

# Mikrostrukturne značajke zavarenih spojeva Cr-Ni čelika zavarenih AC MIG postupkom

---

**Bauer, Bruno**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:235:661775>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-04**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bruno Bauer**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Bruno Bauer

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentici Dr. sc. Maji Jurici na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem laborantu Krešimiru Sukobljeviću na pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela rada.

Veliko hvala obitelji i prijateljima na podršci i motivaciji za vrijeme cijelog studija.

Bruno Bauer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BRUNO BAUER**

Mat. br.: 0035216220

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mikrostrukturne značajke zavarenih spojeva Cr-Ni čelika zavarenih AC MIG postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Microstructural characteristics of Cr-Ni welds welded with AC MIG process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je dati pregled i analizirati osnovne vrste visokolegiranih čelika. Detaljno objasniti problematiku zavarljivosti visokolegiranih čelika te kako proces zavarivanja utječe na mikrostrukturu i geometriju zavarenog spoja. Opisati i navesti primjenjive tehnologije zavarivanja visokolegiranih čelika s posebnim naglaskom na AC MIG zavarivanje. Detaljno obrazložiti princip i parametre AC MIG zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno zavariti kutni zavar te ispitati i kvantificirati utjecaj parametara izmjenične struje AC MIG zavarivanja na makro i mikrostrukturu visokolegiranih čelika. Zavareni uzorak je potrebno podvrgnuti razornim i nerazornim ispitivanjima, te provesti detaljnu analizu makro i mikrostrukture. Na temelju dobivenih rezultata definirati optimalnu kombinaciju parametara zavarivanja za postizanje željene mikrostrukture i geometrije zavarenog spoja. Zaključno, dati prijedloge daljnjih istraživanja s ciljem postizanja traženih mikrostrukture i svojstava zavara uz primjenu AC MIG postupka.

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

Zadatak zadan:  
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:  
1. prosinca 2022.

Predvideni datum obrane:  
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Euserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. VISOKOLEGIRANI ČELICI .....	2
2.1. Feritni čelici .....	6
2.2. Martenzitni čelici .....	8
2.3. Austenitni čelici .....	12
2.4. Dupleks čelici.....	16
3. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH ČELIKA .....	19
3.1. Zavarljivost visokolegiranih feritnih čelika .....	24
3.2. Zavarljivost visokolegiranih martenzitnih čelika.....	25
3.3. Zavarljivost visokolegiranih austenitnih čelika .....	25
3.4. Zavarljivost visokolegiranih dupleks čelika .....	26
4. UTJECAJ PROCESA ZAVARIVANJA NA MIKROSTRUKTURU AUSTENITNIH ČELIKA.....	27
5. PRIMJENJIVE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA VISOKOLEGIRANIH ČELIKA....	31
5.1. REL .....	31
5.2. TIG .....	33
5.3. MIG/MAG .....	34
5.3.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja .....	37
5.4. EPP.....	38
5.5. ELEKTROTPORNO ZAVARIVANJE.....	39
6. AC MIG.....	42
7. EKSPERIMENTALNI RAD.....	46
7.1. Opis eksperimenta.....	46
7.2. Osnovni materijal .....	46
7.3. Dodatni materijal.....	47
7.4. Zaštitni plin .....	49
7.5. Oprema za zavarivanje.....	50
7.5.1. Uređaj za zavarivanje.....	50
7.5.2. Automat za zavarivanje.....	51
7.6. Zavarivanje.....	52
7.6.1. Priprema uzoraka za zavarivanje .....	52
7.6.2. Zavarivanje .....	53

---

7.7. Izrada makroizbrusaka .....	57
7.7.1. Izrada makroizbrusaka za makroanalizu.....	57
7.7.2. Izrada makroizbrusaka za mikroanalizu .....	61
7.8. Ispitivanje i analiza .....	63
7.8.1. Vizualna kontrola i analiza makroizbrusaka.....	63
7.8.2. Unos topline .....	65
7.8.3. Analiza geometrije zavara.....	66
7.8.4. Mikroanaliza .....	69
8. ZAKLJUČAK.....	75
LITERATURA.....	77
PRILOZI.....	79

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Podjela nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi [4].....	2
Slika 2.	Ugljični čelik i nehrđajući čelik u kontaktu s kisikom [5] .....	3
Slika 3.	Samoobnovljivost pasivnog filma [5] .....	3
Slika 4.	Schaefflerov dijagram stanja [6] .....	5
Slika 5.	Mikrostruktura feritnog čelika [6] .....	6
Slika 6.	Mikrostruktura martenzitnog čelika [1] .....	9
Slika 7.	Mikrostruktura austenitnog čelika [1] .....	13
Slika 8.	Trojni dijagram stanja Fe-Cr-Ni na 750 °C [7] .....	13
Slika 9.	Sprječavanje senzibilizacije [1].....	14
Slika 10.	Mikrostruktura dupleks čelika [1] .....	17
Slika 11.	Zavarljivost metalnih materijala [8] .....	19
Slika 12.	Zone zavara [9].....	20
Slika 13.	Mikrostruktura u područjima zavara [9] .....	22
Slika 14.	Schaeffler-ov strukturni dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom [10] .....	22
Slika 15.	Mikrostruktura austenitnog čelika s delta-feritom [12].....	27
Slika 16.	a) Optička slika mikrostrukture čelika 1.4307, b) SEM slika mikrostrukture čelika 1.4307 [12] .....	28
Slika 17.	Mikrostruktura austenitnog čelika bez senzibilizacije (a) i sa senzibilizacijom (b) [12] .....	28
Slika 18.	Vruća pukotina nastala skrućivanjem u mikrostrukturi čelika 1.4845 [12] .....	29
Slika 19.	Epitaksijalni rast zrna uslijed zavarivanja čelika 1.4845 [12].....	30
Slika 20.	Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [13] .....	32
Slika 21.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2] .....	33
Slika 22.	Shematski prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja [3].....	35
Slika 23.	Načini prijenosa metala MIG/MAG postupkom zavarivanja [19].....	37
Slika 24.	a) Shematski prikaz prijenosa metala, b) dijagram ovisnosti struje i napona o vremenu [19] .....	38
Slika 25.	Shematski prikaz EPP postupka zavarivanja [20] .....	39
Slika 26.	Shematski prikaz elektrootpornih postupaka zavarivanja [21] .....	41
Slika 27.	Grafovi za DC (lijevo) i AC (desno) izvor kod impulsnog MIG zavarivanja [3].	42
Slika 28.	EN ratio [22].....	43
Slika 29.	Geometrija zavara ovisno o jakosti struje zavarivanja i EN omjeru [25] .....	44
Slika 30.	Utjecaj frekvencije na geometriju zavara [26] .....	45
Slika 31.	Ploče od nehrđajućeg čelika 1.4301 .....	47
Slika 32.	Dodatni materijal, žica MIG-309LSi.....	49
Slika 33.	Spremnik plinske mješavine Inoxline C2.....	49
Slika 34.	Uređaj za zavarivanje „Welbee W400“ .....	50
Slika 35.	Automat za zavarivanje „BUG-O systems“ .....	52
Slika 36.	Priprema uzoraka za zavarivanje.....	53
Slika 37.	Zavareni uzorci u eksperimentu .....	54
Slika 38.	Položaj zavarivanja PA .....	55
Slika 39.	Ispitni uzorak 1 .....	56
Slika 40.	Ispitni uzorak 2 .....	57
Slika 41.	Ispitni uzorci 3 (lijevo) i 4 (desno).....	57
Slika 42.	Ispitni uzorci 5 (lijevo) i 6 (desno).....	57
Slika 43.	Tračna pila „BS 350 GH“ .....	58
Slika 44.	Uređaj za brušenje „Minitch 233“ .....	59



---

Slika 45.	Elektrokemijsko nagrivanje uzoraka .....	60
Slika 46.	Uzorak nakon elektrokemijskog nagrivanja .....	61
Slika 47.	Uređaj za poliranje „Mecatech 250“ .....	62
Slika 48.	Geometrija zavora uzoraka 1 i 2.....	63
Slika 49.	Geometrija zavora uzoraka 3 i 4.....	64
Slika 50.	Geometrija zavora uzoraka 5 i 6.....	64
Slika 51.	Radna stanica s osvjetljenjem i fotoaparatom .....	66
Slika 52.	Prikaz kotiranih veličina: stvarne debljine zavora, penetracije i širine zavora.....	67
Slika 53.	Grafički prikaz geometrijskih značajki zavora .....	68
Slika 54.	Svjetlosni mikroskop „Olympus GX51“ .....	69
Slika 55.	Mikrostruktura osnovnog materijala 1.4301 (AISI 304).....	70
Slika 56.	Mikrostruktura uzorka 1 .....	71
Slika 57.	Mikrostruktura uzorka 2 .....	71
Slika 58.	Mikrostruktura uzorka 3 .....	72
Slika 59.	Mikrostruktura uzorka 4 .....	72
Slika 60.	Mikrostruktura uzorka 5 .....	73
Slika 61.	Mikrostruktura uzorka 6 .....	73

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [6].....	8
Tablica 2. Mehanička svojstva i parametri toplinske obrade martenzitnih čelika [6].....	12
Tablica 3. Mehanička svojstva i primjena austenitnih i austenitno-feritnih čelika s niskim udjelom ferita (< 10 %) [6].....	16
Tablica 4. Vrsta struje pri TIG zavarivanju [2].....	34
Tablica 5. Podjela postupaka elektrootpornog zavarivanja [21] .....	40
Tablica 6. Rezultati zavarivanja MIG/MAG impulsno i AC MIG [24].....	44
Tablica 7. Kemijski sastav čelika 1.4301 (AISI 304) [27].....	46
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika 1.4301 (AISI 304) [27] .....	47
Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala, žice G 23 12 LSi [28].....	48
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala, žice G 23 12 LSi [28] .....	48
Tablica 11. Specifikacije uređaja „Welbee W400“ [30] .....	51
Tablica 12. Parametri zavarivanja .....	56
Tablica 13. Iznosi unosa topline.....	65
Tablica 14. Geometrija zavara zavarenih uzoraka .....	67

---

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

-

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$Cr_e$	%	Krom ekvivalent
$Ni_e$	%	Nikal ekvivalent
$R_m$	$N/mm^2$	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	$N/mm^2$	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_e$	$N/mm^2$	Granica razvlačenja
$A_5$	%	Istezljivost
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HRC	-	Tvrdoća po Rockwellu
$\vartheta$	$^{\circ}C$	Temperatura
$\vartheta_A$	$^{\circ}C$	Temperatura austenitizacije
$\vartheta_p$	$^{\circ}C$	Temperatura popuštanja
KU	J	Udarni rad loma
$U$	V	Napon
$I$	A	Jakost struje
$R$	$\Omega$	Električni otpor
$v_z$	cm/min	Brzina zavarivanja
$f$	Hz	Frekvencija
$Q_{pl}$	l/min	Protok plina
$t$	s	Vrijeme
$Q$	$kJ/cm$	Unos topline
$k$	-	Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja
$a$	mm	Stvarna debljina zavara
$p$	mm	Penetracija
$b$	mm	Širina zavara

---

**SAŽETAK**

U ovom je radu obrađena problematika zavarivanja visokolegiranih nehrđajućih čelika. Svrha rada je odrediti prikladne parametre za zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, kojima se postiže željena mikrostruktura i geometrija zavarenog spoja. Rad se sastoji od dva dijela teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu opisane su vrste i razmatrana zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika te kako sam proces zavarivanja utječe na mikrostrukturu i geometriju zavarenog spoja. Dalje su promatrani prikladni postupci zavarivanja visokolegiranih nehrđajućih čelika. Za zavarivanje tankih limova posebno su zanimljivi postupci s niskim unosom topline pa je stoga analiziran AC MIG postupak koji pruža manji unos topline u materijal prilikom zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je automatizirano zavarivanje postupkom MIG/MAG s primjenom istosmjerne i izmjenične električne struje. Zavarivanjem tankog lima od visokolegiranog austenitnog nehrđajućeg čelika 1.4301 napravljeni su kutni zavareni spojevi. Ispitivanje uzoraka sastojalo se od vizualne kontrole, analize makroizbrusaka, unosa topline i geometrije zavara te mikroanalize. Primjenom izmjenične struje postignuta je drugačija mikrostruktura i geometrija zavarenog spoja.

Ključne riječi: austenitni čelik, zavarljivost, AC MIG, mikrostruktura

---

**SUMMARY**

This paper deals with the problem of welding high-alloyed stainless steel. The purpose of this work is to determine suitable parameters for welding high-alloyed stainless steels, which achieve the desired microstructure and geometry of the welded joint. This paper consists of two parts, theoretical and experimental.

In theoretical part, the sorts and weldability of high-alloyed stainless steels are described, and how the welding process itself affects the microstructure and geometry of the welded joint. Next, suitable procedures for welding high-alloy stainless steels were observed. Processes with low heat input are particularly interesting for welding thin sheets, so the AC MIG process was analyzed, which provides less heat input to the material during welding compared to the conventional MIG/MAG process.

In the experimental part, automated MIG/MAG welding was performed using direct and alternating current. Fillet welds were made by welding a thin sheet of high-alloyed austenitic stainless steel 1.4301. Examination of samples consisted of visual and macro-section analysis, heat input analysis, geometry analysis and microanalysis. By applying alternating current, a different microstructure and geometry of the welded joint was achieved.

Key words: austenitic steel, weldability, AC MIG, microstructure

## 1. UVOD

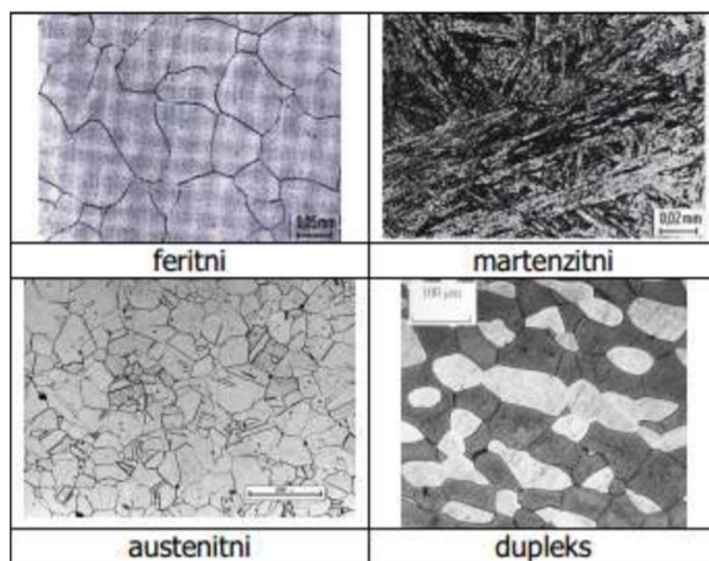
Visokolegirani čelici široko se primjenjuju u industriji i zavarenim konstrukcijama. Zbog postojanosti na koroziju primjenjuju se u raznim specifičnim uvjetima i okolini. Prema mikrostrukturi visokolegirani čelici mogu se podijeliti na četiri osnovne grupe: feritni, martenzitni, austenitni i dupleks (austenit + ferit) čelici. Krom je osnovni legirni element u svim nehrđajućim čelicima. Maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 10,5 % kako bi se zadovoljio uvjet korozijske postojanosti. [1]

Svi čelici koji u strukturi sadrže barem jedan ili više legirnih elemenata s masenim udjelom većim od 5 % nazivaju se visokolegiranim. Unatoč visokom udjelu legirnih elemenata ovi čelici imaju dobru zavarljivost. Postoji mnogo postupaka zavarivanja od kojih je većina pogodna za zavarivanje visokolegiranih čelika. Danas se u praksi za zavarivanje uglavnom koriste elektrolučni postupci (REL, TIG, MIG/MAG, EPP) i elektrootporni postupci (točkasto, bradavičasto, šavno, sučeljeno). Visokolegirane čelike moguće je zavariti svim tim postupcima s određenim ograničenjima. [1, 2]

Postupci elektrolučnog zavarivanja sa smanjenim unosom topline danas dominiraju tehnologijom spajanja u automobilskom sektoru. AC MIG omogućuje zavarivanje s manjim deformacijama na tankim limovima što je glavna prednost ovog postupka. AC MIG postupak zavarivanja omogućuje raspodjelu ulazne energije između dodatnog i osnovnog materijala izmjenom pozitivnog i negativnog polariteta. U kombinaciji s kontrolom impulsa i specifičnim podešavanjem impulsa može se postići poboljšana stabilnost električnog luka. Zavarivanjem ovim postupkom očekuje se manje štrcanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Izmjenom polariteta za vrijeme zavarivanja ostvaruje se manji unos topline u radni komad, što je pogodno za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika koji su osjetljivi na deformacije. [3]

## 2. VISOKOLEGIRANI ČELICI

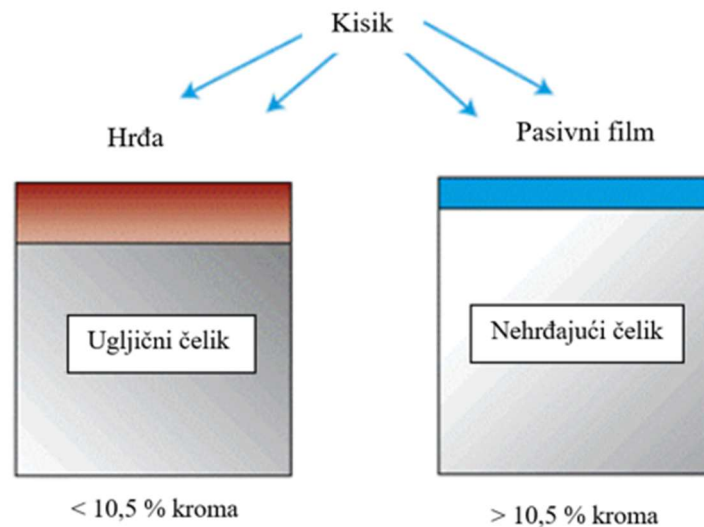
Svi visokolegirani čelici koji pokazuju otpornost na kemijsku i elektrokemijsku koroziju smatraju se nehrđajućim ili korozijski postojanim čelicima. Korozijska postojanost predstavlja sposobnost materijala da se suprotstavi negativnom djelovanju korozijskog medija usporavanjem njegovog djelovanja. Razni čimbenici utječu na korozijsku postojanost te se mogu podijeliti na unutarnje (napetosti, mikrostruktura, sastav materijala) i vanjske (naprezanje, temperatura, sastav medija). Svi čelici kod kojih ne dolazi do međudjelovanja s vanjskim medijem su otporni na koroziju. Ugljik je sastavni dio čelika te se ne smatra legirnim elementom. Visina udjela ugljika povećava čvrstoću i granicu razvlačenja, a snižava duktilnost. Maseni udio ugljika treba biti nizak jer se dio kroma s ugljikom spaja u karbide tako da preostali krom postaje beskoristan za pasivaciju. Osnovni legirni element u svim nehrđajućim čelicima je krom. Kako bi se zadovoljio uvjet korozijske postojanosti maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 10,5 %. Nehrđajućim čelicima se osim kroma dodaje još mnoštvo drugih legirnih elemenata poput nikla, mangana, titanija, molibdena, silicija, dušika, ugljika i drugi. Legirnim elementima se modificira struktura, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost na nižim temperaturama i korozijska postojanost. Nehrđajući čelici se prema mikrostrukтури mogu podijeliti na četiri osnovne grupe: feritni, martenzitni, austenitni i dupleks (austenit + ferit) nehrđajući čelici. Slika 1. prikazuje podjelu nehrđajućih čelika prema mikrostrukтури. [1, 4]



Slika 1. Podjela nehrđajućih čelika prema mikrostrukтури [4]

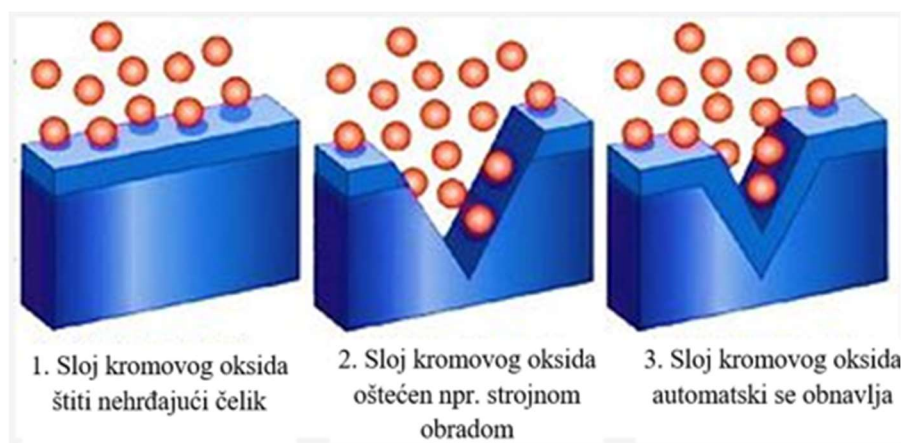


Na površini nehrđajućih čelika krom s kisikom iz zraka formira stabilni oksidni sloj (pasivni film) koji sprječava oksidaciju. Kemijski spoj u sastavu oksidnog sloja, koji je iznimno tanak (1 do 5 nm) i vrlo dobro prijanja uz površinu čelika, je  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Slika 2. prikazuje formirani sloj hrđe na ugljičnom čeliku u kontaktu s kisikom (lijevo) i pasivni film formiran na nehrđajućem čeliku u kontaktu s kisikom (desno). [1]



Slika 2. Ugljični čelik i nehrđajući čelik u kontaktu s kisikom [5]

Oksidni sloj ima karakteristiku samoobnovljivosti u različitim medijima. Slika 3. prikazuje proces samoobnovljivosti pasivnog filma.



Slika 3. Samoobnovljivost pasivnog filma [5]

Svi korozijski postojani čelici otporni su na oksidaciju pri niskoj (do 180 °C) i povišenoj temperaturi (između 180 i 450 °C), a neki od njih i pri visokoj temperaturi (iznad 450 °C). [1]

Korozija se može definirati kao spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija (plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica) tijekom kemijskih i elektrokemijskih procesa. Kako bi čelik bio potpuno postojan na koroziju, moraju istovremeno biti zadovoljena dva uvjeta. Prvi uvjet je da čelik mora sadržavati barem 12 % Cr i to u čvrstoj otopini. Drugi uvjet je homogena monofazna mikrostruktura kojom se izbjegava opasnost nastanka lokaliteta čiji je potencijal različit od potencijala osnovne mase čelika. U teoriji korozijski postojan čelik ima potpuno feritnu, martenzitnu ili austenitnu mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih faza. Korozijski postojani čelici moraju sadržavati što viši postotak kroma i što manji ugljika. [6]

Prisutnost karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  u mikrostrukturi visokolegiranog nehrđajućeg čelika ima negativan utjecaj na korozijsku postojanost. Maseni udio ugljika u karbidu  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  iznosi 5,68 %C, a kroma 94,32 %Cr. To znači da svakih 1 %C veže na sebe  $94,32 / 5,68 = 16,6$  %Cr ili u slučaju kada čelik sadrži 0,1 %C, što je uglavnom slučaj kod visokolegiranih čelika, ugljik veže na sebe 1,66 %Cr. U slučaju stvaranja karbida u visokolegiranom čeliku koji sadrži 0,1 %C i 12 %Cr dolazi do sniženja %Cr oko granica zrna s 12 na 10,34 %Cr ( $12 - 1,66 = 10,34$ ) u čvrstoj otopini. Takav čelik ne ispunjava uvjet potpune antikorozivnosti te je posebno podložan pojavi interkristalne korozije. [6]

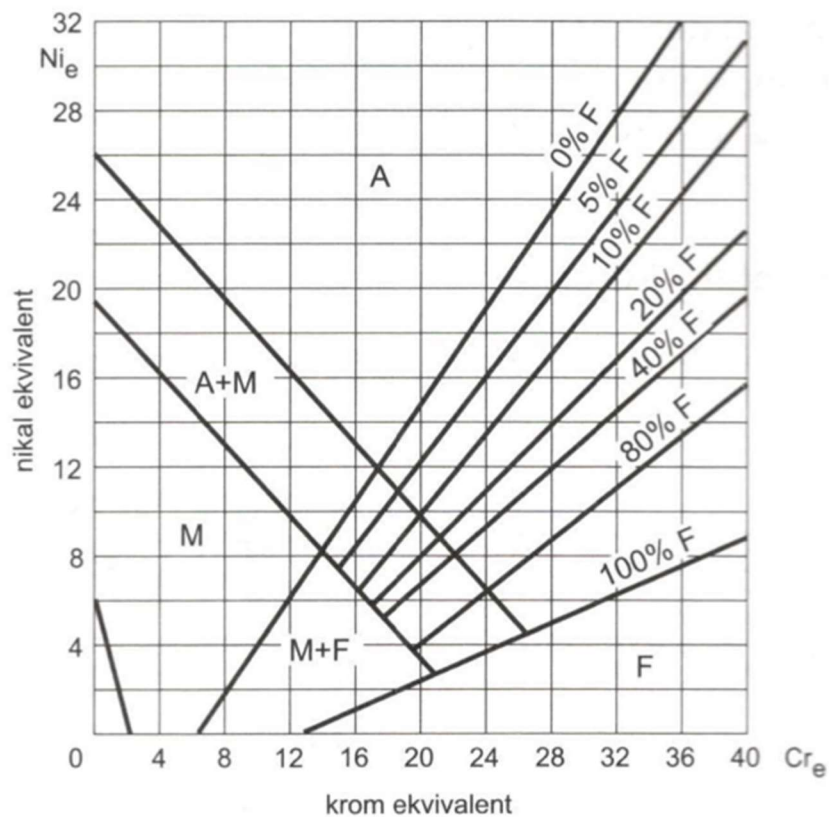
$$\frac{6 \times A_r(C)}{6 \times A_r(C) + 23 \times A_r(Cr)} \times 100 = 5,68 \%C \quad (1)$$

Legirni elementi kod visokolegiranih čelika se mogu podijeliti na alfagene i gamagene. Alfageni elementi promiču monofaznu strukturu ferita, također se nazivaju feritotvorci. Od svih alfagenih elemenata krom najviše utječe na promicane feritne mikrostrukture. Uz krom ostali alfageni elementi su molibden, silicij, niobij, volfram, titanij i aluminij. S druge strane gamageni elementi promiču monofaznu austenitnu strukturu, također se nazivaju austenitotvorci. Od svih gamagenih elemenata nikal najviše utječe na promicanje austenitne mikrostrukture. Uz nikal ostali gamageni elementi su kobalt, bakar, mangan i dušik. [6]

Schaefflerov strukturni dijagram za gašeno stanje (slika 4.) pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja krom ekvivalenta ( $\text{Cr}_e$ ) koji izražava utjecaj elemenata koji

pospješuju stvaranje ferita (alfageni) i nikal ekvivalenta ( $Ni_e$ ) koji izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita (gamageni). On pruža dobar uvid moguće pozitivne mikrostrukture ovisno o kemijskom sastavu čelika. [6]

- $Cr_e = \%Cr + 2*(\%Si) + 1,5*(\%Mo) + 0,5*(\%V + \%Nb + \%Ti) + 1*(\%Al)$
- $Ni_e = \%Ni + 30*(\%C) + 0,5*(\%Mn) + 0,6*(\%Cu) + 20*(\%N) + 0,5*(\%Co)$



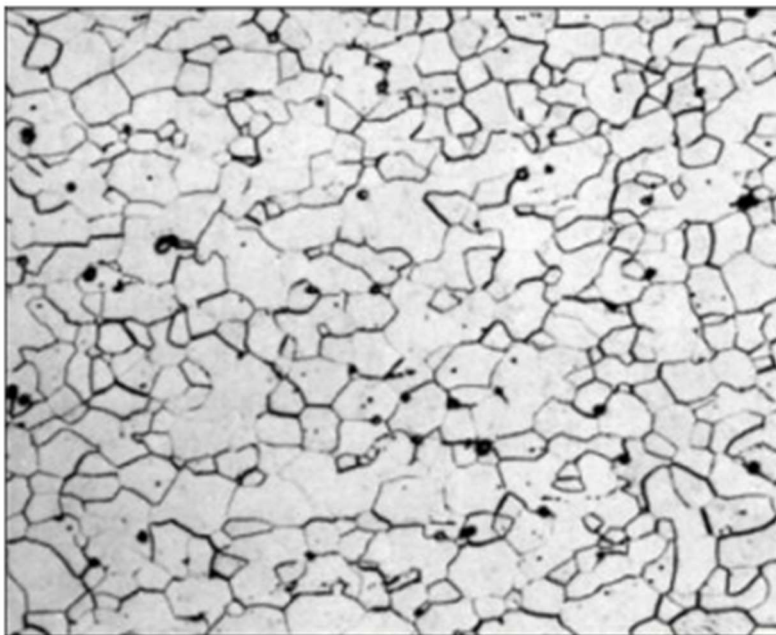
Slika 4. Schaefflerov dijagram stanja [6]

Visokolegirani nehrđajući čelici se zbog svojih iznimnih svojstava primjenjuju u [1]:

- Farmaceutskoj industriji,
- Postrojenjima za preradu hrane i mliječnih proizvoda,
- Kemijskoj, petrokemijskoj i procesnoj industriji,
- Industriji papira i celuloze,
- Za različite komercijalne proizvode: kućanski uređaji, dijelovi automobila itd.

