

Utjecaj broja prolaza na udio ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja kod visokolegiranog austenitnog čelika

Zelenika, Vito

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:719022>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vito Zelenika

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Vito Zelenika

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se svojem mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, dipl. ing. i asistentici dr. sc. Maji Jurici (Remenar), mag. ing. na pruženom znanju i pomoći. Također zahvaljujem svim svojim kolegama, prijateljima i obitelji koji su bili uz mene tokom studija sa svojom pomoći, savjetima i potporom, da prebrodim sve probleme te uspješno položim prediplomski studiji Fakulteta strojarstva i brodogradnje

Vito Zelenika



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske 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: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **VITO ZELENKA**

Mat. br.: 0035212952

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj broja prolaza na udio ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja
kod visokolegiranog austenitnog čelika**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Influence of number of passes on the ferrite content of the austenitic
stainless steel welded joint**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je dati pregled i analizirati zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika s posebnim naglaskom na austenitne čelike. Opisati i navesti primjenjive tehnologije zavarivanja visokolegiranih austenitnih čelika. Opisati utjecaj unosa topline pri zavarivanju austenitnih čelika na udio ferita u mikrostrukturi. Dati neke primjere primjene austenitnih čelika u industrijskoj proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno za odabrani austenitni čelik velike debljine definirati tehnologiju zavarivanja kao i pripremu spoja. Zavareni spoj razorno ispitati – analizirati geometriju zavarenog spoja kao i udio ferita u mikrostrukturi na karakterističnim dijelovima metala zavara. Analizom dobivenih rezultata donijeti zaključak o utjecaju unosa topline na udio ferita u mikrostrukturi metala zavara.

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

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Nehrđajući čelici	2
3. Zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika	5
3.1 Zavarljivost martenzitnih čelika	5
3.2 Zavarljivost feritnih čelika	7
3.3 Zavarljivost dupleks čelika.....	9
4. Austenitni nehrđajući čelici.....	11
4.1 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika.....	12
5. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.....	15
5.1 Postupci primjenjivi za zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika.....	17
5.2 TIG zavarivanje.....	18
5.3 MIG/MAG zavarivanje	18
5.4 REL zavarivanje.....	18
5.5 Zavarivanje pod zaštitom praška (SAW, EPP)	19
6. Primjena austenitnog čelika u proizvodnji	20
7. Utjecaj topline na udio ferita u mikrostrukturi austenitnog nehrđajućeg čelika	22
8. Eksperimentalni dio rada.....	25
8.1 Osnovni materijal	25
8.2 Tehnologija zavarivanja	26
8.2.1 Oblikovanje zavarenog spoja	26
8.2.2 Zavarivanje ispitnih uzoraka	27
8.3 Mjerenje udjela ferita	32
9. Zaključak.....	38
LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz mikrostruktura različitih grupa čelika [3]	3
Slika 2. Schaefflerov dijagram [3]	4
Slika 3. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [9].....	8
Slika 4. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) potpuni austenit; b) austenit i delta ferit [11].....	12
Slika 5. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70% Fe [11].....	13
Slika 6. Korozija oblika ureza nožem, iznad zavora AISI 321, ispod zavora AISI 318, temperatura 110°C do 115°C [13].....	17
Slika 7. Zavarivanje pod zaštitom praška [18].....	19
Slika 8. Armaturne šipke od austenitnog čelika [20]	20
Slika 9. Pojediniosti pripreme spoja s dvostrukim V-utorom [23].....	22
Slika 10. Delta-feritni profili mjereni Magne-Gage metodom, po cijeloj profilu zavarivanja [23]	24
Slika 11. Oblikovanje spoja za zavarivanje	26
Slika 12. U-priprema radnog komada	27
Slika 13. Redoslijed zavarivanja	27
Slika 14. Kontrola međuslojne temperature	28
Slika 15. Proces izrade korijenskog prolaza.....	30
Slika 16. Proces izrade zavora REL tehnologijom	32
Slika 17. Zavareni uzorak materijala X2CrNiMo17-12-2	32
Slika 18. Izgled pripremljenog makroizbruska [26].....	33
Slika 19. Feritoskop „Ferritgehaltmesser 1.054“	33
Slika 20. Makroizbrusak sa označenim mjestima mjerenja udjela ferita	34
Slika 21. Utjecaj unosa topline na sadržaj ferita u metalu zavora	37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [6]	5
Tablica 2. Standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [6]	7
Tablica 3. Standardne vrste dupleks nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [6]	10
Tablica 4. Precipitati koji mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima [11]	14
Tablica 5. Utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima [12]	15
Tablica 6. Primjena nehrđajućih čelika u zrakoplovima [21]	21
Tablica 7. Kemijski sastav osnovnog materijala i dodatnog materijala [23]	23
Tablica 8. Parametri zavarivanja [23]	23
Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala X2CrNiMo17-12-2 [24]	25
Tablica 10. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [24]	26
Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [25]	28
Tablica 12. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala a Böhler	29
Tablica 13. Izabrani parametri TIG zavarivanja	30
Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [27]	31
Tablica 15. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [27]	31
Tablica 16. Izabrani parametri REL zavarivanja	31
Tablica 17. Očitane vrijednosti sadržaja ferita u mikrostrukturi metala zavara	35

POPIS OZNAKA/KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
A5	%	Istezljivost
I	A	Jakost struje
R _{p0,2}	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
KV (+20°C)	J	Udarni rad loma
U	V	Napon
v _z	cm/min	Brzina zavarivanja
Q _z	kJ/mm	Unos topline
BW		U-priprema (<i>engl. Butt weld</i>)
EPP		Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
MIG		Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (<i>engl. Metal Inert Gas</i>)
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje taljivom obloženom elektrodom
TIG		Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (<i>engl. Tungsten Inert Gas</i>)
WPQR		Zapisnik o kvalifikaciji postupaka zavarivanja (<i>engl. Welding procedure qualification record</i>)

SAŽETAK

Tema ovog rada je analiza utjecaja broja prolaza na udio ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja kod visokolegiranog austenitnog čelika

U prvom dijelu rada, teorijskom dijelu, prikazane su osnovne značajke, kao što su podjela i osnovna svojstva, kod visokolegiranih nehrđajućih čelika. Ukratko je opisana zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika s naglaskom na austenitne nehrđajuće čelike. Također, opisane su tehnologije koje se najčešće koriste za zavarivanje austenitnih čelika. Navedene su prednosti tih tehnologija i moguće greške prilikom zavarivanja austenitnog čelika. Opisan je utjecaj topline unutar zavara na udio ferita i navedeno je istraživanje koje to istražuje.

U eksperimentalnom dijelu rada je na temelju provedene tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2, debljine 60 mm, detaljno analiziran utjecaj parametara zavarivanja na mikrostrukturu zavarenog spoja kroz cijelu debljinu materijala s posebnim naglaskom na unos topline i sadržaj ferita.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelici, udio ferita, mikrostruktura.

1. Uvod

Nehrđajući čelik odnosi se na veliku skupinu pasivnih legura koje dijele zajednički primarni element, željezo (Fe), a sve sadrže najmanje 10,5 % kroma (Cr) i najviše 1,2 % ugljika (C). Uloga Cr je pasivizacija. Unatoč činjenici da je Cr manje plemeniti metal od željeza, pasivizacijom se čelik pretvara iz 'tipične' aktivne legure koja pripada elektrokemijskom nizu u pasivnu slitinu sa znatno boljom otpornošću na koroziju.

Nehrđajući čelik nedvojbeno je „globalni hit“, a njegova široka uporaba u mliječnoj industriji, klaonicama, farmaceutskoj i kemijskoj industriji, rezidencijama, rafinerijama, zgradama i dizajnu, nije slučajnost. Ukratko, nehrđajući čelik koristi se kad god se želi dobit "uglačan" izgled, kao i materijal koji je otporan na koroziju te jednostavan je za čišćenje. Nehrđajući čelik najsličniji je univerzalnoj leguri otpornoj na koroziju koja može poslužiti za izgradnju različitih objekata, od onih jednostavnih, poput poštanskih sandučića, do one kompleksnije građe, poput nebodera. Nevjerojatni potencijal nehrđajućeg čelika ogleda se u njegovoj proizvodnji i primjeni. 2001. godine globalna proizvodnja, mjerena u taljenom čeliku, iznosila je 19,2 milijuna tona, ali je do 2006. porasla na 28,4 milijuna tona. Globalna recesija 2008. do 2009 godine, usporila je i potrošnju i proizvodnju, s brojevima od 27,6, 25,9 i 24,6 milijuna tona u 2007., 2008. i 2009. godini. Međutim, 2010. godine, došlo je do još jednog porasta u proizvodnji čelika, gdje je u prvom tromjesjeću te godine, proizvedeno gotovo 23 milijuna tona nehrđajućeg čelika, što vraća nadu u to da ovaj materijal ipak ima svijetliju budućnost no što se isprva mislilo. [1]

2. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelik (engl. stainless steel), naziv je koji se koristi još od najranijih faza razvoja ovih čelika. U početku, prihvaćen kao generičko ime, danas označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na koroziju. Obilježava ih minimalni udio Cr od 10,5 % kao i dodatak ostalih legirnih elemenata poput nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se modificira njihova struktura, ili postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost.[2]

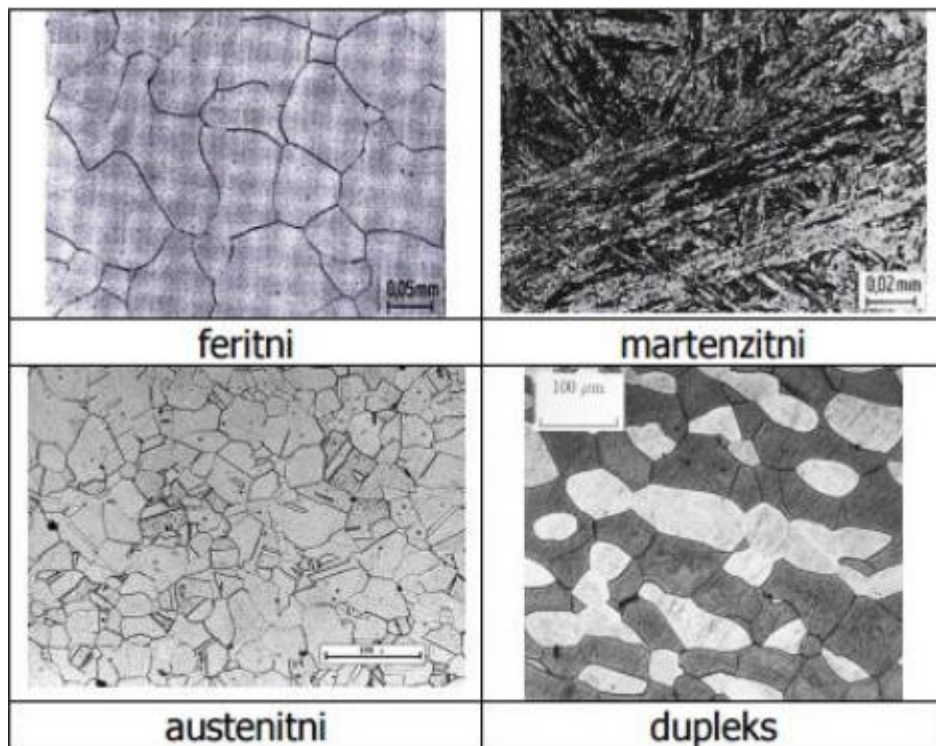
Danas razlikujemo 4 osnovne vrste nehrđajućih čelika, koje se dijele prema njihovoj mikrostrukturi.

