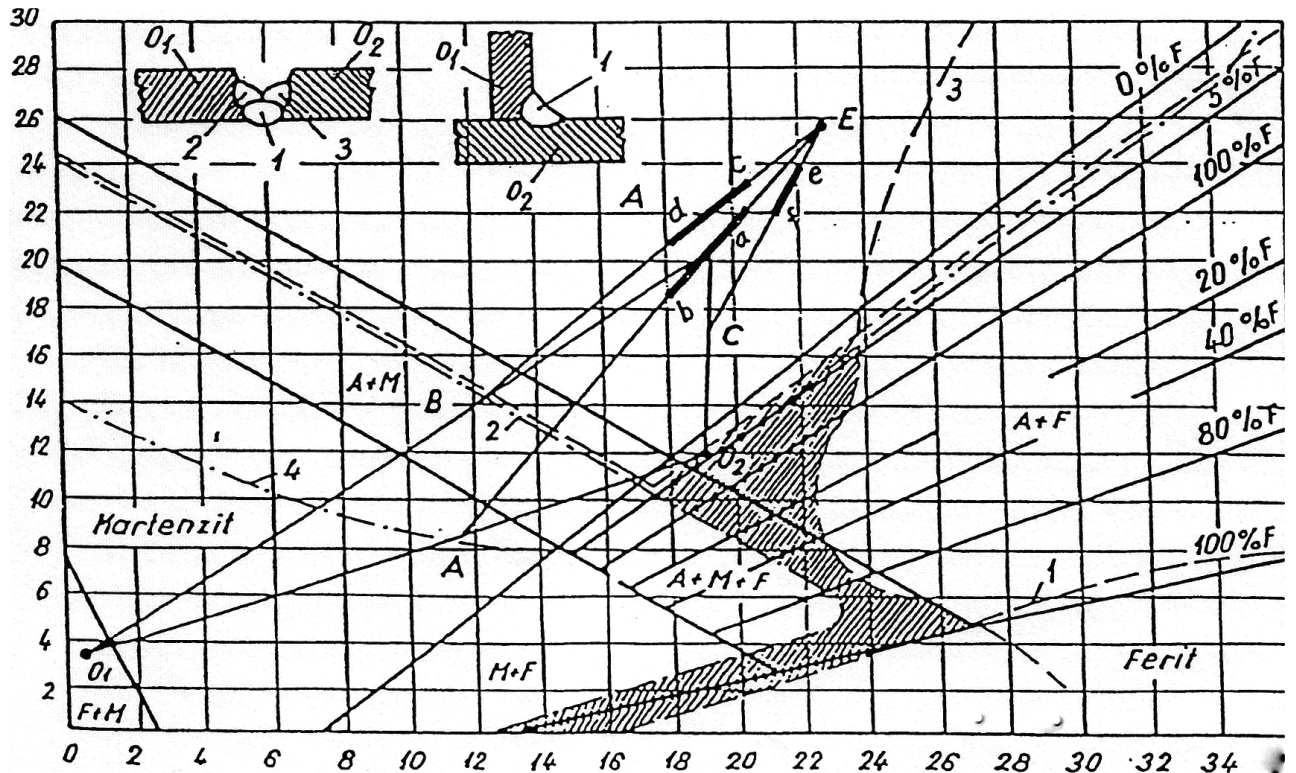
Slika 5. Schaefflerov dijagram [8]

Dopuna koju je Bystram uveo obuhvaćaju 4 linije koje označavaju 4 područja [8, 13, 12]:

- 1. Područje** – Kod tog područja na temperaturama od 500°C do 900°C dolazi do pojave krhke σ - faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10 % δ – ferita (α – faze).
- 2. Područje** – To područje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom i djelomice austenitno - martenzitnom strukturom. Iznad 1250°C materijali su skloni toplim pukotinama. Rješenje za zavarivanje materijala u tom području je korištenje dodatnog materijala koji u strukturi metala zavara osigurava 3 – 10 % ferita.
- 3. Područje** – U tom području se nalaze zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom. Vrlo su skloni hladnim pukotinama ispod 400°C. Predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom žarenjem se može riješiti problem hladnih pukotina. Ovo područje prekriva i jedan dio područja 2 u prekriženom dijelu te može doći i do pojave toplih pukotina.
- 4. Područje** – Obuhvaća veliki dio čistog ferita i djelomično austenita time i korozijski postojeće čelike s vrlo niskim sadržajem ugljika. Iznad 1100°C dolazi do jakog rasta kristalnog zrna te su posljedice krhkost, znatno smanjenje žilavosti te sklonost pukotinama.

Šrafirani dio u dijagramu predstavlja označava područje optimalnog sastava zavarenog spoja. Zato je potrebno voditi računa da se zavar nalazi u tom području. U praksi nije uvijek moguće pa se poduzimanjem drugih mjera može doći do kvalitetnih zavara. Čelik određenog kemijskog sastava se može označiti na Schaefflerovom dijagramu omeđenim područjem koje određuje mogući položaj čelika konkretnog sastava. Čelik određenog kemijskog sastava kao i dodatni materijal se na dijagramu označavaju točkama koje su definirane njihovim Cr i Ni – ekvivalentom. Takav slučaj je prikazan na slici 6. Podjeli li se pravac koji spaja osnovni i dodatni materijal u postotnim iznosima dobiva se veličina koja odgovara postotku miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Na tom pravcu se također može pratiti strukturno stanje zavarenog spoja. U korijenskom sloju 1 na slici 6. srednji sastav rastaljenih ivica lima odgovara točki A na liniji O1 – O2. Kod austenitnog čelika (O2) protaljivanje je veće nego kod feritno – perlitnog čelika (O2) zbog manje toplinske provodljivosti austenitnog čelika pa za niskolegirani čelik stupanj protaljivanja iznosi 40 %, a austenitni čelik oko 60 %. Na dužini AE dijelom a – b je određena struktura i sastav korijenskog sloja. Dijelom c – d na liniji BE je određen sastav metala koji nastaje protaljivanjem niskolegirano feritno – perlitnog čelika i

korijenskog sloja. Protaljivanje austenitnog čelika i korijenskog sloja nastaje na liniji CE kod odsječka e – f [8, 9].



Slika 6. Primjena Schaefflerovog strukturnog dijagrama pri određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavora [8]

Feritni broj (FN) u principu određuje otpornost metala zavora na vruće pukotine te označava postotak δ – ferita u metalu zavora nehrđajućih čelika. U tablici 4. je navedena tipična vrijednost feritnog broja za pojedine metale zavora [14]

Tablica 4. Približne vrijednosti feritnog broja (FN) za pojedine metale zavora [14]

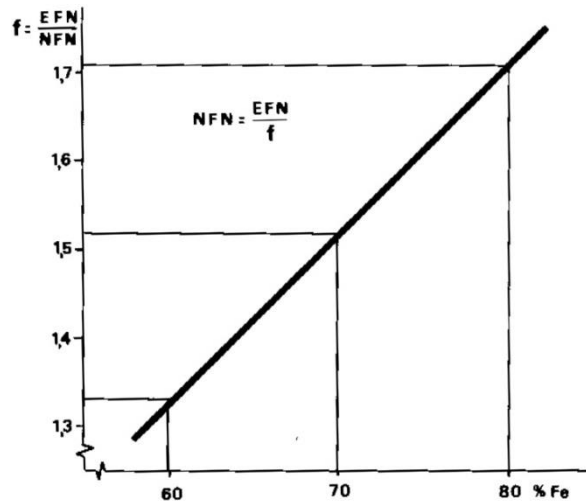
Metal zavora	Feritni broj (FN)
Potpuno austenitni metal zavora (visoka korozivna otpornost u jako oksidirajućem i manje kiselom mediju koji sadrži kloride)	FN < 0,5
CrNiMoN metal zavora, nemagnetičan	FN < 0,5
Nisko feritan CrNi i CrNiMoN metal zavora	FN 6 – 15 ili < 0,5
Metal zavora nehrđajućeg čelika s otpornošću na vruće pukotine i mikropukotine	FN 6 – 15
Austenitno – feritni metal zavora za raznorodne spojeve i prijelazne slojeve	FN 15 – 35
Austenitno – feritni metal zavora sa visokom otpornošću na napetosnu i rupičastu (piting) koroziju	FN 30 -70

Metoda koja je međunarodno priznata za određivanje broja ferita temelji se na jednakomjernom definiranom odnosu magnetske sile i sadržaju ferita u zavaru. Takav je odnos nezaobilazan zato što ne postoji pouzdana metoda za određivanje ferita u nehrđajućem čeliku. Sila između trajnog magneta i metala zavara mjeri se torzijskom vagom te se vrijednosti uspoređuju [14].

Sadržaj ferita u metalu zavara moguće je dobiti putem proračuna na temelju kemijskog sastava metala zavara. Izračunaju se Cr i Ni – ekvivalenti koji se zatim ucrtavaju u dijagrame koji su zasnovani na temelju metalurških istraživanja, a to su [14]:

- Schaefflerov dijagram, najprikladniji dijagram za opću sliku strukture metala zavara, ali za točno određivanje FN – a u metalu zavara baš i nije.
- DeLongov dijagram, objavljen 1973. godine, dobar je za ograničeni raspon metala zavara CrNiMo, CrNiN i CrNiMoN čelika.
- Najtočnije određivanje FN je pomoću WRC 1992 Constitution dijagrama, kojeg su preradili Kotecki i Siewert na temelju WRC 1988 Constitution dijagrama objavljenog od Siewerta, McCowana i Olsona. Najtočnije određivanje FN – a je pomoću tog dijagrama zahvaljujući točnom određivanju utjecaja Mn, Si, C, N i Nb.