## 2.1. Feritni čelici

Feritni čelici uglavnom sadrže maseni udio ugljika ( $C < 0,1 \%$ ) i legirnog elementa kroma (Cr 13-17 %). Karakterizira ih feritna mikrostruktura koja je postojana pri gotovo svim temperaturama pa se zbog toga ne mogu zakaliti. Osim kroma, koji je osnovni legirni element, feritni čelici mogu sadržavati i manju količinu dodatnih legirnih elemenata: molibden, titanij, niobij i drugi. Osnovne karakteristike nehrđajućih feritnih čelika su dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procijepu, osobito u medijima koji sadrže kloride. Njihova glavna primjena je u slučajevima kada je otpornost na koroziju važnija od mehaničkih svojstava. Teže se zavaruju osobito vrste sa srednjim i visokim sadržajem kroma. Feritni čelici su feromagnetični. [1, 6] Slika 5. prikazuje mikrostrukturu feritnog čelika.



Slika 5. Mikrostruktura feritnog čelika [6]

Prema sadržaju kroma feritni čelici se dijele na: [1]

- Feritni čelici s nižim udjelom kroma (10,5 – 14 % Cr) – bolja korozijska postojanost od ugljičnih čelika.
- Feritni čelici sa srednjim udjelom kroma (14 – 18 % Cr) – primjenjuju se u uvjetima veće korozijske agresivnosti.

- Feritni čelici s visokim udjelom kroma (18 – 30 % Cr) – posjeduju bolju korozivsku postojanost od austenitnih i martenzitnih čelika, relativno su skupi i teže se obrađuju, posebno su osjetljivi na krhkost pri izloženosti temperaturi od 475 °C (krhkost 475).

Korozivska postojanost, feritnih čelika kao i ostalih visokolegiranih čelika, raste s porastom masenog udjela kroma u čeliku. Dodatni legirni elementi značajno utječu na mikrostrukturu feritnih čelika. Mogu se dodavati namjerno ili se mogu nalaziti u njihovom sastavu kao nečistoće, oni su [1]:

#### Dušik

- Proširuje područje austenita, slično kao i ugljik. U feritnim čelicima se smatra nečistoćom, a ne kao legirni dodatak.
- Kod čelika s niskim i srednjim sadržajem kroma, sadržaj dušika i ugljika se ograničava i smanjuje.

#### Alfageni legirni elementi (Cr, Si, Ti, Nb, Mo, Al)

- Ti i Ni imaju veliki afinitet prema ugljiku i dušiku te već u malim udjelima promiču feritnu fazu.
- Al neutralizira dušik i poboljšava otpornost na oksidaciju osobito pri povišenim temperaturama.
- Si se ponaša kao dezoksidans, a ujedno povišuje otpornost na oksidaciju.
- Mo osobito poboljšava korozivsku otpornost na rupičastu koroziju.

#### Gammaeni legirni elementi (Mn, Ni)

- Ne dodaju se feritnim čelicima osim ako nije nužno.
- Mn se dodaje s ciljem da spriječi nastanak željeznog sulfida, poboljšava livljivost i preradu u toplom stanju.
- Ni se ponekad dodaje jer smanjuje zareznu osjetljivost.

#### Karakteristike feritnih čelika:[6]

- magnetičnost,
- relativno mekani,
- bolja obradivost odvajanjem čestica od austenitnih čelika,
- slabo oblikovljivi deformiranjem,

- relativno slaba zavarljivost zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900 °C, opasnost od krhkosti 475 prilikom duljeg držanja na temperaturama 350 - 520 °C, mogućnost nastajanja krhke  $\sigma$ -faze (FeCr) prilikom dugog držanja na temperaturama 520 - 850 °C,
- nisu osjetljivi na napetosnu koroziju čak i u kloridnim otopinama,
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO<sub>3</sub>) i nisu osjetljivi na plinove koji u sastavu sadrže sumpor, za razliku od austenitnih čelika,
- manje postojani prema kloridnim otopinama (morska voda),
- umjereno postojani na pojavu jamičastog oštećenja ako sadrže Mo,
- nisu otporni na rastaljene metale – Al, Sb i Pb, soli i reducirajuće medije,
- skloni lomljivosti prilikom izloženosti niskim temperaturama,
- niže cijene od ostalih nehrđajućih čelika.

Tablica 1. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika [6]

Oznaka čelika EN (stara HRN)	Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva u žarenom stanju			Posebna otpornost i primjeri primjene
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ , min N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ ,min, %	
X6Cr17 (Č4174)	-	450...600	270	20	korozijski postojan pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji
X6CrMo17	1,1Mo	450...650	270	20	posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora
X8CrTi17 (Č4971)	0,7Ti	450...600	270	20	kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, sita i okvire
X8CrNb17	0,9Nb	450...600	270	20	dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove)
X8CrMoTi17	1,75Mo 0,65Ti	500...600	300	20	za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća. <i>Nije za udarni rad!</i>
X12CrMoTi25	2,5Mo 1,8Ti	650...750	450	12	za otopine s visokim udjelom slobodnog klora
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700...850	550	12	za obradu odvajanjem čestica na automatima: vijke, matice, zakovice, male zupčanike, male osovine

## 2.2. Martenzitni čelici

Martenzitni čelici zbog potrebe zakaljivanja sadrže relativno visok maseni udio ugljika (0,15 – 1,0 %C) te osnovni legirni element krom (Cr > 13 %). Također je moguće legiranje dodatnim legirnim elementima molibdenom i vanadijem. Martenzitni čelici mogu sadržavati i neke druge legirne elemente, koji se kontrolirano dodaju sa svrhom postizanja određenih svojstava. Njihovo osnovno svojstvo je odlična kombinacija dobre korozijske postojanosti, visoke čvrstoće i tvrdoće, dobre otpornosti na toplinski i mehanički umor te odlične otpornosti na trošenje. Imaju nešto lošiju korozijsku postojanost u usporedbi s ostalim nehrđajućim čelicima zbog višeg udjela ugljika i

relativno niskog udjela kroma. Čelici s višim udjelom ugljika u mikrostrukturi osim martenzita mogu sadržavati i određenu količinu karbida, na primjer alatni čelici kod kojih je primarna otpornost na abrazijsko trošenje. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika zbog važnosti korozijske postojanosti u tom području. Zbog nižeg sadržaja kroma i ostalih legiranih elemenata njihova cijena je niža od ostalih nehrđajućih čelika. U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu čvrstoću i tvrdoću te otpornost na trošenje. Svi martenzitni čelici su feromagnetični. [1, 6] Slika 6. prikazuje mikrostrukturu martenzitnog čelika.



Slika 6. Mikrostruktura martenzitnog čelika [1]

Legirni elementi kod martenzitnih čelika jednim dijelom mogu biti otopljeni u austenitnoj ili feritnoj metalnoj osnovi, dok ostatak može s ugljikom tvoriti karbide (Cr, Ti, Mo, W i V). Više kroma u metalnoj osnovi pruža čeliku bolju korozijsku otpornost. Dok više ugljika pruža višu tvrdoću, čvrstoću i otpornost na trošenje, ali lošiju žilavost, zavarljivost i kemijsku postojanost. Postupnim otapanjem karbida na visokoj temperaturi ugljik i karbidotvorci prelaze u austenit i preostale karbide. Kao posljedica toga sve su niže temperature  $M_s$  (martenzit start) i  $M_f$  (martenzit finish) na dijagramu gašenja. Što kao rezultat ostavlja više zaostalog austenita u mikrostrukturi te lošija mehanička svojstva. [1]

Legirni elementi su [1]:

Krom

- Osnovni legirni element, osigurava korozivsku postojanost.
- Jaki feritotvorac, jaki karbidotvorac – povisuje tvrdoću, otpornost na povišene temperature i otpornost na trošenje.

Ugljik

- Najvažniji i osnovni element u martenzitnim čelicima, od svih elemenata ima najveći utjecaj na tvrdoću. Također povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, ali loše djeluje na žilavost, zavarljivost te korozivsku postojanost.
- Promovira austenitnu fazu.

Molibden

- Poboljšava korozivsku postojanost i obradivost odvajanjem čestica. Povoljno djeluje na mehanička svojstva i tvrdoću na visokim temperaturama.
- Jaki feritotvorac, jaki karbidotvorac – tvori razne tipove karbida poput  $\text{Mo}_2\text{C}_6$ , koji precipitiraju sporim hlađenjem kroz austenitno područje.
- Dodatno povisuje sekundarno otvrdnuće koje nastaje tijekom popuštanja.
- Odgađa okrupnjavanje karbidnih čestica za vrijeme zagrijavanja.

Vanadij

- Ima važnu ulogu u sprječavanju rasta austenitnog zrna za vrijeme toplinske obrade (mali postotak od 0,1 % V povoljno djeluje u ovom smislu).
- Jaki karbidotvorac – tvori fino disperzirane karbide i karbonitride.
- Promiče ferit u slučaju kada je otopljen u metalnoj osnovi.

Toplinska obrada visokolegiranih martenzitnih čelika uobičajeno obuhvaća [1]:

1. Žarenje (sferodizacijsko)

- Martenzitni čelici se isporučuju u meko žarenom stanju što omogućuje lakše oblikovanje u željeni oblik.
- Žarenje je proces kojim se smanjuje tvrdoća, poboljšava obradivost odvajanjem čestica i oblikovljivost u hladnom stanju. Što je viša temperatura žarenja to je veći utjecaj na promjenu navedenih svojstava.



## 2. Austenitizacija

- Postizanje austenitne mikrostrukture s potpuno ili djelomično otopljenim karbidima.
- Postizanje željenih svojstava čelika – tvrdoće i korozijske postojanosti.
- Što je viša temperatura austenitizacije to je više karbida, karbidi su krupniji i rastu zrna austenita.
- Legirni elementi otopljeni u austenitu utječu na  $M_s$  i  $M_f$  temperature, udio zaostalog austenita, tvrdoću nakon kaljenja i popuštanja.

## 3. Gašenje (nadkritično hlađenje)

- Slijedi nakon austenitizacije, uglavnom se provodi u ulju kako bi se osigurao potpuni prijelaz austenita u martenzit.
- Pojava zaostalog austenita (ne transformiranog u martenzit) smanjuje tvrdoću i doprinosi smanjenju žilavosti (nakon popuštanja). Izbjegava se dubokim hlađenjem.
- Sporije hlađenje uzrokuje nastanak precipitata i nepotpunu čvrstoću, dok brže hlađenje rezultira deformacijama i pukotinama.

## 4. Duboko hlađenje

- Provodi se po potrebi, nužno je kod čelika kojima je temperatura  $M_f$  ispod sobne temperature kako bi pretvorba u martenzit bila potpuna.
- Sav zaostali austenit prelazi u martenzit.
- Sredstvo za hlađenje je suhi led ili tekući dušik.
- Brzina hlađenja ne smije biti veća od  $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . Vrijeme hlađenja iznosi između 24 i 36 sati.

## 5. Popuštanje (visokotemperaturno)

- Primjenjuje se sa svrhom povišenja žilavosti i uklanjanja zaostalih naprezanja u martenzitu.
- Postizanje dimenzijske stabilnosti pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbide popuštanja.

Tablica 2. Mehanička svojstva i parametri toplinske obrade martenzitnih čelika [6]

Oznaka čelika		Sastav, "ostalo", maseni %	Tvrdća u meko-žarenom stanju, HB	Toplinska obrada			Mehanička svojstva nakon popuštanja				Primjenjivost	
EN	stara HRN			austenitizacija, $t_h$ , °C	gašenje <sup>2)</sup> HRC <sub>2</sub> -	popuštanje $t_p$ , °C	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> ili HRC	$R_{m0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> min.	$A_5$ , % min.	KU (DVM), min.	do $t_h$ , °C	$R_{m0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $t_h$
X20Cr13	Č4172	-	≤ 220	980...1030	z, u 47	650...750	800...650	450	18	55	400	305
X20CrMo13	-	1...1,3Mo	≤ 265	950...1000	u 47	650...750	900...750	550	14	28	500	412
X22CrNi17 (M/A/F) <sup>1)</sup>	Č4570	1,5...2,5Ni	≤ 275	1000...1050	u 47	630...720	950...800	600	14	30	400	375
X30Cr13	Č4173 (Č41702)	-	≤ 245	980...1030	u, z	640...740	1000...800	≤ 500	11	-	-	-
X36CrMo17 (po DIN-u: alatni)	-	1...1,3Mo	≤ 250	1000...1050	u 49	650...750	950...800 47 HRC	600	14	28	400	470
X42Cr13 (po DIN-u: alatni)	Č4175 (Č41702)	-	≤ 225	1020...1050	u, z 58	200...300	57...54 HRC	-	-	-	-	-
X45CrMoV15	Č4770 (Č47702)	0,4...0,6Mo 0,1 V	≤ 260	1050...1100	u, z 59	100...200	57...55 HRC	-	-	-	500	-
X90CrMoV18	Č4772	0,9...1,3Mo 0,1 V	≤ 265	1000...1050	u 61	100...300	57...55 HRC	-	-	-	-	-

<sup>1)</sup> martenzitno-austenitno-feritna struktura gašenja;

<sup>2)</sup> z - zrak; u - ulje

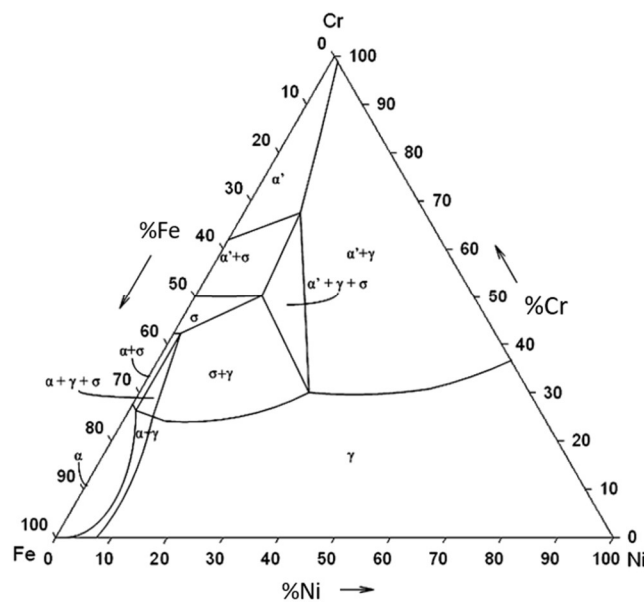
### 2.3. Austenitni čelici

Austenitni nehrđajući čelici imaju najširu primjenu od svih nehrđajućih čelika. To su visokolegirani čelici legirani kromom zbog postojanosti na koroziju i niklom koji proširuje austenitno područje te omogućuje zajedno s manganom postizanje austenitne mikrostrukture na sobnoj temperaturi. Karakterizira ih niski maseni udio ugljika (0,03 – 0,08 %C) uz osnovne legirne elemente: nikel (8 – 20 %Ni), krom (16 – 26 %Cr) i mangan uglavnom < 2 %. Maseni udio ugljika kod austenitnih čelika treba biti što manji kako bi se izbjegla opasnost od stvaranja štetnih kromovih karbida (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>). Maseni udio kroma mora biti što viši kako bi se osigurala antikorozijska svojstva. Maseni udio nikla također mora biti što viši zbog gamagenog djelovanja nikla koji treba prevladati alfa-geno djelovanje kroma kako bi se osigurala austenitna mikrostruktura pri sobnoj temperaturi. Osim osnovnih, nehrđajući austenitni čelici, mogu se legirati dodatnim legirnim elementima s kojima je moguće poboljšati njihova mehanička svojstva (dušik), obradivost (selenij, sumpor) i otpornost na neku specifičnu koroziju. Dodatni legirni elementi,

kojima se legiraju nehrđajući austenitni čelici, su: bakar, molibden, aluminij, titanij, dušik, tantal, selenij, sumpor i niobij. [1] Slika 7. prikazuje mikrostrukturu austenitnog čelika, a slika 8. prikazuje trojni dijagram stanja Fe-Cr-Ni na 750 °C na kojem su vidljive postizive faze željeza legiranog kromom i niklom.



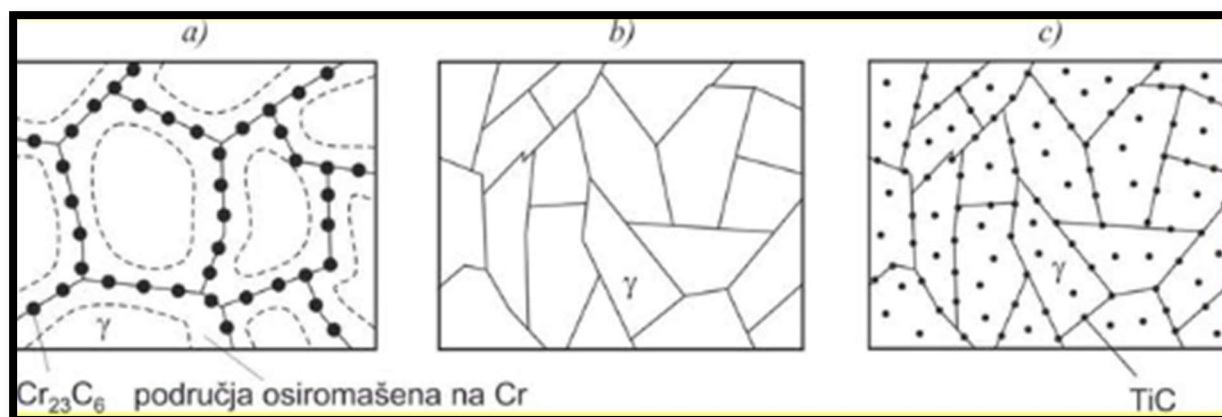
Slika 7. Mikrostruktura austenitnog čelika [1]



Slika 8. Trojni dijagram stanja Fe-Cr-Ni na 750 °C [7]

Dodatno legiranje austenitnih čelika s molibdenom, titanijem, niobijem, tantalom prouzrokuje pojavu ferita (5 – 10 %) u mikrostrukturi ili djeluje stabilizirajuće na opasnost od interkristalne korozije. Dušik dodan u niskim postocima (0,2 – 0,4 %) izrazito djeluje na povišenje čvrstoće te pospješuje otpornost na jamičastu i napetosnu koroziju. [6]

Senzibilizacija je nepoželjna mikrostrukturna promjena u austenitnim čelicima. Senzibilizacija je pojava precipitacije karbida po granicama zrna. Do senzibilizacije dolazi duljim zadržavanjem na temperaturama između 425 i 870 °C tada dolazi do formiranja karbida tipa  $M_{23}C_6$  po granicama zrna, količina nastalih karbida ovisi o vremenu i temperaturi. Formiranje karbida smanjuje sadržaj kroma u području oko granica zrna. U slučaju pada masenog udjela kroma ispod 12 % postoji opasnost od interkristalne korozije. Također nastupanjem senzibilizacije dolazi do pada mehaničkih svojstava te se smanjuje otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procjepu. Opasnost od senzibilizacije sprječava se smanjenjem masenog udjela ugljika i dodavanjem stabilizatora titanija i niobija. U slučaju kada je već nastupila senzibilizacija mikrostrukturno stanje popravlja se kratkotrajnim žarenjem na visokim temperaturama i naglim hlađenjem ili dugotrajnim žarenjem na nižim temperaturama i metastabilnim hlađenjem. Žarenjem se omogućuje difuzija ugljika te se obnavlja austenitna mikrostruktura. [1] Slika 9. prikazuje princip sprječavanja senzibilizacije kod austenitnog čelika, a) senzibilizacija u mikrostrukturi austenitnog čelika, b) austenitna mikrostruktura, c) austenitna mikrostruktura sa stabilizatorom TiC nastalog legiranjem s titanijem.



Slika 9. Sprječavanje senzibilizacije [1]

Karakteristike austenitnih čelika [1, 6]:

- visoka žilavost, oksidacija i korozivna otpornost,
- postojana austenitna struktura „solidus“ temperature do ispod sobne temperature, kubično plošno centrirana FCC rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- dobra žilavost pri niskim temperaturama,
- nisu magnetični,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- mogu očvrsnuti samo u hladnom stanju,
- dobra oblikovljivost u hladnom stanju,
- visoka otpornost na puzanje pri visokim temperaturama,
- osjetljivi su na senzibilizaciju,
- skloni precipitaciji intermetalnih faza između 540 i 900 °C,
- osjetljivi na formiranje martenzita,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika.

Austenitni nehrđajući čelici primjenjuju se kao [1]:

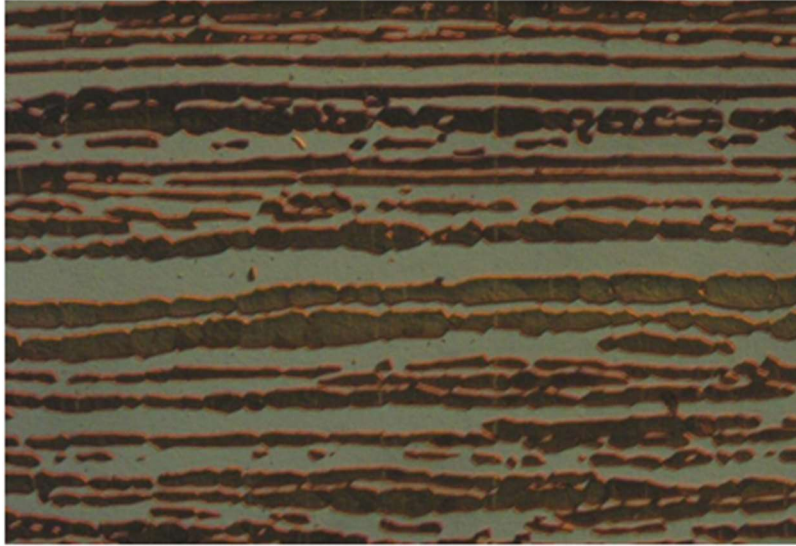
- uređaji u medicini i ortopediji,
- za tlačne spremnike,
- u industriji masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, šećera, kože, nafte,
- u industriji celuloze, boja, ulja, sapuna, sulfata, gume, foto-pribora, elastične mase, kemikalija,
- predmeti u kućanstvu,
- dijelovi opreme u kontaktu sa sumpornom i fosfornom kiselinom,
- aparati i uređaji u prehrambenoj industriji.