Dijele se na [2]:

- Feritni nehrđajući čelici - sadrže uobičajeno 11 -17 % Cr, uz dodatak nekih drugih legirnih elemenata (npr. Mo, Si, Al, Ti ili Nb).
- Martenzitni nehrđajući čelici - sadrže 11-13% Cr te do 1,2% C, feromagnetni su i mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade.
- Austenitni nehrđajući čelici – legura tog čelika sadrži nominalno 18% Cr i 8,5% Ni, uključujući manje količine ugljika, dušika, mangana i silicija.
- Dupleks nehrđajući čelici - struktura im je dvofazna i sastoji se od otprilike 50% ferita i 50% austenita. Ovi čelici pokazali su povećanu otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida te imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike.

Dodatno, navedena podjela može se proširiti ako se uzme u obzir i mogućnost očvršćavanja, pa tako postoji i peta skupina nehrđajućih čelika tzv. precipitacijski očvrnuti čelici.

Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa prikazane su na Slici 1.[3]



Slika 1. Prikaz mikrostrukture različitih grupa čelika [3]

Ekvivalenti nikla (Ni_{ekv}) i kroma (Cr_{ekv}), koji uključuju utjecaj dodatnih legiranih elemenata u čeliku, ustanovljeni su kako bi općenito objasnili utjecaj sastava čelika na njegovu mikrostrukturu.

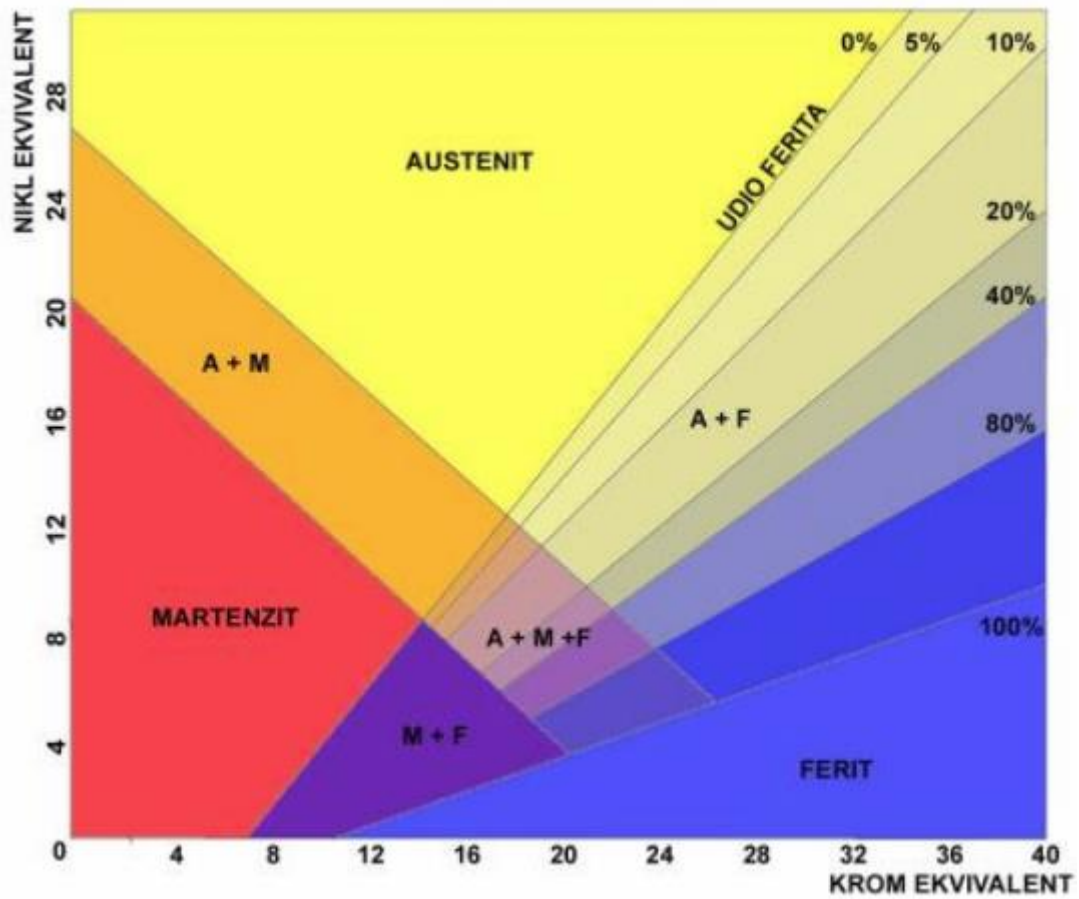
Cr_{ekv} – izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (α – geni elementi),

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

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

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

Uz pomoć izračunatih Ni i Cr ekvivalenata i Schaefflerovog dijagrama prikazanog na slici 2. jednostavno se može vidjeti kakvu strukturu pojedini čelik sadrži.



Slika 2. Schaefflerov dijagram [3]

3. Zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika

Stručni, educirani timovi ljudi, „europski inženjeri“ za zavarivanje (EWE), dužni su prije svakog postupka zavarivanja proučiti sve detalje vezane uz njega, kao što su vrsta i debljina materijala, pregledati nacrt i tehnologiju zavarivanja, te na kraju ovjeriti pregledane materijale svojim potpisom i pečatom, kako bi se na temelju tih podataka mogao odabrati adekvatan postupak zavarivanja za određenu konstrukciju. Također, prije svakog zavarivanja, potrebno je provesti temeljitu pripremu. To se odnosi na pripremu i čišćenje površine na kojoj se namjerava zavarivati. Ukoliko se to sve ne obavi, postoji velika mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima.[4]

3.1 Zavarljivost martenzitnih čelika

Kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika, zona taljenja i dio ZUT-a, koji je zagrijan na temperaturu višu od temperature austenitizacije za zadani čelik, tijekom hlađenja do sobne temperature poprimaju krhku martenzitnu mikrostrukturu. S obzirom da je takva mikrostruktura znatno lošije duktilnosti i lomne žilavosti od okolne mikrostrukture, toplinskim obradama poboljšane, ovakav se čelik ne može koristiti odmah nakon zavarivanja, već se mora provesti toplinska obrada kako bi se postigla povoljnija mehanička svojstva.[5]

U tablici 1. popis je najčešće primjenjivanih nehrđajućih martenzitnih čelika te njihov kemijski sastav prema normi HRN EN 10088-1:2007.

Tablica 1. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [6]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X12Cr13	1.4006	0,08/0,15	1	1	0,04	0,02	-	11,5/13,5	-	0.075	-
X15Cr13	1.4024	0,12/0,17	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0,16/0,25	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0,26/0,35	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-

X46Cr13	1.4034	0,43/0,50	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X38CrMo 14	1.4419	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	13,0/14,5	0,60/ 1,00	-	-
X55CrMo 14	1.4110	0,48/0,60	1	1	0,04	0,02	-	13,0/15,0	0,50/ 0,80	-	V:0,15
X50CrMo V15	1.4116	0,45/0,55	1	1	0,04	0,02	-	14,0/15,0	0,50/ 0,80	-	V:0,1/0,2
X39CrMo 17-1	1.4122	0,33/0,45	1	1,5	0,04	0,02	-	15,5/17,5	0,80/ 1,30	1	-
X3CrNiM o13- 4	1.4313	0,05	0,7	1,5	0,04	0,02	$\geq 0,$ 02	12,0/14,0	0,30/ 0,70	3,5/ 4,5	-
X4CrNiM o16- 5-1	1.4418	0,06	0,7	1,5	0,04	0,02	$\geq 0,$ 02	15,0/17,0	0,80/ 1,50	4,0/ 6,0	-

Martenzitni nehrđajući čelici imaju neka svojstva koja utječu na njihovo ponašanje pri izlaganju različitim temperaturama pri zavarivanju.

Ta svojstva su sljedeća:

- 1) Vrijednosti njihovog taljenja su oko 1480 °C, u usporedbi s 1540 °C za konstrukcijski čelik. To znači da preuzimaju manje topline za taljenje ili se tale brže od konstrukcijskog čelika pri istoj količini preuzete topline.
- 2) Njihovi koeficijenti širenja i skupljanja približno su isti ili nešto manji od odgovarajuće vrijednosti za ugljični čelik.
- 3) Ovisno o temperaturi, toplinska vodljivost je manja od polovice ocjena konstrukcijskog čelika.
- 4) Imaju veći otpor prema protoku električne struje od konstrukcijskog čelika. Zbog toga zahtijevaju manju jakost struje za zavarivanje. [7]

Na svojstva metala zavara nakon zavarivanja, te na utjecaj toplinske obrade nakon zavarivanja, utječe se pravilnim odabirom dodatnog materijala. Svojstva zone utjecaja topline mogu se kontrolirati pravilnim odabirom postupka zavarivanja, parametara postupka zavarivanja i naknadnom toplinskom obradom.