Dugogodišnje korištenje WRC 1992 Constitution dijagrama je dokazalo da daje najbolju procjenu feritnog broja, a stari Schaefflerov daje najbolje rezultate za raznorodne spojeve, zavarivanje čelika sa prevlakama, proračun sastava i položaj razrijeđenog metala zavara. Feritni broj nije jednak sadržaju ferita u metalu zavara, sadržaj ferita niti se ne može točno izmjeriti, ali ga možemo izračunati dijeljenjem FN sa faktorom f. Faktor f pak je ovisan o postotku željeza u metalu zavara te ga dobivamo putem dijagrama koji je prikazan na slici 7. [14].



Slika 7. Faktor f ovisan o postotku Fe u metalu zavara [14]

3.2.4. Izbor postupka zavarivanja

Za zavarivanje raznorodnih čelika nije toliko bitan postupak zavarivanja, ali je vrlo bitno odabrati dobru tehnologiju zavarivanja koja će osigurati malo protaljivanje – miješanje rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim. Takvom tehnologijom zavarivanja će se spriječiti nastanak krhkih struktura i pukotina u prijelaznom sloju. Na tablici 5. je prikazan stupanj protaljivanja za neke postupke zavarivanja taljenjem [8].

Postupci za zavarivanje čelika različitih struktura su [8]:

- Postupci zavarivanja taljenjem (REL, MIG, MIG praškom punjenom žicom, EPP, TIG...),
- Postupci zavarivanja taljenjem s vrlo niskim razrjeđenjem kao što su zavarivanje pulsirajućim lukom, zavarivanje elektronskim mlazom i zavarivanje laserom
- Postupci spajanja bez taljenja (zavarivanje trenjem, zavarivanje eksplozijom, tvrdo lemljenje...).

Tablica 5. Stupnjevi protaljivanja za pojedine postupke zavarivanja taljenjem [8]

Postupak	Stupanje miješanja (dilucije) d
EPP zavarivanje trakom / TIG postupkom s toplom žicom	8 – 20 %
TIG	15 – 100 %
REL postupak s rutilnom žicom	15 – 25 %
REL postupak s bazičnom žicom	20 – 30 %
MAG	20 – 40 %
MAG, impulsno	10 – 30 %
EPP zavarivanje žicom	30 – 50 %

3.2.5. Dodatni materijal

Izbor dodatnog materijala ovisi o dobivenoj kvaliteti i svojstvima zavara. Kod zavarivanja raznorodnih čelika predstavlja problem što se svojstva osnovnih materijala bitno razlikuju. Dodatni materijal se može razlikovati od oba osnovna materijala ili je blizak više legiranom čeliku što ovisi o vrsti materijala koje spajamo. Najvažnije je odabrati takav dodatni materijal koji će osigurati veću čvrstoću zavara od čvrstoće niže legiranog čelika. Za zavarivanje feritno – perlitnih čelika sa austenitnim korozijski postojanim čelikom preporučuje se primjena austenitnog dodatnog materijala. Tim se dobiva zadovoljavajuća mehanička i strukturna svojstva zavara. Kod spajanja martenzitnih čelika i niskolegiranih feritnih čelika kao i martenzitnih čelika sa austenitnim može se izvesti sa standardnim dodatnim materijalom, a kod zavarivanja martenzitnog i austenitnog čelika se koristi dodatni materijal na bazi nikla. Korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla, martenzitna zona može biti smanjena što zavareni spoj čini otpornijim na povišenim temperaturama. Ako se zavaruju čelici kojima su tališta vrlo različita npr. kod zavarivanja feritni – perlitnih s austenitnim čelicima, temperatura skrućivanja metala zavara mora biti bliža čeliku s nižim talištem. Ako je temperatura skrućivanja metala zavara veća moguća je pojava toplih pukotina u ZUT – u [8, 11].

3.3. Problemi kod zavarivanja raznorodnih čelika

3.3.1. Difuzijski procesi

Difuzijski procesi predstavljaju jedan od najvećih problema kod zavarivanja raznorodnih čelika. Difuzija je kretanje atoma kroz materijal te time dolazi do nastanka kemijskih i strukturnih neravnomjernosti što vrlo utječe na kvalitetu zavarenog spoja raznovrsnih čelika. Do procesa difuzije dolazi prilikom samog zavarivanja, naknadne toplinske obrade i pri radu na visokim temperaturama. [8, 15]

Gibanje atoma kroz materijal događa se raznim oblicima difuzije [8]:

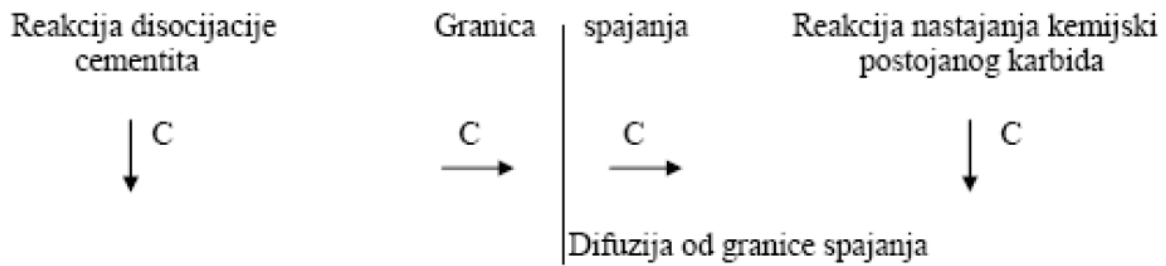
1. volumna difuzija, atomi se gibaju kroz kristalnu rešetku,
2. površinska difuzija, gibanje atoma po površini,
3. gibanje atoma kroz granice kristala,
4. gibanje atoma kroz dislokaciju i drugih površinskih i linijskih nepravilnosti.

Najveću difuzijsku pokretljivost u spoju raznorodnih čelika posjeduje ugljik zbog njegovih vrlo malih veličina atoma. Ugljika ima čak od 10^4 do 10^6 puta veću pokretljivost u odnosu na druge legirajuće elemente. Ispitivanjem je uočeno da nakon difuzije dolazi do razugljičenja na strani ugljičnog čelika, a pougljičenja na strani austenitnog čelika. Razugljičenje se ne može izbjeći ni korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla. Kada je zavareni spoj izložen visokim temperaturama duže vrijeme ugljik će difundirati iz područja materijala s nižim postotkom Cr u materijal s višim postotkom Cr. Do difuzije ugljika dolazi, ako postoji razlika u sadržaju karbidotvoraca kao što su Cr, Mo, Nb i ostali, ako je ta razlika jako velika, doći će do difuzije C iz čelika nižeg postotka C u čelik s više postotka C. Najniža temperatura kod koje počinje difuzija ugljika iznosi 425°C , a kod 800°C je difuzija najintenzivnija. [1, 12, 15]

Postoji veliki broj faktora koji omogućuju difuziju lako pokretljivih elemenata u zavarenom spoju [15]:

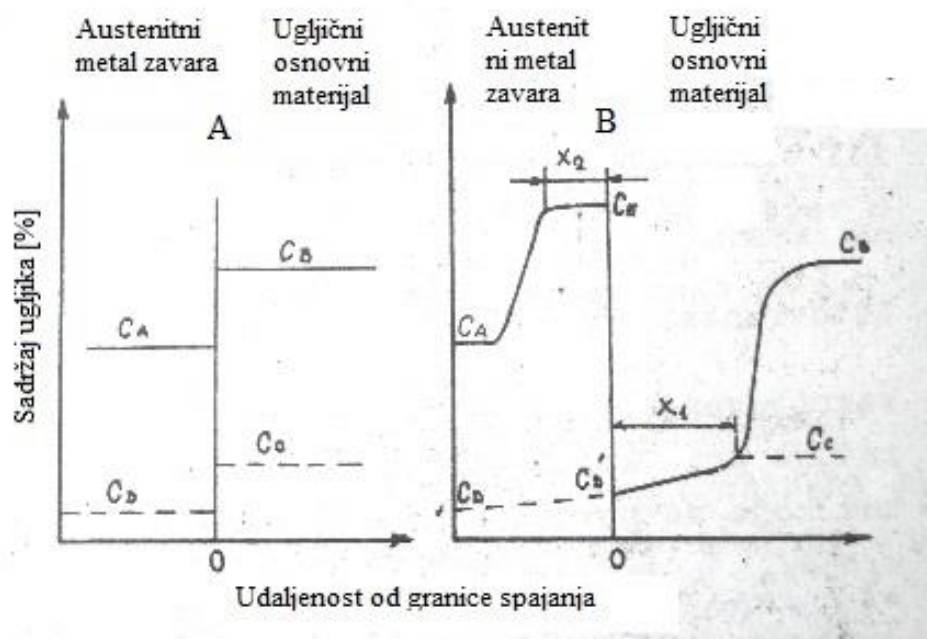
- Prisutnost elemenata s većim afinitetom prema ugljiku u jednom od čelika koji se zavaruje u usporedbi sa željezom,
- istovremena tekuća i čvrsta faza u zoni spajanja,
- zagrijavanje okolne zone materijala koji se zavaruje do temperature kod koje dolazi do transformacije željeza $\alpha \rightarrow \gamma$ pri kojoj je povećana rastvorljivost ugljika,
- velika razlika sadržaja ugljika u metalima koji se zavaruju.