Tablica 3. Mehanička svojstva i primjena austenitnih i austenitno-feritnih čelika s niskim udjelom ferita (< 10 %) [6]

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
EN	stara HRN		R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup> min.	R <sub>p0.2</sub> , N/mm <sup>2</sup> min.	HB maks	A <sub>5</sub> , % min.	KU, J min.	
X12CrNi18-8	Č4571	-	700	215	180	50	85	Standardni tip čelika - predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama, ortopediji. Primjenjiv je do 300 °C.
X5CrNi18-9	Č4580	-	700	185	180	50	85	Otporan na različite organske i anorganske kiseline - primjena: industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300 °C.
X10CrNiTi18-9	Č4572	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez topl. obrade nakon zavarivanja. - miježarstvo, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrije filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450 °C.
X10CrNiNb18-9	Č4582	0,8 Nb	750	205	190	40	85	Isto kao i gore.
X5CrNiNb18-9	-	0,7 Nb	740	205	190	40	103	Povišeno otporan na dušičnu kiselinu, ostalo jednako kao gore.
X5CrNiMo18-10	Č4571	2,25 Mo	700	205	180	45	85	Povišeno otporan na neoksidirajuće kiseline i na točkastu koroziju uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez toplinske obrade.- industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, miježarstva i pivovare
X10CrNiMoTi18-10	Č4571	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, toplinska obrada nakon zavarivanja nepotrebna - industrija tekstila, sulfata, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase
X10CrNiMoNb18-10	Č4571	2,25 Mo 0,8 Nb	750	225	190	40	85	Isto kao i gore

## 2.4. Dupleks čelici

Ova skupina visokolegiranih čelika nema monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu austenitno-feritnu s 40 do 60 % ferita. Dvofazna austenitno-feritna mikrostruktura ne zadovoljava nužan uvjet postojanosti na opću koroziju, ali daje povećanu postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu i na H<sub>2</sub>S. Dupleks čelike također karakterizira vrlo velika postojanost na jamičastu koroziju. Struktura dupleks čelika sastoji se od ferita koji ima BCC kristalnu rešetku i austenita s FCC kristalnom rešetkom. Omjer faza je većinom 50:50, a ovisi o sastavu čelika i toplinskoj obradi. Dupleks čelici pokazuju sličnu otpornost na koroziju kao i austenitni čelici. Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja kod dupleks čelika veća je nego kod austenitnih, dok je vrijednost žilavosti između feritnih i austenitnih čelika. Dvofazna mikrostruktura može izazvati poteškoće prilikom zavarivanja zbog sklonosti na krhkost ferita i zbog mogućnosti izlučivanja karbida po granicama zrna ferit/austenit. [1, 6] Slika 10. prikazuje mikrostrukturu dupleks čelika.



Slika 10. Mikrostruktura dupleks čelika [1]

Osnovni legirni elementi u dupleks čelicima su krom i nikal, a dodatni su dušik, molibden, bakar, silicij, volfram i drugi. Dupleks čelici se ne primjenjuju iznad 315 °C zbog opasnosti od pojave krhkost 475 , donja temperatura primjene je do -60 °C. Trenutno proizvodnja dupleks čelika ima najveći trend rasta među visokolegiranim nehrđajućim čelicima. [1]

Primjenom toplinske obrade u strukturi dupleks čelika mogu se pojaviti nepoželjne strukturne tvorevine u obliku izlučevina i precipitata. One snižavaju mehanička svojstva i korozivsku postojanost. [1]

Dupleks čelici pronalaze primjenu u području industrije nafte i plina, papira, kemijsko-procesnoj i petrokemijskoj industriji, za cisterne na vozilima, brodogradnji i drugdje. [6]

Primjena dupleks čelika [1]:

- u vodenim i kloridnim otopinama,
- u industriji nafte i plina,
- u industriji celuloze i papira,
- u postrojenjima za desalinizaciju,
- u kontaktu s octenom i fosfornom kiselinom,
- za cijevi kemijskih reaktora, filteri dimnih plinova,
- za cijevi izmjenjivača topline u rafinerijama, procesnoj, kemijskoj i drugim industrijama,

- za izmjenjivače topline na geotermalnim izvorima,
- za tankere za prijevoz kemikalija,
- za implantate u medicini,
- za cijevi za sustave s morskom vodom,
- za separatore nafte i plina,
- zamjena za austenitne čelike u pogodnim uvjetima za nastanak napetosne i rupičaste korozije.



### 3. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

Komponenta ili dio od metalnih materijala smatra se zavarljivim kada se određenim postupkom uz primjenu pogodne procedure zavarivanjem može postići kontinuitet metalnog materijala. Zavareni spoj mora zadovoljavati zadane kriterije metalurških i mehaničkih značajki te ne smije narušavati nosivost konstrukcije koje je sastavni dio. Pojam zavarljivost se može koristiti za opisivanje sposobnosti uspješne izrade komponente pomoću zavarivanja i sposobnosti da ta komponenta radi na odgovarajući način u predviđenom radnom okruženju. Prema normi ISO 581:1980 smatra se da je metalni materijal podložan zavarivanju u određenoj mjeri s određenim postupcima kada zavarivanje osigurava cjelovitost metala. Zavarljivost ovisi o tri faktora: osnovnom materijalu koji se zavaruje, konstrukciji i tehnologiji zavarivanja. [8, 9] Slika 11. prikazuje utjecajne parametre na zavarljivost metalnih materijala.

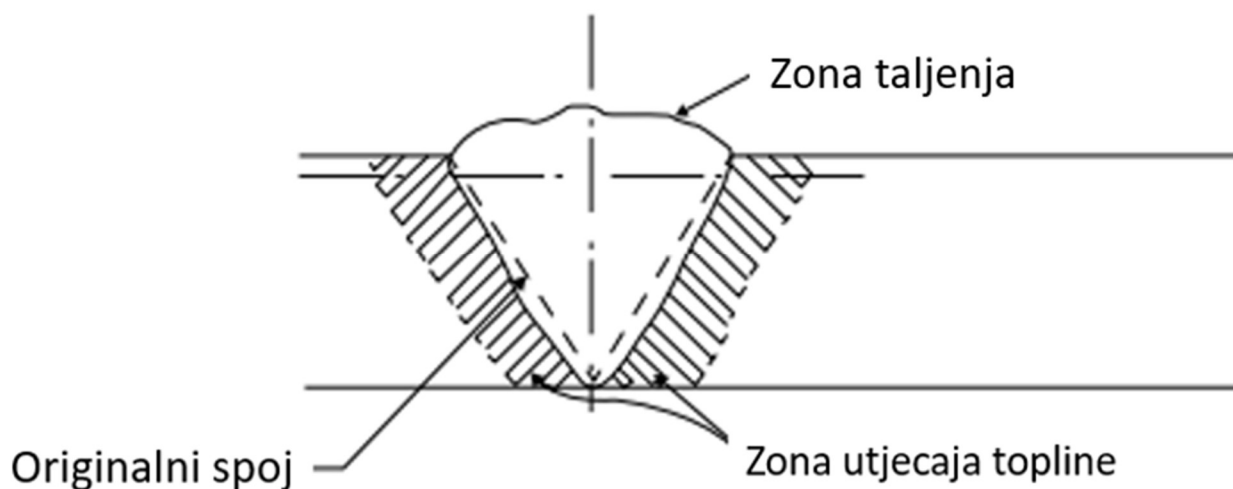


Slika 11. Zavarljivost metalnih materijala [8]

Iako je razumijevanje mehanizama koji dovode do različitih oblika pucanja važno. Preventivne mjere obično se ne mogu razviti dok se ne shvati priroda kvara. U nekim slučajevima, promjene u tehnici ili postupku zavarivanja mogu biti učinkovite. Na primjer, jednostavne promjene unosa topline i oblika zavara ponekad mogu spriječiti pucanje zavara uslijed skrućivanja. Drugi primjer je korištenje predgrijavanja i kontrole temperature kako bi se spriječilo pucanje izazvano vodikom. Međutim, treba napomenuti da će rješenje za mnoge probleme zavarljivosti zahtijevati promjenu materijala, a ne “podešavanje” sastava ili parametara procesa. Na primjer, pukotine uslijed

ponovnog zagrijavanja i starenja deformacije značajni su problemi kod zavarivanja debelih presjeka ili vrlo ograničenih Cr–Mo čelika te superlegura na bazi nikla. Potrebno je poznavanje preciznog mehanizma kvara prije nego što se mogu implementirati korektivne mjere. [9]

Postoji niz metalurških procesa kojima se kontrolira mikrostruktura i svojstva zavara. Taljenje i skrućivanje su važni procesi, zato što su ključni za postizanje prihvatljivih spojeva u svim postupcima zavarivanja taljenjem. Uz skrućivanje važni su procesi segregacije i difuzije koji rezultiraju lokalnim varijacijama sastava koje utječu i na zavarljivost i na radnu učinkovitost. Ispitivanje zavarenog spoja otkriva različite mikrostrukturne regije. Zona taljenja povezana je s taljenjem i miješanjem metala, nakon zavarivanja naziva se metalom zavara (MZ). Zona utjecaja topline (ZUT), iako nije rastaljena, pod utjecajem je topline iz procesa zavarivanja. Zonu taljenja i ZUT dijeli linija staljivanja. Izvan ZUT-a nalazi se nepromijenjeni osnovni materijal. [9] Slika 12. prikazuje zone zavara.



Slika 12. Zone zavara [9]

Zona taljenja predstavlja ono područje zavara gdje dolazi do potpunog taljenja i ponovnog skrućivanja tijekom procesa zavarivanja. Na mikrostrukturu u zoni taljenja utječe sastav materijala i uvjeti skrućivanja. Male razlike u sastavu često rezultiraju velikim varijacijama u mikrostrukturi i svojstvima. U nekim sustavima, promjena brzine skrućivanja i hlađenja također mogu promijeniti mikrostrukturu. Definirana su tri tipa zone taljenja: autogena, homogena i heterogena. Klasifikacije se temelje na tome koristi li se dodatni materijal ili ne te prema sastavu dodatnog

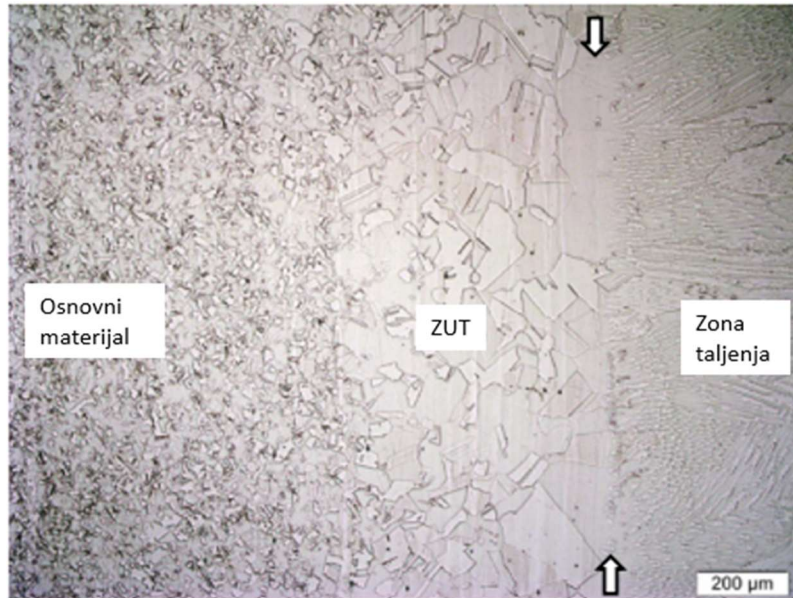
materijala s obzirom na osnovni materijal. Autogeni zavari su oni gdje se ne dodaje dodatni materijal, a zona taljenja nastaje taljenjem i ponovnim skrućivanjem osnovnog materijala. Homogeni zavari uključuju upotrebu dodatnog materijala koji je vrlo sličan sastavu osnovnog materijala. Heterogeni zavari su zavareni spojevi napravljeni s dodatnim materijalima čiji se sastav razlikuje od sastava osnovnog materijala. [9]

Sve reakcije u zoni unosa topline odvijaju se u krutom stanju. U ovom području ne dolazi do reakcije taljenja ili likvidacije. Proces zavarivanja i unos topline, vrsta materijala i stanje materijala prije zavarivanja važne su varijable koje mogu utjecati na rezultirajuću mikrostrukturu ZUT-a. Budući da ZUT prolazi kroz spektar toplinskih ciklusa (vršne temperature i brzine hlađenja), moguć je širok raspon mikrostrukture unutar istog zavara i lokalne varijacije mogu biti velike. [9]

Reakcije koje se događaju u ZUT-u mogu biti prilično složene. Postoji puno mogućih metalurških reakcija, a svako određeno područje u ZUT-u može proći kroz jednu ili više od sljedećih [9]:

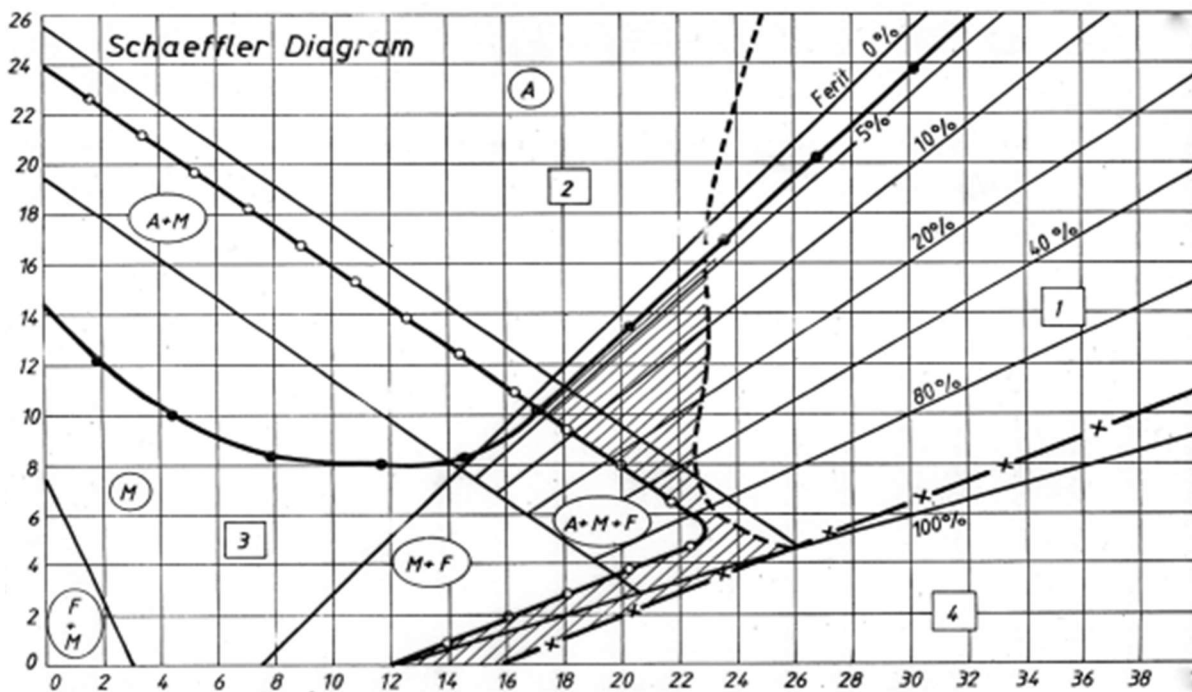
- rekristalizacija,
- rast zrna,
- fazne transformacije,
- otapanje,
- formiranje precipitata,
- zaostala naprezanja.

Slikom 13. je prikazana mikrostruktura sitnozrnatog austenitnog nehrđajućeg čelika 1.4307 (AISI 304L) u područjima zone taljenja, ZUT-a i osnovnog materijala. Linija staljivanja označena je strelicama. Zavarivanje u ovom slučaju je rezultiralo rastom zrna u ZUT-u, vidljivo je kako su zrna u ZUT-u za red veličine veća od onih u osnovnom materijalu. Novonastala mikrostruktura ZUT-a ima manju tvrdoću od osnovnog materijala i metala zavara nastalog skrućivanjem zone taljenja. [9]



Slika 13. Mikrostruktura u područjima zavora [9]

Slikom 14. je prikazan Schaeffler-ov strukturni dijagram s DeLong-ovom i M. C. T. Bystram-ovom dopunom. Na dijagramu su označena područja strukturne osjetljivosti (bez šrafure) te šrafirana područja koja omogućuju prihvatljivu zavarljivost. [10]



Slika 14. Schaeffler-ov strukturni dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom [10]

M. C. T. Bystram-ova dopuna obuhvaća četiri polja [10]:

1. Materijali u ovom polju su skloni pojavi krhke  $\sigma$ -faze na temperaturama između 500 i 900 °C. Čelici austenitno-feritne mikrostrukture s više od 10 %  $\delta$ -ferita ( $\alpha$ -faze) naročito su skloni krhkosti.
2. Materijali u ovom polju su skloni stvaranju toplih pukotinama iznad 1250 °C. Kao što je vidljivo na dijagramu ovo polje uglavnom obuhvaća materijale s austenitnom mikrostrukturom, kada bi se ti materijali zavarivali s austenitnim dodatnim materijalom postoji mogućnost pojave toplih pukotina u zavarenom spoju. Korištenjem dodatnog materijala koji u strukturi zavara osigurava 3 – 10 % ferita moguće je izbjeći pojavu toplih pukotina.
3. U ovom polju nalaze se materijali s krhkom martenzitno-austenitnom i martenzitno-feritnom mikrostrukturom koji su izrazito skloni pojavi hladnih pukotina ispod 400 °C. Pojava hladnih pukotina može se izbjeći primjenom predgrijavanja prije zavarivanja i naknadnom toplinskom obradom žarenjem.
4. Ovo polje obuhvaća korozijski postojeće čelike koji u sastavu imaju vrlo mali postotak ugljika. Kod ovih materijal iznad 1100 °C dolazi do izraženog rasta zrna iz čega proizlazi sklonost pukotinama u metalu zavara i ZUT-u.

Kod feritnih čelika zavarljivost je ograničena zbog grubozrnate mikrostrukture koja rezultira niskom žilavošću, teže se zavaruju zbog pojava deformacija. Austenitni čelici imaju ograničenu zavarljivost zbog sklonosti stvaranja toplih pukotina, što je tipično i za ostale legure s FCC kristalnom rešetkom. Kod martenzitnih čelika zavarljivost ovisi o njihovoj prokaljivosti zbog koje mogu nastati hladne pukotine u materijalu. Čelici legirani kromom na površini imaju oksidni sloj ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) čija je temperatura taljenja oko 1972 °C značajno viša od temperature taljenja čelika. Zbog toga je za vrijeme zavarivanja potrebna uporaba odgovarajućih elektroda koje u oblozi sadrže fluoride (Ca ili Na fluoride) kako bi se uklonio oksidni sloj. Korištenjem elektroda s fluoridnom oblogom dolazi do zarobljavanja fluorida u troski na površini metala zavara i ZUT-a. Što može dovesti do korozije u zavarenom spoju kada je izložen visokim temperaturama, potrebno je ukloniti fluoride prije procesa toplinske obrade zavarenog spoja. [11]

Normom HRN EN ISO 3581-A definirana su svojstva i područja primjene elektroda za zavarivanje visokolegiranih čelika. Na primjer, za zavarivanje feritnih čelika koriste se bazično obložene elektrode (EZ – Krom 6), za austenitne rutilno i bazično obložene elektrode (EZ - Krom 10R i EZ – Krom 10B), za dupleks čelike rutilno obložene elektrode (EZ – Krom 8) itd. [11]

Osnovna pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika [11]:

- obratiti veliku pozornost prilikom odabira dodatnog materijala,
- alati i brusne ploče ne smiju sadržavati karbide, koriste se aluminijski oksidi,
- mjesto zavarenog spoja prije zavarivanja mora biti očišćeno i glatko obrađeno (bez vlage, masnoća, premaza, itd.)
- obavezno predgrijavanje martenzitnih čelika,
- sredstvo za hlađenje u sastavu ne smije sadržavati klor,
- pjeskarenje se vrši s čistim pijeskom.

### 3.1. Zavarljivost visokolegiranih feritnih čelika

Zavarljivost feritnih čelika je ograničena zbog visoke sklonosti prema rastu zrna u strukturi, što može dovesti do izlučivanja krhkih intermetalnih faza (npr. sigma faza) u području ZUT-a. Iz tog razloga nisu pogodni za zavarivanje kada se radi o debljim materijalima, zbog potrebe za velikim unosom topline. Feritni čelici imaju visoku električnu otpornost, zbog koje su pogodni za elektrootporno zavarivanje. Kod feritnih čelika ne dolazi do faznih pretvorbi za vrijeme hlađenja što ih čini pogodnima za zavarivanje. Međutim, zbog toga što nema faznih pretvorbi procesom toplinske obrade nakon zavarivanja nije moguće postići sitnozrnatu mikrostrukturu kada već postoji grubozrnata mikrostruktura u feritnom čeliku. Kako bi se spriječilo nastajanje grubozrnate mikrostrukture potrebno je provoditi zavarivanje s malim unosom topline. Kod ovih čelika obično nema predgrijavanja prije zavarivanja, osim u slučaju kada je u strukturi visok udio kroma i ugljika (> 0,25 %C). Tada se provodi predgrijavanje na temperaturi od oko 200 °C s ciljem izbjegavanja pojave hladnih pukotina. Nakon procesa zavarivanja provodi se žarenja na temperaturi između 750 i 850 °C uz brzo hlađenje. Ako je potrebno ravnjanje zbog hladnih deformacija zavarenih dijelova, ono se provodi na temperaturama između 300 i 400 °C, zbog veće plastičnosti na tim temperaturama. [4,11]

### 3.2. Zavarljivost visokolegiranih martenzitnih čelika

Martenzitne čelike je moguće zavarivati u otvrdnutom, poboljšanom ili žarenom stanju. Sa svrhom sprječavanja nastanka pukotina u materijalu provodi se predgrijavanje prije zavarivanja (200 – 300 °C), kontrola između prolaza tijekom zavarivanja i toplinska obrada nakon zavarivanja (popuštanje sa 700 – 750 °C). Martenzitni čelici se predgrijavaju na temperaturama višim od  $M_s$ , oko 400 °C, a kada se zavarivanje provodi s velikim unosom topline predgrijavanje se vrši na otprilike 250 °C. Predgrijavanjem se smanjuje vjerojatnost pojave hladnih pukotina. Kod zavarivanja s više prolaza potrebna je kontrola temperature materijala prije zavarivanja svakog sljedećeg prolaza. Kako bi se smanjila sklonost nastajanju pukotina temperatura materijala prije nanošenja novog prolaza mora biti manja od 420 °C. Toplinska obrada se provodi s ciljem smanjenja zaostalih naprezanja u materijalu. Također, primjenom toplinske obrade dolazi do smanjenja tvrdoće i čvrstoće te rasta žilavosti. Za zavarene konstrukcije koriste se martenzitni čelici s masenim udjelom ugljika manjim od 0,15 %C. [4, 11]

### 3.3. Zavarljivost visokolegiranih austenitnih čelika

Austenitne čelike karakterizira niska toplinska provodljivost, 30 % niža u odnosu na feritne čelike. Zavarivanje materijala s niskom toplinskom provodljivošću rezultira zaostalim naprezanjima i deformacijama u osnovnom materijalu. Austenitni čelici se smatraju dobro zavarljivima u slučaju kada ne sadržavaju nečistoće u strukturi. Nisu skloni porastu zrna u ZUT-u i nisu skloni pojavi krhkosti 475. Problemi zavarljivosti austenitnih čelika nastaju uslijed korištenja pogrešnih parametara zavarivanja, što može prouzročiti greške: pukotine uzrokovane korozijom, tople pukotine, izlučivanje sigma faze. Duže izlaganje austenitnih čelika temperaturama između 425 i 850 °C uzrokuje formiranje kromovih karbida  $Cr_{23}C_6$  na granicama zrna, koji za sebe vežu značajan postotak kroma (94,3 %Cr). Tada postoji opasnost od interkristalne, ali i od ostalih oblika korozije ako u osnovnom materijalu nema dovoljno kroma za pasivaciju. Izlučivanje  $Cr_{23}C_6$  sprječava se smanjenjem masenog udjela ugljika u austenitnom čeliku, legiranjem s titanijem, niobijem i tantalom koji s ugljikom tvore stabilne karbide. Monofazni austenitni čelici skloni su nastanku toplih pukotina, prilikom zavarivanja u njihovoj strukturi nastaju spojevi niskog tališta sulfidi i fosfidi. Izbjegavanje pojave sulfida i fosfida u strukturi moguće je uz primjenu dodatnog

materijala koji nakon zavarivanja u zoni taljenja uzrokuje austenitnu fazu s 4 do 12 %  $\delta$ -feritne faze. Izlaganje zavarenog spoja, s  $\delta$ -feritom u mikrostrukturi, temperaturama između 600 i 950 °C postoji opasnost od stvaranja krhke  $\sigma$ -faze. Predgrijavanje austenitnih čelika nije potrebno, osim u slučaju debljih radnih komada kada se vrši na temperaturama između 100 i 150 °C. [4, 11]