3.2 Zavarljivost feritnih čelika

Feritni nehrđajući čelici sa sadržajem Cr u rasponu od 14,5-27,0 % Cr imat će BCC feritnu kristalnu strukturu, koja je stabilna od sobne temperature do temperature taljenja. Feritni nehrđajući čelici imaju nizak sadržaj C koji rijetko prelazi 0,06 %. Međutim, budući da feritni nehrđajući čelici imaju nizak sadržaj C, količina Cr zarobljena u tim karbidima nema suprotan učinak smanjenja razine Cr dovoljno da utječe na njihovu sposobnost da spriječe stvaranje austeniti. Feritni nehrđajući čelici su magnetski i ne mogu se očvrnuti toplinskom obradom jer promjena iz jedne kristalne rešetke u drugu nije moguća. Kod kratkotrajnog izlaganja visokim temperaturama (1000°C i više) mogu postati krhki i izgubiti otpornost na koroziju. Zbog toga nisu isplativi za zavarivanje. Također, pokazuju krhkost na niskim temperaturama. Kako temperatura pada ispod sobne temperature, tako oni postaju sve manje rastezljivi i žilavi, te sve više krhki. [8]

U Tablici 2 prikazane su standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika.

Tablica 2. Standardne vrste feritnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [6]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	ostalo
X2CrNi12	1.4003	0,03	1,0	1,5	0,040	0,015	0,03	10,5/ 12,5	-	0,30/1,0 0	-
X2CrTi12	1.4512	0,03	1,0	1,0	0,040	0,015	-	10,5/ 12,5	-	-	Ti: 6(C+N)/0,65
X6CrNiTi12	1.4516	0,08	0,7	1,5	0,040	0,015	-	10,5/ 12,5	-	0,50/ 1,50	Ti: 0,05/0,35
X6Cr13	1.4000	0,08	1,0	1,0	0,040	0,015	-	12,0/ 14,0	-	-	-
X6CrAl13	1.4002	0,08	1,0	1,0	0,040	0,015	-	12,0/ 14,0	-	-	Al: 0,10/0,30
X6Cr17	1.4016	0,08	1,0	1,0	0,040	0,015	-	16,0/ 18,0	-	-	-
X3CrTi	1.4510	0,05	1,0	1,0	0,040	0,015	-	16,0/	-	-	Ti:

17								18,0			4(C+N)+0,15/0,80
X3CrNb17	1.4511	0,05	1,0	1,0	0,040	0,015	-	16,0/18,0	-	-	Nb :12C/1,00
X6CrMo17-1	1.4113	0,08	1,0	1,0	0,040	0,015	-	16,0/18,0	0,90/1,40	-	-
X2CrMoTi18-2	1.4521	0,025	1,0	1,0	0,040	0,015	0,030	17,0/20,0	1,80/2,50	-	Ti: 4(C+N)+0,15/0,80

Da bi se poboljšala svojstva standardnih feritnih nehrđajućih čelika razvijeni su superferitni nehrđajući čelici. Neke od njihovih osnovnih karakteristika su: visok udio kroma (obično od 18 do 25%) i dodatak molibdena (obično od 1 do 4%), koji poboljšava otpornost na koroziju, niske razine dušika i ugljika (manje od 0,03%), što sprječava štetne efekte koji su posljedica nastajanja kromovih nitrida i kromovih karbida za vrijeme zavarivanja, i dodaci niskog udjela nikla koji poboljšava otpornost na krhkost kod visokih temperatura. Opća uporaba super ferita kao zavarene komponente, iako je zavarljivost poboljšana, ograničena je na najveću debljinu od 5 mm. [8]



Slika 3. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [9]

3.3 Zavarljivost dupleks čelika

Ova kategorija čelika razlikuje se po tome što ima dvofaznu strukturu sastavljenu od oko 40% - 60% ferita, a ostatak čini austenit. Prvenstveno su bili legirani s 18% -27% Cr, 5% -8% Ni i 1% -4% Mo. Primjenjuju se u brodogradnji i u naftnom sektoru, postrojenjima za desalinizaciju morske vode, industriji papira i drugim industrijama.

Dupleks čelici posjeduju povećanu otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida, a imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Također čvrstoća ovih čelika je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika.

Prilikom zavarivanja, ključno je održavati unos topline veći od 0,5 kJ/mm, kako bi se izbjegao razvoj velikih količina ferita u zoni utjecaja topline. Nakon zagrijavanja materijala u feritnu fazu, ferit se ne uspijeva vratiti u austenit tijekom brzog hlađenja, što štetno djeluje na zavareni spoj. Povećani udio feritne strukture dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura i do smanjenja korozijske postojanosti. Ova pojava je izraženija u ZUT-u nego u zoni metala zavara, zato što se svojstva metala zavara mogu kontrolirati izborom adekvatnog dodatnog materijala.

Zavarivanje treba provoditi u kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline, jer dovoljna količina unesene topline i postupno hlađenje osigurava kristalizaciju i skrućivanje čelika, što rezultira potrebnim kvalitetama dupleks čelika. [5]

U Tablici 3. popis je najčešće korištenih dupleks čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007.

Tablica 3. Standardne vrste duplex nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [6]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X2CrNiN23-4	1.4362	0,0/30	1,0	2,0	0,0/35	0,0/15	0,05/0,20	22,0/24,0	0,10/0,60	3,5/5,5	Cu 0,10/0,60
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	0,0/30	1,0	2,0	0,0/35	0,0/15	0,10/0,22	21,0/23,0	2,50/3,50	4,5/6,5	-
X2CrNiN22-2	1.4062	0,0/30	1,0	2,0	0,0/40	0,0/10	0,16/0,28	21,5/24,0	0,45	1,00/2,90	-
X2CrNiCuN23-4	1.4655	0,0/30	1,0	2,0	0,0/35	0,0/15	0,05/0,20	22,0/24,0	0,10/0,60	3,5/5,5	Cu: 1,00/3,00
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	0,0/40	1,0	4,0/6,0	0,0/40	0,0/15	0,20/0,25	21,0/22,0	0,10/0,80	1,35/1,90	Cu: 0,10/0,80
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	0,0/30	1,0	4,0/6,0	0,0/35	0,0/30	0,05/0,20	19,5/21,5	0,10/0,60	1,50/3,5	Cu: 1,00
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	0,0/30	0,7/0	2,50/4,0	0,0/35	0,0/15	0,20/0,30	23,0/25,0	1,00/2,00	3,0/4,5	Cu; 0,10/0,80
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	0,0/30	0,5/0	0,80/1,50	0,0/30	0,0/15	0,30/0,40	28,0/30,0	1,50/2,60	5,8/7,5	Cu: 0,80
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	0,0/30	0,7/0	2,0	0,0/35	0,0/15	0,20/0,30	24,0/26,0	3,0/4,0	6,0/8,0	Cu: 1,00/2,50
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	0,0/30	1,0	2,0	0,0/35	0,0/15	0,24/0,35	24,0/26,0	3,0/4,5	6,0/8,0	-
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	0,0/30	1,0	1,0	0,0/35	0,0/15	0,20/0,30	24,0/26,0	3,0/4,0	6,0/8,0	Cu: 0,50/1,00 W: 0,50/1,00

4. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su zbog svoje korozijske postojanosti, dobre obradljivosti i izvrsne zavarljivosti mehaničkih svojstava, ali i estetskih karakteristika, najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije, građevinarstvu, za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta.[3]

Austenitni nehrđajući čelici redovito sadrže Ni, koja pri niskim temperaturama stabilizira austenitnu strukturu. Obično sadrže 17-25% Cr i 8-20% Ni pa je prema tome sadržaj Cr mnogo viši od granice pasivnosti, što uveliko poboljšava njihova tehnološka svojstva, a donekle i korozijsko ponašanje. [9]

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika [4]:

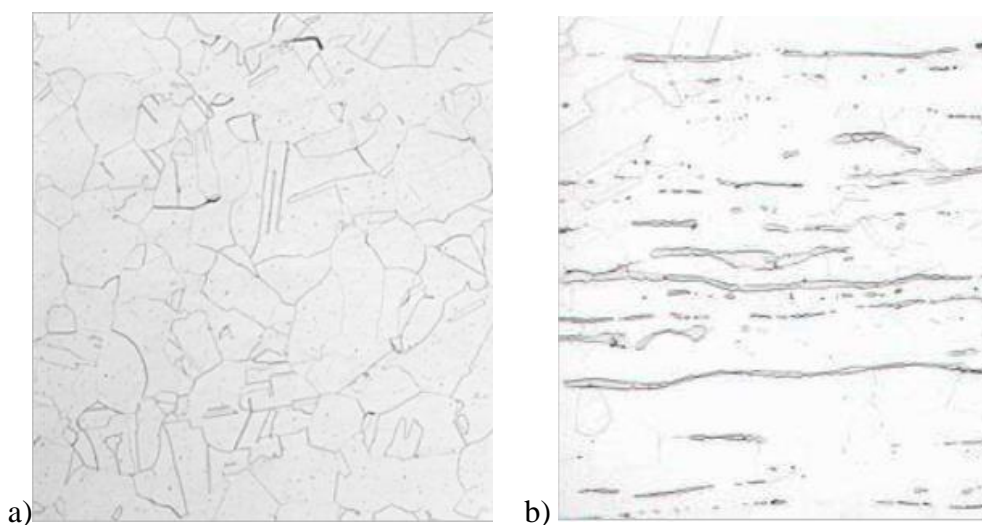
- nemaju mogućnosti usitnjavanja zrna
- nemagnetični su
- javlja se veća napetosa korozija i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika
- odlične plastičnosti,
- legiranjem s molbidenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturi iznad 600°C
- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa
- dobra svojstva pri niskim temperaturama (teorijski primjenjivi od -273°C)
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja
- nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija

Austenitni CrNi-čelici bolji su po općem korozijskom ponašanju od nehrđajućih Cr-čelika pod jednakim sadržajem Cr. Dodatak nikla povećava sklonost pasiviranju, što se očituje sniženjem potencijala i anodne gustoće struje potrebne za prijelaz u pasivno stanje. Zato su CrNi-čelici u većini elektrolita nešto plemenitiji od pasivnih nehrđajućih Cr-čelika. CrNi-čelici se lakše i brže pasiviraju, odnosno sporije i teže depasiviraju nego odgovarajući Cr-čelici.[11]