Na slici 8. je prikazana pojava difuzije ugljika kod zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom.



Slika 8. Difuzija ugljika prilikom zavarivanja ugljičnog čelika s austenitnim čelikom [15]

Na strani ugljičnog i austenitnog čelika razlikuje se koncentracija ugljika kao i njegova rastvorljivost na granici spajanja, to je neophodno za izjednačavanje sadržaja rastvorenog ugljika difuzijom njegovih atoma iz zasićenog stanja cementitom u stanje zasićeno karbidom. Na slici 9. je prikazan proces difuzije u zoni spajanja ugljičnog osnovnog materijala s austenitnim dodatnim materijalom [15].



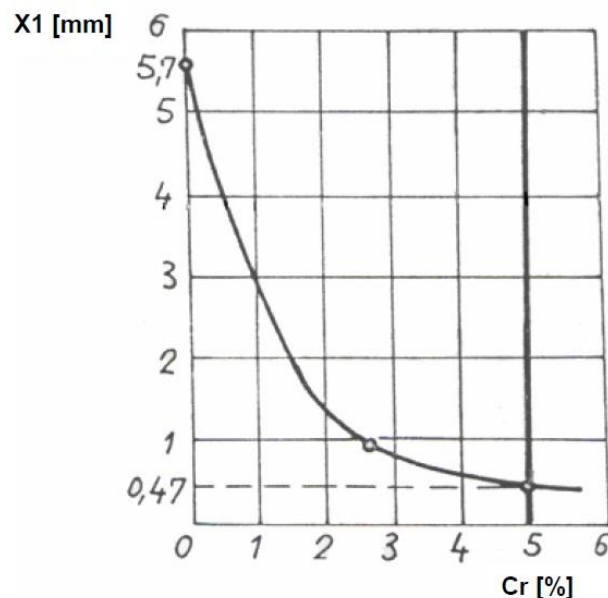
Slika 9. Proces difuzije kod spajanja ugljičnog osnovnog čelika s austenitni dodatnim materijalom [12]

Pomoću C_A i C_B na slici 9 označavaju koncentraciju ugljika u metalu zavara i osnovnom materijalu, C_C i C_D koncentraciju otopljenosti ugljika u metalu zavara i osnovnom

materijalu. Dijagram A prikazuje koncentraciju ugljika u zoni spajanja odmah nakon zavarivanja, a dijagram B nakon termičke obrade [15].

Prilikom difuzije ugljika iz ugljičnog čelika u austenitni dolazi do poremećaja ravnoteže na strani ugljičnog čelika. Da bi se ta ravnoteža sačuvala, ugljik difundira iz dijelova udaljenih od zone spajanja što rezultira pojavom disocijacije cementita na mjestima udaljenijim od zone spajanja. Posljedica toga je da se u blizini spajanja prepoznaje razugljičeni sloj na strani ugljičnog čelika širine X_1 , a koncentracija otopljenog ugljika opada sa C_C na C_D . Difundirani ugljik iz ugljičnog materijala se veže s elementima koji su skloni vezanju s karbidima stabilniji od cementita. Stvaranje karbida se događa uz granicu spoja, kada se iscrpe elementi koji grade karbide ta zona se proširuje pa se za vrijeme odvijanja difuzije koncentracija ugljika na strani austenitnog metala zavara koncentracija C_A se mijenja na koncentraciju C_E [15].

Za smanjenje difuzije ugljika najefikasnija mjera je legiranje ugljičnog čelika s elementima koji su skloni vezati se s ugljikom tvoreći karbide u ugljičnom čeliku. Djelomično ili potpuno stvaranje stabilnih karbida u ugljičnom čeliku smanjuje u njima koncentraciju rastvorenog ugljika C_C , a time i razliku $C_C - C_D$. Najčešći element za stvaranje stabilnih karbida je krom te je na slici 10. Prikazan njegov utjecaj na razvitak difuzijskih slojeva. [15]



Slika 10. Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja [12]

Iz dijagrama je vidljivo da kod zavarivanja čelika s 5 % Cr nastaje širina razugljičenog sloja od 0,47 mm. Time se smatra da kod zavarivanja raznorodnih čelika, gdje ugljični čelik

posjeduje minimalno 5 % Cr skoro pa potpuno isključuje razvijanje difuzije. Za sprječavanje difuzije osim kroma u osnovni materijal se mogu legirati i drugi elementi koji tvore karbide (titan, nobij, vanadij) [15].

3.3.2. Zaostala naprezanja i deformacije zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika

Do naprezanja u zavarenom spoju dolazi isključivo zbog zavarivanja, a uzroci tome su neravnomjeran raspored topline od zavarivanja te krutost zavarenih spojeva koja sprečava slobodu toplinskih deformacija. Zaostala naprezanja mogu nastati u zavarenom spoju raznorodnih čelika [8, 9]:

- Prilikom zavarivanja, zbog neravnomjerne raspodjele topline te krutosti zavarenog spoja koja sprečava toplinske deformacije pa nastaju plastične deformacije
- Podvrgavanjem zavarenog spoja toplinskoj obradi
- Prilikom rada kod cikličkih promjena temperature

Na naprezanja utječu još i mehanička i fizikalna svojstva čelika koji se zavaruju, a to su koeficijent linearnog istezanja, toplinska vodljivost, modul elastičnosti i ostalo. U tablici 6. su prikazana svojstva pojedinih čelika [8].

Tablica 6. Svojstva različitih vrsta čelika [8]

	Austenitni Cr-Ni čelici	Feritni Cr čelici	Martenzitni Cr čelici	Precipitacijom očvrnuti čelici	Ugljični čelici
Gustoća, $\rho/\text{kg m}^{-3}$	7800-8000	7800	7800	7800	7800
Koeficijent linearnog istezanja (0–500 °C), $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	17,0–19,2	11,2-12,1	11,6-12,1	11,9	11,7
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), $\lambda/\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	18,7-22,8	24,2-26,3	28,7	21,8-23	60
Specifični električni otpor $/10^{-6}\Omega\text{m}$	69-102	59-67	55-72	77-102	12
Specifični toplinski kapacitet (0 – 100 °C) $\text{c}/\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	460-500	460-500	420-460	420-460	480
Vlačni modul elastičnosti, E/GPa	190-200	200	200	200	210
Temperatura taljenja /°C	1400- 1450	1480-1530	1480-1530	1400-1440	1538

Vidljiva je razlika modula elastičnosti od 10 % između feritno – perlitnog čelika i austenitnog u korist austenitnog čelika. Zavarivanjem takve kombinacije konstrukcija treba biti prethodno zavarena s minimalni napetostima da ne bi došlo do pojave pukotina zbog napetosne korozije. Kod zavarivanja raznovrsnih čelika s različitim koeficijentima linearnog istezanja moguća je pojava pukotina za vrijeme rada zbog cikličkih promjena temperature. Kod takvog primjera je potrebno koristiti dodatni materijal čiji je koeficijent linearnog istezanja vrlo sličan kao kod ugljičnog konstrukcijskog čelika, npr. nikal – legure. Tada će se najveća opterećenja javljati na strani korozijski postojanog čelika što nije opasno zbog veće duktilnosti materijala koju osigurava nikal [8].

Najbolja metoda za uklanjanje zaostalih naprezanja nastalih prilikom zavarivanja istorodnih čelika je žarenje, a što se tiče zavarenih spojeva iz raznorodnih čelika nakon takve toplinske obrade u faze hlađenja opet dolazi do pojave napetosti zbog različitih toplinskih dilatacija raznorodnih čelika [9, 12].

3.4. Zavarivanje platiranih materijala

Platiniranje je postupak nanošenja tankog sloja plemenitijeg materijala na nelegirane i mikrolegirane konstrukcijske čelike u svrhu postizanja antikorozivnog sloja. Na deblji osnovni materijal se zavaruje platiniran sloj debljine od 3 – 7 mm, a to se izvodni toplim valjanjem, zavarivanjem eksplozijom ili se navaruje pod prahom. Platinirani sloj može biti od CrNi legure, Cr nehrđajućih čelika, Ni – legure, Cu – legure i ostalo [1].

Zavarivanjem platiniranih materijala potrebno je postići [1]:

- homogenost i kontinuitet platiranog sloja,
- otpornost na koroziju,
- mehanička svojstva moraju biti zadovoljavajuća za osnovni materijal i za platinirani sloj.

Problemi kod zavarivanja i navarivanja platiniranih slojeva su [1]:

- a) Različita fizikalna svojstva:
 - temperatura tališta,
 - koeficijent linearnog toplinskog rastezanja,
 - koeficijent provođenja topline,
 - granica razvlačenja i ostala napreznja.
- b) Različita struktura i svojstva što uključuje moguću krhkost.