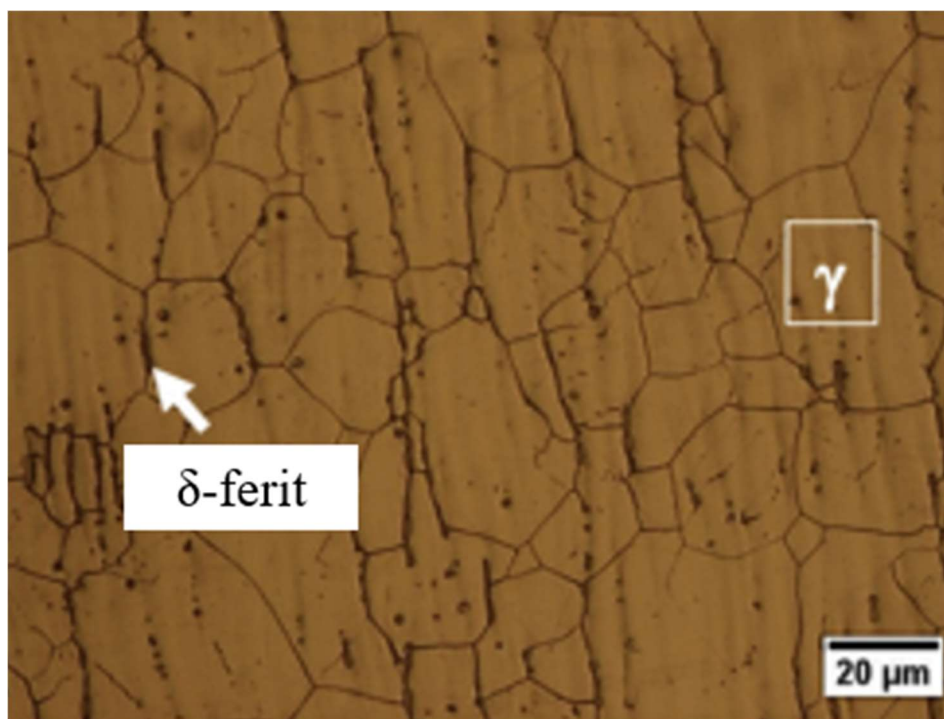
### 3.4. Zavarljivost visokolegiranih dupleks čelika

Zavarljivost dupleks čelika približno je jednaka zavarljivosti austenitnih. Preporuka kod procesa zavarivanja dupleks čelika je da se zavaruje s kontroliranim unosom topline i da se osigura hlađenje kojim se u mikrostrukturi ostvaruje dovoljan udio austenitne faze. Procesom zavarivanja dupleks čelika u mikrostrukturi se mijenja omjer ferita i austenita u korist ferita. Zavarivanje bez dodatnog materijala izaziva porast udjela ferita u zavaru do 80 %. Korištenje dodatnih materijala na bazi nikla (3 - 4 %Ni) osigurava se dovoljan udio austenita u zavarenom spoju. Također, pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture postiže se korištenjem dušika u mješavini zaštitnog plina. Dupleks čelici su podložni toplinskom šoku za vrijeme zavarivanja kada dolazi do izlučivanja feritne i austenitne faze. Toplinski šok prouzrokuje podjelu ZUT-a na visokotemperaturni (V-ZUT) i niskotemperaturni (N-ZUT). Nakon procesa zavarivanja dupleks čelika potrebno je kontrolirano hlađenje. Da bi se postigla dovoljna količina austenita u ZUT-u mora se osigurati dovoljno sporo hlađenje, ali i dovoljno brzo hlađenje kako ne bi došlo do izlučivanja štetnih intermetalnih faza i pojave krhkosti 475. Predgrijavanje se ne primjenjuje osim u slučaju debljih materijala (> 20 mm) kada se vrši na 150 °C. [4, 11]



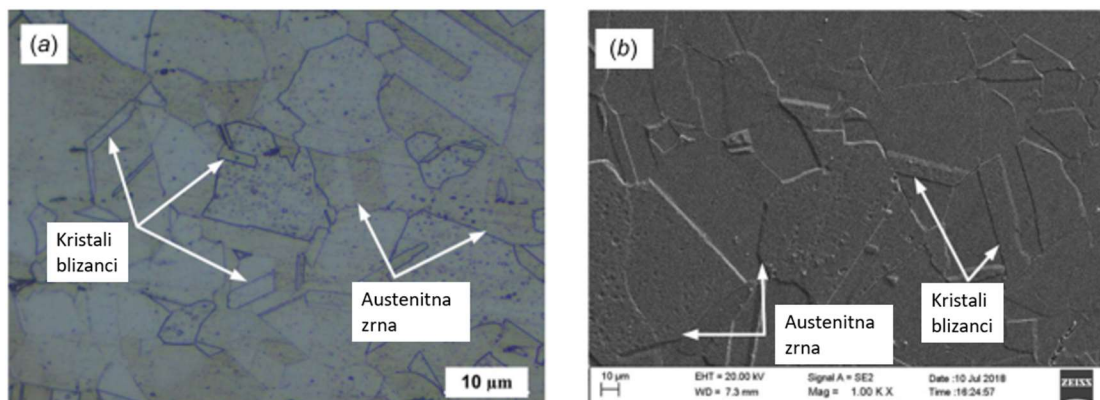
#### 4. UTJECAJ PROCESA ZAVARIVANJA NA MIKROSTRUKTURU AUSTENITNIH ČELIKA

Mikrostruktura visokolegiranih austenitnih čelika općenito sadrži fazu austenit podložnu ravnotežnom skrućivanju. Međutim, tijekom procesa zavarivanja, koji je neravnotežni proces, velika brzina hlađenja potiče promjenu dijela austenita u delta-ferit, koji ostaje u mikrostrukтури na sobnoj temperaturi. Ovaj zadržani delta-ferit je koristan u smislu poboljšavanja žilavosti, rastezljivosti i otpornosti na koroziju. Također, poboljšava otpornost na skrućivanje i vruće pukotine. Više od 10 % delta-ferita u mikrostrukтури može smanjiti mogućnost obrade u toplom stanju. [12] Slika 15. prikazuje mikrostrukтуру austenitnog čelika s delta-feritom.



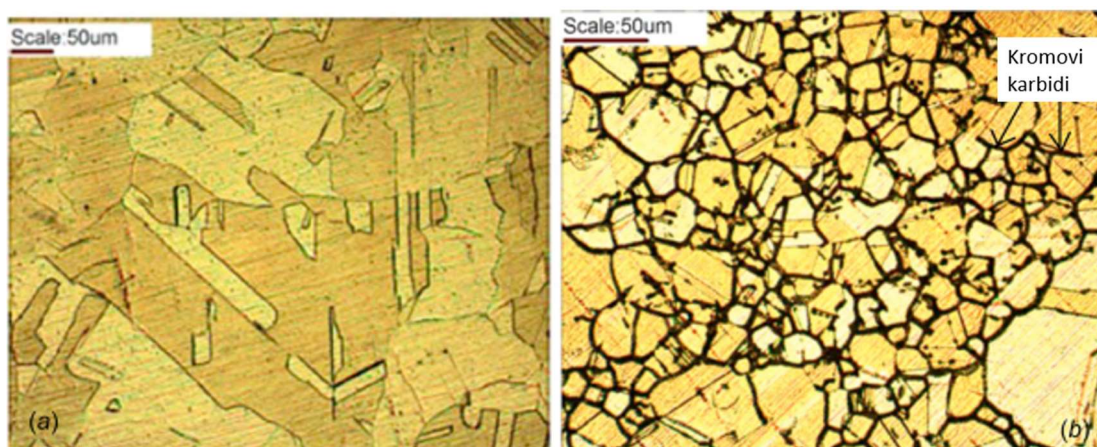
Slika 15. Mikrostruktura austenitnog čelika s delta-feritom [12]

Optičke i SEM slike prikazuju mikrostrukтуру nehrđajućeg čelika 1.4307 (AISI 304L) s poligonalnim austenitnim zrnima i različitim kristalima blizancima (slika 16.). austenitna zrna i kristali blizanci tvore mikrostrukтуру austenitnih čelika. Takva mikrostruktura osigurava dobru otpornost na koroziju i visoku žilavost, ali povećava vjerojatnost nastajanja toplih pukotina. [12]



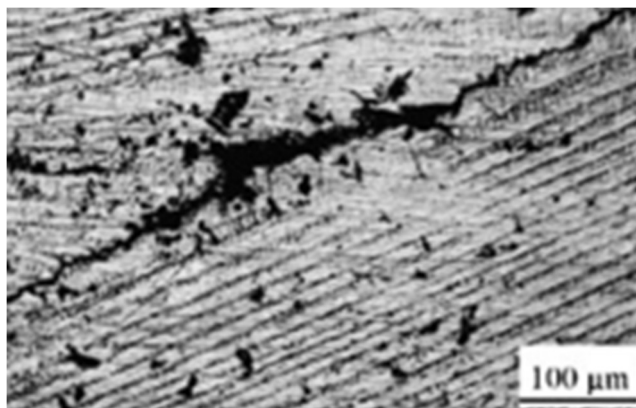
Slika 16. a) Optička slika mikrostrukture čelika 1.4307, b) SEM slika mikrostrukture čelika 1.4307 [12]

Korozija je jedan od glavnih problema povezanih sa zavarenim spojevima od nehrđajućeg čelika. Do pada korozijske postojanosti u zavaru dolazi zbog pojave senzibilizacije koja može uzrokovati interkristalnu koroziju. Senzibilizacija nastaje zbog izlučivanja kromovih karbida i nekoliko drugih intermetalnih faza po granicama zrna, kada je nehrđajući čelik dugotrajno izložen povišenim temperaturama, primjerice tijekom procesa zavarivanja. Slika 17. pod a) prikazuje ne senzibilizirani uzorak čelika 1.4301 (AISI 304), a pod b) prikazuje senzibilizirani čelik 1.4301 (AISI 304) koji sadrži kromove karbide (tamne linije) po granicama zrna. Čimbenici koji potiču senzibilizaciju su količina ugljika u materijalu, vrijeme i temperatura toplinske obrade, veličina zrna i orijentacija zrna. Na koroziju također može utjecati unos topline i brzina hlađenja zone zavarivanja, ti procesi mogu dovesti do segregacije i stvaranja zona osiromašenih kromom. [12]



Slika 17. Mikrostruktura austenitnog čelika bez senzibilizacije (a) i sa senzibilizacijom (b) [12]

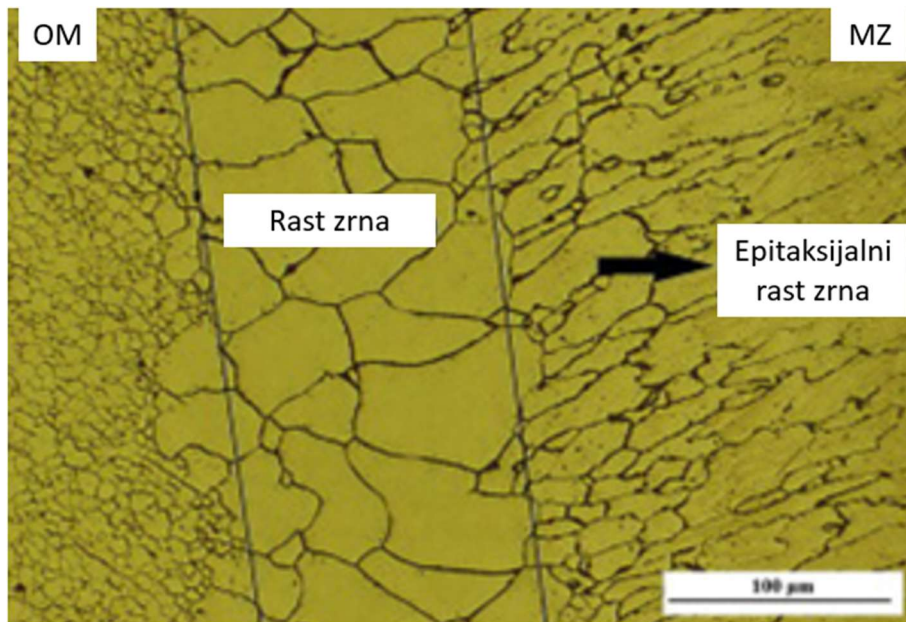
Vruće pukotine kod zavarivanja općenito se javljaju na kraju procesa skrućivanja. One uključuju pojavu pukotina izazvanu skrućivanjem, pojavu pukotina u ZUT-u i pojavu pukotina izazvanu likvidacijom na povišenoj temperaturi. Vruće pukotine obično se javljaju na granicama zrna pod utjecajem toplinski induciranog naprezanja i mikrostrukture sklone pukotinama. Pojava pukotina izazvanih skrućivanjem nastaje zbog unosa topline zavarivanjem, sastava materijala, ograničenja deformacija, veličine i oblika zrna, veličine zavarenog spoja te toplinske kontrakcije. Pukotine nastale skrućivanjem mogu se minimalizirati do određene mjere ili eliminirati uklanjanjem mehaničkih ograničenja. Osim toga, sastav materijala ima veliki utjecaj na pucanje izazvano skrućivanjem zbog promjene stanja materijala iz tekućeg u kruto. [12] Slika 18. prikazuje pucanje uzrokovano skrućivanjem materijala 1.4845 (AISI 310).



Slika 18. Vruća pukotina nastala skrućivanjem u mikrostrukтури čelika 1.4845 [12]

Pukotine uzrokovane naponskom korozijom započinju inicijacijom i širenjem u metalima koji imaju visoku otpornost na koroziju, kao što su visokolegirani nehrđajući čelici. Pukotine uzrokovane naponskom korozijom se pojavljuju kada je materijal podvrgnut vlačnom opterećenju u korozivnom mediju. Kod visokolegiranih nehrđajućih čelika formiraju se zbog indukcije vlačnog naprezanja, osjetljivosti mikrostrukture i korozivnog okruženja. Sklonost pukotinama veća je u kloridnom mediju, koji može značajno smanjiti čvrstoću nehrđajućeg čelika. Indukcija zaostalog naprezanja u ZUT može dovesti do pukotina i korozije duž granica zrna. [12]

Epitaksijalni rast zrna nastupa kada osnovni i dodatni materijal imaju isti kemijski sastav. Slika 19. prikazuje epitaksijalni rast zrna u ZUT-u i oko linije staljivanja uslijed zavarivanja osnovnog materijala 1.4845 (AISI 310) s istim dodatnim materijalom. [12]



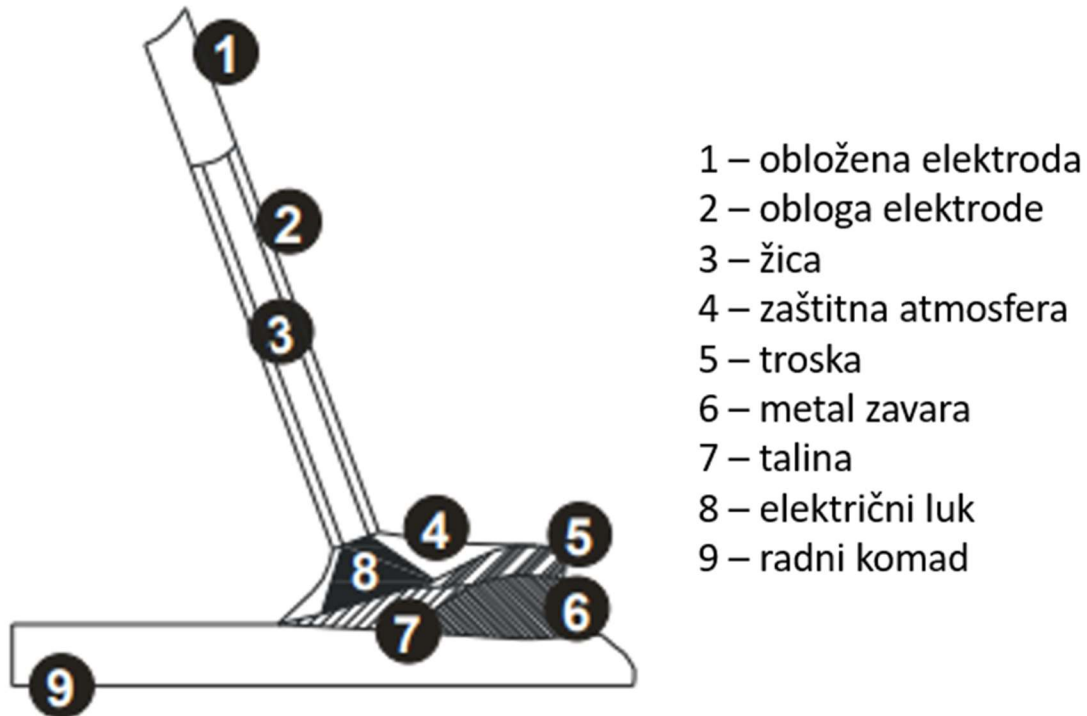
Slika 19. Epitaksijalni rast zrna uslijed zavarivanja čelika 1.4845 [12]

## 5. PRIMJENJIVE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

Za vrijeme zavarivanja visokolegiranih nehrđajućih čelika potrebna je stroga kontrola deformacija tijekom procesa. Zbog njihove niske toplinske provodljivosti nužan je manji unos topline nego kod ugljičnih čelika. Zavarivanje ovih čelika može se provoditi velikom većinom tehnologija zavarivanja, ali s određenim ograničenjima. Koriste se elektrolučni postupci (REL, TIG, MIG, EPP), plazma, laserski i elektronski snop, elektrotoporni postupci (točkasto, šavno, visokofrekventno zavarivanje). Plinski postupci nisu preporučljivi, osim za toplinsko ravanje uslijed pojave deformacija. Prilikom zavarivanja bitno je postići uvjete za sprječavanje oksidacije korištenjem zaštitnih plinskih atmosfera za vrijeme samog procesa. [11]

### 5.1. REL

Ručno elektrolučno zavarivanje (REL) je prvi razvijeni elektrolučni postupak zavarivanja. Kod REL postupka zavarivanja dolazi do uspostave električnog luka kresanjem (povlačenjem elektrode po radnom komadu) koje uzrokuje kratki spoj i odmicanjem elektrode od radnom komada. Uslijed povišene temperature izazvane električnim lukom dolazi do taljenja jezgre i obloge elektrode koja stvara određenu količinu rastaljenog metala, troske i plinova. Plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge tvore zaštitnu atmosferu tijekom zavarivanja. Zavarivač u procesu zavarivanja ravnomjerno dodaje elektrodu u električni luk i poprečnim gibanjem elektrode stvara zavareni spoj. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja prikazan je slikom 20. [13]



Slika 20. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [13]

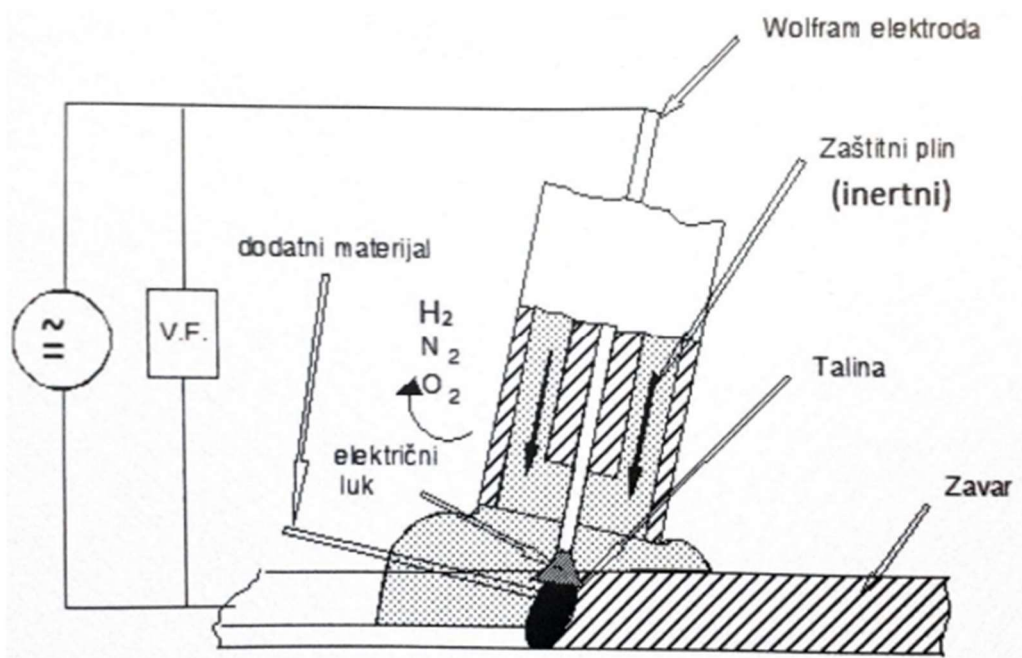
Izvor struje kod REL zavarivanja može biti istosmjerni (elektroda spojena na (+) ili (-) pol) ili izmjenični. Statička karakteristika izvora za ovaj postupak je strmo padajuća (CC). [2]

REL postupak zavarivanja ima široku primjenu. Karakteriziraju ga male brzine zavarivanja i relativno mala količina depozita u jedinici vremena. Danas se primjenjuje kod kraćih zavarenih spojeva na većim debljinama materijala (> 15 mm). Koristi se za većinu metalnih materijala. [13]

U ručnom elektrolučnom zavarivanju najčešće se primjenjuje obložena elektroda. Prema oblozi obložene elektrode mogu se podijeliti na bazične, rutilne i celulozne. Bazične elektrode se uglavnom spajaju na (+) pol, a rutilne uglavnom na (-) pol istosmjerne struje, međutim s rutilnim elektrodama moguće je zavarivanje izmjeničnom strujom. Elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika najčešće su obložene bazičnom oblogom. Sastav metala jezgre elektrode mora odgovarati sastavu visokolegiranog čelika koji se zavaruje. Elektrode nadoknađuju gubitke legiranih elemenata nastale tijekom zavarivanja. Izbor elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika vrši se ovisno o kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima radnog komada, uz zahtjev da metal zavara ima jednaka ili bolja mehanička svojstva. [2]

## 5.2. TIG

TIG (eng. Tungsten inert gas) je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom od volframa u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. U ovom postupku volframova elektroda se najčešće spaja na negativan (-) pol istosmjerne električne struje. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode i radnog komada. Zavarivanjem se tali radni komad, a elektroda se ne tali, tada zavareni spoj nastaje miješanjem talina osnovnih materijala. Postupak se može provoditi uz dodavanje dodatnog materijala koji se tali, u tom slučaju dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala prilikom nastajanja zavarenog spoja. Zaštitni plin za vrijeme zavarivanja štiti zonu taljenja i zonu utjecaja topline od atmosferskih uvjeta te održava stabilnost električnog luka. Najčešće korišteni inertni zaštitni plin kod TIG postupka je argon (Ar), može se koristiti i helij (He) ili mješavina argon/helij u određenim postocima. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja prikazan je slikom 21. [2]



Slika 21. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2]

Izvor struje kod TIG zavarivanja može biti istosmjerni ili izmjenični ovisno o materijalu koji se zavaruje prikazano tablicom 4. Statička karakteristika izvora za ovaj postupak je strmo padajuća (CC). Postupak je primjenjiv za zavarivanje svih materijala. [14]

Tablica 4. Vrsta struje pri TIG zavarivanju [2]

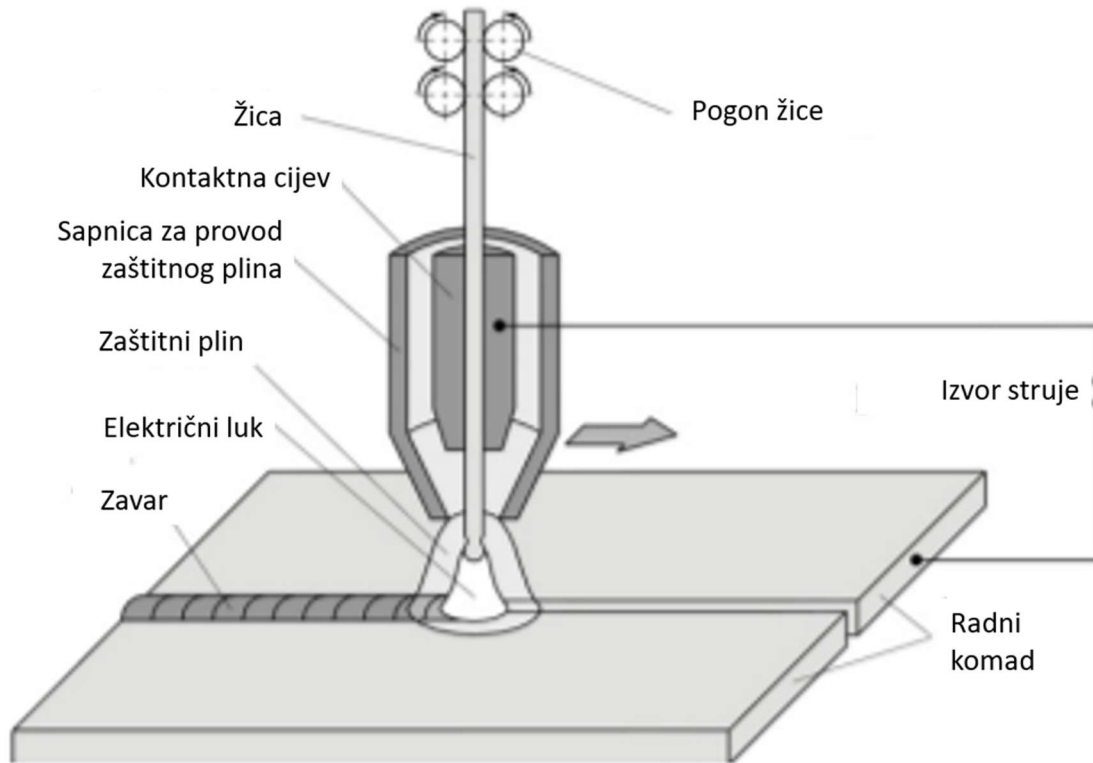
VRSTA STRUJE	ZAVARIVANI MATERIJALI	NAPOMENA
istosmjerna elektroda (-) pol	svi materijali osim Al i Mg i njihovih legura	mogućnost najvećeg opterećenja elektrode
izmjenična ili impulsna	Al i Mg i njihove legure	moguće uklanjanje oksida s površine osnovnog materijala
istosmjerna elektroda (+) pol	posebni slučajevi	vrlo malo dozvoljeno opterećenje elektrode

TIG zavarivanje visokolegiranih čelika uvijek se provodi spajanjem volframove elektrode na negativan (-) pol istosmjerne električne struje. Najčešće se koristi volframova elektroda legirana s malim dodacima torijevog oksida (1 do 2 %ThO<sub>2</sub>). Dodaci ThO<sub>2</sub> olakšavaju uspostavu električnog luka, stabiliziraju luk, smanjuju eroziju vrha elektrode i povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. Kao zaštitni plin najčešće se koristi argon (Ar), zbog osjetljive mikrostrukture visokolegiranih čelika na nečistoće koristi se argon više čistoće (Ar 4.8) ili čišći. [2, 15]

### 5.3. MIG/MAG

MIG/MAG je postupak elektrolučnog zavarivanja kod kojeg se električni luk ostvaruje između kontinuirano dodavane taljive elektrode koja je u ovome postupku zavarivanja dodatni materijal i radnog komada. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnog (MIG – Metal Inert Gas) ili aktivnog (MAG – Metal Active Gas) plina. Ovaj postupak elektrolučnog zavarivanja ima najširu primjenu zbog visoke učinkovitosti. Ovaj postupak karakterizira veća brzina zavarivanja, jednostavnije rukovanje, automatizacija, veće količine rastaljenog materijala u jedinici vremena. Postupak je moguće provoditi poluautomatizirano kada je dodavanje žice automatizirano, a vođenje pištolja ručno te potpuno automatizirano, odnosno robotizirano. [2] Slika 22. prikazuje proces MIG/MAG postupka zavarivanja.