4.1 Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika

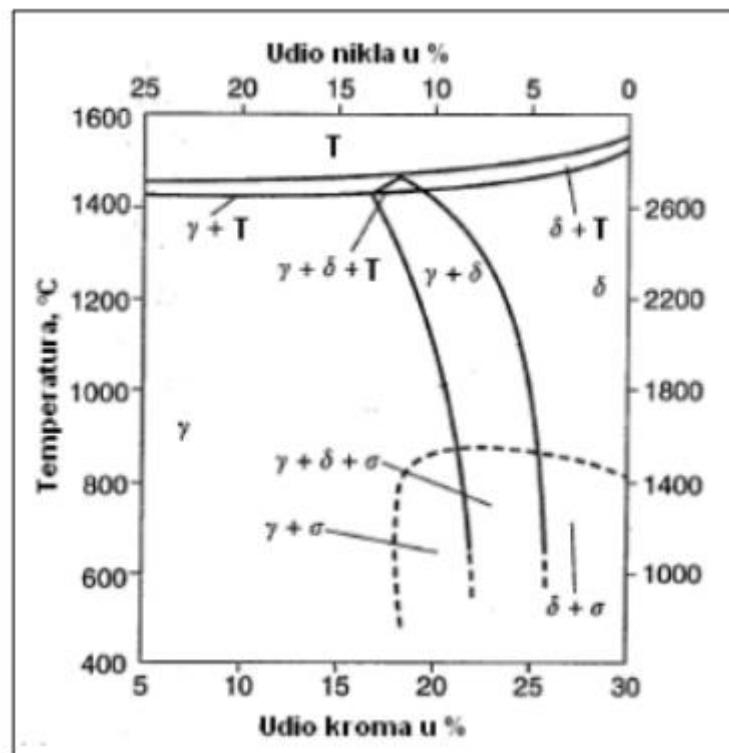
Kemijski sastav i termomehanička obrada nehrđajućih austenitnih čelika kontroliraju se tako da je mikrostruktura na sobnoj temperaturi potpuno austenitna ili austenitna s manjom komponentom feritne faze. Ovisno o udjelu alfa i gama faza legiranih komponenti. Mikrostruktura je ili potpuno austenitna ili austenitno feritna.[11]

Slika 4 a) prikazuje mikrostrukturu austenitnog nehrđajućeg čelika sa 100 % austenita, a slika 4. b) prikazuje mikrostrukturu čelika s austenitom i određenim udjelom visokotemperaturnog (delta) ferita. Delta-feritne trake teku paralelno sa smjerom valjanja. Feritna faza nastaje kao rezultat razdvajanja legiranih elemenata (osobito Cr) tijekom kristalizacije i naknadne termomehaničke obrade. Obično volumni udio delta-ferita ne prelazi 2 do 3 %. Njegova prisutnost u mikrostrukturi nije uvijek nepoželjna, iako može utjecati na duktilnost i žilavost austenitnog nehrđajućeg čelika u određenim situacijama. Uz trakaste nakupine delta-ferita mogu se izlučiti nepoželjne mikrostrukturne faze (karbidi tipa $M_{23}C_6$ i sigma-faza).[11]



Slika 4. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: a) potpuni austenit; b) austenit i delta ferit [11]

Slika 5. prikazuje stvaranje mikrostrukture u austenitnim nehrđajućim čelicima pomoću ravnotežnog pseudobinarnog dijagrama Fe-Cr-Ni sa 70% Fe. Austenitna ili feritna mikrostruktura stvara se ovisno o količini Cr i Ni u izvornoj kristalizaciji. Legure koje sadrže manje od 12% Ni i više od 18% Cr primarno su nastale kao 100 % delta ferit. Legure s većim postotkom Ni i manjim udjelom Cr od navedenih imaju potpuno austenitnu mikrostrukturu nakon primarne kristalizacije. Austenit, ferit i talina prisutni su u trokutastom području s oko 12 % Ni, između linija likvidusa i solidusa, a mikrostruktura je dvofazna i sastoji se od ferita i austenita odmah nakon skrućivanja. [11]



Slika 5. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70% Fe [11]

Legure s feritnom mikrostrukturuom nakon primarne kristalizacije prelaze u potpuno austenitnu ili austenitnu s malim postotkom ferita nakon ravnotežnog hlađenja na temperaturu okoline.

Tablica 4. prikazuje najčešće precipitate u austenitnom nehrđajućem čeliku, zajedno s njihovim kristalnim strukturama i kemijskim formulama. Zbog Cr, iznimno jakog karbidnog oblikovanja i bitnog legirnih elementa u svim nehrđajućim čelicima, karbidi se mogu razviti u gotovo svim austenitnim čelicima. I drugi karbidotvorni legirni elementi, kao što su molibden, niobij i titan, promiču nastanak karbida. Karbidi $M_{23}C_6$ najvažniji su zbog svog utjecaja na otpornost na koroziju. U temperaturnom rasponu, od 425 do 870 ° C, nastaju sitni karbidni talozi na granicama austenitnih zrna. Oni mogu kratko vrijeme stvarati interkristalnu koroziju, a ta je pojava izraženija kod austenitnih čelika koji su otvrdnuli hladnom deformacijom.

Tablica 4. Precipitati koji mogu nastati u austenitnim nehrđajućim čelicima [11]

Precipitat	Kristalna građa	Stehiometrijska formula
MC	FCC	TiC, NbC
M_6C	Kubična	$(FeCr)_3Mo_3C$, Fe_3Nb_3C
$M_{23}C_6$	FCC	$(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$
NbN	FCC	NbN
Z-faza	Tetragonalna	CrNbN
Sigma-faza	Tetragonalna	Fe-Ni-Cr-Mo
Lavesova faza	Heksagonalna	Fe_2Mo , Fe_2Nb
Chi-faza	BCC	$Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$
G-faza	FCC	$Ni_{16}Nb_6Si_3$, $Ni_{16}Ti_6Si_7$
R	Heksagonalna Romboedarska	Mo-Co-Cr Mo-Co-Cr
ϵ - nitridi (Cr_2N)	Heksagonalna	Cr_2N
Ni_3Ti	Heksagonalna	Ni_3Ti
Ni_3 (Al, Ti)	FCC	Ni_3Al

5. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelici mogu se zavariti bez većih poteškoća ako su tijekom procesa ispunjeni određeni tehnološki zahtjevi. Za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika može se koristiti bilo koji postupak s električnim lukom (TIG, MIG, REL, EPP). Nema potrebe za toplinskom obradom prije i nakon zavarivanja zbog toga što hlađenjem ne otvrdnjavaju te imaju dobru žilavost.[12]

Tablica 5. prikazuje utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima.

Tablica 5. Utjecaj pojedinih elemenata u austenitnim Cr-Ni čelicima [12]

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A (austenit)	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati interkristalnu koroziju – IKK.
Cr	F (ferit)	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji.
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni.
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću. Pomaže stvaranju zrna.
Nb		Dodaje se čeliku $min Nb \geq 8 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mo	A	Spriječava vruće pukotine stvaranjem MnS.
P, S, Se	-	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji) dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranju ferita
Ti	-	Dodaje se čeliku $Ti \geq 5 \times C$ da bi se vezao ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita

Otpornost izlučivanja štetnih faza i pojavi pukotina [13]:

a) **Izlučivanje Cr karbida** u području 450-850 °C (najviše na oko 650 °C) na granicama zrna. Dovodi do smanjenja Cr otopljenog u austenitu ispod 12 %, što je ispod granice pasivnosti. Ako je pristuan agresivni medij, zbog nedostatka Cr može doći do interkristalne korozije izlučivanja karbida odnosno interkristalnu koroziju možemo spriječiti:

1. **Legiranjem elementima karbidotvorcima** - Nb, Ti, Ta, koji tvore stabilne karbide. Ovi elementi imaju veći afinitet prema ugljiku od Cr, pa će se oni prvo vezati za ugljik, a Cr će ostati jednoliko raspoređen.

2. **Smanjenje sadržaja ugljika** - jako mala pojava karbida, pa je nepovoljno djelovanje smanjeno

3. **Gašenjem** - toplinskom obradom na 1050-1100 °C kada se karbidi rastvore, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850-450 °C se zadržava struktura austenita bez izlučenog Cr na granicama zrna vezanog u Cr karbid.

4. **Malim unošenjem topline** - čime skraćujemo vrijeme zadržavanja u intervalu 850- 450 °C pri hlađenju, kada se izlučuju Cr karbidi. Preporuke su za bolje hlađenje ulaganje predmeta u vodu ili dodatnim hlađenjem vodom.

b) **Izlučivanje krhkih faza** - Veći sadržaj Cr daje veću sklonost stvaranju krhkih faza. Dok neki elementi djeluju jače od Cr na izlučivanje krhkih faza, jedino Ni i Co djeluju usporavajuće na izlučivanje krhkih faza. Krhke faze imaju drugačiju strukturu, te smanjuju istezljivost i otpornost na koroziju.

c) **Korozija u obliku ureza noža (engl. Knifeline attack)**. Korozija se javlja u uskom području ZUT-a, koje je bilo zagrijano iznad 1300 °C. U toj zoni dolazi do raspada karbida Nb (nijobi) ili Ti (titan), brzim hlađenjem samo će se mali dio karbida NbC ili TiC ponovo stvoriti, a ostatak Nb, Ti i C će ostat otopljen u krutini. Ponovnim zagrijavanjem između 500-700 °C u zoni koja je prethodno bila zagrijana iznad 1300 °C, izlučivat će se Cr₂₃C₆ karbid, koji uzrokuje koroziju u obliku ureza noža. Javlja se uz granicu taljenja u ZUT-u ili u zavaru kad ima više prolaza. Pojava ovog oblika interkristalne korozije moguća je samo na Ti ili Nb stabiliziranim čelicima. Izbjeći se može smanjenjem ugljika C < 0,04%.

Na Slici 6. se nalazi primjer korozije oblika ureza nožem.



Slika 6. Korozija oblika ureza nožem, iznad zavara AISI 321, ispod zavara AISI 318, temperatura 110°C do 115°C [13]

d) **Tople pukotine** - Potpuno austenitna struktura ima veliku sklonost toplim pukotinama. Kako bi spriječili njihovo nastajanje potrebno je održavati sadržaj delta-ferita u spoju zavara između 3-10 %. Ako je ispod granice imat će opasnost od pojave toplih pukotina. To se događa zbog malog udjela feritne faze u kojoj se sumpor može otopiti, što će dovesti do stvaranja željeznih sulfida tijekom solidifikacije i uzrokovati pojavu toplih pukotina. U slučaju da je udio delta-ferita veći od 10%, dolazi do stvaranja veza ferita okolo austenitne rešetke, što dovodi do pojave galvanske korozije između tih dviju faza.

e) **Pukotine zbog napetosne korozije** – javljaju se u eksploataciji, ako su prisutni agresivni mediji. Za austenitne čelike su kloridi najopasniji, pa treba držati sadržaj Cl što manjim i izbjegavati vlačna naprezanja i napetosti u materijalu.