Dodatni materijal mora odgovarati mehaničkim svojstvima osnovnog materijala te antikorozivnim svojstvima platiniranog sloja. Ako je dodatni materijal čvršći od osnovnog, zona taljenja će biti čvršća u ZUT-u i zoni taljenja (ZT) te će nastati visoka zaostala napreznja te ako nema istežljivosti doći će do pukotina u ZT koje se mogu proširiti i do ZUT-a [1].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

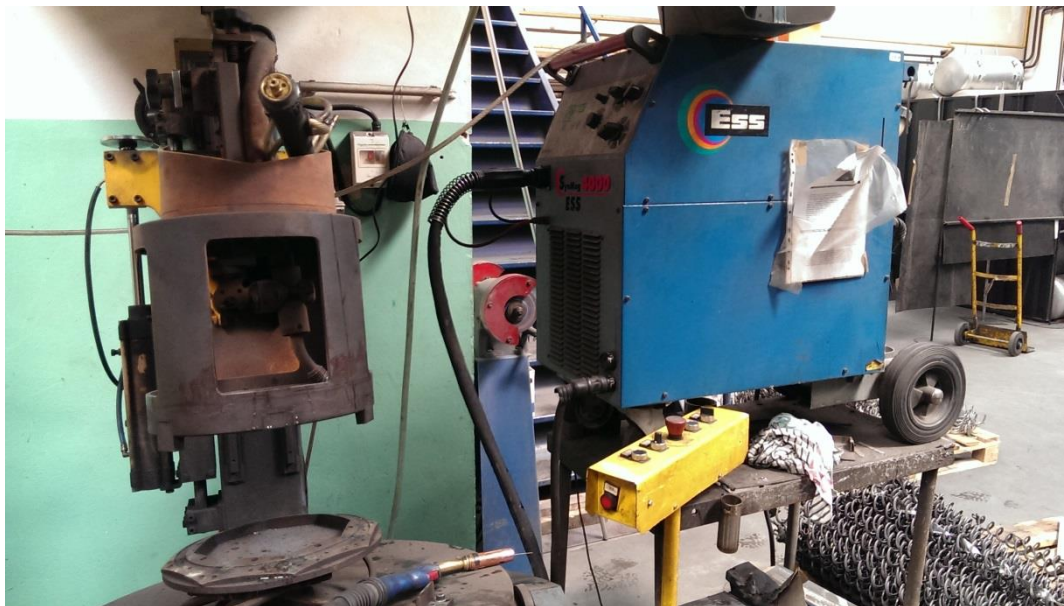
Za eksperimentalni dio završnog rada izrađena su dva tipa ispitnih uzorka. Uzorci su rađeni u tvrtci Centrometal d.o.o. Prvi uzorak zavaren je jednim prolazom, a drugi pomoću tri prolaza. Oba uzorka su kutnog spoja i izrađena su MAG postupkom zavarivanja.

Daljnje izrezivanje ispitnih uzoraka te priprema samih makro izbrusaka presjeka zavara izvedena je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na Katedri za zavarene konstrukcije, Laboratoriju za zavarivanje te Laboratoriju za zaštitu materijala.

4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada

4.1.1. Izvor struje

Za izradu zavarenih uzoraka eksperimentalnog dijela korišten je izvor struje ESS SynMag 4000 koji je prikazan na slici 11. U tablici 7. su prikazane osnovne tehničke specifikacije izvora struje.



Slika 11. Izvor struje za zavarivanje ESS SynMag 4000

Tablica 7. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje ESS SynMag 4000

Raspon struje za MIG/MAG [A]	40 – 400
Raspon napona za MIG/MAG [V]	16 - 34
Intermitencija [A]	40 % d.c. 400
	100 % d.c. 240
Napon praznog hoda [V]	18 – 48
Klasa izolacije	
Zaštita	IP 23
Dimenzije v/d/š [mm]	980 x 430 x 930
Masa [kg]	180

4.1.2. Specifikacija osnovnog materijala – nelegirani čelik

U tablici 8. su prikazana mehanička svojstva osnovnog materijala, a u tablici 9. je prikazan kemijski sastav osnovnog materijala. Podaci su uzeti iz certifikata osnovnog materijala prema EN 102043-3.1 priloženih u završnom radu.

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S235JRG2

Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	290
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	405
Istezanje A _S [%]	29,5

Tablica 9. Kemijski sastav čelika S235JRG2

Kemijski element	Kemijski sastav elemenata [%]
C	0,166
Si	0,008
Mn	0,552
P	0,025
S	0,012
Al	0,028
Nb	0,002
V	0,001
Ni	0,008
Cr	0,025
Cu	0,01
Mo	0,001
C - ekvivalent	0,265

4.1.3. Specifikacija osnovnog materijala – visokolegirani čelik

Mehanička svojstva osnovnog materijala prikazana su u tablici 10., a u tablici 11. dan je kemijski sastav osnovnog materijala. Podaci su uzeti iz atesta osnovnog materijala priloženih u završnom radu.

Tablica 10. Mehanička svojstva osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12

Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	357
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	651
Istezanje A _S [%]	57,3

Tablica 11. Kemijski sastav čelika 1.4828 X15CrNiSi20-12

Kemijski element	Kemijski sastav elemenata [%]
C	0,052
Si	1,95
Mn	0,97
P	0,023
S	0,001
Cr	19,3
Mo	0,13
Ni	11,12
Al	0,003
N	0,048
Cu	0,21
Sn	0,005
Nb	0,01
B	0,0038
Ti	0,012
C - ekvivalent	4,855

4.1.4. Dodatni materijal

Dodatni materijal za izradu uzoraka korišten je Boehler FFB – IG prema EN ISO 14343-A; G 25 20 Mn. U tablici 12. su iznesena mehanička svojstva dodatnog materijala uzeta iz A – testa prema EN 10204–3.1, a u tablici 13. kemijski sastav dodatnog materijala.

Tablica 12. Mehanička svojstva dodatnog materijala prema EN 10204–3.1.

Promjer žice [mm]	1,2
Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm ²]	≥ 350
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	≥ 540
Istezanje [%]	≥ 30
Udarni rad loma [KV/J]	≥ 60

Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala

Kemijski element	Kemijski sastav elemenata [%]
C	0,13
Si	0,9
Mn	3,0
P	0,01
S	< 0,01
Cr	24,2
Mo	< 0,1
Ni	20,4

Korištenjem dodatnog materijala Boehler FFB – IG dobiva se potpuno austenitni depozit. Zavareni spoj otporan je do 1200°C te posjeduje dovoljnu žilavost do -196°C. Potrebno je izbjegavati temperature između 650°C i 900°C zbog mogućnosti pojave krhkosti.

4.1.5. Zaštitni plin

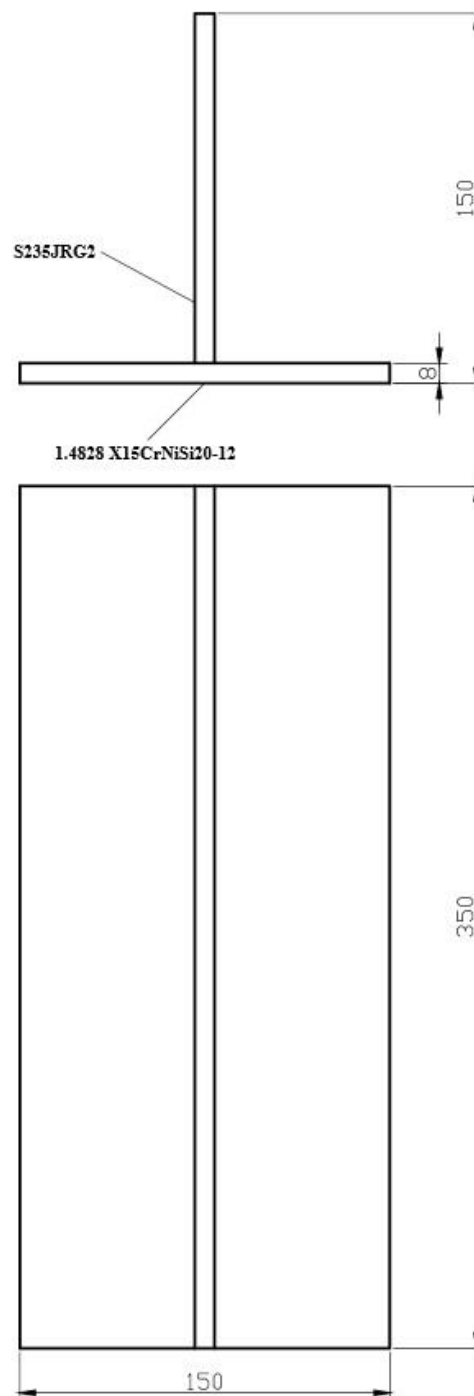
Za izradu oba uzoraka korišten je zaštitni plin oznake M12 prema normi HRN EN ISO 14175. Zaštitni plin se sastoji od mješavine Ar i CO₂ i to 98% argona i 2% ugljičnog dioksida. Protok plina je iznosio 12 l/min, na slici 12. je prikazana provjera protoka plina.



Slika 12. Provjera protoka plina

4.2. Dimenzije i izrada ispitnih uzoraka

Ispitni uzorak jednog prolaza kao i uzorak od tri prolaza su jednakih dimenzija. Duljina uzoraka iznosi 350 mm, a širina i visina 150 mm. Debljina osnovnog materijala S235JRG2 je jednaka kao i kod osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12, a iznosi 8 mm. Osnovni materijali izrezani su postupkom laserskog rezanja. Na slici 13. su prikazane dimenzije ispitnog uzorka u nacrtu i tlocrtu.