Slika 22. Shematski prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja [3]

Izvor struje kod MIG/MAG zavarivanja može biti istosmjerni (elektroda spojena na (+) pol) ili izmjenični. Statička karakteristika izvora za ovaj postupak je blago padajuća, tj. ravna (CV). [14]

Prednosti MIG/MAG postupka [16]:

- velika učinkovitost i proizvodnost,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- zavarivanje u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala,
- pogodan za automatizaciju,
- primjena različitih plinskih mješavina,
- širok izbor parametara i načina prijenosa metala,
- pogodan za automatizaciju,
- moguća primjena za lemljenje,
- mogućnost primjene praškom punjene žice.

Nedostaci MIG/MAG postupka [16]:

- povećani broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- složeniji uređaji (dovođenje žice i automatska regulacija) - skuplji u odnosu na REL postupak,
- potreba za zaštitom od vjetra prilikom rada na otvorenom,
- pojava rasprskavanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima,
- problemi kod dovođenja žice (posebice aluminij).

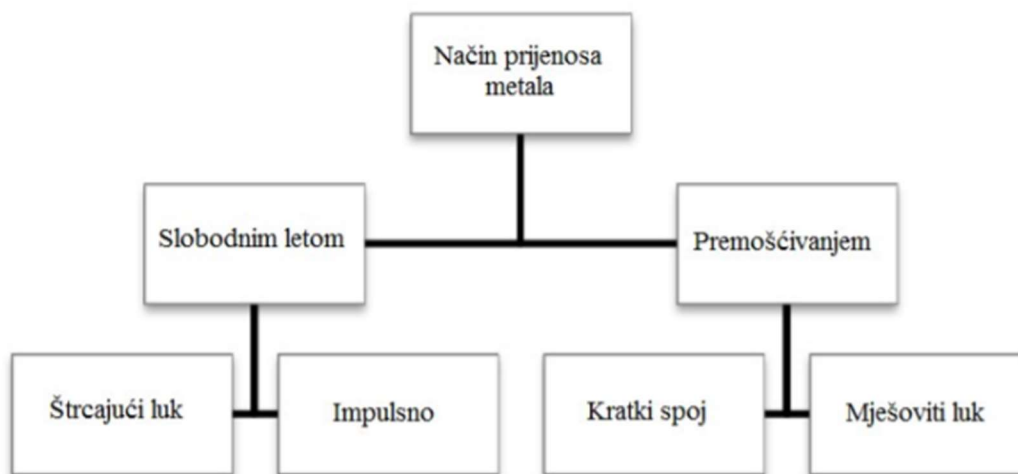
Parametri MIG/MAG postupka koje je potrebno podesiti prije samog zavarivanja [17]:

- brzina zavarivanja,
- vrsta i protok zaštitnog plina,
- promjer žice,
- slobodni kraj žice,
- jakost električne struje,
- napon električnog luka,
- induktivitet.

Zavarivanje visokolegiranih čelika MIG/MAG postupkom može se provoditi primjenom istosmjerne struje kada je elektroda spojena na (+) pol ili izmjeničnom strujom. Kod ovog postupka elektroda je ujedno i dodatni materijal u obliku žice. Žice koje se primjenjuju za zavarivanje visokolegiranih čelika obično su pobakrene ili poniklane, pružaju bolji električni kontakt i zaštitu od korozije. Osim punih žica mogu se koristiti i praškom punjene žice. Odabir žice, pri zavarivanju visokolegiranih čelika, vrši se na temelju sastava osnovnog materijala koji se zavaruje. Dodatni materijal mora imati što sličniju mikrostrukturu osnovnome materijalu, kako bi se osiguralo da zavareni spoj ima jednaka ili bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala. Kao zaštitni plin kod MIG/MAG postupka zavarivanja visokolegiranih čelika koristi se čisti argon, helij ili plinska mješavina Ar/He. Također se koriste mješavine s visokim udjelom inertnog plina, uglavnom argona i niskim udjelom aktivnog plina. Plinske mješavine koje se uglavnom koriste su Ar/O<sub>2</sub>, Ar/H<sub>2</sub>, Ar/CO<sub>2</sub>. Udio aktivnog plina kod ovih mješavina je < 5 %. [2, 18]

### 5.3.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja

Prijenos metala do radnoga komada započinje taljenjem elektrode koja je ujedno i dodatni materijal. Elektroda se tali prilikom kontakta s električnim lukom. Na vrhu elektrode dolazi do formiranja i razdvajanja rastaljene kapljice koja pada na površinu radnog komada. Kod MIG/MAG postupka prijenos metala moguće je obaviti na dva osnovna načina slobodnim letom ili premošćivanjem. Kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i mješovitim lukom. Kod prijenosa slobodnim letom kapljice razlikujemo prijenos metala štrcajućim i impulsnim lukom. [2] Slika 23. prikazuje načine prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja.

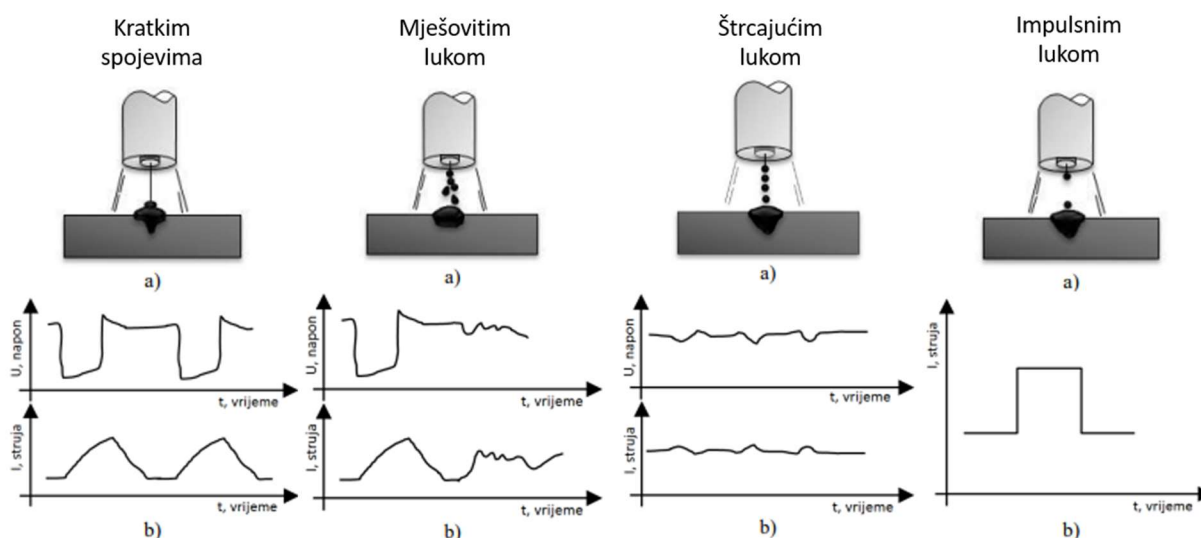


Slika 23. Načini prijenosa metala MIG/MAG postupkom zavarivanja [19]

Karakteristike različitih prijenosa materijala[16]:

- Kratkim spojevima: napon 13 – 21 V, jakost struje 50 – 170 A, niski unos topline u radni komad, za zavarivanje tanjih limova, za zavarivanje u prisilnim položajima.
- Mješovitim lukom: napon 22 – 25 V, jakost struje 170 – 235 A.
- Štrcajućim lukom: napon 25 – 40 V; jakost struje 200 – 600 A, za zavarivanje debljih materijala, visoka učinkovitost.
- Impulsnim lukom: kontrolirani prijenos štrcajućim lukom, odvajanje jedne kapljice po impulsu električne struje.

Shematski prikazi te dijagrami ovisnosti struje i napona o vremenu za pojedini način prijenosa metala dani su slikom 24.

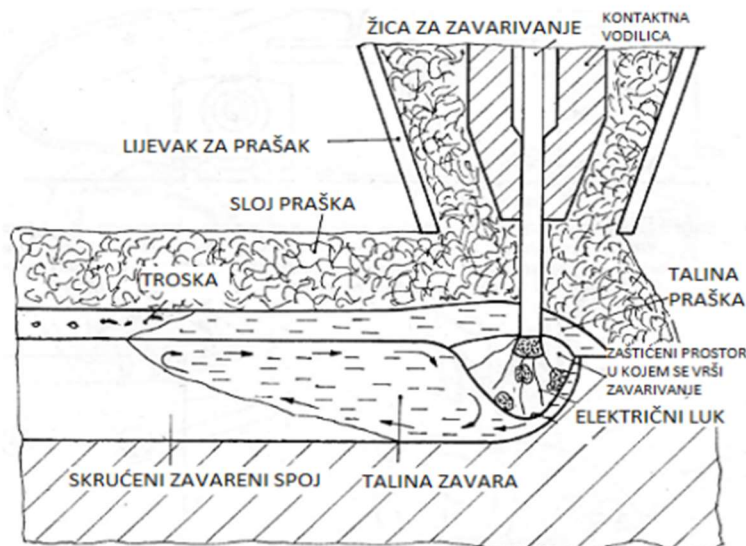


Slika 24. a) Shematski prikaz prijenosa metala, b) dijagram ovisnosti struje i napona o vremenu

[19]

#### 5.4. EPP

EPP je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom praška. Električni luk kod EPP postupka se uspostavlja između kontinuirano dodavane taljive elektrode koja je najčešće u obliku žice i radnog komada. Za vrijeme zavarivanja ovim postupkom nije potrebna zaštita za oči zbog prekrivenosti električnog luka zaštitnim praškom. Zavarivanje pod praškom uzrokuje sloj troske koji ostaje na površini metala zavara. Prašak ima ulogu zaštite rastaljene kupke zavara od atmosferskih plinova, oblikuje zavar, otežava naglo hlađenje zavara te pozitivno utječe na kemijski sastav metala zavara. Kemijski elementi iz praška vežu za sebe nečistoće iz metala zavara koje ostaju u troski. Nakon zavarivanja s površine zavarenog spoja uklanja se prašak i troska. EPP postupak se najčešće primjenjuje u mehaniziranoj varijanti. Postupak se primjenjuje u položenom položaju zato što prašak ne može omogućiti zaštitu u prisilnim položajima. Shematski prikaz EPP postupka zavarivanja prikazan je slikom 25. [2]



Slika 25. Shematski prikaz EPP postupka zavarivanja [20]

Kod EPP postupka zavarivanja primjenjuju se velike jakosti struje. Izvor struje može biti istosmjerni ili izmjenični. Zavarivanje primjenom istosmjerne struje vrši se s elektrodom spojenom na (+) pol, a navarivanje s elektrodom spojenom na (-) pol. Kod navarivanja EPP postupkom mogu se koristiti trake kao elektrode, korištenjem traka ostvaruje se značajno veći depozit u jedinici vremena. Statička karakteristika izvora za ovaj postupak ovisi o promjeru žice koji može iznositi od 2 do 6 mm. Kod žica s većim promjerom od 3 mm primjenjuje se strmo padajuća (CC), a kod žica s manjim promjerom od 3 mm primjenjuje se blago padajuća, tj. ravna (CV) statička karakteristika. [2, 14]

EPP postupak karakterizira visoka učinkovitost. Primjena ovog postupka smatra se ekonomičnom kod zavarivanja spojeva dužih od 0,5 m na limovima debljim od 10 mm. Postupak se primjenjuje u brodogradnji, u gradnji velikih spremnika, za čelične konstrukcije, za šavne cijevi većih promjera, za navarivanje dodatnih materijala od nehrđajućeg čelika na osnovni materijal od nelegiranog čelika i drugo. Materijali koji se zavaruju ovim postupkom su uglavnom nelegirani, niskolegirani i visokolegirani čelici. Primjena na ostalim materijalima trenutno nije proširena. [2]

## 5.5. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Postupci zavarivanja kod kojih se metal zagrijava i tali toplinom nastalom uslijed električnog otpora spadaju u grupu postupaka elektrotopornog zavarivanja. Kod ovih postupaka nema pojave

električnog luka. Podjela elektrootpornih postupaka zavarivanja dana je tablicom 5. Svaki vodič se prolaskom električne struje kroz njega zagrijava proporcionalno električnom otporu kojim se suprotstavlja prolasku struje. Toplina nastala prema tom principu omogućuje zavarivanje materijala u kontaktu uz primjenu sile pritiska, to jest mehaničke energije. [21]

Količina topline razvijene u vodiču određena je prema formuli Joule-ova zakona[21]:

$$Q = \int_0^t I^2(t)R(t)dt \quad (2)$$

gdje su:

$I$  – jakost struje zavarivanja, A

$R$  – električni otpor,  $\Omega$

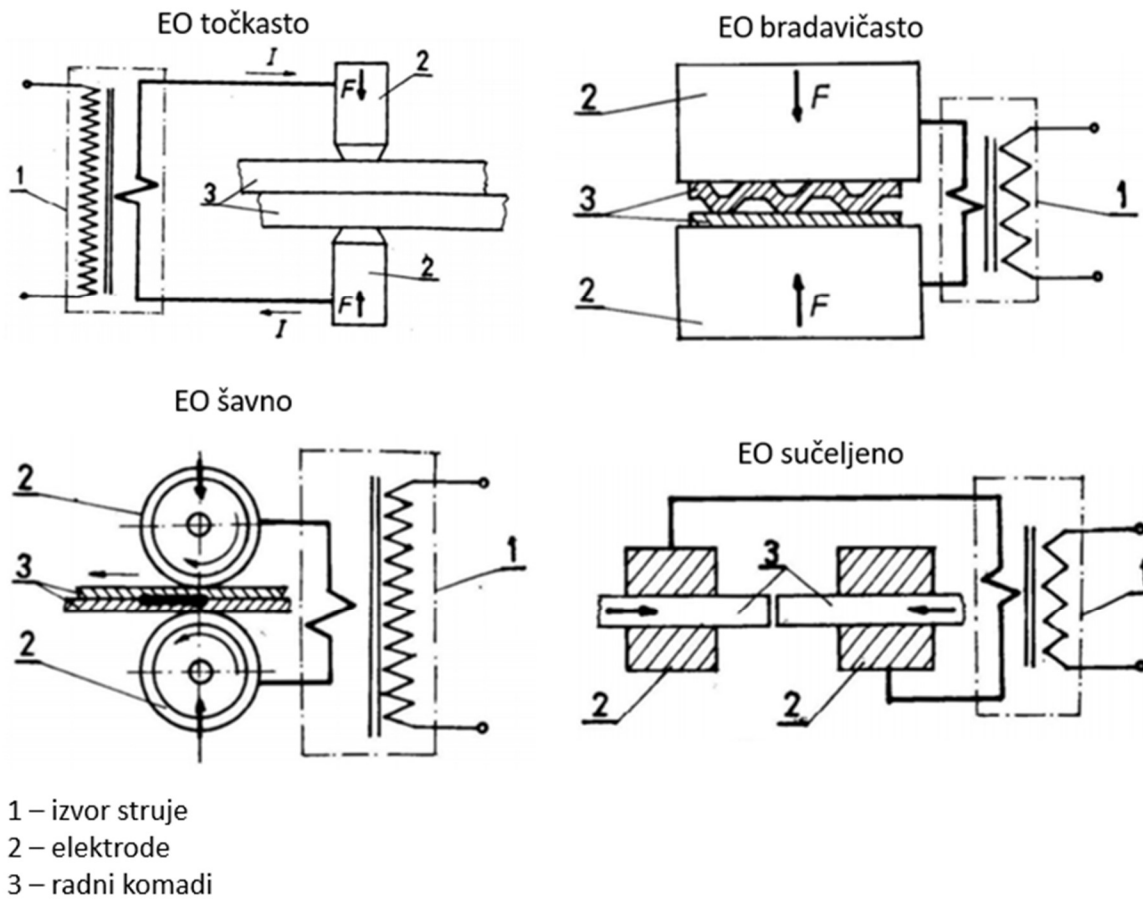
$t$  – vrijeme prolaska električne struje, s

Kod EO zavarivanja koriste se visoke vrijednosti jakosti struje od 100 do 300000 A. Zbog karakteristično niskog električnog otpora metala, napon je nizak iznosa od 0,5 do 25 V. Vrijeme prolaska električne struje je kratko, iznosi od 0,05 do nekoliko desetaka sekundi. [21]

Tablica 5. Podjela postupaka elektrootpornog zavarivanja [21]

Vrsta spoja	Postupak zavarivanja	Način izvođenja	Način zagrijavanja
Preklonni	Točkasto	Pomoću jednog para elektroda	Na principu električnog otpora
		Pomoću više pari elektroda	
		Pomoću kolutova	
	Šavno (kolutno)	S dva koluta S sjednim kolutom i „ramom“	
	Bradavičasto	Na stroju za bradavičasto zavarivanje	
Sučeljni	Sučeono zavarivanje čistim otporom	Na stroju za sučeono zavarivanje	Na principu električnog otpora
	Sučeono zavarivanje iskrenjem		Iskrenjem

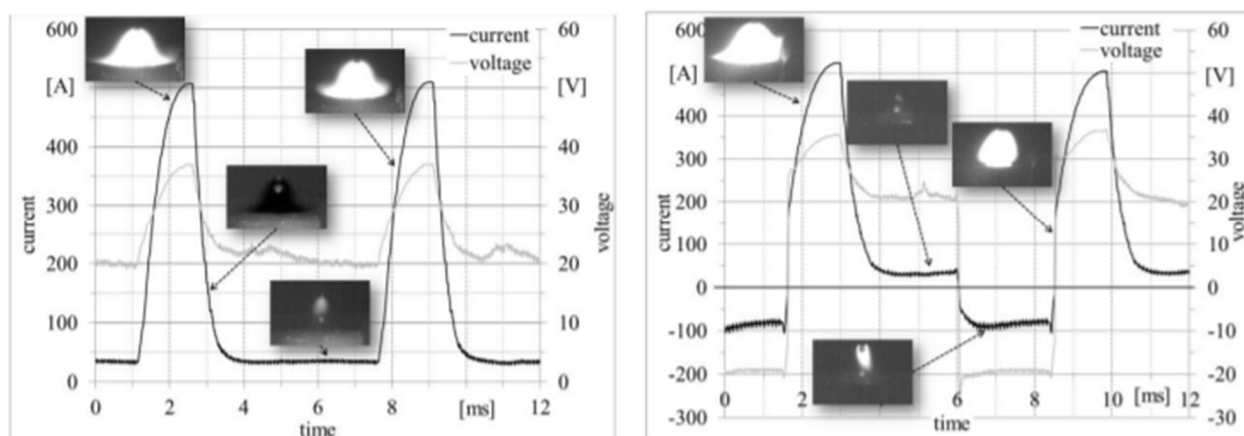
EO postupcima moguće je zavariti sve materijale. Svi EO postupci pronalaze primjenu u zavarivanju tankih limova. Za EO zavarivanje uglavnom se koriste izvori izmjenične struje, izvori istosmjerne struje rijetko se primjenjuju zbog kompliciranosti dobivanja visokih iznosa struja. Statička karakteristika EO postupka je strmo padajuća (CC). Slikom 26. dan je shematski prikaz elektrootpornih postupaka zavarivanja. [21]



Slika 26. Shematski prikaz elektrootpornih postupaka zavarivanja [21]

## 6. AC MIG

AC MIG postupak razvio se zbog potrebe izbjegavanja propaljivanja materijala i za premošćivanje zazora na tankim limovima. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja žica (elektroda) se uglavnom spaja na pozitivan (+) polaritet izvora struje. Negativan (-) polaritet prilikom EPP postupka daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Isti ishod postiže se i MIG/MAG postupkom ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi neravnomjerno s dosta štrcanja. Negativan polaritet se često primjenjuje kod praškom punjenih žica. Izmjenom polariteta, tj. balansom pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radnom komadu postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku. Zavarivanje izmjeničnom strujom pruža prednost u smislu otklanjanja puhanja luka izazvanog elektromagnetskim poljem. Međutim, treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG dosta složeni i kompleksni. [2, 3, 22] Slika 27. prikazuje grafove ovisnosti struje i napona o vremenu za DC (lijevo) i AC (desno) izvor kod impulsnog MIG zavarivanja.

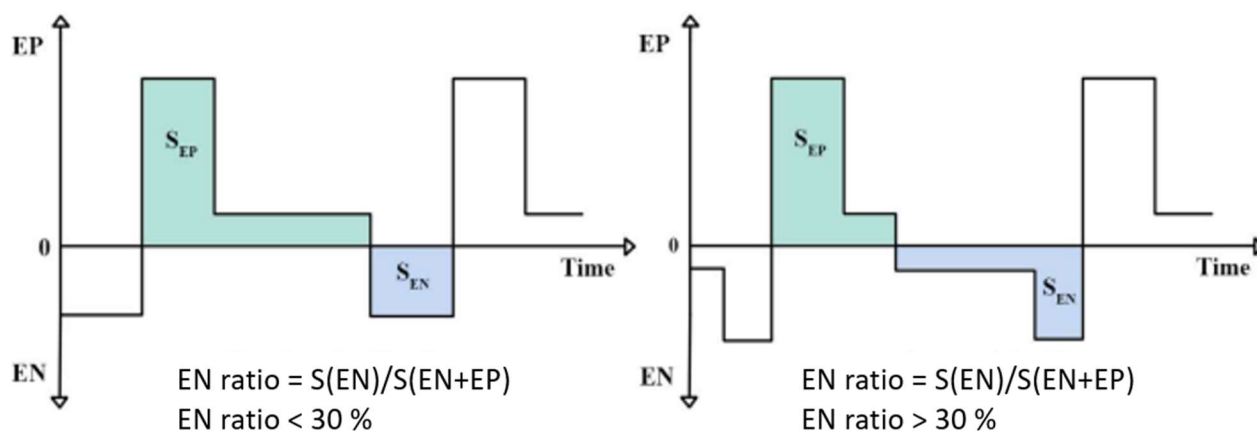


Slika 27. Grafovi za DC (lijevo) i AC (desno) izvor kod impulsnog MIG zavarivanja [3]

Budući da veličina kapi utječe na sposobnost AC MIG procesa za premošćivanje zazora, važno je razumjeti dinamiku stvaranja kapi u ovom procesu. Period kada je elektroda na negativnom polu naziva se područje negativne elektrode (EN), u tom području dolazi do veće brzine taljenja te bržeg rasta visećih kapljica. Nasuprot tome, period kada je elektroda na pozitivnom polu naziva se područje pozitivne elektrode (EP), zbog različite dinamike struje ovo područje podijeljeno je na područje niske pozitivne elektrode značajno za održavanje luka i područje visoke pozitivne



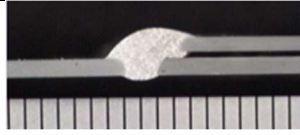
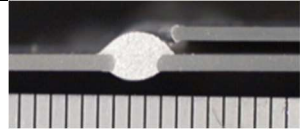
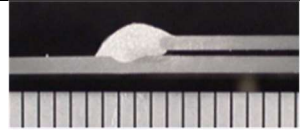
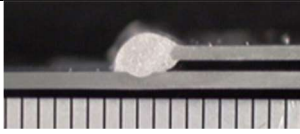
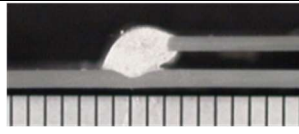
elektrode gdje dolazi do odvajanja kapljice. Ovisno o primjeni negativnog polariteta na žici mijenja se oblik penetracije kao i mogućnost premošćivanja zazora pri zavarivanju tankih limova. EN omjer (EN ratio) je definiran kao omjer površine EN i ukupne površine jednog ciklusa impulsa, prikazano grafom na slici 28. Korištenjem EN omjera većeg od 30 % EN područje impulsa podijeljeno je na EN osnovno područje koje služi za održavanje luka i EN vršno područje u kojem je povećana brzina taljenja žice. [22]



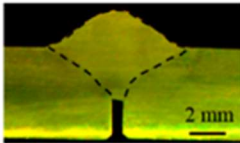
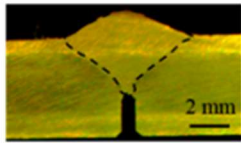
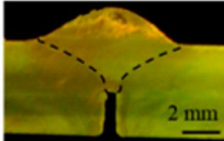
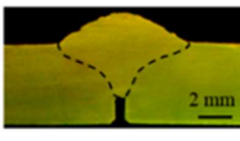
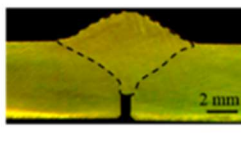
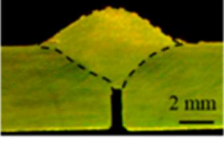
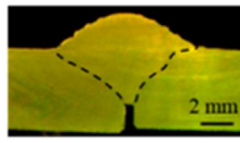
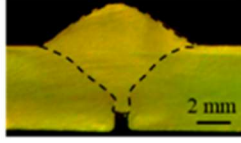
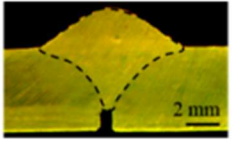

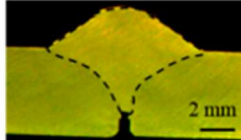
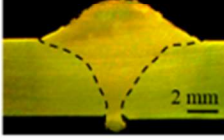
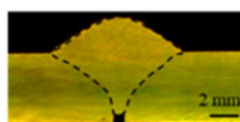
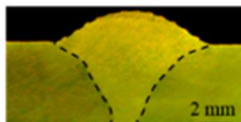
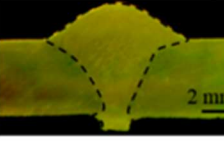
Slika 28. EN ratio [22]

Kod AC MIG postupka stabilnost luka osigurana je pozitivnim (EP) područjem impulsa elektrode. Problem propaljivanja je prevladan pružanjem niskog unosa topline u radni komad kod negativnog (EN) područja impulsa elektrode, što rezultira većim taloženjem materijala. Povećanjem EN omjera povećava se depozit materijala i smanjuje se penetracija. Zavarivanje s visokim EN omjerom rezultira zavarima s velikim nadvišenjem i plitkom penetracijom. Ove karakteristike AC MIG postupka čine ga prikladnim za zavarivanje tankih limova u slučaju povećanog razmaka između ploča, tj. za premošćivanje zazora. [23] Tablica 6. prikazuje rezultate zavarivanja MIG/MAG s impulsnim prijenosom metala i AC MIG postupka (EN ratio = 20 %).