5.1 Postupci primjenjivi za zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika

Odabir postupka zavarivanja ovisi o više čimbenika primjerice o debljini materijala, obliku same konstrukcije, zahtjevanoj kvaliteti, o vrsti nehrđajućeg čelika, itd. Greške u materijalu, krive specifikacije materijala, neprikladna tehnika spajanja i loša izvedba, dovode do povećanja mogućnosti da konstrukcija, odnosno konačni proizvod, ne zadovoljava kriterije za uporabu što može dovesti do otkazivanja same konstrukcije ili projekta.[13]

Najčešći procesi zavarivanja su : TIG (engl. Tungsten Inert Gas), MIG/MAG (engl. Metal Inert Gas ili Metal Active Gas), REL (ručno elektrolučno zavarivanje), zavarivanje plazmom, EPP (elektrolučno pod praškom).

5.2 TIG zavarivanje

TIG (engl. Tungsten Inert Gas) također se naziva i GTAW (engl. Gas Tungsten Arc Welding). To je postupak elektrolučnog zavarivanja u kojem se spajanje proizvoda izvodi zagrijavanjem radnog komada električnim lukom koji se stvara između volframove elektrode i radnog predmeta. Da bi se izbjegla atmosferska kontaminacija rastaljenog zavarenog spoja, koristi se zaštitni plin (argon ili helij). Nehrđajući čelici se mogu zavarivati istosmjernom strujom (DC) i izmjeničnom strujom (AC).

Prednosti zavarivanja TIG-om je da se može lagano kontrolirati unos topline i dodatnog materijala pri zavarivanju.[14]

5.3 MIG/MAG zavarivanje

Elektrolučno zavarivanje elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina (MIG/MAG) je postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električni luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje. Zbog utjecaja topline električnog luka, tali se žica i osnovni materijal na mjestu zavarivanja, čime se ostvaruje zavareni spoj. [15]

Razlika zavarivanja nehrđajućeg čelika i ugljičnog čelika je da unosom velikih toplina nehrđajućim čelicima može doći do stvaranja problema tokom zavarivanja (interkristalna korozija). Automatski se onda navodi da bi se trebalo koristiti zavarivanje koristeći male struje i napon. Ipak, to dovodi do neminovnog rasprskavanja, koji isto loše utječe na korozijsku postojanost i povećava troškove dodatne obrade. Postoji mogućnost zavarivanja štrcajućim lukom, ali taj način zahtijeva veći unos energije i moguće spajanje debljih obradaka. Jedno od rješenja ovog problema je zavarivanje impulsnim lukom, gdje se može kontrolirati količina prijenosa materijala, a i dobiva se stabilan luk, bez rasprskavanja.[15]

5.4 REL zavarivanje

Ručno elektrolučno zavarivanje (REL), točnije izraženo ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (engl. Manual Metal Arc Welding – MMA) ili elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (engl. Shielded Metal Arc Welding – SMAW), je postupak zavarivanja kojem električna struja, bilo izmjenična ili istosmjerna, tvori električni luk između elektrode i

metala koji se spajaju. Prilikom izvođenja zavarivanja, obloga elektrode se raspada, pružajući zaštitni plin i sloj troske, koji oboje štite zavar od onečišćenja dok se ne ohladi. Razlikujemo 4 vrste obloga za elektrode: bazična, celulozna, rutilna i kisela. Zbog svestranosti postupka i jednostavnosti njegove opreme i rada, zavarivanje električnim lukom najčešći je postupak zavarivanja.[16]

5.5 Zavarivanje pod zaštitom praška (SAW, EPP)

Električni luk se uspostavlja ispod sloja praška, između elektrode i radnog komada, tako da se električni luk tokom zavarivanja ne vidi. Električna energija luka pretvara se u toplinsku, tali osnovni materijal, dodatni materijal i prašak, uz automatsko dodavanje žice i kretanje luka određenom brzinom po sloju kojeg se zavaruje ili po površini radnog komada kojeg se navaruje. Talina osnovnog i dodatnog materijala spaja se u jednu cjelinu koja se skrućuje i čini zavareni spoj. Sam proces taljenja odvija se u zatvorenom prostoru kojeg čini talina troske nastala taljenjem praška, štiteći tako od štetnih plinova iz okolne atmosfere.[10]

EPP postupak se upotrebljava za limove debljine veće od 6 mm, dugačke i horizontalne zavare. Prašak štiti električni luk i zavar. Posebna primjena EPP postupka je navarivanje (npr. nehrđajućeg čelika na običan čelik).[17]

Slika 8. prikazuje primjer zavarivanja pod zaštitom praška.

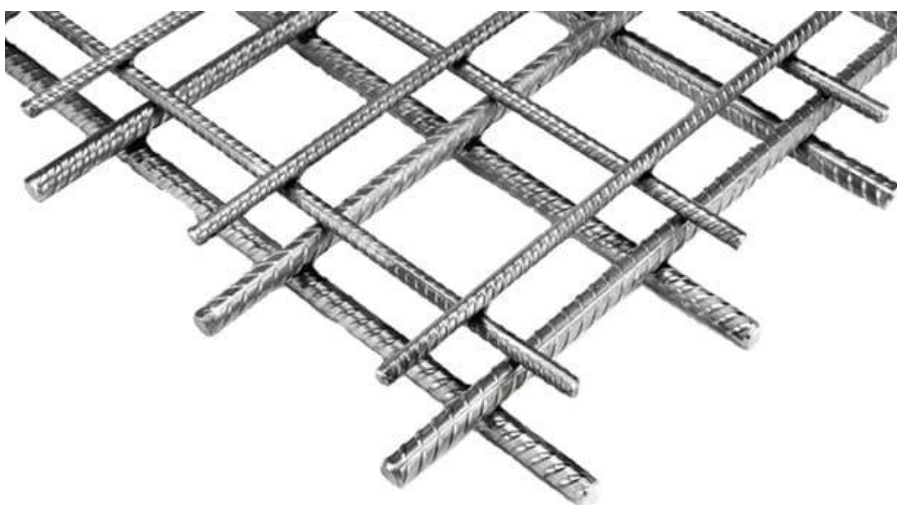


Slika 7. Zavarivanje pod zaštitom praška [18]

6. Primjena austenitnog čelika u proizvodnji

Austenitni nehrđajući čelici imaju široku primjenu u domaćoj, industrijskoj i transportnoj proizvodnji. Prvenstveno se temelje na otpornosti na koroziju, čvrstoći i svojstvima pri visokim temperaturama. Budući da su njihovi početni troškovi često veći od troškova alternativnih materijala, njihova popularnost temelji se na njihovom minimiziranju troškova tijekom cijelog životnog ciklusa njihove uporabe.[19]

Prehrambena, farmaceutska, kemijska industrija, proizvodnja celuloze i papira te petrokemijska industrija ovise o austenitnim nehrđajućim čelicima jer njihova otpornost na koroziju dovodi do niske potrošnje održavanja, nedostatka onečišćenja proizvoda, visoke čistoće i dugog vijeka trajanja. Jednostavnost zavarivanja i izrade važni su u tim primjenama, ali nehrđajući čelici se koriste jednostavno zato što je to najekonomičniji materijal za korištenje. Početna cijena često je loša mjera materijala, primjerice u slučaju betonskih armaturnih šipki, gdje je cijela konstrukcija ugrožena korozijom manje komponente, a armaturne šipke nehrđajućeg čelika (Slika 8.) bi mogla eliminirati takve probleme uz malu razliku u odnosu na ukupnu cijenu materijala.[19]



Slika 8. Armaturne šipke od austenitnog čelika [20]

Česta primjena austenitnih nehrđajućih čelika je i u zrakoplovnoj industriji. Primjenjuju se na pojedinim korozijski osjetljivim i opterećenim dijelovima zrakoplovne konstrukcije, kao na primjer na komponentama hidrauličkih i pneumatskih sustava, te se koriste za primjenu za mehanizam upravljanja. Koriste se ponekad i kao pojedine komponente trupa aviona i mlaznog motora, za uljne cijevi u motoru, komponente podvozja, dijelova za ubrizgavanje goriva i dijelova ispušnog sustava.[21]

Tablica 6. prikazuje primjenu austenitnog nehrđajućeg čelika u zrakoplovnoj industriji.

Tablica 6. Primjena nehrđajućih čelika u zrakoplovima [21]

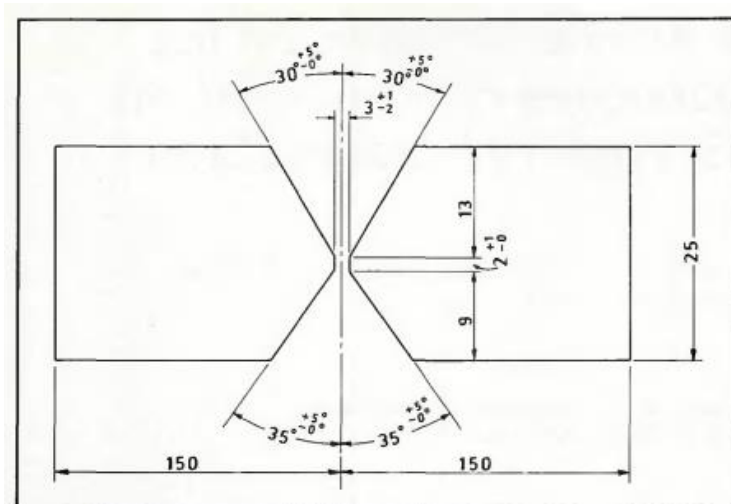
Primjena	Vrsta nehrđajućeg čelika
Spremnici	AISI 304 AISI 304L
Ispušni sustav, visokotemperaturni dijelovi motora i konstrukcijski dijelovi	AISI 321 AISI 316 AISI 316L AISI 310
Ostali konstrukcijski dijelovi (povišene temperature)	AISI 304 AISI 304L

7. Utjecaj topline na udio ferita u mikrostrukturi austenitnog nehrđajućeg čelika

Ferit se može formirati zavarivanjem austenitnog nehrđajućeg čelika i temperaturno je stabilan. Hlađenjem počinje solidifikacija austenita ili ferita. Austenitni nehrđajući čelik može se kristalizirati u četiri oblika: austenit, austenit-ferit, ferit-austenit i ferit. Način hlađenja ima značajan utjecaj na karakteristike čelika, osobito na mehanička svojstva i sposobnost zavarivanja.[22]

Prisutnost ferita u zavarenom austenitnom metalu od nehrđajućeg čelika, opsežno je proučavan. Njegov oblik i karakteristike oblikovanja, kao i njihovi učinci na mehanička svojstva, zavarljivost (tendencije pucanja pri skrućivanju) i otpornost na koroziju, su opće poznati od strane stručnog kadra kao što su EWE inženjeri.