Slika 13. Prikaz dimenzija uzorka

Kao što je prethodno navedeno, ispitni uzorci su zavarivani MAG postupkom. Prvi uzorak je zavaren jednim prolazom, a drugi pomoću tri prolaza. Lijevom tehnikom su zavarena oba uzorka. U tablici 14. su navedeni tehnološki parametri koji su korišteni za zavarivanje oba uzorka. Slike 14. i 15. prikazuju zavarivanje ispitnih uzorka.

Unos topline nam je vrlo bitan kod zavarivanja, a izračunava se prema formuli:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_Z \times 1000} \times \eta \text{ [kJ/cm]}$$

U – Napon zavarivanja [V]

I – Jakost struje zavarivanja [A]

v_Z – Brzina zavarivanja [cm/min.]

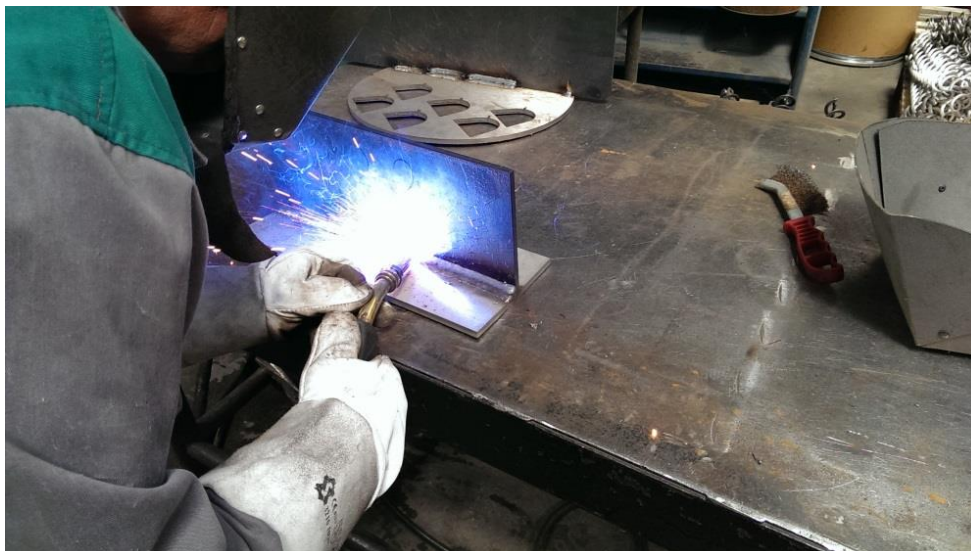
η – Stupanj iskorištenja i ovisi o postupku zavarivanja (za MAG 0,8)

Tablica 14. Tehnološki parametri zavarivanja

	Ispitni uzorak s jednim prolazom	Ispitni uzorak s tri prolaza
Jakost struje [A]	213	190
Napon [V]	27,8	21,5
Protok plina [l/min]	12	12
Brzina žice [m/min]	7,6	4
Brzina zavarivanja [cm/min]	20	35
Unos topline [kJ/cm]	14,21	5,60



Slika 14. Zavarivanje ispitnog uzorka s jednim prolazom



Slika 15. Zavarivanje ispitnog uzorka s tri prolaza

Na slici 16. i 17. su prikazani zavareni ispitni uzorci, spremni za izrezivanje eksperimentalnih uzoraka.



Slika 16. Zavareni ispitni uzorak s jednim prolazom



Slika 17. Zavareni ispitni uzorak s tri prolaza

Nakon izrezivanja velikih uzoraka u Laboratoriju za zavarivanje, dobiveni izrezani uzorci se poliraju na stroju u laboratoriju za materijalografiju. Poliranje se provodi tako što se na stol od stroja koji rotira 300 min^{-1} stavlja brusni papir od silicon carbida (SIC). Brzina vrtnje brusnog papira, u ovom slučaju 300 min^{-1} , dobiva se na temelju propisane brzine brušenja. Prvo brušenje se vrši brusnim papirom hrapavosti #360, nakon toga se vrši brušenje brusnim papirom hrapavosti #500 te brušenje i poliranje slijedi redom hrapavošću: #1200, #2000, #4000. Brušenje i poliranje se vrši uz pomoć vode koja hladi, ujedno i ispire izbrušeni otpad. Na slici 18. lijevo je prikazan stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka, a desno brusni papir hrapavosti #4000.

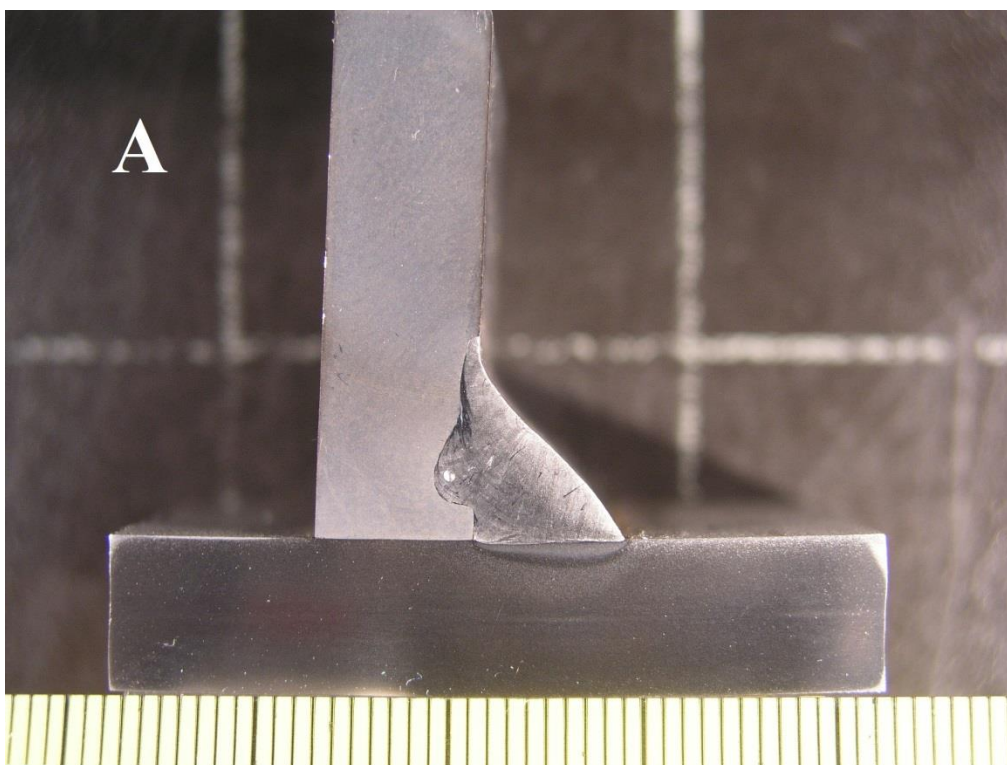


Slika 18. Stroj za poliranje izrezanih ispitnih uzoraka – lijevo, brusni papir hrapavosti #4000 – desno

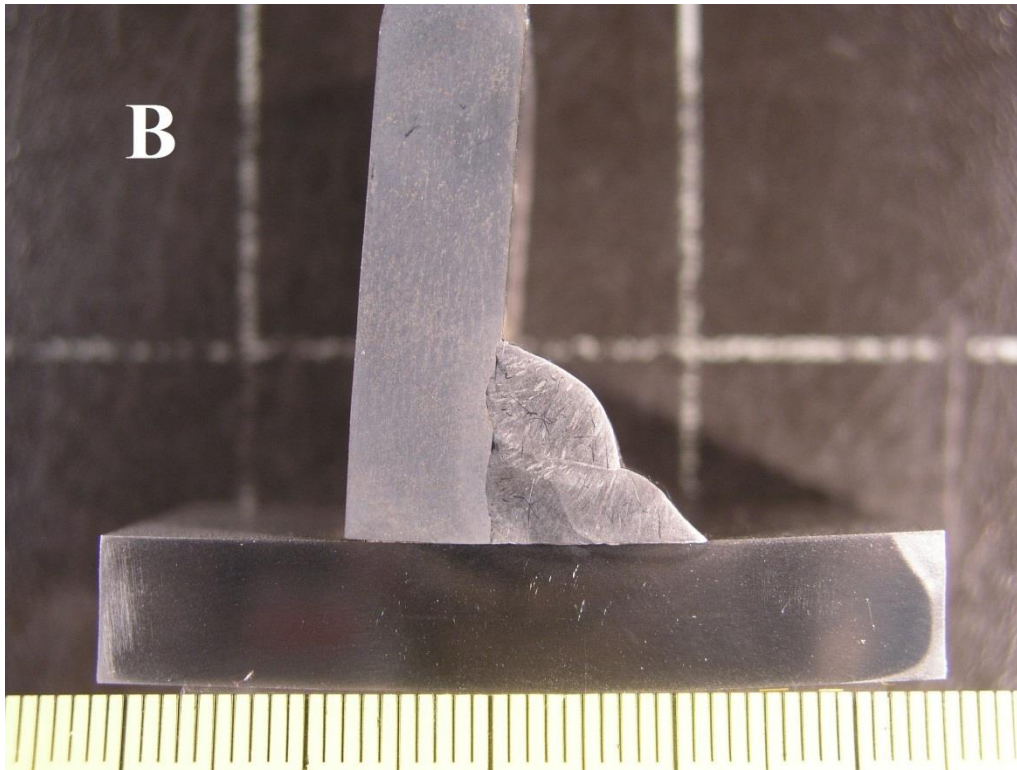
Polirani izrezani ispitni uzorci se zatim podvrgavaju nagrivanju u nitalu 3 % koje se vrši u Laboratoriju za zaštitu materijala. Nital je rastvor dušične kiseline u alkoholu i to u omjeru 1 cm³ dušične kiseline i 100 cm³ etilnog alkohola. Tim postupkom se nagrivanju granice zrna željeza [16].