Tablica 6. Rezultati zavarivanja MIG/MAG impulsno i AC MIG [24]

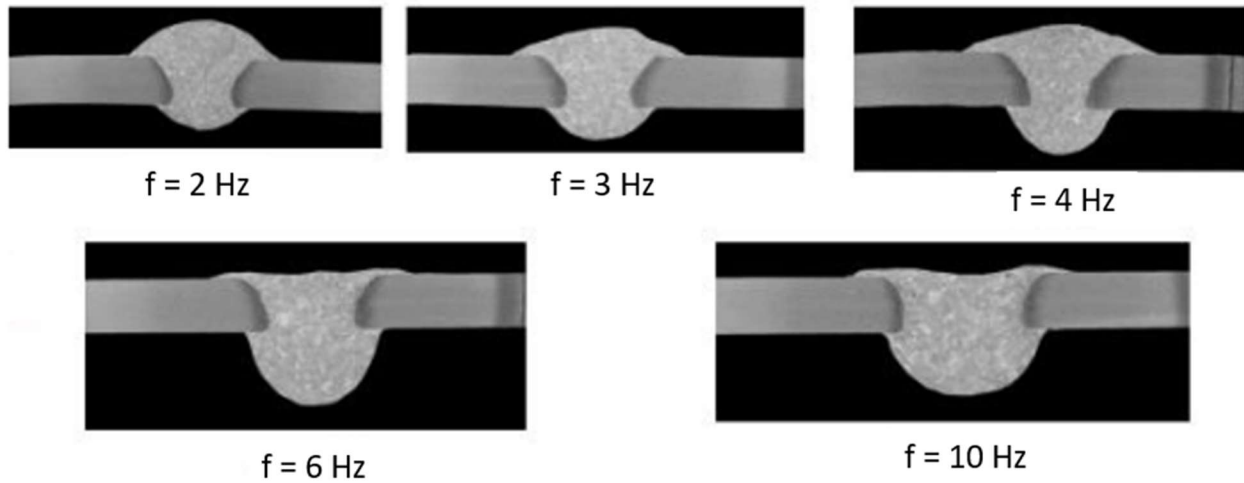
Osnovni materijal: AlMg, 1,5 mm + 1 mm		Žica: AlMg5, 1,2 mm	
Jakost struje: 60 A		Brzina zavarivanja: 90 cm/min	
Razmak	0,5 mm	1,0 mm	1,5 mm
DC impulsno			nemoguće
AC (EN ratio = 20 %)			

EN omjer utječe na geometriju zavara. Slika 29. prikazuje poprečni presjek zavara dobivenih korištenjem različiti jakosti struja zavarivanja i EN omjera. [25]

Prosječna struja zavarivanja, I	EN ratio = 0 %	EN ratio = 30 %	EN ratio = 50 %
150 A			
175 A			
200 A			
225 A			
250 A			

Slika 29. Geometrija zavara ovisno o jakosti struje zavarivanja i EN omjeru [25]

Frekvencija promjene polariteta utječe na unos topline i dubinu penetracije zavara. Zavarivanje s većom frekvencijom rezultira dubljom penetracijom i smanjenim nadvišenjem zavara. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara zavarenih AC valnim impulsom prikazan je slikom 30. [26]



Slika 30. Utjecaj frekvencije na geometriju zavara [26]

## 7. EKSPERIMENTALNI RAD

### 7.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio rada je proveden u laboratoriju za zavarivanje u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zavarivanje uzoraka se provodilo postupkom MIG/MAG uz dodavanje dodatnog materijala, žice. Brzina zavarivanja i protok plina prilikom zavarivanja svih uzoraka su bili konstantni. Prvi uzorak je zavaren korištenjem istosmjerne struje, a ostalih pet je zavareno korištenjem izmjenične struje s različito podešenim parametrima zavarivanja na svaki od pet uzoraka. Prvi uzorak je zamišljen kao reprezentativni, a za ostalih pet je potrebno utvrditi prednosti i nedostatke tehnike zavarivanja izmjeničnom strujom. Kao osnovni materijal korištene su ploče visokolegiriranog nehrđajućeg čelika 1.4301 (AISI 304) koje su nakon zavarivanja činile kutni spoj. Zaštitni plin korišten tijekom zavarivanja je mješavina argona i ugljikovog dioksida (97,5 %Ar + 2,5 %CO<sub>2</sub>). Nakon zavarivanja provedena su ispitivanja unosa topline, vizualna ispitivanja zavara nakon kojih su napravljeni makroizbrusci te je provedena makrostrukturna analiza na poprečnom presjeku zavara. Zatim je uslijedila analiza mikrostrukture. Konačno je na temelju dobivenih rezultata bilo potrebno zaključiti da li postoje prednosti zavarivanja tankih ploča izmjeničnom strujom u odnosu na istosmjernu struju.

### 7.2. Osnovni materijal

Eksperiment se provodi na nehrđajućem čeliku oznake 1.4301, češće označavan prema američkom standardu (AISI 304). To je austenitni Cr-Ni čelik dobre čvrstoće i odlične otpornosti na koroziju. Tablica 7. prikazuje kemijski sastav, a tablica 8. prikazuje mehanička svojstva čelika 1.4301.

Tablica 7. Kemijski sastav čelika 1.4301 (AISI 304) [27]

Element	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	N	
%	Min	-	-	-	8	-	-	17,5	-
	Max	0,07	1	2	10,5	0,045	0,015	19,5	0,10

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika 1.4301 (AISI 304) [27]

$R_m$ , min [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ , min [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ , min [%]	KU, min [J]	HB, max
520-720	210	35-40	85	215

U eksperimentalnom dijelu rada korišteno je 6 ploča osnovnog materijala, čije su dimenzije iznosile:

- duljina - 200 mm,
- širina - 100 mm,
- debljina - 4 mm.

Slika 31. prikazuje ploče od nehrđajućeg čelika 1.4301 korištene u eksperimentu.



Slika 31. Ploče od nehrđajućeg čelika 1.4301

### 7.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal u eksperimentu je korištena žica LINCOLN MIG-309LSi promjera 1,2 mm. Prema normi HRN EN ISO 14343:2009 taj dodatni materijal ima oznaku G 23 12 LSi, a sastoji se od komponenata prikazanih u tablici 9. [28]

Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala, žice G 23 12 LSi [28]

Oznaka materijala		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Nb	ostali
23 12 L Si	309LSi	0,03	0,65-1,2	1,0-2,5	0,03	0,02	22,0-25,0	11,0-14,0	0,5	-	0,5	-	-

Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su tablicom 10.

Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala, žice G 23 12 LSi [28]

$R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
320	510

Tipična primjena žice MIG-309LSi [29]:

- Za spajanje nehrđajućih čelika, srednje i nisko legiranih čelika
- Izuzetne performanse pri velikim brzinama dodavanja žice

Preporučeni zaštitni plinovi prilikom korištenja žice MIG-309LSi [29]:

- Za prijenos metala kratkim spojevima: 90 %He / 7,5 %Ar / 2,5 %CO<sub>2</sub>
- Za aksijalni prijenos raspršivanjem: 98 %Ar / 2 %O<sub>2</sub>

Žica MIG-309LSi je podobna za zavarivanje u svim položajima. [29]

Slika 32. prikazuje žicu korištenu kao dodatni materijal u eksperimentu.



Slika 32. Dodatni materijal, žica MIG-309LSi

#### 7.4. Zaštitni plin

Prilikom provođenja eksperimenta korištena je plinska mješavina M12 određena normom HRN EN ISO 14715. Prema normi M12 mješavina se sastoji od 0,5 do 5 %CO<sub>2</sub>, a ostatak je argon. U eksperimentu se koristi mješavina Inoxline C2 čiji je sastav 97,5 %Ar i 2,5 %CO<sub>2</sub>. Slika 33. prikazuje spremnik plinske mješavine korištene u eksperimentu Inoxline C2.



Slika 33. Spremnik plinske mješavine Inoxline C2

## 7.5. Oprema za zavarivanje

### 7.5.1. Uređaj za zavarivanje

Zavarivanje uzoraka provodi se korištenjem uređaja za zavarivanje „Welbee W400“ od proizvođača OTC Daihen, prikazanog na slici 34.



Slika 34. Uređaj za zavarivanje „Welbee W400“

Specifikacije izvora struje „Welbee W400“ prikazane su u tablici 11.



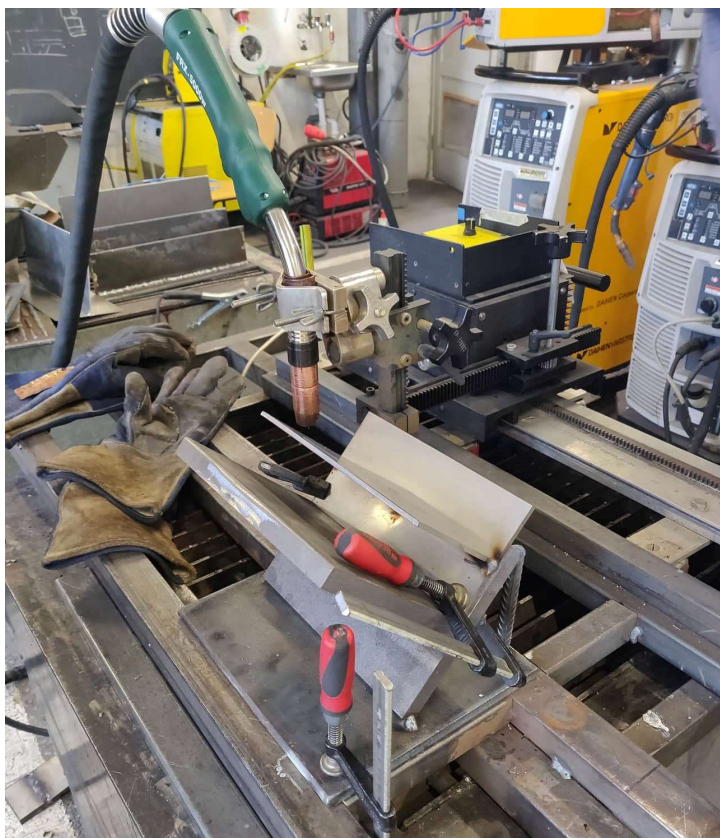
Tablica 11. Specifikacije uređaja „Welbee W400“ [30]

Model	WB-W400
Broj faza	Trofazni
Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Nazivni ulazni napon	400 V
Raspon ulaznog napona	400 V ± 15 %
Nazivna snaga	21,4 kVA, 17,0 kW
Nazivna ulazna struja	31 A
Nazivna izlazna struja	400 A / 350 A
Nazivni napon opterećenja	34 V / 31,5 V
Raspon nazivne izlazne struje	30 do 400 A
Raspon nazivnog izlaznog napona	12 do 35 V
Maksimalni napon praznog hoda	92 V
Nazivni radni ciklus	40 % / 100 %
Broj stanja zavarivanja	100
Raspon radne temperature	-10 do 40 °C
Radni raspon vlažnosti	do 50% na 40 °C, do 90% na 20 °C
Raspon temperature skladištenja	-20 do 55 °C
Raspon vlage pri skladištenju	do 50% na 40 °C, do 90% na 20 °C
Vanjske dimenzije	395 mm × 710 mm × 762 mm
Masa	86 kg
Statička karakteristika	Naponska (CV)

### 7.5.2. Automat za zavarivanje

Eksperiment se provodi automatskim zavarivanjem pomoću automata „BUG-O systems“. Automat se koristi zbog preciznosti i konstantnosti zavarivanja sa svrhom uklanjanja greške zavarivača. To je jednostavan uređaj na koji se pričvrsti pištolj za zavarivanje. Na njemu je moguće podesiti brzinu zavarivanja te on jednolikim pravocrtnim gibanjem, umjesto zavarivača, vrši

zavarivanje zadanom brzinom. Slika 35. prikazuje automat korišten za izvođenje zavarivanja ovog eksperimenta.



Slika 35. Automat za zavarivanje „BUG-O systems“

## 7.6. Zavarivanje

### 7.6.1. Priprema uzoraka za zavarivanje

Priprema uzoraka počinje čišćenjem površina ploča od nehrđajućeg čelika 1.4301 pomoću etilnog alkohola s ciljem uklanjanja nečistoća s površine. Prije samog zavarivanja napravljeni su pripoji na pločama kako bi se omogućilo zavarivanje kutnog spoja u položaju zavarivanja PA. Nakon što su napravljeni pripoji na svim uzorcima započinje priprema zavarivačke stanice. Uzorci s napravljenim pripojima se stežu u željeni položaj, zatim se podese parametri zavarivanja. Slika 36. prikazuje pripremu uzoraka za zavarivanje.

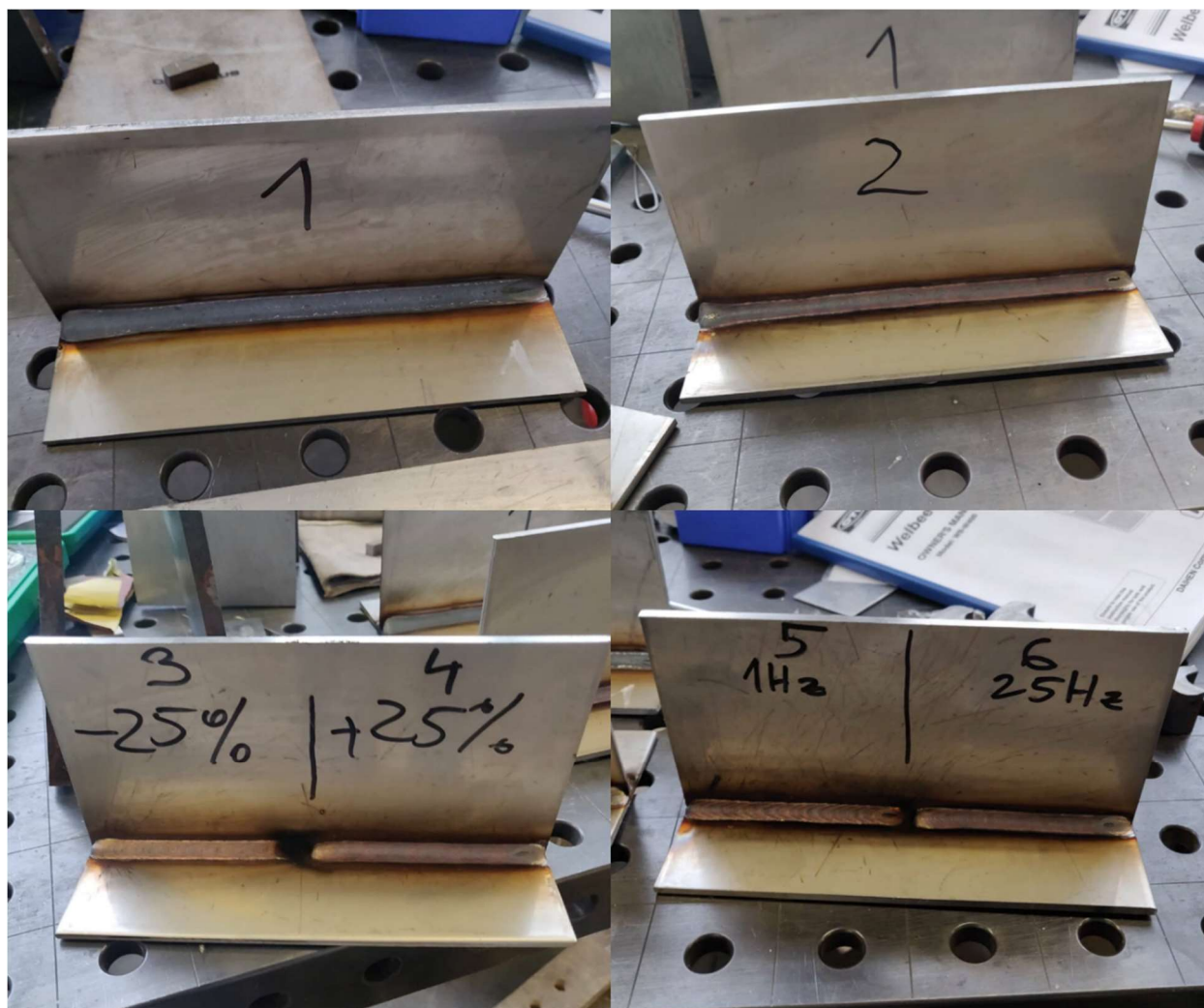


Slika 36. Priprema uzoraka za zavarivanje

### 7.6.2. Zavarivanje

Prije samog MAG zavarivanja uzoraka napravljena je preproba na ploči od istog materijala 1.4301. Preprobom su utvrđeni parametri zavarivanja. U eksperimentu je zavareno šest uzoraka. Prvi uzorak je zavaren istosmjernom strujom (DC) te je predstavljao referentni uzorak. Ostalih pet uzoraka je zavareno izmjeničnom strujom (AC) s različitim parametrima zavarivanja. Ukupno je u eksperimentu korišteno osam ploča osnovnog materijala od kojih je zavareno četiri kutna spoja. Treći i četvrti kutni spoj sadrže svaki po dva različita zavara, a prvi i drugi po jedan što ukupno čini šest uzorka.

Svi uzorci su zavareni impulsnim načinom prijenosa. Uzorak jedan je zavaren istosmjernom strujom (DC) s elektrodom spojenom na plus (+) pol. Uzorak dva je zavaren izmjeničnom strujom (AC), EN omjer je iznosio 50 %. Uzorak tri i četiri su zavareni izmjeničnom strujom (AC) s promjenom balansa (EN ratio) na uređaju za zavarivanje. EN omjer za uzorak tri iznosio je 25 %, a za uzorak četiri 75 %. Uzorak pet i šest su zavareni izmjeničnom strujom (AC) primjenom wave pulse načina zavarivanja. Wave pulse je metoda kod koje se primjenjuju impulsi dvostruke razine snage prilikom zavarivanja. Frekvencija je tada obrnuto proporcionalna periodu koji obuhvaća impulse niže i više razine snage. Za peti uzorak frekvencija je iznosila 1 Hz, a za šesti 25 Hz. Slika 37. prikazuje uzorke zavarene u eksperimentu.



Slika 37. Zavareni uzorci u eksperimentu

Ispitni uzorci u eksperimentu zavarivani su MAG tehnologijom zavarivanja. Zavarivalo se u položaju PA korištenjem neutralne tehnike zavarivanja, pri čemu je pištolj bio postavljen pod kutom od  $0^\circ$ , prikazano slikom 38. Svaki od uzoraka je zavaren primjenom zaštitnog plina Inoxline C2 ( $97,5\% \text{Ar} + 2,5\% \text{CO}_2$ ) čiji je protok bio konstantnog iznosa 18 l/min za svaki uzorak. Brzina zavarivanja je također bila konstantnog iznosa za svaki uzorak 29 cm/min. U tablici 12. su prikazani parametri zavarivanja za svaki od šest ispitnih uzoraka iz eksperimenta.



Slika 38. Položaj zavarivanja PA

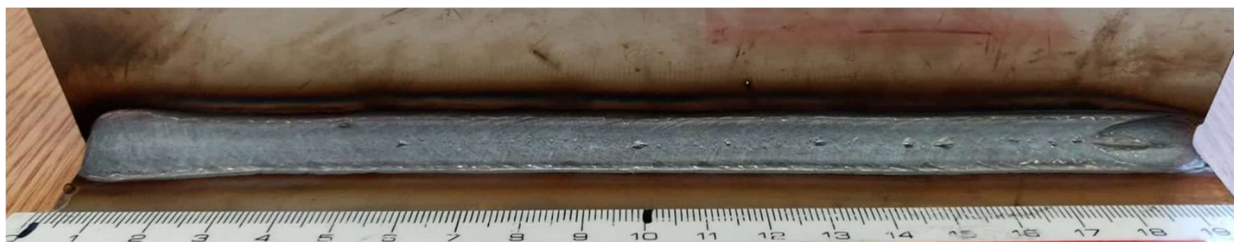
Uzorci u eksperimentu:

1. istosmjerna struja (DC), impulsno
2. izmjenična struja (AC), EN ratio = 50 %
3. izmjenična struja (AC) s promjenom balansa, EN ratio = 25 %
4. izmjenična struja (AC) s promjenom balansa, EN ratio = 75 %
5. izmjenična struja (AC) wave pulse,  $f = 1 \text{ Hz}$ , EN ratio = 50 %
6. izmjenična struja (AC) wave pulse,  $f = 25 \text{ Hz}$ , EN ratio = 50 %

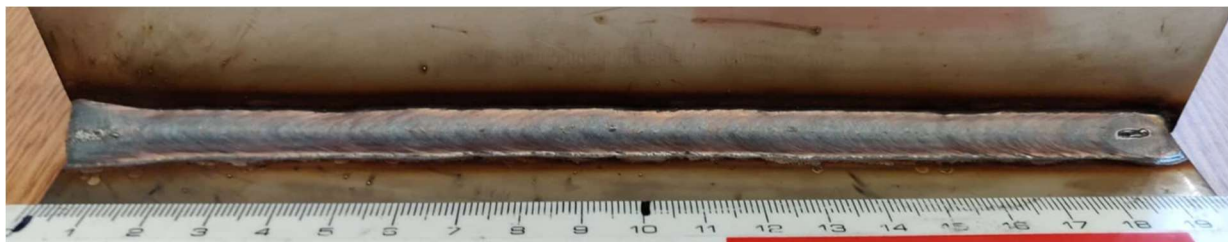
Tablica 12. Parametri zavarivanja

	1	2	3	4	5	6
Način prijenosa	DC impulsno	AC	AC	AC	AC, wave pulse ( $f = 1 \text{ Hz}$ )	AC, wave pulse ( $f = 25 \text{ Hz}$ )
EN ratio [%]	0	50	25	75	50	50
Postavljena jakost struje [A]	160	116	116	116	116	116
Očitana jakost struje [A]	182	118	122	120	124	124
Postavljeni napon [V]	23,9	20,8	20,9	20,8	20,8	20,8
Očitani napon [V]	22,7	21,3	21,5	21,2	21,5	22,2
Brzina zavarivanja [cm/min]	29					
Zaštitni plin	Inoxline C2 (97,5 % Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub> )					
Protok plina [l/min]	18					
Promjer žice [mm]	1,2					
Dodatni materijal	MIG-309LSi					
Brzina dovoda žice [m/min]	5,8					
Slobodni kraj žice [mm]	17					

Korištenjem parametara navedenih u tablici 12. zavareni su ispitni uzorci. Izgledi zavara prikazani su na slikama 39. - 42.



Slika 39. Ispitni uzorak 1



Slika 40. Ispitni uzorak 2



Slika 41. Ispitni uzorci 3 (lijevo) i 4 (desno)



Slika 42. Ispitni uzorci 5 (lijevo) i 6 (desno)

## 7.7. Izrada makroizbrusaka

### 7.7.1. Izrada makroizbrusaka za makroanalizu

Nakon provedenog zavarivanja potrebno je napraviti makroizbruske. Najprije je bilo potrebno izrezati uzorke kako bi se dobio poprečni presjek zavara. Iz poprečnog presjeka zavara nakon provedenog brušenja, poliranja i kemijskog nagrizanja dobije se makroizbrusak iz kojeg je moguće odrediti geometriju zavara. Uzorci su prerezani tračnom pilom „BS 350 GH“ koja je prikazana na slici 43.