U američkom istraživanju koje se bavilo učinkom broja prolaza u zavarenom spoju austenitnog nehrđajućeg čelika tipa AISI 316L, istražili su strukturu i svojstva zavara. Eksperiment je proveden na način da su tri zavarena komada, svaki 1 m duljine i debljine 25 mm, izrađena od nehrđajućeg čelika tipa AISI 316L. Detalji zavarenog spoja prikazani su u Slici 9. Konstantni napon, automatski SAW stroj, zajedno sa komercijalno dostupnom kombinacijom potrošnog materijala elektrode, korišteni su za izradu gore navedenih zavara. Potrošna žica bila je promjera 2,4 mm, a dodatni materijal je bio neutralni tip baze od 0,9. [23]



Slika 9. Pojediniosti pripreme spoja s dvostrukim V-utorom [23]

Kemijski sastav osnovnog materijala i dodatnog materijala dan je u Tablici 7.

Struja zavarivanja je u rasponu 250-600 A, kako bi se proizveli zavari s 13 prolaza (zavar A), 9 prolaza (zavar B) i 5 prolaza (zavar C). Primijenjeni uvjeti zavarivanja navedeni su u Tablici 8. zajedničko izobličenje svedeno je na minimum izmjenjujući uzastopne prolaze zavara između dviju strana zavara dvostrukog V-utora.

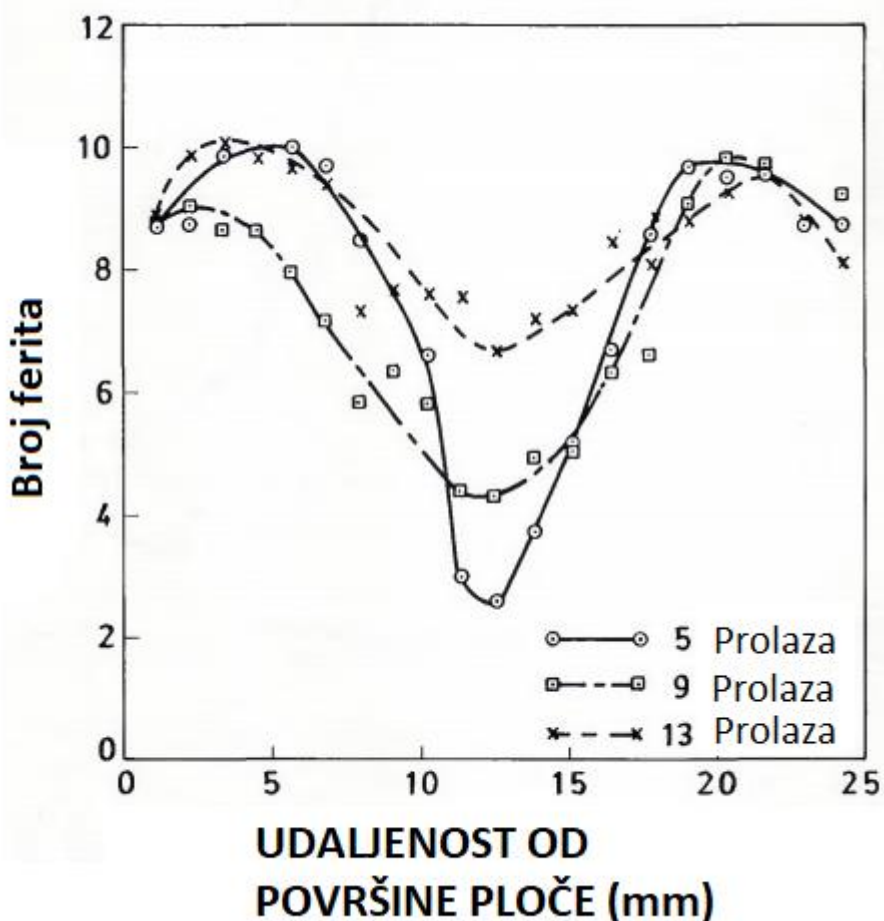
Tablica 7. Kemijski sastav osnovnog materijala i dodatnog materijala [23]

Materijal	Kemijski element (%)							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N	Fe
Osnovni materijal	0,029	0,93	0,34	10,50	16,80	2,00	0,04	Ostatak
Dodantni materijal	0,014	1,40	0,31	12,80	18,60	2,80	0,04	Ostatak

Tablica 8. Parametri zavarivanja [23]

Tehnologija	REL
Tip žice	AISI 316L
Dodatni materijal	Avesta flux 800 Neutralni tip, bazičnosti = 0,9
Promjer žice	2,4 mm
Polaritet	DCEP (+)
Jakost struje	250-600 A
Napon struje	26-44 V
Brzina zavarivanja	25 i 30 cm/min
Temperatura Zavarivanja	150 °C
Broj prolaza	5,9 i 13
Unos topline	5,77; 2,58 i 1,73 kJ/mm

Ovim istraživanjem zaključeno je da se feritni broj (FN) značajno razlikuje od korijena zavora pa do površine zavora. Feritni broj koji je bio mjereno blizu površine zavora je bio oko 10 FN, neovisno o ukupnom broju prolaza na zavaru. Međutim vrijednost FN se značajno mijenjala u korijenu zavora ovisno o broju prolaza. Povećan je sa 2,5 FN za zavar C (5 prolaza) do 7 FN za Zavar A (13 prolaza), kao što prikazuje u Slici 10. [23]



Slika 10. Delta-feritni profili mjereni Magne-Gage metodom, po cijeloj profilu zavarivanja [23]

Istraživanjem je zaključeno da su da se povećanjem broja prolaza tijekom zavarivanja, povećava minimalni sadržaj ferita u korijenskom području zavora, a smanjuje u razlici ferita na površini i korijenu zavora. [23]

Iduće poglavlje će ispitati taj zaključak sa istraživanjem sličnog zavarenog materijala koji je bio proveden unutar laboratorija za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

8. Eksperimentalni dio rada

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada bio je utvrditi utjecaj broja prolaza na udio ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja austenitnog čelika. Prema planu pokusa, pripremljen je obradak X2CrNiMo17-12-2, debljine 60 mm. Prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika mora se obratiti posebna pozornost na unos topline, kao i na odgovarajući odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina, a svi oni imaju izravan utjecaj na korozivnu otpornost i mehanička svojstva zavarenog spoja.

Analiza je provedena prema pripadajućem certifikatu o kvalifikaciji postupka zavarivanja, (WPQR, eng. Welding Procedure Qualification Record). Iz zavarenog uzorka pripremljene su epruvete koje su korištene za ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Također, iz zavarenog uzorka izrezan je uzorak koji je naknadnom obradom brušenja i poliranja, izrađen u makroizbrusak te je na njemu provedeno ispitivanje udjela ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja.

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

8.1 Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnom dijelu rada korišten je austenitni nehrđajući čelik X2CrNiMo17-12-2 prema EN 10028-7, a prema HRI CEN ISO/TR 15608 spada u grupu 8.1. Debljina materijala iznosi 60 mm. Ova vrsta nehrđajućeg čelika ima nizak sadržaj C, što sprječava taloženje ugljika tijekom zavarivanja. Također, ima bolja svojstva protiv korozije i može se koristiti u izrazito korozivnim uvjetima zbog koncentracije molibdena. U Tablici 9. nalazi se kemijski sastav navedenog čelika prema EN 10088-1, a u Tablici 10. prikazana su mehanička svojstva. [24]

Tablica 9. Kemijski sastav osnovnog materijala X2CrNiMo17-12-2 [24]

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

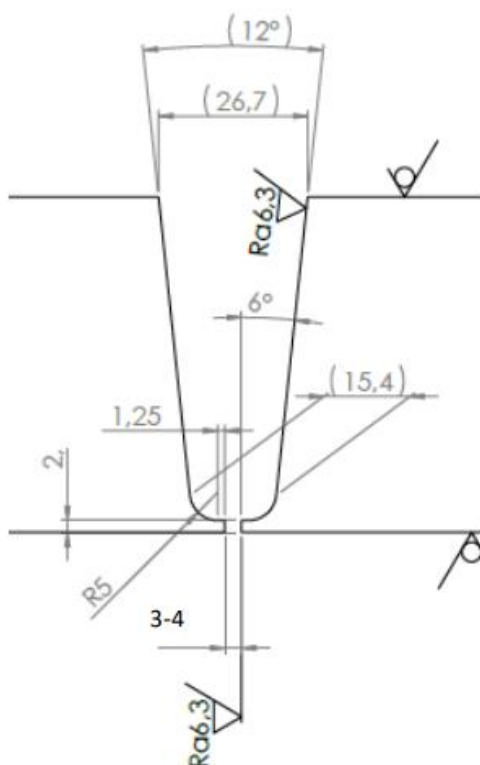
Tablica 10. Mehanička svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2 [24]

Debljina stijenke, mm	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost A5, %	Udarni rad loma KV (+20 °C), J
$> 40 \leq 63$	200	500-830	30	100

8.2 Tehnologija zavarivanja

8.2.1 Oblikovanje zavarenog spoja

Izabrana je U-priprema zbog velike debljine radnog komada (60 mm), sučeonni spoj BW (eng. Butt weld) kako je i preporučeno normom EN ISO 9692-1:2013: Ref. br. 1.8. Priprema spoja sa pripadajućim dimenzijama prikazana je na Slici 11., dok je na Slici 12. prikazan pripremljeni radni komad. Priprema spoja izvedena je strojnom obradom, te su nakon strojne obrade površine spoja očišćene i odmašćene.