Zadnji postupak za dobivanje makro izbruska presjeka zavara je elektrolitsko nagrivanje u kromovoj kiselini (10 g CrO₃ u 100 ml H₂O) koje se također izvodi u Laboratoriju za zaštitu materijala. Postupak elektrolitskog nagrivanja traje 2 – 3 min. pod naponom od 10 V te jakosti struje 4 A.

Na slici 19. Prikazan je makro izbrusak presjeka zavara ispitnog uzorka zavarenim jednim prolazom te ćemo ga nazvati uzorkom A. Na slici 20. Je prikazan makro izbrusak presjeka zavara ispitnog uzorka zavarenog pomoću tri prolaza te ćemo ga nazvati uzorak B.



Slika 19. Makro izbrusak presjeka zavara – uzorak A



Slika 20. Makro izbrusak presjeka zavora – uzorak B

Iz uzoraka A na slici 19. vidimo da je došlo do naljepljivanja. Do naljepljivanja može doći zbog nepravilne tehnike rada, neispravnih parametara zavarivanja za tu kombinaciju materijala te nepravilne pripreme spoja. Na uzorku A je vidljivo da je položaj luka neispravan te je previše ukošen na stranu osnovnog materijala S235JRG2. To je rezultiralo dubokim protaljivanjem na jednom dijelu osnovnog materijala S235JRG2 te nije došlo do miješanja u točki spajanja osnovnih materijala. Kod uzorka B vidimo da je došlo do miješanja na strani osnovnog materijala S235JRG2, a na strani osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12 je također došlo do naljepljivanja. Mogući uzorci naljepljivanju su nepravilni parametri zavarivanja te prevelika brzina zavarivanja.

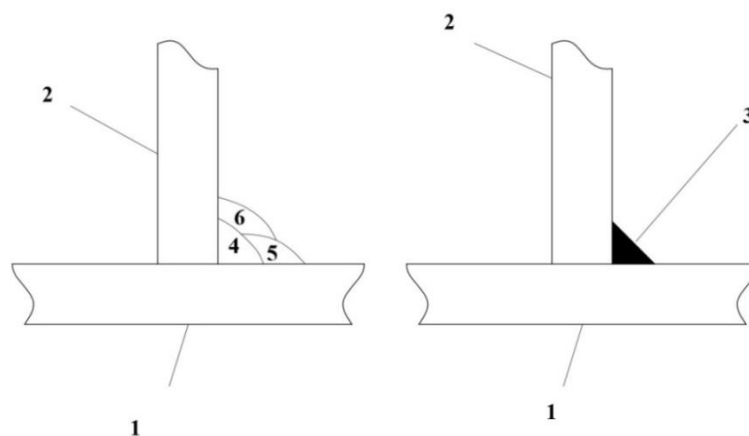
4.3. Mjerenje feritnog broja

Određivanje feritnog broja, tj. postotak ferita u zavaru vrši se pomoću uređaja: Institut Dr. Foerster Reuntligen Ferritgehaltmesser 1.054 koji je prikazan na slici 21. Uređaj posjeduje ticalo koje prislanjanjem na željeno mjesto očitava postotak ferita u materijalu. Uređaj se kalibrira pomoću etalona koji posjeduje točno 9,8 % F.



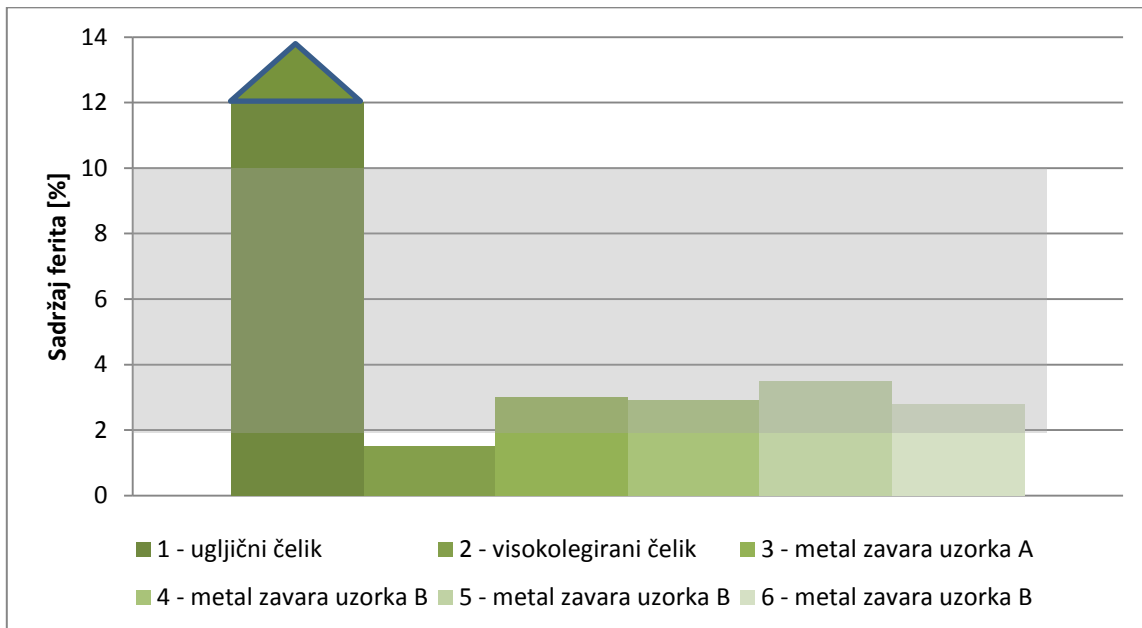
Slika 21. Uređaj za mjerenje feritnog broja

Osnovni materijal S235JRG2 koji je označen brojem (1) na slici 22. sadrži iznad 12 % ferita dok osnovni materijal 1.4828 X15CrNiSi20-12 (2) sadrži 1,2 – 1,7 % F. Kod uzorka A, zavareni spoj sadržava 0,1 – 0,8 % F, a na depozitu sa strane ugljičnog čelika (2) sadržava 3,8 – 6,7 % F. Na tom mjestu je veliko odstupanje zbog velike razlike sadržaja ferita u ugljičnom čeliku i u samom dodatnom materijalu. Kako se sve više po zavaru približavamo ugljičnom čeliku tako postotak F raste. Na uzorku B u zavaru (4) postotak ferita iznosi 2,2 – 4,25 %. U zavaru (5) postotak ferita se kreće između 2,75 % i 3,75 % te u zavaru (6) iznosi 1,7 – 3,7 % F.

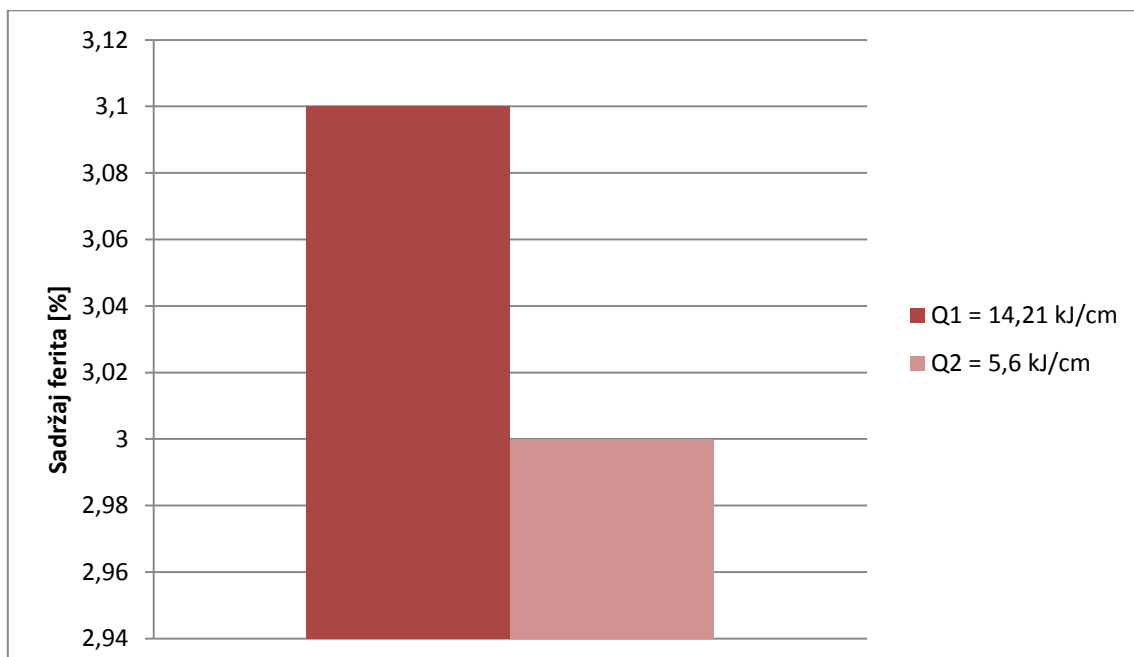


Slika 22. Prikaz zavora i osnovnih materijala na makro izbruscima za mjerenje feritnog broja

Na slici 23. se nalazi grafički prikaz udjela ferita u svakom zavaru i osnovnom materijalu. Brojčane oznake zavara uzete su iz slike 22. Osjenčano područje prikazuje prihvatljiv postotak ferita. Stupac 2 nam prikazuje udio ferita u osnovnom materijalu 1.4828 X15CrNiSi20-12 te nije čudno što iznosi manje od prihvatljivog. Sličan primjer je i kod stupca 1 koji prikazuje udio ferita u osnovnom materijalu S235JRG2 te iznosi daleko iznad 12%. Također vidimo da se svi zavari nalaze u prihvatljivom području sadržaja ferita. Slika 24. prikazuje usporedbu sadržaja ferita pojedinog unosa topline. Vidimo da je sadržaj ferita skoro pa izjednačen. Uzete su srednje vrijednosti sadržaja ferita za pojedini unos topline.