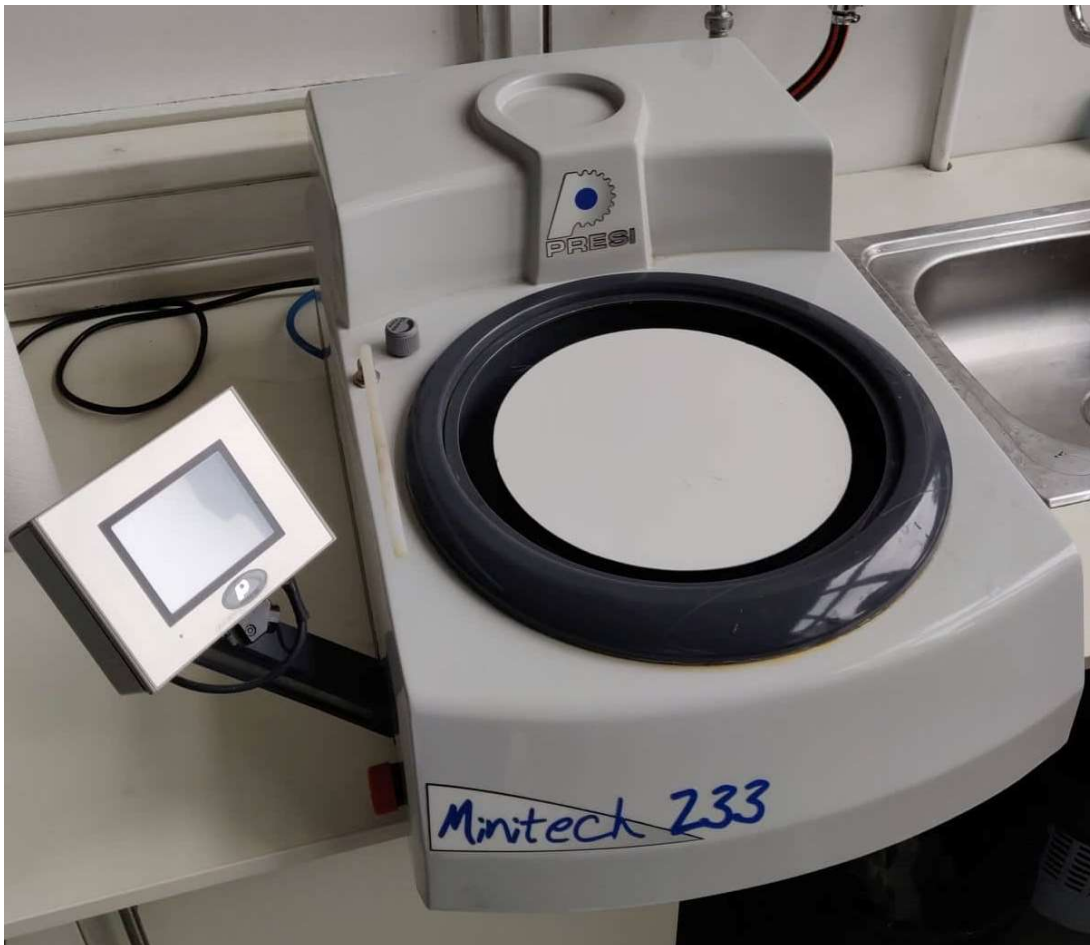


Slika 43. Tračna pila „BS 350 GH“

Za Ručno brušenje prerezanih uzoraka korištena su tri brusna papira različitih granulacija: P80, P150, P320. Uzorci se prvo bruse na papiru najveće granulacije P80 koji otklanja najviše materijala, ali ostavlja površinu pregrubom. Kako bi se uzorak pripremio za strojno brušenje potrebno ga je dalje brusiti finijim papirom to jest papirom manje granulacije P150 i kasnije papirom najmanje granulacije u ovom slučaju P320.

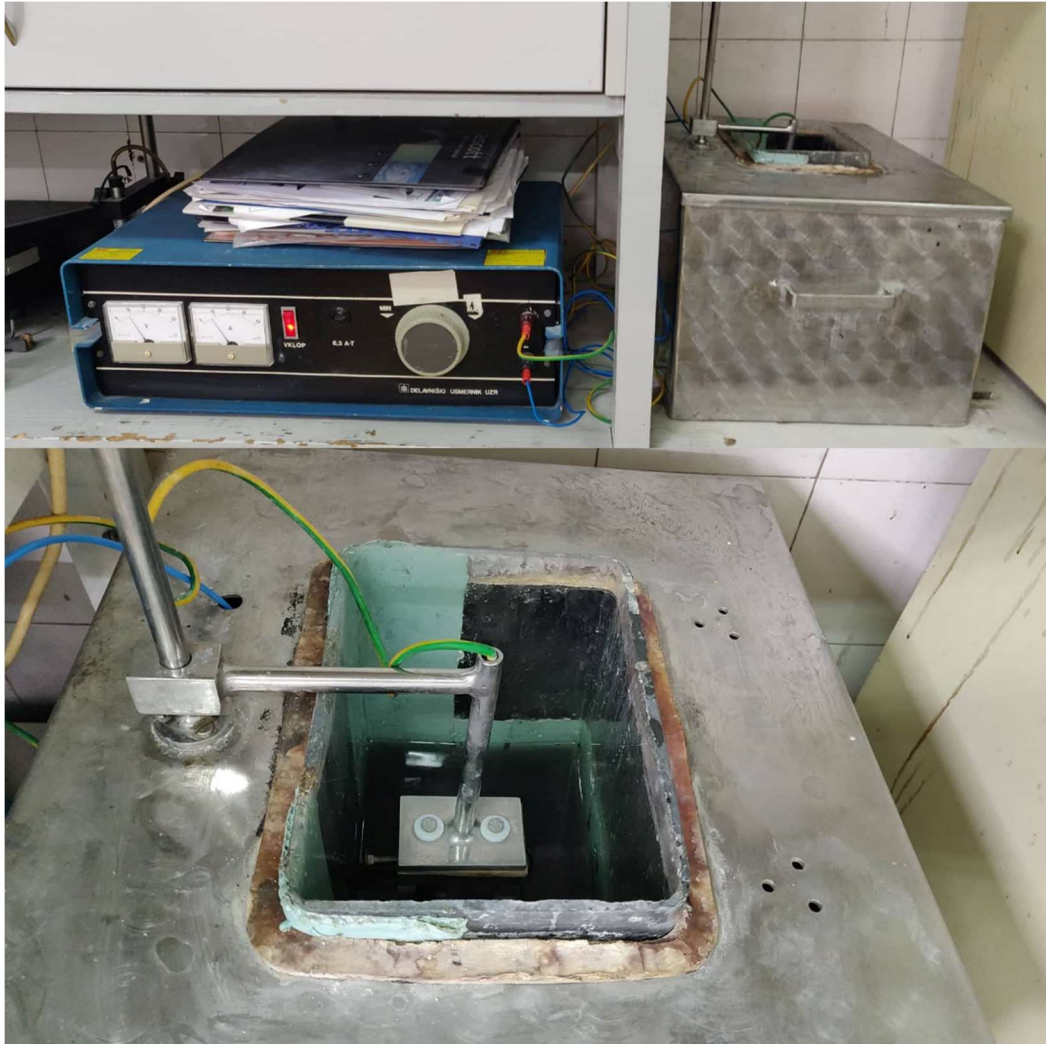
Nakon ručnog brušenja papirom P320 uzorci su spremni za finije brušenje na uređaju „Minitech 233“, koji je prikazan na slici 44. Brušenje se odvijalo uz vodeno hlađenje koje sprječava zagrijavanje uzoraka te ujedno odnosi odvojene čestice. Brzina okretaja ploče prilikom brušenja iznosila je 300 o/min. Brusni papiri postavljaju se na ploču uređaja te se mijenjaju otprilike svakih dvije minute. Granulacije brusnih papira bile su iznosa 320, 600, 1000, 2000 i 4000. Ukupno vrijeme trajanja brušenja iznosi otprilike 10 min po uzorku. Nakon tog vremena dobije se glatka i sjajna površina uzorka.





Slika 44. Uređaj za brušenje „Minitech 233“

Nakon brušenja uzorke je bilo potrebno nagristi kako bi na njihovoj površini bila vidljiva jasna razlika između metala zavara i osnovnog materijala. U konačnosti provedeno je elektrokemijsko nagrivanje površine poprečnog presjeka ispitnih uzoraka. Nagrivanje se odvijalo u 10 % oksalnoj kiselini ( $C_2H_2O_4$ ). Stanica za elektrokemijsko nagrivanje se sastoji od izvora struje i kućišta koje sadrži kiselinu. Sam postupak nagrivanja počinje učvršćivanjem uzorka i njegovim uranjanjem u kućište s kiselinom. Nakon čega kroz uzorak počinje teći struja čime započinje elektrokemijsko nagrivanje. Slika 45. prikazuje postupak elektrokemijskog nagrivanja uzoraka.



Slika 45. Elektrokemijsko nagrivanje uzoraka

Prosječne vrijednosti parametara nagrivanja za pojedini uzorak iznosile su:

- Napon,  $U = 8 \text{ V}$ ,
- Jakost struje,  $I = 6 \text{ A}$ ,
- Vrijeme nagrivanja,  $t = 40 \text{ s}$ .

Nakon elektrokemijskog nagrivanja jasnije su vidljive granice između metala zavara i osnovnog materijala, odnosno jednostavnije je razlučiti metal zavara od osnovnog materijala. Slika 46. prikazuje ispitni uzorak neposredno nakon postupka elektrokemijskog nagrivanja.

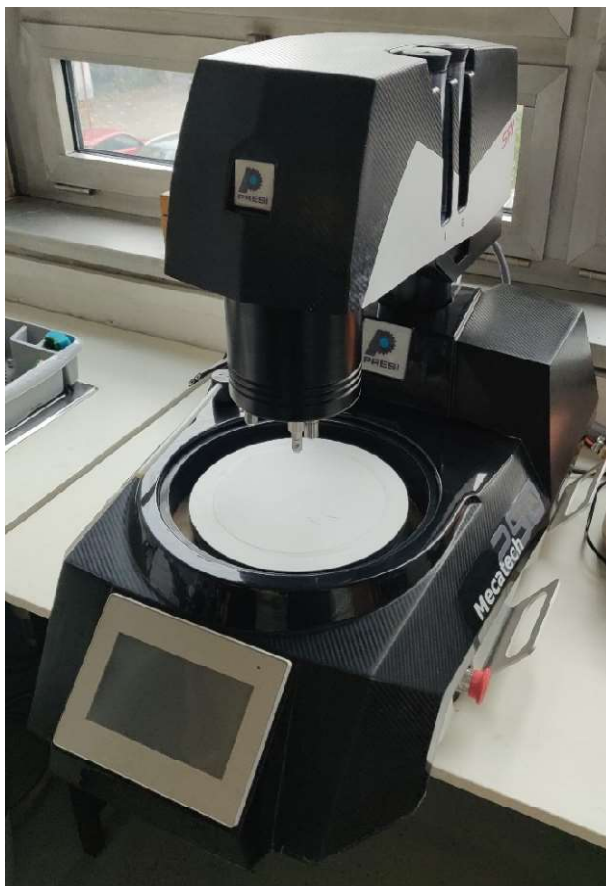


Slika 46. Uzorak nakon elektrokemijskog nagrivanja

### **7.7.2. Izrada makroizbrusaka za mikroanalizu**

Kako bi se napravila mikroanaliza potrebna je drugačija priprema makroizbrusaka. Potrebno je poliranje uzoraka i kraće vrijeme nagrivanja. Prije procesa poliranja uzorci su brušeni na uređaju „Minitech 233“ prikazanog na slici 44. Parametri brušenja su bili identični kao i kod pripreme za makrostrukturu. Brušenje se odvijalo uz vodeno hlađenje, brzina okretaja ploče iznosila je 300 o/min, korištene su granulacije 320, 600, 1000, 2000, 4000.

Nakon procesa brušenja uslijedilo je poliranje uzoraka. Uređaj za poliranje korišten u eksperimentu „Mecatech 250“ prikazan je slikom 47. Za poliranje uzoraka na okretnu ploču postavlja se tkanina, na koju se dodaje dijamantna pasta koja u sebi sadrži abrazive. Kao rashladno sredstvo koristi se lubrikant umjesto vode. Brzina okretaja ploče iznosila je 150 o/min. U prvom koraku poliranja korištena je dijamantna pasta s veličinom abraziva od 3  $\mu\text{m}$ , a u drugom koraku dijamantna pasta s veličinom abraziva od 0,03  $\mu\text{m}$ .



Slika 47. Uređaj za poliranje „Mecatech 250“

Nakon poliranja provodi se kemijsko nagrivanje. Kod pripreme površine za analizu mikrostrukture potrebno je kraće vrijeme elektrokemijskog nagrivanja u 10 % oksalnoj kiselini. Proces nagrivanja identičan je kao i kod pripreme za makrostrukturu. Postupak elektrokemijskog nagrivanja uzoraka prikazan je slikom 45.

Prosječne vrijednosti parametara nagrivanja za pojedini uzorak iznosile su:

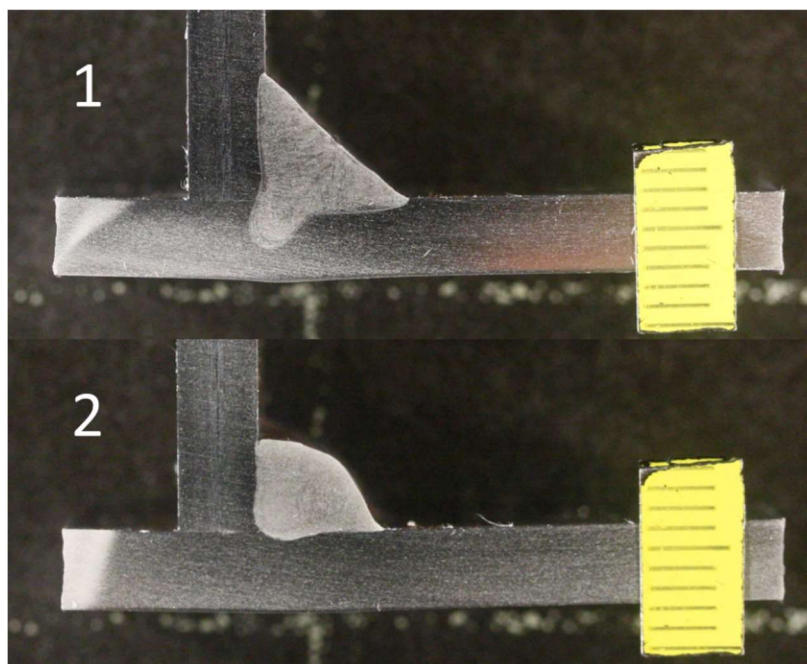
- Napon,  $U = 8 \text{ V}$ ,
- Jakost struje,  $I = 5 \text{ A}$ ,
- Vrijeme nagrivanja,  $t = 15 \text{ s}$ .

Vrijeme nagrivanja za mikroanalizu iznosilo je 15 s. Kod pripreme za makroanalizu od nagrivanja se, na površini uzorka, očekuje jasna razlučivost između metala zavara i osnovnog materijala. Za mikroanalizu je potrebna razlučivost susjednih zrna u mikrostrukтури. Zbog toga je potrebna finija priprema površine poliranjem i kraće vrijeme nagrivanja.

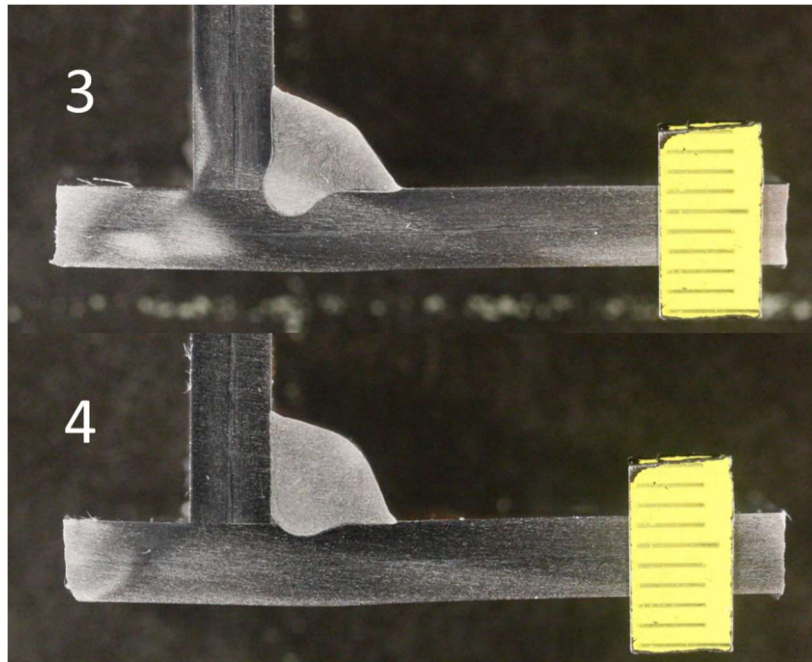
## 7.8. Ispitivanje i analiza

### 7.8.1. Vizualna kontrola i analiza makroizbrusaka

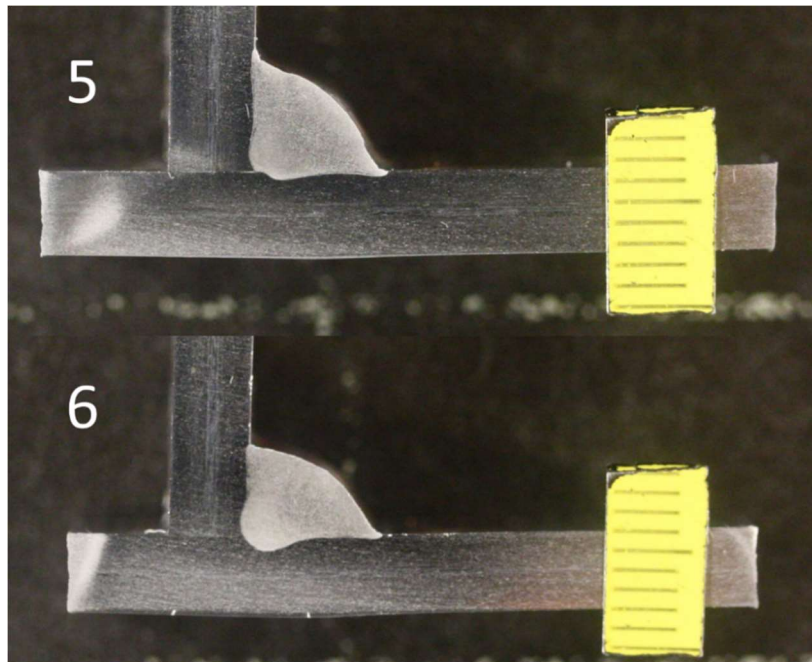
Na površini lica zavara i ZUT-a kod svih uzoraka, osim na površini metala zavara uzorka 1, vidljivi su oksidi (slike 39. - 42.). Okside je potrebno ukloniti sa svih površina na kojima su prisutni. Poprečni presjeci makroizbrusaka prikazani su slikama 48. - 50. Iz profila zavara uzorka vidljivo je da su zavari 1, 4 i 5 izvedeni simetrično, a kod uzoraka 2, 3 i 6 je zavar položen više prema donjem limu, posebice zavar na uzorku 6. Na svim profilima zavara nisu prisutne greške: pukotine, poroznost, ugorine, čvrsti uključci. Kod uzoraka 2, 4 i 5 nije došlo do provara te je prisutna greška naljepljivanja, posebice kod zavara na uzorku 4 na vertikalno postavljenom limu. Oblik zavara uzorka 1 je dobar, nije prisutno ispupčenje i provar je dobar. Kod ostalih uzoraka prisutno je ispupčenje zavara, najviše izraženo kod uzoraka 2 i 4. Provar kod uzoraka 3 i 6 je zadovoljavajući, a kod uzoraka 2, 4 i 5 nije došlo do penetracije na spoju ploča. Na svim poprečnim presjecima makroizbrusaka ZUT nije vidljiv golim okom. Očekivano je najdublja penetracija postignuta na uzorku 1 zavarenom s istosmjernom strujom i većom jakosti struje. Međutim, oblik penetracije uzorka 1 nije fino zaobljen kao kod uzoraka 3 i 6. Deformacije oblika na svim uzorcima su minimalne. Zavari na svim uzorcima su zadovoljavajući.



Slika 48. Geometrija zavara uzorka 1 i 2



Slika 49. Geometrija zavora uzoraka 3 i 4



Slika 50. Geometrija zavora uzoraka 5 i 6

### 7.8.2. Unos topline

Unos topline se definira kao dio energije električnog luka koji se utroši prilikom zavarivanja radnog komada.

Unos topline u radni komad računa se prema formuli [31]:

$$Q = \frac{U \times I \times k \times 60}{v_z \times 1000} \quad (3)$$

Gdje je:

$Q$  – unesena topline, kJ/cm

$U$  – napon zavarivanja, V

$I$  – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min

$k$  – koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011-1,  $k = 0,8$  za MIG/MAG postupak)

Tablica 13. Iznosi unosa topline

Uzorak	Unos topline [kJ/cm]
1	6,838
2	4,160
3	4,342
4	4,211
5	4,413
6	4,556

Unos topline za uzorak 1 je najveći, zbog veće struje zavarivanja u odnosu na ostale uzorke. Unos topline za ostale uzorke je podjednakog iznosa. Unos topline za uzorak 3 je veći nego za uzorak 4, zbog manjeg iznosa EN omjera za uzorak 3. Unos topline za uzorak 6 je veći nego za uzorak 5, zbog veće frekvencije zavarivanja wave pulse metodom.

Zavarivanje izmjeničnom strujom, u odnosu na istosmjernu, rezultira manjim unosom topline u materijal te u isto vrijeme osigurava podjednaku količinu depozita što je u skladu s literaturom [3]. Primjena izmjenične struje dokazala je da unos topline nije jedini faktor koji utječe na količinu depozita. Zavarivanje s manjim unosom topline smanjuje rizik od toplih pukotina koje se mogu pojaviti prilikom zavarivanja visokolegiranih austenitnih čelika.

### 7.8.3. Analiza geometrije zavara

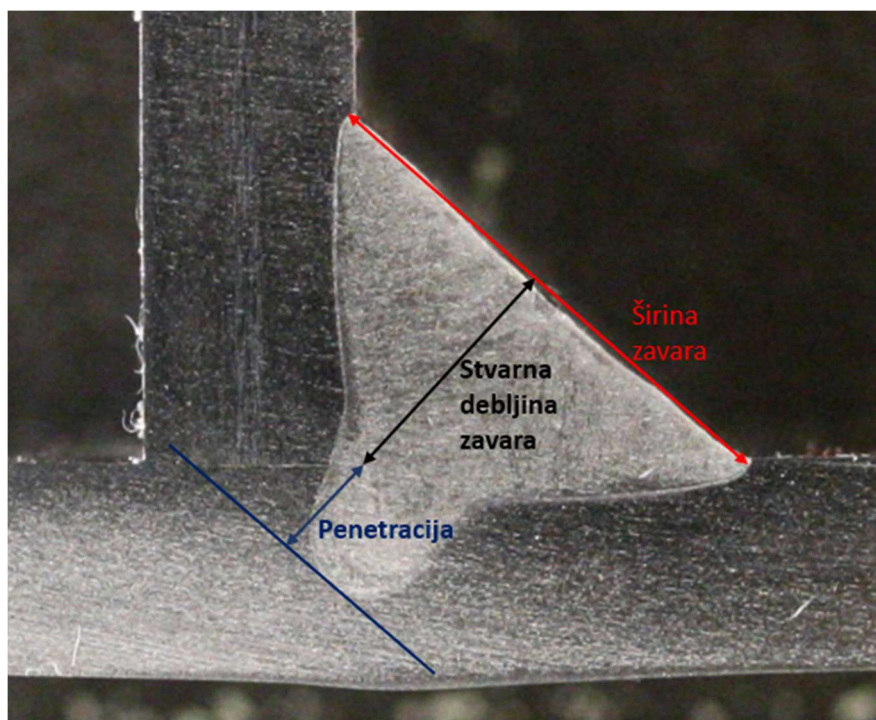
Makroanaliza podrazumijeva analizu geometrije poprečnog presjeka zavara. Fotografije poprečnog presjeka uzoraka napravljene su na radnoj stanici s osvjetljenjem i fotoaparatom prikazano na slici 51.



Slika 51. Radna stanica s osvjetljenjem i fotoaparatom



Promatrane geometrijske značajke su stvarna debljina zavora, penetracija i širina zavora. Slika 52. prikazuje kotiranu stvarnu debljinu zavora, penetraciju i širinu zavora na uzorku 1.