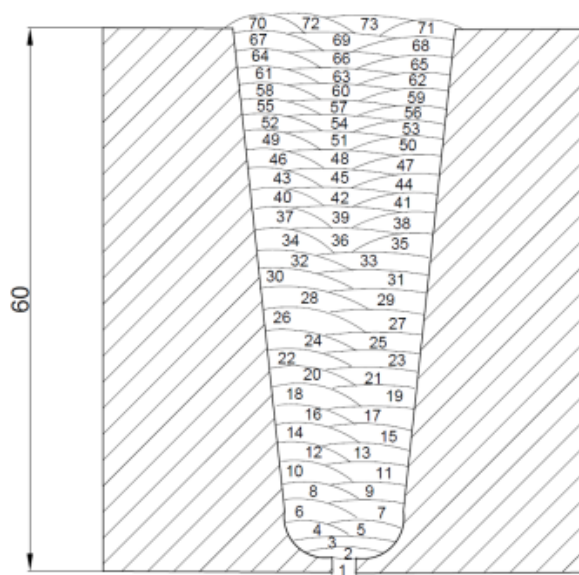
Slika 11. Oblikovanje spoja za zavarivanje



Slika 12. U-priprema radnog komada

8.2.2 Zavarivanje ispitnih uzoraka

Zavarivanje austenitnih čelika može se provesti različitim postupcima zavarivanja navedenih u poglavlju 5, dok su za ovaj slučaj zavarivanja odabrani postupci 141 (TIG) i 111 (REL) prema HRN EN ISO 4063. TIG postupkom zavareni su korijenski prolazi, a ostali prolazi zavareni su REL postupkom. Oba postupka zavarivanja provedena su ručno. Sva zavarivanja provedena su u položenom horizontalnom položaju PA. Na Slici 13. prikazan je redoslijed zavarivanja.



Slika 13. Redoslijed zavarivanja

Također tijekom višeprolaznog zavarivanja kontrolirala se međuslojna temperatura zavarivanja prema normi HRN EN ISO 13916 T_i 20/120-TB, koja bi trebala da međuslojna temperatura mora biti između 20 °C i 120 °C, kao što je prikazano na Slici 14.



Slika 14. Kontrola međuslojne temperature

8.2.2.1 TIG zavarivanje

Za tehnologiju TIG zavarivanja koristio se dodatni materijal EAS 4 M – IG proizvođača Böhler prema normama EN ISO 14343-A: W 19-12-3 L / AWS A5.9: ER316 L. Ovim dodatnim materijalom omogućeno je zavarivanje u svim položajima. Zajamčena su svojstva žilavosti sve do – 196 °C i otpornosti na interkristalnu koroziju do 400 °C. U Tablici 11. i 12. prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala.[25]

Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala Böhler EAS 4 M – IG [25]

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

Tablica 12. Mehanička svojstva zavora dobivenog pomoću dodatnog materijala a Böhler EAS 4 M – IG [25]

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

Protok zaštitnog plina iznosi 12 l/min. Za zaštitu korijena se koristi plin protoka 4-5 l/min. Korištena je Wolfram elektroda oznake WT20 i promjera Ø2,4 mm. Debljina korijenskog prolaza iznosi 6 mm. Kut postavljanja pištolja iznosi 80° - 85°, u odnosu na osnovni materijal. Također na Slici 16. prikazan je proces izrade korijenskog prolaza. Izabrani parametri TIG zavarivanja navedeni su u Tablici 13, a unos topline unutar tablice 13. izračunat je prema formuli (1). [26]

$$Q_z = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \text{ kJ/cm} \quad (1)$$

Gdje je:

Q_z – unos topline u zavar, kJ/cm

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

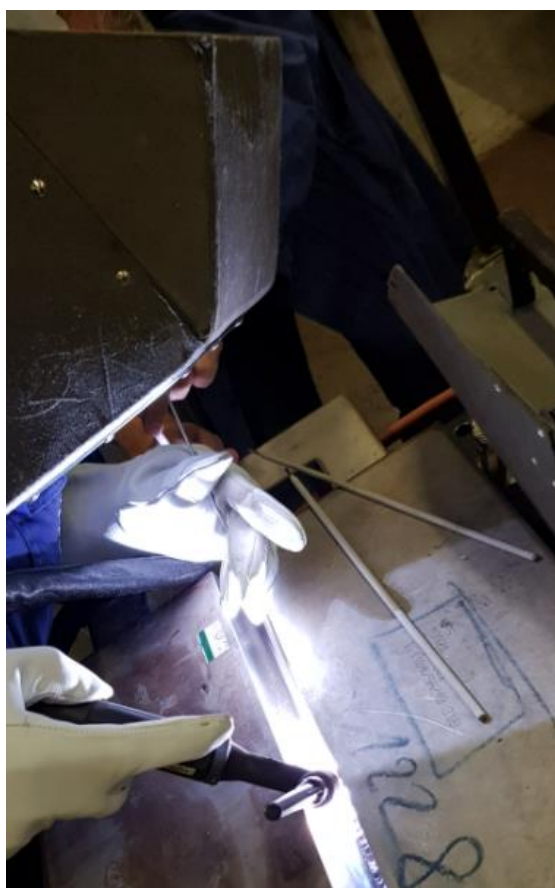
U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Tablica 13. Izabrani parametri TIG zavarivanja

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

**Slika 15. Proces izrade korijenskog prolaza**

8.2.2.2. REL zavarivanje

Za REL zavarivanje korišten je dodatni materijal EZ-Krom 30R, prema normi EN ISO 3581-A: E 19-12-3 LR 12 / ASME SFA-5,4 E316L-16, proizvođača Elektroda Zagreb. Promjer odabrane elektrode iznosi $\varnothing 3,2$ mm. Ovo je rutilno obložena elektroda za zavarivanje stabiliziranih i nestabiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika. Zavari koji su otporni na intergranularnu koroziju do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, dobivaju se uporabom ove elektrode, te omogućuju sadržaj delta ferita u strukturi zavara. Zavarivanje u svim položajima moguće je istosmjernom strujom i elektrodom na pozitivnim polu. Potrebno je sušiti elektrode po potrebi 2 sata na $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. [27]

U Tablici 14. i 15. prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva zavara dobivenog dodatnim materijalom EZ – KROM 30 R.[26]

Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [27]

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

Tablica 15. Mehanička svojstva zavara dobivenog pomoću dodatnog materijala EZ – KROM 30 R [27]

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

Kod REL zavarivanja kut postavljanja elektrode iznosi 85° - 90° . Tehnika rada koja je korištena kod REL zavarivanja je zavarivanje povlačenjem elektrode, čime se smanjuje unos topline i povećava brzina zavarivanja. Proces izrade zavara u laboratoriju prikazan je na Slici 17. U Tablici 16. su navedeni izabrani parametri zavarivanja, a unosi topline dobiveni su formulom (1). Stupanj iskorištenja djelovanja električnog luka kod REL zavarivanja iznosi 0,8.

Tablica 16. Izabrani parametri REL zavarivanja

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



Slika 16. Proces izrade zavara REL tehnologijom

8.3 Mjerenje udjela ferita

Iz zavarenog uzorka (Slika 18.) izrezan je uzorak koji je naknadnom obradom brušenja i poliranja izrađen u makroizbrusak (Slika 19.), te je na njemu provedeno ispitivanje udjela ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja.



Slika 17. Zavareni uzorak materijala X2CrNiMo17-12-2



Slika 18. Izgled pripremljenog makroizbruska [26]

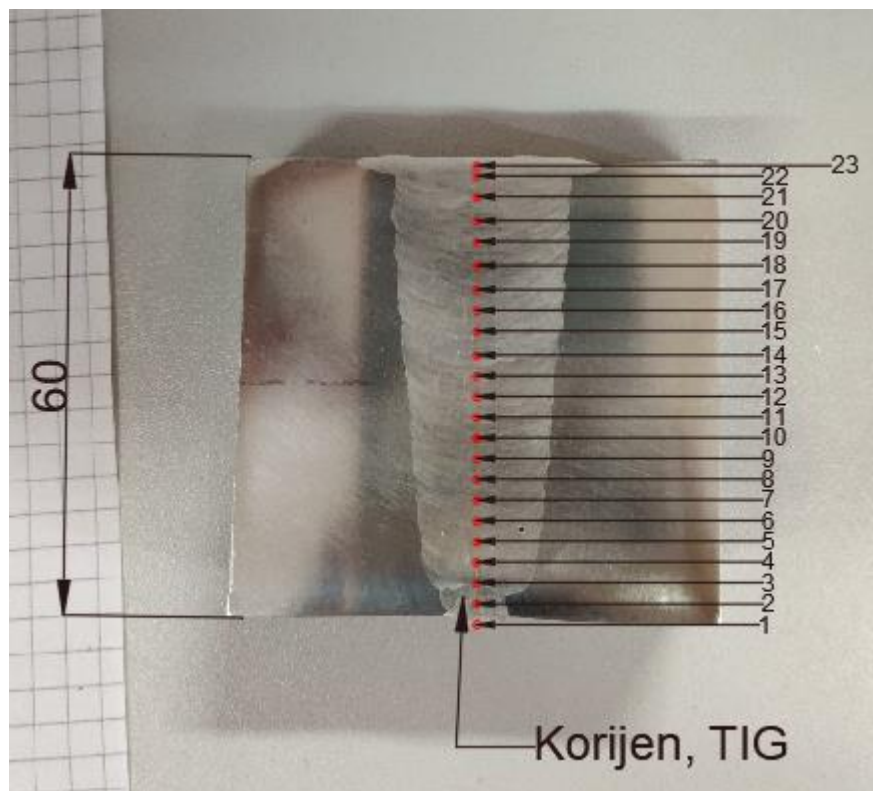
Mjerenje udjela ferita u radnom komadu provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Mjerenje je provedeno na feritoskopu „Ferritgehaltmesser 1.054“ prikazanog na slici 20.



Slika 19. Feritoskop „Ferritgehaltmesser 1.054“

Prije početka mjerenja, uređaj je kalibriran pomoću etalona koji sadrži točno 9,8 % ferita. Mjerenje udjela ferita provodi se oslanjanjem ticala na željenu poziciju za koju se očitava postotak ferita.