Slika 23. Prikaz udjela ferita u pojedinom zavaru i osnovnom materijalu

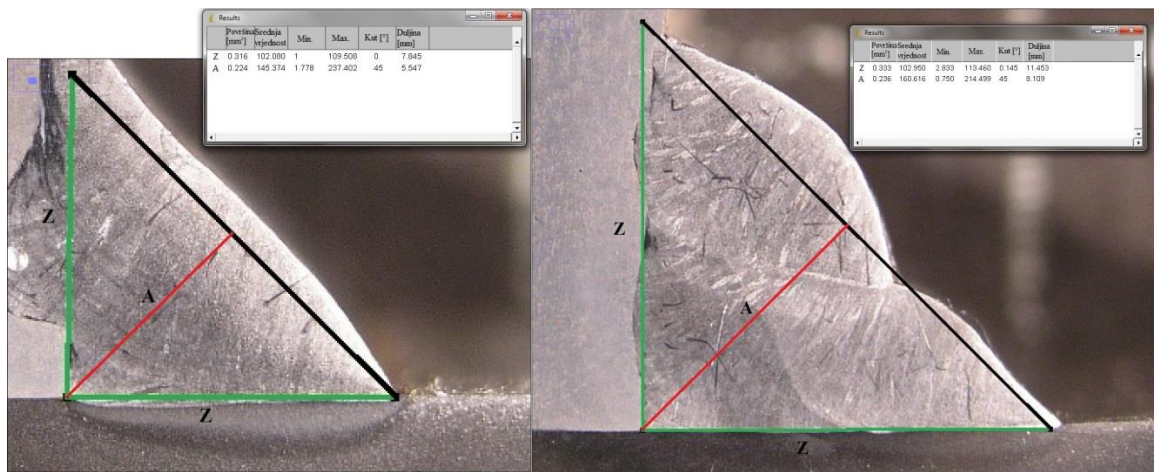


Slika 24. Sadržaj ferita pojedinog unosa topline

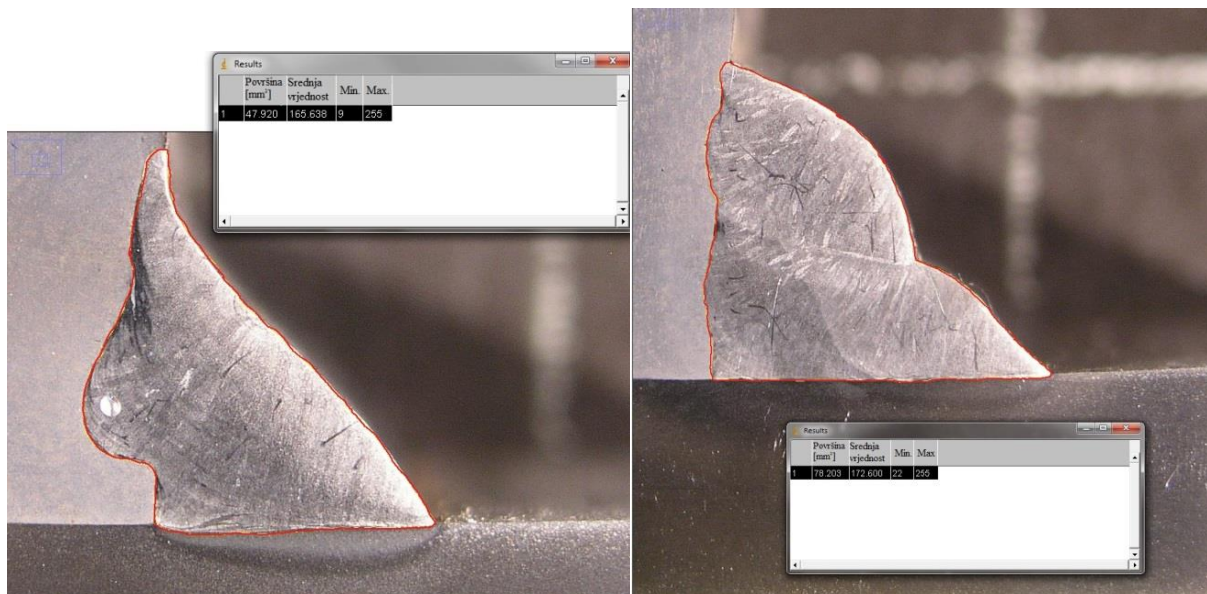
4.4. Geometrija zavora

U geometriji zavora potrebno je izmjeriti bitne dimenzije zavori kao što su: dubina zavora, površina presjeka zavora, dubina ZUT – a, visina te širina. Mjerenje je izvršeno u programu „imageJ“ na makro izbruscima presjeka zavora koji su fotografirani u Laboratoriju za materijalografiju, a prikazani su na slici 19. i 20.

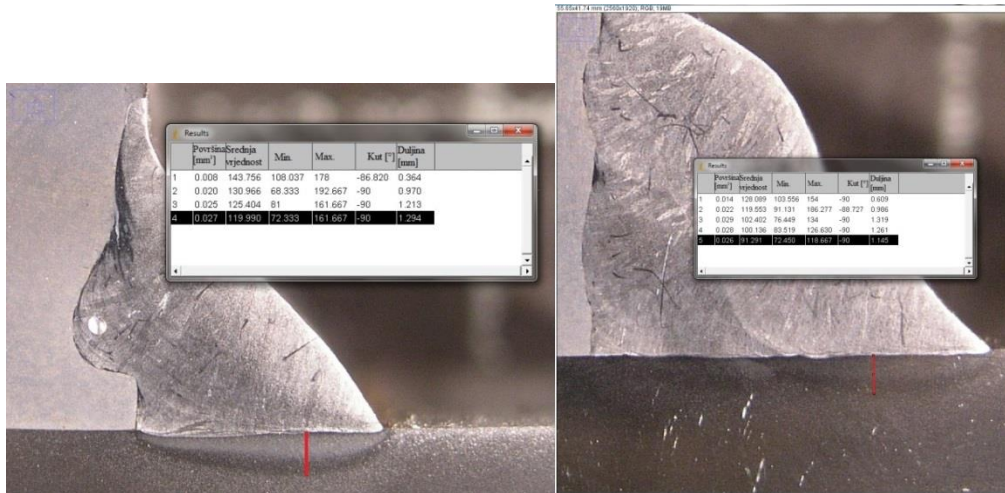
Na slici 25. je prikazan primjer mjerenja visine zavora uzorka A i B. Mjerenje površine presjeka zavora prikazano je na slici 26. za oba uzorka. Dubina ZUT – a izmjerena je na taj način da je uzeta srednja vrijednost dubine za mjere uzete duž širine ZUT – a, a prikazano je na slici 27. za oba uzorka.