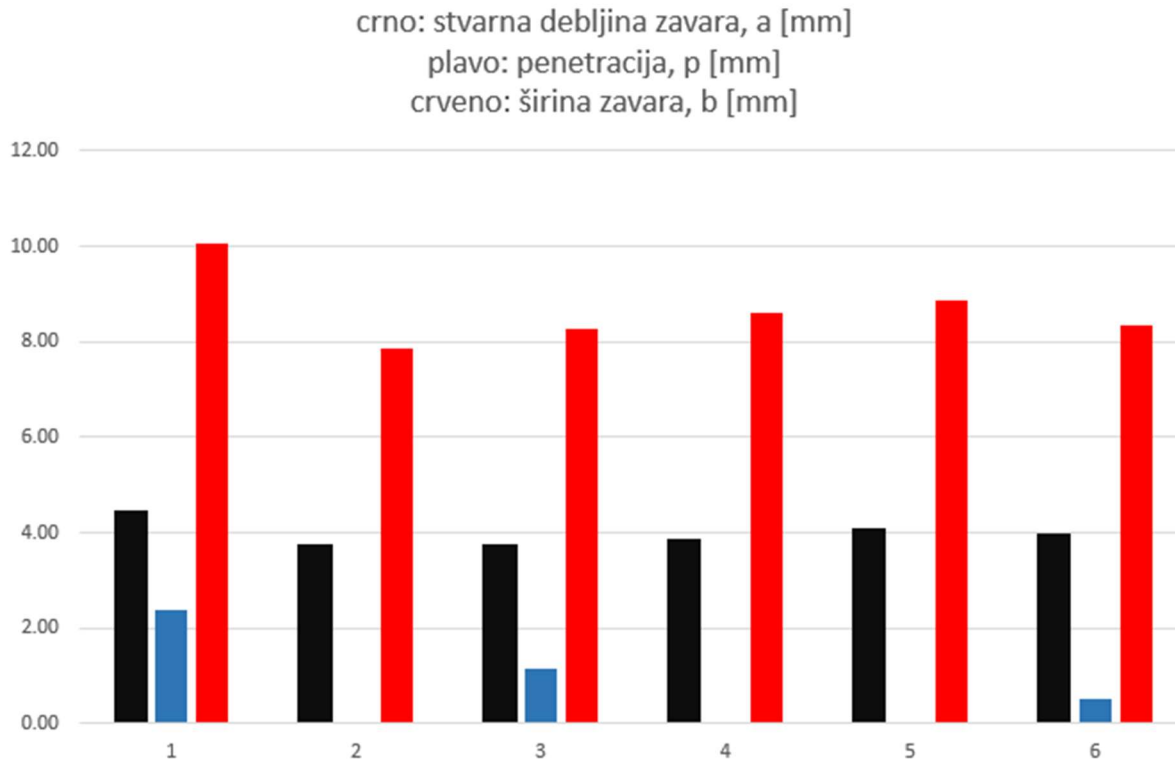


Slika 52. Prikaz kotiranih veličina: stvarne debljine zavora, penetracije i širine zavora

Iznosi veličina stvarne debljine zavora, penetracije i širine zavora za svaki uzorak dani su u tablici 14., te veličine su izmjerene pomoću programa ImageJ (na slikama 48. – 50.). Slika 53. prikazuje grafički prikaz geometrijskih značajki zavora.

Tablica 14. Geometrija zavora zavarenih uzoraka

Uzorak	Stvarna debljina zavora, a [mm]	Penetracija, p [mm]	Širina zavora, b [mm]
1	4,453	2,378	10,063
2	3,745	0	7,872
3	3,730	1,135	8,266
4	3,870	0	8,597
5	4,087	0	8,873
6	3,963	0,513	8,345



Slika 53. Grafički prikaz geometrijskih značajki zavora

Sve geometrijske značajke uzorka 1 očekivano su većeg iznosa nego kod ostalih uzoraka, zbog veće struje zavarivanja. Kod ostalih uzoraka stvarna debljina zavora i širina zavora su podjednake iznosa, zbog istih iznosa struja zavarivanja. Nije došlo do penetracije kod uzoraka 2, 4 i 5. Kod uzorka 3 primijenjen je EN omjera od 25 % kod kojeg je zbog dužeg perioda elektrode spojene na plus (+) pol prisutna dobra penetracija. Kod uzorka 6 prisutna je penetracija zbog veće frekvencije zavarivanja wave pulse metodom.

S porastom EN omjera smanjuje se penetracija što je u skladu s literaturom [25]. Primjena izmjenične struje ostavlja nadvišenje zavora, što je pozitivno za slučaj premošćivanja zavora. Veća je mogućnost premošćivanja zavora primjenom izmjenične struje u odnosu na istosmjernu što je u skladu s literaturom [24].

#### 7.8.4. Mikroanaliza

Mikroanaliza podrazumijeva analizu vrste i veličine faza u strukturi materijala. Fotografije mikrostrukture napravljene su pomoću svjetlosnog mikroskopa „Olympus GX51“ prikazanog na slici 54.



Slika 54. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX51“

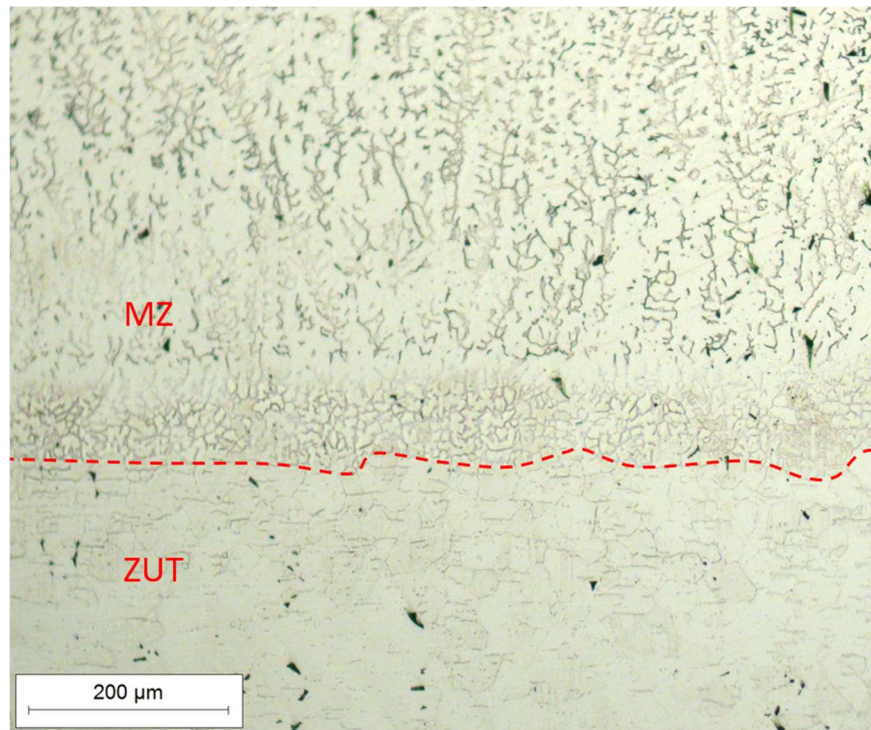
Kao osnovni materijal svih uzoraka u eksperimentu korištene su ploče od austenitnog čelika 1.4301 (AISI 304). Mikrostruktura osnovnog materijala uzorka 3 prikazana je slikom 55. Sve fotografije mikrostrukture su napravljene s povećanjem od 100x.



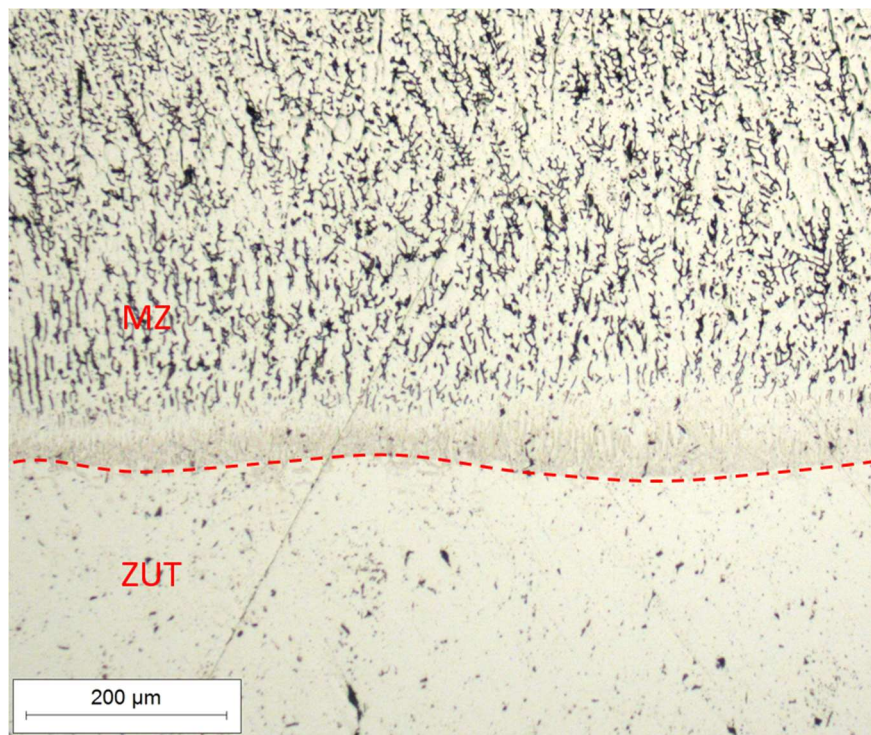
Slika 55. Mikrostruktura osnovnog materijala 1.4301 (AISI 304)

U mikrostrukturi osnovnog materijala uz fazu austenit (bijela zrna) prisutan je određeni udio faze  $\delta$ -ferita (crne linije) te karbidi (crne točkice). Poveći crni oblici na slici nisu karbidi, već greške koje su se pojavile prilikom pripreme uzorka.

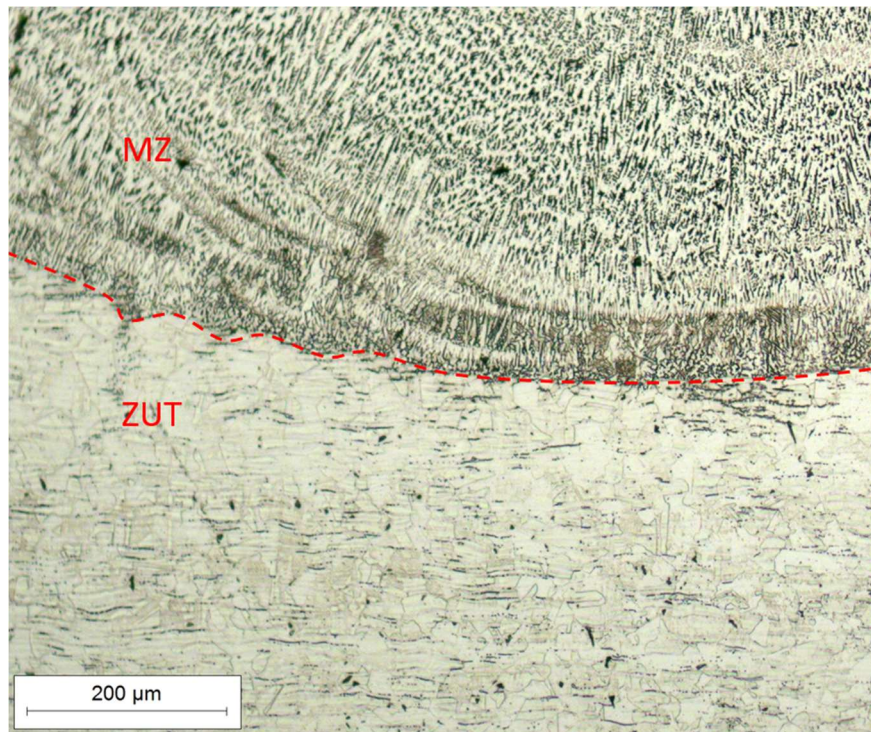
Slike 56. - 61. prikazuju mikrostrukture uzoraka oko linije staljivanja. Iznad linije staljivanja nalazi se metal zavara, a ispod ZUT i osnovni materijal. Na slikama je označeno područje linije staljivanja (isprekidana linija), metal zavara (MZ) i zona utjecaja topline (ZUT).



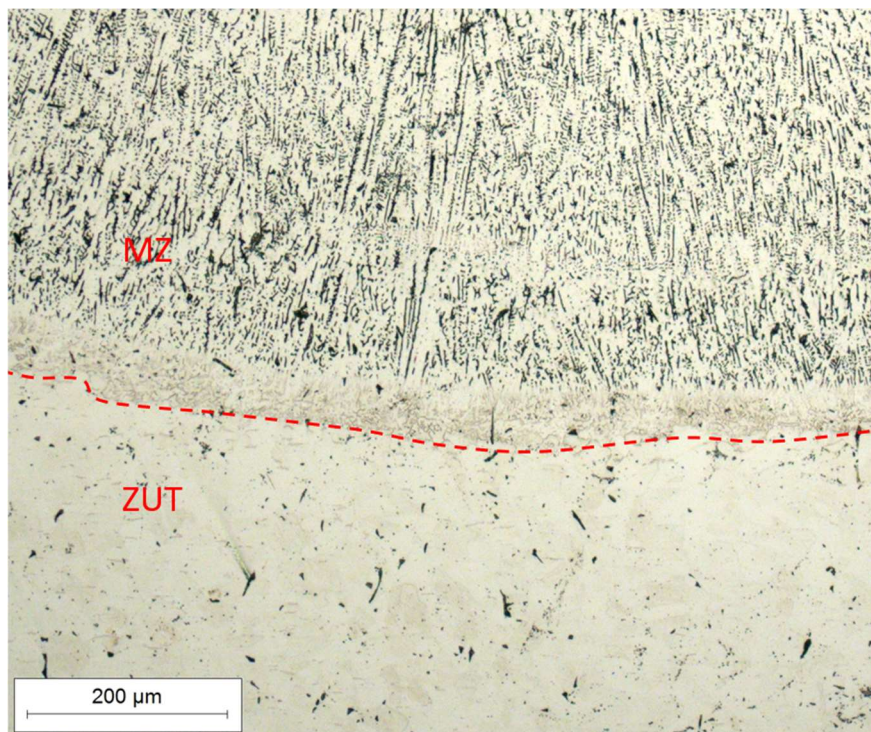
Slika 56. Mikrostruktura uzorka 1



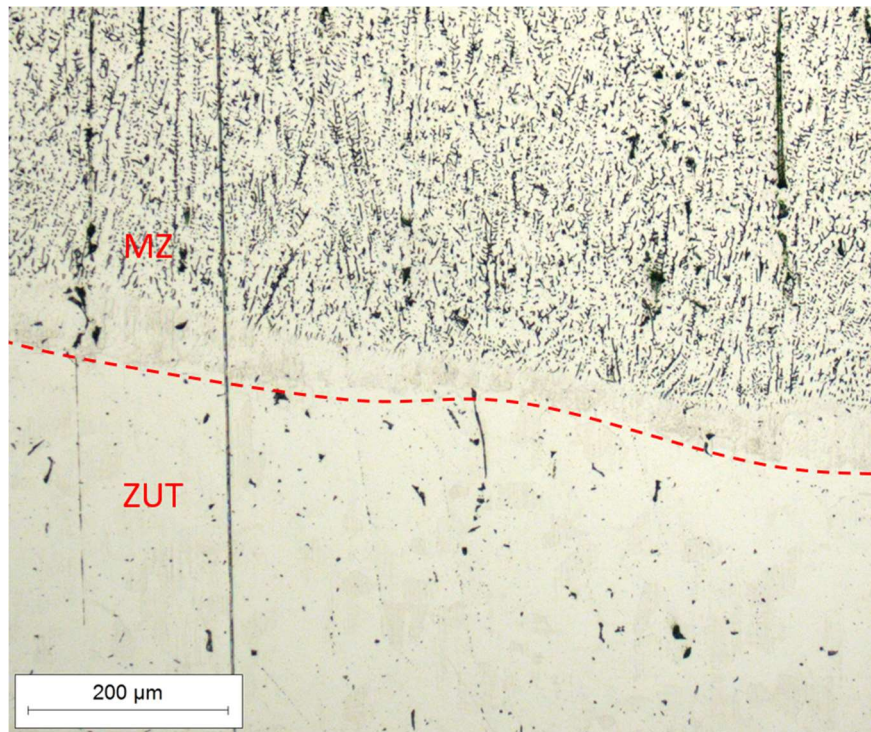
Slika 57. Mikrostruktura uzorka 2



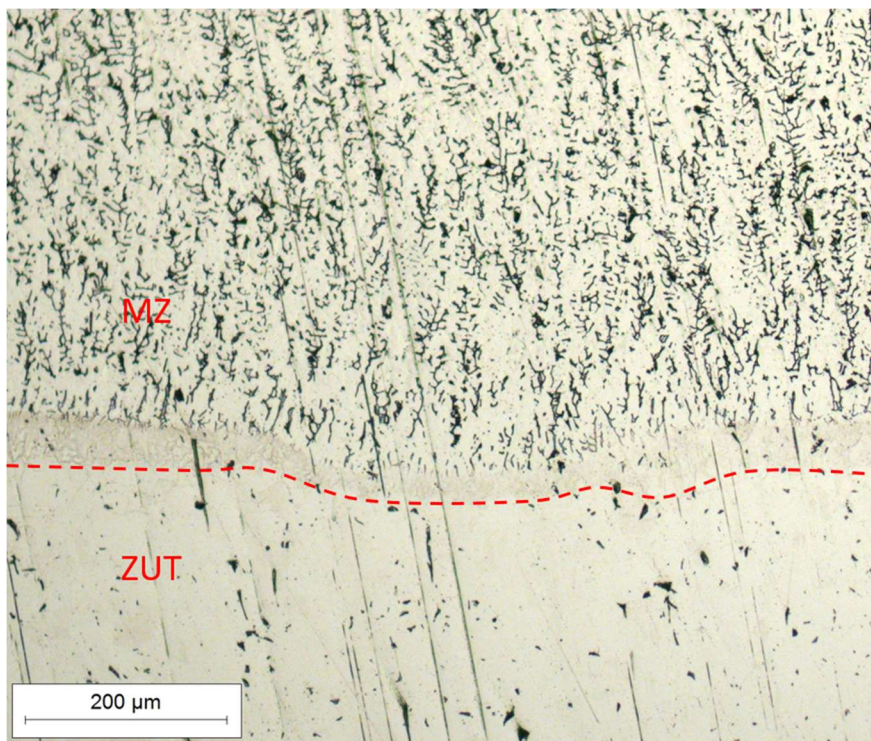
Slika 58. Mikrostruktura uzorka 3



Slika 59. Mikrostruktura uzorka 4



Slika 60. Mikrostruktura uzorka 5



Slika 61. Mikrostruktura uzorka 6

Na određenim fotografijama mikrostrukture vidljive su duge paralelne ravne linije, izražene kod uzorka 6, koje ne predstavljaju mikrostrukturne značajke, već su uzrok ne dovoljnog poliranja. Metal zavara svih uzoraka u mikrostrukтури sadrži faze austenit (bijelo) i  $\delta$ -ferit (crno). Na slikama se vidi jasna razlika mikrostrukture metala zavara i osnovnog materijala. Slika mikrostrukture uzorka 3 ima bolju razlučivost od ostalih slika uzoraka. Na ostalim slikama mikrostrukture teško je razlučiti veličinu ZUT-a. Međutim, vidljivo je da je ZUT uzorka 1 najveći. ZUT uzorka 3 je manji od ZUT-a uzorka 1, prema tome pretpostavka je da i ostali uzorci 2, 4, 5 i 6 imaju manji ZUT od uzorka 1. Kod svih uzoraka došlo je do povećanja zrna u mikrostrukтури ZUT-a. Duž područja ZUT-a uzorka 1 izražene su granice zrna, dok kod ostalih uzoraka nisu. Pojavili su se karbidi po granicama zrna u ZUT-u uzorka 1 zbog većeg unosa topline u odnosu na ostale uzorke.



## 8. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu su opisane vrste visokolegiranih čelika, zavarljivost i postupci zavarivanja visokolegiranih čelika. Objašnjene su posljedice zavarivanja na mikrostrukturu austenitnih Cr-Ni čelika. Detaljno je obrađen princip AC MIG postupka zavarivanja. U radu je provedeno MIG/MAG zavarivanje uz primjenu istosmjerne i izmjenične struje. Kutni spojevi su zavareni uz primjenu automata sa svrhom postizanja konstantne brzine zavarivanja i uklanjanja pogreške zavarivača. Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je definirati optimalne parametre zavarivanja za postizanje željene geometrije i mikrostrukture zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada zavareni su limovi debljine 4 mm od materijala 1.4301 (AISI 304) s različitim parametrima zavarivanja kako bi se ustanovio utjecaj parametara na geometriju i mikrostrukturu zavarenog spoja. Promjena parametara zavarivanja utjecala je na geometrijske značajke zavara kako slijedi:

- Uzorak 1 zavaren je primjenom istosmjerne struje, a ostali uzorci primjenom izmjenične struje. Očitana jakost struje za uzorak 1 iznosila je 178 A, a za ostale uzorke 120 A u prosjeku. Matematički izračunat unos topline za uzorak 1 bio je za 50 % veći nego za ostale uzorke. Također, na temelju veličine ZUT-a i geometrijskih značajki zavara može se zaključiti da je unos topline za uzorak 1 bio najveći.
- Uzorak 3 i 4 zavareni su s promjenom balansa polariteta. EN omjer za uzorak 3 iznosio je 25 %, a za uzorak 4 75 %. Manji iznos EN omjera za uzorku 3 rezultirao je dobrom fino zaobljenom penetracijom, dok kod uzorka 4 nije bilo penetracije.
- Uzorak 5 i 6 zavareni su wave pulse metodom s različitom frekvencijom. Frekvencija za uzorak 5 iznosila je 1 Hz, a za uzorak 6 je iznosila 25 Hz. Primjena veće frekvencije za uzorak 6 rezultirala je penetracijom, dok kod uzorka 5 nije bilo penetracije.

Shodno eksperimentu zavar kod uzorka 1 ima najbolji oblik, s najdubljom penetracijom i bez ispupčenja duž površine lica. Međutim, u slučaju zavarivanja limova sa stijenkom debljine 2 mm ili manje dogodilo bi se propaljivanje. Mikrostruktorna analiza pokazala je karbide po granicama zrna u ZUT-u uzorka 1, zavarenog s najvećim unosom topline. Materijal kod kojeg je došlo do pojave karbida po granicama zrna podložan je interkristalnoj koroziji ako je izložen korozijski agresivnom mediju. Iz tog razloga bolje su mikrostrukturne značajke uzorka 2 – 6, zavarenih s

manjim unosom topline, kod kojih nisu vidljivi karbidi po granicama zrna. Nadvišenje zavara koje je prisutno kod uzoraka 2 – 6 povoljno je za slučaj premošćivanja zazora.

Na temelju rezultata očekuje se manji unos topline u materijal primjenom AC MIG postupka u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak. Prema tome, preporuka je primijeniti AC MIG postupak za zavarivanje tankih limova s debljinom stijenke od 2 mm ili manje. Također, je preporuka primijeniti AC MIG postupak za premošćivanje zazora kod većih razmaka ploča, koje nije moguće primjenom konvencionalnog MIG/MAG postupka.

Preporuka za daljnje istraživanje je izložiti uzorke korozijski agresivnom mediju. Izlaganje uzoraka korozijski agresivnom mediju dalo bi bolji uvid u kvalitetu zavarenih spojeva.

## LITERATURA

- [1] Rede, V.: predavanja iz kolegija Posebni metalni materijali, FSB, 2020.
- [2] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Priručnik: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.
- [3] Brumm, S., Bürkner, G.: Gas Metal arc Pulse Welding with Alternating Current for Lightweight Materials, *Materials Today: Proceedings*, 2, 179–187, 2015.
- [4] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, FSB, 2007.
- [5] Bauer, B.: Određivanje kritičnog unosa topline za primjenu korijenske zaštite kod TIG zavarivanja Cr-Ni čelika, Završni rad, FSB, 2021.
- [6] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, 2011.
- [7] Yen, Y., Su, J., Huang, D.: Phase equilibria of the Fe-Cr-Ni ternary systems and interfacial reactions in Fe-Cr alloys with Ni substrate, *Journal of Alloys and Compounds*, 457(1–2), 270–278, 2008.
- [8] Garašić, I.: Zavarljivost osnovna načela, FSB
- [9] Lippold J. C.: *Welding Metallurgy and Weldability*, Ohio State University, 2015.
- [10] Mateša, B., Samardžić, I., Dunđer, M.: Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, Slavonski Brod, 2011.
- [11] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [12] Kumar, N., Pandey, C., Kumar, P.: Dissimilar Welding of Inconel Alloys with Austenitic Stainless-Steel: A Review. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2022.
- [13] Horvat, M., Bilić, M., Kondić, V.: Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, 2013.
- [14] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, 2015.
- [15] Živčić, M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, 1985.
- [16] Garašić, I.: prezentacija MIG/MAG postupak zavarivanja, FSB, 2015.
- [17] Jurica, M.: Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, FSB, 2015.
- [18] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, 1992.
- [19] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, 2014.
- [20] Živčić, M.: Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP, 1986.

- [21] Kondić, Z.: Elektrootporno zavarivanje, Zagreb, 1987.
- [22] Arif, N., Chung, H.: Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(9), 1828–1837, 2014.
- [23] Arif, N., Chung, H.: Alternating current-gas metal arc welding for application to thick plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 75–83, 2015.
- [24] Ternar B.: prezentacija Suvremene naprave za zavarivanje, Lendava, 2007.
- [25] Ikram, A., Chung, H.: The effect of EN ratio and current on microstructural and mechanical properties of weld joined by AC-GMAW on square groove butt joints. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(3), 2017.
- [26] Adamiec, J., Pfeifer, T.: Welding of Aluminium Alloy Thin Sheets Using Variable Polarity MIG Method, *Solid State Phenomena Vol 211*, 15-22, 2013.
- [27] <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304-14301.html> , dostupno 21.11.2022.
- [28] HRN EN ISO 14343:2010, Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, trakaste elektrode, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih čelika i čelika otpornih na visoke temperature – Razredba (ISO 14343:2009; EN ISO 14344:2010)
- [29] [https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWwires-BlueMax-BlueMaxMIG309LSi/c61012.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwires-BlueMax-BlueMaxMIG309LSi/c61012.pdf) , dostupno 21.11.2022.
- [30] <https://otc-daihen.com/?id=3047> , dostupno 21.11.2022.
- [31] HRN EN 1011-1:2009, Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. Dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje

## **PRILOZI**

1. CD-R disc