Mjerenje je provedeno unutar 23 točke, koje su oko 4 mm udaljene jedna od druge. Točke 1 i 2 su mjerene unutar korijena zvara koji je bio rađen TIG tehnologijom dok su ostale mjerene na točkama koje su zavarivane REL tehnologijom. Osnovni material je imao 3,5 – 4 % udjela ferita. Točke su prikazane na Slici 21, a u Tablici 17. su očitane vrijednosti.



Slika 20. Makroizbrusak sa označenim mjestima mjerenja udjela ferita

Tablica 17. Očitane vrijednosti sadržaja ferita u mikrostrukтури metala zavara

Oznaka mjesta mjerenja	Očitana vrijednost sadržaja ferita, %	Prosjek sadržaja ferita u metalu zavara, %
1	7,6	7,3
2	7	
3	10	9,66
4	9	
5	10	
6	11	9,8
7	9,1	
8	9,3	
9	9	9,13
10	9,5	
11	8,9	
12	8,8	7,33
13	7,1	
14	6,1	
15	7,1	7,27
16	7,6	
17	7,1	
18	5,9	5,63
19	5	
20	6	
21	6	5,57
22	5,7	
23	5	

Na temelju provedenog mjerenja može se vidjeti da su prosjeci udjela ferita u metalu zavara veći od udjela ferita u osnovnom materijalu.

U točkama 1 i 2 koje su mjerene unutar korijena zavara, unos topline iznosio je 7,0-7,5 kJ/cm i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 7,3 %.

U točkama 3-5 unos topline iznosio je 6,9-7,2 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 9,66 %.

U točkama 6-8 unos topline iznosio je 6,9-7,2 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 9,8 %.

U točkama 9-11 unos topline iznosio je 7,0-7,6 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 9,13 %.

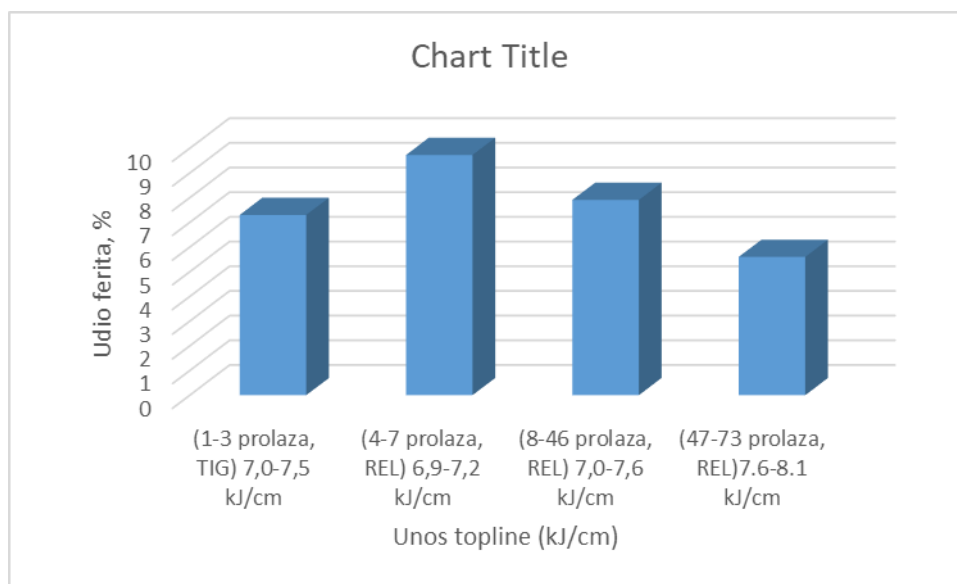
U točkama 12-14 unos topline iznosio je 7,0-7,6 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 7,33 %.

U točkama 15-18 unos topline iznosio je 7,0-7,6 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 7,27 %.

U točkama 18-20 unos topline iznosio je 7,6-8,1 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 5,63 %.

U točkama 20-23 unos topline iznosio je 7,6-8,1 kJ/cm (REL zavarivanje) i dobiveni prosječni udio ferita je iznosio 5,57 %.

Na slici 22. grafički je prikazan sadržaj ferita u metalu zavara ovisno o unosu topline.



Slika 21. Utjecaj unosa topline na sadržaj ferita u metalu zavara

Na temelju podataka iz grafičkog prikaza može se vidjeti kako se s povećanjem unosa topline smanjuje udio ferita u mikrostrukturi zavara. Povećanjem unosa topline, smanjuje se brzina hlađenja čime se veća količina primarnog ferita transformira u austenit, što rezultira smanjenjem sadržaja ferita u mikrostrukturi. Prilikom višeprolaznog zavarivanja dolazi do ponavljajućih toplinskih ciklusa kod kojih također dolazi do otapanja ferita u mikrostrukturi. Najviši sadržaj delta ferita u mikrostrukturi zavara ostvaren je kod unosa topline od 6,9 kJ/cm – 7,2 kJ/cm, koji je u prosjeku iznosio 9,73 % i nalazio bi se unutar 20. do 27. prolaza, što bi se moglo zaključiti da prilikom zavarivanja unutar više prolaza u tom području dolazi do najviše ponavljajućih toplinskih ciklusa.

9. Zaključak

Američko istraživanje koje je navedeno u poglavlju 6. zaključuje da se povećanjem broja prolaza tijekom zavarivanja povećava minimalni sadržaj ferita u korijenskom području zavara i smanjuje u razlici ferita na površini i korijenu zavara. Naime, unutar poglavlja 7.3 zaključuje se da se udio ferita smanjuje povećanjem unosa topline pri zavarivanju. Unutar poglavlja 6. očitava se u Tablici 8., da tijekom zavarivanja unutar 5 prolaza i 13 prolaza postoji jasna razlika u unosu topline unutar zavara. Prilikom izrade C uzorka, unos topline je bio 5,7 kJ/mm, dok kod uzorka A je unos topline bio 1,73 kJ/mm. Uzorak C je imao manji udio ferita unutar korijena zavara (vidi Sliku 10.), zato što je imao veći unos topline i uz to je bio rađen unutar 5 prolaza, zbog kojeg još dolazi i do ponavljajućeg toplinskog ciklusa.

Oba istraživanja (poglavlja 6. i 7.3) pokazuju da udio ferita ovisi o utjecaju broja prolaza zavarivanja. Zbog ponavljajućih toplinskih ciklusa smanjuje se brzina hlađenja, čime se veća količina ferita pretvara u austenit te tako rezultira u smanjenju udjela ferita unutar mikrostrukture zavara. Iz ovoga možemo zaključiti da udio ferita ovisi o unosu topline zavarivanja i broju prolaza. Uzimajući ta 2 faktora u obzir moguća je kontrola udjela ferita tijekom višeprolaznog zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika.

LITERATURA

- [1] STAINLESS STEEL AND CORROSION, Damstahl
- [2] prof.dr.sc. Juraga I., dr.sc. Alar V., Šimunović V., dipl.ing. Stojanović, predavanja MEHANIZMI ZAŠTITE OD KOROZIJE
- [3] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.; Zavarivanje Cr – Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje; 4. Seminar, Čelici otporni na koroziju; Pula, 2007.
- [4] Samardžić I., Analiza tehnološkiosti zavarenih konstrukcija, SFSB. Slavonski Brod.
- [5] Barić E., Zavarljivost martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4, Diplomski rad, Zagreb 2015
- [6]; Norma HRN EN 10088-1:2007; Nehrđajući čelici - 1. dio: Popis nehrđajućih čelika
- [7] WELDING OF STAINLESS STEELS AND OTHER JOINING METHODS, NICKEL INSTITUTE, 2020
- [8] <https://www.scribd.com/document/372705781/Steel-Metallurgy>, Pristupljeno: 24.8.2021.
- [9] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferritic-stainless-steel> , Pristupljeno: 24.8.2021.
- [10] Esih I., Dugi Z., Tehnologija zaštite od korozije, Školska knjiga, Zagreb 1990.
- [11] Austenitni nehrđajući čelici, dostupno na:
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf
(26.8.2021.)
- [12] Lippold J. C. i Kotecki D. J., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. SAD: Wiley, 2005.
- [13] Brkić S., Priručnik – Nehrđajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb 2007.
- [14] R.Kumar,S.R.Sundara Bharathi, A Review Study on A-TIGWelding of 316(L) Austenitic Stainless Steel, Tamilnadu, India 2015
- [15] Rudan, M. dipl. ing. Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, seminar, Pula 2007
- [16] Pikelj T. Operativne značajke dvostruko obloženih bazičnih elektroda, završni rad, Zagreb 2015
- [17] Vusić F., Primjena EPP postupka pri zavarivanju čelika SA516Gr70, stručni rad, Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec 2019

-
- [18] <https://www.oerlikon-welding.com/processes/submerged-arc-welding-process>, pristupljeno 7.9.2021
- [19] T. Michler, in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016
- [20] <https://theconstructor.org/building/stainless-steel-reinforcing-bars-types-properties/945/>, pristupljeno 19.9.2021
- [21] Klasnić A., Napetosnoa korozija dijelova zrakoplova izrađenih od visokolegiranih Cr-Ni čelika, Zagreb, 2017
- [22] Stan. A. David, Ferrite Morphology and Variations in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds, SUPPLEMENT TO THE WELDING JOURNAL, 1981
- [23] I. Goweisankar, A. K. Bhaduri, V. Seetharaman, D. D. N. Verma, D. R. G. Achar, Effect of the Number of Passes on the Structure and Properties of Submerged Arc Welds of AISI Type 316L Stainless Steel, Weldability of Steels, 1987.
- [24] „Svojstva čelika X2CrNiMo17-12-2“. https://www.rodacciai.fr/UPLOAD/datasheets/316L-316PLUS_X2CrNiMo17-12-2-Nr.1.4404-ENG.pdf, Pristupljeno 14.9.2021.
- [25] „Dodatni materijal za TIG“. https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/01112015000000B_Boehler%20EAS%204%20M-IG_tig%20rod.pdf, Pristupljeno 14.9.2021
- [26] Gorupić, D., Analiza tehnologije zavarivanja austenitnog čelika X2CrNiMo17-12-2, Diplomski rad, Zagreb, 2021
- [27] „Dodatni materijal za REL“. <https://www.ezg.hr/proizvodi/electrode/EZKROM30R.html> Pristupljeno 14.9.2021