Slika 25. Prikaz mjerenja visine zavora. Uzorak A – lijevo, uzorak B - desno

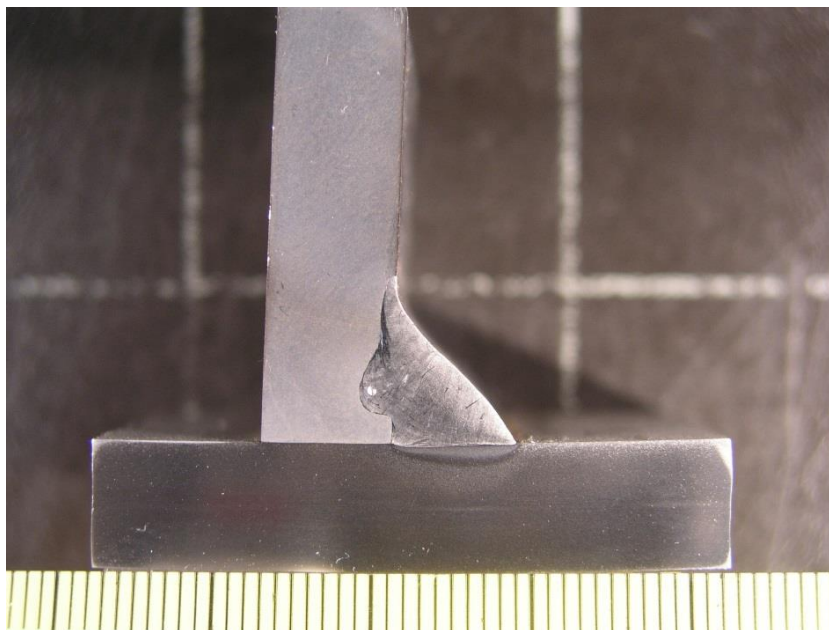


Slika 26. Prikaz mjerenja površine presjeka zavora. Uzorak A – lijevo, uzorak B – desno



Slika 27. Prikaz mjerenja srednje vrijednosti dubine ZUT – a na strani 1.4828 X15CrNiSi20-12 osnovnog materijala. Uzorak A – lijevo, uzorak B – desno

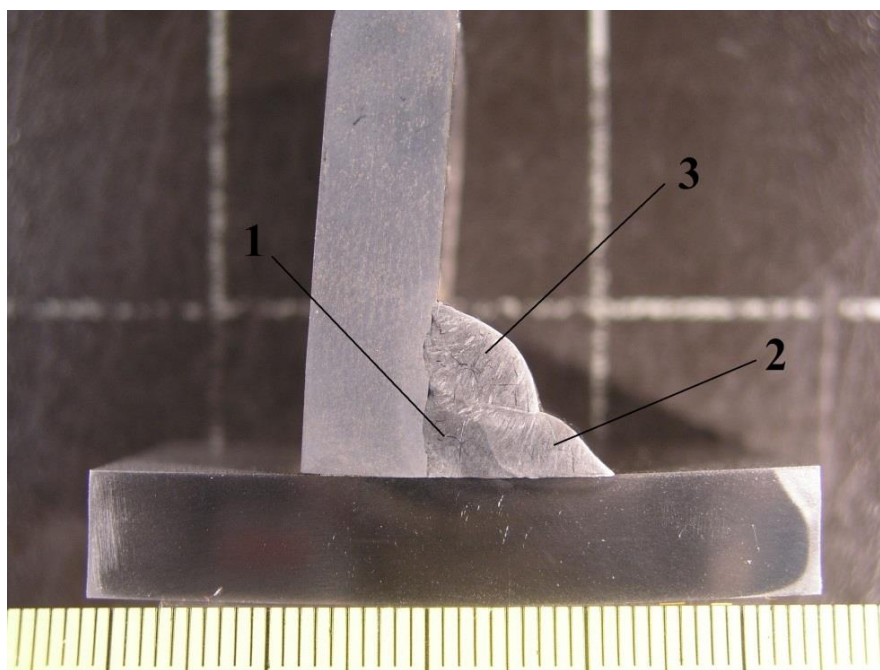
U tablici 15. su izmjerene veličine zavora iz makro izbruska presjeka zavora uzorka A koji je prikazan na slici 28., a u tablici 16 su izmjerene veličine zavora iz makro izbruska uzorka B koji je prikazan na slici 29.



Slika 28. Makro izbrusak uzorka A

Tablica 15. Izmjerene veličine zavora uzorka A

UZORAK A	Visina zavora [mm]	5,5
	Z [mm]	7,8
	Površina presjeka zavora [mm ²]	48
	Prosječna dubina ZUT – a na strani S235JRG2 čelika [mm]	4
	Prosječna dubina ZUT – a na strani 1.4828 X15CrNiSi20-12 čelika [mm]	0,86



Slika 29. Makro izbrusak uzorka B.

Tablica 16. Izmjerene veličine zavora uzorka B

UZORAK B	Visina zavora [mm]	8
	Z [mm]	11,5
	Površina presjeka zavora [mm]	78
	Površina presjeka zavora (1) [mm]	20
	Površina presjeka zavora (2) [mm]	25,5
	Površina presjeka zavora (3) [mm]	32,5
	Prosječna dubina ZUT – a na strani S235JRG2 čelika [mm]	1,4
	Prosječna dubina ZUT – a na strani 1.4828 X15CrNiSi20-12 [mm]	0,8

5. ZAKLJUČAK

Upotreba raznorodnih spojeva svake godine je u usponu te time i znanje o raznorodnim spojevima raste. Za dobivanje kvalitetnog raznorodnog spoja bitan je dodatni materijali koji se uzima, parametri zavarivanja te je vrlo bitno dobiti kvalitetno miješanje osnovnog materijala s dodatnim.

Stupanj protaljivanja je vrlo bitan faktor kod zavarivanja raznorodnih čelika jer na temelju njega znamo kakvo miješanje osnovnog i dodatnog materijala ćemo dobiti. Kemijska raznorodnost je povezana sa stupnjem protaljivanja te što je stupanj protaljivanja veći, veća je nejednakost kemijskog sastava u zoni zavara te je udio osnovnog materijala veći u materijalu zavara. Time zaključujemo da stupanj protaljivanja treba biti što manji.

Strukturu zavara raznorodnog spoja određujemo pomoću Schaefflerovog dijagrama. Strukturu depozita dobivamo na temelju kemijskog sastava osnovnih materijala i dodatnog materijala izračunavanjem njihovih Cr i Ni ekvivalentima koji se zatim ucrtavaju u dijagram. Vrlo je bitno da se zavar nalazi u šrafiranom području dijagrama jer to područje označava optimalni sastav zavarenog spoja. Tu nam je vrlo bitan i feritni broj koji određuje otpornost metala zavara prema toplim pukotinama. Najtočnije određivanje sadržaja ferita u metalu zavara na temelju kojeg izračunavamo feritni broj je pomoću WRC 1992 Constitution dijagrama.

Postoji puno problema koji mogu nastati prilikom zavarivanja raznorodnih spojeva, a jedan od njih je proces difuzije i predstavlja jedan od najvećih problema kod zavarivanja raznorodnih spojeva. Proces difuzije je kretanje atoma kroz materijali, najčešće ugljika te time dolazi do razugljičenja na strani ugljičnog čelika, a pougljičenja na strani austenitnog što rezultira nastankom kemijskih i strukturnih neravnomyjnosti koje dovode do moguće pojave interkristalne korozije i smanjenju mehaničkih svojstva zavarenog spoja. Zaostala naprezanja također predstavljaju problem koji nastaje prilikom zavarivanja, podvrgavanjem zavarenog spoja toplinskoj obradi te prilikom rada kod cikličkih promjena temperature.

Kod eksperimentalnog dijela rada na temelju makro izbrusaka iz zavarenih uzoraka koji su prethodno prikazani na slici 19. možemo zaključiti da nije došlo do potrebnog miješanja na strani osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12, nego do naljepljivanja zavara na oba uzorka. Na temelju dobivenih rezultata zaključujemo da kod uzorka A nisu bili dobri parametri zavarivanja te sami položaj električnog luka što je rezultiralo naljepljivanjem.

Kod uzorka B također je došlo do naljepljivanja na strani osnovnog materijala 1.4828 X15CrNiSi20-12 što je rezultat prevelike brzine zavarivanja te krivih parametara zavarivanja.

Što se tiče sadržaja ferita u materijalu zavara, prema slici 22. vidimo da zadovoljava. Srednja vrijednost izmjerenog sadržaja ferita u svakom zavaru prelazi 2% te se nalazi u zadovoljavajućoj zoni koja iznosi od 2% F do 10% F čime je izbjegnuta opasnost od pojave toplih pukotina.

LITERATURA

- [1]. Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
- [2]. Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [3]. Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 37, Zagreb, 1994., 1/2, str. 3 - 11
- [4]. Stawowy, H.: Proizvodnja nehrđajućih čelika – stanje i razvoj u tehnologiji i gospodarenju u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 39, 1996., 3/4, str. 73 - 79
- [5]. Schiller, B.; Kekić, M.: Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozivskih postojanih čelika u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 44, 2001., 1/2, 23 - 26
- [6]. Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih čelika - zbornik radova,
- [7]. Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [8]. „Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler – ovog dijagrama“, s interneta, <https://bib.irb.hr/datoteka/535201.233-243-sbz2011.pdf>, 21.05.2014.
- [9]. Jakšić, S.: O zavarivanju raznorodnih čelika s osvrtom na primjenu u kotlogradnji u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje br. 1, 1969., str. 2 - 11
- [10]. „Zavarivanje raznorodnih materijala u izradi kompenzatora“, s interneta, <http://bib.irb.hr/datoteka/556582.271-279-sbz2011.pdf>, 21.05.2014.
- [11]. „Povoljne i nepovoljne karakteristike raznorodnih zavarenih spojeva čelika X10CrMoVNb91“, s interneta, <http://www.e2012.drustvo-termicara.com/papers/download/101>, 22.05.2014.
- [12]. Mezga, V.: Problematika zavarivanja raznorodnih čelika, diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [13]. Čimić T.: Zavarivanje raznorodnih čelika u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 24, 1981., 5, 257 – 265
- [14]. Ferit u zavaru, Schaefflerov dijagram, WRC 1992 Constitution dijagram“, s interneta, <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/A6.pdf>, 04.09.2014
- [15]. Begović B.: Difuzioni procesi u zavarenim spojevima raznorodnih čelika u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 19, 1976., 10-11, 263 – 267
- [16]. Konjatić, P.: Analize tehnološkiosti zavarenih konstrukcija, diplomski rad, Slavonski Brod, 2001.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. A – testi osnovnih i dodatnih materijala